



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

## **CURSOS PARA EJECUTIVOS Y DIRECTIVOS**

**- 1995 -**

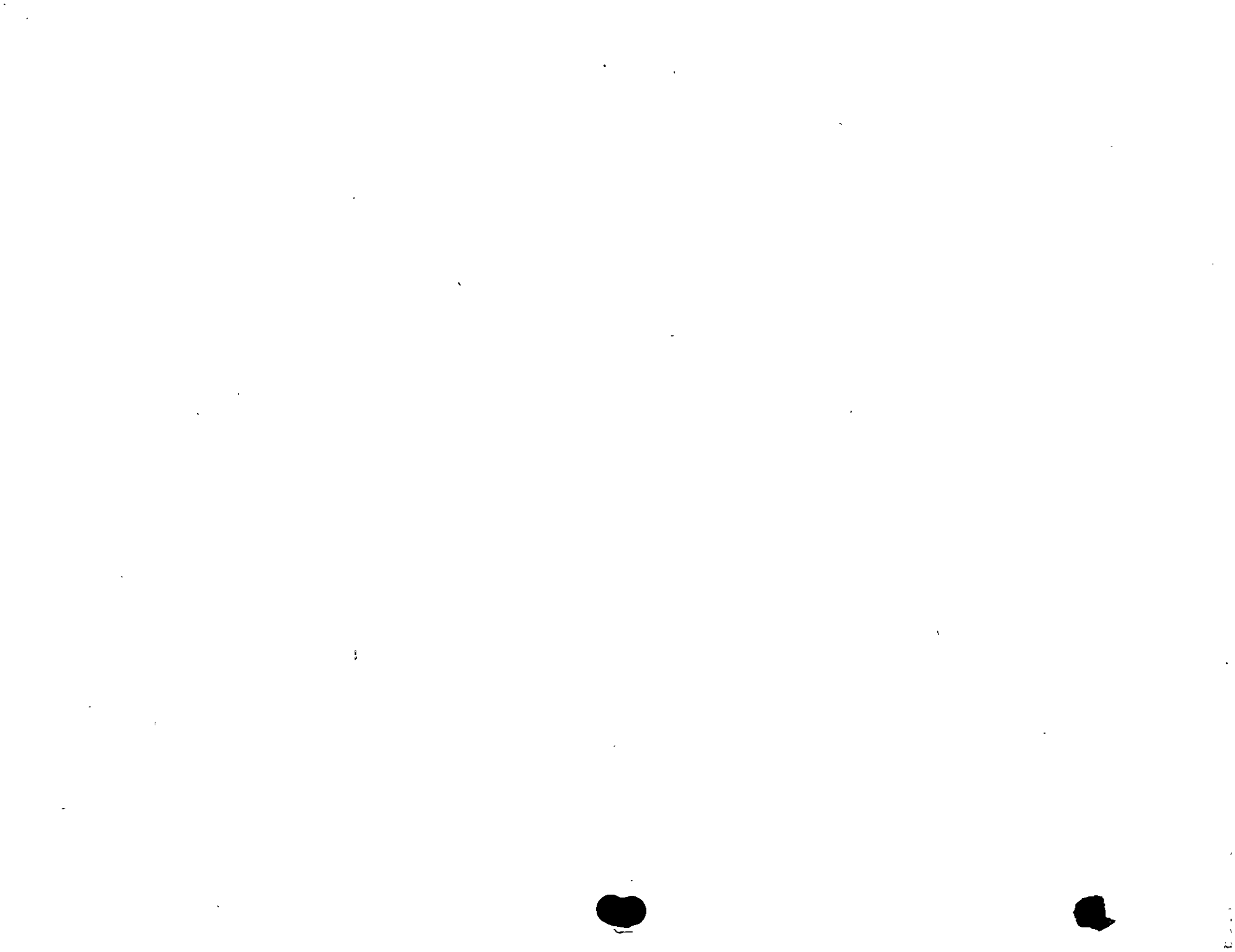
### **TECNICAS DE PLANEACION Y CONTROL DE LA PRODUCCION**

Del 19 al 23 de junio

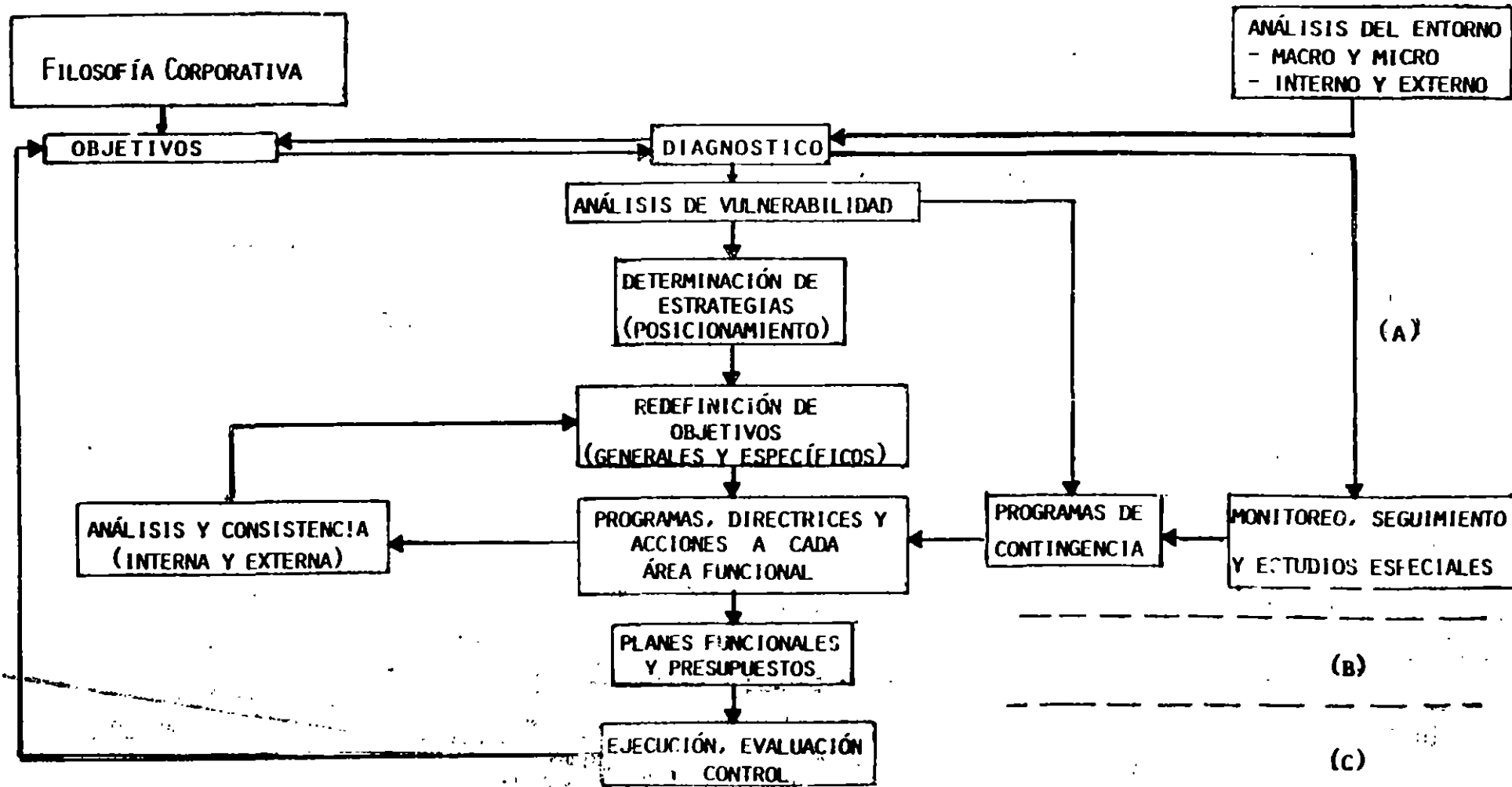
1. Función Productiva
2. Planeación de la Producción
3. Administración de Materiales
4. Control de Producción
5. Sistema de Control de Calidad

**AUTOR: TAWFIK Y CHAUVEL  
TEXTO: ADMINISTRACION DE LA PRODUCCION**

**EXPOSITOR: M. EN I. RUBEN TELLEZ SANCHEZ  
Palacio de Minería  
1995**



# PROCESO DE DIRECCION ESTRATEGICA



(A) FASE ESTRATÉGICA

(B) FASE OPERATIVA

(C) FASE DE IMPLANTACIÓN

## FILOSOFIA CORPORATIVA

CONCEPTO: Es el conjunto de propósitos básicos, misiones y valores personales de los altos directivos, que expresados en términos amplios y generales sirven de guía para determinar objetivos, estrategias y planes: así como para difundir una cultura corporativa al interior de la organización.

### PROPOSITOS:

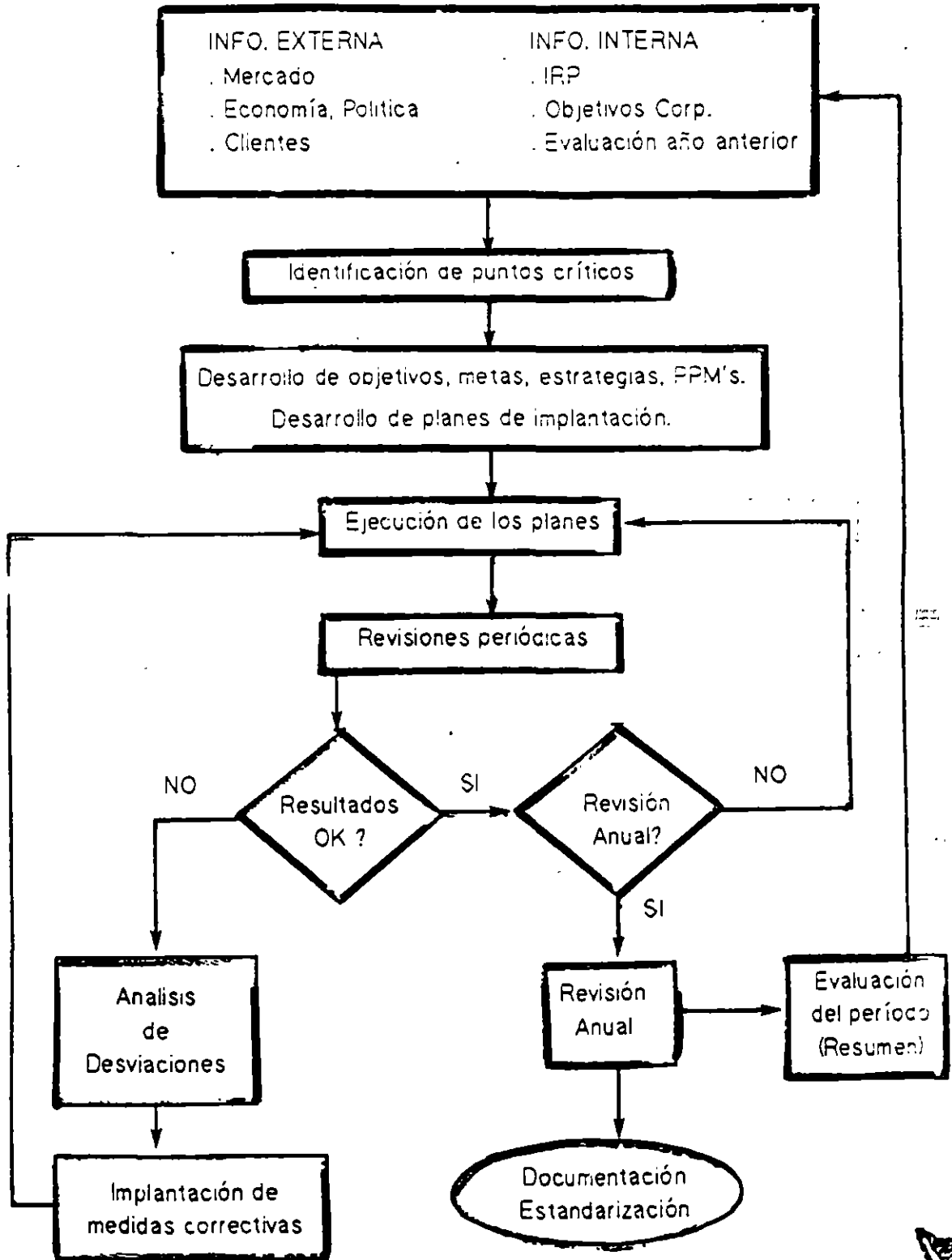
- Generar riqueza para mantener bienestar y crecimiento (rentabilidad).
- Relacionar a la Institución con las demandas de la sociedad (responsabilidad social):
  - Bienestar de la población.
  - Productividad.
  - Distribución del Ingreso.
  - Competitividad externa.
  - Generación de empleos.
  - Descentralización.
  - Contaminación.
  - Desarrollo Tecnológico.
- Lograr la Identificación de los participantes (alta dirección, gerencia media, trabajadores) con los propósitos trascendentales de la empresa.
- Alcanzar mayor cohesión interna, por medio de la identificación con valores comunes (estructura intangible).
- Promover una vocación de servicio al cliente, mejorando su interacción con su entorno inmediato (atención más allá de una simple relación comercial).
- Servir como marco general de referencia para el establecimiento de los objetivos de la empresa.

### ELEMENTOS:

- MISION: Propósito básico que ilustra la razón de existir de la empresa
- CODIGOS ETICOS: Ilustra valores corporativos como medios para alcanzar la misión. Actitudes que normarán comportamiento del personal.
- OBJETIVOS DE ORDEN SUPERIOR: Definición de lo que se debe alcanzar en el horizonte de planeación. Estructura simple.

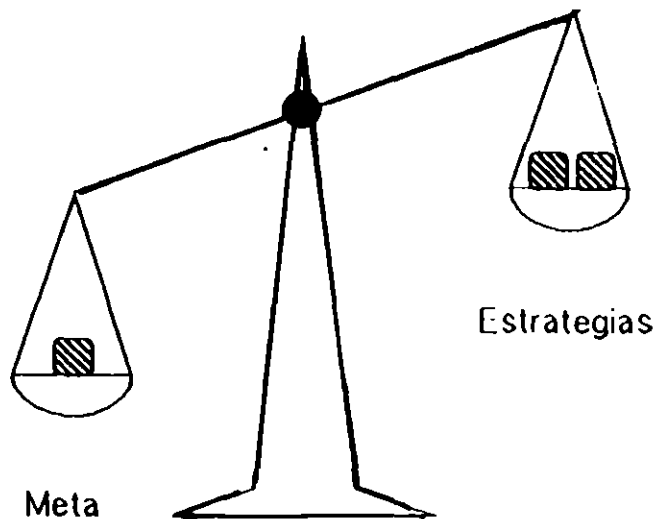


# PROCESO DE APLICACION DE HOSHIN

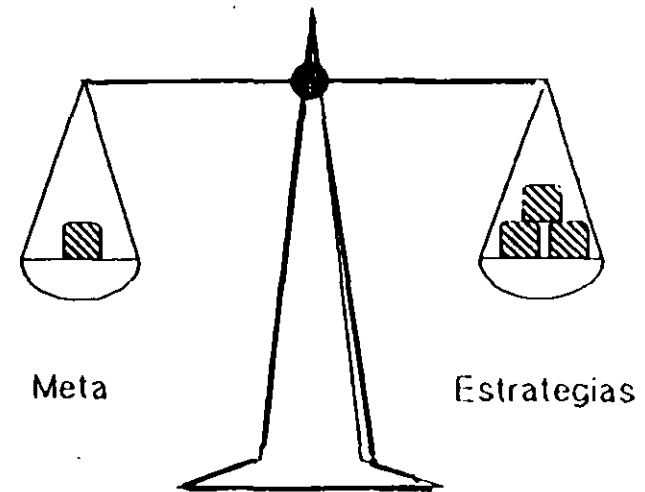


## BALANCE ENTRE METAS Y ESTRATEGIAS

¿La ejecución correcta de todas las estrategias asegura el cumplimiento de la meta?



Estrategias inconsistentes y/o  
inapropiadas para la meta.



Estrategias consistentes y/o  
apropiadas para la meta.

# 7

## Arreglo de las instalaciones y manutención

### OBJETIVOS

Después de haber estudiado este capítulo, el lector deberá ser capaz de:

- definir las características de los tres tipos de arreglo físico de las instalaciones;
- aplicar las técnicas de arreglo físico de las instalaciones;
- proponer un arreglo físico de instalaciones y evaluar su costo;
- definir los cinco principios generales de la manutención y los materiales;
- hacer el análisis económico de la elección del equipo de manutención.

### TERMINOLOGIA

arreglo físico por puesto fijo  
arreglo físico por procedimiento  
arreglo físico por producto  
equilibrio de líneas de ensamble

## INTRODUCCION

El arreglo físico de los locales consiste en la disposición de los recursos materiales y humanos en forma tal que se permita a la empresa alcanzar un volumen dado de producción a un costo mínimo. Esta es una etapa importante en la concepción del sistema de producción, puesto que el grado de eficacia y rendimiento de la empresa dependen de ella. El medio físico de trabajo y la distribución de sus instalaciones condiciona la productividad de la mano de obra. Es por esta causa que la motivación por el trabajo disminuirá en un local mal ventilado o mal distribuido.

Si se calcula el costo del tiempo de desplazamiento de los empleados a los puestos de trabajo, el del tiempo perdido por un empleado que se encuentre buscando una herramienta mal colocada, las consecuencias de los cuellos de botella, el costo de los espacios mal utilizados, el de los accidentes de trabajo motivados por una mala distribución de las instalaciones y las pérdidas causadas por la disminución de la productividad, se verá que ciertamente es rentable dedicar esfuerzos serios a un buen plan de distribución física de las instalaciones.

A continuación examinaremos los tipos de arreglo físico de instalaciones y algunos métodos de análisis del arreglo físico de las instalaciones de un sistema de producción.

## TIPOS DE ARREGLO FISICO DE INSTALACIONES

Existen tres tipos clásicos de arreglo físico de instalaciones: por puesto fijo, por procedimiento y por producto. En un sistema de producción puede distinguirse uno de estos tipos, pero en la mayoría de los casos se hace una combinación de los tres. Cada uno tiene sus características, sus ventajas y sus inconvenientes.

a) **Arreglo físico por puesto fijo.** En este caso el producto está fijo al puesto de trabajo; la mano de obra, las materias primas y las herramientas se desplazan hacia él. Este tipo de distribución física es conveniente para los productos que tienen ciertas particularidades en cuanto a volumen, peso o modo de producción. La construcción naval y la civil, la aeronáutica y la artesanía tienen una distribución por puesto fijo.

b) **Arreglo físico por procedimiento.** El reagrupamiento de las máquinas y los equipos está en este caso en función de sus características técnicas. El producto se desplaza de un taller a otro según las etapas del proceso de fabricación (fig. 7-1). En la producción por pedido y los hospitales se utiliza este tipo de distribución física.

c) **Arreglo físico por producto.** Las máquinas y los equipos están dispuestos en este caso en el orden exacto del proceso de fabricación, y los puestos de trabajo se encuentran físicamente distribuidos en función de un producto o de una categoría de productos que tengan las mismas características técnicas.

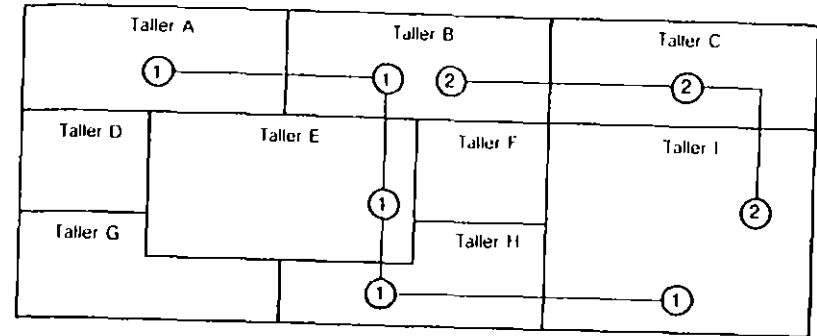


Fig. 7-1  
Arreglo físico por procedimiento

Las líneas de montaje son un ejemplo de distribución física por producto (fig. 7-2).

Existen otras distribuciones físicas cuyas características varían según los objetivos de la empresa, como la distribución física para escaparates y aparadores, para almacenar y para los trabajos de gran envergadura (construcción de carreteras, presas, etc.).

## MANUTENCION Y TRANSPORTE DE LOS MATERIALES

Para la mayoría de las empresas, la manutención y el transporte de los materiales representan un porcentaje importante de los costos de producción, el cual se sitúa entre un 20% y un 30% de la masa salarial obrera. Es difícil evaluar con precisión el costo real de la manutención en un sistema productivo, puesto que casi todos los empleados hacen cada vez más de la manutención su tarea principal. El cálculo del tiempo de manutención para cada empleado es una operación costosa, lo cual provoca que las empresas desistan de realizar tal estudio.

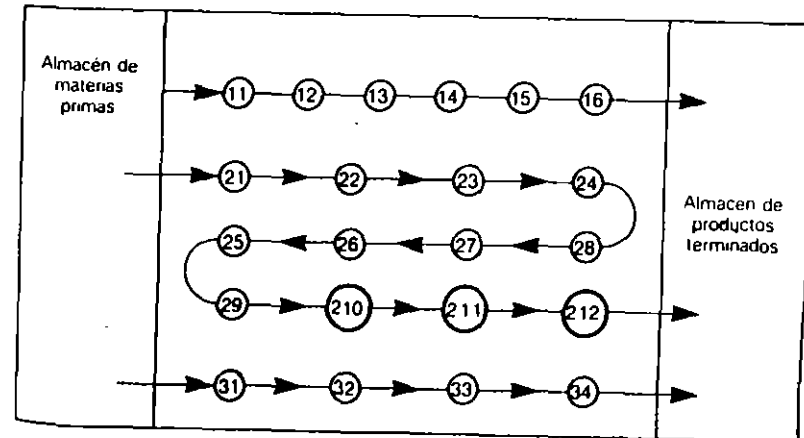


Fig. 7-2  
Arreglo físico por producto

Como la mantención y el transporte son actividades que no transforman el producto y no añaden nada a su valor intrínseco, se encuentran entre las pocas actividades que podrían, teóricamente, ser eliminadas. Por tanto, es necesario estudiar adecuadamente el sistema de mantención a fin de adaptarlo perfectamente al proceso de fabricación y reducir sus costos al mínimo.

En la figura 7-3 se muestran los diferentes puntos de mantención y de transporte de los materiales dentro de un sistema de producción industrial

### CLASIFICACION DE LOS EQUIPOS DE TRANSPORTE Y DE MANUTENCION

Los equipos pueden clasificarse en dos categorías: equipos fijos y equipos móviles. Los equipos fijos permiten sólo una trayectoria determinada. Este es un modo de desplazamiento de naturaleza rígida. Los equipos móviles permiten trayectorias variables y constituyen un medio de transporte de naturaleza flexible.

Los equipos fijos se utilizan en las siguientes condiciones:

- El trayecto de los materiales es fijo
- Las líneas de producción son estables.
- El volumen de producción es constante.
- La frecuencia de desplazamiento es elevada.

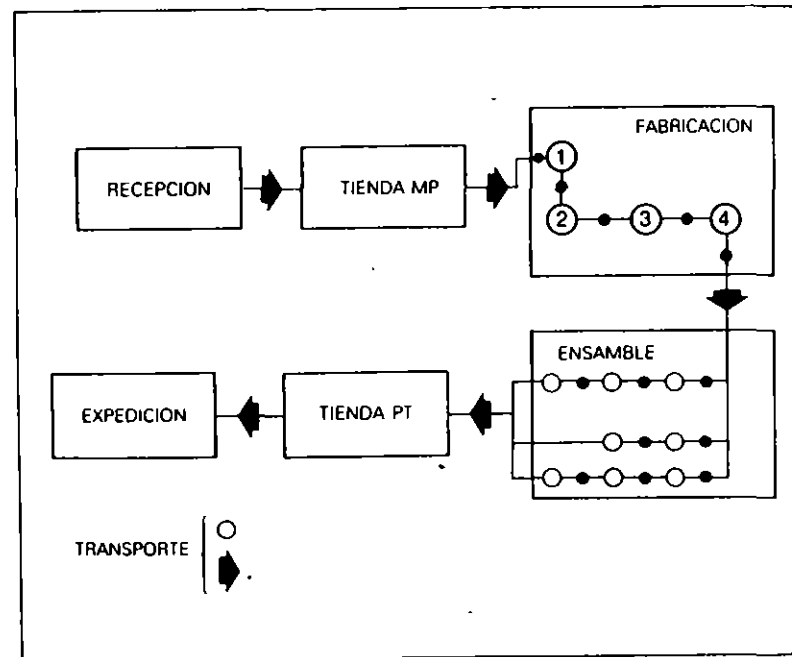


Fig 7-3  
Punto de  
mantención y de  
transporte en un  
sistema  
productivo

Los equipos móviles se utilizan en distancias cortas y variables. Para volúmenes de producción bajos, los equipos móviles son menos costosos que los fijos.

### ELECCION DE UN EQUIPO

El análisis de la elección de un equipo de transporte y de mantención se basa en los tres siguientes aspectos:

- tipo de servicio que convenga más, desde el punto de vista técnico, a la situación que se analiza;
- número de aparatos de mantención,
- análisis económico.

El primer aspecto obliga al analista a conocer todos los equipos de mantención disponibles y sus características. Por características se entienden los siguientes elementos: dimensiones, capacidad, límites de utilización, confiabilidad y costos de operación. También es necesario que el analista conozca las características del producto que deba desplazarse: volumen, peso, fragilidad, secuencia de fabricación y distancia de desplazamiento.

El segundo aspecto depende del volumen de los productos por desplazar, la frecuencia y la velocidad de desplazamiento. Se necesita un estudio de tiempos para determinar el número de aparatos de mantención.

El análisis económico constituye el tercer aspecto de la elección definitiva. Este análisis es necesario cuando el volumen de los productos que se deban desplazar sea bastante importante. Es de esta forma como se podrán realizar ahorros.

### ANALISIS ECONOMICO

A fin de proceder al análisis de los costos, debe determinarse el tiempo necesario para la mantención y para el transporte del material. Este tiempo puede dividirse en cuatro elementos:

- tiempo de carga,
- tiempo de desplazamiento,
- tiempo de espera,
- tiempo de descarga (incluyendo el tiempo de regreso).

Cada tipo de equipo se relaciona con uno o varios de estos elementos. Por ejemplo, los convoyadores no tienen tiempo de retorno (cuando regresan vacíos a su lugar de origen), como sucede con los tractores.

Una vez que estos elementos han sido determinados para cada tipo de equipo, deben calcularse los costos fijos y variables, y posteriormente debe procederse al análisis del punto de preferencia (fig 7-4).

*Ejemplo:* Deseamos transportar una distancia de 50 m una serie de cajas, cada una de las cuales pesa 10 kg. El volumen anual de producción es de

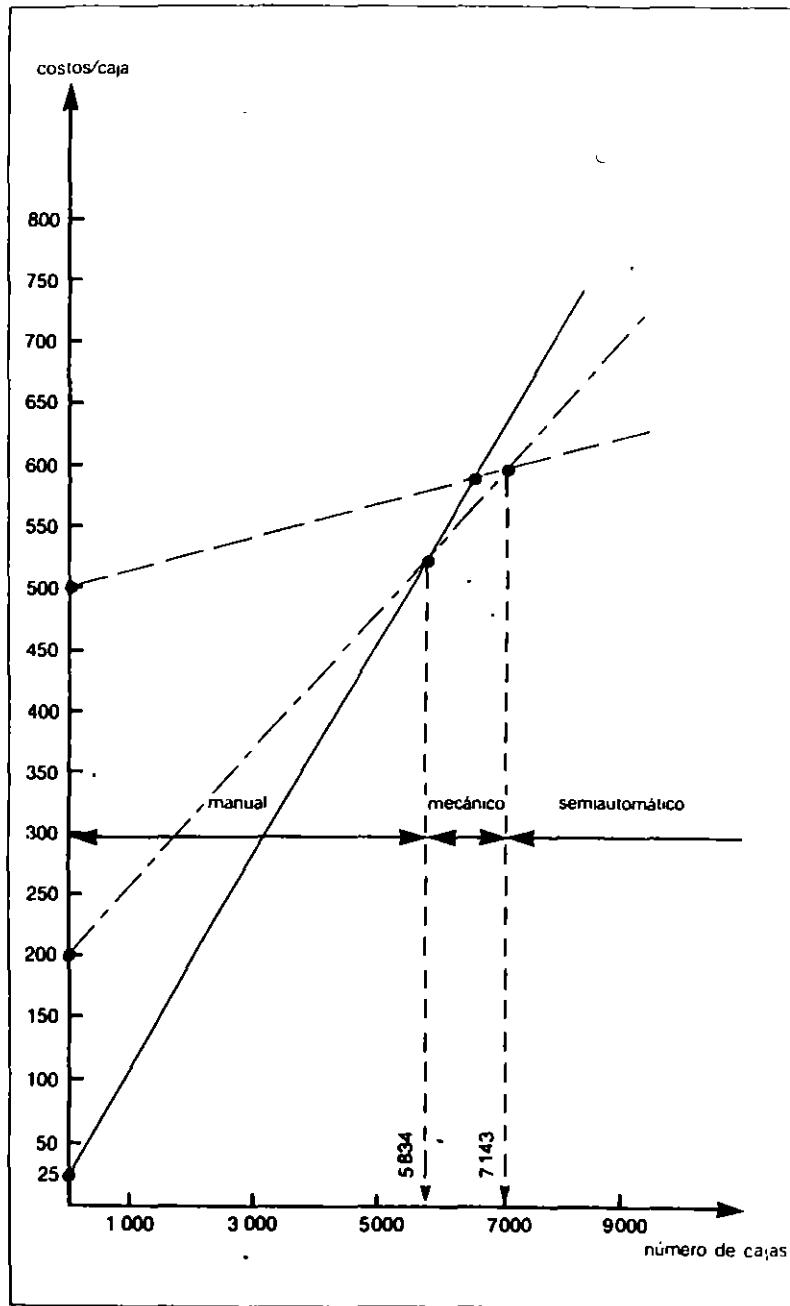


Fig. 7-4  
Análisis del punto de preferencia para los tres tipos de equipo

10 000 cajas. Entre las posibilidades que permiten realizar este trabajo, hemos seleccionado las tres siguientes:

- transporte manual por una persona que empuje un carro de cuatro ruedas o tire de él,
- transporte mecánico con un montacargas,
- transporte semiautomático con un convoyador

**Soluciones:**

**1o. Transporte manual**

Hagamos las siguientes hipótesis: la capacidad de carga del carro es de 50 kg; es decir, de 5 cajas por desplazamiento, el tiempo de carga o de descarga es de 30 segundos por caja; la velocidad promedio de desplazamiento es de 50 m/minuto; la tarifa es de \$ 4.80 por turno; el costo de compra del carro es de \$ 125, amortizable en cinco años.

En nuestros cálculos no consideraremos el cambio del valor del dinero a través del tiempo

Costo fijo anual por caja	$\frac{125}{5} = \$ 25$
Costos variables por caja	
— carga:	$\frac{4.80 \times 30}{3600} = \$ 0.04$
— desplazamiento (ida y vuelta) de 2 minutos.	$\frac{4.80 \times 2}{60 \times 5} = \$ 0.032$
— descarga:	$\frac{4.80 \times 30}{3600} = \$ 0.40$
<b>Total de los costos variables</b>	<b>\$ 0.112 por caja</b>

**2o. Transporte mecánico**

Hagamos las hipótesis siguientes: la capacidad de carga del montacargas es de 200 kg, es decir 20 cajas, el tiempo de carga o descarga de las cajas sobre las paletas del montacargas es de 30 segundos; la velocidad de desplazamiento es de 200 m/minuto; el costo del montacargas es de \$ 4 000, amortizable en 20 años.

Costo fijo anual por caja:	$\frac{4\ 000}{20} = \$ 200$
Costos variables por caja.	
— carga	\$ 0.04
— desplazamiento de 30 segundos:	$\frac{4.80 \times 30}{3600 \times 20} = \$ 0.002$
— descarga:	0.04
<b>Total de los costos variables</b>	<b>\$ 0.082 por caja</b>

### 3o Transporte semiautomático

Para el empleo de un convoyador se necesitarán instalaciones de \$ 10 000, amortizables en 20 años. La velocidad de desplazamiento es de 350 m/minuto. El tiempo de carga o descarga es de 15 segundos por caja.

$$\text{Costo fijo anual por caja: } \frac{10\,000}{20} = \$ 500$$

Costos variables por caja:

$$\text{— carga: } \frac{4.80 \times 15}{3\,600} = \$ 0.02$$

$$\text{— descarga: } \frac{4.80 \times 15}{3\,600} = \$ 0.02$$

Total de los costos variables: \$ 0.04 por caja

El costo de desplazamiento por empleados se ha eliminado. Puede notarse en la figura 7-4 que el equipo manual es económico cuando el volumen de producción es inferior a 5 834 unidades. Para un intervalo de entre 5 834 y 7 143 unidades, el equipo mecánico resulta ser el más económico. Más allá de 7 143 unidades, la elección más económica será la del equipo semiautomático.

## PRINCIPIOS GENERALES DE MANUTENCION

Resolver todos los problemas de manutención es difícil, y a veces imposible. Cada empresa se enfrenta a problemas y situaciones diferentes. Puede ocurrir que dos empresas que fabriquen un producto idéntico utilicen procesos de manutención diferentes.

Por este motivo se da gran importancia a los principios generales de manutención, en virtud de la reducción de los costos de transporte y del tiempo de maniobras.

- 1er. principio: Identificar y clasificar los diferentes materiales y productos.
- 2o. principio: Transportar el material la distancia más pequeña posible (movimiento en línea recta de ser posible).
- 3er. principio: Reducir el tiempo de detención o de no utilización del equipo al mínimo.
- 4o. principio: Eliminar las cargas parciales.
- 5o. principio: Reemplazar la manipulación o la manutención manual por métodos mecánicos o automáticos de ser posible.

## MÉTODOS DE ANÁLISIS DEL ARREGLO FÍSICO DE LAS INSTALACIONES

Estos métodos se han elaborado en función de las características particulares de un sistema productivo. Por tal motivo se encuentran métodos de análisis por procedimiento, por producto o por puesto fijo para el arreglo físico

de las instalaciones. Los dos principales métodos de análisis que estudiaremos son el método de análisis de los recorridos, el cual se utiliza en el estudio del arreglo físico por procedimiento, y el método de equilibrio de líneas de ensamble, que se utiliza en el estudio del arreglo físico por producto.

Varios de estos métodos son actualmente programables por computadora, y resultan útiles para el análisis de los problemas de arreglo físico de gran envergadura. Entre estos programas se encuentra el CRAFT ("Computerized Relative Allocation of Facilities Technics") para el análisis y la evaluación de los planes de arreglo físico. Este programa ejecuta las siguientes funciones:

- determinación de la mejor localización respecto a los diferentes talleres dentro de un nuevo edificio,
- análisis de las distribuciones físicas de reemplazo,
- análisis de la centralización o descentralización de ciertos servicios (recepción, expedición, mantenimiento, tiendas, etc.),
- determinación de la mejor localización de un edificio con respecto a un conjunto de edificios, así como de las actividades que deban desempeñarse en él.

## METODO DE ANÁLISIS SECUENCIAL DE LOS RECORRIDOS

Este método se utiliza para encontrar las mejores posiciones respecto de diferentes elementos dentro de un espacio determinado. Estas posiciones son aquellas que reducen la distancia total de desplazamiento de la mano de obra y el material. En dicho método se utilizan la *matriz de recorridos* y la *gráfica de rutas*. Este método es aplicable en el arreglo físico por procedimiento. A continuación describimos sus principales etapas mediante un ejemplo.

Una fábrica de muebles produce muebles de dormitorio (A) y de cocina (B). Estas dos categorías de productos se elaboran en nueve talleres diferentes. Se vende un promedio de 1 500 mobiliarios A y 2 000 mobiliarios B. La frecuencia de los desplazamientos para la fabricación de cada mobiliario se presenta en la figura 7-5.

### 1a. etapa: Elaboración de la matriz de recorridos

A partir de los datos tabulados en la figura 7-5 es posible elaborar la matriz de recorridos (fig. 7-6). Se calculan los desplazamientos entre dos talleres y se inscriben en la casilla adecuada. Por ejemplo, el número de desplazamientos del taller ① al taller ② es de 1 500 para el producto A y de 2 000 para el producto B. El total de los desplazamientos de ① a ② es por tanto de 3 500. Se repiten los mismos cálculos para cada casilla que se relacione con un desplazamiento.

### 2a. etapa: Elaboración de un arreglo físico esquemático

Puede elaborarse un primer arreglo físico de naturaleza esquemática después de hacer un análisis de los datos de la matriz de recorridos (fig. 7-6). Este análisis puede dividirse en tres partes:

donde E es la eficacia medida en porcentaje

D es la suma de los desplazamientos dentro del arreglo físico ideal,  
d es la suma de los desplazamientos dentro del arreglo físico real.

El total ideal de desplazamientos es igual a la suma de las dimensiones de la matriz de recorridos (152 000) Aquí se ha considerado que todos los talleres son contiguos (cuando en realidad se encuentran a cierta distancia entre sí).

Para calcular el total de los desplazamientos reales es necesario:

1. determinar la distancia que separa a cada centro de taller de los demás (puede considerarse que la distancia de separación entre dos talleres adyacentes corresponde a una unidad de longitud);
2. multiplicar, para cada vínculo entre dos talleres, los desplazamientos por su longitud;
3. sumar los productos así obtenidos.

Los resultados del cálculo de la eficacia de la distribución física global de la figura 7-11 se presentan en la figura 7-12

A partir de la tabla de la figura 7-12 es posible estudiar las posibilidades de acercar los talleres que tengan un número elevado de desplazamientos y que estén separados por tres unidades de longitud, por ejemplo ⑥—⑦ y ④—⑥

## METODO DE EQUILIBRIO DE LAS LINEAS DE ENSAMBLE

En la fabricación en serie, las operaciones son ejecutadas por los obreros que integran un puesto de trabajo el cual forma parte de una línea de ensamble. A fin de evitar los embotellamientos, es necesario que el tiempo de ensamble de todos los puestos de trabajo sea el mismo. El número de operaciones asignadas a cada puesto de trabajo estará en función del tiempo de ejecución de cada operación. Por ejemplo, si se desea que la tasa de producción sea de 40 unidades por hora, el tiempo de ensamble de cada puesto de trabajo deberá ser igual a:

$$60 \div 40 = 1.5 \text{ minutos por puesto de trabajo}$$

Por tanto, las operaciones deben organizarse de modo que el tiempo total de las maniobras realizadas en cada puesto sea igual o inferior a 1.5 minutos. De este modo no habrá ya tiempo improductivo; el rendimiento de la línea de ensamble sería óptimo si el tiempo de producción de cada puesto fuera exactamente de 1.5 minutos. El tiempo de ejecución de cada operación es sin embargo diferente, y la cronología de las operaciones impuesta por el proceso de ensamble a menudo impide en la práctica el logro de este objetivo.

Teniendo en cuenta las condiciones iniciales (número de unidades por hora, número máximo de puestos de trabajo, dimensiones de cada puesto), el método de equilibrio consiste en repartir las operaciones en forma tal que la coordinación de los puestos de trabajo conduzca a una eficacia máxima de la línea de ensamble.

Existen varios métodos de equilibrio de líneas de ensamble. Estudiemos el desarrollado por T.R. Hoffman, cuyas etapas se resumen como sigue

Vínculo	Longitud	Número de desplazamientos	Total de desplazamientos	Observaciones
(1)	(2)	(3)	(4) = (2) x (3)	
① — ②	1	3 500	3 500	
② — ③	1	8 500	8 500	
② — ④	1	13 500	13 500	
③ — ②	1	12 500	12 500	
③ — ③	1	3 500	3 500	
④ — ③	1	6 500	6 500	
④ — ④	1	5 000	5 000	
⑤ — ⑤	1	8 500	8 500	
⑥ — ①	1	9 000	9 000	
⑥ — ⑥	1	5 000	5 000	
⑥ — ⑦	1	8 500	8 500	
⑦ — ⑦	1	5 500	5 500	
⑦ — ⑧	1	11 000	11 000	
⑧ — ⑧	1	13 500	13 500	114 000
① — ③	2	3 500	7 000	
① — ④	2	3 500	7 000	
③ — ⑧	2	3 500	7 000	
④ — ⑥	2	8 000	16 000	
⑥ — ⑦	2	11 000	22 000	59 000
① — ④	3	3 500	10 500	
④ — ⑧	3	5 000	15 000	25 500
$E = \frac{152\ 000}{198\ 500} \times 100 = 76.57\%$				198 500

Fig 7-12  
Cálculo de la eficacia de un arreglo físico

1. Representar gráficamente la interdependencia de las operaciones de ensamble del producto (fig 7-13)
2. Determinar el tiempo cíclico de cada puesto de trabajo con la ayuda de la fórmula

$$\text{Tiempo cíclico} = \frac{1 \text{ hora (o 60 minutos)}}{\text{tasa de producción}}$$

3. Determinar el número teórico de puestos de trabajo, dividiendo el tiempo total de las operaciones entre el tiempo cíclico
4. Elaborar la matriz de los precedentes inmediatos (fig 7-14). El número de columnas y de hileras de esta matriz corresponde al número de operaciones necesarias para la elaboración del producto. En cada casilla, se indica la cifra 1 si la operación de la hilera precede inmediatamente a la operación de la columna. Por ejemplo, la operación ① precede inmediatamente a las operaciones ② y ③; por tanto se inscribe la cifra 1 en las columnas ② y ③ de la hilera ①. Ello significa que las operaciones ② y ③ no pueden realizarse sino hasta después de la operación ①.



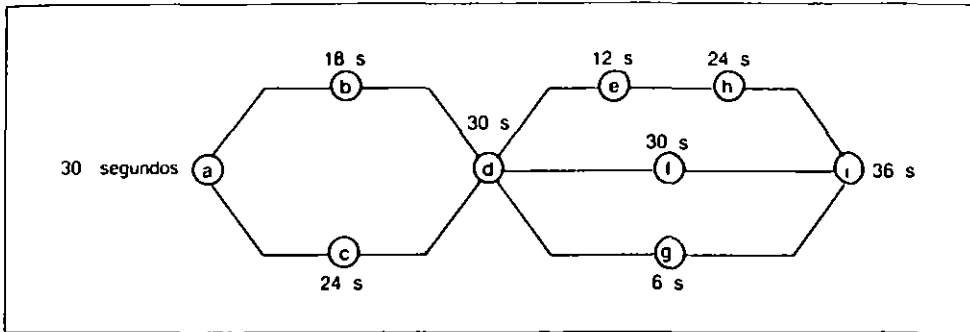


Fig 7-13  
Interdependencia de las operaciones

- Añadir las unidades de cada columna de la matriz de precedentes para formar la hilera 1 (fig. 7-14)
- La cifra 0 de la hilera indica que la operación se encuentra liberada de toda operación precedente, de modo que puede asignarse esta operación a un puesto de trabajo. Si dos o más ceros aparecen en la hilera se asigna la operación que tenga la duración más prolongada, con la condición de que el tiempo disponible en el puesto de trabajo así lo permita. De este modo, la operación @ será asignada al puesto A (fig. 7-15).
- Una vez que la operación ha sido asignada a un puesto de trabajo, se restan las cifras de su hilera a las de la última hilera para formar una nueva. Se vuelve a emprender la etapa 6, y los cálculos se continúan hasta que la matriz termine
- Hacer una síntesis en forma de tabla (fig. 7-15).
- Calcular la eficacia de los puestos de trabajo con ayuda de la fórmula

$$\text{Eficacia} = \frac{\text{suma de los tiempos de utilización de cada puesto}}{\text{número de puestos} \times \text{tiempo cíclico}}$$

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
a	D								
b		D							
c			D						
d				D					
e					D				
f						D			
g							D		
h								D	
i									D

Hilera	1	0	1	1	2	1	1	1	3	Yes
Hilera	2	-D	0	0	2	1	1	1	3	Yes
Hilera	3	-D	0	D	1	1	1	1	3	Yes

Hilera	4	-D	-D	-D	0	1	1	1	3	Yes
Hilera	5	-D	-D	-D	-D	0	0	0	1	3
Hilera	6	0	-D	-D	-D	0	0	0	1	2

Hilera	7	-D	-D	-D	-D	-D	0	0	0	2	Yes
Hilera	8	0	-D	-D	-D	-D	0	0	0	1	Yes
Hilera	9	-D	-D	-D	-D	-D	-D	-D	-D	0	Yes

Fig 7-14  
Matriz de precedentes inmediatos.

Puesto	Elementos	Tiempo necesario para cada elemento	Tiempo acumulativo
A	1	30	30
	3	24	54
	2	18	72
B	4	30	30
	6	30	60
	5	12	72
C	8	24	24
	7	6	30
	9	36	66

Fig 7-15  
Tabla de repartición de las operaciones

## RESUMEN

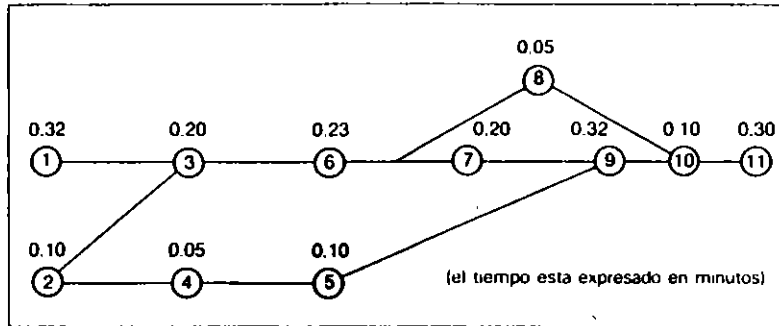
Se distinguen tres tipos de arreglo físico por procedimiento, por producto y por puesto fijo. El arreglo físico varía de un sistema de producción a otro según el tipo de procedimiento y el volumen de producción. Se trata en este caso de arreglar los equipos en forma tal que se reduzcan los costos de desplazamiento de los materiales y de los empleados. El análisis secuencial de los recorridos y el equilibrio de las líneas de ensamble son métodos que permiten encontrar una solución satisfactoria para los problemas de arreglo físico.

En cuanto a los equipos de mantenimiento, pueden distinguirse dos tipos: los equipos fijos y los equipos móviles. Cada uno de estos tipos se utiliza en condiciones particulares. Es necesario el análisis técnico y económico de los equipos de mantenimiento para hacer una elección racional.

## Preguntas

- Diga en qué condiciones es recomendable utilizar el arreglo físico de las instalaciones:
  - por procedimiento,
  - por producto,
  - por puesto fijo.
- ¿Cuál es la información necesaria para un análisis del arreglo físico de las instalaciones?
- ¿Cuáles son las principales etapas del método de análisis secuencial de recorridos?
- Dé algunos ejemplos de industrias en las que se utilice el método de equilibrio de líneas de ensamble.
- ¿Cómo se utiliza el método de equilibrio de líneas de ensamble en el arreglo físico de las instalaciones?
- ¿Pueden disociarse el análisis del arreglo físico de las instalaciones y el de la mantención de los materiales? En caso negativo, ¿por qué?

Fig 7-16  
Interdependencia  
de las  
operaciones para  
el producto A.

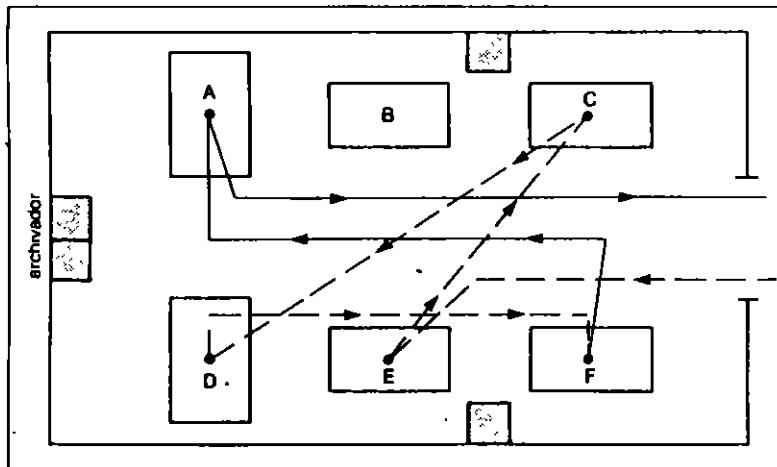


7. Describa el sistema de análisis del arreglo físico de las instalaciones.
8. Haga una lista de equipos de mantenimiento y clasifiquelos según sus propios criterios.

## Ejercicios prácticos

1. En la figura 7-16 se ilustra la interdependencia de las operaciones de ensamble para el producto A. Con el objeto de obtener una tasa de producción de 60 unidades por hora, calcule:
  - a) el tiempo ciclico de la cadena de ensamble,
  - b) el número de puestos de trabajo,
  - c) la eficacia de los puestos de trabajo.

Fig 7-17  
Distribución  
física actual del  
departamento de  
pedidos

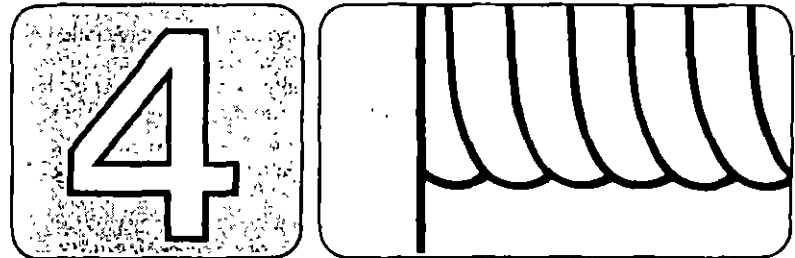


2. En la figura 7-17 se ilustra el arreglo físico de una oficina de pedidos. El proceso de tratamiento de los pedidos se representa por la línea punteada. Se desea revisar la distribución física actual a fin de reducir la distancia recorrida por cada pedido.

## BIBLIOGRAFIA

1. Immer, J.R., *Materials Handling*, McGraw-Hill, New York, 1953
2. Moore, M. et A. Ogus, *Les appareils de maintenance*, Paris, Entreprise moderne d'édition, 1973
3. Moore, J.M., *Plant Layout and Design*, New York, Macmillan, 1962
4. Pierre, Michel, *Implantation et maintenance rationnelles*, Paris, Dunod, 1975

# La administración de operaciones



La administración de operaciones es el conjunto de actividades que aseguran la continuidad y el funcionamiento armónico de un sistema productivo. Comprende la planificación, la coordinación y el control de las operaciones a fin de lograr los objetivos deseados.

Los objetivos de un sistema productivo son la consecución de un bien con calidad determinada, en cantidad suficiente para la demanda, en el momento y el lugar oportunos y a un costo mínimo. Para el logro de estos objetivos se requiere la elaboración de planes y la implantación de controles que informen acerca de la administración de las operaciones.

En la figura A-IV se muestra el ciclo de planificación y de control de un sistema productivo. Las *previsiones* de la demanda constituyen los datos básicos para la planificación global. El *programa general de producción* es el resultado de la planificación global, y en él se definen las grandes orientaciones del sistema.

La *planificación detallada* proporciona los planes necesarios para cada división del sistema productivo implicada en la realización del programa general. Las divisiones afectadas son fabricación, almacenamiento, aprovisionamiento, aseguramiento de la calidad y mantenimiento.

El control de las operaciones completa el ciclo de la planificación. Los resultados de este control constituyen la "retroacción" necesaria para corregir y evaluar las actividades del sistema. Es por tanto posible verificar ciertas condiciones previstas en los planes relativos a producción, inventarios, costos y calidad.

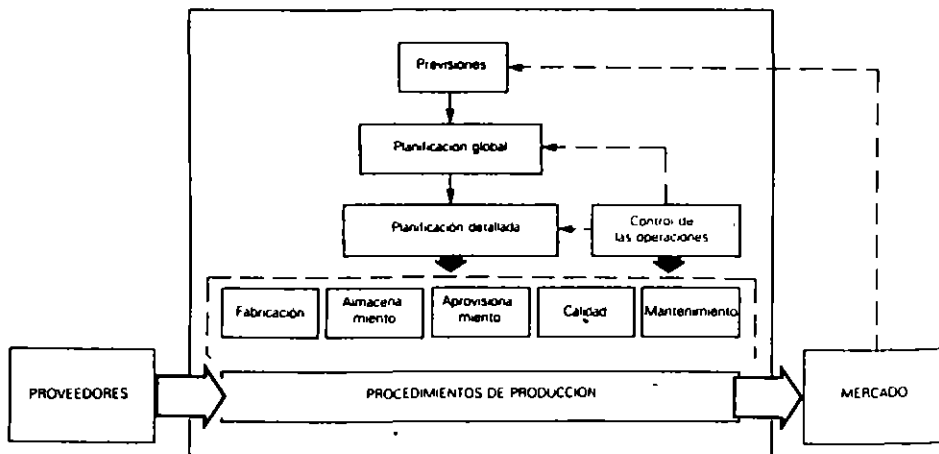


Fig. A-IV  
Ciclo de planificación

# 8

## Las previsiones\*

### OBJETIVOS

Después de haber estudiado este capítulo, el lector deberá ser capaz de

- distinguir entre previsiones y predicciones,
- enumerar los diferentes tipos de previsiones y explicar su utilización;
- identificar las componentes de la demanda de un producto;
- elaborar previsiones a partir de datos históricos de la demanda,
- exponer el sistema de elaboración de las previsiones

### TERMINOLOGIA

- análisis de regresión
- correlación
- factor de ponderación
- suavización exponencial
- media móvil
- media ponderada
- previsión
- serie estadística
- tendencia
- variación aleatoria
- variación estacional

\*Aunque este término suele traducirse como *pronóstico*, se ha preferido el término *prevision* por considerarlo más apropiado (N del T)

## INTRODUCCION

Distingamos primeramente entre predicciones y previsiones. Las primeras se basan en intuiciones y en una "sensibilidad" que el hombre de negocios experimentado aprende a desarrollar. Las segundas se basan únicamente en datos cuantitativos, los cuales se analizan con métodos científicos. Las predicciones son menos confiables que las previsiones. El administrador combina a menudo datos subjetivos y objetivos en sus pronósticos.

Las previsiones relativas a la demanda constituyen elementos de información importantes para la toma de decisiones dentro de toda organización, y sirven para planificar y controlar el sistema. Estas permiten no solamente prever la demanda de un producto, sino también programar las necesidades de material, de servicios y de mano de obra.

Es bien sabido que, en la administración de operaciones del sistema productivo, la planificación y el control se aplican a diferentes niveles. Ello nos conduce a considerar diferentes tipos de previsiones: a largo plazo, a plazo mediano y a corto plazo (fig. 8-1). Nosotros nos interesaremos aquí en las que sirven para elaborar planes a plazos corto y mediano. En este capítulo por tanto estudiaremos las componentes de la demanda, los diferentes tipos de previsiones y las técnicas que se utilizan para su elaboración.

## COMPONENTES DE LA DEMANDA

La demanda de un producto o de un servicio está condicionada por varios factores, a veces controlables, a menudo incontrolables, entre los cuales pueden citarse los factores *técnicos* (especificaciones, precio, distribución, etc.), *sociológicos* (actitudes del consumidor, valores culturales, etc.), *económicos* (estado de la economía general, inflación, nivel de vida, etc.), *tecnológicos* (nuevas invenciones o modificaciones) y *políticos* (restricciones jurídicas, reglamentos, etc.).

Tipo de prevision	Duración	Utilidad	Factores por considerar	Técnicas y métodos
A largo plazo	3 a 5 años	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desarrollo de la gama de productos y de nuevos productos</li> <li>Expansión del mercado</li> <li>Elaboración de planes estratégicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Factores económicos a escala nacional e internacional</li> <li>Factores tecnológicos</li> <li>Factores políticos y sociales</li> <li>Objetivos a largo plazo de la empresa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Método Delphi</li> <li>Técnicas de la investigación comercial</li> </ul>
A plazo mediano	1 a 2 años	<ul style="list-style-type: none"> <li>Evaluación de los gastos de inversión</li> <li>Planificación de las compras de equipo y maquinaria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vea cuadro anterior</li> <li>Competencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Análisis de regresión y de correlación</li> </ul>
A corto plazo	1 año o menos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planificación de la producción las compras y los inventarios</li> <li>Planificación de las ventas, la publicidad y la promoción</li> <li>Elaboración de presupuestos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vea cuadros anteriores</li> <li>Factores estacionales y tendencia de la demanda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Media móvil</li> <li>Suavización exponencial simple</li> <li>Suavización exponencial con factores estacionales y tendencia lineal</li> </ul>

Fig. 8-1  
Clasificación de los tipos de previsiones

Para analizar los efectos de estos factores en la demanda deben conocerse las componentes de la demanda: media, tendencia, variaciones aleatorias, variaciones estacionales y variaciones cíclicas (fig. 8-2). Estas componentes definen el comportamiento de la demanda.

a) **Demanda promedio.** Esta es la suma de las ventas por periodo dividida entre el número de periodos, es un valor típico de la demanda para estos periodos.

b) **Tendencia.** La comparación de las medias de dos periodos consecutivos puede revelar una tendencia a la alza o a la baja. En el primer caso dicha tendencia se conoce como *tendencia positiva*, en el segundo caso se la llama *tendencia negativa*. Debe notarse que en la figura 8-2 la tendencia de la demanda es a la alza para los años 1978 y 1979.

c) **Variaciones aleatorias.** Una parte de la demanda se debe a eventos no identificables los cuales tienen como efecto aumentar o disminuir el nivel de la demanda. Estos cambios se conocen como variaciones aleatorias. La única forma de reducir el efecto de estas variaciones al nivel de previsiones es estimando la demanda promedio para un periodo más o menos prolongado.

d) **Variaciones estacionales.** La demanda de ciertos productos se identifica con una estación. Estos productos se denominan estacionales. Otros productos son consumidos durante todo el año, pero su demanda sufre fluctuaciones en cada estación. Estos cambios se conocen como variaciones estacionales (tal es el caso de la cerveza y las bebidas gaseosas).

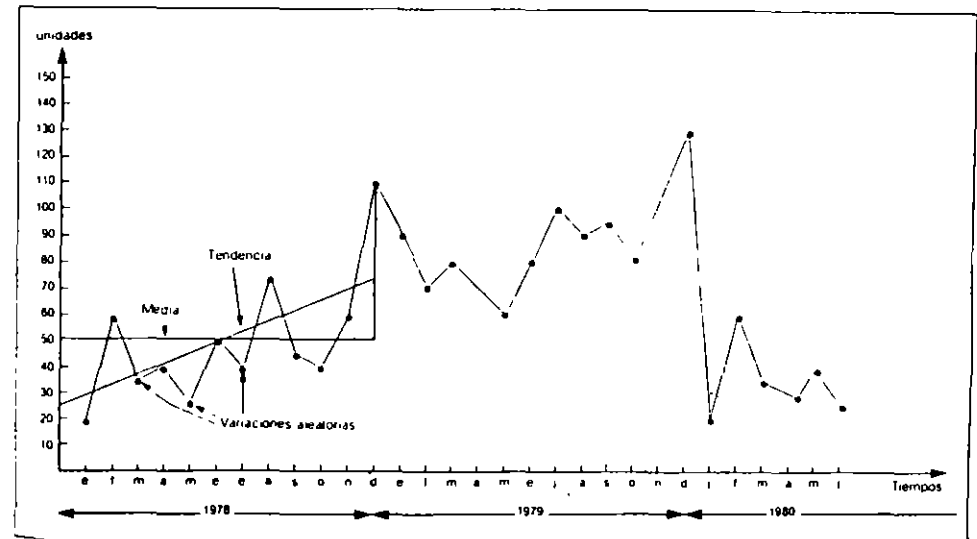


Fig. 8-2  
Gráfica de la demanda de un producto para los años de 1978 y 1979

e) **Variaciones cíclicas.** Estos son los cambios que se presentan por periodos. En general, dichas variaciones siguen cierta curva que se repite a la manera de ciclos de longitud variable. El análisis de las variaciones cíclicas rebasa el alcance del presente volumen.

## MÉTODOS

Los métodos que se utilizan para estimar los eventos futuros pueden clasificarse en dos grandes categorías: métodos de *predicción* y métodos de *previsión*. Entre los primeros se encuentran el método Delphi, las técnicas de la investigación comercial y el método de analogías. Entre los segundos se tienen los métodos estadísticos (media móvil, media ponderada, análisis de correlación y de regresión y modelos econométricos) y los métodos aritméticos (series de Fourier y métodos de suavización exponencial).

Después de una rápida descripción de los métodos de predicción, estudiaremos con mayor detalle los métodos que se utilizan generalmente en las previsiones a corto y a mediano plazo.

### METODO DELPHI

Este método fue diseñado por dos investigadores de la Rand Corporation, Olaf Helmer y Norman Dalkey. Su finalidad es obtener de un grupo de expertos seleccionados el consenso más seguro posible acerca de la evolución de un evento o de un sector particular.

Para ello, cada experto es invitado a responder un cuestionario. Posteriormente sus respuestas se dan a conocer a los demás expertos. De este modo cada experto puede comparar sus planteamientos con los del resto del grupo, y esto conduce a una revisión general de los enunciados. Para las respuestas que se aparten de la opinión mayoritaria y que el entrevistado quiera sostener se pide una justificación.

Evitando confrontar a los expertos y formar un grupo de discusión, este método permite obtener un consenso más objetivo. Este método ofrece la ventaja de eliminar la influencia de ciertos factores psicológicos como los argumentos especiosos, el deseo de no abandonar una opinión expresada públicamente, las reacciones en cadena provocadas por una opinión mayoritaria, etc.

Este método se utiliza para predicciones a largo plazo relacionadas con nuevos productos, evolución tecnológica, desarrollo de productos o evolución del mercado.

### TECNICAS DE INVESTIGACION COMERCIAL

Los datos que proporcionan el estudio del mercado y el análisis del comportamiento de los consumidores permiten pronosticar la demanda de ciertos productos. En la investigación comercial se utilizan cuestionarios, paneles de consumidores y de productos, ensayos de nuevos productos. El lector que desee más información sobre estas técnicas puede consultar la bibliografía que se proporciona al final del capítulo.

## METODO DE LAS ANALOGIAS

Este método consiste en aplicar el análisis de un fenómeno o de un acontecimiento pasado al evento que está siendo estudiado. Esto es lo que se hace cuando se predicen la demanda y la tendencia de un nuevo producto a partir del ciclo de vida de otro producto.

## MÉTODOS ESTADÍSTICOS

En este método se utilizan series estadísticas para formular *previsiones* acerca de la demanda de un producto. Para ello se recurre al cálculo de la media, la desviación estándar, el coeficiente de correlación, etc. En seguida expondremos el método de la media móvil, el de la media ponderada y el análisis de correlación y el de regresión.

a) **Media móvil.** Las variaciones de la demanda de la figura 8-2 muestran una tendencia a la alza para los años 1978 y 1979, y una tendencia a la baja para el principio de 1980. Por tanto, es necesario que el método de previsión refleje estas variaciones.

El método de la media móvil, cuya aplicación es simple, se adapta más o menos bien a dichas variaciones. Este método consiste en ajustar las previsiones a la demanda reciente, de donde proviene la *movilidad* de la media. He aquí las etapas principales de este método.

- 1o. Determinar el número de periodos de referencia ( $n$ ).
- 2o. Establecer las previsiones calculando la media de la demanda de estos periodos según la fórmula:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n}$$

donde  $P$  es la previsión buscada,  
 $\Sigma$  significa "suma de",  
 $D$  designa la demanda de un periodo,  
 $i$  identifica el periodo.

*Ejemplo:* La compañía "Ramy Ltée" desea realizar una previsión para el mes de abril. Supongamos que las ventas de los tres meses precedentes han sido 2 560 unidades (enero), 3 205 (febrero), 2 830 (marzo).

*Solución:*

$$\begin{aligned} P_{\text{abril}} &= \frac{D_E + D_F + D_M}{3} \\ &= \frac{2\,560 + 3\,205 + 2\,830}{3} = 2\,865 \text{ unidades} \end{aligned}$$

En la figura 8-3 se representan las ventas de 1979 y las previsiones basadas en periodos de tres y seis meses. Debe notarse que entre más grande sea el

Periodos	Demanda	Previsiones ( 3 meses )	Previsiones ( 6 meses )
Enero	80		
Febrero	90		
Marzo	85	85.0	
Abril	70	81.6	
Mayo	80	78.3	
Junio	105	85.0	85.0
Julio	100	95.0	88.3
Agosto	105	103.3	90.8
Septiembre	100	101.6	93.3
Octubre	105	103.3	99.2
Noviembre	100	101.6	102.5
Diciembre	150	118.3	110.0

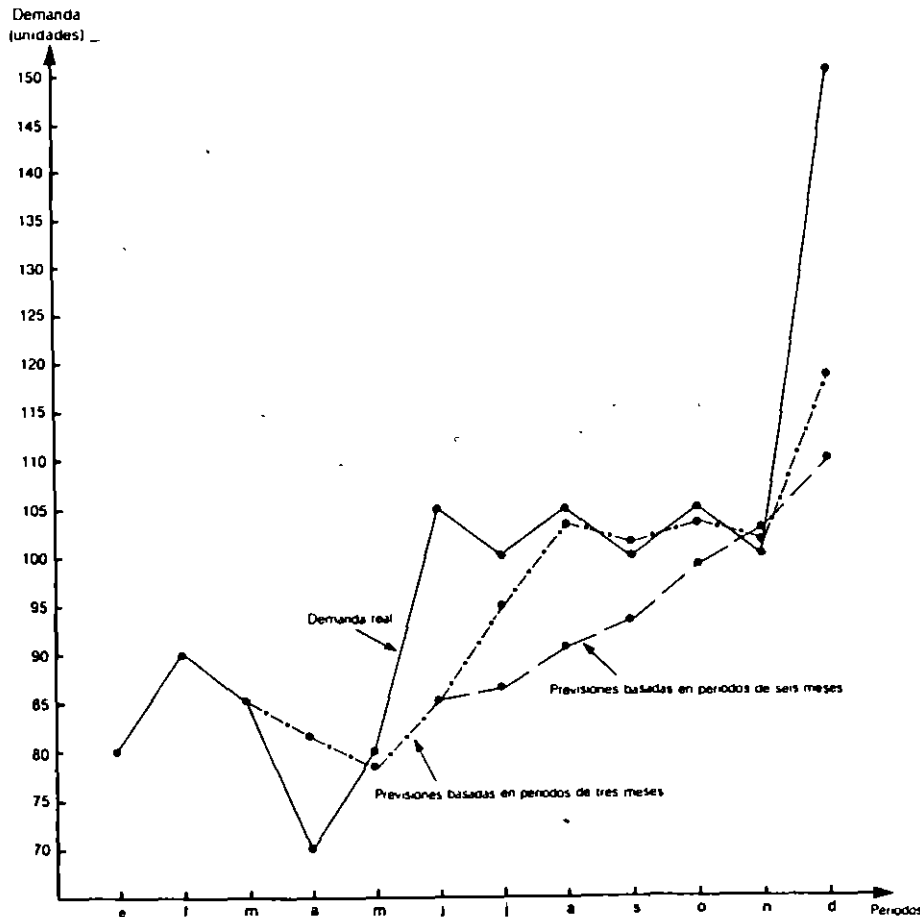


Fig. 8-3  
Comparación de los resultados de las previsiones elaboradas con bases de 3 y 6 meses

número de periodos de referencia, mayores serán las desviaciones entre la demanda real y las previsiones, puesto que el efecto de las variaciones aleatorias se ve atenuado. Es necesario por tanto hacer un análisis de la demanda anterior a fin de encontrar el número de periodos de referencia que conenga mejor a las variaciones de la demanda.

**b) Media ponderada** En el método anterior se concedía a todos los periodos de referencia una importancia igual. En el método de la media ponderada se pondera la demanda de cada uno de los periodos de referencia según su importancia relativa. Por ejemplo, si la demanda del último periodo es la más significativa, se le atribuye un *factor de ponderación* mayor que a los precedentes. Este factor puede disminuir gradualmente según la anterioridad del periodo. La suma de los factores de ponderación debe ser igual a la unidad.

*Ejemplo.* Después de haber estudiado de nuevo las variaciones de la demanda, la compañía "Ramy Ltée" ha decidido ponderar la demanda de los tres periodos de referencia y ha elegido los tres siguientes factores: 50% (marzo), 30% (febrero), 20% (enero). ¿Cuál será en este caso la previsión para abril?

*Solución:*

$$P_{\text{abril}} = \alpha_1 D_{M1} + \alpha_2 D_F + \alpha_3 D_E$$

donde  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$  son los factores de ponderación

Por tanto

$$P_{\text{abril}} = (0.50 \times 2.830) + (0.30 \times 3.205) + (0.20 \times 2.560) \\ = 1.415 + 961.5 + 512 = 2.888.5 \text{ unidades}$$

**c) Análisis de correlación y de regresión** Varios organismos públicos y privados publican estadísticas índice de precios al consumidor, ingreso promedio por persona, ventas anuales por sector económico, gastos nacionales brutos, gastos personales en bienes durables, no durables y servicios, etc. Podemos tratar de relacionar estas estadísticas con las actividades de ventas y descubrir de este modo las causas de ciertas tendencias de la demanda. Si se comparan algunos de estos índices con la demanda de un producto determinado, es posible realizar previsiones referentes a la demanda de este producto. Estos índices pueden también ser el ingreso medio por familia, el número de matrimonios, el índice del nivel de vida, la tasa de inflación, la construcción de viviendas, el efecto de la promoción y de la publicidad, etc.

En este método se trata por tanto de expresar, con la ayuda de un modelo matemático, la relación entre ciertos índices y la demanda de un producto dado. Sin embargo, antes de elaborar el modelo, debe asegurarse el que exista una relación de dependencia, o *correlación*, entre las dos variables. Por ejemplo, si se mide la estatura de los estudiantes de una escuela y se compara con la media de las calificaciones de cada uno, es seguro que entre las dos series estadísticas no se encontrará relación alguna. Se dice entonces que las dos variables (estatura y calificaciones) son independientes. Sin embargo, si se comparan las ventas de casas unifamiliares con el número de matrimonios por año o con el ingreso promedio, probablemente se encontrará una relación de dependencia entre estas variables.

La primera de estas variables (venta de casas unifamiliares) se denomina *variable dependiente* ( $y$ ) y la segunda (numero de matrimonios o ingreso promedio) se denomina *variable independiente* ( $x$ ). Pero, ¿cómo puede descubrirse que existe una relación entre dos variables? ¿Cuál es el grado de correlación? En fin, ¿cuál es el modelo matemático que revela el comportamiento de la variable dependiente?

Puede descubrirse la existencia de una relación de este género comparando series estadísticas que presenten variaciones concomitantes. Una fórmula permitirá calcular el coeficiente de correlación, y el *análisis de regresión* proporcionará el modelo matemático adecuado para definir esta relación y sus consecuencias.

### 1. Cálculo del coeficiente de correlación

Este coeficiente se calcula a partir de la ecuación

$$r = \frac{n \sum (xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n \sum (x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n \sum (y^2) - (\sum y)^2}}$$

donde  $r$  es el coeficiente de correlación y  $n$  es el número de puntos o datos.

El valor de este coeficiente varía entre 0.0 y 1.0. Entre más tienda  $r$  a 1, más fuerte será el grado de correlación. Se pueden destacar los siguientes cuatro niveles de correlación:

- 1.00 — 0.90: fuerte
- 0.89 — 0.70: buena
- 0.69 — 0.45: mediana
- 0.44 y menos: débil

Este coeficiente representa el grado de influencia de la variable independiente sobre la variable dependiente. Si, por ejemplo, el coeficiente de correlación es de 0.65, ello significa que el 65% de las variaciones de la variable  $y$  están controladas por la variación de  $x$ .

### 2. Análisis de regresión

Para definir el comportamiento de la variable dependiente ( $y$ ), debe trazarse en primer lugar la recta más representativa de un conjunto de puntos (series estadísticas) identificados por sus coordenadas. La gráfica de la figura 8-4 ilustra esta recta, cuya ecuación<sup>1</sup> es

$$y = B + mx$$

El ajuste de una recta a estos datos se hace con la finalidad de calcular los parámetros  $B$  y  $m$ , lo cual se hace con la ayuda de las siguientes ecuaciones

$$m = \frac{n \sum (xy) - \sum x \sum y}{n \sum (x^2) - (\sum x)^2}$$

$$B = \frac{\sum y - m \sum x}{n}$$

<sup>1</sup> Esta ecuación se obtiene por el método de "mínimos cuadrados", el cual asegura que la suma de los cuadrados de las desviaciones entre los puntos y la recta sea un mínimo

donde  $n$  es el número de datos o de puntos

*Ejemplo:* Supongamos que se han colectado informes acerca de la venta de casas unifamiliares para los diez últimos años (fig. 8-5). Evaluemos las previsiones de ventas para el año de 1980.

*Solución:* En una primera etapa, se analiza el grado de correlación entre las ventas anteriores ( $y$ ) y cada uno de los diez últimos años ( $x$ ). La tabla de la figura 8-6 proporciona los valores necesarios para el cálculo del coeficiente de correlación.

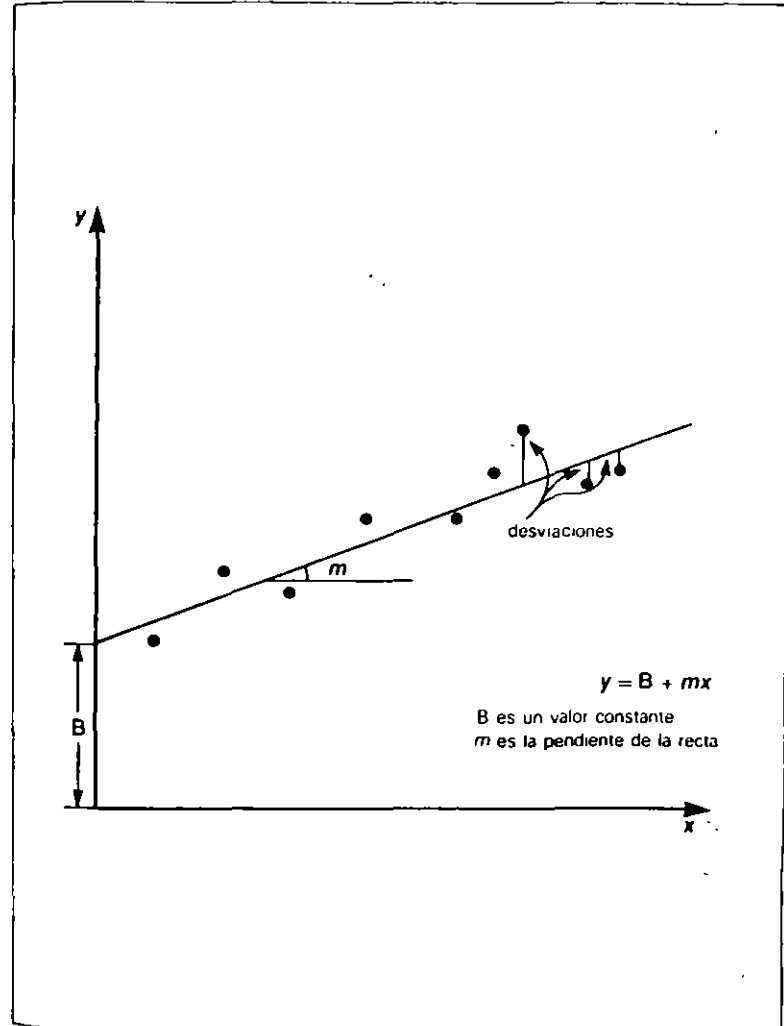


Fig. 8-4  
Ajuste de un  
conjunto de datos  
a una recta



Fig 8-5  
Tabla de ventas anuales en miles de dolares para los diez últimos años

año (x)	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
ventas en miles \$ (y)	400	600	500	700	900	800	1200	1300	1100	1500

Ceficiente de correlación:

$$r = \frac{10 \times 58\,900 - 55 \times 9\,000}{\sqrt{10 \times 377 - 3\,025} \sqrt{10 \times 930 \times 10^4 - 810 \times 10^5}} = 0.9984$$

Por tanto, la correlación es fuerte.

Cálculo de la recta:

$$m = \frac{10 \times 58\,900 - 55 \times 9\,000}{10 \times 377 - 3\,025}$$

$$= \frac{94 \times 10^3}{745} = 126.17$$

$$B = \frac{9\,000 - 126.17 \times 55}{10}$$

$$= \frac{2\,060.65}{10} = 206$$

Previsiones para 1980 (y):

$$y = B + mx$$

$$x = 11$$

$$y = 206 + 126.17 \times 11$$

$$= 1\,593.87 \times 1\,000 = \$ 1\,593\,870$$

Año	No de referencia (x)	y × 10 <sup>3</sup>	xy × 10 <sup>3</sup>	x <sup>2</sup>	y <sup>2</sup> × 10 <sup>10</sup>
1970	1	400	400	1	16
1971	2	600	1 200	4	36
1972	3	500	1 500	9	25
1973	4	700	2 800	16	49
1974	5	900	4 500	25	81
1975	6	800	4 800	36	64
1976	7	1 200	8 400	49	144
1977	8	1 300	10 400	56	169
1978	9	1 100	9 900	81	121
1979	10	1 500	15 000	100	225
Total	55	9 000	58 900	377	930 × 10 <sup>10</sup>

Fig. 8-6

## METODOS ARITMETICOS

Se trata de un conjunto de modelos matemáticos convenientes para el estudio de ciertas variaciones. Estos son el modelo de suavización exponencial simple, el modelo de suavización exponencial con tendencia lineal, el modelo de suavización exponencial simple con tendencia lineal y factores estacionales, y las series de Fourier. A continuación estudiaremos la aplicación del primer modelo.

a) **Suavización exponencial simple** Este método tiene la ventaja, con relación al de la media móvil, de la flexibilidad con que se ajustan las previsiones a las variaciones de la demanda, debido a que al final de cada periodo se examina la validez de las previsiones confrontándolas con la realidad reciente. Este método consiste por tanto en estimar la demanda promedio suavizada (ajustada) para el periodo venidero ( $\bar{P}_t$ ) sumando o substrayendo a las previsiones promedio precedentes ( $\bar{P}_{t-1}$ ) un porcentaje ( $\alpha$ ) de la diferencia entre la demanda actual ( $D_t$ ) y las previsiones promedio precedentes ( $\bar{P}_{t-1}$ ). Este porcentaje se conoce como *coeficiente de suavización exponencial*. La siguiente ecuación representa el modelo de suavización exponencial simple (fig. 8-7).

$$\bar{P}_t = \bar{P}_{t-1} + \alpha (D_t - \bar{P}_{t-1})$$

El valor del coeficiente de suavización exponencial se encuentra entre 0 y 1. Los valores que se utilizan generalmente varían entre 1 y 30%, según la política de la empresa con respecto a las variaciones de la demanda. El valor 0 significa estabilidad en la demanda anterior. El valor del coeficiente se incrementa cuando la empresa decide reaccionar ante las variaciones de la demanda.

Si el modelo de la demanda no contiene tendencias lineales o variaciones estacionales, la previsión corresponderá directamente a la demanda promedio suavizada. Por tanto:

$$\bar{P}_t = \bar{P}_{t-1}$$

En la figura 8-8 se indican los resultados del cálculo de ciertas previsiones con la ayuda del modelo de suavización exponencial simple a partir de un coeficiente  $\alpha$  de 0.10. Para febrero, por ejemplo, la previsión de la demanda ( $\bar{P}_{t+1}$ ) se calculará de la siguiente manera con ayuda de la fórmula citada.

$$\bar{P}_t = \bar{P}_{t-1} + \alpha (D_t - \bar{P}_{t-1})$$

$$\bar{P}_e = \bar{P}_D + \alpha (D_e - P_D)$$

$$\bar{P}_e = 75 + 0.10 (70.8 - 75)$$

$$\bar{P}_e = 75 - 0.42$$

$$\bar{P}_e = 74.58$$

$$\bar{P}_e = \bar{P}_{t+1} = 74.5$$

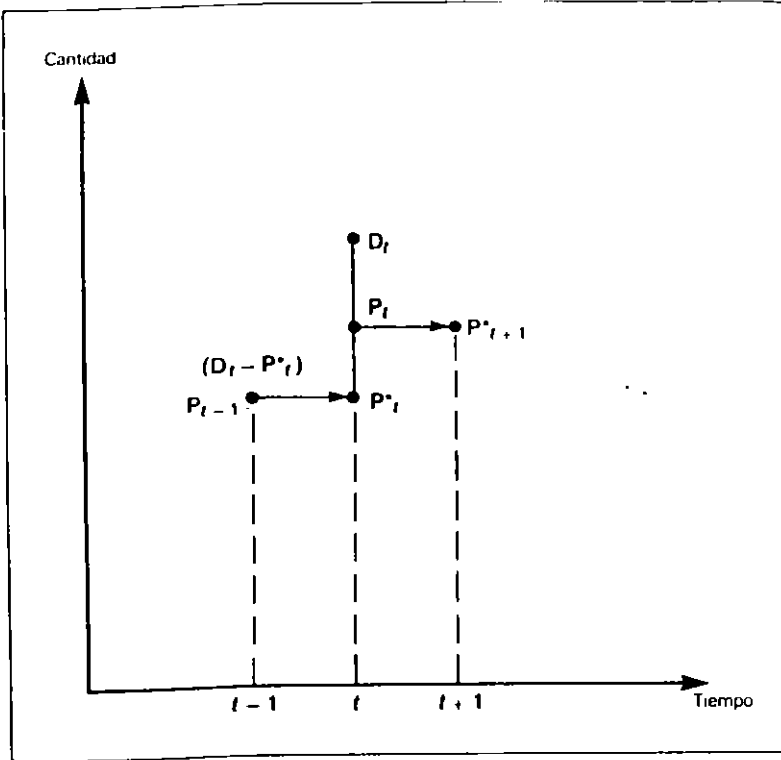


Fig 8-7  
Representación gráfica de los elementos de la previsión de la demanda con ayuda del método de suavización exponencial simple

## SISTEMA DE ELABORACION DE PREVISIONES

En la figura 8-9 se representan los elementos constitutivos del sistema de elaboración de previsiones. La complejidad de este sistema depende del tipo de industria, del tamaño de la empresa y de sus recursos humanos, financieros y materiales.

Periodo	Demanda real $D_t$	Demanda promedio actual $P_t$	Previsión $P_{t+1}^*$
Valor inicial		75.00	
enero de 1980	70.80	74.58	
febrero	80.20	75.14	74.58
marzo	85.30	76.16	75.14
abril	75.50	76.09	76.16
mayo	70.80	75.58	76.09
junio	88.10	76.81	75.56
julio			76.81

Fig. 8-8  
Previsión de la demanda con ayuda de un modelo de suavización exponencial simple ( $\alpha = 0.10$ )

## INSUMO

Este es el conjunto de datos necesarios para la elaboración de las previsiones. La preparación de estos datos constituye la primera etapa del proceso. Entre los datos más utilizados se encuentran los de ventas anteriores (por producto, año o región), cantidades ordenadas, volumen del mercado en valor

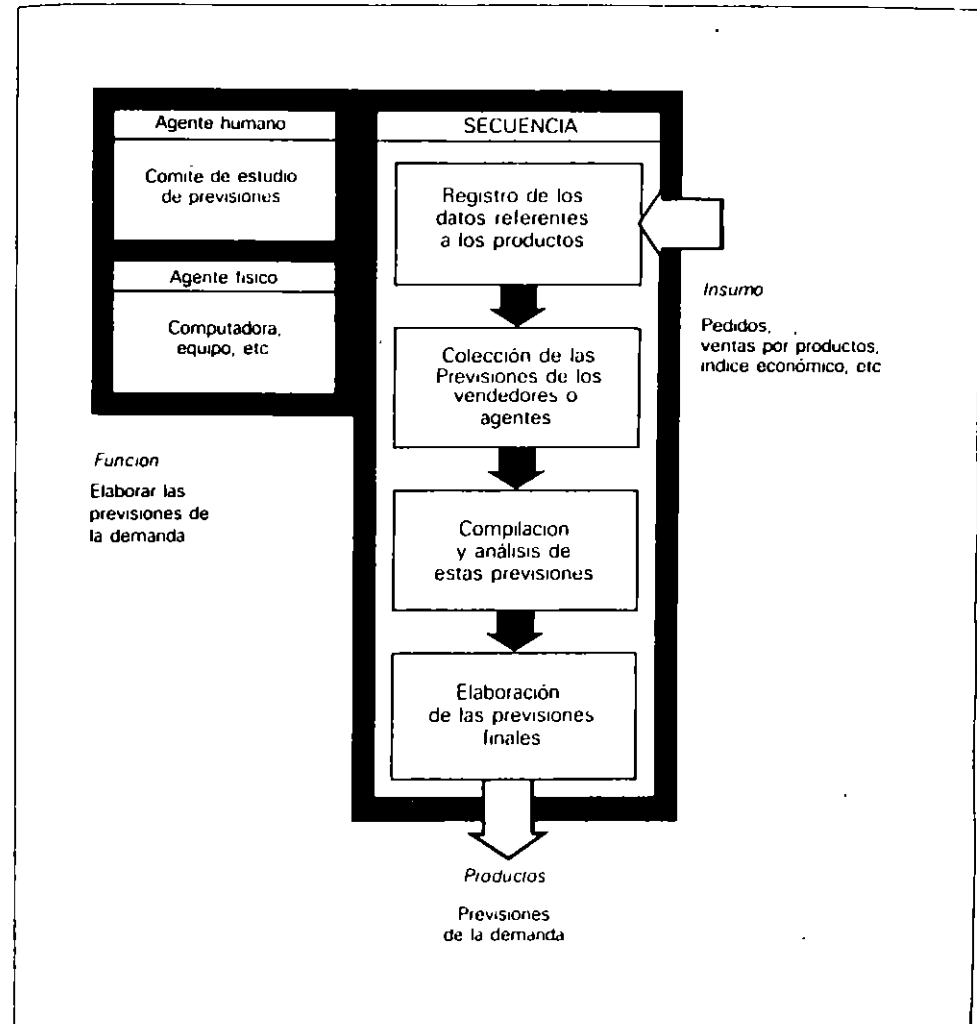


Fig 8-9  
Sistema de elaboración de previsiones

monetario, parte del mercado en posesión de los competidores e índices económicos (ingreso promedio, gastos personales en bienes durables o no durables, tasa de inflación, tasa de desempleo, etc.). Una empresa bien organizada que desee planificar mejor sus operaciones debe poner en marcha un sistema de registro de dichos datos.

### AGENTE HUMANO

En la pequeña y mediana industria, el responsable de las previsiones es generalmente el director de mercadotecnia. En la empresa de alto nivel se establece un comité de estudio, formado por los directores de ventas, de producción, de compras y de finanzas. Este comité debe tener en cuenta los siguientes elementos en el momento de realizar las previsiones: cambios al nivel del producto y efectos sobre la demanda, nuevo presupuesto de publicidad y de promoción, modificación del precio de venta, situación de la competencia, evolución del comportamiento de los consumidores.

### AGENTE FISICO

La computadora es una herramienta cada vez más indispensable para los comités de estudio. No es necesario que la empresa posea su propia computadora, ya que existen en el mercado programas de previsión y de planificación de la actividad productiva.

## RESUMEN

La predicción es un método intuitivo que se basa en el juicio y la experiencia del hombre de negocios. Las previsiones son elementos de información que se obtienen con la ayuda de métodos científicos: investigación comercial, análisis de correlación y de regresión, media móvil o ponderada y suavización exponencial.

El análisis de las componentes de la demanda (media, tendencia y variaciones aleatorias, estacionales y cíclicas) es necesario a fin de elegir el método de previsión.

## Preguntas

- 1 ¿Qué diferencia existe entre una predicción y una previsión?
- 2 ¿Existen métodos de predicción y métodos de previsión? En caso afirmativo, ¿cuáles son?
- 3 Mencione los diferentes tipos de previsión así como su aplicabilidad en la práctica.
- 4 Enumere los métodos que se adaptan a los diferentes tipos de previsión.
- 5 Identifique las componentes de la demanda y muestre la forma en que se las puede representar en una gráfica de demanda en función del tiempo.
- 6 Diga si la demanda de los productos que se mencionan a continuación sufre variaciones estacionales:

- a) ropa,                      c) pan,                      e) transportes,  
b) muebles,                  d) legumbres y frutas,      f) puertas y marcos

7. Exponga los métodos de previsión que usted conozca y su empleo.
8. Exponga las ventajas y los inconvenientes de los siguientes métodos de previsión:
  - media móvil,
  - media ponderada,
  - análisis de regresión,
  - suavización exponencial simple.
- 9 ¿Cuáles son los elementos constitutivos de un sistema de elaboración de previsiones?
- 10 Haga una tabla para el registro de los datos que son necesarios a fin de elaborar las previsiones de la demanda de un producto

## Ejercicios prácticos

- 1 A partir de la gráfica de la figura 8-2, calcule la demanda promedio para 1978 ( $D_{78}$ )
- 2 El departamento de ventas de un establecimiento ha observado que la mejor previsión se obtiene ponderando las ventas de los cuatro últimos meses. Los factores de ponderación se distribuyen como sigue. 40% para las ventas del mes más reciente, 30, 20 y 10% para las ventas de los 3 meses anteriores.

	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio
Demanda real (unidades)	80	90	100	95	110	120	

- a) Elabore las previsiones del mes de julio
  - b) Si las ventas reales del mes de julio son de 105 unidades, calcule las previsiones del mes de agosto.
- 3 Una panadería suministra buñuelos a una cadena de restaurantes. En la tabla siguiente se indica la demanda de buñuelos en docenas para las cinco semanas precedentes. La panadería cierra los sábados; por tanto la producción del viernes debe satisfacer la demanda de sábado y domingo.

Días	Enero					Febrero
	semana 1	semana 2	semana 3	semana 4	semana 5	semana 6
lunes	3 300	3 500	3 400	3 200	3 500	
martes	3 100	3 200	3 300	3 100	3 300	
miércoles	3 400	3 500	3 400	3 200	3 600	
jueves	2 900	3 000	2 900	2 800	3 100	
viernes	3 000	2 900	3 200	2 900	3 100	
sábado y domingo	3 900	3 800	4 100	4 200	4 000	

Se desea elaborar las previsiones para la semana 6 utilizando

- El método de la media móvil a partir de una base de 3 semanas
- El método de la media ponderada con los siguientes factores de ponderación 0.5: semana 5, 0.3 semana 4, y 0.2 semana 3.
- El método de suavización exponencial simple con un coeficiente de suavización  $\alpha$  de 0.2 y un valor inicial de 3 200.

4 En la tabla siguiente se indican las ventas reales mensuales del año precedente para cierto producto:

	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio
Ventas	495	520	490	510	500	520

	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
Ventas	540	550	510	490	470	510

- Si se utiliza la suavización exponencial simple ¿cuál será, según usted, el mejor valor de  $\alpha$ ?
- Calcule las previsiones del mes de enero para el nuevo año utilizando el método de suavización exponencial simple

5. El gerente de ventas de una compañía considera que probablemente existe una relación entre las ventas de los productos de la compañía y los gastos personales de bienes durables o el ingreso promedio personal. El ha colectado las estadísticas de la tabla siguiente, y desea que usted le ayude a elaborar las previsiones de ventas para el año próximo ¿Cuáles serán sus recomendaciones?

Año	Ventas (en miles \$)	Gastos en bienes durables (en millones \$)	Ingreso personal (en millones \$)
1965	400	5 800	41 100
1966	600	5 500	46 100
1967	500	5 900	50 500
1968	700	6 500	55 600
1969	900	7 000	61 800
1970	800	6 800	66 600
1971	1 200	7 800	73 800
1972	1 300	9 000	83 200
1973	1 100	10 600	90 500
1974	1 500	12 100	95 000

## BIBLIOGRAFIA

- Bass, F.M., C.W. King et E.A. Pessemier, *Applications of the Science in Marketing Management* John Wiley, 1968
- Buffa, E.S. et W.H. Taubert, *Production Inventory Systems Planning and Control* Hoinewood (III) Richard D Irwin, 1972
- D'Hoeraene, J. et Y. Ledoux, *La prévision dans l'entreprise* Paris Dunod 1970
- Huang, D.S., *Regression and Economic Methods* New York, John Wiley, 1970

### Artículos

- Anl, D.H., « New Product Forecasting Using Consumer Panels », *Journal of Marketing Research*, mai 1970, pp 159-167
- Bass, F.M., « A New Product Growth Model for Consumer Durables » *Management Science*, janvier 1969
- Benassy, J., « Aperçu sur les méthodes de prévision à court terme » *Direction et Gestion*, n° 1, Paris, 1968
- Chambers, J.C., S.K. Mullick et D.D. Smith, « How to Choose the Right Forecasting Technique », *Harvard Business Review*, juillet-août 1971, pp 47-74
- Claycamp, H.J. et L.E. Liddy, « Prediction of New Product Performance: an Analytical Approach » *Journal of Marketing Research*, novembre 1969 pp 414-421
- Geoffrion, A.M., « A Summary of Exponential Smoothing », *Journal of Industrial Engineering*, juillet-août 1962
- Kaufman, H., « La prévision à court terme et les méthodes adaptatives » *Direction et Gestion* n° 4, Paris, 1967
- Leleuvre, L. et H.N. Cheng, « Méthode de prévision et de contrôle des coûts des départements d'un hôpital: le cas de la radiologie », *Gestion*, Montréal novembre 1978

# 9

## Elementos de administración de inventarios

### OBJETIVOS

Después de haber estudiado este capítulo, el lector deberá ser capaz de

- explicar la utilidad de los inventarios.
- exponer las categorías de inventarios.
- clasificar los inventarios por el método ABC.
- distinguir las dos definiciones del nivel de servicio.
- definir los elementos de los costos de aprovisionamiento y de almacenamiento.
- calcular la cantidad económica de la orden.
- analizar la cantidad económica desde el punto de vista de los descuentos por cantidad.

### TERMINOLOGIA

costo de adquisición	punto de reorden
costo de abastecimiento	producto en curso
costo de orden	producto semiterminado
costo de almacenamiento	inventario
lote económico	inventario activo
almacenamiento	inventario de seguridad
método ABC	almacenamiento

## INTRODUCCION

La escasez de materias primas que se observó en la Primera Guerra Mundial, la sobreabundancia de inventarios durante la crisis económica de 1929, las dificultades de abastecimiento que surgieron en la Segunda Guerra Mundial y muchos otros problemas que han experimentado las empresas son aspectos que han contribuido a la toma de conciencia sobre la importancia de una administración económica de los inventarios.

El almacenamiento es una forma de asegurar la continuidad de las operaciones de un sistema de producción. Sin embargo, al mismo tiempo dicha actividad desencadena costos suplementarios, lo que tiene como efecto una reducción del margen de utilidad. En consecuencia, es necesario que la empresa asegure la continuidad de sus operaciones con una garantía razonable contra la escasez de la materia prima, pero evitando los excesos de inventarios.

## CATEGORIAS DE INVENTARIOS

Los inventarios varían dependiendo de las actividades. En una empresa industrial se encuentran inventarios de materias primas, de productos en curso, de productos terminados y de mantenimiento. En una empresa comercial existen inventarios de productos terminados y de muebles de oficina. En general, los inventarios pueden dividirse en cuatro categorías:

a) **Inventario de fabricación.** Es el formado por las materias primas brutas, las piezas y los productos semiterminados que entran en la composición de los productos terminados.

b) **Inventario de productos en curso.** Se trata de las componentes que se encuentran en las diferentes etapas de la fabricación. Dichos productos pueden almacenarse en los locales de fabricación si el procedimiento de producción implica etapas sucesivas, como ocurre por ejemplo en una línea de ensamble.

c) **Inventarios de productos terminados.** Estos productos, que son el resultado final del sistema de producción, se guardan en almacenes apropiadamente acondicionados hasta el momento de su expedición.

d) **Inventario MRO (mantenimiento, reparación, operaciones).** Estos productos no forman parte integral de un producto terminado, pero intervienen directamente en el proceso de fabricación. El aceite, el jabón, la grasa, las piezas de repuesto para las máquinas y los muebles de oficina son algunos ejemplos. Se lo conoce también como inventario de abastecimientos.

## CLASIFICACION DE LOS INVENTARIOS: EL METODO ABC

La clasificación es una etapa esencial en una administración sana de los inventarios. La empresa, según sus necesidades, adopta ciertos criterios a

este respecto, entre los cuales pueden mencionarse la tasa de rotación, el objeto, la utilización, el valor del consumo anual, etc. La clasificación por el método ABC es utilizada por las empresas que desean ejercer un mínimo de control sobre sus inventarios.

Este método consiste en reagrupar los artículos del almacén ya sea con base en el gasto anual promedio de cada artículo (costo de compra y gastos generales), o con base en la inversión anual para cada uno. Se procede a esta clasificación una vez que se han identificado los artículos del almacén y que los ficheros de utilización han sido establecidos y mantenidos durante un ciclo completo de operaciones. En seguida describimos las etapas de su elaboración.

- Los artículos se clasifican en orden creciente o decreciente, tomando como base el gasto anual promedio o la inversión anual.
- Se suman los valores de todos los artículos del almacén. El resultado representa la inversión total anual.
- El valor de cada artículo se convierte en porcentaje del total de la inversión anual.
- Los artículos se reparten en tres grupos A, B y C.
  - El grupo A, que representa entre el 70% y el 80% del consumo anual total en dólares, contiene del 10% al 20% de los artículos.
  - El grupo B, que representa entre el 15% y el 20% del consumo anual total, contiene del 30% al 40% de los artículos.
  - El grupo C, que representa entre el 5% y el 10% del consumo anual total, contiene del 40% al 50% de los artículos.

En la tabla siguiente se muestra la inversión anual para diez artículos hallados en el almacén. Clasifiquemos estos artículos por el método ABC.

Numero del articulo	03	19	22	23	27	36	41	54	68	82
Costo anual (\$)	15 000	800	95 000	425	25 000	1 500	225	7 500	75 000	13 000

### Solución

Etapas a) y b)

Etapas c)

Numero	Costo anual	Porcentaje
22	\$ 95 000	40.8
68	75 000	32.1
27	25 000	10.7
03	15 000	6.4
82	13 000	5.6
54	7 500	3.2
36	1 500	0.6

19	800	0.3
23	425	0.2
41	225	0.1
Total		100%
		\$ 233 450

Etapa d)

Grupos	Inversión		Inventario	
	Costo anual	Porcentaje	Numero de los articulos	Porcentaje
A	\$ 170 000	72.9	22 68	20
B	\$ 53 000	22.7	27 03. 82	30
C	\$ 10 450	4.4	54 36 19. 23. 41	50

Puede observarse que un gran número de artículos (40% a 50%) no constituyen más que un pequeño porcentaje (5% a 10%) de la inversión total anual. Esta clasificación se hace con el objeto de

- orientar los esfuerzos del administrador en la elaboración de la política y los procedimientos de control del inventario,
- permitirle repartir el presupuesto y el tiempo del personal en función del valor de los diferentes artículos del almacén

## REGLA DE ADMINISTRACION DE LOS INVENTARIOS

Una representación gráfica de la evolución de los inventarios permitirá comprender más fácilmente los elementos necesarios para elaborar una regla de administración. Por lo general esta regla debe definir los siguientes elementos: nivel del inventario, inventario activo, inventario de seguridad, punto de reorden, tasa de agotamiento, tasa de reabastecimiento y demora de reabastecimiento o de entrega (fig. 9-1)

### NIVELES DE INVENTARIO

Los niveles de inventario representan los límites predeterminados de las cantidades por almacenar. Estas cantidades varían entre un nivel máximo y un nivel mínimo. La determinación de estos dos niveles depende del consumo anual, de la tasa de agotamiento, del costo unitario del producto, de las demoras de entrega, etc.

### INVENTARIO ACTIVO

Este es el inventario que varía constantemente al ritmo de las entradas y salidas del almacén, y puede corresponder a la cantidad económica o al

1 En esta forma de clasificación no se hace más que suponer la distribución de Pareto

consumo actual. Este inventario es igual a la diferencia entre los niveles máximo y mínimo.

### NIVEL DE SERVICIO

Este se refiere a la intensidad con la cual la empresa desea satisfacer la demanda. El nivel de servicio puede concebirse en dos formas

- 1 la relación entre el número de *unidades* ofrecidas y el número demandado.
- 2 la relación entre el número de *clientes* que han comprado el producto y los que lo han demandado

Supongamos, por ejemplo, que el número de clientes por atender es de 10. Nueve clientes demandan 10 unidades cada uno y el décimo demanda 500. Si las nueve primeras demandas son satisfechas y la décima no se atiende, el nivel de servicio será igual a

— según la primera definición

$$\frac{900}{1400} \times 100 = 64.3\%$$

— según la segunda definición.

$$\frac{9}{10} \times 100 = 90\%$$

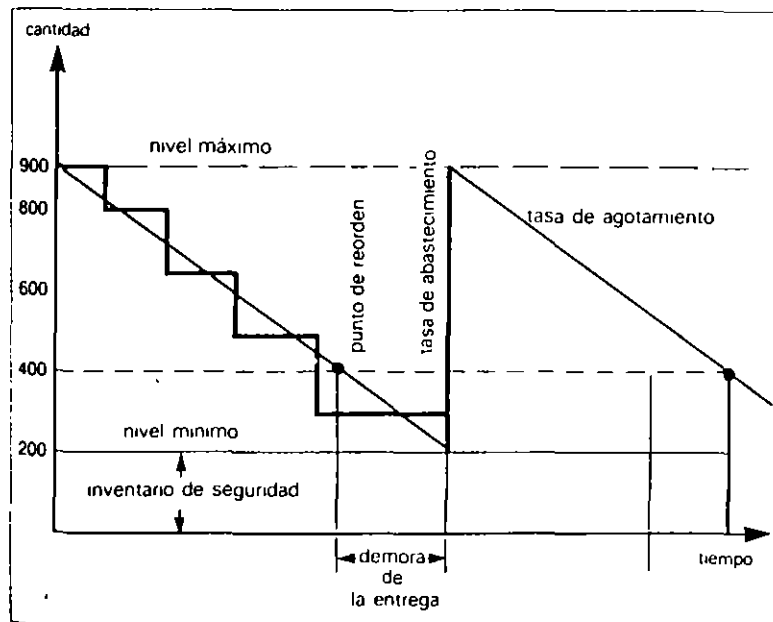


Fig 9-1  
Modelo de  
almacenamiento

Con la primera definición se conoce el porcentaje de la *demanda* que ha sido satisfecho, mientras que la segunda definición indica el porcentaje satisfecho de la *clientela* independientemente de las unidades demandadas

### PUNTO DE REORDEN

Este es el nivel del inventario a partir del cual se decide ordenar el producto. Este punto, que se establece para asegurar la disponibilidad de los productos en los periodos de reabastecimiento, designa una cantidad que está en función de la tasa de la demanda durante el periodo de reabastecimiento y de la demora de la entrega

El siguiente ejemplo ilustra una manera de determinar en forma aproximada el punto de reorden. Supongamos que, para un artículo determinado, los consumos mensuales y las demoras de entrega son los siguientes:

Mes	Consumo mensual (unidades)	Demora de la entrega (días)
enero	90	3
febrero	110	5
marzo	120	6
abril	80	4
mayo	100	3
junio	100	3
	600	24

El consumo mensual promedio es de

$$\frac{600}{6} = 100 \text{ unidades}$$

Considerando meses de 30 días, el consumo cotidiano es de:

$$\frac{100}{30} = 3.3 \text{ unidades/día}$$

La demora promedio de entrega es de

$$\frac{24}{6} = 4 \text{ días}$$

El punto de reorden se sitúa en

$$3.3 \times 4 = 13.2$$

Por tanto, debe levantarse la orden en el momento en que el inventario llega a aproximadamente 14 unidades. En este ejemplo no se ha mencionado la existencia de un inventario de seguridad que permita evitar la escasez durante los periodos o demoras de entrega que excedan de cuatro días

### INVENTARIO DE SEGURIDAD

Este tiene como finalidad impedir toda interrupción en el aprovisionamiento, causada por demoras en la entrega o por un aumento imprevisto de la demanda durante el periodo de reabastecimiento

La importancia del inventario de seguridad está ligada al nivel de servicio, la fluctuación de la demanda y la variación de las demoras de entrega. Si una empresa desea aumentar su nivel de servicio, deberá acrecentar su inventario de seguridad a fin de poder responder a la alza imprevista de la demanda y adaptar el punto de reorden en consecuencia

## COSTO DE ABASTECIMIENTO Y DE ALMACENAMIENTO

Una etapa importante en el estudio de una política de administración de inventarios es el análisis de los diferentes costos asociados con la compra, el almacenamiento y la utilización de los productos. Estos costos pueden clasificarse en tres categorías

- costo de aprovisionamiento,
- costo de almacenamiento,
- costo de escasez

Los elementos necesarios para el cálculo de estos costos pueden obtenerse en el departamento de contabilidad, el cual también debe clasificarlos en costos fijos y costos variables

### COSTO DE APROVISIONAMIENTO

Este se refiere a la adquisición o renovación del inventario. Este costo, también denominado costo de adquisición, comprende el *costo de la orden* y el precio pagado por la mercancía. El costo de la orden incluye los gastos inherentes a la emisión de una solicitud de pedido, el transporte, la recepción y la inspección

Ciertos elementos del costo de la orden son fijos e independientes del número de pedidos emitidos o de la cantidad de artículos por pedido. Por ejemplo, los gastos de administración del personal y del material correspondientes al establecimiento de los pedidos son invariables, cualquiera que sea el número de pedidos. Otros gastos varían en función del trabajo suplementario y contribuyen sólo en cierta medida al costo del pedido. Por tanto, en todos los gastos pueden distinguirse una parte fija y una parte variable. En el caso del costo del pedido, los gastos que intervienen son los siguientes

- a) costo de la mano de obra
  - oficina de compras (director, compradores y otros),
  - almacén (personal dedicado a la recepción de la mercancía),
- b) gastos inmobiliarios (superficie y mantenimiento de la oficina y del almacén),
- c) deudas pasivas (intereses sobre préstamos),
- d) costo del suministro,
- e) comunicaciones,
- f) transporte y distribución,
- g) recepción e inspección



La distribución entre gastos fijos y variables depende de la organización interna de la empresa

En la tabla siguiente se da un ejemplo de cálculo del costo de la orden. Los porcentajes que se indican son solamente promedios

Elementos de gasto	Costo total	% variable	Costo variable
Mano de obra	\$ 200 000	60%	\$ 120 000
Inmobiliario	\$ 13 500	75%	\$ 10 125
Deudas pasivas	\$ 6 500	90%	\$ 5 850
Suministros	\$ 6 500	50%	\$ 3 250
Comunicaciones	\$ 6 500	50%	\$ 3 250
Transporte	\$ 33 500	25%	\$ 8 375
Inspección	\$ 53 500	25%	\$ 13 375
Total	\$ 320 000	100%	\$ 164 225

Número total de pedidos emitidos por año: 16 000

Costo total por pedido.  $\frac{320\ 000}{16\ 000} = \$20.00$

Costo variable por pedido  $\frac{164\ 225}{16\ 000} = \$10.26$

En la figura 9-2 se demuestra que el costo de la orden disminuye con el tamaño del lote.

### COSTO DE ALMACENAMIENTO

Por lo común, el costo anual de almacenamiento representa más del 25% del valor promedio de los productos almacenados (este porcentaje se sitúa entre 14 y 36%) En principio, este costo se compone de los siguientes elementos:

- Valor promedio del inventario** (para un año determinado).
- Intereses sobre la inversión** Es importante tener en cuenta los gastos correspondientes a los intereses y el rendimiento que sería posible obtener si el capital se invirtiera en alguna otra cosa. La tasa de interés puede evaluarse en función de la tasa bancaria en curso (entre 10 y 15% del valor promedio del inventario).
- Gastos de seguros** Numerosas compañías se aseguran contra incendios, contra robo o contra cualquier otra forma de daños. Este costo se sitúa entre 1 y 3% del valor promedio del inventario
- Impuestos prediales** Estos representan de un 2 a un 4% del valor inmobiliario (terreno, almacén).
- Mano de obra** Los salarios pagados a los empleados por el control y la manipulación de los inventarios constituyen un cargo fijo
- Costo de ocupación** El almacén se deprecia a una tasa de entre 1 y 5% por año.
- Costo de obsolescencia** Ciertos productos terminados o el material que se utiliza en la fabricación se vuelven obsoletos con la introducción de nuevos

productos. Este costo puede representar entre un 4 y un 10% del valor promedio del inventario

- Costo de deterioro** El deterioro puede deberse al almacenamiento, la manipulación u otras causas. Debe representar un máximo de 1% del valor promedio del inventario

De una forma general, estos costos varían con el incremento o decremento del inventario (fig 9-2 b). Es por ello que dichos costos se expresan como un porcentaje del valor promedio del inventario. En la tabla siguiente se da un ejemplo de su distribución

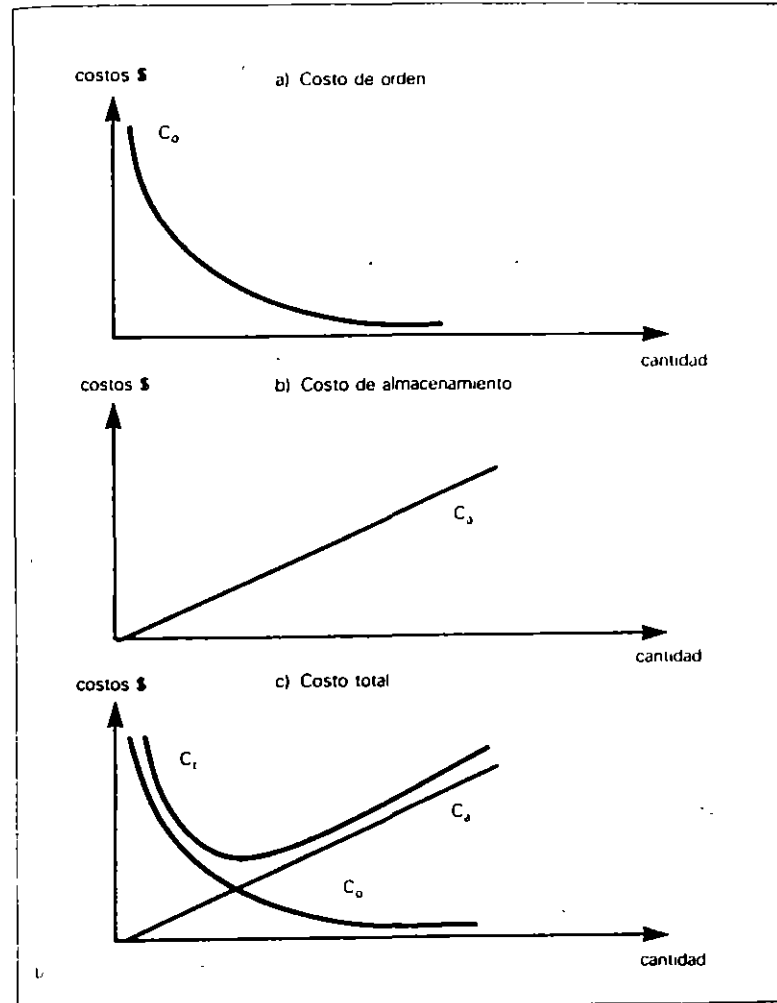


Fig 9-2  
Costo de  
aprovechamiento  
y de  
almacenamiento  
en función de la  
cantidad de  
inventario

Elementos de gasto	Costos	Porcentaje de valor promedio del inventario
Intereses	\$ 150 000	7.5
Seguros	\$ 600	0.03
Impuestos prediales	\$ 75 000	3.75
Mano de obra	\$ 60 000	3.00
Ocupación	\$ 100 000	5.00
Obsolescencia	\$ 40 000	2.00
Deterioro	\$ 400	0.02
Reciclaje	\$ 10 000	0.5
<b>Total</b>	<b>\$ 436 000</b>	<b>21.8</b>
Inventario promedio	\$ 2 000 000	

### COSTO DE ESCASEZ O FALTA DE INVENTARIO

Este costo corresponde al monto de las ventas perdidas como consecuencia de la falta de inventario, del costo de detención de la producción, de los gastos suplementarios o del costo de los trabajos administrativos suplementarios. El costo de la escasez se considera uno de los más difíciles de evaluar.

## EL LOTE ECONOMICO

Se han realizado diversos análisis para combinar ciertos factores cuantitativos en una fórmula o modelo matemático, con el objeto de determinar la cantidad económica por comprar. Partiendo de las características de los datos disponibles (tasa de consumo, costos, demoras, etc.) y del contexto del problema, se han desarrollado varios modelos matemáticos con el objeto de reducir el costo de los inventarios.

La fórmula de Wilson es el modelo básico para el cálculo del lote económico por ordenar. Aunque este método de cálculo —un poco simplista— ha sido muy criticado, debe considerarse que los resultados son válidos en la medida en que el lote económico no es más que un punto de referencia que debe complementarse por la experiencia adquirida. Este método no debe aplicarse rigidamente, sino en función de los procedimientos establecidos y considerando los resultados existentes.

### SIMBOLOGIA

A continuación se incluye la lista de símbolos que se utilizan en el cálculo del lote económico.

- a) El inventario promedio es igual a la mitad del inventario activo, al que se le ha añadido previamente el inventario de seguridad o la suma de las cantidades máxima y mínima dividida entre dos.

$$\text{inventario promedio} = \frac{\text{inventario activo}}{2} + \text{inventario de seguridad (IS)}$$

$$\text{o bien} = \frac{\text{nivel máximo} + \text{nivel mínimo}}{2}$$

- b) Q representa la cantidad anual por ordenar. Esta corresponde al consumo anual estimado del producto.
- c)  $q_0$  representa la cantidad económica de unidades que deberán comprarse por pedido, es el resultado de aplicar la fórmula del lote económico.
- d)  $c_1$  es el costo por pedido.
- e)  $c_2$  es el costo anual de almacenamiento por unidad.
- f) I es el costo de almacenamiento expresado como porcentaje del valor promedio del inventario.
- g) U es el costo unitario de compra del producto.
- h)  $C_c$  es el costo anual de orden.
- i)  $C_s$  es el costo anual de almacenamiento.

### CALCULO DEL LOTE ECONOMICO

Veamos con un ejemplo cómo se establece la fórmula del lote económico. Supongamos que el consumo anual de cierto producto es de 100 000 unidades, que el costo de orden se estima en \$20 por pedido, que el costo de almacenamiento es del 25% del valor anual del inventario promedio y que el costo unitario del producto es de \$100.

$$\text{Costo de almacenamiento} = \text{valor del inventario promedio} \times \text{porcentaje}$$

$$\text{o bien} = \text{inventario promedio} \times \text{costo unitario de almacenamiento}$$

$$C_a = \left[ \frac{q}{2} \times U \right] \times I$$

$$\text{o bien} = \left[ \frac{q}{2} \times c_2 \right]$$

$$\text{Costo anual de orden} = \text{número de pedidos por año} \times \text{costo de orden}$$

$$C_o = \frac{Q}{q} \times c_1$$

$$\text{o bien} = n \times c_1$$

$$\text{Costo total} = \text{costo de almacenamiento} + \text{costo anual de orden (fig. 9-2c)}$$

$$C_T = C_a + C_o$$

En la tabla siguiente se indican los valores de estos costos para diferentes cantidades por ordenar.

Cantidad por ordenar	$C_a = \frac{q}{2} \times U \times I$	$C_o = \frac{Q}{q} \times c_1$	$C_T = C_a + C_o$
100	$= \frac{100}{2} \times 100 \times 0.25$ $= \$1\,250$	$= \frac{100\,000}{100} \times 20$ $= \$20\,000$	\$21\,250.00
200	$= \frac{200}{2} \times 100 \times 0.25$ $= \$2\,500$	$= \frac{100\,000}{200} \times 20$ $= \$10\,000$	\$12\,500.00
300	$= \frac{300}{2} \times 100 \times 0.25$ $= \$3\,750$	$= \frac{100\,000}{300} \times 20$ $= \$6\,666.66$	\$10\,416.66
400	$= \frac{400}{2} \times 100 \times 0.25$ $= \$5\,000$	$= \frac{100\,000}{400} \times 20$ $= \$5\,000$	\$10\,000.00
500	$= \frac{500}{2} \times 100 \times 0.25$ $= \$6\,250$	$= \frac{100\,000}{500} \times 20$ $= \$4\,000$	\$10\,250.00

Observe que el pedido de 400 unidades produce el costo total mas bajo. Si se compara el costo de almacenamiento con el costo de orden, se concluye que al nivel de 400 unidades estos dos costos son iguales. De este modo podemos deducir la fórmula del lote económico

$$C_a = C_o$$

$$\frac{q_o}{2} \times U \times I = \frac{Q}{q} \times c_1$$

$$q^2 = \frac{2Qc_1}{UI}$$

$$q_o = \sqrt{\frac{2Qc_1}{UI}}$$

o bien =  $\sqrt{\frac{2Qc_1}{c_2}}$

Apliquemos esta ecuación a nuestro ejemplo:

$$q_o = \sqrt{\frac{2Qc_1}{UI}}$$

$$= \frac{2 \times 100\,000 \times 20}{100 \times 0.25}$$

$$= 400 \text{ unidades por pedido}$$

## EMPLEO DE LA FORMULA DEL LOTE ECONOMICO

Seria muy monotono y a menudo inexacto aplicar esta formula a cada articulo, debido a que el consumo anual, el costo unitario y las condiciones de almacenamiento varian de un articulo a otro. Para remediar este problema, deben reagruparse los articulos según ciertos criterios (por ejemplo método ABC), y posteriormente debe aplicarse la fórmula a cada grupo. Se trata por tanto de la aplicación uniforme de una política y no de una fórmula.

En el momento de emplear la formula del lote economico deben tenerse en cuenta los siguientes elementos de modificación o de apreciación

a) **Redondeo de las cantidades.** Cuando la cantidad que resulta del calculo no es un numero entero, a menudo debe redondearse. Es incómodo hacer 3 1/2 o 6 1/4 pedidos, debe elegirse entre 3 y 4 en el primer caso y optar por 6 en el segundo. Es igualmente necesario que la cantidad total de unidades por ordenar sea un número entero.

b) **Ajustes por comodidad.** Si la cantidad económica de pedidos para un articulo es de 4 docenas, pero el embalaje habitual se hace para 5 docenas, un embalaje especial puede generar gastos suplementarios y causar errores de conteo.

c) **Ajustes para obtener descuentos por cantidad.** (Véase más adelante.)

## LIMITES DE ESTA FORMULA

La fórmula del lote económico no es recomendable más que en ciertos casos, debido a la inexactitud de los resultados. Pueden citarse los siguientes casos:

- productos cuyo precio fluctúa mucho,
- productos cuya tasa de utilización varía frecuentemente,
- productos cuya utilización no puede preverse con un grado razonable de exactitud.

## EL DESCUENTO POR CANTIDAD Y EL LOTE ECONOMICO

A menudo es posible obtener una disminución significativa del costo unitario cuando se ordena una cantidad ligeramente superior a la del lote económico.

En este caso, se calcula primero el lote económico sin tener en cuenta la posibilidad de descuentos, y posteriormente se evalúa el costo total anual de la cantidad que daría derecho a un descuento. Finalmente se elige aquella cantidad cuyo costo sea el más bajo.

Ejemplo.

Consumo anual	10 000 unidades
Costo unitario:	\$10
Costo de almacenamiento	25% del valor del inventario promedio
Costo por pedido	\$20

El proveedor concede los siguientes descuentos

0 a 999 unidades:	\$ 10 00
1 000 a 1 999 unidades	\$ 9 95
2 000 a más:	\$ 9 90

**Solución:**

a) Cálculo del lote económico:

$$q_0 = \sqrt{\frac{2 Q c_1}{U I}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 10\,000 \times 20}{10 \times 0.25}} = 400 \text{ unidades}$$

b) Se tiene la opción entre:

400 unidades a \$ 10.00	1 000 unidades a \$ 9 95	2 000 unidades a \$ 9 90
-------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

Con ayuda de la siguiente tabla procedamos al análisis de estas tres ofertas

	400 unidades	1 000 unidades	2 000 unidades
Costo anual de compra	\$ 100 000	\$ 99 500	\$ 99 000
Costo de almacenamiento	\$ 500	\$ 1 243 75	\$ 2 475
Costo de orden	\$ 500	\$ 200	\$ 100
Costo total	\$ 101 000	\$ 100 943 75	\$ 101 575

c) Desde el punto de vista estrictamente económico, la elección será consecuentemente la del pedido de 1 000 unidades a \$9 95

## POLITICA DE ADMINISTRACION DE INVENTARIOS

Esta política consiste en el conjunto de reglas y procedimientos que aseguran la continuidad de la producción de una empresa, permitiendo una seguridad razonable en cuanto a la escasez de materia prima e impidiendo el exceso de inventarios, con el objeto de mejorar la tasa de rendimiento.

Esta política puede variar de una empresa a otra, de un periodo a otro, y de un producto o grupo de productos a otro. Su éxito reside en el respeto de los siguientes imperativos:

- Establecer relaciones exactas entre las necesidades probables y los abastecimientos de diferentes productos
- Definir categorías para el inventario y clasificar cada mercancía en la categoría adecuada.

- Mantener los costos de abastecimiento y almacenamiento al mas bajo nivel posible
- Mantener un nivel adecuado de inventarios
- Satisfacer rápidamente la demanda
- Recurrir a la informática

La política de administración de los inventarios debe también estar adaptada al sistema de producción. Las necesidades de materiales y de servicios no son las mismas para la producción en serie y para la producción intermitente o por unidad. La administración de los inventarios para cada uno de estos sistemas se estudiara en los capítulos dedicados a la planificación.

## RESUMEN

El almacenamiento es una forma de asegurar la continuidad de las operaciones del sistema de producción. Pueden distinguirse cuatro categorías de productos por almacenar: inventario de fabricación, inventario de productos en curso, inventario de productos terminados e inventario MRO.

Para administrar mejor los inventarios, éstos deben clasificarse por orden de valor monetario según el método ABC. También es posible establecer reglas de administración para cada clase de productos. La regla de administración debe definir los niveles de inventarios, el inventario activo, el inventario de seguridad, el punto de reorden, la tasa de agotamiento, la tasa de reaprovisionamiento y la demora de la entrega.

Los costos relativos al inventario son los de aprovisionamiento, almacenamiento y escasez. El cálculo del lote económico es una forma de reducirlos.

## Preguntas

- 1 Para una empresa diga cuál es la importancia de cada una de las siguientes categorías de inventarios: materias primas, productos en curso, productos MRO y productos terminados.
- 2 Describa el método ABC que se utiliza para el control de los inventarios.
- 3 ¿En qué consiste la regla de administración de inventarios?
- 4 ¿Que funciones tiene el inventario de seguridad?
- 5 ¿Se ve afectado el punto de reorden de un producto por el nivel del inventario de seguridad?
- 6 Indique la fórmula del punto de equilibrio.
- 7 ¿Cuáles son las dos formas de concebir el nivel de servicio?
- 8 ¿Es el costo de almacenamiento directa o inversamente proporcional a la cantidad almacenada?
- 9 ¿Es compatible el cálculo del lote económico con el método ABC?
- 10 Explique los límites de la utilización de la fórmula del lote económico.

1. Un fabricante necesita 40 000 circuitos impresos por año para la elaboración de cierto producto. El estima que el costo de orden es de \$20 por pedido y que el costo de almacenamiento es del 20% del valor promedio del inventario. Si el costo unitario es de \$2, calcule
- la cantidad económica de la orden.
  - el costo de almacenamiento, el costo de orden y el costo total.
  - el número de pedidos por año.
2. Los siguientes artículos han sido registrados en el fichero (kárdex) de una compañía así como su costo anual de compra

No	Código	Costo anual
1	M 07	\$ 32 000
2	N 14	\$ 1 200
3	M 23	\$ 37 000
4	O 26	\$ 14 000
5	P 36	\$ 108 000
6	M 37	\$ 3 700
7	N 45	\$ 28 000
8	P 53	\$ 19 000
9	O 77	\$ 8 100
10	P 84	\$ 65 000

Se desea que usted:

- clasifique estos artículos según el método ABC;
  - indique el valor monetario y el porcentaje de cada clase.
  - calcule la cantidad económica por ordenar del artículo P 36, cuyo costo unitario es de \$ 20, sabiendo que el costo de orden es de \$ 50 por pedido y el costo anual de almacenamiento es de \$5 por unidad.
3. Una compañía desea establecer una regla de administración de inventarios para un producto cuyo consumo anual se eleva a aproximadamente \$250 000. Después de un estudio detallado de los principales registros contables, se ha colectado la siguiente información:

Consumo estimado para el año de 1981	105 000 unidades
Costo unitario promedio	\$2.50
Alquiler del almacén	\$0.25/unidad
Costo de preparación de un pedido	\$21.50/pedido
Seguro de los inventarios	10% de su valor
Costo promedio de recepción	\$20/pedido
Gastos postales	\$0.50/pedido
Pérdidas por deterioro	2%
Falta de ganancia en intereses	10%

Calcule.

- el costo de orden y almacenamiento.
- la cantidad económica por ordenar para el año de 1981.
- el costo de aprovisionamiento y de almacen.
- la cantidad por ordenar, considerando la hipótesis de los siguientes descuentos por cantidad:

1 a 9 999	\$2.50 por unidad
10 000 a 19 999	\$2.40 por unidad
20 000 o más	\$2.35 por unidad

4. Usted debe proporcionar a sus clientes, todos los lunes, un promedio de 400 unidades de cierto producto. Usted obtiene dicho producto de un fabricante a \$60 por unidad. El costo de orden y de transporte es de \$ 150 por pedido. El costo de almacenamiento se estima en un 20% del costo de los productos almacenados. Hay 50 semanas de trabajo en el año. Usted desea elaborar una regla de administración de inventarios para determinar
- la cantidad económica por ordenar.
  - el costo total de aprovisionamiento y almacenamiento.
  - el punto de reorden y el nivel máximo del inventario, teniendo en cuenta que usted desea mantener 5 unidades como inventario de seguridad y que la demora promedio de la entrega es de una semana.

## Estudio de un caso práctico

### La compañía "Hany Ltée"

Las operaciones de la línea de ensamble del producto LT 13146 de esta compañía se encuentran actualmente detenidas a causa de la escasez de una de las componentes electrónicas del producto. Esta compañía se dedica a fabricar aparatos para el hogar.

El director de producción (D Pr), después de haber tomado conocimiento del incidente, ha convocado a su oficina al director de planificación (D Pl) y al director de aprovisionamiento (D A.) a fin de encontrar las causas del incidente y proponer una solución. En seguida presentamos la conversación que mantuvieron.

- D A — Se han seguido todos los procedimientos de compra. esa demora no se previó en nuestras diligencias. Se trata de un error. estoy seguro.
- D Pr. — ¿Ha previsto usted por lo menos un inventario de seguridad para este tipo de componente?
- D Pl — No, dada la constante evolución tecnológica de la industria electrónica y el elevado costo de obsolescencia de las componentes electrónicas, hemos preferido no mantener inventarios de seguridad.
- D Pr — ¿Ha evaluado usted cuánto costará este incidente a la compañía?

- D Pl. — Aproximadamente \$500 dolares en salarios y gastos fijos por día. No he añadido a este costo las posibles pérdidas de ventas ocasionadas por el retardo de la entrega
- D A — El costo ha sido bajo esta vez, porque nuestro proveedor también ha tenido problemas de abastecimiento, y deberemos aguardar hasta la fabricación del lote ordenado, lo cual no ocurrió en el anterior periodo de escasez
- D Pr — Les he convocado aquí el día de hoy para poner fin a la repetición de estas situaciones. Opino que debe redefinirse la política de almacenamiento de componentes electrónicas
- D Pl. — Actualmente estoy estudiando la reformulación de la regla de administración de inventarios referente a las componentes electrónicas. He colectado la información necesaria para la evaluación de esta regla (vea la tabla siguiente). El procedimiento que me propongo seguir consta de tres etapas:

1. Calcular el lote económico para cada componente cuyo costo anual de compra sea superior a \$10 000
2. Calcular el nivel máximo del inventario añadiendo al lote económico el inventario de seguridad, que es igual a la cantidad mínima calculada según una de las tres siguientes fórmulas.

- a) El costo de compra de las componentes inmovilizadas en el inventario de seguridad debe ser igual o inferior al costo de detención de la línea de producción:

$$IS = \frac{\text{costo de detención por día}}{\text{costo unitario de compra}}$$

- b)  $IS = 1/2 \text{ tasa de utilización} \times \text{demora de la entrega}$   
 c)  $IS = (\text{tasa de utilización} \times \text{porcentaje de variación}) \times \text{demora de la entrega}$

3. Determinar el punto de reorden con ayuda de la fórmula  
 Punto de reorden =  $IS + (\text{tasa de utilización} \times \text{demora de la entrega})$

Artículo	Codigo de la componente	Consumo anual (unidades)	Costo unitario promedio (\$)	Tasa de utilización		Demora de la entrega (días)	Costo de detención de la producción (\$/día)
				Unidades / día	Porcentaje de variación		
1	RT — 101	144 000	0.30	600	8%	12	\$ 350
2	HT — 201	240 000	0.24	1 000	5%	10	\$ 420
3	ST — 301	12 000	1.00	50	15%	20	\$ 220
4	LT — 401	132 000	0.40	550	10%	10	\$ 350

- D A — Usted no ha considerado, en su procedimiento, el descuento por cantidad que los proveedores nos ofrecen algunas veces
- D Pr. — Pienso que, por el momento, este descuento no debe tomarse en cuenta en la definición de la regla de administración, y que cada situación debe ser evaluada independientemente (*Mirando al director de planificación*) ¿Que piensa usted?
- D Pl. — Tiene usted razón, pero es necesario que mi informe prevea las actitudes que deberán tomarse en estos casos particulares
- D Pr. — Bien, ¿cuándo estará listo su informe?
- D Pl. — Haré todo lo que pueda, lo tendrá usted en cuanto esté terminado
- D Pr. — (*Sonriendo*) Espero que no haya demoras en su entrega

## Preguntas

- ¿Qué piensa usted del procedimiento propuesto por el director de planificación?
- Elabore un informe que contenga los detalles de la aplicación de esta regla de administración para cada una de las componentes
- ¿Qué actitud propondría usted considerando la hipótesis de un descuento por cantidad?

## BIBLIOGRAFIA

1. Antier, P., *Conseils pratiques pour la gestion des stocks* Paris Dunod 1967
2. Briggs, P.G., O.L. Dares et P.J. Harrison, *Les stocks et la gestion des stocks* Paris Entreprise moderne d'édition, 1970
3. Buchan, J. et E. Koenigsberg, *Gestion scientifique des stocks* Paris Eyrolles 1963
4. Fernier, J., *La gestion scientifique des stocks*, Paris Dunod 1966
5. Killen, L., *Techniques de gestion des stocks*, Paris Bordas, 1971
6. Rambaux, A., *Gestion économique des stocks*, Paris Dunod 1969
7. Starr, M.K. et D.M. Miller, *La Gestion des stocks* Paris Dunod 1966

# 10

## La planificación global

### OBJETIVOS

Después de haber estudiado este capítulo, el lector deberá ser capaz de

- definir el cometido de la planificación global,
- identificar los problemas de la planificación global,
- aplicar las técnicas de planificación,
- describir los elementos constitutivos del sistema de planificación global

### TERMINOLOGIA

costo diferencial de producción  
planificación  
PGP  
maquila  
estrategia de producción

## INTRODUCCION

La planificación es una etapa esencial que precede a los trabajos y engloba un objetivo determinado. Estos planes futuros de acción se inscriben dentro de un contexto dinámico que lleva al administrador a ajustar sus planes al ritmo de los cambios.

La planificación es una etapa esencial que precede a los trabajos y engloba todas las previsiones inherentes a la elaboración de planes de acción eficaces.

La planificación se hace a largo plazo (construcción de una nueva fábrica, expansión de la gama de productos), a plazo mediano (elaboración de los planes de producción y de venta) y a corto plazo (calendario de producción), así como a diferentes niveles del sistema de producción. Cada tipo de planificación responde a cierta necesidad de información y de control del administrador. La planificación global define, para un periodo determinado, las orientaciones de la empresa en materia de producción de bienes y servicios. Aquí estudiaremos la planificación a corto y a mediano plazos (dos años o menos) para el conjunto de la empresa.

La finalidad de la planificación global es evaluar el conjunto de recursos materiales, humanos y financieros necesarios para las operaciones de producción de un periodo dado. El principal objetivo es satisfacer, al más bajo costo posible, las previsiones de demanda de este periodo.

La realización de este objetivo está sujeta a restricciones internas y externas. La política de la empresa en materia de mano de obra, horas suplementarias, almacenamiento y nivel de servicio a la clientela constituyen las restricciones internas. Las restricciones externas provienen de las condiciones tecnológicas —las cuales limitan la capacidad técnica de producción— y de la situación sociológica, económica y de la competencia, las cuales condicionan las variaciones de la demanda.

El programa general de producción (PGP), el cual analizaremos en este capítulo, es el resultado de la planificación global. Se elabora a partir de las previsiones de la demanda para el conjunto de productos ofrecidos por la empresa, y define las cantidades por producir, los niveles de inventario y la composición de la mano de obra para cada periodo.

## ELABORACION DE UN PGP

### INFORMACION BASICA

En la figura 10-1 se da la lista de los elementos de información necesarios para elaborar un PGP. A fin de coleccionar esta información se requiere ante todo elaborar los documentos de registro para los datos de cada departamento.

El departamento de mercadotecnia elaborará las previsiones de la demanda. El departamento de contabilidad se ocupará de los costos de producción. El departamento de planificación y control de la producción determinará la capacidad de producción y los niveles apropiados de inventario. Este último departamento también deberá, dependiendo de los cambios en la información básica, rectificar los planes de producción.

a) **Previsiones de la demanda** En una empresa que fabrique un solo producto, el PGP puede elaborarse a partir de las previsiones de la demanda para este producto. Sin embargo, es una empresa que tenga varios productos, debe primero encontrarse una unidad de medida común. De tal modo, para un fabricante de pinturas, la unidad de medida de la demanda será el número total de galones por año, para un taller mecánico, el número de horas-hombre o de horas-máquina por año, para un hospital, el número de camas ocupadas durante el año; para una tienda menudista, la cifra anual de ventas.

b) **Niveles de inventario** Debe determinarse el nivel del inventario de productos terminados para el principio y para el final del periodo de planificación. Según los niveles fijados, la cantidad por producir durante el periodo será más o menos elevada. La determinación de estos niveles depende principalmente de la estabilidad de la demanda. Consecuentemente, cuando la demanda del mes debe ser satisfecha al principio del mes y la producción no se hace disponible sino hasta el final de dicho mes, es necesario prever un inventario final. De tal modo, si se planifica la producción para el periodo de enero a diciembre de 1981, deberá preverse un inventario final equivalente a la demanda de enero de 1982.

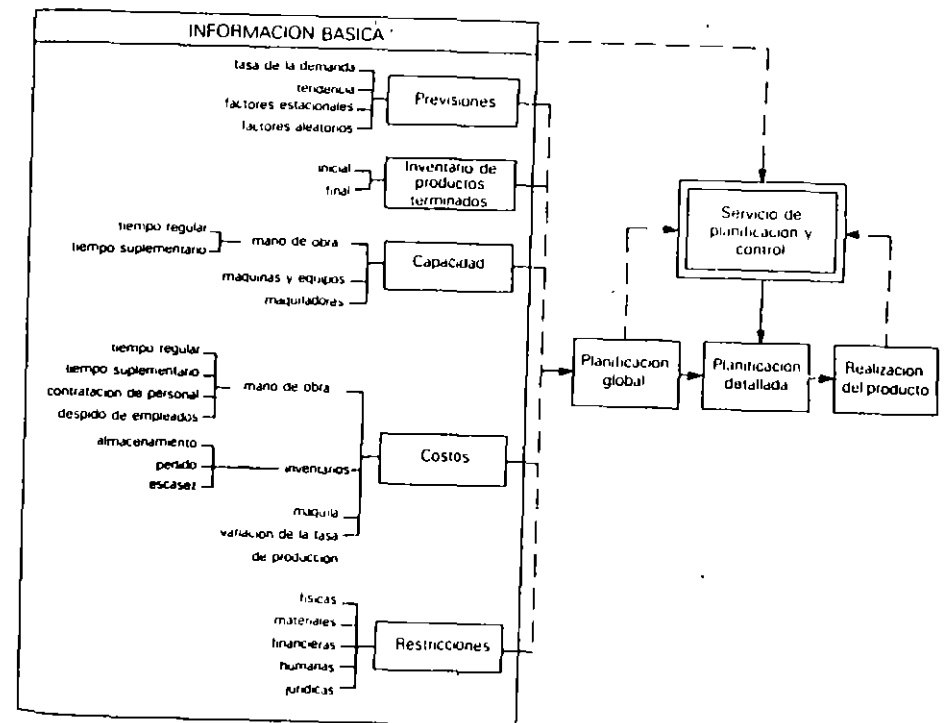


Fig 10-1  
Información necesaria para la elaboración de un PGP



c) **Capacidad de producción.** Los informes relativos a la capacidad de producción pueden dividirse en tres categorías: mano de obra en tiempo regular y suplementario, maquinaria y maquila. Es a partir de esta información como se evaluarán los medios de responder a la demanda.

En el capítulo 5 se mostró la forma en que se determina la capacidad de producción para una demanda. Se trata ahora de ajustar las variaciones de la demanda en el transcurso del periodo de interés. Este ajuste debe hacerse al menor costo y respetando ciertas restricciones físicas, financieras, humanas y jurídicas.

d) **Costos de producción.** Una vez que el PGP se ha juzgado técnicamente realizable, se calculan sus costos diferenciales al nivel de la mano de obra, los inventarios, la maquila y la variación de la tasa de producción, para elegir posteriormente el más económico y el menos restrictivo. Los elementos que deberá proporcionar el departamento de contabilidad para evaluar el costo de producción son:

- **Costo de la mano de obra.** Este es el salario por hora de los empleados en tiempo regular y suplementario. Debe añadirse el costo de adiestramiento y de falta de productividad debido a la contratación de nuevos empleados, así como las compensaciones salariales que se pagan en el momento de un despido.
- **Costos de almacenamiento.** Los costos de almacenamiento, de orden y de escasez se definieron en el capítulo anterior. Estos forman parte integrante del costo diferencial de producción, y afectan las decisiones referentes a los niveles de inventario del PGP.
- **Costo de la maquila.** Este es el precio establecido por un maquilador o un subcontratista. Ciertas empresas se ven obligadas a mandar fabricar una parte o la totalidad de su producción en maquila. Las razones para ello pueden ser que la demanda rebasa la capacidad máxima de la fábrica durante ciertos periodos, que la demanda del producto sea incierta, que las ventajas económicas de esta fórmula sean importantes, que la fábrica carezca de espacio para fabricar o almacenar su producto, etc.
- **Costo de la variación de la tasa de producción.** Algunas veces la empresa debe aumentar o reducir su capacidad productiva. La modificación de esta capacidad siempre ocasiona ciertos costos. Por ejemplo, un aumento de capacidad ocasiona gastos administrativos suplementarios así como costos de contratación y adiestramiento de personal, una reducción de la capacidad propicia costos por despido o costos de mano de obra improductiva.
- **Restricciones.** Cuando se habla de un PGP técnicamente realizable, se entiende un programa que respeta las restricciones del sistema de producción. Algunas de estas restricciones son propias del sistema, como el espacio de producción y almacenamiento, el número de máquinas, equipos y herramientas, los límites de tiempo suplementario, las reglas del contrato

colectivo y las disponibilidades financieras. Otras restricciones provienen del exterior, como el salario mínimo, las leyes laborales, la tecnología y la competencia.

## ESTRATEGIA DE PRODUCCION

Esta se puede definir como el arte de combinar racional y económicamente las variables del sistema productivo dentro de un plan de acción que tenga como finalidad satisfacer la demanda.

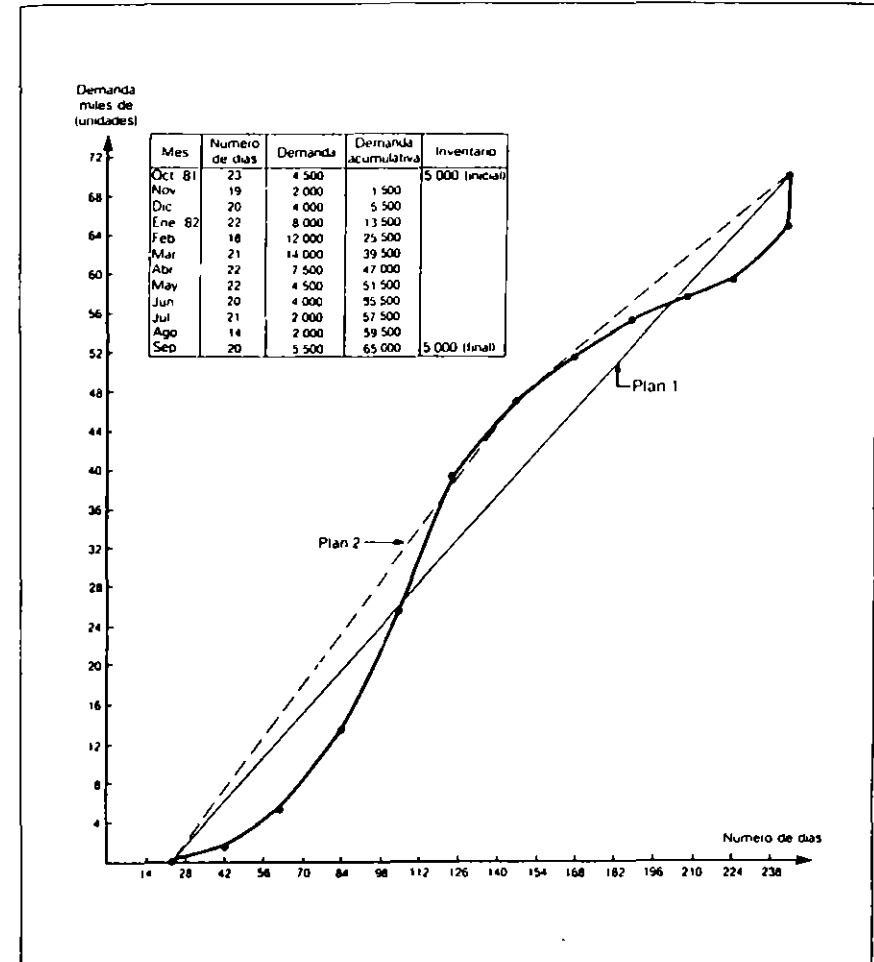


Fig. 10-2  
Curva acumulativa de la demanda

He aquí algunos ejemplos de estrategias de las cuales puede servirse la empresa según la naturaleza de los recursos

- Variar el nivel de la mano de obra según la variación de la demanda (lo cual genera costos de contratación de personal, de despido y de variación de la producción).
- Emplear la mano de obra en tiempo suplementario y suprimir el tiempo improductivo.
- Aumentar los niveles de inventarios (lo cual genera costos de almacenamiento)
- Aceptar los costos de escasez.
- Recurrir a la maquila.
- Utilizar técnicas de comercialización (lo cual genera costos de promoción y de publicidad).

Una empresa que desee variar su capacidad de producción en función de la demanda recurrirá a la primera estrategia. Si decide mantener un nivel constante de mano de obra, se servirá de una o varias de las otras estrategias.

## MÉTODOS DE ELABORACION DE UN PGP

Varios métodos sirven para elaborar un PGP: métodos gráfico y de transporte (programación lineal), reglas de decisión lineal y de investigación de una decisión óptima (programación dinámica), y métodos heurísticos.

Nosotros contemplaremos aquí los métodos gráficos y de transporte, los cuales se adaptan bien al contexto de la pequeña y mediana empresa (Para más información sobre los demás métodos, vea la bibliografía al final del capítulo.)

a) **Método gráfico.** Este método permite analizar las variaciones de la demanda con ayuda de una curva acumulativa\* a fin de encontrar la mejor forma de satisfacer esta demanda. Según la política de la empresa y a partir de un criterio económico se definirá la mejor estrategia de producción, es decir, el programa general de producción más económico. Mediante el ejemplo que se presenta a continuación, veamos las etapas del método gráfico.

En la tabla de la figura 10-2 se dan las previsiones de la demanda para el periodo de octubre de 1981 a septiembre de 1982 y el número de días laborables por mes. Elaboremos un PGP lo más económico posible teniendo en cuenta la siguiente información:

### Capacidad de producción:

- en tiempo regular:
  - máxima 350 unidades/día
  - mínima 200 unidades/día
- en tiempo suplementario: 20% de la capacidad del tiempo regular

\* En teoría estadística esta curva suele denominarse curva (N del T)

— en maquila 300 unidades/día

— Actualmente, la capacidad en tiempo regular es de 300 unidades por día. La adición o eliminación de un empleado equivale a una variación de 15 unidades por día.

### Nivel de inventario

- inventario inicial disponible 5 000 unidades
- inventario final deseado 5 000 unidades

### Costos:

- en tiempo regular \$ 5 00/unidad
- en tiempo suplementario \$ 5 50/unidad
- en maquila \$ 6 00/unidad
- de contratación de personal \$ 250 00/empleo
- de despido de empleados \$ 300 00/empleo
- de almacenamiento \$ 0 10/unidad/periodo
- de escasez y demora de entrega \$ 1 20/unidad/periodo

### Solución

- Debe primeramente construirse la curva acumulativa de la demanda, teniendo en cuenta los inventarios inicial y final
- Después debe analizarse la curva acumulativa de la demanda y tratar de encontrar diferentes soluciones para responder a la demanda. Las líneas punteadas de la figura 10-2 representan las dos primeras soluciones (1o y 2o. planes)

1er PLAN. Se utilizará una sola tasa promedio de producción durante el año (fig 10-3).

Periodo	Número de días	Tasa de producción	Producción				Demanda	Inventario		Costos	
			TR	TS	MA	Total		inicial	final	Escasez	Almacenamiento
A	B	C	D = B x C	E	F	G = D + E + F	H	I = J - I - H	J = G + I	K = (I) x 1 20	L = I x 0 10
Estado inicial									5 000		
Octubre	23	300	6 900			6 900	4 500	500	7 400		50
Noviembre	19	300	5 700			5 700	2 000	5 400	11 100		540
Diciembre	20	300	6 000			6 000	4 000	7 100	13 100		710
Enero	22	300	6 600			6 600	6 000	5 100	11 700		510
Febrero	18	300	5 400			5 400	12 000	(300)	5 400	420	
Marzo	21	300	6 300			6 300	14 000	(8 900)	6 300	10 680	
Abril	22	300	6 600			6 600	7 500	(10 100)	6 600	12 120	
Mayo	22	300	6 600			6 600	4 500	(15 000)	6 600	9 600	
Junio	20	300	6 000			6 000	4 000	(15 400)	6 000	6 480	
Julio	21	300	6 300			6 300	2 000	(11 400)	6 300	1 680	
Agosto	14	300	4 200			4 200	2 000	2 900	7 100		290
Septiembre	20	300	6 000			6 000	5 500	1 600	7 600		160
								2 600			
										40 980	2 260
										Costo diferencial total: \$ 43 740	

Fig 10-3

Programa general de producción a una sola tasa promedio

$$\begin{aligned} \text{Tasa promedio de producción} &= \frac{\text{demanda total} - \text{inventario inicial} + \text{inventario final}}{\text{número total de días}} \\ &= \frac{70\,000 - 5\,000 + 5\,000}{242} \\ &= \frac{70\,000}{242} = 290 \text{ unidades/día} \end{aligned}$$

Nota: Ya que esta tasa promedio está cerca de la tasa actual (300), utilizaremos esta última para nuestros cálculos.

2o. PLAN: Se elegirán dos tasas de producción para el año y se contratará tiempo suplementario cuando sea necesario (fig. 10-4).

$$\text{— Primera tasa} = \frac{47\,000}{145} = 325 \text{ unidades/día}$$

Nota: La adición de un empleado, que significa un aumento de 15 unidades por día, puede redondearse a 330 unidades.

$$\text{— Segunda tasa} = \frac{70\,000 - 47\,000}{242 - 145} = \frac{23\,000}{97} = 238 \text{ unidades/día}$$

Nota: Sería preferible que la tasa anterior (la cual tiene el efecto de aumentar el inventario) se redondeara a 200 unidades por día

3er. PLAN: Se adoptará la tasa mínima de 200 unidades por día con la contratación de maquiladores a fin de reducir la escasez.

Periodo	Número de días	Tasa de producción	Producción				Demanda	Inventario		Costos									
			TR	TS	MA	total		inicial	final	TS	escasez	almacenam	contr. de per	desp. de emp					
Estado inicial		300						5 000											
Octubre	23	330	7 590			7 590	4 500	500	6 090				50						
Noviembre	19	330	6 270			6 270	2 000	6 090	12 360				609						
Diciembre	20	330	6 600	1 370		7 970	4 000	8 360	16 280	660			836						
Enero	22	330	7 260	1 452		8 712	6 000	8 280	16 992	775			826						
Febrero	18	330	5 940	1 188		7 128	12 000	4 892	12 120	594			499 20						
Marzo	21	330	6 830	1 386		8 216	14 000	(1 880)	8 316	683	2 256								
Abril	22	330	7 260			7 260	7 500	(1 064)	7 260		1 276 80								
Mayo	22	200	4 400			4 400	4 500	1 696	6 096				169 60						2 700
Junio	20	200	4 000			4 000	4 000	2 096	6 096				209 60						
Julio	21	200	4 200			4 200	2 000	4 096	8 296				409 60						
Agosto	14	200	2 800			2 800	2 000	6 296	9 096				629 60						
Septiembre	20	200	4 000			4 000	5 000	3 596	7 596				359 60						
Costo diferencial total										2 673	3 532 80	4 600 20	500	2 700					
															\$ 14 006 00				

Fig 10-4 Programa general de producción con dos tasas de producción

- Posteriormente, deben definirse las hipótesis de trabajo necesarias para el cálculo de los niveles de inventario al inicio y al final de un periodo. Estas hipótesis se refieren al momento de la disponibilidad de la producción y al de la satisfacción de la demanda. El que la producción de un mes esté disponible al final de dicho mes, y que la demanda del mismo mes deba satisfacerse al principio de él significa que la demanda de un mes quedará normalmente cubierta por la producción del mes anterior. Se necesita por tanto un inventario inicial y un inventario final. Esta hipótesis es principalmente aplicable a los productos de consumo popular. Para los productos cuyo modelo se renueva al final de cada año, y cuando no se pretenda almacenar estos productos en el inventario final, la hipótesis será que la producción estará disponible al final del mes y la demanda será satisfecha al final del mismo mes.
- En seguida deben calcularse las cantidades por producir y los niveles de inventario al principio y al final de cada periodo para los tres planes (figs 10-3, 10-4 y 10-5)
- Deben calcularse también los costos diferenciales para cada plan, y debe elaborarse una tabla sintética de estos costos (fig 10-6)
- Finalmente deben analizarse las ventajas y desventajas de cada plan, y elegirse el plan que responda mejor a las exigencias y objetivos de la empresa

b) Método del transporte. El método de transporte fue presentado en el capítulo 6, cuando se realizó el estudio de la localización. Haciendo algunas modificaciones a la matriz, este método puede emplearse para elaborar un programa general de producción. La demanda de un producto se considera la restricción referente al destino, y la capacidad de producción se considera la restricción de la fuente. Los costos de fabricación en tiempo regular, el tiempo suplementario y en tiempo de maquila se indican en la esquina derecha de su casilla respectiva. El costo de almacenamiento se suma al costo de fabrica-

Vease la figura 6-6, pág 116

Periodo	Número de días	Tasa de producción	Producción				Demanda	Inventario		Costos									
			TR	TS	MA	total		inicial	final	TS	escasez	almacenam	maquil.						
Estado inicial																			
Octubre	23	200	4 600			4 600	4 500	559	3 641										
Noviembre	19	200	3 800			3 800	2 000	3 100	6 640				50						
Diciembre	20	200	4 000			4 000	4 000	2 900	8 000				310						
Enero	22	200	4 400	1 100		5 500	8 000	0	12 000				290						
Febrero	18	200	3 600	10 400		14 000	12 000	0	14 000				1 100						
Marzo	21	200	4 200	3 300		7 500	14 000	0	14 000				7 600						
Abril	22	200	4 400	100		4 500	7 500	0	4 500				3 300						
Mayo	22	200	4 400			4 400	4 500	0	4 500				100						
Junio	20	200	4 000			4 000	3 000	419	4 420				43						
Julio	21	200	4 200			4 200	2 000	2 431	6 600				242						
Agosto	14	200	2 800			2 800	2 000	4 171	7 200				440						
Septiembre	20	200	4 000			4 000	5 000	1 750	5 700				170						
Costo diferencial total										1 540	24 340								
															\$ 25 580 00				

Fig 10-5 Programa general de producción con maquila

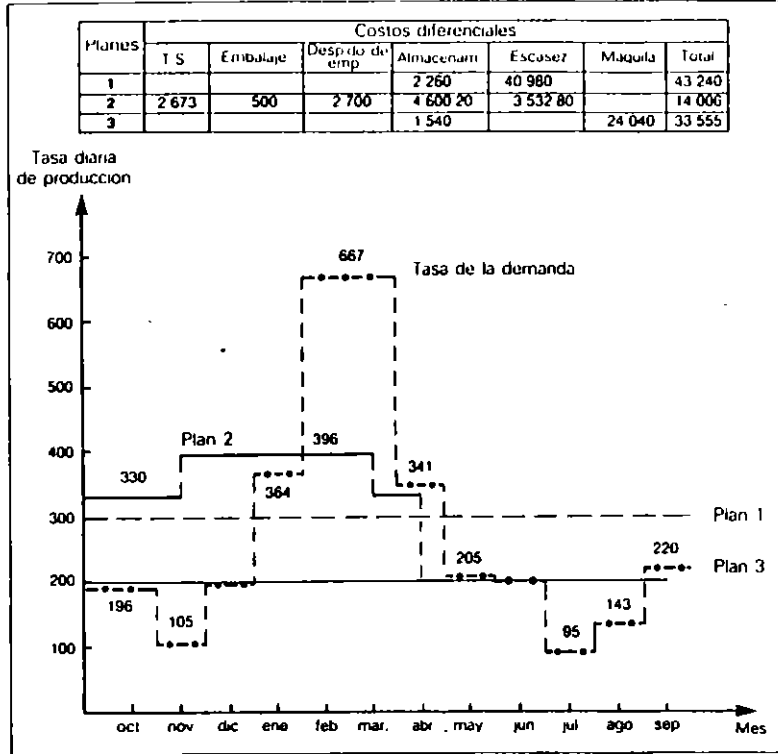


Fig. 10-6  
Comparación de la tasa de producción con la tasa diaria de la demanda

ción cuando los productos no se agotan en el periodo de su producción. Por ejemplo, en el periodo 2 de la figura 10-7 se han fabricado, en tiempo regular, 72 unidades del producto A; se agotan 60 unidades en el mismo periodo, pero se almacenan 12 unidades hasta el periodo 3. Consecuentemente, su costo unitario de fabricación aumenta \$ 0.10.

Los costos de contratación de personal, de despido y de escasez no figuran en esta matriz, ya que la escasez de mercancía y el retardo en la entrega son inadmisibles en la resolución de este problema. Ello significa que la producción de los meses subsiguientes no puede satisfacer la demanda del mes actual. Es este el motivo por el que las casillas que se encuentran abajo de la diagonal de la matriz y ciertas casillas correspondientes a la maquila están vacías o ausentes, ya que representan posibilidades inadmisibles para este caso.

Debe notarse en la figura 10-7 que la capacidad disponible rebasa la demanda total, y la diferencia (62 unidades) se inscribe en la casilla de la capacidad desaprovechada.

**Ejemplo** Habiendo proyectado las previsiones de la demanda de los productos A y B para los tres meses próximos, una compañía desea elaborar un

Periodo	Producto	1		2		3 + inventario final		Capacidad desaprovechada sin usar	Capacidad disponible
		A	B	A	B	A	B		
Inventario inicial		0	0	0	10	0	20	0	42
		25	17						
1	T R	6.00	7.00	6.10	7.15	6.20	7.30	3.00	150
	T S	113	37	9.10	10.15	9.20	10.30	0	30
2	T R			6.00	7.00	6.10	7.15	3.00	150
	T S			60	78	12	9.10	0	30
3	T R					6.00	7.00	3.00	150
	T S					83	67	0	30
Demanda		138	54	60	78	70 + 25	80 + 15	62	582

Fig. 10-7  
Metodo del transporte, empleado en la planificación global

programa de producción que satisfaga la totalidad de la demanda al más bajo costo posible. Los dos productos comparten la mismas instalaciones de producción. He aquí la información disponible:

Productos	Previsiones			Capacidad (unidades/mes)		Inventario		Costo		
	1	2	3	T.R.	T.S.	inicial	final	T.R.	T.S.	Almacena- miento (unidad/ periodo)
A	138	60	70		30	25	25	\$ 6	\$ 9	\$ 0.10
B	54	78	80	150		17	15	\$ 7	\$ 10	3 \$ \$ 0.15

**Solución:** Con ayuda de estos datos se construye una matriz de costos (fig 10-7). Notemos que el costo inicial de almacenamiento para el periodo 1 es nulo, puesto que existe un agotamiento inmediato. Sin embargo, si el inventario del producto A se agota en el periodo 2, el costo de almacenamiento que deberá añadirse es de \$ 0.10 por unidad por periodo. Para el periodo 3, este costo será de \$ 0.20 para el mismo producto (El inventario final exigido será sumado a la demanda del periodo 3).

Para resolver el problema, se afectan las casillas de los valores cuya suma respeta las restricciones de esquina (capacidad disponible y demanda). Por ejemplo, con relación al inventario inicial del producto A, dado que son 25 las unidades, se deberán producir 113 unidades en el curso del periodo si se desea satisfacer la demanda de 138 correspondiente al mismo periodo.

Para calcular el costo del programa, se empieza por multiplicar el número de cada casilla por su costo respectivo. Posteriormente se suman todos estos resultados:

$$113 \times 6 + 37 \times 7 + 60 \times 6 + 78 \times 7 + 12 \times 6 + 10 + 83 \times 6 + 67 \times 7 + 28 \times 10 = 678 + 259 + 360 + 546 + 73.20 + 498 + 469 + 280 = \$ 3 163 20$$

## SISTEMA DE PLANIFICACION GLOBAL

En la figura 10-8 se muestran los elementos constitutivos de un sistema de planificación global cuya función es la de elaborar un programa general de producción

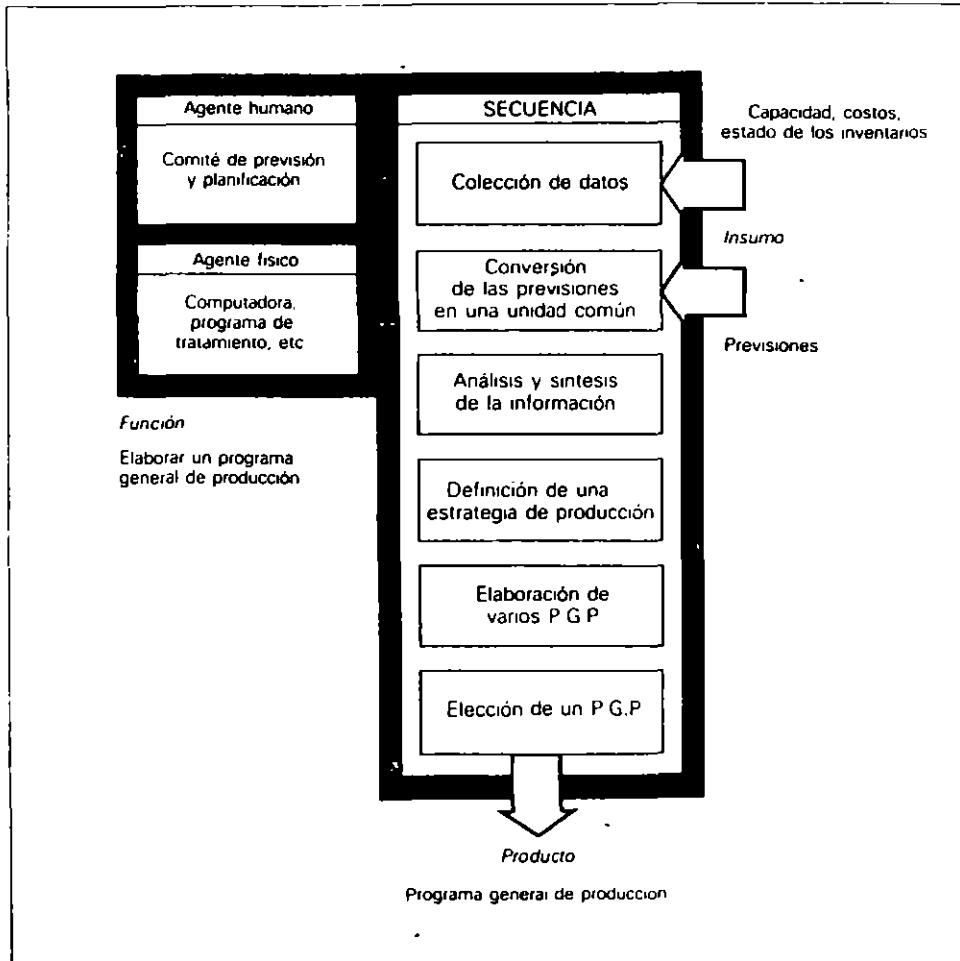


Fig 10-8  
Sistema de planificación global

El *insumo* es el conjunto de los informes básicos. El *producto* es un PGP que, además de presentar ventajas económicas, debe respetar las restricciones y la política de la empresa. Ciertas empresas confían la elaboración del PGP a compañías especializadas, otras forman un comité integrado por los responsables de la producción, la planificación, las ventas y el aprovisionamiento. La *secuencia* se resume en las siguientes cinco etapas: colección de los datos, conversión de las previsiones en una unidad común de medida, análisis y síntesis de la información, definición de una estrategia de producción, elaboración de varios PGP; y elección de un programa general de producción.

## RESUMEN

La planificación es una etapa preliminar esencial que consiste en diseñar planes a corto, mediano y largo plazo según la envergadura de los objetivos.

La planificación global tiene como finalidad establecer un PGP para un periodo que puede ser de un trimestre a dos años. Este PGP define las cantidades por producir en tiempo regular y suplementario y en maquila, los niveles de inventario, el número de empleados por contratar o despedir y los costos implicados.

Entre los métodos que se utilizan en la elaboración de un PGP podemos citar los métodos gráficos, de programación lineal y heurísticos.

## Preguntas

- 1 ¿En qué consiste la planificación global?
- 2 ¿Cuáles son los objetivos que persigue la planificación global?
- 3 Enumere los datos básicos necesarios para la elaboración de un programa general de producción.
- 4 ¿Qué significa el término estrategia de producción? Enumere y analice las posibles estrategias.
- 5 ¿Considera el programa general de producción como un medio útil de control?
- 6 ¿Piensa usted que el PGP es una herramienta de planificación únicamente útil para empresas grandes?
- 7 ¿Cuáles son las etapas de la elaboración de un PGP?
- 8 Haga una comparación entre el método gráfico y el método de transporte.

## Ejercicios prácticos

- 1 Una compañía fabrica aislantes rígidos en forma de tableros (polietileno rojo con recubrimiento celular) cuya resistencia térmica aproximada es de 5 por cada 2.5 cm de espesor. Las previsiones de la demanda anual para estos tableros aislantes son las siguientes:

Mes	ene	feb	mar.	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Demanda (miles de tableros)	12	18	18	12	9	12	9	18	24	21	18	9

La tasa de producción es de 1 500 tableros por mes-hombre. Los costos de producción son los siguientes:

almacenamiento	1 5% del costo de fabricación por mes
fabricación	\$ 21 25 por cada seis tableros
contratación de personal	\$ 400 por empleado
despido de personal	\$ 250 por empleado

Dado que el estado de escasez no es admisible, diga ¿cuál de las dos siguientes estrategias es la más económica:

- producción basada en la demanda promedio; es decir, nivel constante de mano de obra;
- producción variable según la demanda mensual, es decir, variación de la mano de obra en función de la demanda.

Haga la representación gráfica de los dos planes de producción.

- Una compañía de aparatos electrónicos prepara un programa de producción para un producto cuya demanda tiene un ciclo de 6 meses. Las previsiones de la demanda para los próximos seis meses figuran en la tabla que se presenta más abajo. La política de la compañía es de mantener un inventario de seguridad equivalente al 10% de la demanda del mes; este inventario se considera el inventario inicial para el periodo subsecuente. El inventario inicial es de 100 unidades.

Periodo	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio
Previsiones	600	1 000	800	350	400	600
Número de horas	22	18	21	22	22	20

Cada unidad exige 10 horas-hombre. El número de horas de trabajo es de 8 por día. El tiempo suplementario ha sido fijado en un 25% del tiempo regular. La compañía emplea 40 personas en forma regular. Los costos de producción son:

Mano de obra	
tiempo regular	\$ 5/hora
tiempo suplementario	\$ 7/hora
contratación de personal	\$ 300/empleado
despido de personal	\$ 400/empleado

Inventario	
almacenamiento	\$ 2.50/unidad/mes
escasez o retardo	\$ 20.00/unidad

Producto	
costo unitario	\$ 200
maquila	\$ 210/unidad

Elabore los tres siguientes planes de producción

- Tasa constante de producción con 38 empleados, utilizando tiempo suplementario cuando sea necesario
  - Variación de la tasa de producción dependiendo de la demanda (contratación y despido de empleados)
  - Tasa constante de producción con 20 empleados, utilizando maquila cuando sea necesario
- Una compañía ha recibido los tres siguientes pedidos de cierto producto. Estos pedidos deberán ser despachados durante los cuatro próximos periodos. En la siguiente tabla se muestra la cantidad ordenada y la fecha de entrega

Periodo	Semana de entrega			
	15	16	17	18
A	20	14	20	15
B	24	20	25	17
C	17	9	10	7
Total	61	43	55	39

Basándose en la siguiente información y empleando el método de transporte, elabore un plan de producción que tenga un costo mínimo

Capacidad (unidades/semana)		Inventario		Costo		
T.R.	T.S.	inicial	final	T.R.	T.S.	almacenamiento
35	15	30	20	\$ 10	\$ 15	\$ 1/unidad/producto

## BIBLIOGRAFIA

- Butta, E.S. *Operations Management Problems and Models* New York Wiley 3<sup>ra</sup> ed. 1972
- Butta, E.S. et W.H. Taubert *Production-Inventory Systems Planning and Control*, Homewood Irwin, 1972
- Chase, R.B. et N.J. Aquilano, *Production and Operations Management* Homewood Irwin 1977
- Holt, C.F., F. Modigliani, J.F. Muth et H.A. Simon, *Planification de la production des stocks de l'emploi*, Paris, Dunod, 1964
- Production (gestion de la production)*, Montréal H.E.C. 1977-78

# Planificación de un sistema de producción en serie

## OBJETIVOS

- Después de haber estudiado este capítulo, el lector deberá ser capaz de
- ubicar la planificación detallada con relación a la planificación global;
  - definir el cometido de la planificación detallada,
  - definir las características de un sistema de producción en serie;
  - aplicar las técnicas de planificación detallada,
  - explicar las reglas de administración de los inventarios para un sistema de producción en serie.

## TERMINOLOGIA

calendario de compras  
calendario de producción  
horario global  
producción en masa  
producción en serie  
sistema de distribución

ción en serie (Para más información sobre estas técnicas, consulte la bibliografía que se presenta al final del capítulo)

### CALCULO DE LAS CANTIDADES POR PRODUCIR

A fin de facilitar la elaboración de los calendarios de producción y de compra, se recomienda calcular las cantidades de cada pieza que serán necesarias para la fabricación de las cantidades previstas en el horario global. De tal modo, a partir de la composición del producto, del nivel actual de los inventarios, de este horario y de estas demoras de producción, pueden evaluarse las cantidades por producir o comprar. Veamos las principales etapas de este cálculo con un ejemplo

En la figura 11-3 se muestra la composición de tres productos (A, B, C). Las cifras entre paréntesis son los porcentajes de pérdida, y las cifras entre corchetes representan las demoras de fabricación para las piezas así como las demoras de entrega para las materias primas. En la tabla 11-4 se muestra el programa global de los tres productos, el estado de los inventarios de materias primas y de productos en curso. Determinemos las cantidades por fabricar u ordenar durante la semana 1.

**Solución:** En la tabla de la figura 11-5 se indican los resultados de las siguientes etapas de cálculo:

- Calcular las cantidades brutas requeridas de la pieza D para el producto A y en seguida para el producto B. Note que se necesitan dos piezas D para fabricar una unidad del producto A y que se necesita una pieza para una unidad del B.
- Añadir las cantidades brutas requeridas para D.

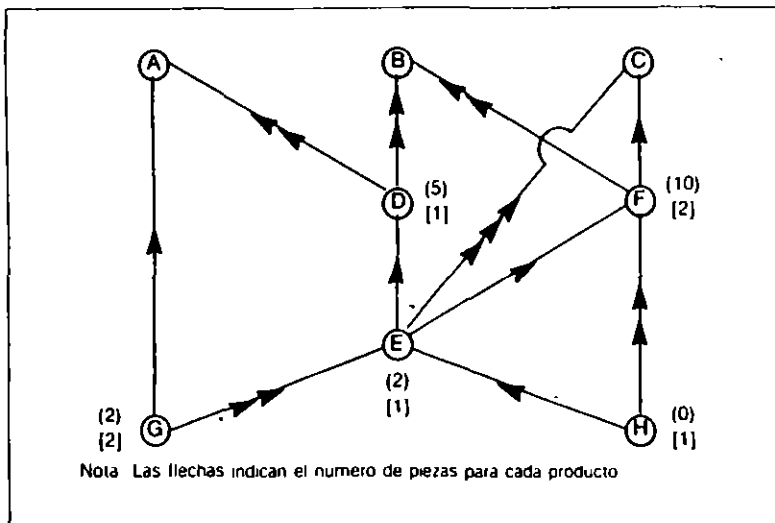


Fig 11-3  
Composición de los productos A, B y C

#### a) Programa global

Producto \ Periodo	1	2	3	4	5	6
A	200	150	170	250	200	250
B	100		100		100	
C		200		300		250

#### b) Estado de los inventarios

Piezas	D	E	F	G	H
Cantidades disponibles	700	1 503	400	2 850	2 500

Fig 11-4

- Substraer del inventario la cantidad total necesaria para obtener la cantidad requerida neta de la componente D.
- Calcular la cantidad neta total requerida, teniendo en cuenta el porcentaje de pérdida:

$$\text{Cantidad neta total requerida} = \frac{\text{cantidad neta requerida}}{1 - \text{porcentaje de pérdida}}$$

- Clasificar la cantidad neta total requerida en un número de periodos equivalente a la demora de fabricación o de entrega. Se repiten estas etapas para las piezas F, E, G y H. Con base en la figura 11-5, las cantidades por producir durante el periodo 1 serán por tanto

pieza D: 211  
 pieza F: 222  
 pieza E: 440  
 pieza G: 3 847  
 pieza H: 0

### PLANIFICACION DE LOS INVENTARIOS

Los inventarios tienen gran importancia en el sistema de producción en serie, puesto que garantizan la continuidad de las operaciones, la utilización racional de los recursos disponibles y el mantenimiento de un nivel satisfactorio de servicio a la clientela, además de asegurar la independencia de las operaciones en cada etapa de la producción y de la distribución. En una línea de producción, los inventarios de productos en curso permiten a cada máquina o puesto de trabajo proseguir las operaciones hasta un cierto punto aun si en la etapa precedente las máquinas se detienen.

Como se vio en el capítulo 9, los inventarios producen costos. Para reducir estos costos es necesario determinar y controlar los niveles adecuados de



Pieza D

Descripción		1	2	3	4	5	6
Cantidad bruta requerida a A		400	300	340	500	400	500
Cantidad bruta requerida de B		200		200		200	
Cantidad total requerida	700	600	300	540	500	600	500
En inventario		100					
Cantidad neta requerida			200	540	500	600	500
Cantidad total neta requerida incluyendo la pérdida			211	568	526	632	526
Cantidad total neta requerida clasificada		211	568	526	632	526	

Pieza F

Descripción							
Cantidad bruta requerida de B		200		200		200	
Cantidad bruta requerida de C			200		300		250
Cantidad total requerida	400	200	200	200	300	200	250
En inventario		200					
Cantidad neta requerida				222	333	222	278
Cantidad total neta requerida clasificada		222	333	222	278		

Pieza E

Descripción							
Cantidad bruta requerida de D		211	568	526	632	526	
Cantidad bruta requerida de C			600		900		750
Cantidad bruta requerida de F		222	333	222	278		
Cantidad requerida total	1 503	433	1 501	748	1 810	526	750
En inventario		1 070					
Cantidad neta requerida			431	748	1 810	526	750
Cantidad neta requerida total			440	763	1 847	537	765
Cantidad requerida clasificada		440	763	1 847	537	765	

Fig 11-5  
Cantidades por producir durante los seis próximos periodos

Pieza H

Descripción							
Cantidad bruta requerida de E		440	763	1 847	537	765	
Cantidad bruta requerida de F		444	666	444	556		
Cantidad total requerida		884	1 429	2 291	1 093	765	
En inventario	2 500	1 616	187				
Cantidad neta requerida				2 104	1 093	765	
Cantidad requerida clasificada			2 104	1 093	765		

Pieza G

Descripción							
Cantidad bruta requerida de A		200	150	170	250	200	250
Cantidad bruta requerida de E		880	1 526	3 594	1 074	1 530	
Cantidad total requerida		1 080	1 676	3 864	1 324	1 730	250
En inventario	2 850	1 770	94				
Cantidad neta requerida				3 770	1 324	1 730	250
Cantidad total neta requerida				3 847	1 351	1 765	255
Cantidad requerida clasificada		3 847	1 351	1 765	255		

Fig 11-5  
(Cont)

inventarios para los diferentes estados de la producción y de la distribución. Debe por tanto formularse una regla de administración de los inventarios que convenga a la producción en serie y que se base en la cantidad por fabricar u ordenar, en el inventario de seguridad y en el punto de reorden.

## REGLA DE ADMINISTRACION DE LOS INVENTARIOS

Si se observa la circulación de los inventarios entre la producción y la distribución, se nota que el abastecimiento de productos terminados y el agotamiento de éstos al nivel del almacén ocurren simultáneamente. Por otra parte, en un sistema de producción en serie, la utilización de una pieza en una máquina se hace al mismo tiempo que la fabricación de otro artículo en la máquina precedente. En los dos casos, es necesario que la tasa de aprovisionamiento sea mayor que la tasa de agotamiento o de utilización del producto. Se trata aquí de calcular la cantidad por producir con el objeto de reducir los costos de almacenamiento, los de orden o los de preparación de las máquinas.

## Cantidad económica por producir

Para calcular esta cantidad, debe elaborarse un modelo matemático que represente el costo total de un inventario. La figura 11-6 proporciona un modelo gráfico que nos permitirá visualizar el comportamiento de este inventario. Para determinar el inventario promedio por periodo, consideremos el periodo  $t_1$  de la figura. Si la tasa de utilización o de agotamiento ( $u$ ) es nula durante este periodo, el inventario aumenta según la recta AC a una tasa de abastecimiento ( $a$ ). Por tanto la cantidad demandada ( $q$ ) será:

$$q = t_1 \times a$$

$$t_1 = \frac{q}{a} \quad (1)$$

Sin embargo, el modelo supone un agotamiento a una tasa constante ( $u$ ), por lo que el inventario evolucionará según la recta AD a una tasa ( $a - u$ ). En consecuencia, la cantidad máxima almacenada durante el periodo  $t$  será

$$ED = t_1 (a - u) \quad (2)$$

Si substituímos  $t_1$  de la ecuación (2) por el valor de  $t_1$  de la ecuación (1), obtendremos.

$$ED = \frac{q}{a} (a - u) \quad (3)$$

Por tanto, el inventario promedio es igual a la cantidad máxima ED durante el periodo  $t$  dividida entre 2:

$$\text{inventario promedio} = \frac{1}{2} ED$$

$$= \frac{1}{2} \times \frac{q(a-u)}{a}$$

El costo total de abastecimiento es igual a la suma del costo de almacenamiento y el costo de orden.

$$C_T = C_s + C_c$$

$$C_T = \frac{1}{2} \times \frac{q(a-u)}{a} \times c_1 + \frac{Q}{q} \times c_2 \quad (4)$$

donde  $Q$  es el consumo anual.

Derivando la ecuación (4) respecto a  $q$  e igualándola a cero, obtendremos una ecuación que nos permitirá calcular la cantidad económica por producir.

$$q_o = \sqrt{\frac{2 Q c_2}{c_1} \times \frac{a}{a-u}}$$

donde  $q_o$  es la cantidad económica u óptima.

*Ejemplo* Una de las piezas del producto A se fabrica a razón de 120 unidades por día. En la línea de ensamble del producto A se utiliza esta pieza a razón de 60 unidades por día. Se desea saber cuál será el lote económico de producción y el punto de orden de esta pieza si:

- la demanda anual es de 20 000 unidades,
- el costo de almacenamiento es de \$ 1/unidad/año,
- el costo de preparaciones de \$ 50/pedido,
- la demora de fabricación es de 7 días.

*Solución.*

$$q_o = \sqrt{\frac{2 \times 20\,000 \times 50}{1} \times \frac{120}{120 - 60}}$$

$$= \sqrt{4\,000\,000} = 2\,000 \text{ unidades}$$

Punto de reorden  $60 \times 7 = 420$  unidades

## Inventario de seguridad

Ya se ha destacado la importancia del inventario de seguridad. Se trata ahora de investigar cómo se le determina dentro de un contexto en el cual la

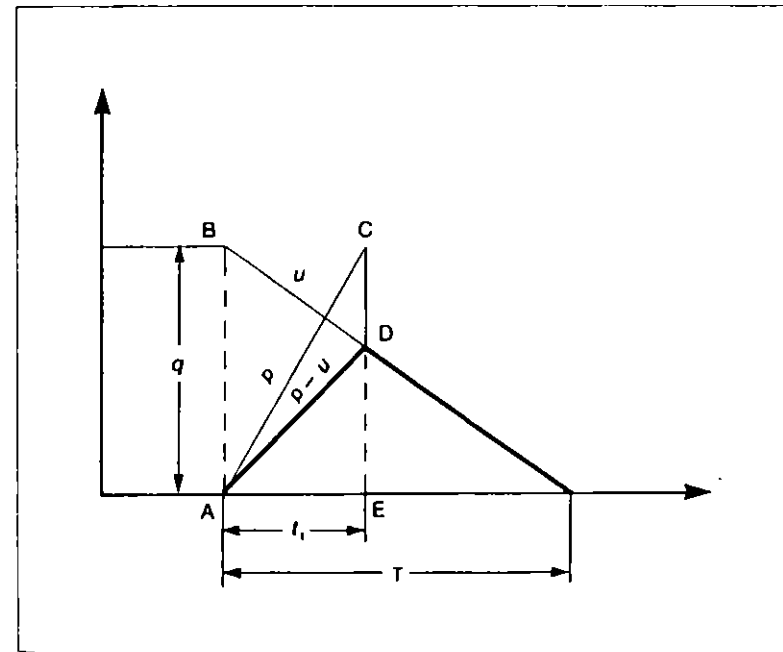


Fig 11-6  
Modelo del lote económico con tasa de aprovisionamiento y tasa de agotamiento simultáneas

demanda es aleatoria. El método de cálculo puede resumirse en cuatro etapas.

1. Evaluar la magnitud de la demanda por periodo para uno o varios años anteriores. En la figura 11-7 se ilustra la distribución acumulativa de la demanda en un periodo de 100 semanas.
2. Definir el nivel de servicio correspondiente a la política y a los medios de la empresa (cap. 8).
3. Determinar la demanda máxima con ayuda de la distribución establecida en la primera etapa y con ayuda del nivel de servicio. Por ejemplo, si este último es igual a 95% en la figura 11-7, se ve que la demanda máxima ( $D_{m\acute{a}s}$ ) será igual a 350 unidades por semana.
4. Calcular el nivel mínimo del inventario de seguridad (IS) substrayendo de la demanda máxima la demanda promedio ( $D_{prom.}$ ):

$$IS = D_{m\acute{a}s} - D_{prom.}$$

$$IS = 350 - 225 = 125 \text{ unidades}$$

### Punto de reorden

Este punto puede establecerse en dos formas. La primera se basa en cierto nivel de inventario, el cual se determina según la demora promedio de entrega (L), la tasa de la demanda (u) y el inventario de seguridad (IS).

$$\text{punto de reorden} = IS + u \times L$$

La segunda manera se basa en la utilización de un periodo fijo de orden. En cada periodo se evalúa el nivel del inventario, y se ordena la cantidad que llevará al inventario a un nivel máximo dado. Ciertas empresas asocian las dos maneras a fin de compensar los inconvenientes de un método con las ventajas del otro.

## RESUMEN

Las técnicas de la planificación detallada varían con el tipo de sistema de producción. Las principales características del sistema de producción en serie son: producción en masa, mecanización, automatización, y líneas de producción y de ensamble.

El análisis de las componentes de un sistema de producción-distribución permite un mejor conocimiento de su funcionamiento, y ello da como resultado una planificación y un control adecuados de las operaciones.

La planificación detallada consiste en elaborar los calendarios de producción por producto, división, máquina y empleado. Estos calendarios constituyen también herramientas de control que permiten al departamento de planificación, con base en los resultados, tomar las decisiones que asegurarán la continuidad de las operaciones.

Tasa de la demanda	Frecuencia	Frecuencia acumulativa	Frecuencia acumulativa en porcentaje
0 a 49	2	2	2.22
50 a 99	8	10	11.11
100 a 149	10	20	22.22
150 a 199	15	35	38.89
200 a 249	20	55	61.11
250 a 299	15	70	77.78
300 a 349	16	86	95.55
350 a 400	4	90	100

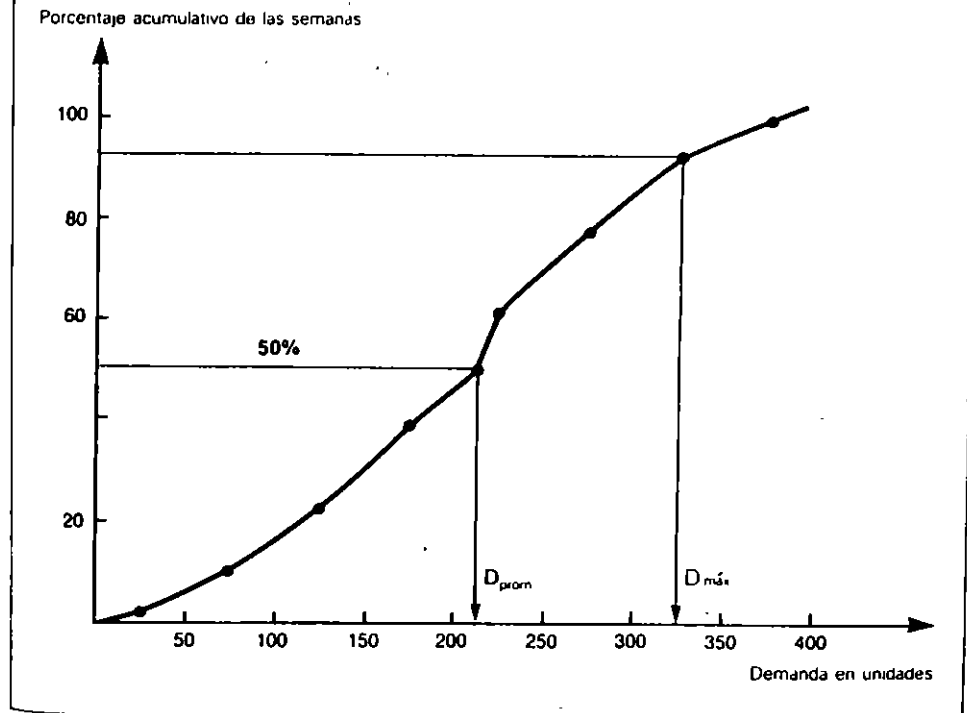


Fig 11-7  
Distribución acumulativa de la demanda

La planificación de los inventarios, en un sistema de producción en serie, es de importancia vital para la continuidad de las operaciones y para la utilización óptima de los recursos. El cálculo de lote económico por producir u ordenar, el del inventario de seguridad y el del punto de reorden constituyen elementos esenciales para la administración racional de los inventarios.

## Preguntas

1. ¿Por qué el programa general de producción no es suficiente como herramienta de producción?
2. ¿Cuáles son las principales características de un sistema de producción en serie?
3. ¿Cuáles son las relaciones entre el sistema de producción y el de distribución?
4. ¿Cuál es el cometido de los calendarios de producción?
5. ¿En qué consiste la planificación de los inventarios en un sistema de producción en serie?

## Ejercicios prácticos

1. La composición de un producto terminado (A) se representa en la figura 11-8. A partir del programa general y del estado de los inventarios, elabore un calendario de producción y de compra para los cinco próximos periodos. Programa global.

Periodos	1	2	3	4	5
Producto					
A	100	100	100	100	100

Estado de los inventarios

Piezas	B	C	D	E
Cantidad disponible	600	100	950	240

2. Un producto se vende a una tasa constante de 600 unidades por día. La tasa de producción de la fábrica es de 800 unidades por día. El costo de preparación de las máquinas se estima en \$ 50 por lote fabricado, y el costo de almacenamiento es de \$ 1.25 por unidad por año. Se mantiene en el almacén un inventario de seguridad de 5 000 unidades durante el año. Tomando 250 días por año, ¿cuál es la cantidad económica por fabricar? ¿Cuál es el costo anual total de preparación y de almacenamiento?
3. Una compañía que fabrica cerveza tiene una línea de llenado cuya capacidad promedio de producción es de 20 000 litros por día. El consumo cotidiano promedio para una de sus marcas se evalúa en 12 000 litros por

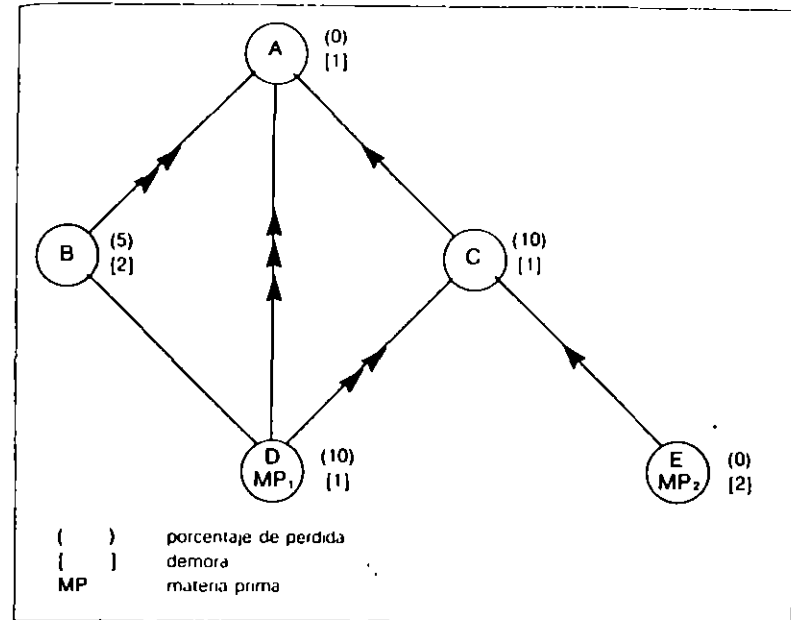


Fig 11-8  
Composición del producto terminado A

día. El costo de preparación de la línea de llenado se estima en \$ 500, y el costo de almacenamiento es de \$ 1.25 por litro por año. Sabiendo que el consumo de cerveza se reparte entre 350 días en promedio por año y que el número de días laborables por año es de 250, calcule la cantidad económica por fabricar. Evalúe el inventario de seguridad y el punto de reorden, considerando la hipótesis de una demanda cotidiana máxima de 22 000 litros y de una demora de fabricación de dos días.

4. Una compañía dedicada a los aparatos electrónicos fabrica calculadoras al ritmo de 1 000 unidades por día (250 días por año). Cada calculadora contiene dos pilas de níquel-cadmio, las cuales se fabrican a razón de 2 500 unidades por día. Calcule la cantidad económica de pilas por fabricar, sabiendo que el costo de preparación se estima en \$ 200 y el costo de almacenamiento en \$ 0.40 por unidad por año.

## BIBLIOGRAFIA

1. Bowman, E.H. et R.B. Fetter, *Methodes scientifiques de gestion industrielle*, Paris Dunod 1962
2. Bulla, E.S. et W.H. Taubert, *Production-Inventory Systems Planning and Control* Homewood Irwin 1972
3. Holt, C.C., F. Modigliani, J.F. Muth et H.A. Simon, *Planification de la production des stocks de l'emploi*, Paris, Dunod, 1964
4. Magee, J.F., *Le planning de la production et le contrôle des stocks* Paris Dunod 1962
5. Moore, F.G. et T.E. Hendrick, *Production/Operations Management* Homewood Irwin 7<sup>a</sup> éd 1977
6. Wild, R., *Production and Operations Management Principles and Techniques* Londres IRW 1979

# Planificación de un sistema de producción intermitente

## OBJETIVOS

Después de haber estudiado este capítulo, el lector deberá ser capaz de.

- definir las principales características de un sistema de producción intermitente;
- describir las componentes del sistema y su interdependencia,
- describir las etapas de la programación,
- definir el cometido del departamento de programación,
- aplicar ciertas técnicas de optimización

## TERMINOLOGIA

distribución  
calendario  
coordinación  
lanzamiento  
programación  
reactivación  
secuencia

## INTRODUCCION

La producción por pedido es la base del sistema de producción intermitente. Ciertas industrias como las muebleras, las de puertas y las de estufas industriales pueden fabricar productos estandarizados durante los periodos de baja demanda y almacenarlos durante algún tiempo, en espera de pedidos. Consecuentemente, en el momento de realizar la planificación global deberán preverse los periodos de baja demanda y las cantidades de productos estándar por almacenar.

Aunque la planificación detallada tiene como finalidad establecer las cantidades que deberán fabricarse por periodo para cada producto, este procedimiento no es suficiente en el caso de un sistema de producción intermitente, porque cada pedido tiene su propia secuencia de producción, su tiempo de ejecución, su cantidad por producir y sus demoras de entrega. Por tal motivo es necesaria una etapa: la referente a la distribución (asignación de los trabajos a máquinas y empleados) y al seguimiento de cada pedido en el transcurso del proceso de fabricación. Esta etapa se conoce como *programación de los pedidos*. Después de describir las componentes y características del sistema de producción intermitente analizaremos las etapas de la programación de los pedidos, para describir posteriormente algunas técnicas de optimización que permitan maximizar la utilización de los recursos materiales y humanos.

## CARACTERISTICAS DEL SISTEMA DE PRODUCCION INTERMITENTE

Las principales características de este tipo de sistema de producción son como sigue:

- bajo volumen de producción por producto;
- gran diversidad de los productos por fabricar,
- reagrupamiento de máquinas similares por taller,
- alto grado de especialización de la mano de obra,
- desigualdad en la distribución de los trabajos entre los diferentes talleres, máquinas o empleados,
- baja tasa de utilización de ciertas máquinas;
- flexibilidad de la producción;
- falta frecuente de materias primas;
- posibilidad de fabricar ciertos productos estándar durante los periodos de baja demanda

## COMPONENTES DEL SISTEMA DE PRODUCCION INTERMITENTE

En la figura 12-1 se indican las principales componentes del sistema de producción intermitente. Observe la ausencia de un sistema de distribución

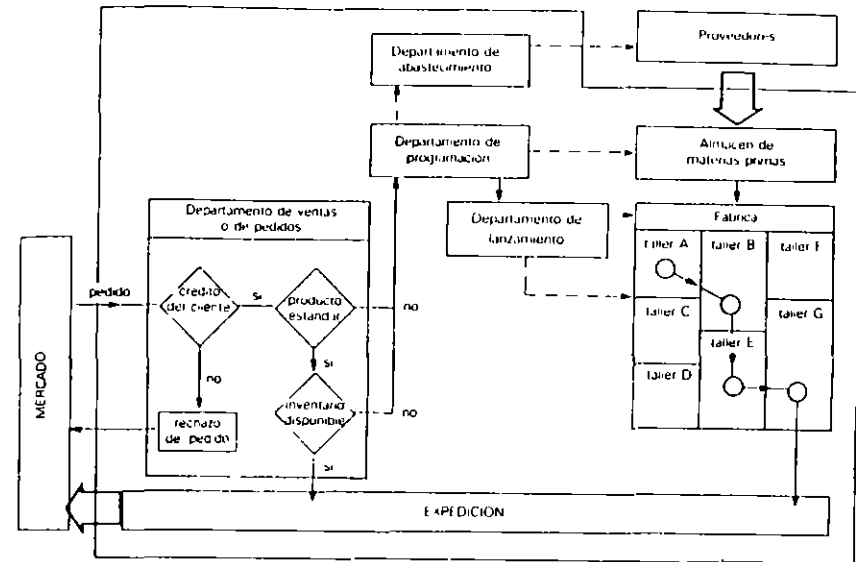


Fig. 12-1  
Componentes de un sistema de producción intermitente

El departamento de ventas, constituido a menudo por vendedores a comisión, se encuentra investigando continuamente contratos o pedidos que puedan asegurar la continuidad del sistema de producción.

Los pedidos son recibidos primeramente por el departamento de ventas o de pedidos, el cual establece por principio de cuentas la solvencia del cliente. Posteriormente se observa si el producto ordenado es estándar. En caso de serlo, se verifica su disponibilidad en el almacén. Si no está disponible, se envía el pedido al departamento de programación. Según las reglas de prioridad establecidas, este departamento procede a la programación del pedido, es decir, planifica las etapas de la fabricación. Por otra parte, el departamento de programación verifica la disponibilidad de las materias primas, si éstas no son suficientes, dicho departamento comunica al departamento de abastecimientos los informes necesarios para su compra.

## ETAPAS DE LA PROGRAMACION

La programación comprende el siguiente conjunto de actividades: distribución de los trabajos, elaboración de las requisiciones de material y de los ordenes de trabajo, lanzamiento de los trabajos, control y reactivación de los trabajos críticos (atrasados). Aunque estas etapas son las mismas en el momento de la programación de los pedidos, sus técnicas de optimización varían según el número de procedimientos de fabricación y los medios de producción por utilizar. A continuación examinaremos en detalle las etapas de la programación de un pedido y posteriormente analizaremos las técnicas

destinadas a maximizar la utilización de los recursos humanos, materiales y financieros. En la figura 12-2 se muestran las principales etapas de la programación.

## ANÁLISIS DE LOS TRABAJOS

Para el caso de un producto estándar esta etapa es sencilla, puesto que se trata solamente de precisar los recursos materiales y humanos necesarios para la fabricación del pedido. Para un nuevo producto, el análisis de los planes y presupuestos y la evaluación del tiempo de fabricación así como de los recursos materiales y humanos exigirá una mayor investigación, aunque la tarea puede verse facilitada por una buena organización de la información y el empleo de personas que tengan experiencia en trabajos de estimación.

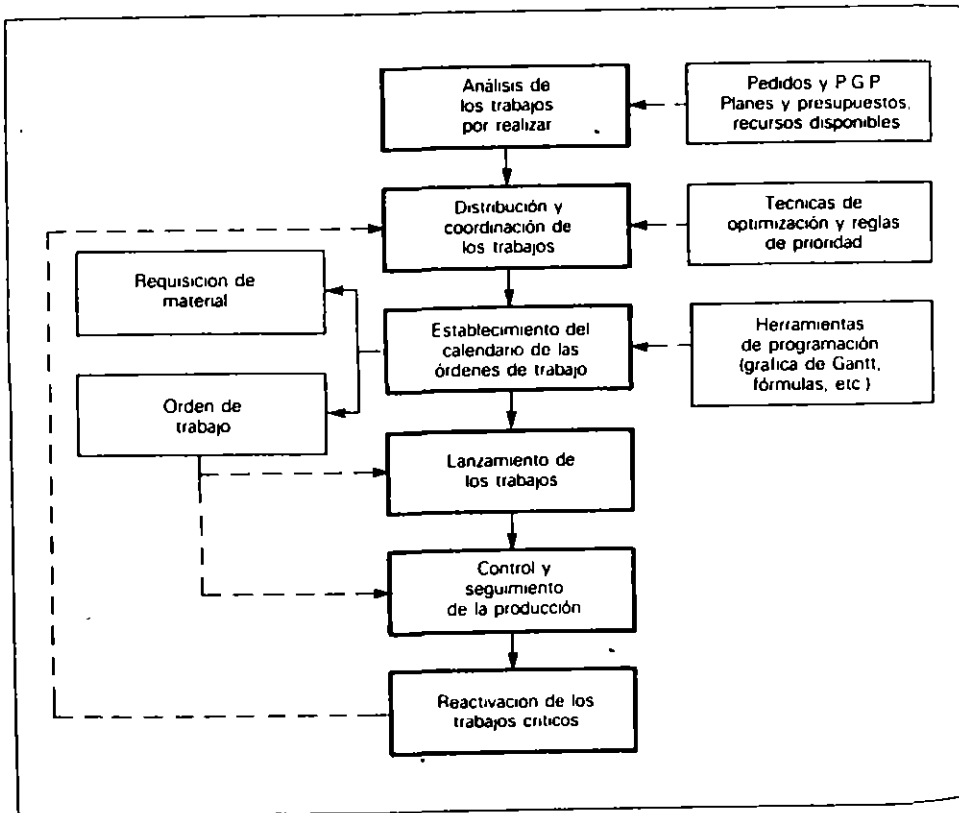


Fig 12-2  
Etapas de la programación de un pedido

## COORDINACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LOS TRABAJOS

En la etapa anterior se respondió, para el caso de cada pedido, a la pregunta ¿quién hace qué y dónde? Se trata ahora de establecer la secuencia de los trabajos de este pedido en función de los trabajos ya asignados a las máquinas y al personal. A primera vista ello parece una operación sencilla, pero se cambiará de idea si se trata de encontrar la secuencia que reducirá al mínimo el tiempo total de fabricación. Tomemos el ejemplo de tres productos (A, B, C) fabricados en tres máquinas diferentes. Cada uno de estos productos tiene su tiempo de fabricación. Para fabricar estos productos se tienen seis posibilidades (fig 12-3).

A, B, C; A, C, B; B, A, C; B, C, A; C, A, B, C, B, A. ¿Cuál debe adoptarse? En la figura 12-3 se nota que la tercera posibilidad es la mejor (B, A, C), con un tiempo total de fabricación de 17 horas.

La mayoría de las empresas pequeñas y medianas establecen para resolver el problema reglas de prioridad tales como "primera llegada, primer servicio" o "primero los pedidos pequeños", etc. Sin embargo, esta forma de proceder no permite descubrir la secuencia que reduzca el tiempo total de fabricación. Para encontrar una respuesta satisfactoria a esta pregunta existen técnicas de optimización que se adaptan a ciertas situaciones, y las cuales analizaremos más tarde.

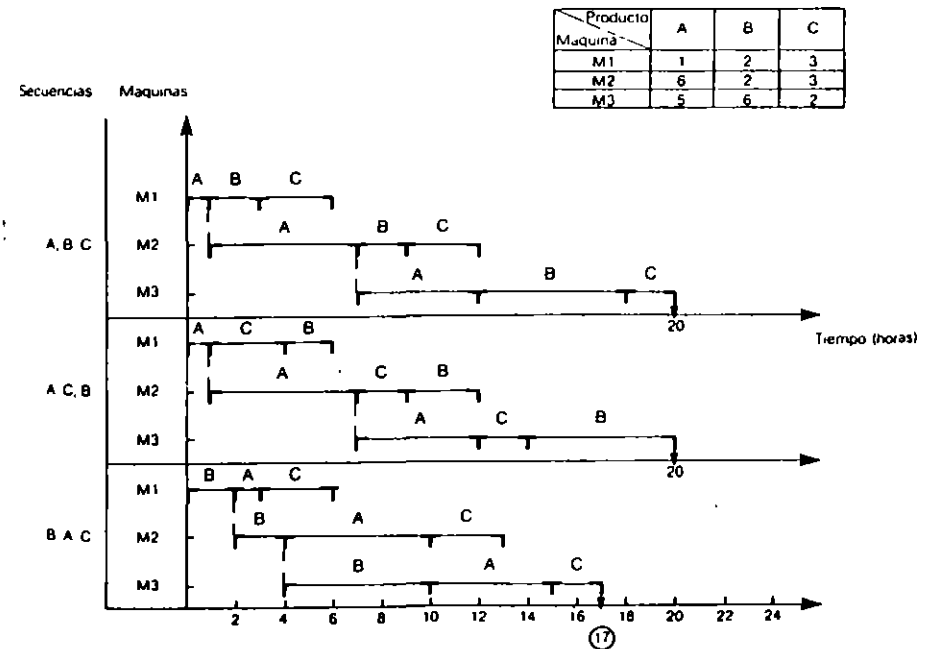


Fig 12-3  
Secuencias posibles para la fabricación de tres productos A, B y C

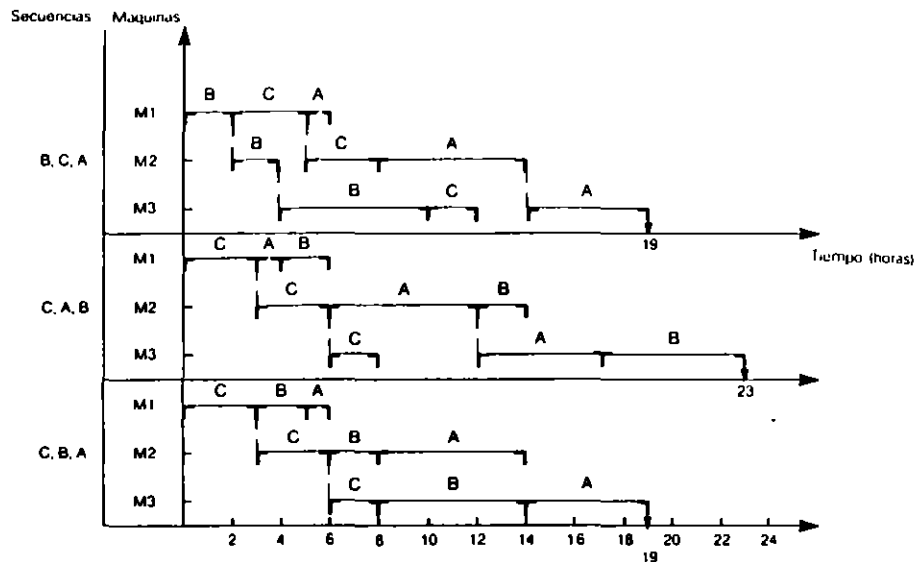


Fig. 12-3  
(Cont)

## ESTABLECIMIENTO DEL CALENDARIO

Una vez que se ha establecido la secuencia de realización, debe elaborarse el calendario en función de los recursos disponibles. En esta etapa la gráfica de Gantt constituye la principal herramienta de trabajo. Esta es una gráfica de dos dimensiones o dos variables: el tiempo se coloca en la abscisa y en la ordenada se colocan los talleres, máquinas o empleados. En la figura 12-4 se ilustra una de las formas de esta gráfica así como los símbolos que generalmente se utilizan en ella. Note que con la ayuda de la gráfica de Gantt puede rastrearse el avance de las operaciones para cada máquina, empleado, división o pedido. Además de ser una herramienta de planificación, esta gráfica constituye una herramienta de control.

Existen dos formas de asignar las operaciones a las máquinas, y consecuentemente existen dos formas de representarlas en la gráfica de Gantt; se trata de la distribución sin cabalgadura y la distribución con cabalgadura. La primera se utiliza cuando las operaciones de la segunda máquina no pueden empezar hasta que las de la primera han sido completamente terminadas. Pero éste no es siempre el caso, puesto que para ciertos productos las operaciones pueden superponerse o "encabalgarse". Por ejemplo, para un pedido de 800 unidades de un producto fabricado en tres máquinas, es posible, después de que la primera máquina ha terminado 100 unidades, comenzar la segunda etapa de las operaciones en la segunda máquina y lo mismo para la tercera. Esta es una distribución con cabalgadura. En la cabalgadura se tienen dos situaciones posibles.

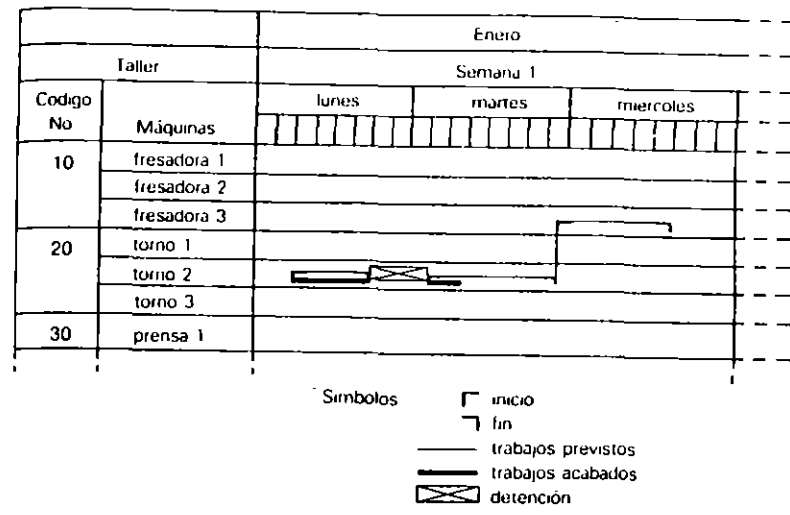


Fig. 12-4  
Gráfica de Gantt  
y su simbología

1. La duración de la segunda etapa es más prolongada que la primera: se procede a una cabalgadura hacia delante.
2. La duración de la segunda etapa es más corta que la primera: se procede a una cabalgadura hacia atrás.

En la figura 12-5 se ilustran los casos de distribución con y sin cabalgadura. Adicionalmente, en esta etapa deben hacerse las requisiciones de material y las órdenes de trabajo en función de las fechas establecidas en la gráfica de Gantt.

## LANZAMIENTO DE LOS TRABAJOS

Esta sección se ocupa de la preparación de las materias primas y de las herramientas necesarias para la realización de los trabajos según el calendario establecido, las requisiciones de material y las órdenes de trabajo.

Esta preparación puede encomendarse a un departamento autónomo si el volumen de trabajo lo justifica. En la mayor parte de las empresas pequeñas y medianas, esto lo hace un comisionado del departamento de programación, el obrero mismo o el capataz del equipo.

## CONTROL Y SUMA

Al final de cada periodo o jornada de trabajo se registra en la gráfica de Gantt el avance de los trabajos para cada máquina, empleado, taller o pedido. Estos trabajos se comparan con las previsiones. No será necesaria ninguna modificación al calendario si todas las operaciones se desarrollan tal y como se previó. Por el contrario, si han ocurrido detenciones (descompostura de máquinas, ausencia de empleados, etc.) el departamento de programación debe modificar el calendario en consecuencia.



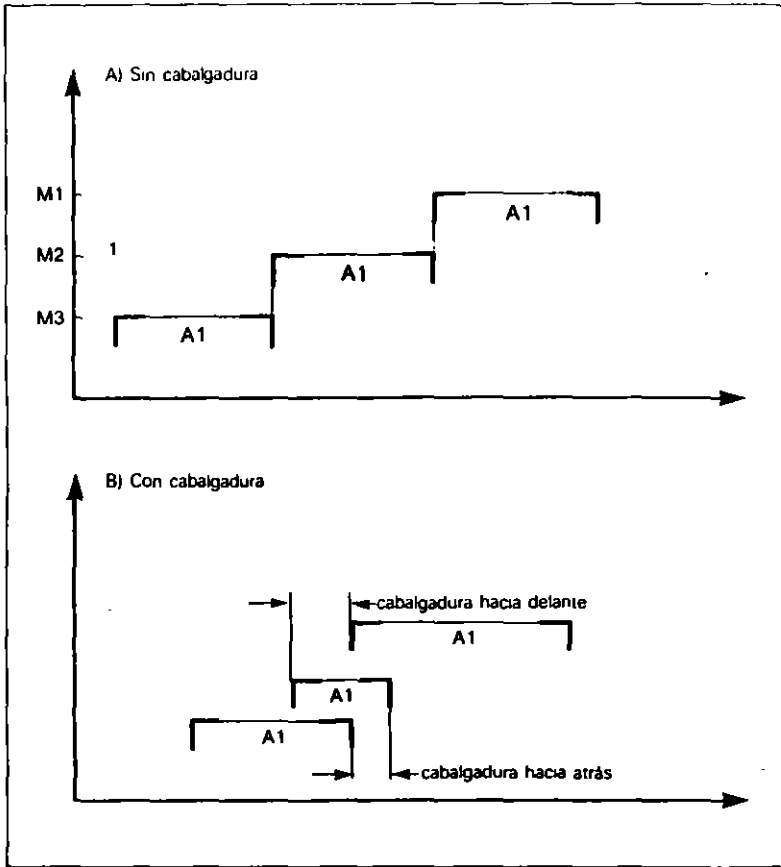


Fig. 12-5  
Representación  
gráfica de la  
distribución con y  
sin cabalgadura

## REACTIVACION DE LOS TRABAJOS

Esta etapa consiste en acelerar los trabajos que se encuentran atrasados respecto de la fecha de terminación establecida o debido a que el cliente desea obtener su pedido antes de la fecha convenida. En los dos casos debe modificarse el calendario de los trabajos, o recurrirse a la contratación de tiempo suplementario. Es la segunda solución la que parece más sencilla.

## TECNICAS DE DISTRIBUCION

En esta sección trataremos de responder a la pregunta que se formuló anteriormente: ¿cuál es la secuencia que reduce al mínimo el tiempo total de fabricación de cierto número de pedidos recibidos? El establecimiento de una

regla de prioridad constituye un método simple para responder una parte de la pregunta, pero no garantiza en forma alguna la secuencia óptima. Las técnicas de optimización constituyen un enfoque más completo para responder a la pregunta. En la mayoría de las empresas pequeñas y medianas se utilizan las reglas de prioridad, debido a que son sencillas y fáciles de aplicar.

## REGLAS DE PRIORIDAD

La elección y aplicación de estas reglas dependen de la política y la organización interna de cada empresa. Algunas empresas utilizan una o varias reglas de prioridad cuya aplicación depende de diversos factores: complejidad del proceso de fabricación, amplitud del pedido, importancia del cliente, etc. En las reglas prácticas, la prioridad se concede:

- el primero que llega;
- al pedido que tenga el tiempo de ejecución más corto,
- al pedido que tenga el tiempo de ejecución más largo,
- al pedido que tenga la demora más pequeña (duración a la fecha de entrega menos duración de fabricación),
- al pedido que tenga la fecha de entrega más cercana;
- según la razón de la demora crítica ( $r_c$ )

$$r_c = \frac{\text{fecha estimada de entrega} - \text{fecha actual}}{\text{fecha estimada de entrega} - \text{fecha prometida o deseada}}$$

- según la importancia del cliente,
- según un proceso aleatorio,

Cada una de estas reglas presenta ventajas y desventajas. Sin embargo, algunas de ellas son más ventajosas que otras desde el punto de vista de la economía de tiempo. Por ejemplo, una experiencia [2] ha demostrado que la aplicación de la regla *b*) para cierto número de pedidos, tiene un tiempo total promedio de fabricación más corto que otras reglas.

## TECNICAS DE OPTIMIZACION

Se han elaborado varias técnicas a fin de maximizar la utilización de los recursos materiales y humanos en un sistema de producción intermitente. Cada técnica se aplica a un contexto específico. De esta forma, las técnicas que se utilizan en el caso de pedidos que tienen dos etapas de producción serán diferentes de las que se utilizan para pedidos que tienen varias etapas. En seguida presentaremos dos técnicas sencillas, la regla de Johnson y la programación lineal (método de distribución).

## REGLA DE JOHNSON

Este método [8] se aplica cuando dos pedidos deben ser ejecutados en dos máquinas consecutivas. Las condiciones de aplicación son que una máquina sea utilizada para un solo pedido o un solo producto a la vez, y que el orden de las operaciones no puede ser cambiado. El método comprende cuatro etapas:

- 1 Establecer la lista de los tiempos de producción (tiempo de fabricación y de preparación) de cada máquina para cada uno de los pedidos
- 2 Elegir el tiempo de producción más corto.
- 3 Si el tiempo más corto pertenece a la primera máquina, se coloca el pedido al inicio de la secuencia. Si se trata de la segunda máquina, el pedido se coloca al final
- 4 Eliminar el pedido asignado y repetir las etapas 2 y 3 para los pedidos restantes.

Para obtener el tiempo total de realización de los pedidos, se representa la secuencia en una gráfica de Gantt.

*Ejemplo* Cuatro productos (A, B, C, D) son fabricados consecutivamente en dos máquinas. Los tiempos de producción en horas para cada una de las máquinas se indican en la tabla de la figura 12-6.

*Solución* Aplicando las cuatro etapas mencionadas se obtiene la siguiente secuencia

C — B — D — A

En la figura 12-6 se muestra la gráfica de Gantt para el cálculo del tiempo total de producción de los cuatro artículos

Puede adaptarse la regla de Johnson para el caso de varios productos o pedidos fabricados en tres máquinas. Esta adaptación asegura una solución satisfactoria pero no óptima. Tiene la ventaja de ser simple. Es posible obtener una mejor secuencia cuando se satisfacen una o dos de las siguientes condiciones:

- 1)  $\text{Min}(M1) \geq \text{Máx}(M2)$ ,
- 2)  $\text{Min}(M3) \geq \text{Máx}(M2)$ ,

donde (M1), es el tiempo de producción para el producto o el pedido (i) fabricado en la máquina No. 1;  
(M2), para la máquina No. 2,  
(M3), para la máquina No. 3

Se trata entonces de sumar el tiempo de producción de la máquina 1 y la máquina 2 y los tiempos de producción de la máquina 2 y la máquina 3. De este modo se reduce el número de hileras de máquinas a dos; posteriormente se repiten las cuatro etapas de la regla de Johnson

*Ejemplo* En la tabla de la figura 12-7 se muestra el tiempo de producción en horas para cinco productos fabricados en tres máquinas M1, M2 y M3. Encontramos la secuencia que reduce al mínimo el tiempo total de fabricación para estos cinco productos.

*Solución* Comparando las cifras de la tabla de la figura 12-7, se encuentra que se satisface la segunda condición

$\text{Min}(M3) \geq \text{Máx}(M2)$ ,

Producto \ Maquina	A	B	C	D
M1	3	6	5	7
M2	2	8	6	4

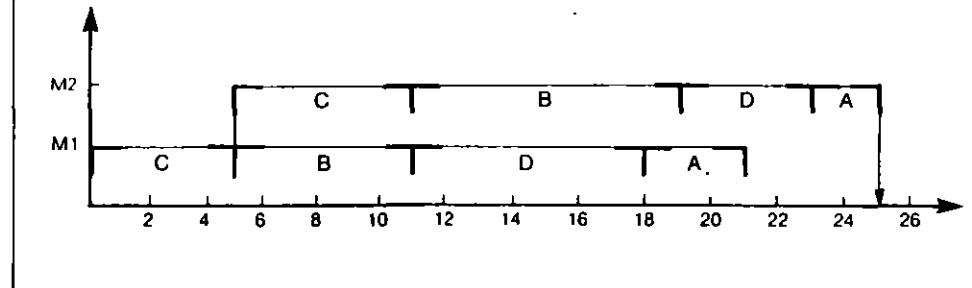


Fig 12-6  
Tiempo de producción de la secuencia óptima

Se suman las cifras de las dos primeras hileras (M1 + M2), luego las de las dos últimas hileras (M2 + M3), y se obtienen los resultados de la tabla de la figura 12-8.

Se aplican las cuatro etapas de la regla de Johnson, y se obtiene la siguiente secuencia:

D — C — E — B — A

### Método de distribución (programación lineal)

Este método es una técnica de la programación lineal y se relaciona con el método de transporte. Se utiliza para asignar los trabajos a las máquinas o a los empleados basándose en uno de los siguientes criterios: costos, tiempo, eficacia, etc. El número de trabajos debe corresponder al número de máquinas o de empleados. De este modo, los empleados o las máquinas efectúan el mismo trabajo, pero a un costo o en un momento diferente. Este método se resume en las siguientes cinco etapas:

Producto \ Maquina	A	B	C	D	E
M1	12	16	8	6	10
M2	10	6	4	4	10
M3	10	14	16	22	18

Fig 12-7  
Tiempo de producción de los cinco productos

1. Calcular el tiempo total de producción para cada pedido en cada máquina multiplicando la cantidad ordenada por el tiempo unitario de producción.
2. Restar el número más pequeño de cada hilera a los números de la misma hilera.
3. Restar el número más pequeño de cada columna a los números de la misma columna.
4. Determinar el número *mínimo* de líneas para cubrir cada 0 de la matriz. Para hacer esto, se empieza con las hileras y las columnas que tienen el mayor número de ceros, y así sucesivamente hasta que todos los 0 de la matriz hayan quedado cubiertos. Se obtiene una solución óptima si el número de líneas es igual al número de máquinas, si no, se pasa a la etapa 5.
5. Se diseña el número mínimo de líneas para cubrir los ceros de la matriz. Posteriormente se resta el número más pequeño de éstos a los que no hayan quedado cubiertos en la matriz, y se suma a los números que se encuentran en la intersección de las líneas. En este momento se regresa a la etapa 4.
6. Distribuir cada producto o pedido a partir de los 0 de la matriz.

*Ejemplo:* Pueden fabricarse cuatro pedidos (A, B, C, D) en una de cuatro máquinas M1, M2, M3 y M4. Cada una de las máquinas tiene un tiempo de producción para cada uno de los productos ordenados. En la tabla de la figura 12-9 se indica el tiempo de producción para cada producto y la cantidad ordenada. ¿Cómo deben asignarse los pedidos a cada una de las cuatro máquinas?

Pedidos	Cantidades	Tiempo de producción por unidad			
		M1	M2	M3	M4
A	30	0,40	0,25	0,20	0,30
B	25	0,60	0,40	0,50	0,60
C	45	0,50	0,30	0,20	0,40
D	50	0,30	0,40	0,20	0,25

Fig 12-9  
Tiempo de producción por unidad y cantidad ordenada

*Solución:* En la figura 12-10 se representan las etapas de cálculo

## RESUMEN

La programación constituye la etapa más importante en la planificación de un sistema de producción intermitente. Las principales etapas de la programación de un pedido son el análisis, la distribución y la coordinación de los trabajos, el establecimiento del calendario, el lanzamiento, el control y seguimiento de los trabajos y la reactivación de los trabajos críticos.

Ciertas reglas de prioridad y técnicas de optimización se emplean en la distribución de los trabajos. Estas técnicas permiten maximizar la utilización de los recursos humanos y materiales.

## Preguntas

1. ¿Cuáles son las principales características de un sistema de producción intermitente?
2. ¿Cuál es la diferencia entre la programación y el lanzamiento de los trabajos?
3. ¿Cuáles son las principales etapas de la programación de un pedido?
4. ¿A quién se debe confiar, en la pequeña y mediana industria, la responsabilidad de la coordinación de los trabajos de fabricación?
5. ¿Cuál es el cometido del departamento de programación en un sistema de producción intermitente?
6. ¿Se justifica que las empresas pequeña y mediana no hagan uso de las técnicas de optimización?

## Ejercicios prácticos

1. Un supermercado posee una panadería anexa a su división de pan y pasteles. Esta división ha recibido una veintena de pedidos de alguno de sus seis modelos de pasteles navideños. Estos pedidos han sido clasificados por modelo. El proceso de fabricación incluye las dos etapas principales de preparación —horneado y decoración. En la tabla siguiente se indica el tiempo de producción de cada etapa para cada modelo. Determine la secuencia de los trabajos que reducirá al mínimo el tiempo total de ejecución de los pedidos.

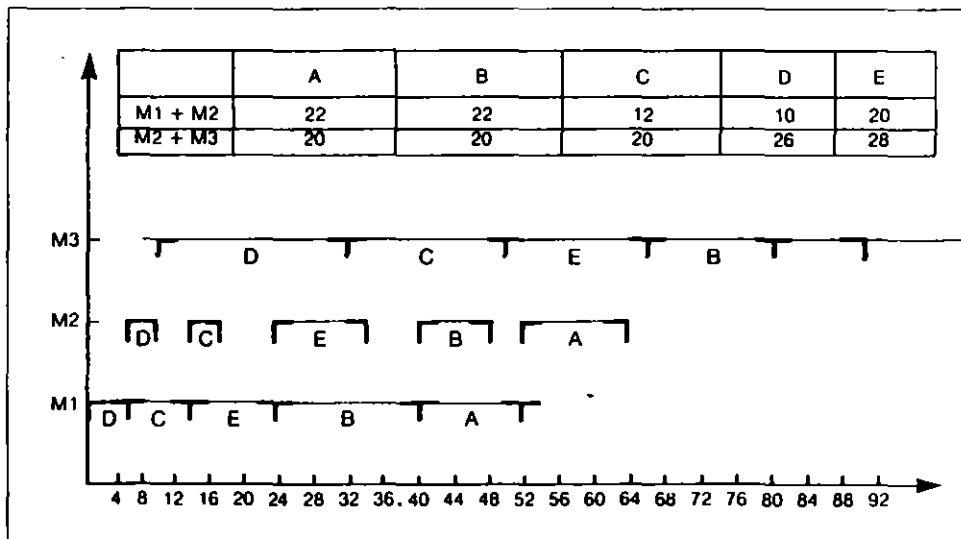


Fig 12-8  
Tiempo de producción de la secuencia óptima

1a etapa: calcular el tiempo de producción

	M1	M2	M3	M4
A	12	7.5	6	9
B	15	10	12.5	15
C	22.5	13.5	9	18
D	15	20	10	12.5

2a etapa: restar una hilera

	M1	M2	M3	M4
A	6	1.5	0	3
B	5	0	2.5	5
C	13.5	4.5	0	9
D	5	10	0	2.5

3a etapa: restar por columna

	M1	M2	M3	M4
A	1	1.5	0	0.5
B	0	0	2.5	2.5
C	8.5	4.5	0	6.5
D	0	10	0	0

4a etapa: cubrir los ceros de la matriz

	M1	M2	M3	M4
A	1	1.5	0	0.5
B	0	0	2.5	2.5
C	8.5	4.5	0	6.5
D	0	10	0	0

5a etapa: restar y sumar el número más pequeño no sombreado de la matriz

	M1	M2	M3	M4
A	0.5	1	0	0
B	0	0	3	2.5
C	8	4	0	6
D	0	10	0.5	0

4a etapa: cubrir los ceros de la matriz

	M1	M2	M3	M4
A	0.5	1	0	0
B	0	0	3	2.5
C	8	4	0	6
D	0	10	0.5	0

Distribución óptima

M1: D  
M2: B  
M3: C  
M4: A

Fig 12-10  
Etapas de cálculo  
del método de  
distribución

Modelos	A	B	C	D	E	F
Operaciones						
Preparación y horneado	8	10	16	6	7	9
Decoración	6	18	4	14	5	7

2. Una compañía ha recibido seis pedidos de mesas y estufas. En la tabla siguiente se indica el tiempo de producción en horas para cada pedido en cada taller. Un taller no puede ser ocupado más que por un pedido a la vez, y debe respetarse la secuencia corte-ensamble-acabado.

Se desea:

- determinar la secuencia que reducirá al mínimo el tiempo total de producción de los seis pedidos;
- determinar el tiempo de producción, si se emplea la regla de prioridad "primera llegada, primer servicio";
- si la fecha de inicio es cero, encuentre la fecha para la cual debe acordarse la entrega del pedido C-141, sabiendo que la compañía funciona 40 horas por semana.

Pedido	Corte	Ensamble	Acabado
C-125	15	9	24
C-134	12	6	9
C-140	27	12	21
C-141	21	9	15
C-142	18	3	6
C-145	14	10	16

3. Una compañía posee cinco modelos diferentes de tornos para fabricar piezas metálicas. El costo de utilización del torno varía según el modelo, debido a que el costo de compra y el salario de los empleados dependen del grado de perfeccionamiento de los modelos. De esta forma, los cinco modelos de tornos pueden ejecutar los mismos trabajos, pero a distintos niveles de eficacia y de costos. En la tabla siguiente se muestra el tiempo de producción en horas para cinco pedidos procesables en los cinco tornos disponibles así como el costo de cada uno de los modelos.

Se desea que usted:

- distribuya los pedidos según el criterio del tiempo total mínimo de producción;
- distribuya los pedidos según el criterio del costo mínimo;
- determine el tiempo total mínimo de producción;
- determine el costo total mínimo;
- recomiende un programa de distribución a la compañía.

4. Tres productos (A, B, y C) pueden fabricarse empleando una de tres máquinas, M1, M2 y M3. Como la demora de la entrega es pequeña, la compañía desea asignar los tres productos a las tres máquinas de tal modo que se reduzca así el tiempo total de fabricación. El tiempo de producción en minutos por productos y la cantidad por fabricar se indican en la tabla siguiente. Determine la distribución que responderá mejor al criterio del tiempo.

Modelos de tornos	Costo por hora	Pedidos (tiempo en horas)				
		A	B	C	D	E
M1	\$ 18	5	6	4	7	3
M2	\$ 25	6	4	3	2	6
M3	\$ 30	4	9	2	4	4
M4	\$ 20	8	8	5	5	5
M5	\$ 24	3	5	4	3	5

Código del pedido	Número de unidades por pedido	Tiempo en horas		
		M1	M2	M3
A	50	10	8	5
B	75	3	5	8
C	45	4	8	9

## BIBLIOGRAFIA

- 1 Bulla E.S. et W.H. Taubert *Production-Inventory Systems. Planning and Control*, chap. 10 11 et 12, Homewood Irwin, 1972
- 2 Bulla, E.S., *Operations Management, the Management of Productive Systems*, Hamilton Wiley 1976
- 3 Lambert, P. *La fonction Ordonnancement*, Paris, Éditions d'organisation 1975
- 4 Mayer, R., *Production and Operations Management*, New York, McGraw-Hill 3<sup>e</sup> éd. 1975
- 5 Moore, F.G. et R. Jablonski, *Production Control*, New York McGraw-Hill 3<sup>e</sup> éd. 1969
- 6 Ramboz, A. *L'ordonnancement* Paris, Entreprise moderne d'édition, 2<sup>e</sup> éd. 1965
- 7 Wild, R., *Production and Operations Management, Principles and Techniques*, Londres HARV 1979

### Artículos

- 8 Johnson, S.M., "Optimal two and three Stage Production Schedules with Set-up Times Included" *Naval Research Logistics Quarterly*, mars 1954

# 13

## Planificación de un sistema de producción por unidad

### OBJETIVOS

Después del estudio de este capítulo, el lector deberá ser capaz de:

- describir las etapas de la planificación de una producción por unidad,
- distinguir las dos principales técnicas, PERT y CPM,
- construir una red PERT para un conjunto de trabajos interdependientes;
- calcular el tiempo de inicio y de término de actividades de una red PERT;
- determinar los márgenes de tiempo de realización para cada una de estas actividades;
- identificar las actividades que forman parte de la ruta crítica,
- calcular la cantidad y el costo de los recursos humanos y materiales necesarios para la realización de un proyecto simple.

### TERMINOLOGIA

actividad previa	evento
actividad subsecuente	margen libre
ruta crítica	margen total
CPM	nudo
etapa	PERT

## INTRODUCCION

Después de estudiar la planificación de la producción en serie e intermitente, nos queda por analizar la planificación de la producción por unidad.

El rearrreglo físico de una división de una fábrica, la instalación de nuevos equipos, el mantenimiento de un sistema complejo de producción y la construcción de barcos son algunos ejemplos de este caso. Cuando se habla de "unidades", se hace referencia a productos complejos que pueden producirse solamente a razón de uno a la vez y requieren operaciones y recursos variados.

Este sistema de producción se encuentra en las industrias naval, aeronáutica y de la construcción. Para realizar tales productos, es necesario establecer un programa especial que tenga como finalidad racionalizar la ejecución de los trabajos. Varios métodos de análisis, de planificación y de control han sido propuestos para este efecto. A continuación expondremos los dos principales: el CPM (Critical Path Method), o método de la ruta crítica, y el PERT (Progress Evaluation and Review Technique).

## ETAPAS DE LA PLANIFICACION

Las actividades de esta planificación son las siguientes.

- análisis de cada operación,
- estudio de la interdependencia de las operaciones,
- confección de la red de operaciones,
- previsión de las fechas de inicio y término de cada operación y evaluación de las demoras tolerables,
- evaluación de los recursos materiales, humanos y financieros necesarios para cada operación,
- determinación de las operaciones cuyas fechas de realización son críticas, es decir, para las cuales no es posible retardo alguno si se quiere entregar el producto dentro de ciertas demoras.

En la figura 13-1 se indican los elementos constitutivos de un sistema de planificación de la producción por unidad.

## LAS TECNICAS DE PLANIFICACION

El PERT y el CPM son técnicas que se utilizan en la planificación y el control de los trabajos de un programa. Se caracterizan por la construcción de una red y la evaluación del tiempo y los costos de ejecución. El PERT se distingue porque recurre a la teoría de la probabilidad para evaluar el tiempo de realización y, en consecuencia, las posibilidades de terminar en una fecha determinada.

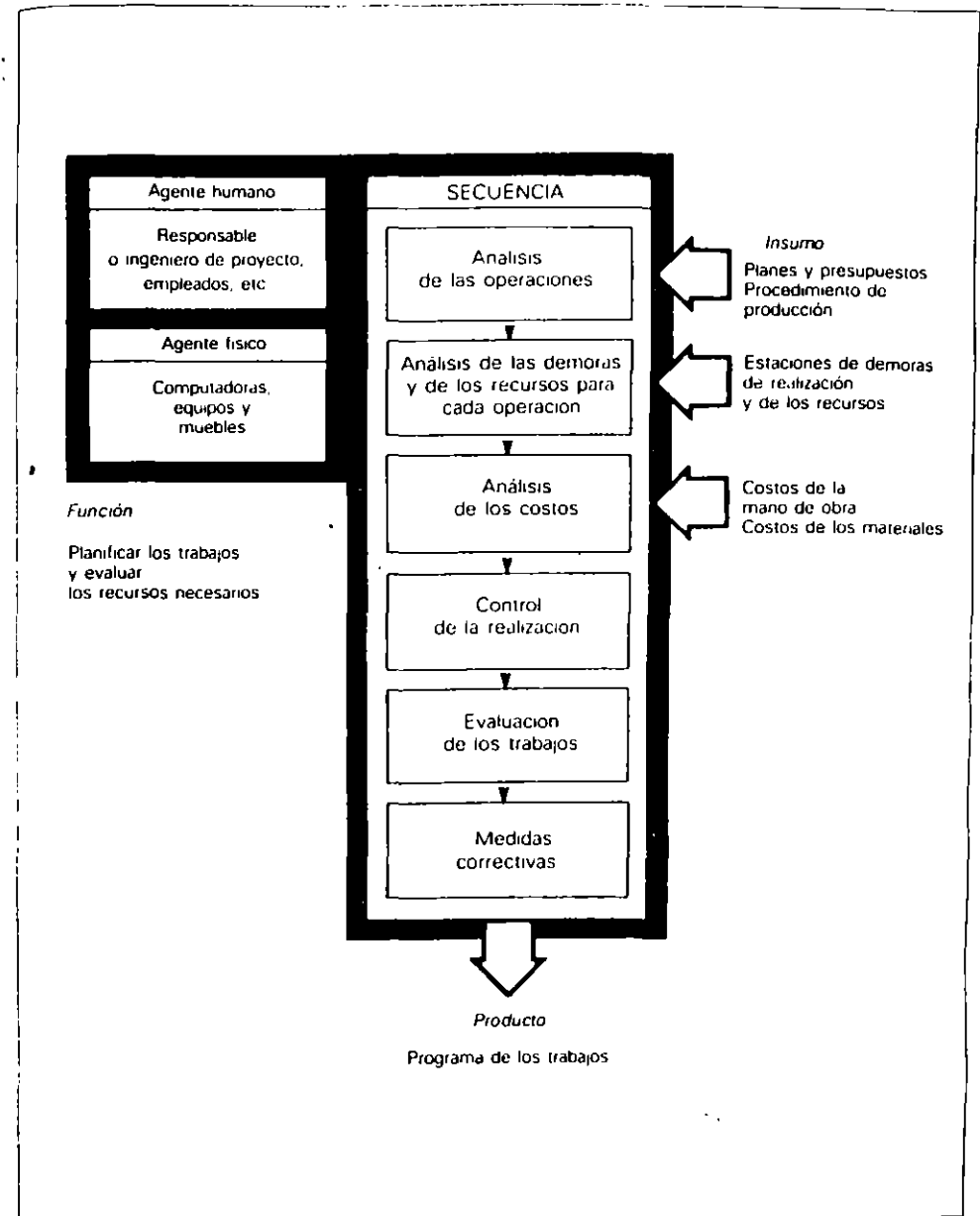


Fig 13-1 Sistema de planificación de la producción por unidad

## TERMINOS Y SIMBOLOS

Para la construcción de una red que muestre el orden de sucesión de las actividades se requiere el uso de ciertos términos y símbolos, los cuales es conveniente definir.

**Etaqa, evento o nudo** Este es el momento del principio o del fin de una actividad. Se representa por un círculo dentro de la red PERT (fig 13-2a). Se lo llama preferentemente *nudo* cuando existe un paso de una actividad a otra

**Actividad.** La actividad es una operación que implica el empleo de recursos. En la red PERT, estas actividades se representan por una flecha orientada en el sentido del agotamiento del tiempo; en la red CPM se representan por un círculo, y las flechas indican la interdependencia de las actividades (fig 13-2c). Se distinguen tres categorías de actividades en una red PERT (fig. 13-2b).

- *previas*, las cuales deben ser terminadas antes del inicio de otra;
- *subsecuentes*, las cuales siguen inmediatamente a la precedente;
- *paralelas*, las cuales empiezan al mismo tiempo que otra.

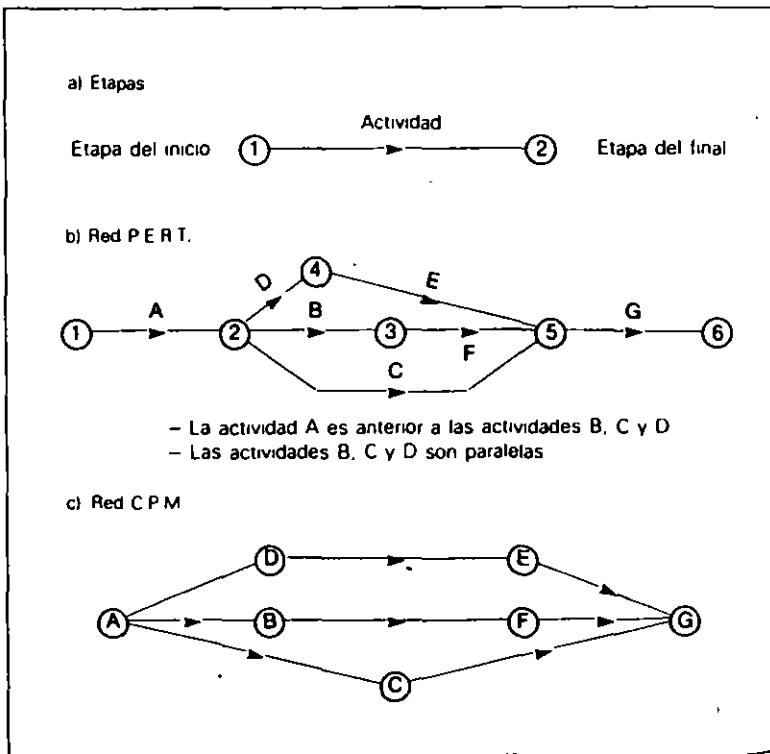


Fig. 13-2  
Representación  
gráfica de las  
actividades y  
etapas de la  
producción  
unitaria.

**Ligadura** Esta designa una dependencia entre dos etapas. Se la representa por una flecha puntiaguda y orientada en el sentido de la dependencia de las actividades. La figura 13-3a representa la actividad de un equipo que instala postes y cables telefónicos. El trabajo dura 45 días. Si se desea reducir la duración del trabajo del programa movilizándolo dos equipos, se podrá encomendar al primero la instalación de los postes durante 10 días, posteriormente, mientras el primer equipo instala los otros postes, el segundo instalará los cables telefónicos en los postes ya colocados, y así sucesivamente (fig. 13-3b). Observe que la actividad B2 no puede comenzar antes que la actividad A2 haya sido terminada. Es por ello que debe colocarse una ligadura entre las etapas (3) y (4), y otra entre las etapas (5) y (6). En las figuras 13-3c y d se muestran otros ejemplos de la utilización de ligaduras entre las etapas de actividades.

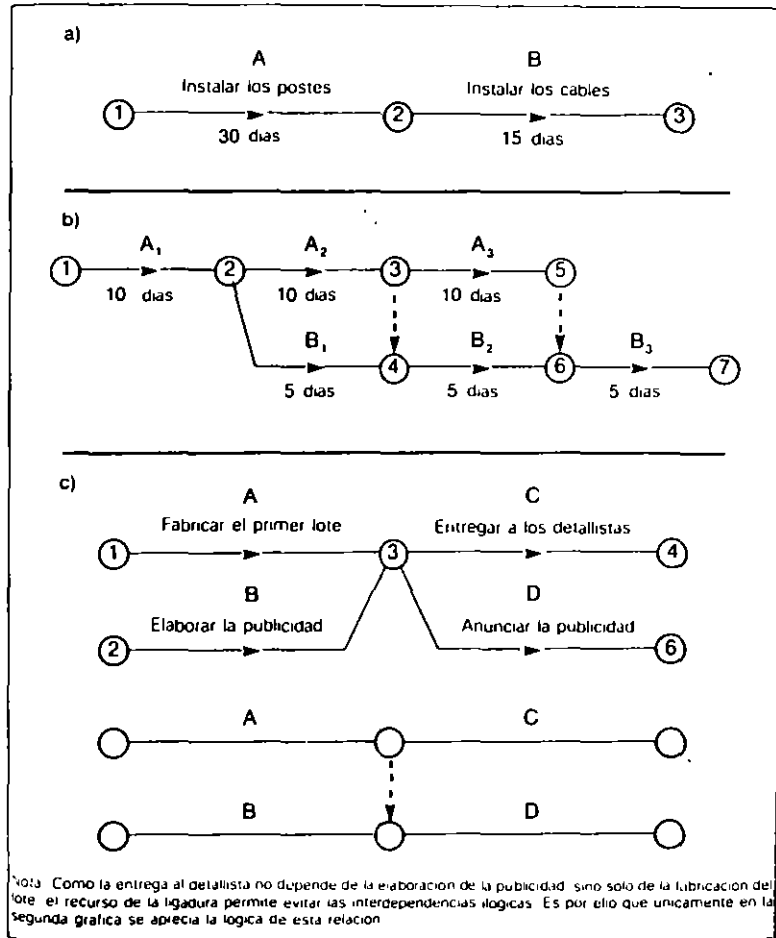


Fig. 13-3  
Representación  
de las  
ligaduras

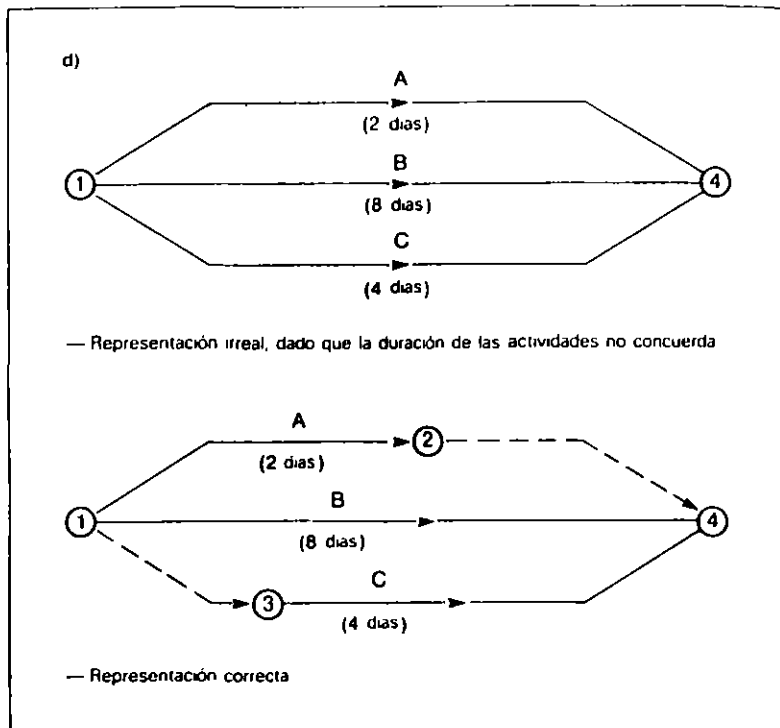


Fig. 13-3  
(Cont.)

### CONSTRUCCION DE UNA RED

En la figura 13-4 se muestran las seis etapas de la construcción de la red PERT:

- Se hace la lista y la codificación de las actividades cuyas relaciones se indican (fig. 13-4).
- Se expresa gráficamente la interdependencia de estas actividades. No debe repetirse ninguna letra en la columna de las actividades.
- Se numeran las actividades comenzando por la cifra 1 para la actividad A; posteriormente se hace un desplazamiento horizontal para numerar las actividades subsecuentes con la cifra 2. La numeración de las actividades subsecuentes corresponde por tanto a la cifra atribuida a la actividad anterior más 1. Si dos actividades anteriores pertenecientes a un mismo nudo tienen números diferentes, se elige el más elevado cuando se añade 1 para numerar las actividades subsecuentes. Note que no existe ninguna relación vertical entre los números.
- Posteriormente se numeran los nudos; el nudo lleva el número más elevado de las actividades anteriores.

- Se traza un número de líneas verticales equivalente al nivel de nudos. Posteriormente se coloca cada nudo sobre la línea correspondiente a su número. Debe notarse que, si una letra se repite en la columna de las actividades previas, existirá una ligadura entre sus nudos.
- Se construye finalmente la red, uniendo las líneas entre los nudos e inscribiendo las flechas apropiadas.

### FIJACION DE LAS FECHAS DE TERMINACION

Una vez que el tiempo de realización de cada actividad se ha evaluado y que la red de actividades ha sido establecida, se decide el momento en el que empezará y terminará cada una de las actividades.

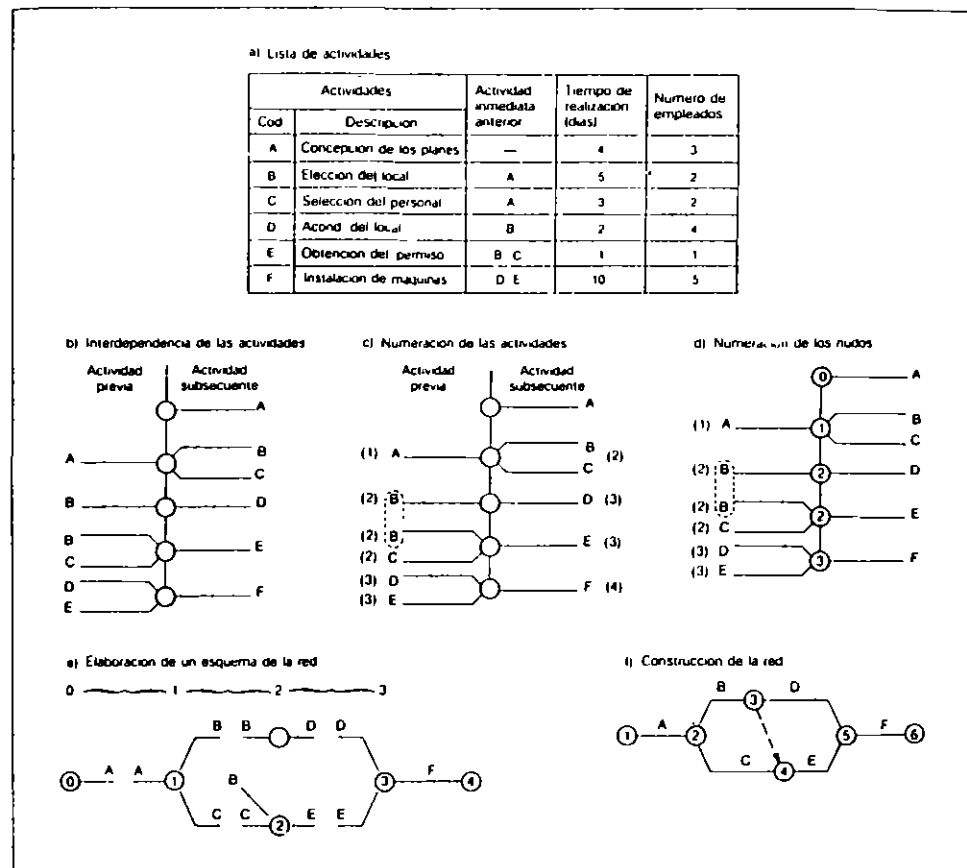


Fig. 13-4  
Etapas de la construcción de una red PERT



En la técnica CPM se evalúa el tiempo promedio de realización, y es con ayuda de este tiempo como se determina el momento del inicio y del fin de cada actividad. En la técnica PERT se considera que al tiempo de realización sigue una distribución aleatoria, con ayuda de la cual se evalúan el tiempo promedio y la desviación estándar de cada actividad. Esto permite conocer la probabilidad de terminar el programa dentro de las demoras previstas.

### Terminología y símbolos

**Inicio temprano (ITE).** Esta es la fecha de iniciación de una actividad, cuando todas las actividades previas han sido terminadas en su fecha más temprana. El inicio temprano de una actividad corresponde por tanto a la fecha más alejada de los finales tempranos (FTE) de las actividades anteriores.

$$(ITE)_i = \text{Máx} (FTE \text{ de las actividades } a \text{ previas}),$$

donde  $i$  designa la actividad.

**Final temprano (FTE).** Esta es la fecha del final más temprano posible de una actividad, cuando ésta ha comenzado con un inicio temprano. El final más temprano corresponde por tanto al inicio más temprano de la actividad que se considera más el tiempo promedio de su realización ( $t_i$ ).

$$(FTE)_i = (ITE)_i + t_i$$

**Inicio tardío (ITA).** Esta es la fecha más tardía para comenzar una actividad si se desea evitar retardos en las actividades subsecuentes. El inicio tardío de una actividad corresponde a su fin tardío menos el tiempo promedio de su realización:

$$(ITA)_i = (FTA)_i - t_i$$

**Final tardío (FTA).** Esta es la fecha más tardía del final de una actividad si se desea evitar informar la fecha final más allá del final previsto en el programa. El fin tardío de una actividad corresponde a la fecha más cercana de los inicios tardíos de las actividades subsecuentes:

$$(FTA)_i = \text{Min} (ITA \text{ de las actividades subsecuentes})$$

**Ruta crítica (RC).** Este método está constituido por una serie de actividades cuya suma de tiempos promedios de realización corresponde a la duración total del programa. Esta ruta se denomina "crítica" porque sus actividades no incluyen margen alguno. Por tanto deben controlarse estrechamente, puesto que toda demora retardaría el final previsto dentro del programa.

**Margen total (MT).** Esta es la demora que puede concederse a una actividad sin retardar el final previsto en el programa. Si el margen total de una actividad se agota, las actividades subsecuentes formarán parte de una nueva ruta crítica.

$$(MT)_i = (ITA)_i - (ITE)_i = (FTA)_i - (FTE)_i$$

**Margen libre (ML)** Esta es la demora que puede concederse a una actividad sin retardar el inicio temprano de las actividades subsecuentes. Si el margen libre de una actividad se agota, la ruta crítica no se ve afectada. El margen libre debe ser inferior o igual al margen total.

$$(ML)_i = \text{Min} (ITE \text{ de las actividades subsecuentes}) - (FTE)_i$$

En la figura 13-5 se muestra la representación de estos valores para una actividad de la red PERT.

### Ejemplo de cálculo

En la figura 13-6 se indican los resultados de un cálculo de tiempo para una red PERT. Debe notarse que la ruta crítica está constituida por actividades cuyos márgenes totales y libres son nulos (A, B, D y F). Si el margen libre de la actividad C se agota, el inicio temprano de la actividad E no resulta afectado. Por tanto, es inútil acelerar las actividades C y E para reducir la duración del programa. Aun sería preferible aumentar su duración si ello puede contribuir a reducir los costos del conjunto.

También es posible representar las actividades con ayuda de la gráfica de Gantt, precisando las fechas del calendario anual (fig. 13-6).

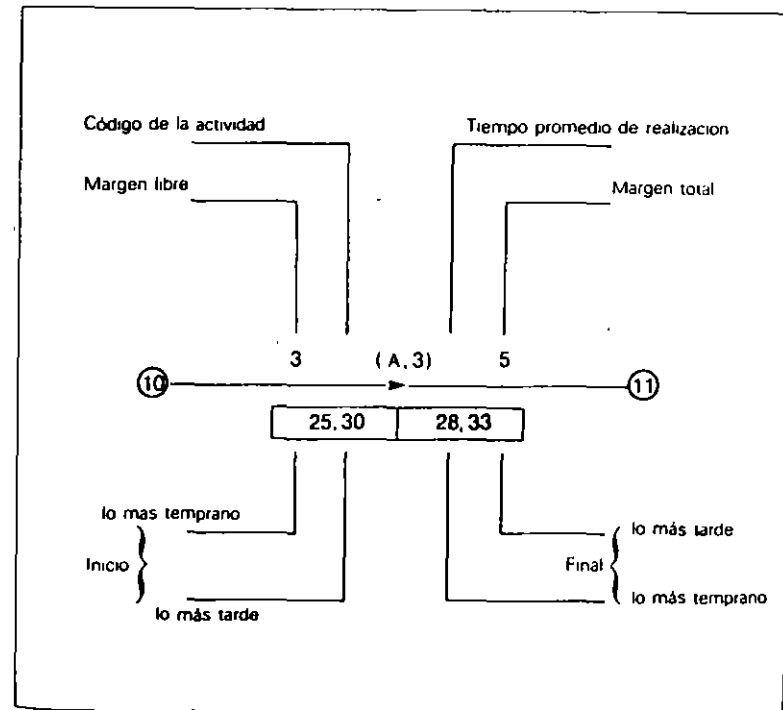


Fig. 13-5  
Representación de los valores del tiempo para cada actividad de la red PERT

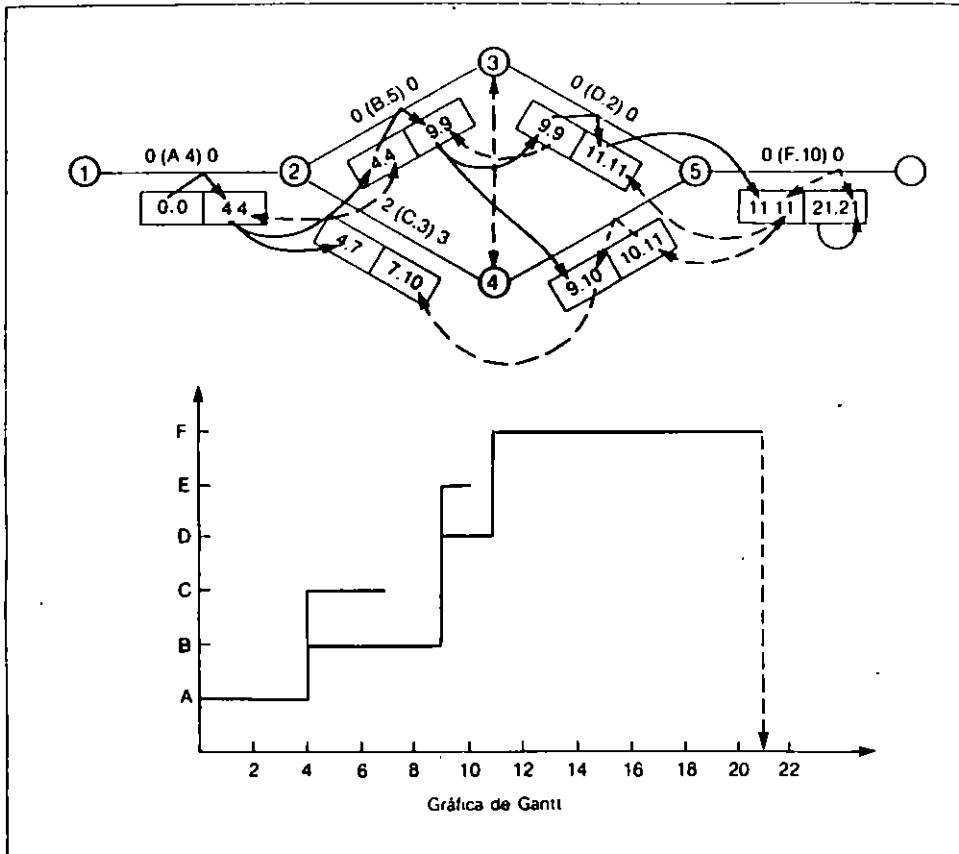


Fig. 13-6  
Cálculo del tiempo de cada actividad

## PLANIFICACION DE LOS RECURSOS

Para cada actividad se requiere el empleo de uno o varios recursos humanos, materiales o financieros. Después de la elaboración del calendario deben determinarse estos recursos. Esta etapa es esencial a fin de equilibrar los recursos necesarios con los recursos disponibles de la empresa. Frecuentemente, es necesario revisar el calendario de las actividades a causa de restricciones de recursos.

a) **Recursos humanos.** Debe evaluarse el número de personas implicadas en cada actividad, y posteriormente debe establecerse el número total de personas necesarias por día o por periodo para el conjunto de actividades. En la

figura 13-7 se ilustra la representación del número de personas por periodo para el ejemplo de la figura 13-4

En ciertos casos, las variaciones del número de personas por periodo son muy importantes. El responsable de los trabajos se verá obligado, como consecuencia de políticas administrativas, a controlar la utilización del personal. Para lograrlo, tiene la alternativa entre desplazar las actividades que tienen

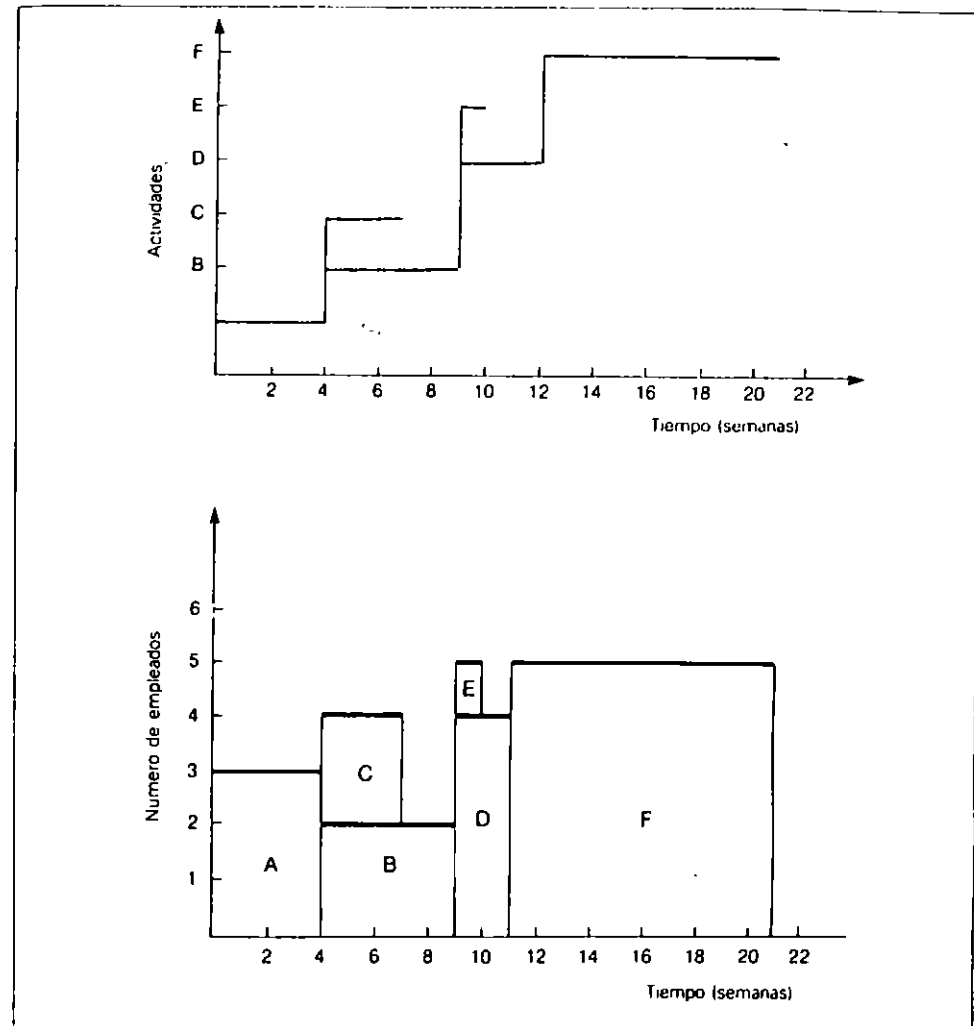


Fig. 13-7  
Cálculo del número de empleados por periodo

un margen total o reducir el número de personas por actividad, aumentando así el número de periodos de trabajo y alargando la duración del programa

b) **Recursos materiales.** Es necesario prever para cada actividad, las materias primas, las herramientas y los equipos, y evaluar su costo. Los planes y los presupuestos proporcionarán la información necesaria para estos cálculos. A partir de la lista de este material por actividad y según la fecha de terminación de los trabajos, se procede a las compras.

c) **Recursos financieros.** El análisis de los costos del programa se hace casi paralelamente a la elaboración del calendario. Se estudia la forma en que la mano de obra, el plazo de terminación, el aumento o la disminución de personal y el recurso al tiempo suplementario repercuten en los costos.

La etapa subsecuente es la elaboración del presupuesto. Este presupuesto puede dividirse en presupuestos por actividad, por fase de realización, de mano de obra, de materia prima, de equipo, etc. De este modo, el presupuesto podrá servir de herramienta de control y planificación.

## RESUMEN

La producción unitaria incluye numerosas actividades interdependientes y orientadas hacia la realización de un objetivo o de un producto específico. Las dos principales técnicas de planificación y de control para tal sistema de producción son el CPM y el PERT. Ambas utilizan la red de actividades y permiten evaluar el tiempo y los costos de realización.

## Preguntas

1. ¿Cuáles son las características de la producción por unidad?
2. ¿Cuáles son las etapas de la planificación de los trabajos de producción por unidad?
3. Haga una comparación entre las técnicas de CPM y las del PERT.
4. ¿Qué es lo que caracteriza al método de la ruta crítica?
5. ¿En qué consiste la planificación de los recursos?

## Ejercicios prácticos

1. Una compañía cierra sus puertas dos semanas al año para el mantenimiento general de su fábrica. El departamento de mantenimiento ha elaborado la lista que se presenta a continuación de las actividades y los números de días y de empleados necesarios para esta operación anual. Se desea:
  - a) diseñar la red PERT;
  - b) determinar la duración y las actividades de la ruta crítica.

c) repartir el personal de este departamento respetando los plazos de terminación establecidos, sabiendo que el departamento cuenta con 13 empleados y puede llegar a tener hasta 16 en caso necesario

Actividad	Actividad inmediata anterior	Número de días	Número de empleados
A	—	1	9
B	—	3	3
C	—	4	8
D	A	1	2
E	D	3	5
F	B	2	7
G	E	2	6
H	C, F, G	5	12

2. Los alumnos de los últimos semestres de la carrera de Finanzas de una universidad organizan cada año, durante la última semana de marzo, un departamento que ayuda a la población local a redactar las declaraciones de impuestos. A fin de planificar la organización de esta semana, los estudiantes han elaborado la lista de las actividades inmediatamente previas y consecutivas a la semana de declaración de impuestos. Basándose en esta lista, se pide que usted:

- a) diseñe la red PERT;
- b) determine las actividades de la ruta crítica;
- c) determine en qué fecha deben formar su comité los estudiantes, sabiendo que la semana de declaración de impuestos empieza el último lunes de marzo.

Código	Descripción	Actividad inmediata anterior	Duración (días)
A	Formación de un comité	—	5
B	Primera reunión del comité	A	5
C	Reservación de un número de teléfono	B	1
D	Impresión de cartas publicitarias	C	5
E	Expedición de cartas	D	5
F	Elaboración de anuncios para los medios de comunicación	C	5
G	Contacto con los medios de comunicación	F, E	5
H	Elaboración de la lista de los equipos	B	1
I	Elaboración de los horarios de los estudiantes para la semana	D	5
J	Elaboración de los horarios de los profesores	I	5
K	Recolección de una cuota de \$ 1	B	5
L	Reservación de los equipos	H	1
M	Apertura de una cuenta bancaria	K	1
N	Elaboración de anuncios publicitarios	G	2

O	Compra de café, azúcar, buñuelos, etc	M	1
P	Reservación de dos cafeterías	L, M	1
Q	Instalación de los equipos, anuncios, etc	O, N, P	1
R	La semana de impuestos	J, Q, G	5
S	Remesa de la cuota	R	3
T	Elaboración de estados financieros	S	5
U	Reunión del comité	T	1
V	Publicación de un informe	U	5

- 3 Una compañía desea reorganizar físicamente su taller de ensamble en función de un nuevo producto. El responsable del programa ha evaluado la duración y el costo directo en situación normal y en caso de aceleración de los trabajos (vea la tabla siguiente) Si la compañía evita costos indirectos de \$ 150 por día, ¿tendría alguna ventaja acelerar los trabajos al máximo? ¿Cuáles son las actividades que deberán ser aceleradas a fin de maximizar las economías?

Actividad	Actividad inmediata anterior	Duración (días)		Costos directos (\$)	
		normal	acelerada	normal	acelerada
A	—	2	1	450	600
B	A	8	4	300	500
C	A	7	5	400	500
D	C	6	3	300	400
E	C	5	3	500	900
F	B	2	2	200	200
G	D, F	5	4	450	600
H	E, G	3	2	300	600

### BIBLIOGRAFIA

- 1 Boulet, A., *Le PERT à la portée de tous*, Paris Dunod, 1970
- 2 Chase, R. et N. Aquilano, *Production and Operations Management* Homewood (Ill.) Irwin 1976
- 3 Kaulman, A. et G. Desbazeille, *La méthode du chemin critique*, Paris Dunod 2<sup>e</sup> éd 1966
- 4 Perreault, Y.G., *Recherche opérationnelle techniques décisionnelles* Montréal, Presses de l'Université du Québec, 1973
- 5 Poggioli, P., *Pratique de la méthode PERT*, Paris Éditions d'organisation, 1970

# 14

## Administración del abastecimiento

### OBJETIVOS

Después de haber estudiado este capítulo, el lector deberá ser capaz de

- definir el cometido del abastecimiento dentro del sistema de producción;
- describir las principales etapas del ciclo de compra;
- identificar los elementos de un código de procedimientos.
- describir las actividades de un sistema de administración del abastecimiento,
- analizar las componentes del sistema logístico

### TERMINOLOGIA

abastecimiento  
código de procedimientos  
acondicionamiento  
ciclo de compra  
empaquetamiento  
logística industrial  
política de compra  
requisición de compra

## INTRODUCCION

Toda empresa, cualesquiera que sean sus actividades, tiene necesidad de obtener ciertos bienes o servicios para sus operaciones. La empresa industrial se abastece de materias primas, muebles, maquinaria y servicios necesarios para sus procedimientos de producción. La empresa comercial compra productos que se revenderán con una utilidad. La empresa de servicios obtiene los muebles y equipos que serán necesarios para sus procedimientos administrativos.

La administración del *abastecimiento* consiste por tanto en procurar a un sistema de producción los bienes y servicios en la cantidad y calidad requeridas, al mejor precio, del mejor proveedor en el lugar y el momento oportunos, a fin de satisfacer las exigencias de sus operaciones. Estos son los principales aspectos de una administración eficaz del abastecimiento. En síntesis, se trata de responder a las siguientes preguntas: ¿Qué comprar?, ¿En qué cantidad?, ¿Cómo comprarlo?, ¿Cuándo y de quién comprarlo? (fig. 14-1)

El abastecimiento de materias primas o equipos y la distribución de los productos terminados están asegurados por el *sistema logístico*. Este sis-

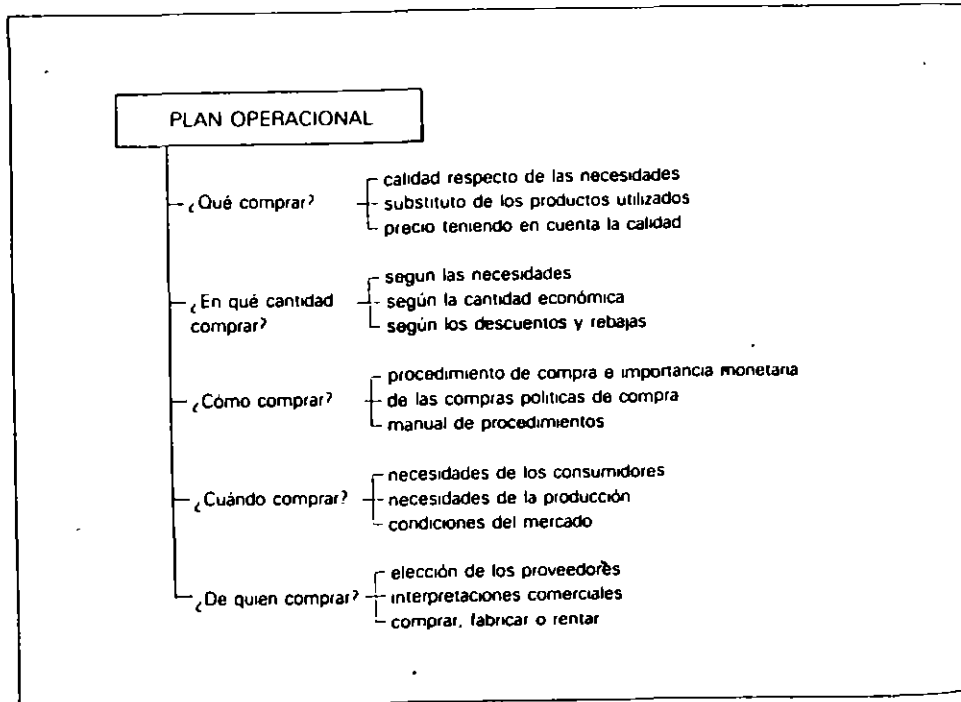


Fig. 14-1  
Problemática de las compras en el plan operacional

tema se compone de varios subsistemas productivos como los de compras, administración de los inventarios, planificación y control de la producción, transporte y tratamiento de los pedidos.

En este capítulo se describen las principales etapas del ciclo de compra, la política de compra, el código de procedimientos y el sistema logístico.

## CICLO DE COMPRA

Este consiste en una serie de actividades o etapas que se encadenan e inician con una demanda interna, denominada "*requisición*" de compra. En la figura 14-2 se muestran las etapas del ciclo de compra y los servicios que normalmente implican este ciclo.

a) **Emisión de una requisición de compra.** Esta es la etapa en la que se comunica la necesidad al departamento de abastecimiento. Esto puede hacerlo cualquier departamento de la empresa o exclusivamente el departamento de control de los inventarios. Esta última práctica es la más común en la mayoría de las empresas.

b) **Análisis de la requisición.** El secretario del departamento de abastecimiento dirige la requisición al comprador responsable de esta categoría de bienes y servicios, el cual debe a su vez revisar ciertos puntos antes de proceder a la investigación y elección de un proveedor, o simplemente a la emisión de un pedido. Los puntos que deben revisarse se mencionan en la figura 14-2.

c) **Investigación y elección de un proveedor.** Esta etapa existe en las siguientes situaciones:

- compras nuevas,
- compras importantes desde el punto de vista económico o técnico,
- insuficiencia del proveedor actual,
- evolución del mercado (disminución de los precios, aparición de un nuevo producto, de un nuevo proveedor, etc.)

La investigación y elección de un proveedor comprenden las tres siguientes actividades:

- elaboración de una lista de proveedores aceptables,
- elaboración de cotizaciones o concurso de ofertas,
- evaluación de las ofertas y elección de un proveedor.

d) **Emisión de una solicitud de pedido.** Una vez que se ha hecho la elección, se expide al proveedor una solicitud de pedido, la cual constituye el contrato escrito entre la empresa compradora y el proveedor. En la figura 14-3 se muestran las principales etapas de la emisión de una solicitud de pedido.

e) **Seguimiento del pedido.** La responsabilidad del abastecimiento no termina con la expedición de una solicitud de pedido, sino se extiende hasta la

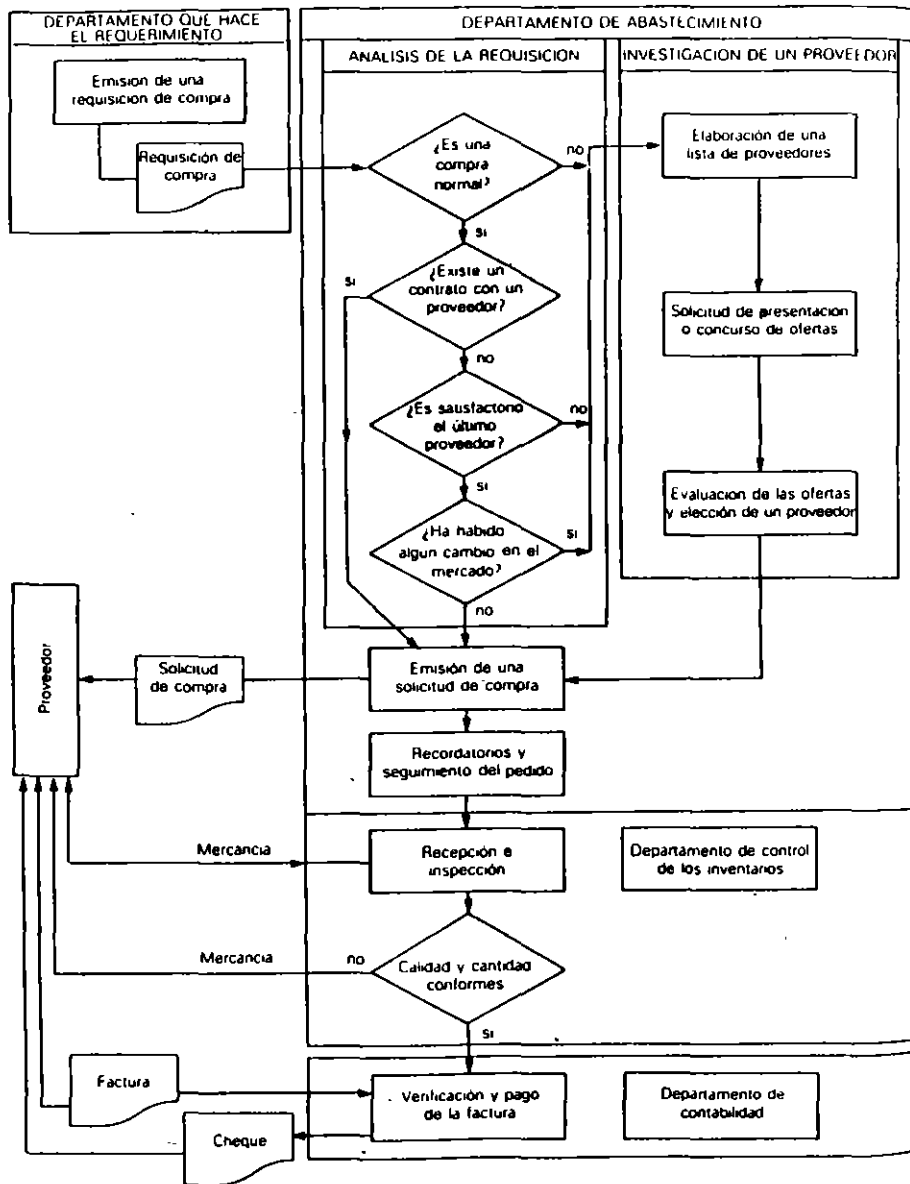


Fig. 14-2  
Principales etapas de un ciclo de compra

utilización del material en las líneas de producción. Entre estas dos etapas, es necesario que el responsable de la compra siga el pedido de cerca y proceda a hacer recordatorios y solicitudes de información al proveedor, a fin de asegurarse de que el contenido del pedido sea entregado en la fecha prevista.

f) **Recepción e inspección de la mercancía.** En el momento de la recepción, la inspección se hace generalmente en dos etapas, que pueden denominarse *inspección general* e *inspección técnica*. La inspección general es realizada por un comisionado del departamento de recepción, el cual verifica el estado general de la mercancía. Posteriormente dicha mercancía se guarda en la zona de control, en espera de la inspección técnica por parte de los especialistas de la empresa.

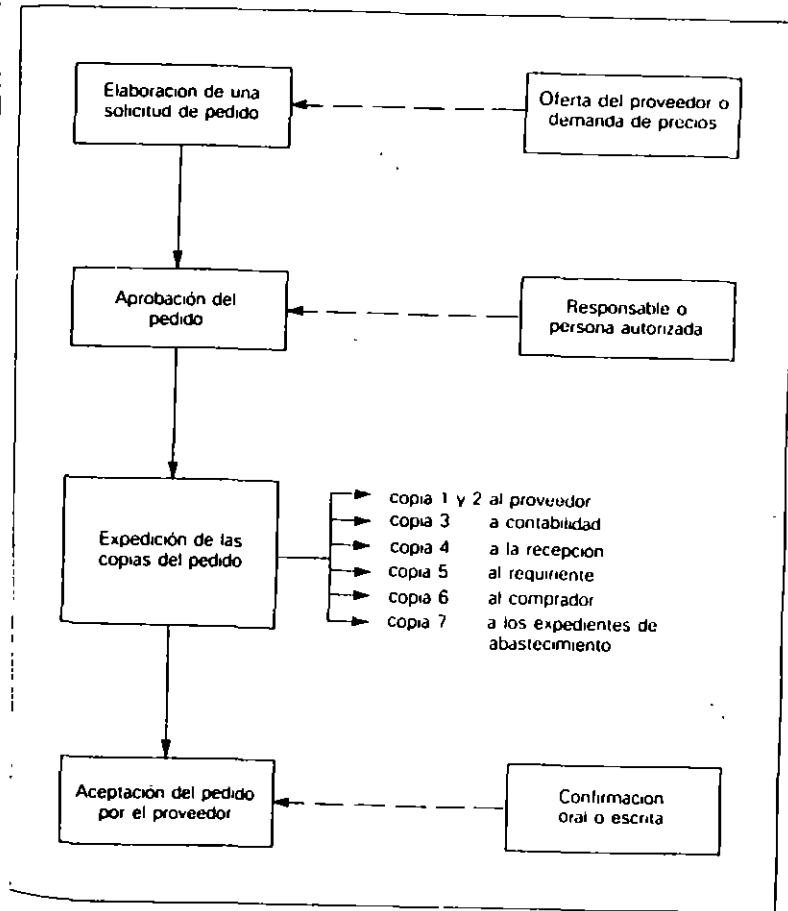


Fig. 14-3  
Etapas de la elaboración y la emisión de un pedido

g) Verificación y pago de la factura. Si el informe de inspección es favorable para la aceptación de la mercancía, éste se envía al departamento de contabilidad para la autorización del pago

Después de la verificación simultánea de la solicitud de compra, el informe de inspección y la factura, el departamento de contabilidad emite un cheque

## POLITICA DE COMPRA Y CODIGO DE PROCEDIMIENTOS

La política de compra y el código de procedimientos son herramientas de trabajo indispensables para la administración eficaz de las compras. Dichas políticas definen la responsabilidad y las actividades del departamento de abastecimiento. Para ser verdaderamente útiles, es necesario que estos documentos se difundan por los departamentos de la empresa. Desafortunadamente,

en muchas empresas éstas son cosas a las cuales se hace referencia "de memoria", sin que haya nada escrito

## LA POLITICA DE COMPRA

Este es un enunciado de los principios y reglas que definen la actitud de la empresa en materia de abastecimiento. Dicha política podría formularse de la siguiente manera:

- La responsabilidad de las compras se confía al departamento de abastecimiento, único autorizado para comprometer a la compañía con un proveedor
- Dicho departamento tiene en cuenta todas las recomendaciones que le son hechas por quien formula la requisición
- Este departamento debe recurrir sistemáticamente a la competencia entre los proveedores.
- Limita las compras a los proveedores que juzgue responsables, es decir, aquellos cuya reputación, situación financiera y estructura de precios sean lo suficientemente sólidas para considerarse una fuente adecuada de abastecimiento
- Asegura que los proveedores respeten íntegramente las condiciones en las cuales se han comprometido

## EL CODIGO DE PROCEDIMIENTOS

Este es una guía que define las responsabilidades del departamento de abastecimiento y fija los métodos a los cuales debe recurrirse para las actividades de compra. El contenido del código de procedimientos se basa en los siguientes puntos:

- responsabilidad de las compras;
- autoridad y delegación de autoridad,
- procedimientos de compra: negociación oral, negociación escrita (demanda de precio o de sumisión), invitación a concurso de ofertas, convocatoria de ofertas públicas,
- elección de los proveedores;
- elección de las ofertas,
- estándares de calidad,
- comunicación de los proveedores

## SISTEMA DE ADMINISTRACION DEL ABASTECIMIENTO

En la figura 14-4 se muestran las componentes de este sistema de administración. En el capítulo 4 se definió el cometido de cada uno de los subsistemas (de control, de organización y de operaciones). Aplicaremos estas definiciones al sistema de administración del abastecimiento

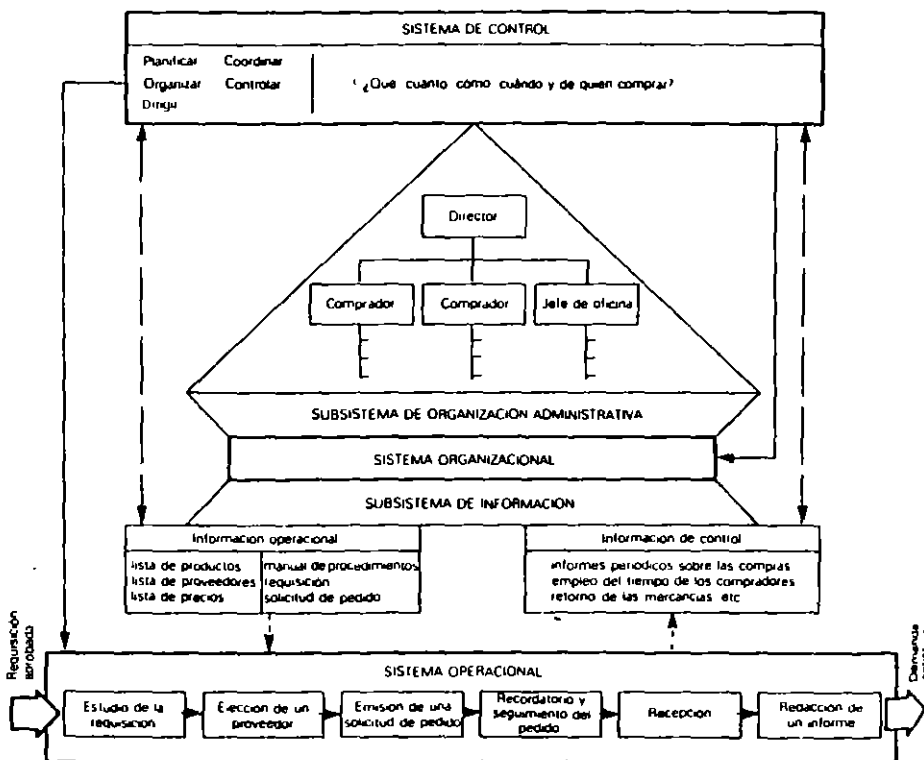


Fig 14-4 Sistema de administración de un departamento de abastecimiento

## SISTEMA DE CONTROL

Este asegura la administración del sistema operacional de abastecimiento. Para hacerlo responde a las preguntas ¿Qué?, ¿En qué cantidad?, ¿Cómo?, ¿Cuándo?, ¿De quién comprar? Los elementos de respuesta a estas preguntas se definen en la política de compras y en el manual de procedimientos. La figura 14-5 proporciona ciertos elementos de respuesta.

La acción del sistema de control no se limita a estos aspectos, sino que se extiende a toda la administración, es decir, a la resolución de los problemas, la planificación y el control de las actividades del abastecimiento, y a la dirección del personal de abastecimiento.

## SISTEMA ORGANIZACIONAL

Este sistema comprende la organización administrativa y la información. Estos dos subsistemas, si están bien definidos y son respetados por todo el personal, permiten el funcionamiento armónico del departamento de abastecimiento.

a) **Subsistema de organización administrativa.** Este es el conjunto de estructuras administrativas que definen la finalidad, responsabilidad, autoridad, funciones y relaciones de los diferentes puestos administrativos dentro del departamento de abastecimiento. La descripción de tareas (fig 14-6) y el organigrama administrativo (fig 14-7) son herramientas que permiten establecer la organización administrativa.

¿Qué comprar?	¿Que cantidad comprar?	¿Cómo comprar?	¿De quién comprar?	¿Cuándo comprar?
A partir de las necesidades se determina la lista de bienes y servicios necesarios para la producción, y se prevén sus especificaciones.	A partir del análisis de las necesidades se evalúa la cantidad económica por comprar, teniendo en cuenta las ofertas de descuento o de rebaja.	Según la importancia del valor monetario de las compras se procede a: <ul style="list-style-type: none"> <li>— investigación verbal</li> <li>— investigación escrita</li> <li>— convocatoria de ofertas por invitación</li> <li>— convocatoria pública de ofertas</li> </ul>	Además de las interpretaciones comerciales, otros criterios para la elección de los proveedores son: <ul style="list-style-type: none"> <li>— precio/calidad</li> <li>— capacidad técnica del proveedor</li> <li>— garantía</li> <li>— situación financiera etc</li> </ul>	— Según un calendario de compras relacionado con las necesidades de la producción. — Después de carta revisión de los inventarios disponibles.

Fig. 14-5  
Elementos de respuesta a las preguntas relativas a las compras

### Descripción de la tarea

#### Identificación

Título Comprador de materiales Grupo Administrativo y técnico  
 Departamento Abastecimiento División Compras  
 Fecha de publicación Agosto 1977. Publicación precedente Abril 1973  
 Nivel de responsabilidad Exento  
 Director inmediato Gerente de compras de materiales  
 Subordinados inmediatos Ninguno

#### Responsabilidades

Dependiente del gerente de compras de materiales es responsable de la compra de los materiales que le son asignados. Participa con el gerente en la formulación de los objetivos, políticas y programas que regulan las actividades de compra.  
 Valor anual de las compras más de \$ 3 000 000

#### Detalles de las funciones

- 1 Favorece las políticas y las prioridades de abastecimiento de materiales y de servicios, lo cual permite a la compañía obtener el máximo beneficio por cada dólar gastado.
- 2 Vigila que los proveedores entreguen las cantidades al precio, con la calidad y en el momento requeridos.
- 3 Negocia, supervisa y sigue los pedidos de mercancía.
- 4 Es responsable de la investigación de las fuentes de abastecimiento, de los ahorros posibles y de los nuevos productos.
- 5 Fomenta la cooperación entre los diferentes departamentos de la compañía y provee la participación necesaria para la reducción de los costos y el mejoramiento de los productos.
- 6 Coordina y asegura los vínculos entre los proveedores y los departamentos (aseguramiento de la calidad, investigación fabricación, mercadotecnia) implicados en la modificación de las especificaciones.
- 7 Fomenta la creación de nuevas fuentes de abastecimiento.
- 8 Desarrolla informes favorables con los proveedores actuales y eventuales.
- 9 Negocia con los proveedores.
- 10 Vigila, sobre petición, el manejo y la eliminación de los materiales dañados, rechazados u obsoletos.
- 11 Se informa de las leyes y reglamentos que rigen la compra y la expedición de los materiales utilizados por la compañía.
- 12 Proporciona periódicamente a los diferentes responsables informes sobre las condiciones de mercado, las tendencias económicas y sus efectos sobre el abastecimiento de los materiales utilizados en la producción.
- 13 Sigue la evolución de la función de compras.
- 14 Asume toda tarea especial que su director le confíe.
- 15 Toma la iniciativa en el mejoramiento del departamento de abastecimiento.
- 16 Participa en el establecimiento de los procedimientos de inventario.
- 17 Concentra a los diferentes comités cuyo objeto tiene alguna relación con el abastecimiento y sus dependientes.
- 18 Elabora informes para la alta administración.

Fig. 14-8  
Descripción de tareas para un comprador



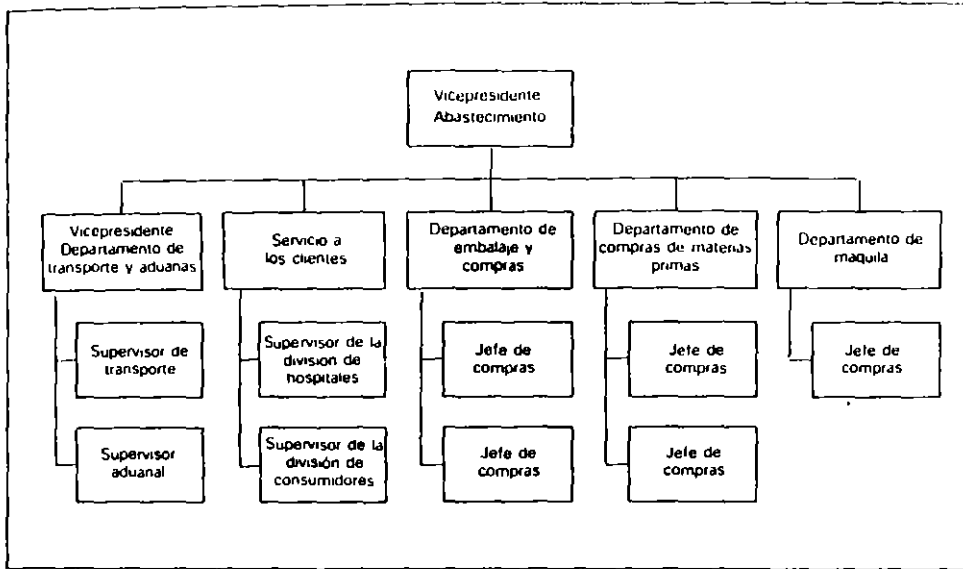


FIG. 14-7  
Organigrama de un departamento de aprovisionamiento

b) **Subsistema de información** Este es el conjunto de informes y documentos necesarios para la administración del departamento de abastecimiento. En la figura 14-8 se muestra la información recibida y emitida por este departamento.

### SISTEMA OPERACIONAL

Su función consiste en responder a las demandas de compra respetando siempre las condiciones establecidas por el sistema de control. El ciclo de compra que se expuso anteriormente resume las operaciones.

### SISTEMA DE LOGISTICA

El término *logística* designa normalmente el conjunto de actividades relacionadas con el transporte, abastecimiento y alojamiento de tropas. Después de la última guerra mundial, varios términos y técnicas pertenecientes a las operaciones militares fueron adaptados a la administración de empresas, y la logística se identificó con las actividades de abastecimiento y distribución de productos. Es así que se habla de *logística industrial*, que es una parte importante de la administración de operaciones de una empresa.

Puede decirse que el rendimiento de una empresa va de la mano con la eficacia de su sistema logístico. Su integración a una empresa implica que se identifiquen las diferentes actividades logísticas dentro de la empresa y que se las reagrupe en una misma función. A menudo es muy difícil confiar todas

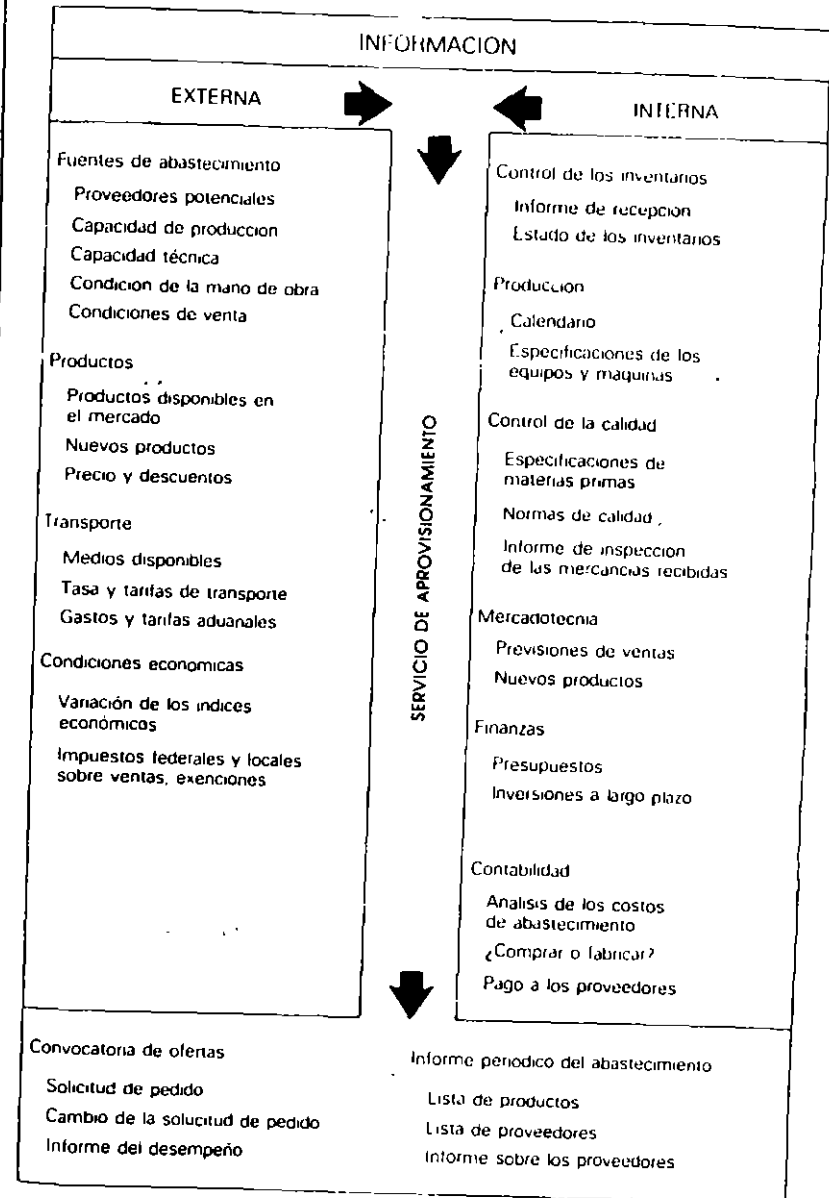


Fig 14-8  
Información recibida y emitida por el departamento de abastecimiento

estas actividades a un solo responsable. Por este motivo generalmente es necesario implantar mecanismos de comunicación y de coordinación entre los responsables de estas actividades. Sin embargo, en las empresas de transporte, estas actividades se centralizan en un departamento de coordinación de operaciones a título de función principal. En las empresas industriales y comerciales, la logística se identifica con la distribución física, cuya responsabilidad se confía a uno de los tres siguientes departamentos: abastecimiento, producción o mercadería.

## DEFINICION Y COMPONENTES DE LA LOGISTICA INDUSTRIAL

La organización del desplazamiento y de la manutención de los materiales (materias primas y productos), ya sea en el interior o en el exterior de la empresa, es el objeto de estudio de la logística industrial. La función de esta última consiste en vigilar la eficacia de las redes de distribución y de abastecimiento, de los modos de manutención y transporte, de la localización de los departamentos y de la distribución física de los locales.

Los costos de manutención y de desplazamiento constituyen, en ciertos casos, más del 50% del precio de costo del producto. Estos costos varían de una empresa a otra según varios factores tales como tipo de producto, volumen, peso, cantidad, forma de transporte, distancia, coordinación de las operaciones, etc. Una empresa que desee tener ahorros debe por tanto organizar eficazmente las actividades de su sistema logístico.

Las actividades de un sistema logístico pueden dividirse en tres categorías:

- localización, distribución física, manutención, acondicionamiento y empaquetamiento,
- planificación de la producción y administración de los inventarios,
- distribución física (recepción, transporte y aduana, tratamiento de los pedidos).

Estas actividades son interdependientes. Un retardo al nivel de la entrega de las materias primas afectará el nivel de los inventarios, lo cual provocará tarde o temprano modificaciones en los planes de producción. A fin de comprender mejor el funcionamiento del sistema logístico, veamos la interdependencia de sus actividades.

### Localización, distribución física, manutención, acondicionamiento y empaquetado

Los tres factores que afectan en forma fundamental el sistema logístico de una empresa son las fuentes de abastecimiento, la red de distribución, el costo y el modo de transporte.

El estudio de la localización en un sistema logístico tiene por objeto reducir el costo de transporte de las materias primas y de los productos terminados. La localización de la fábrica y de los almacenes debe analizarse teniendo en cuenta las redes de abastecimiento y de distribución, puesto que éstos son

los vínculos de una empresa con sus fuentes de vida. También deben considerarse otros factores: alejamiento de la mano de obra, servicios públicos, ventajas fiscales, etc.

La *distribución física* de los locales, cuando ha sido mal concebida, puede repercutir en la eficacia del sistema de producción. El emplazamiento de las máquinas y los equipos respecto a los trabajadores y los materiales debe ser analizado de tal forma que se reduzcan los desplazamientos tanto dentro de la fábrica como dentro del almacén.

El estudio de la *manutención* de los materiales tiene como finalidad integrar los equipos de manutención para que dicha actividad se desempeñe en forma eficaz y económica. El estudio de la distribución física y el de la manutención deben hacerse en forma simultánea.

El *acondicionamiento* de los productos debe concebirse en forma tal que se facilite el empaque. Ambas cosas están en función de los aparatos de manutención y de los modos de transporte: el paquete o la caja deben tener forma, dimensiones y peso que no rebasen la capacidad de los aparatos y vehículos.

Por otra parte, el espacio ocupado por el producto depende del acondicionamiento: por ejemplo, el volumen de ocupación será más grande cuando el embalaje tenga forma cilíndrica en vez de cúbica. Ello tendrá como efecto un aumento en el costo del transporte.

### Planificación de la producción y administración de los inventarios

Hemos reagrupado estas dos actividades debido a que, como se ha visto, es esencial conocer las previsiones, el nivel de servicio y el nivel de los inventarios para planificar la producción. El nivel del inventario de productos terminados está en función del nivel de servicio a los clientes: un nivel de servicio elevado exigirá un inventario elevado y, en consecuencia, un aumento en los costos de almacenamiento. Disminuir el nivel de servicio provoca la insatisfacción de la clientela y la pérdida eventual de los clientes. Se trata de encontrar el nivel de servicio que, teniendo en cuenta otros elementos, asegurará a la empresa el mejor rendimiento.

Por este motivo la planificación y el control de la producción deben asegurar, en la cantidad requerida y en el momento oportuno, la alimentación de la red de distribución, e informar al departamento de abastecimiento las necesidades de materiales con demoras mínimas. El almacenamiento también forma parte de la administración de los inventarios, y por ello debe tenerse en cuenta la magnitud y distribución física del almacén, la manutención y las condiciones de almacenamiento. Estos son los factores que influyen en la eficacia del sistema logístico.

### Distribución física

Este es el punto medular de la logística. Se compone de las siguientes actividades:

c) **Recepción** Antes de su almacenamiento, la mercancía se guarda a menudo en una zona de control en espera de la inspección y verificación. El procedimiento de inspección varía de una empresa a otra, según la cantidad de la mercancía y la importancia de la calidad. Si la eficacia de este procedimiento deja que desear, ello ocasionará retardos en la fabricación y en consecuencia una baja en el nivel de servicio.

b) **Transporte y aduana.** El transporte añade al producto los valores de tiempo y de lugar. La elección de las formas de transporte y el control de los costos de este último se cuentan entre las actividades de la logística.

Las decisiones concernientes a este dominio exigen el conocimiento de los modos de transporte, de su capacidad y de sus costos respectivos. Los ahorros que se obtendrán son importantes y justifican el tiempo consagrado al análisis de estas decisiones.

Por otra parte, el departamento de aduanas, en el caso de las exportaciones e importaciones, vigila los procedimientos aduanales para la recepción y expedición de las mercancías.

c) **Tratamiento de los pedidos.** La recepción del pedido del cliente, la verificación y aprobación del crédito, la preparación y expedición de la mercancía, la facturación, la transmisión de los acuses de recepción a la contabilidad y el registro de las quejas componen el ciclo del tratamiento de los pedidos. Es el departamento de pedidos el que asegura la coordinación de estas actividades y permite reducir las demoras de entrega. Por tanto, desempeña una importante función en el sistema de logística.

Las demoras de entrega dependen en parte de la eficacia de este departamento. Si se mejora el tratamiento de los pedidos se mejora también el servicio a los clientes.

## INTERDEPENDENCIA DE LAS PRINCIPALES ACTIVIDADES DEL SISTEMA LOGISTICO

Se ha notado que estas actividades son interdependientes. Si se efectúa un cambio en una actividad, deberán evaluarse sus consecuencias en las demás actividades. A menudo es difícil prever todas las consecuencias de un cambio y medir su importancia, debido a que el análisis de un sistema logístico es complejo. La figura 14-9 da una idea de esta interdependencia. En ella se ponen de relieve las relaciones entre las actividades, los departamentos y los productos.

En la figura 14-10 se muestran los efectos de ciertas decisiones en el costo de las diferentes actividades del sistema logístico. Cada casilla sombreada, sobre la diagonal, representa una decisión tomada al nivel de una actividad. Las casillas sobre la misma línea horizontal indican las consecuencias de esta decisión. Por ejemplo, el aumento de volumen de carga tendrá como consecuencias: la disminución del costo del transporte, la posibilidad de aumentar el espacio de almacenamiento (lo cual aumentará los costos de almacenamiento), una reducción del número de pedidos (lo cual ocasionará una dismi-

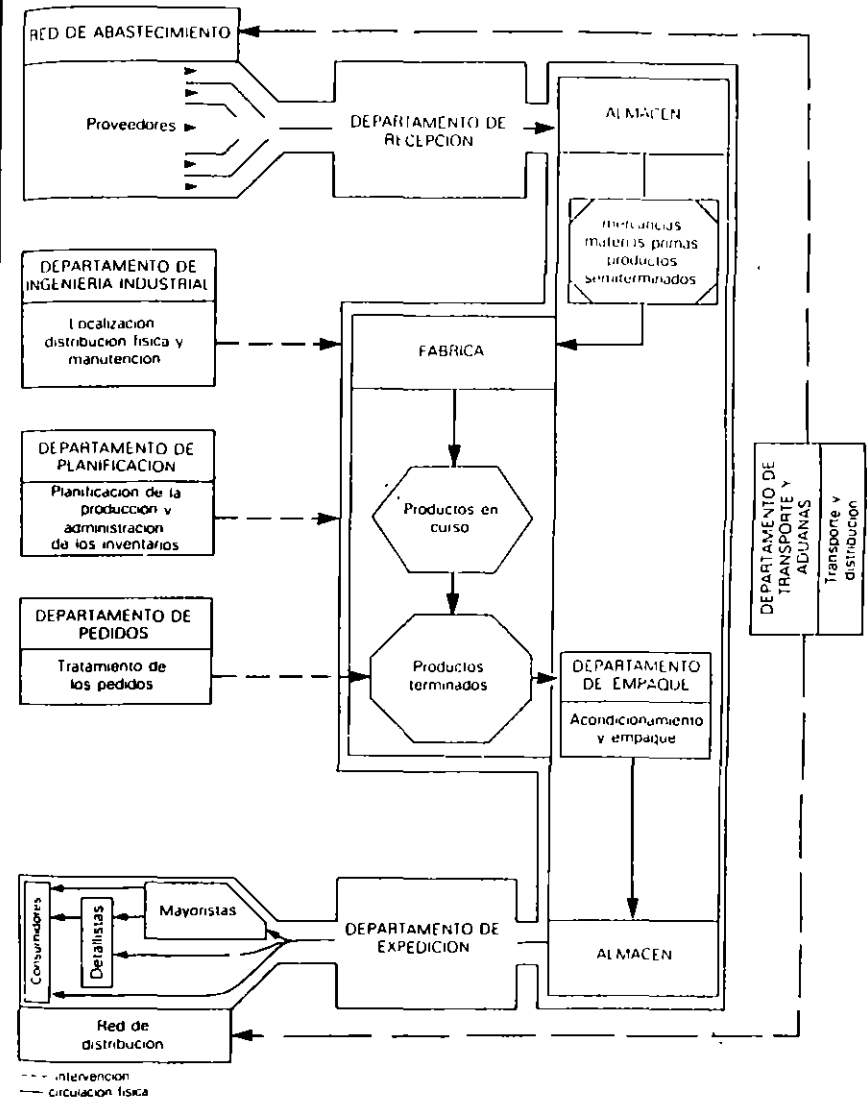


Fig. 14-9 Interdependencia de las componentes de un sistema de logística industrial



- Departamento de ingeniería: ingeniero en jefe, ingeniera y secretario
- Departamento de producción: director de producción, superintendente de fábrica, comisionado del almacén, capataces y obreros
- Departamento de contabilidad: contador, dos auxiliares contables, secretaria

2. Cuatro tiendas de neumáticos (A, B, C, D) presentan cada cual una propuesta a una compañía de transportes que desea comprar 400 neumáticos para su flota de camiones ligeros. He aquí sus ofertas:

A) Garantía de duración	50 000 km
Precio	\$ 35 50 menos 10%
B) Garantía de duración	40 000 km
Precio	\$ 32.00 menos 5%
C) Garantía de duración	45 000 km
Precio	\$ 32.50 menos 8%
C) Garantía de duración	40 000 km
Precio	\$ 34 00 (sin descuento)

- 1) Basándose en el criterio económico, ¿qué elección haría usted?
- 2) Calcule el ahorro total que se realizará como consecuencia de la elección que usted haga
- 3) ¿Cuáles son, según usted, los demás criterios de selección que deben tenerse en cuenta?

## Estudio de un caso práctico

La empresa "Filteck Ltée" transforma fibras sintéticas que se usan en la fabricación de productos de mercería y de decoración comercial

### ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL (parcial)

Los departamentos de investigación y desarrollo, de abastecimiento y de fabricación informan directamente al director de la fábrica. El departamento de control de calidad informa al director de fabricación (fig. 14-11).

- El departamento de investigación y desarrollo está compuesto por tres técnicos que trabajan bajo la dirección de un químico. Este departamento tiene la responsabilidad de desarrollar nuevos productos y de modificar los productos existentes en función de las nuevas tecnologías. También debe emitir las especificaciones para las materias primas, para el procedimiento de fabricación y para el producto terminado.
- El departamento de abastecimiento está formado por un director, asistido por un comprador. Este departamento tiene la responsabilidad de comprar las materias primas necesarias para la fabricación del producto según la cantidad prescrita en las especificaciones. Debe, en la medida de lo posible, diversificar sus fuentes de abastecimiento y comprar al mejor precio.

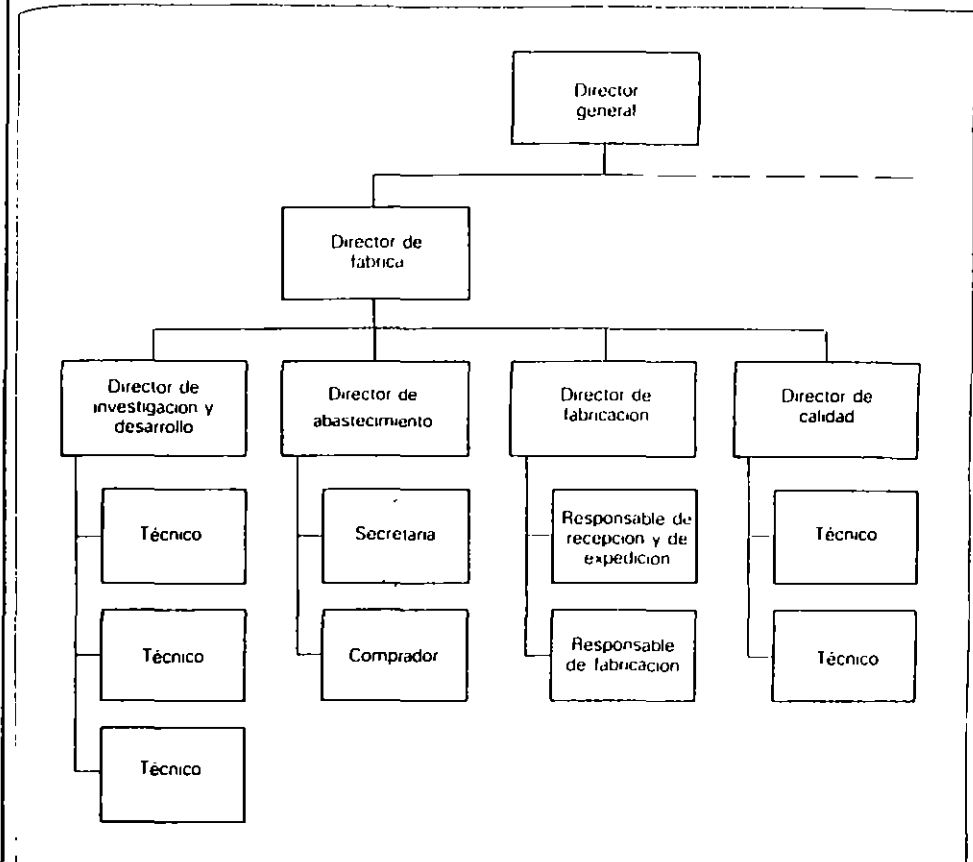


Fig. 14-11  
Organigrama administrativo parcial de la compañía "Filteck Ltée"

- El departamento de fabricación está compuesto por un director, al cual informan dos responsables, el primero de la fabricación del producto, el segundo de su recepción y expedición. El departamento de fabricación tiene la responsabilidad de manufacturar un producto conforme las normas de calidad definidas por el departamento de investigación y desarrollo. Debe planear la fabricación en forma tal que el producto esté disponible sin que se acumulen inventarios de materias primas y de productos terminados demasiado cuantiosos. En este departamento trabajan aproximadamente 50 empleados.
- El departamento de control de la calidad está constituido por un ingeniero y dos técnicos que se encargan del control de las materias primas y del producto terminado. Este departamento tiene como responsabilidad garantizar que el producto terminado satisfaga las especificaciones.

### CURSO DE LAS ESPECIFICACIONES

Las especificaciones que describen las normas y tolerancias para las materias primas y para los productos terminados, así como las características de los procedimientos, son emitidas por el departamento de investigación y desarrollo, después de ser aprobadas por el químico.

Las especificaciones se distribuyen como sigue.

materias primas	departamento de abastecimiento, departamento de control de calidad,
productos terminados y procedimientos	departamento de fabricación, departamento de control de calidad

### CURSO DE LAS REQUISICIONES DE COMPRA

La requisición es emitida por el departamento de fabricación, y posteriormente se gira al departamento de abastecimiento. La solicitud de pedido es entonces emitida por el comprador, con referencia al número de especificación de materia prima. Se envía una copia al responsable de la recepción de las materias primas.

### LA SITUACION

Un técnico de control de calidad retiene casi todo el hilo producido en una jornada, debido a que la tensión mínima del hilo no cumple con la especificación del producto terminado.

El ingeniero de control de calidad informa de ello inmediatamente al jefe del departamento de fabricación, quien pregunta: "¿Como es posible? ¿No verificaron la fibra cuando llegó?" El ingeniero responde: "La fibra fue verificada, y en todos sus aspectos satisfizo la especificación, pero no es nuestro proveedor habitual."

El jefe del departamento y el ingeniero deciden informar el problema al director de fabricación, quien hace venir al jefe del departamento de abastecimiento y le dice: "Tenemos un serio problema de calidad, nuestras operaciones se encuentran paralizadas, toda la producción del día de hoy ha sido rechazada a causa de la baja resistencia del hilo, y me han informado que las fibras utilizadas provenían de un nuevo proveedor."

El jefe del departamento de abastecimiento replica: "Yo compré las fibras siguiendo la especificación de la materia prima, el proveedor me aseguro que podía fabricar esta fibra para nosotros a un mejor precio que nuestro proveedor habitual. ¿Cumplen las fibras con nuestra especificación?" El director de fabricación responde: "Sí, pero el producto terminado no es aceptable por parte de nuestro cliente."

El ingeniero del departamento de calidad propone hacer una reevaluación de todas las fibras no utilizadas y solicitar la asistencia del departamento de investigación y desarrollo. La reevaluación confirmó que las fibras satisfacen la especificación de la materia prima. Se convoca entonces al químico del departamento de investigación y desarrollo.

El director de fabricación no ha terminado de exponer el problema cuando el químico se pone de pie y dice: "Las fibras de este proveedor ya han sido evaluadas por mi departamento y han sido juzgadas inaceptables para este tipo

de hilo, vea usted mismo este informe (fig. 14-12) que data de hace ya un año". El informe gráfico indica claramente que, para una calidad aparentemente idéntica, las fibras de los dos proveedores no permitían obtener la misma calidad de hilo.

El jefe del departamento de abastecimiento añade: "Debido a todos los secretos con que usted rodea sus procedimientos de fabricación, no estamos ni siquiera al corriente de la utilización específica de las fibras que usted nos pide comprar. Si hubiera sabido que era para ese producto, nunca hubiera comprado el material a este proveedor."

El director de la fábrica, informado de la situación y de las pérdidas que deberá sufrir la empresa en vista de que no es posible reclamación alguna al

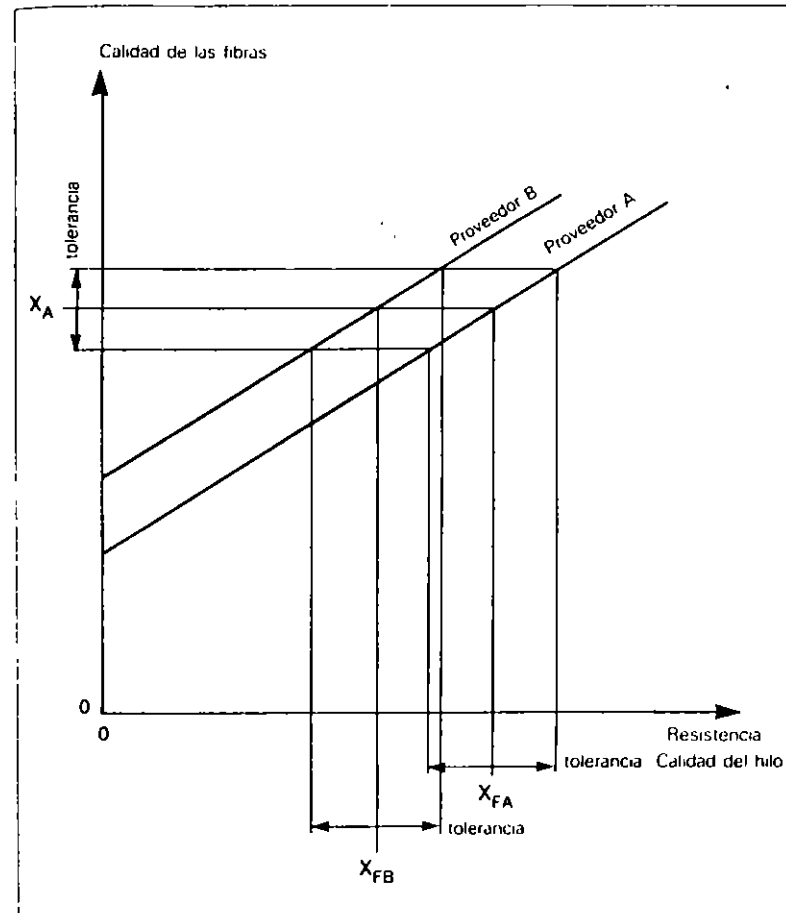


Fig. 14-12  
Componentes de un sistema de logística industrial

proveedor, solicita al jefe del departamento de abastecimiento que establezca un sistema que elimine este tipo de errores

Suponga que usted es el jefe del departamento de abastecimiento. Con ayuda del enfoque sistemático, elabore un sistema de verificación del abastecimiento para todo nuevo proveedor

## BIBLIOGRAFIA

- 1 Ammer, D.S., *Materials Management*, Homewood, Irwin, 3ª ed., 1974
  - 2 England, W.B., *Modern Procurement Management*, Homewood Irwin, 1970
  - 3 England, W.B. et M.R. Lenders, *Purchasing and Materials Management*, Homewood, Irwin, 6ª ed., 1975
  - 4 Hewitz, S., *L'approvisionnement dans l'entreprise*, Paris, Éditions de l'entreprise moderne, 1959
  - 5 Jardin, J., *Techniques de l'achat industriel*, Paris, Éditions Hommes et Techniques, 1974
  - 6 Lamar, L. et W.D. Dobler, *Purchasing and Materials Management Text and Cases*, New York, McGraw-Hill, 2ª ed., 1971.
  - 7 Muller, P.M., *Organisation des approvisionnements dans l'industrie*, Paris, Éditions d'organisation, 1971
- Artículos*
- 8 Ammer, D.S., « La direction des matières et produits organisée en centre de profits », Montréal *Acheteurs*, décembre 1970
  - 9 Chiqui, Claude, « La distribution physique nouveau champ d'expertise en management - Montréal, *Gestion*, novembre 1977.
  - 10 Gros, P., « L'organisation de l'approvisionnement », Montréal *Acheteurs*, octobre 1966
  - 11 Lapone, G. et Y. Nobert, « Distribution à partir d'un entrepôt central: le logiciel CIRCUITS », Montréal *Gestion*, novembre 1978

# 15

## Elementos de administración de la calidad

### OBJETIVOS

Después de haber estudiado este capítulo, el lector deberá ser capaz de:

- definir la calidad de un producto y sus elementos,
- explicar la orientación y los principios organizacionales de la función "calidad" dentro de la empresa;
- identificar las herramientas de administración de la calidad y principalmente las relativas a su costo;
- enumerar las componentes de un sistema de calidad y sus relaciones.

### TERMINOLOGIA

aseguramiento de la calidad	inspección
auditoría de la calidad	mantenimiento
control de la calidad	política de calidad
falla interna	prevención
falla interna	producto defectuoso
defecto	calidad
evaluación	técnico en calidad
confiabilidad	seguridad
administración de la calidad	

## INTRODUCCION

En Inglaterra, se ha evaluado el costo total de los defectos de fabricación en 400 millones de libras esterlinas por año. En la Unión Soviética, las pérdidas debidas a la mala calidad de los productos fueron estimadas por especialistas en aproximadamente 175 000 millones de rublos para 1958, cantidad que rebasa la cuarta parte del ingreso del Estado. Para los principales países de Europa, los expertos han evaluado el desperdicio en más de 10% de la producción industrial bruta, lo cual se debe a insuficiencia de la calidad de los productos [4]. Todos estos hechos ponen de relieve la importancia del aspecto cualitativo de la producción industrial.

En este capítulo estudiaremos primero la definición de la calidad y los elementos que la afectan; analizaremos también los diferentes tipos de estructuras organizacionales de un departamento de calidad.

Otra serie de hechos demuestra hasta qué punto los consumidores se vuelven más conscientes y más exigentes; ello explica por qué las empresas deben adoptar comportamientos que tengan en cuenta la calidad. En Estados Unidos, un informe presentado al presidente y al congreso en 1970 demostró que 20 millones de personas sufren heridas cada año; 100 000 casos se tratan de heridas corporales permanentes y 30 000 son mortales. En dicho informe se concluyó que el consumidor estadounidense está expuesto a ciertos riesgos en el momento de la utilización de los productos de consumo, y recomendó la creación de un mecanismo de protección al consumidor.

El público, al perder la confianza en la calidad de los productos, se organizó en los llamados "movimientos de protesta de los consumidores". Este fue el inicio de la era del "consumismo". Con el despertar de los consumidores, el número de pleitos legales contra las empresas, que no llegó más que a algunos cientos en los años sesentas, fue de un millón en 1973 en Estados Unidos.

Es por estas razones que a continuación estudiaremos los fundamentos de la organización de un departamento de calidad.

Sin embargo, la calidad tiene su precio y sus exigencias, y los hombres de negocios se preocupan cada vez más por la competencia internacional. Los competidores externos cuidan la calidad de sus productos imponiéndose normas de exportación muy rígidas. Por otra parte, en el mercado estadounidense la calidad de los productos importados se manifiesta en el interés que los consumidores ponen en ella, sobre todo cuando consideran la relación precio-calidad de los productos que les son ofrecidos [11].

Para completar el estudio de la calidad industrial, hablaremos del importante aspecto del costo de la calidad y las ventajas que la empresa puede obtener de ella. Finalmente, veremos en qué consiste la "auditoría" de la calidad y los medios de comunicación que se utilizan en el departamento dedicado a ella.

## HISTORIA

La calidad de un objeto o de un producto ha sido siempre una meta buscada por el hombre. El artista crea obras únicas con el deseo de impartirles un valor

permanente, y los artesanos fabrican sus productos siguiendo normas que fueron establecidas desde la antigüedad.

El año de 1790 marca el inicio de una nueva era en la industrialización con la producción de piezas de repuesto. A partir de 1900, con el nacimiento de las grandes fábricas, el obrero, que hasta entonces era responsable de la calidad de su producción (auto-control), vio pasar esta responsabilidad a un jefe de grupo.

Durante la primera guerra mundial, las demandas de equipo y provisiones para el ejército hicieron necesario el aumento de la productividad de las empresas. Para mantener la productividad y la calidad a un nivel aceptable, debe transferirse la responsabilidad de la calidad a un inspector.

La segunda guerra mundial desencadenó la producción en masa y una serie de nuevos desarrollos tecnológicos, los cuales necesitaban una reestructuración de las responsabilidades dentro de la empresa. La evaluación de la calidad se transfirió entonces a un grupo especializado denominado *control de la calidad*. Se introdujeron principios científicos, y el control estadístico de la calidad hizo su aparición.

Con la explosión industrial de los años sesentas apareció la *administración de la calidad*, resultado de una integración vertical y horizontal de la función "calidad" dentro de la empresa (fig. 15-1).

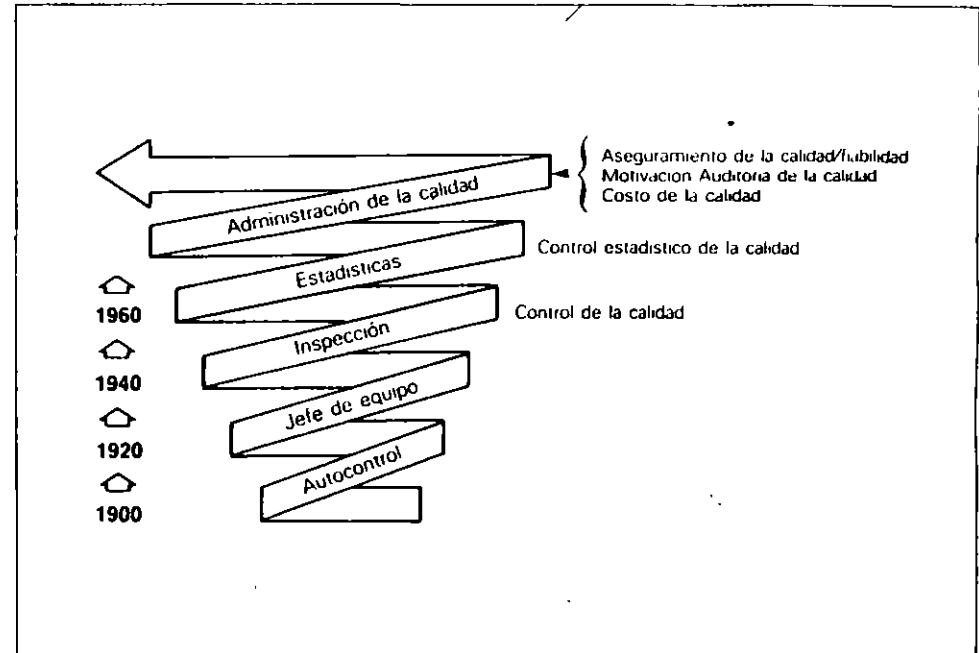


Fig. 15-1  
Evolución del sistema de la calidad



## LA CALIDAD Y SUS ELEMENTOS TECNICOS

La calidad es difícil de evaluar, porque muy a menudo es subjetiva y se opone a la noción de cantidad. Sin embargo, la función del administrador de la calidad, o del técnico en calidad,<sup>1</sup> será precisamente tratar de cuantificar esta calidad para medirla y controlarla. La calidad de un producto o de un servicio es actualmente sinónimo de valor de empleo o valor de uso: hasta donde podemos usar en forma intercambiable las expresiones "calidad del servicio" y "calidad del producto". Ello significa que la calidad no es absoluta sino relativa respecto de una necesidad o de una función. De este modo, las exigencias de calidad relativas a una cámara fotográfica serán diferentes para un profesional y un aficionado.

Esta noción de calidad depende, para el consumidor, del servicio obtenido del producto. Por ello es importante, al nivel de su concepción, tener en cuenta las características técnicas que corresponderán a este respecto, tales como:

- **Confiabilidad:** característica relativa a la vida útil, que tiene que ver con la aptitud del producto para realizar la función esperada, en las condiciones de utilización prescritas y durante un tiempo comercialmente aceptable
- **Pertinencia:** característica económica relacionada con la aptitud del producto para ser verificado o inspeccionado al costo más bajo posible durante su periodo de utilización comercialmente aceptable;
- **Mantenimiento:** característica operacional relativa a la posibilidad de prolongar el tiempo de vida útil por medio de mantenimiento preventivo, o aptitud del producto para ser reparado en el momento de una descompostura, durante su periodo de vida comercialmente aceptable,
- **Seguridad:** característica relacionada con la aptitud del producto para ser utilizado sin riesgos de producir daños corporales o a los bienes de terceros

La calidad debe ser bien comprendida para ser bien administrada. Si la empresa la considera un criterio del éxito, ello permitirá:

- reducir los desperdicios de energía y de materias primas,
- mejorar los precios de costo;
- responder a las aspiraciones de la clientela,
- asegurar un mercado interior activo e importante,
- facilitar el desarrollo de las exportaciones, y participar así en el avance económico del país.

## FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD

Estos factores se conocen en la industria con el nombre de las "siete M"

<sup>1</sup> Especialista en administración de la calidad. Otros neologismos originados de la misma raíz tienden a imponerse en esta especialidad: *cuálitica* (ciencia de la administración de la calidad) y *cuálimetría* (medición de la calidad).

— **El mercado:** La demanda de nuevos productos y de productos mejorados crece a un ritmo impresionante, y el consumidor se ve incitado por la publicidad a comprar con más frecuencia. Ello tiene por efecto la producción en masa y la puesta en marcha de productos de vida reducida. En este contexto, el consumidor puede percibir los productos como si fueran de calidad inferior.

— **La mano de obra:** El rápido crecimiento de la tecnología exige una mano de obra cada vez más especializada. Las nuevas tecnologías vuelven pronto obsoletos los procedimientos y métodos. Ello hace necesario un reciclaje de la mano de obra y muy a menudo un aumento del trabajo. La mano de obra se preocupa por el futuro y se siente menos responsable de la calidad del producto, puesto que su intervención en el proceso se ve disminuida.

— **Lo "monetario":** Para estar presente en el mercado, la compañía debe adaptarse a la tecnología más reciente y en consecuencia debe hacer inversiones para mejorar no solamente su productividad, sino también la calidad y la confiabilidad de su producto. El nivel de calidad del producto dependerá también del precio que el consumidor pueda pagar en el segmento del mercado en el que opere la empresa.

— **La manera de administrar:** Todo cambio rápido en la orientación, en el mercado, en la mano de obra y en las inversiones tiene como efecto un nuevo cuestionamiento de la finalidad de la administración y sus responsabilidades jerárquicas. La calidad de un producto depende de las decisiones de la administración y de la percepción que se tenga de esta calidad a los distintos niveles de la empresa, de no ser así, dicha calidad se vuelve efímera.

— **Los materiales:** La calidad del producto está ligada a la de los materiales. La empresa busca continuamente nuevos materiales a fin de mejorar la ejecución del producto y de reducir el costo de su producción. Las especificaciones se vuelven entonces restrictivas para las normas del producto y necesitan de análisis más complejos. Esta investigación de la economía en las materias primas da como resultado una limitación en el número de proveedores potenciales.

— **La máquina y el método:** La tecnología desencadena la utilización de nuevas máquinas y métodos de fabricación, los cuales tienen como finalidad mejorar la productividad y reducir los costos. Los métodos se vuelven rápidamente obsoletos, y la maquinaria utilizada no permite ya satisfacer las nuevas exigencias de calidad de la clientela. El uso de las máquinas es otro factor que afecta la calidad de los productos.

— **El medio de trabajo:** Para realizar un producto de calidad, no debe olvidarse la calidad del medio de trabajo. Un taller limpio, ordenado y bien iluminado es una necesidad indispensable. Las relaciones entre la mano de obra o los cuadros de trabajo afectan directamente el nivel de calidad del producto.

## LA FUNCION "CALIDAD" EN LA EMPRESA

Ahora que la calidad y sus exigencias han sido definidas, veamos las formas en que la organización puede lograr sus objetivos trazados a este respecto

Si la función "calidad" se encuentra integrada, se observa generalmente un aumento de la productividad, una reducción de las demoras de accesibilidad e incluso una reducción en el precio del producto. Esta función puede estructurarse siguiendo tres modelos:

- inspección,
- control de la calidad,
- aseguramiento de la calidad.

### INSPECCION

La inspección consiste en separar las unidades defectuosas de las unidades acordes con las especificaciones, verificándolas todas en la etapa final o después de ciertas operaciones de fabricación o de ensamble. Este modelo se ve limitado en su aplicación por el costo de la mano de obra cuando la inspección es manual. No es utilizable en el caso de análisis destructivos<sup>2</sup>. Sin embargo, puede adaptarse a una línea de fabricación continua cuando se automatiza la inspección. El principal inconveniente de este modelo es la detección tardía de las fallas, lo cual vuelve elevado el costo de los reinicios.

Este modelo se encuentra en las empresas cuya estructura organizacional contiene un grupo dirigido por un jefe de inspección el cual depende del director de fabricación (fig. 15-2). El grupo de inspección no tiene autoridad y

<sup>2</sup> El análisis destructivo es un método que consiste en verificar la calidad del producto por medio de un examen de consumo, que vuelve inutilizables las unidades probadas.

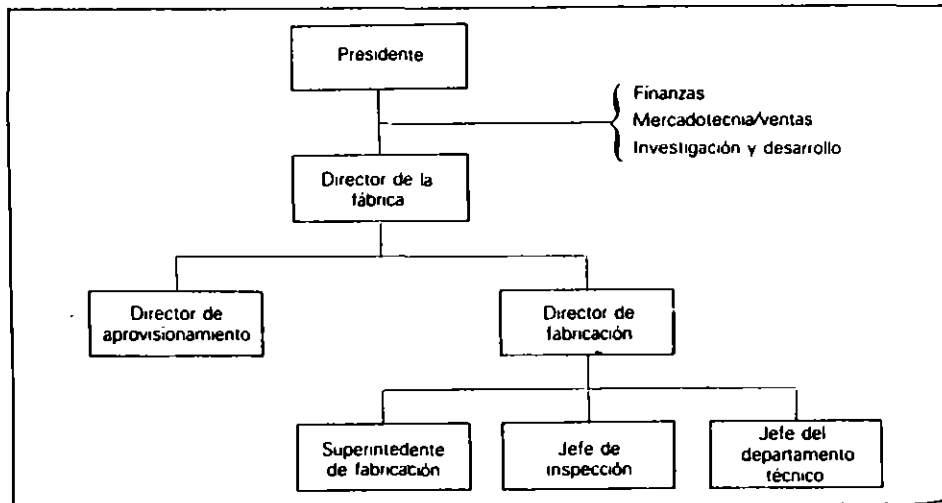


Fig. 15-2  
Modelo de "inspección de la calidad"

consecuentemente no puede ser responsable. En este caso, la dirección de la empresa está poco informada sobre la calidad de los productos, y por tanto generalmente la política de calidad no existe o bien no se respeta.

### CONTROL DE LA CALIDAD

El control consiste en *medir y evaluar la calidad* del producto manufacturado, desde la recepción de las materias primas hasta el final de la producción. Contrariamente a como ocurre en el caso de la inspección, en este modelo se utiliza el control estadístico; es decir, se elaboran planes de muestreo y cartas de control para asegurar la conformidad del producto con las especificaciones.

Este modelo responde bien a todo género de evaluación, incluso en el caso de análisis destructivos. Puede adaptarse a líneas de fabricación continuas, semicontinuas o intermitentes. El control estadístico permite verificar un gran número de características de un producto y evaluar la calidad de un lote estudiando un número restringido de unidades denominado *muestra*. Sólo los lotes que no tengan el nivel de calidad aceptable serán rechazados, entresacados o reprocesados. La automatización de la inspección continua en una línea de fabricación puede concebirse por una o varias características, y el control de la calidad asume en este caso la verificación del buen funcionamiento de los detectores de unidades defectuosas. Las principales ventajas de este modelo, comparado con el de inspección, son la prevención gracias al control de entrada y el mantenimiento del nivel de calidad aceptable mediante la aplicación de controles estadísticos en el curso de la fabricación o en la fase final.

Este modelo se encuentra en las empresas cuya estructura organizacional incluye un grupo de control de calidad que depende de un jefe de mantenimiento o del director de control de calidad, el cual se halla bajo la autoridad del director de la fábrica (fig. 15-3). Cuando el responsable del departamento de calidad se vuelve autónomo, este tiene la autoridad en materia de calidad y también tiene responsabilidades definidas. La dirección de la empresa estará

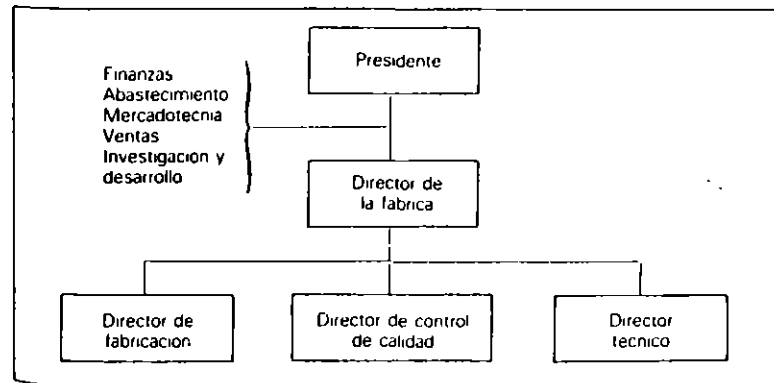


Fig. 15-3  
Modelo de "control de la calidad"

informada de la calidad de los productos y de este modo podrá formular una política de calidad. El inconveniente de este modelo es que, si la política de calidad está mal definida, puede cometerse un error al confiar la responsabilidad primaria de la calidad a este departamento.

## ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

La industria se orienta actualmente hacia este modelo, su estructura es mucho más compleja que en el pasado. El aseguramiento de la calidad es sinónimo de control integrado o de administración de la calidad, y se refiere a la *prevención*. Según el tamaño de la empresa y la naturaleza de los productos manufacturados, se recurre a varios grupos técnicos especialistas en ingeniería de la calidad, analistas y técnicos en administración de la calidad y expertos en tecnología de la empresa. Sus actividades rebasan el marco del simple control de la calidad y se ejercen también al nivel:

- de la concepción del producto,
- del control de los procedimientos,
- de la evaluación después de la venta.

Además de las herramientas estadísticas mencionadas para el control de la calidad, en este modelo se consideran otras técnicas como la auditoría,<sup>3</sup> la confiabilidad y el costo de la calidad, y concierne aún a la elaboración de las políticas globales de calidad. La ventaja de este modelo es que "pone el acento" sobre la prevención y sobre la coordinación de los informes referentes a la calidad de los productos a todos los niveles de la empresa y en todas las etapas de la transformación. Este modelo es el que permite la puesta en marcha y la comercialización de un producto que responda verdaderamente a las expectativas de la clientela.

Dicho modelo se encuentra en las empresas cuya estructura organizacional contenga un grupo a cargo de un director del aseguramiento de la calidad, el cual dependa a su vez de un vicepresidente de calidad y de un vicepresidente de investigación y desarrollo y de calidad (fig 15-4). El grupo de aseguramiento de la calidad es autónomo; tiene autoridad en materia de calidad y en cuanto a las responsabilidades mismas. La dirección general de la empresa está informada de la calidad de los productos. La política de calidad existe y forma parte de los objetivos de desarrollo de la empresa. Una vez que esta política es conocida y que la dirección general está informada de la calidad de los productos, no deberá haber posibilidad de conflicto en cuanto a la responsabilidad de la calidad, como ocurre en el caso del modelo de "control".

Una variante de la estructura de este modelo es posible en las tres grandes empresas. El grupo de aseguramiento de la calidad está constituido por especialistas en calidad, los cuales dependen de un vicepresidente de calidad (fig 15-5). Este grupo tiene como misión elaborar la política y los programas necesarios para el mantenimiento de la calidad de los productos en todas las fábricas de la empresa. La evaluación de los abastecimientos y de los productos terminados puede ser confiada al control de la calidad de cada fábrica.

3 Vea más adelante, pag. 289

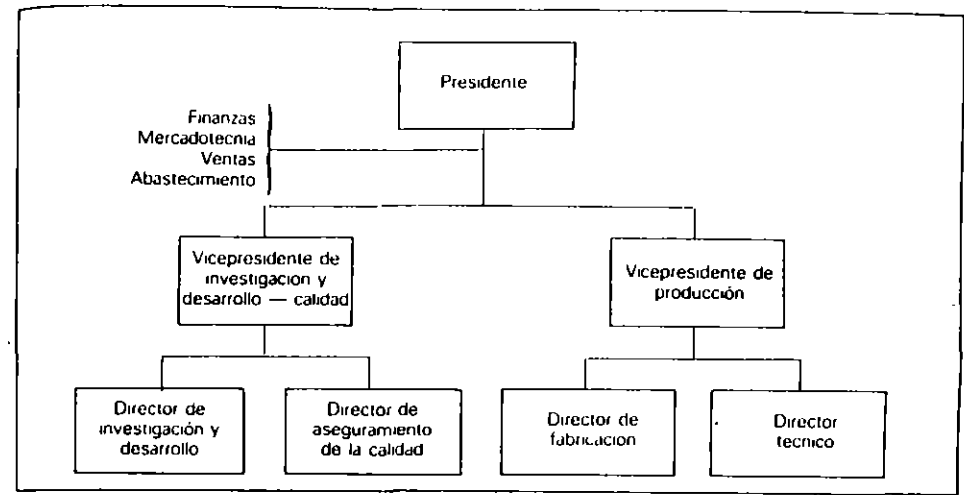


Fig 15-4  
Modelo de "aseguramiento de la calidad"

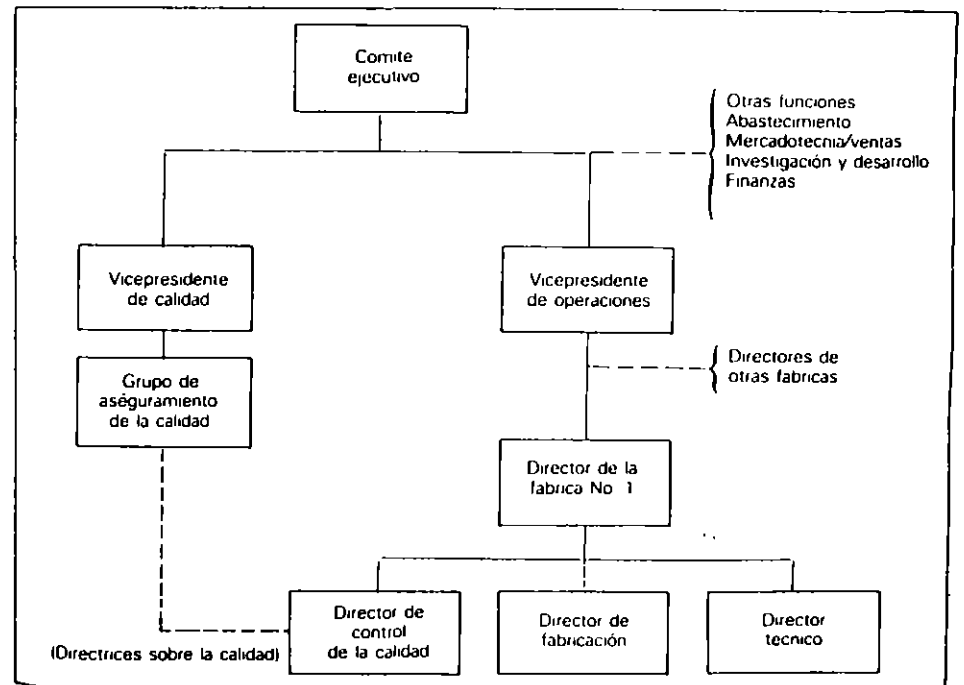


Fig 15-5  
Otro modelo de "aseguramiento de la calidad"

El grupo de aseguramiento de la calidad emite directrices generales y asiste a los grupos de control en caso de ser necesario

## ORGANIZACION DEL DEPARTAMENTO DE CALIDAD

Una vez que la política y la función "calidad" han sido definidas y reconocidas dentro de la empresa, el responsable debe organizar el departamento de calidad. Esta organización depende del tamaño de la empresa, de la naturaleza de los productos y de los riesgos asociados. Es una elección puramente económica y de la cual se desprenderán actividades separadas o reagrupadas al nivel de:

- *calidad de concepción*: actividades que permiten elaborar los documentos de trabajo necesarios para la confección del producto.
- *calidad de conformidad*: actividades que permiten fabricar un producto conforme las especificaciones y la política de calidad de la empresa,
- *calidad de ejecución*: actividades que permiten verificar que el producto procure el servicio esperado por el consumidor

Cuando la función "calidad" se define como un control de la calidad, generalmente la mayoría de las actividades se hace al nivel de la calidad de conformidad. Opuestamente, en lo que se refiere al aseguramiento de la calidad, los tres niveles están claramente definidos

La estructura del departamento de calidad puede por tanto tomar varias formas

**Pequeña empresa:** El responsable del departamento de calidad trabaja muy a menudo al nivel de la concepción y la ejecución, y es asistido por uno o varios técnicos para el control de la conformidad (fig. 15-6)

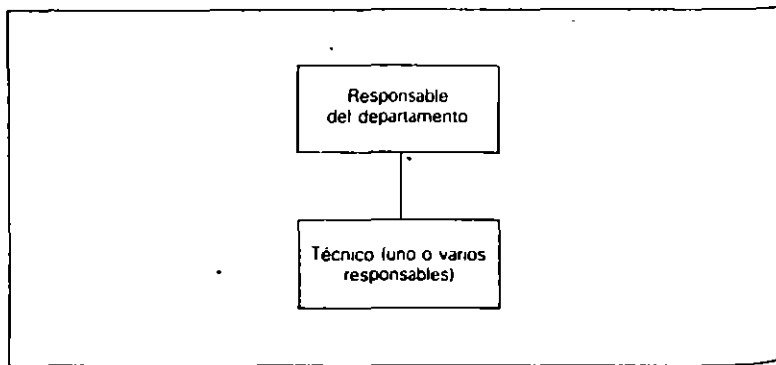


Fig. 15-6  
Pequeña empresa

**Mediana empresa:** El responsable del departamento de calidad puede aislar ciertas actividades y confiarlas a responsables de grupos (control de entrada, control de la producción en curso y de los productos terminados), un despacho de ingeniería de la calidad se ocupará de la concepción y la ejecución (fig 15-7)

**Empresa grande:** El responsable del departamento de calidad puede estructurar su área para responder a diferentes necesidades de la empresa: control de entrada, control de la producción en proceso y de los productos terminados (control separado o conexo a uno o varios procedimientos de fabricación, o a un conexo a las etapas de fabricación), laboratorio central de análisis, despacho de ingeniería especializado en una tecnología o una actividad de servicio (figs 15-8 y 15-9).

**Empresa muy grande:** El responsable del departamento de calidad puede edificar una estructura funcional especializando las funciones de los grupos de su departamento, por ejemplo en contabilidad, mantenimiento preventivo, seguridad del producto, auditoría de la calidad, negocios gubernamentales, control de entrada, planificación e información sobre la calidad, evaluación del producto en proceso de fabricación, evaluación final y calibración de los instrumentos de evaluación. En una estructura tal, los grupos pueden ser identificados con actividades de aseguramiento y de control de la calidad (fig 15-10).

Cuando la empresa posee varias fábricas, las actividades del control de la calidad pueden descentralizarse al nivel de cada fábrica. En oposición, las

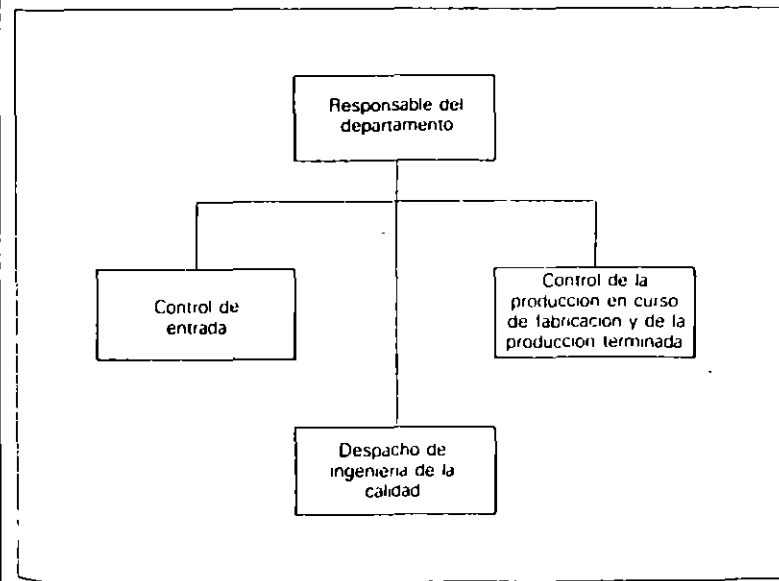


Fig 15-7  
Empresa mediana

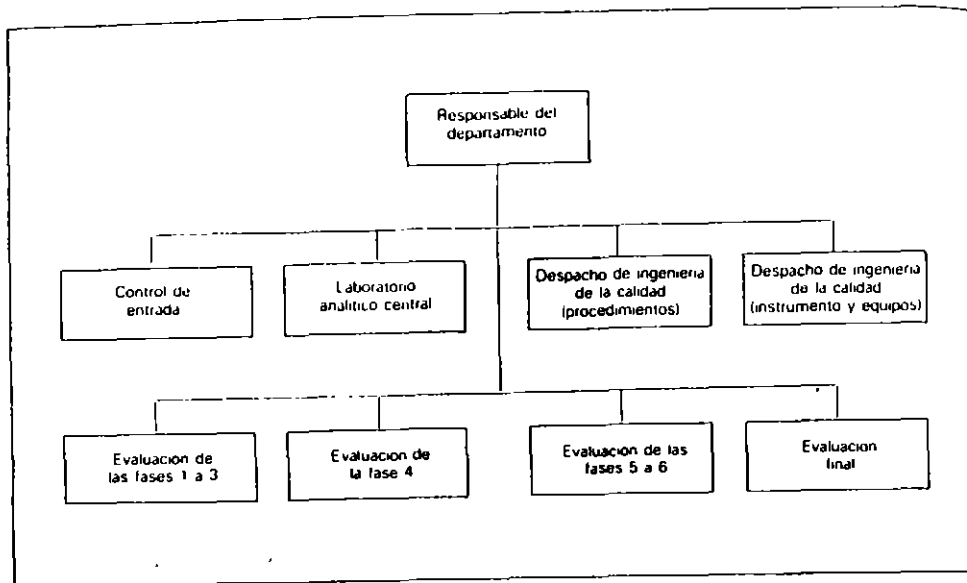


Fig 15-8  
Empresa grande con tecnología especializada

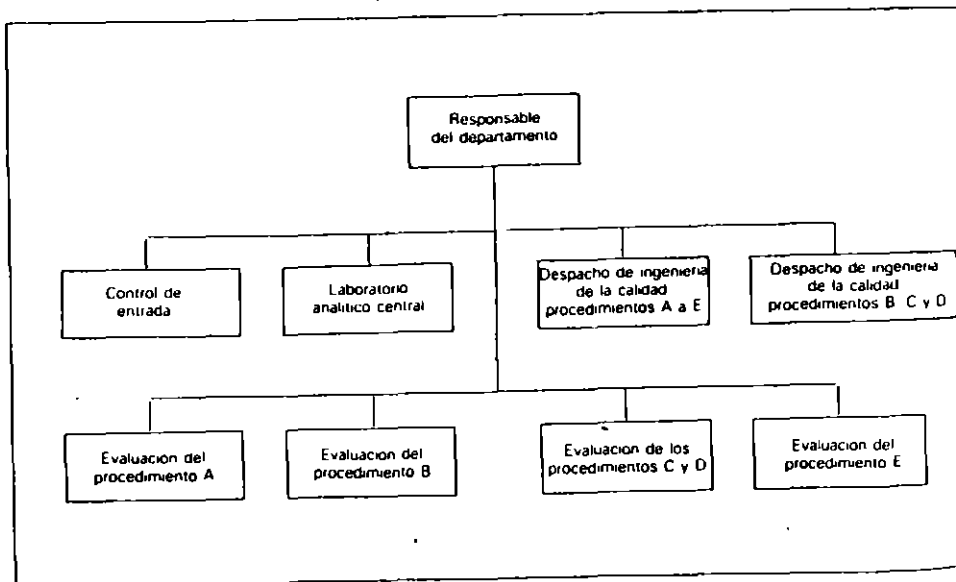


Fig 15-9  
Empresa grande con tecnología variada

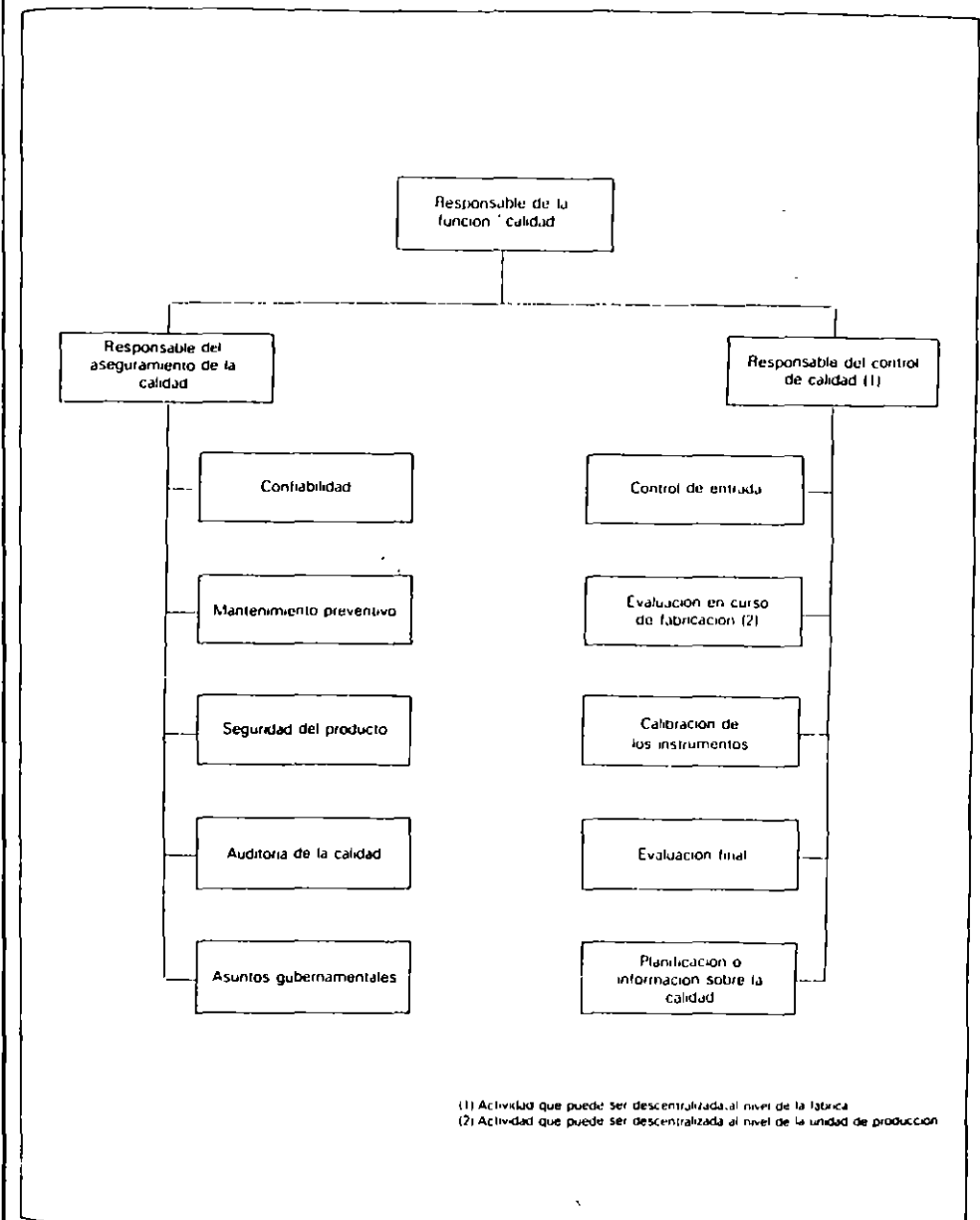


Fig 15-10  
Empresa muy grande

(1) Actividad que puede ser descentralizada al nivel de la fábrica  
(2) Actividad que puede ser descentralizada al nivel de la unidad de producción

actividades del aseguramiento de la calidad se reagruparán en un departamento que informe a la dirección general (Vea en páginas anteriores "Aseguramiento de la calidad".)

## VENTAJAS DE UN DEPARTAMENTO DE CALIDAD

Se estima que en las empresas que han integrado un departamento de control o de aseguramiento de la calidad dentro de su estructura organizacional, y en las cuales la dirección general ha prestado atención particular al problema de la calidad, es posible obtener un ahorro anual de entre 500 y 1 000 dólares por empleado con una inversión de entre 10 y 40% de esta suma [5]

En el caso de Quebec, dos ejemplos entre muchos otros lo confirman para los años setentas. Una empresa de productos alimenticios con cifra de ventas de 20 millones de dólares obtuvo los siguientes resultados dos años después de la implantación de un departamento de calidad:

- reducción de 50% de los productos defectuosos,
- reducción de 65% de las quejas.

El conjunto representa una ganancia de aproximadamente \$ 100 000. Una empresa de materiales de embalaje con cifra de ventas de 15 millones pudo, después de dos años, reducir en un 55% las fallas externas, lo cual representó una ganancia anual de \$ 80 000.

Al nivel internacional, la compañía transnacional ITT declaró haber reducido el costo de la calidad de sus productos de 12 a 5.5% de su cifra de ventas, realizando así un ahorro anual de 845 millones de dólares, diez años después de la implantación de su programa de costo de la calidad [9]

En general, las ventajas que la compañía puede obtener de un departamento de calidad son las siguientes:

- mejor control de la calidad,
- menor destrucción de productos,
- detección anticipada de las tendencias que afectan a la calidad,
- mejoramiento del equipo,
- mejores "tolerancias",<sup>4</sup>
- información oportuna sobre la calidad en cuanto a supervisión de la fabricación,
- reducción de los costos de inspección, poniendo de relieve la prevención

A esta lista pueden añadirse otros elementos difícilmente cuantificables como:

<sup>4</sup> Vea el siguiente capítulo pag. 306

- fidelidad de la clientela a la calidad de un producto, puesto que existe una relación favorable entre los productos de mejor calidad y su parte del mercado,
- aumento de la productividad gracias a una reducción de los tiempos de espera entre las diferentes operaciones de producción,
- mejoramiento de la calidad de vida en el medio de trabajo gracias a una obra bien hecha la primera vez, que las instrucciones contenidas en los documentos de trabajo sean claras, que las herramientas y los métodos estén bien descritos y que las materias primas sean adecuadas.

## COSTO DE LA CALIDAD

Esta es una herramienta administrativa que permite planificar y orientar los programas de la calidad con el objeto de mejorar el nivel de ésta o reducir sus costos [10].

El costo de la calidad se basa en cuatro aspectos:

- prevención,
- evaluación,
- fallas internas,
- fallas externas.

Los gastos de prevención y de evaluación representan las inversiones de la empresa en términos de la realización de un producto que satisfaga las necesidades del consumidor. Los costos de los fracasos internos y externos representan las pérdidas financieras de la empresa debidas a errores en la realización de un producto que no satisface las necesidades del consumidor.

El costo de la calidad debe prever una inversión que no rebase las pérdidas eventuales. El administrador buscará obtener el costo óptimo de la calidad mediante una planificación apropiada. El perfeccionismo en la investigación de la calidad puede ser inútilmente costoso y hacer que el costo de las inversiones sea superior al costo real de las pérdidas. El resultado de un programa es rentable cuando

$$R_0 \leq x(A_1 - A_2) - I$$

donde  $R_0$  es el resultado económico investigado;

- $x$  la cantidad de unidades manufacturadas después de la implantación del programa,
- $A_1$  el costo unitario real del producto antes del programa,
- $A_2$  el costo unitario real del producto después del programa,
- $I$  la inversión en el programa

El costo de la calidad puede resumirse en un principio sencillo de causa y efecto. Si se descubre una falla durante la evaluación de un producto, es posible determinar la causa y el efecto de la falla y, mediante una acción correctiva planificada, eliminarla.

Generalmente, el costo de una falla aumenta con la demora de su detección en el ciclo productivo; la detección en la fase de comercialización es más costosa que la detección en la fase de fabricación. Es por ello que el primer punto del programa debería ser la detección anticipada de las fallas en la realización del producto. El segundo debería ser la reducción de los costos ligados a la detección de las fallas, orientando para ello las actividades hacia la prevención.

El aseguramiento de la calidad contribuye a las utilidades de la empresa cuando, para un costo total óptimo de calidad, las actividades de prevención se encuentran a un nivel tal que los costos de la evaluación y de las fallas se reduzcan al mínimo (fig. 15-11).

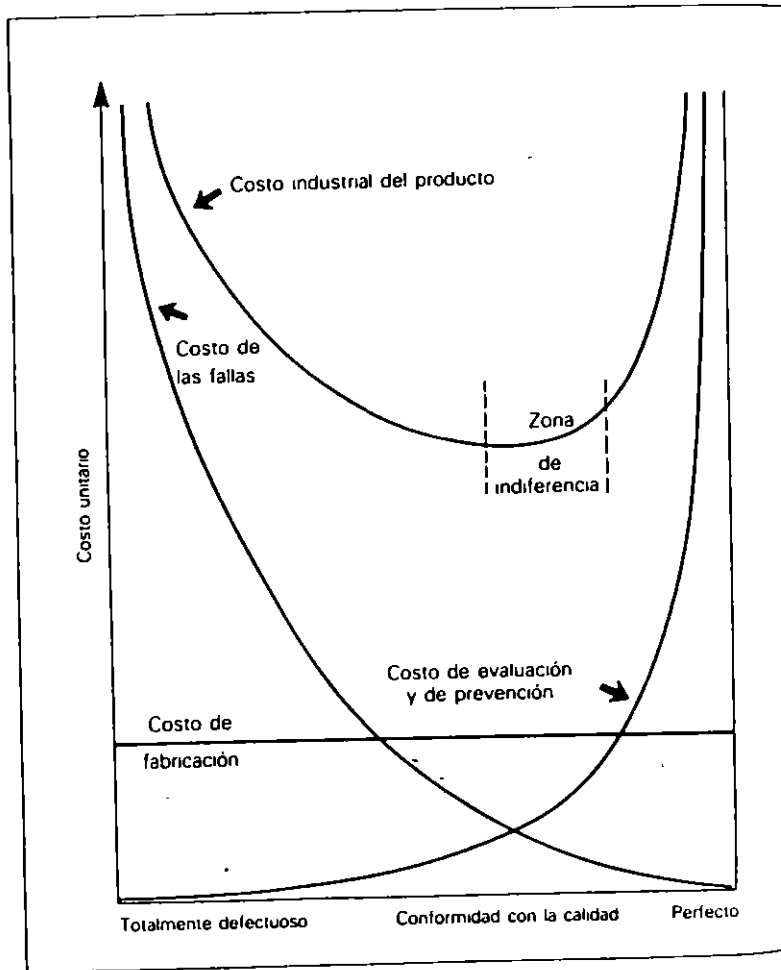


Fig 15-11  
Costo industrial unitario de un producto

El costo del departamento de calidad no concierne más que a una parte de ésta. Es una inversión cuyo presupuesto preve el funcionamiento como el de cualquier otro departamento (personal, programación, mantenimiento, finanzas, etc.). El costo de la calidad es la "inversión de calidad" de la empresa, concretada en los diversos presupuestos y destinada a mantener o mejorar la calidad de los productos en conformidad con la política de calidad, y teniendo en cuenta las pérdidas que se ocasionarían por su ausencia.

El detalle de los elementos que entran en líneas de cuentas aparece en la figura 15-12. Note que esta lista es exhaustiva y que muchas empresas, dada la naturaleza de sus productos, no consideran más que ciertos elementos.

## AUDITORIA DE LA CALIDAD

Con el perfeccionamiento del aseguramiento de la calidad y la descentralización de la función "calidad", la auditoría de la calidad se ha convertido en una herramienta de información importante para las decisiones de la empresa. La norma NF X50-106 de la Asociación Francesa de Normalización define la auditoría<sup>5</sup> como "un examen metódico de una situación, de un nivel determinado en comparación con un modelo, con el objeto de reducir y mantener una variación de cero."

La auditoría de la calidad es por tanto un peritaje objetivo de los elementos que podrían tener un efecto en el nivel de calidad de un producto. Permite identificar la variación entre las normas prescritas y la realidad de un producto. La desviación informada desencadenará un plan de acción con el objetivo de eliminarla. Existen tres tipos de auditoría de la calidad:

- la *auditoría de producto* empieza con el producto terminado y puede examinar a "contracurso" el procedimiento de fabricación hasta las materias primas.
- la *auditoría de procedimiento* es más precisa pues se refiere al método de fabricación del producto y a veces sólo a una etapa del procedimiento.
- la *auditoría de procesos* se utiliza cuando se desea asegurar que todas las directrices e instrucciones referentes al encaminamiento del proceso son seguidas y se adaptan a los cambios de estructuras de la empresa.

La auditoría puede tener dos orígenes:

- la *auditoría de reacción* tiene como origen un problema descubierto en la empresa o proveniente del mercado
- la *auditoría de prevención* tiene como origen el programa de actividades del aseguramiento de la calidad

<sup>5</sup> Término del vocabulario contable inglés que significa *verificación de los libros*. Ha sido elegido por los técnicos en calidad para designar una evaluación que va más allá de la simple verificación del producto, como describe la rúbrica "control de la calidad".

INVERSIONES	
SECCION	ELEMENTOS
PREVENCIÓN	1 Relación con el cliente
	2 Concepción y planificación del sistema de calidad
	3 Concepción de los instrumentos de verificación
	4 Verificación de la concepción
	5 Estudio de las posibilidades de fabricación
	6 Estudio de la garantía
	7 Aseguramiento de la responsabilidad por el producto
	8 Evaluación de los proveedores
	9 Planificación de la evaluación
	10 Auditoría del sistema de calidad
	11 Revisión del procedimiento de fabricación
	12 Mantenimiento preventivo
	13 Buenas prácticas de fabricación
	14 Administración del costo de la calidad
	15 Informe de ejecución de la calidad
	16 Programas de sensibilización a la calidad
	17 Formación y perfeccionamiento
	18 Gastos de consulta con relación a la calidad
	19 Gastos de administración del departamento de calidad
EVALUACIÓN	1 Evaluación del prototipo
	2 Ensayos de calificación
	3 Evaluación de la primera presentación
	4 Inspección en los locales del proveedor
	5 Control de recepción de los materiales
	6 Evaluación del producto
	7 Control del procedimiento de fabricación
	8 Calibración y mantenimiento del equipo de verificación
	9 Evaluación del producto después de la venta
	10 Evaluación de los productos de la competencia
	11 Evaluación de las sustituciones
	12 Auditoría de la calidad del producto
	13 Gastos de laboratorios exteriores
	14 Gastos de certificación
	15 Papelería utilizada por el departamento de calidad
	16 Energía y locales necesarios para la evaluación
	17 Materiales y muestras utilizadas
	18 Amortización del equipo de evaluación
FALLAS INTERNAS	PERDIDAS
	1 Investigación de las causas
	2 Gastos de mantenimiento y de almacenamiento de los productos defectuosos
	3 Disposición del producto (selección, refabricación)
	4 Costo de revaluación del producto
	5 Pérdida de eficacia en la fabricación
	6 Reprogramación de la fabricación
7 Pérdida de clientes (producto no disponible)	

Fig 15-12  
Elementos del  
costo de la  
calidad

FALLAS EXTERNAS	1 Investigación de las causas
	2 Costo de administración de las quejas
	3 Gastos de reemplazo
	4 Disposición del producto (selección, destrucción)
	5 Costo de revaluación del producto
	6 Reprogramación de la fabricación
	7 Pérdida de clientes (descontento)
	8 Detección de productos defectuosos
	9 Responsabilidad civil por un producto defectuoso

Fig 15-12  
(Continuación)

En la figura 15-13 se muestran etapas y el proceso de decisión de una auditoría de la calidad. Puede notarse que, si el elemento no está conforme con la norma prescrita, existirá una investigación cuyo seguimiento conducirá obligatoriamente a la corrección del elemento o a la modificación de la norma. La eficacia de la auditoría depende de los siguientes factores: preparación, definición del objetivo, alcance, ambiente del examen. Una reunión preparatoria con el personal del sector implicado es por tanto recomendable a fin de disipar toda tensión. Debe efectuarse otra reunión con este mismo personal cuando la auditoría haya terminado y deban ponerse en marcha los planes de acción correctiva.

## LAS COMUNICACIONES Y LA INFORMACION SOBRE LA CALIDAD

El departamento de calidad debe informar a los demás departamentos así como a la dirección general acerca de la calidad de los productos de la empresa. El medio utilizado para movilizar la información depende de la naturaleza y de la importancia de la información así como de las consecuencias económicas de las demoras, las cuales deben permitir la mejor decisión.

El primer modo de comunicación es la palabra. Esta tiene un cometido muy importante en la integración de la calidad dentro de la empresa, ya sea durante las reuniones del departamento de calidad o durante las reuniones de otros departamentos. La comunicación verbal permite el diseño de acciones correctivas; contribuye a explicar el por qué y el cómo del contenido de una especificación o de una directriz y su impacto en la calidad del producto. Permite instruir a un nuevo empleado acerca de sus tareas, acerca de lo que el cliente espera y acerca de su contribución a la calidad del producto terminado. La comunicación verbal sola no siempre es el mejor medio en materia de calidad, y debe complementarse con la comunicación escrita.

El segundo modo de comunicación es el escrito. El análisis de la situación de la calidad está apoyado en este caso por documentos; igualmente sucede con las proposiciones y los planes de acción correctiva, ya sea que vengan del interior o del exterior de la empresa.

La dirección general y los responsables de los departamentos, en vista de la variedad y el número de sus actividades, tienen necesidad de recibir a un ritmo determinado la información referente a la calidad de los productos manufacturados. El cometido del técnico en calidad consiste en crear un sistema de información que esté a su alcance.



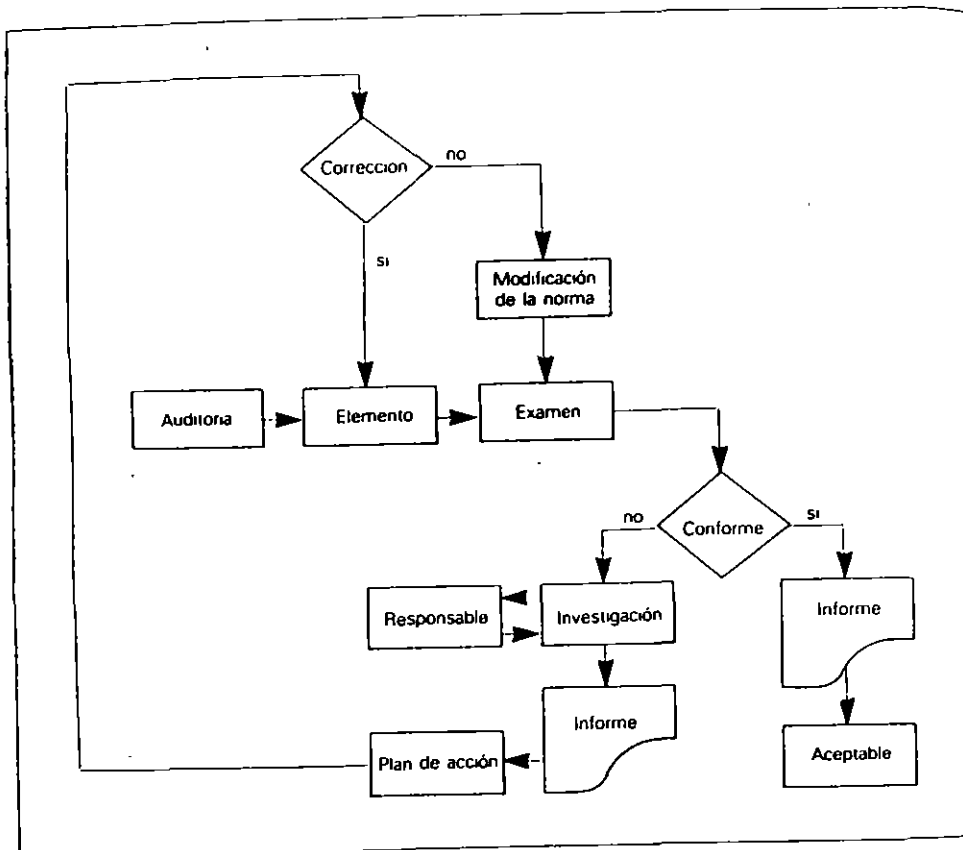


Fig 15-13  
Sistema de auditoria

Las comunicaciones escritas sobre el estado de la calidad (vea los formularios de las figuras 15-14 y 15-15) pueden cubrir los siguientes aspectos:

- Calidad del abastecimiento: se indican los principales problemas observados y sus consecuencias, la clasificación de los proveedores y los seguimientos de los problemas ulteriormente informados deberían figurar en este documento.
- Nivel de la calidad: se indican los principales problemas observados durante la fabricación y sus consecuencias financieras, los seguimientos y las tendencias deben presentarse en forma clara y explícita.
- Quejas de los clientes: se indican los sectores débiles de la empresa los cuales, a pesar de los programas puestos en marcha, no responden a las

CONTROL DE LA CALIDAD  
DISTRIBUCIÓN

MATERIA PRIMA  
AVISOS DE INSPECCION

1 - DIRECTOR DEL ABASTECIMIENTO  
2 - CONTADOR ENCARGADO DE PRECIOS DE COSTO  
3 - JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO  
4 - DIRECTOR ADJUNTO DE CONTROL DE LA CALIDAD  
5 - GERENTE DE INFORMATICA  
6 - GERENTE DE ALMACEN

NUMERO

FECHA \_\_\_\_\_

CODIGO DEL PRODUCTO

NUMERO DE COMPRA \_\_\_\_\_

PRODUCTO \_\_\_\_\_ CANTIDAD \_\_\_\_\_  
PROVEEDOR \_\_\_\_\_ ALMACEN \_\_\_\_\_  
COMENTARIOS \_\_\_\_\_ NUMERO DE LOTE \_\_\_\_\_

RECLASIFICADO

DESCLASIFICADO

ACEPTADO

RECHAZADO No \_\_\_\_\_

Fig 15-14  
Formulario de dictamen de inspeccion para una materia prima

expectativas de la clientela, las tendencias deben explicarse claramente y los seguimientos deben presentarse en forma explícita.

Otros informes escritos, tales como los estudios y los balances técnicos y financieros acerca de la calidad, deben ser emitidos con la frecuencia que convenga al nivel y a las necesidades de los lectores. Estos documentos pueden volverse muy importantes para la empresa con el transcurso del tiempo, algunos de ellos deberán ser clasificados y conservados varios años a fin de mostrar no solamente la conformidad del producto con las especificaciones, sino también la buena fe de la empresa en caso de litigio.

El tercer modo de comunicación sobre la calidad es de uso más reciente; se trata de la imagen, sola o con fondo sonoro. Este modo de comunicación en materia de calidad puede ser utilizado con diferentes enfoques, por ejemplo:

- formación y adiestramiento audiovisual mediante documentos que traten de aspectos técnicos exactos, lo cual ayudará al personal a asimilar mejor una tecnología;
- sensibilización a la calidad mediante anuncios o carteles instalados en sitios estratégicos de los talleres (fig 15-16)

Finalmente, la computadora, descentralizada al nivel de departamentos, pronto deberá permitir un nuevo modo de comunicación en materia de calidad. Este enfoque permitirá a quien oprima una tecla obtener la información necesaria para la toma de decisiones según el ritmo de las necesidades.

QUEJA DE CONSUMIDOR

QUEJA No. \_\_\_\_\_  
 NUMERO ANO

FECHA ANO MES DIA  
 HORA HORAS MINUTOS

PRODUCTO  
 FORMATO CODIGO

RAZON DE LA QUEJA

MUESTRA RECIBIDO  SOLICITADO  EN CURSO  NO DISPONIBLE

QUEJA RECIBIDA  
 POR TELEFONO  TELEGRAMA  CARTA  OTRO   
 DE CONSUMIDOR  TIENDA  DISTRIBUIDOR   
 EMPLEADO  OTRO\*

\*OTRO (INDICAR)

PERSONA QUE PRESENTA LA QUEJA  
 NOMBRE TELEFONO  
 DIRECCION RECIBIDO POR

CONTROL DE LA CALIDAD  
 CRITICA ACCIONES Y RECOMENDACIONES  
 MAYOR  
 MENOR

POR FECHA

PRODUCCION SUMARIO DE LOS RESULTADOS  
 FABRICA  
 NO IDENTIFICABLE

POR FECHA

EXPEDIENTE CLASIFICADO EL  
 POR  DIRECTOR DE CONTROL DE LA CALIDAD  
 COMITE DE REVISIONES DE QUEJAS

INICIALES  
 INICIALES

Fig 15-15  
 Formulario para una queja de un consumidor



Fig 15-16  
 Emblema de una campaña de calidad realizada en Francia. Dize: Calidad en lo natural

## SISTEMA DE ADMINISTRACION DE LA CALIDAD

La *función* consiste aquí en asegurar la conformidad del producto con la necesidad. El *insumo* corresponde a las muestras (productos y materiales que serán analizados) y a las condiciones de la línea de fabricación (temperatura, velocidad, presión, etc.). El *agente humano* es el personal administrativo y técnico del departamento de control o de aseguramiento de la calidad. El *agente físico* es el conjunto de documentos y de instrumentos que permiten la evaluación de los productos. La *secuencia* va de la identificación de las características a la toma de decisiones: los productos están conformes o no con la necesidad. El *medio ambiente interno* está compuesto por laboratorios, presupuestos de operación, especificaciones, la política de calidad y los procedimientos administrativos; el *medio ambiente externo* comprende las leyes y los reglamentos que regulan la industria y sus productos. Finalmente, el *producto* corresponde a los informes sobre la calidad de los productos (fig 15-17).

En la figura 15-18 se observa el sistema de administración de un departamento de aseguramiento de la calidad. El sistema de control se crea para evitar los productos defectuosos e informar a los demás departamentos sobre la calidad de los productos en las diferentes fases de su transformación. El sistema organizacional depende de la naturaleza de los productos y de la magnitud de la empresa. El sistema de información identifica separadamente los informes necesarios para las actividades del departamento (informes operacionales) y los emitidos por el departamento de aseguramiento de la calidad (informes de eficacia). El sistema operacional comprende un conjunto de secuencias cuya finalidad es la de obtener productos conformes con las necesidades.

## RESUMEN

La calidad es hoy en día sinónimo de valor de empleo, hasta donde se puedan usar en forma intercambiable las expresiones *calidad del servicio* y *calidad del producto*. Los factores que afectan a la calidad son conocidos en la industria con el nombre de las "siete M": el mercado, la mano de obra, lo "monetario", la manera de administrar, los materiales, la máquina y el método, y el medio de trabajo.

La función "calidad" puede estructurarse según tres modelos: inspección, control de la calidad y aseguramiento de la calidad. La organización del departamento de calidad depende de la naturaleza del producto y del tamaño de la empresa. Sus actividades se refieren a la calidad de concepción, la calidad de conformidad y la calidad de ejecución. La presencia de un departamento de calidad permite reducir las pérdidas debidas a una producción defectuosa y mantener la fidelidad de la clientela. El costo de la calidad es una herramienta de la administración que permite calcular los gastos de prevención y de evaluación relativos a las pérdidas ocasionadas por producción defectuosa.

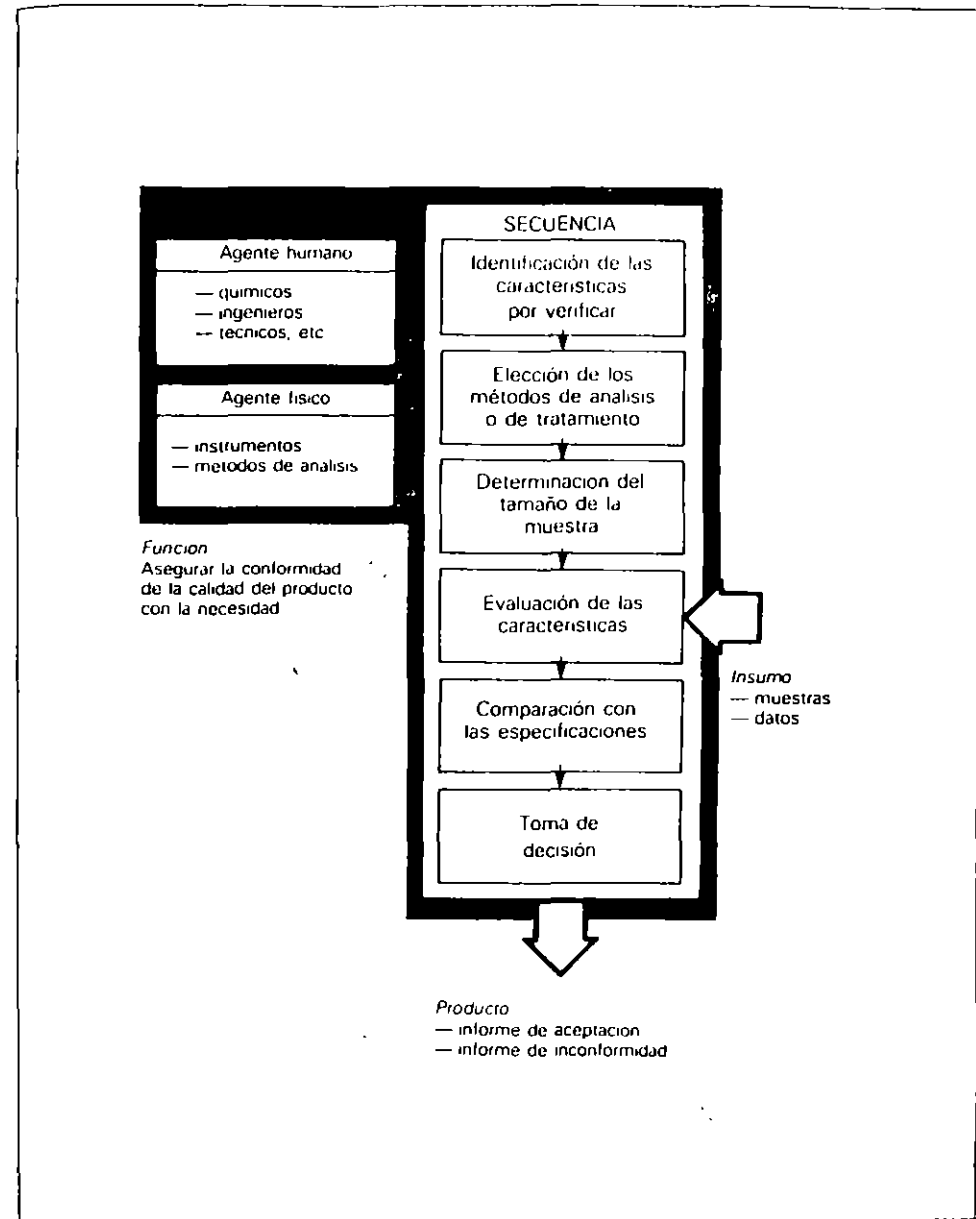


Fig 15-17  
Sistema de la calidad de un producto

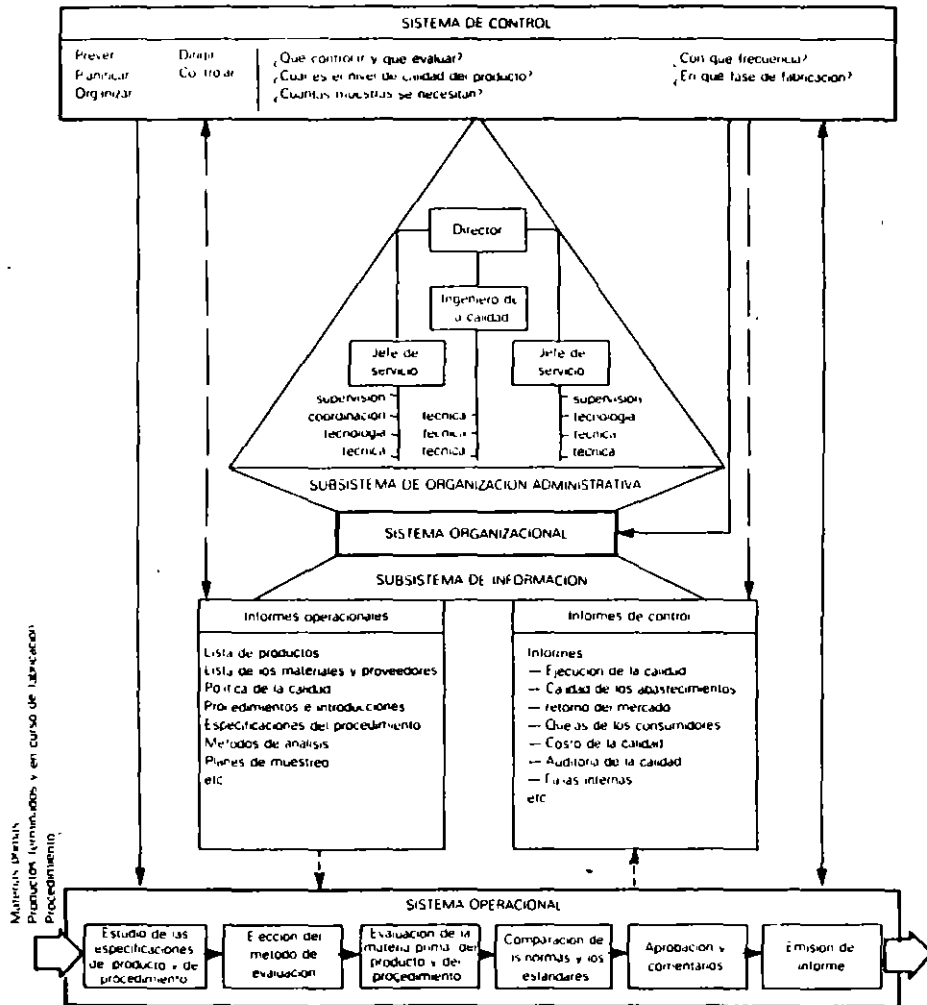


Fig 15-18 Sistema de administración de un departamento de aseguramiento de la calidad

La auditoría de la calidad es un estudio objetivo de los diferentes elementos que pueden afectarla. No es una simple verificación del producto, sino una evaluación simultánea del producto y de los métodos de producción. Se utilizan tres tipos de auditorías: de producto, de procedimiento y de procesos productivos.

La información acerca de la calidad puede ser movilizada mediante comunicación oral y escrita, o por informes combinados con métodos audiovisuales (la formación).

## Preguntas

1. ¿Existe alguna diferencia entre la calidad de un producto y la calidad de un servicio?
2. La mano de obra es un elemento muy importante entre los siete factores que afectan a la calidad. Compare la función que ésta tenía en la edad media con la que tiene actualmente.
3. ¿Cuáles son las diferencias más importantes, para la función "calidad", entre los modelos "control de la calidad" y "aseguramiento de la calidad"?
4. ¿Cuáles son las diferencias más importantes entre los modelos "inspección" y "control de la calidad"?

## Ejercicios prácticos

1. Ustedes son un grupo de consumidores, en grupos de dos o tres, definan los elementos de la calidad de los siguientes productos:

- un pan,
- un par de zapatos,
- una curación;
- un avión,
- un televisor,

En una reunión (algunos días más tarde), comparen los elementos identificados para cada producto y posteriormente recomienden una definición de los elementos que harán de cada uno de estos bienes un producto de calidad.

2. Ustedes son miembros de la dirección general de una empresa de servicios, en grupos de dos o tres, definan los elementos de calidad de los siguientes servicios:

- un servicio hospitalario,
- un servicio bancario;
- una cafetería;

En una reunión (algunos días más tarde), comparen los elementos identificados para cada servicio, posteriormente recomienden una definición de los elementos que harán que los servicios proporcionados sean de calidad.

- Elija una industria milenaria (el vidrio, el vestido, el mueble), y compare los siete factores que afectan la calidad del producto en los inicios de esta industria y en la época actual.
- En el cuadro de una descentralización del departamento de calidad en beneficio de las unidades de producción, se pide a usted que elabore una lista de las actividades que podrán ser descentralizadas. Enuncie las ventajas y los inconvenientes de esta descentralización.
- Elija el tema de una campaña de sensibilización a la calidad, explicándola e ilustrándola mediante un anuncio de promoción de la calidad.
- Usted es responsable del departamento de calidad, y ha recibido la siguiente información:

Cifra de ventas	\$ 25 000 000
Costos de fabricación	" 12 500 000
Verificación de la concepción	" 35 200
Evaluación de los abastecimientos	" 20 600
Mantenimiento preventivo	" 15 300
Ensayos de calificación	" 10 000
Evaluación del producto	" 210 000
Disposición de los productos devueltos a la fábrica	" 175 200
Administración del servicio	" 145 600
Control de recepción	" 85 000
Revaluación de los productos rechazados	" 15 000
Formación y entrenamiento	" 2 600
Pérdida de eficacia	" 53 600
Investigaciones sobre las causas de las fallas dentro de la fábrica	" 14 700
Costo administrativo de las quejas	" 22 000
Buenas prácticas de fabricación	" 25 300
Calibración y mantenimiento	" 22 000
Amortización del material	" 47 300
Pérdidas de clientes por descontento	" 40 600
Papelería	" 8 900
Revaluación de las devoluciones	" 12 700
Investigación de las quejas	" 14 900
Muestras y materiales utilizados	" 20 500
Gastos de reemplazo	" 65 000
Energía y locales	" 35 000

Determine los siguientes costos:

- prevención,
- evaluación;
- fallas internas;
- fallas externas,
- total de la calidad

Expresé el costo total de la calidad como porcentaje de la cifra de ventas de la empresa.

¿Cuáles serán sus recomendaciones?

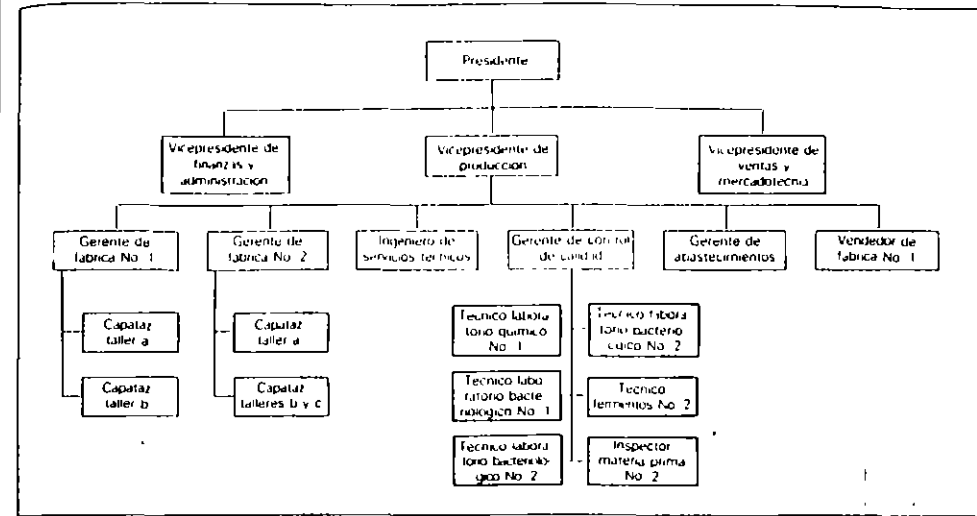


Fig 15-19

Una empresa pequeña de productos alimentarios posee dos fábricas. Ha recurrido a una tecnología muy particular que exige un severo control de la calidad de los fermentos. El control de la calidad inspecciona las materias primas, vigila los fermentos, evalúa las características fisicoquímicas y bacteriológicas del producto así como el aseo de las fábricas, elemento muy importante. Los técnicos y los inspectores del control de la calidad están autorizados sólo para comunicarse con los capataces de fabricación.

El organigrama general de la empresa se muestra en la figura 15-19.

— ¿Qué piensa usted de este organigrama?

— ¿Qué recomienda usted y por qué?

— Reconstruya el organigrama en función de sus recomendaciones.

## BIBLIOGRAFIA

- Crosby, P., *Quality Is Free*, New York, McGraw-Hill, 1979.
- Feigenbaum, A.V., *Total Quality Control*, New York, McGraw-Hill, 1961.
- Goetz, V.J., *Quality Assurance: a Program for the Whole Organisation*, New York, AMACON, 1978.
- Gogue, J.M., *Le défi de la qualité dans la société industrielle*, Paris, Editions d'organisation, 1978.
- Juran, J.M., *Quality Handbook*, New York, McGraw-Hill, 1974.

### Revistas y artículos

- Qualité, contrôle et gestion*, publication trimestrielle, Montréal.
- Qualité et habilité*, bulletin mensuel de l'Association française pour le contrôle industriel de la qualité, Paris.
- Quality Progress*, bulletin mensuel de l'American Society for Quality Control, Milwaukee (Wisconsin).
- Bennett, R.E., "Management's Entitlements", *Quality Progress*, pp 23-24, juillet 1978.
- Chauvel, A.M., et coll., "Le coût de la qualité", *Revue Commerce*, pp 72-98, septembre 1978.
- Miller, R.F., "America's Awakening Consumerism, the Long Term Effect on Quality Control", *Quality Progress*, pp 26-28, juillet 1978.

# 16

## Control de la calidad

### OBJETIVOS:

Después de haber estudiado este capítulo, el lector deberá ser capaz de

- explicar las exigencias previas al control de la calidad,
- situar el control de la calidad dentro de un sistema de fabricación,
- explicar el principio del plan de muestreo y de la carta de control

### TERMINOLOGIA

atributo	magnitud no medible
carta de control	limite de control
curva de eficacia	lote
criterio de aceptación	nivel de calidad aceptable
criterio de rechazo	norma
defecto	plan de muestreo
defectuoso	riesgo alfa
distribución normal	riesgo beta
desviación estándar	especificación
muestra	estandar
alcance	variable
magnitud medible	

## INTRODUCCION

La administración de la calidad debe ser complementada por el control de la calidad, es decir, por la verificación de los productos y los procedimientos de fabricación. Esto se hace con el objeto de medir el grado de apego de productos y procedimientos a las especificaciones que definen la calidad requerida.

Estudiaremos primero los elementos necesarios para el control de la calidad: documentos de trabajo, especificaciones, método de análisis y distribución de la calidad. Posteriormente analizaremos la actividad del departamento de calidad dentro del sistema de fabricación, y finalmente expondremos las técnicas de control.

## EXIGENCIAS PREVIAS AL CONTROL ESTADISTICO

Cuando los estudios de mercadotecnia han confirmado que el producto experimental concebido por el departamento de investigación y desarrollo corresponde a las necesidades del consumidor, deben comunicarse los datos respectivos a los departamentos implicados.

Esta información se refiere a los medios que deberán adoptarse en el abastecimiento y la fabricación, a fin de asegurar que el producto final concuerde con el prototipo aceptado por el departamento de mercadotecnia. Tal información puede clasificarse en dos categorías:

- especificaciones relativas a las características, normas, estándares y tolerancias,
- métodos de evaluación o de análisis que describen la forma de verificar las características del producto.

La información anterior es esencial para una reproducción fiel del producto y para el mantenimiento de su calidad de una producción a la otra. Dado que dicha información describe las exigencias necesarias para la realización del producto, también puede utilizarse como elemento de negociación en los contratos con proveedores y maquiladores.

## ESPECIFICACIONES

Estas son las prescripciones que permiten realizar un producto de calidad. Deben describir el trabajo en detalle. Se las puede reclasificar en dos grupos según la estructura organizacional de la empresa y las características del producto:

- especificaciones de abastecimiento (materia prima, material de embalaje)
- especificaciones operacionales (procedimiento o ensamble, producto en curso de fabricación, producto terminado).

**Especificaciones de abastecimiento.** Estos documentos son utilizados principalmente por el departamento de abastecimiento para negociar con los proveedores y por el departamento del aseguramiento de la calidad para verificar la calidad de las compras. También son útiles al almacén para conocer las condiciones de almacenamiento, e interesan al departamento técnico para la cuidadosa utilización de los materiales y las componentes que participarán en la fabricación.

Cada especificación, en lo que respecta al nombre usual del producto, debe contener los siguientes elementos:

- descripción sumaria del producto;
- normas generales; es decir, principios aceptables por la industria o reconocidos como normas,
- estándares particulares, es decir, enumeración de los criterios que indiquen las tolerancias y hagan referencia a los métodos de evaluación,
- embalaje e identificación del producto,
- almacenamiento y entrega,
- medidas de seguridad para el empleo.

**Especificaciones operacionales.** Estos documentos son utilizados sobre todo por el departamento de fabricación, por la división de aseguramiento de la calidad a fin de verificar la ejecución y la conformidad del producto y del procedimiento, y, en ciertos casos, por el departamento de ventas para negociar con los clientes.

Las *especificaciones de procedimiento* o de ensamble deben explicar con detalle el curso del producto, y describir en cada etapa de la transformación las condiciones de producción (temperatura, presión, velocidad, etc.) así como los puntos de control que permitirán obtener un producto que cumpla con las especificaciones. Con este fin resultan muy útiles los diagramas de ruta o curso.

Las *especificaciones del producto en curso* deben indicar las características, normas, estándares y tolerancias, las referencias a los métodos de evaluación y la lista de los defectos, con su nivel aceptable en las etapas del procedimiento. Los planes y los diseños son a veces indispensables.

Las *especificaciones del producto terminado* contienen los mismos elementos, pero se refieren a la fase final de la fabricación. Estas indican los análisis a los que debe someterse el producto antes de la comercialización y las pruebas sobre las muestras guardadas en el almacén, a fin de confirmar la estabilidad y la fiabilidad del producto cuando se encuentre en el mercado. El contenido de esta especificación es muy importante, ya que se refiere al último punto de control antes del cliente. Finalmente, el producto debe respetar las leyes y los reglamentos que lo rijan.

## Característica, norma, estándar y tolerancia

La complicación descriptiva de la especificación debe indicar, para cada característica, la norma, el estándar y la tolerancia.

**Característica.** Aspecto o dimensión del producto sujeto a una norma o estándar. La característica también puede clasificarse conforme alguna propiedad (física, química, eléctrica, biológica, etc.) y el método de evaluación:

- cuantitativa: variable medible (longitud de un tubo, peso de un recipiente, amperaje de un fusible).
- cualitativa: atributo no medible (apto o defectuoso, liso o áspero, agujerado o no).

**Norma:** Dato de referencia resultante de una elección colectiva razonada, destinado a servir de base de interpretación para resolver problemas repetitivos.<sup>1</sup> La norma está definida y protegida por un estatuto legal

**Estándar:** Regla definida en el interior de una empresa para caracterizar el producto. Cuando una característica está sujeta a una norma, el estándar debe ser favorable a la norma.

**Tolerancia:** Variación dentro de la cual todo valor de la característica se considera acorde con la norma o estándar

**Ejemplo:** La ley canadiense sobre los alimentos establece que una pieza de carne vendida en Canadá no debe contener más del 60% de humedad

características:      humedad,  
norma:                    60% máximo.

El productor, teniendo en cuenta esta norma, establece un estándar que define la calidad de su producto:

estándar:                58% ± 1.5%  
tolerancia:               ± 1.5%; es decir 3%.

## BASES DEL CONTROL ESTADISTICO

Una exposición de los principios de la estadística rebasaría considerablemente el alcance de este volumen. Sin embargo, creemos útil recordar algunas nociones necesarias para un mejor entendimiento de su aplicación al control de la calidad. Se trata de:

- la distribución normal y el cálculo de su media y su dispersión, que se utilizan para el control de las magnitudes medibles o control por variables;
- la noción de defecto o de defectuoso, utilizada para el control de las dimensiones no medibles o control por atributos.

### DISTRIBUCION NORMAL

Ya hemos dicho que la calidad es variable, puesto que el proceso de fabricación produce unidades similares pero no idénticas.

Tomemos por ejemplo el caso de dos grupos de estudiantes y analicemos la distribución de las calificaciones obtenidas en un examen

*Grupo A*

Calificaciones	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Frecuencia	1	2	4	7	7	4	3	2	1	1	0

<sup>1</sup> Normalisation française, "Renseignements généraux et administratifs", Paris, AFNOR, 1975

*Grupo B*

Calificaciones	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Frecuencia	0	0	0	0	2	4	8	11	7	2	1

Si representamos gráficamente los resultados, obtendremos dos distribuciones diferentes que caracterizan la calidad de estos grupos (fig 16-1). Cada uno de tales grupos puede ser identificado por la media y la *dispersión* que tendrán las calificaciones alrededor de este valor central. La dispersión puede expresarse como el intervalo o "rango" de los valores u otra forma de expresión denominada desviación estándar, la cual explicaremos más tarde.

En la industria puede hacerse lo mismo para todas las características de un producto fabricado en serie en una misma máquina o en máquinas idénticas ubicadas en talleres diferentes. Las diferencias entre las unidades de una misma producción provienen de las variaciones en los materiales, la precisión de la maquinaria y la calificación de la mano de obra. En general, para una calidad dada se observa en los distintos casos un valor central denominado media aritmética ( $\bar{X}$ ), así como una repartición más o menos simétrica de las unidades, cuya concentración disminuye según nos alejemos de dicho valor central. Esta dispersión toma a menudo la forma de una campana que se conoce como *distribución normal* o curva de Gauss-Laplace (fig 16-2). Dicha curva o "campana" tiene un rango y una desviación estándar.

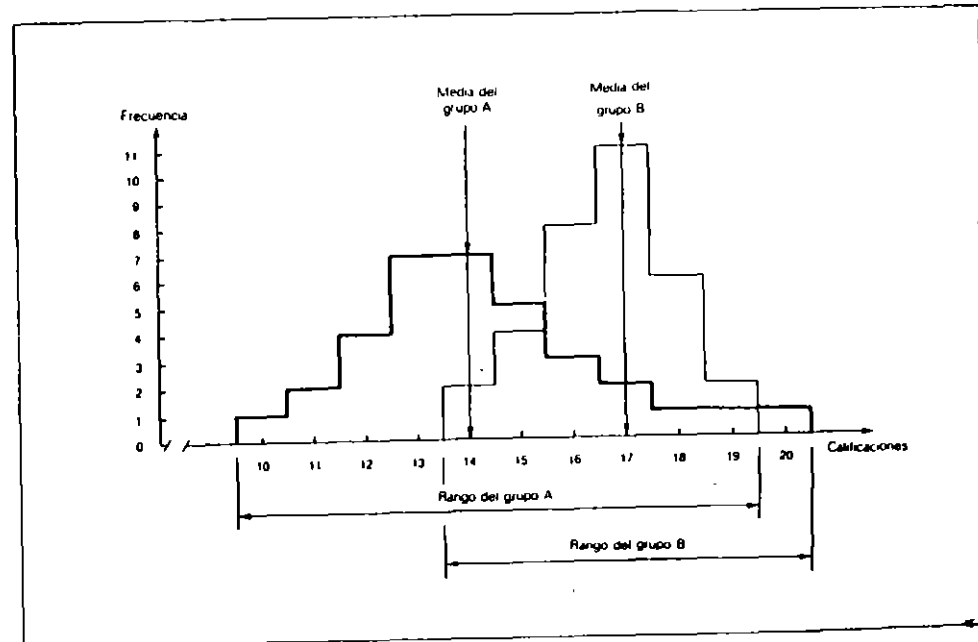
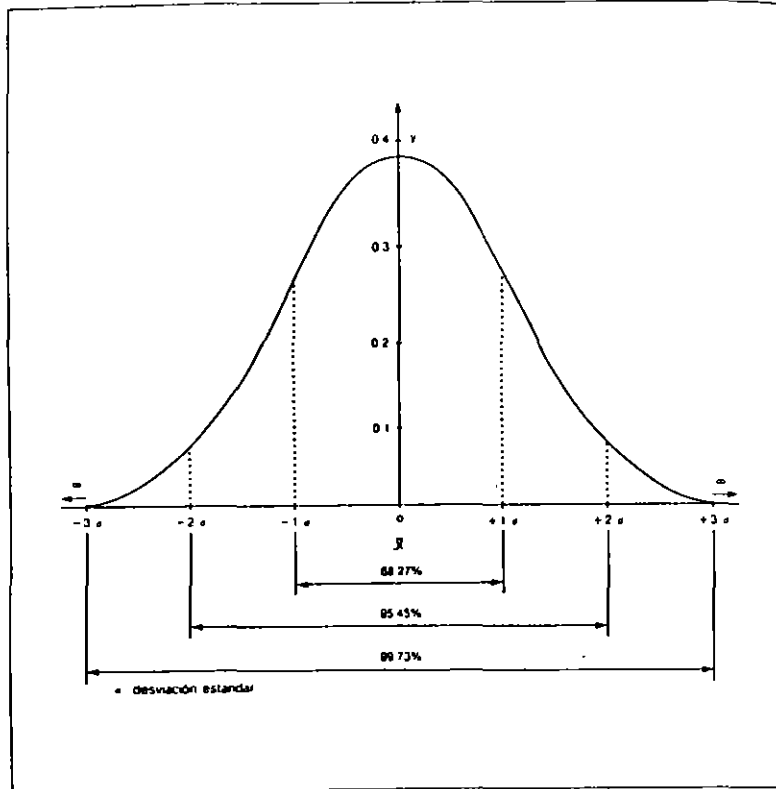


Fig. 16-1  
Comparación de las calificaciones obtenidas por los estudiantes de dos grupos.



Fig 18-2  
Distribución  
normal



### Medición de la media aritmética

La media aritmética ( $\bar{X}$ ) es un valor representativo de un conjunto de datos:

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n}$$

donde  $\sum X$  es la suma de los valores individuales,  
 $n$  es el número de datos.

*Ejemplo:* Se toma una muestra de doce botellas de una línea de llenado, los datos (en mililitros) son los siguientes: 1 534, 1 518, 1 528, 1 544, 1 534, 1 546, 1 524, 1 550, 1 554, 1 500, 1 504, 1 484. La media aritmética de la muestra será por tanto:

$$\bar{X} = \frac{18\,360}{12} = 1\,530$$

Diremos que en promedio una botella contiene 1 530 mililitros de líquido

### Medición del rango

El rango (E) de un conjunto de datos es la expresión de la dispersión en su forma más sencilla. Es la diferencia entre el dato más grande y el más pequeño.

$$E = X_{\max} - X_{\min}$$

donde  $X_{\max}$  es el valor más grande observado,  
 $X_{\min}$  es el valor más pequeño observado

En nuestro ejemplo, el valor más grande es de 1 550 mililitros y el más pequeño es de 1 484 mililitros. El rango de la muestra es por tanto:

$$E = 1\,550 - 1\,484 = 66$$

Diremos que el nivel de llenado varía entre 1 484 y 1 550 mililitros; es decir, existe un *rango* de 66 mililitros

### Medición de la desviación estándar

La desviación estándar ( $\sigma$ ) de un conjunto de datos es la expresión de dispersión que se utiliza con mayor frecuencia en el control de la calidad. Es la raíz cuadrada de la varianza o bien la raíz cuadrada del cuadrado de las desviaciones respecto a la media aritmética

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n}}$$

donde  $\sum$  es la "suma de",  
 $X$ , es un valor individual,  
 $\bar{X}$ , es la media aritmética,  
 $n$ , es el número de datos

Cuando  $n$  es menor de 30, se utiliza<sup>2</sup> el denominador  $(n - 1)$ . En nuestro ejemplo, la desviación estándar es igual a:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(1\,534 - 1\,530)^2 + (1\,518 - 1\,530)^2 + (1\,528 - 1\,530)^2 + (1\,534 - 1\,530)^2 + (1\,534 - 1\,530)^2 + (1\,546 - 1\,530)^2 + (1\,524 - 1\,530)^2 + (1\,550 - 1\,530)^2 + (1\,544 - 1\,530)^2 + (1\,500 - 1\,530)^2 + (1\,504 - 1\,530)^2 + (1\,484 - 1\,530)^2}{12 - 1}}$$

$$= 20$$

Diremos que la dispersión del llenado tiene una *desviación estándar* de 20 mililitros.

Una de las características más importantes de la distribución normal es la relación que existe entre la desviación estándar y el porcentaje de unidades

<sup>2</sup> Teoría de las muestras pequeñas

comprendidas bajo su área:

$\bar{X} \pm 1\sigma$ :	68,27%
$\bar{X} \pm 2\sigma$ :	95,45%
$\bar{X} \pm 3\sigma$ :	99,73%

Diremos por tanto que en nuestro ejemplo:  
 68.27% de las botellas 1 530 ml  $\pm 1 \times 20$  ml,  
 es decir, entre 1 510 y 1 550 ml,  
 95.45% de las botellas contienen 1 530 ml  $\pm 2 \times 20$  ml,  
 es decir, entre 1 490 y 1 570 ml;  
 99.73% de las botellas contienen 1 530 ml  $\pm 3 \times 20$  ml,  
 es decir, entre 1 470 y 1 590 ml.

### Aplicación de las propiedades de la distribución normal

Cuando la media y la desviación estándar de una distribución dada se conocen, es posible determinar todo alejamiento (de la media aritmética y el porcentaje de unidades que se encuentran anterior o en el exterior de esta distribución, es decir, que satisfacen o no una especificación

$$Z = \frac{X - \bar{X}}{\sigma}$$

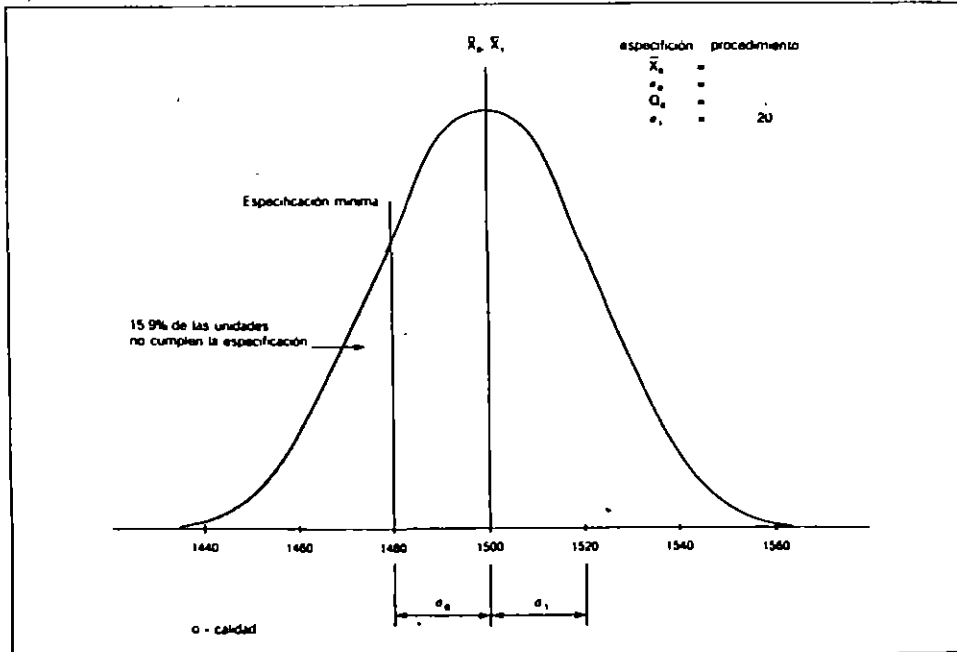


Fig. 16-3  
 Comparación entre la calidad de un procedimiento de fabricación y su especificación

Por ejemplo, en el control de un procedimiento de fabricación, si el valor central es de 1 500 ml, la desviación estándar de 20 ml y la especificación mínima de 1 480 ml, el procedimiento generará (fig. 16-3)

$$Z = \frac{1\,480 - 1\,500}{20} = -1.00$$

Es decir, según la tabla de porcentajes de muestras bajo la curva normal (vea anexo de este capítulo), 15.9% de las unidades no satisfacen la especificación.

### DEFECTO Y DEFECTUOSO

Las nociones de defecto y defectuoso son muy importantes para la inspección, el control y el aseguramiento de la calidad, puesto que representan inconvenientes fundamentales que pueden tener consecuencias graves. Una carta sin timbre postal o estampilla tiene un defecto y se dice que es defectuosa. Un avión en vuelo cuyo tanque de gasolina se agota tiene un defecto y también está defectuoso, pero las consecuencias son muy diferentes. Es por tanto necesario diferenciar y clasificar los defectos dentro de las especificaciones según su naturaleza y sus consecuencias.

**Defecto crítico.** Defecto que, según el juicio o la experiencia, propiciará graves peligros en la fabricación o en la utilización del producto, o lo volverá inutilizable antes de que concluya su vida normal (ejemplo: la puerta defectuosa de un horno de microondas, los frenos defectuosos de un automóvil).

**Defecto mayor.** Defecto que, según la experiencia, provocará una falla anormal del producto durante su uso ordinario y generará costos elevados de mantenimiento o reparación (ejemplo: la calefacción defectuosa de un automóvil en invierno, un alimento en conserva demasiado salado).

**Defecto menor.** Defecto que no provoca fallas del producto ni disminución de su rendimiento, y que tiene un efecto pequeño sobre el cliente a menos que se repita frecuentemente (ejemplo: un tapón difícil de quitar, algunas páginas mal pegadas en un libro).

Un producto defectuoso puede contener uno o varios defectos; el producto será calificado como *críticamente defectuoso*, *mayormente defectuoso* o *menormente defectuoso* no por el número de defectos observados, sino por la naturaleza del defecto principal. Por ejemplo, si un producto tiene un defecto crítico y un defecto mayor, se clasifica como críticamente defectuoso; si tiene un defecto crítico y treinta defectos mayores, sigue considerándose críticamente defectuoso.

## CONTROL DE LA CALIDAD DE UN SISTEMA DE FABRICACION

Una vez que las especificaciones y los métodos de evaluación han sido definidos, el departamento de calidad elabora el programa de control para asegurarse de que el producto cumplirá con las especificaciones. Dicho departamento debe determinar

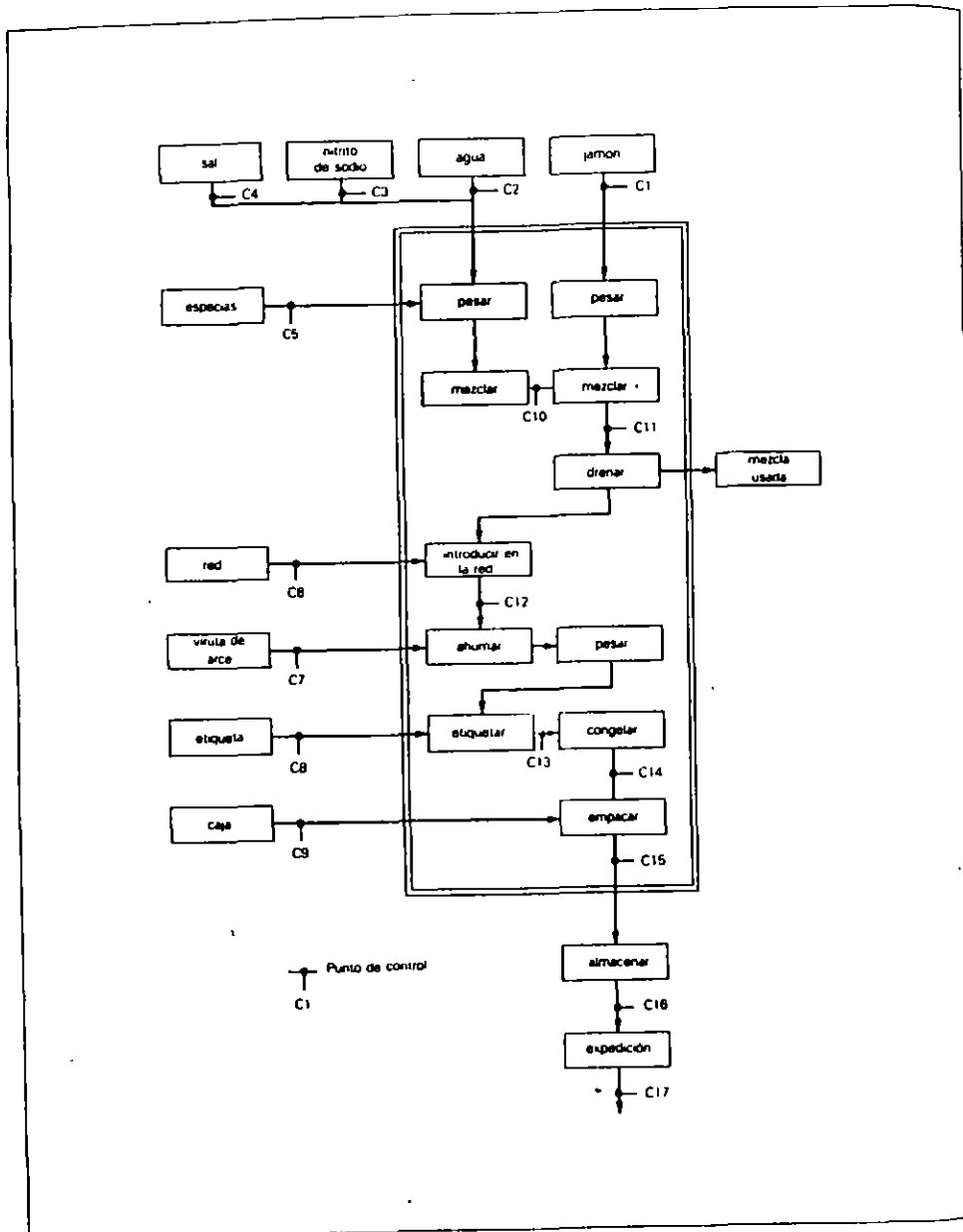


Fig 16-4  
Puntos de control de la calidad durante la fabricación de un jamón ahumado

- C1 Jamón fresco plan de muestreo para verificar las características físicas, químicas y microbiológicas de cada lote, así como un control de la temperatura de almacenamiento
- C2 Agua carta de control trimestral para las características fisicoquímicas y microbiológicas
- C3 C4 C5 Nitrato de sodio, sal, especias plan de muestreo para verificar las características fisicoquímicas de cada lote, así como un control de temperatura y de humedad para el almacenamiento
- C6 Red plan de muestreo para verificar las características físicas de cada lote
- C7 Viruta de arce plan de muestreo para verificar las características físicas de los productos de cada lote así como un control de temperatura y humedad para el almacenamiento
- C8 C9 Etiqueta, caja plan de muestreo para verificar las características físicas de los productos de cada lote así como un control de la temperatura y la humedad para el almacenamiento

#### SECUENCIA DE FABRICACIÓN

- C10 Mezcla carta de control diario sobre las características físicas de la mezcla
- C11 Inyección de la mezcla control rutinario del procedimiento para verificar el sistema automático de bombeo
- C12 Introducción en la red inspección al 100% por los operadores para verificar la apariencia del jamón dentro de la red
- C13 Etiquetado carta de control para verificar el aspecto físico del producto y del embalaje primario
- C14 Congelación control del procedimiento para verificar la temperatura de congelación
- C15 Empaque inspección al 100% por los operadores para verificar la apariencia física de la caja y la identificación del producto, plan de muestreo para verificar la conformidad del producto con las normas gubernamentales

#### PRODUCTO

- C16 Almacenamiento control de las condiciones de almacenamiento del producto terminado
- C17 Expedición control de la identificación y el destino del producto en caso de pedido

Fig 16-4  
(Continuación)

- los puntos de control (qué y dónde controlar),
- las técnicas de control (cómo, cuántas unidades y con qué frecuencia).

### PUNTOS DE CONTROL

No todas las características del producto deben ser verificadas, toda vez que algunas de ellas tienen poca o ninguna influencia sobre la calidad del producto terminado. El departamento de calidad identifica las características que deben ser verificadas y los puntos exactos en los que se ejecutará el control.

Estos puntos de control puede situarse

- en el *insumo*, para asegurar que los materiales o componentes defectuosos no entren en la producción;
- en el *producto*, para verificar que la calidad del producto terminado satisfaga las especificaciones;
- *durante la secuencia* de fabricación, a fin de señalar las unidades defectuosas lo más cerca posible de su origen e identificar las causas.

En la práctica, el departamento de calidad utiliza una combinación de estos tres enfoques, de tal modo que las unidades defectuosas sean detectadas rápidamente y no produzcan costos adicionales de fabricación como los de escrutinio, reproceso y destrucción de productos terminados.

También puede controlarse el producto indirectamente observando el equipo de fabricación, por ejemplo verificando la temperatura o la presión de una máquina. El mantenimiento preventivo adquiere por tanto gran importancia para la realización de un producto de calidad.

### TECNICAS DE CONTROL

El departamento de calidad elige posteriormente la técnica que será utilizada: inspección al 100%, plan de muestreo o carta de control.

- La *inspección al 100%* consiste en inspeccionar cada una de las unidades que pasa por un punto de control.
- El *plan de muestreo* tiene como finalidad evaluar, en un punto de control, la calidad de un lote (N) por medio de una muestra (n) cuyo tamaño se precisa en el plan.
- La *carta de control* sirve para evaluar la calidad de un producto durante su fabricación con la ayuda de gráficas (media, rango, etc.) que permitan visualizar la calidad y prevengan al operador de toda fluctuación anormal.

### Ejemplo

Consideremos el sistema de fabricación del jamón ahumado. La operación consiste en inyectar una mezcla de agua, sal, especias y nitrito de sodio en el

jamón a fin de preservarlo. Cuando la sal ha penetrado en toda la carne, el jamón se coloca en una red que hace que conserve su forma durante toda la operación de ahumado. Dicha operación consiste en cocer lentamente el jamón en una cámara cerrada aplicando un fuego de viruta de arce. Esta operación permite eliminar el excedente de agua introducido con la mezcla, da su sabor típico al jamón ahumado y destruye ciertos parásitos que contiene la carne de cerdo cruda. Cuando la operación de ahumado ha concluido, el jamón se pesa, etiqueta y congela, posteriormente se coloca en una caja y se almacena en una cámara fría hasta su expedición (fig. 16-4).

### INSPECCION AL 100%

Este método es algunas veces técnica y económicamente imposible, dado que, con máquinas de alta productividad, se necesitarían varios días y varios inspectores para evaluar la calidad de todos los productos de una jornada. Los casos en los que vale la pena recurrir a la inspección al 100% son los siguientes:

- un producto muy costoso y cuyo número de defectos puede ser catastrófico; el costo de inspección es entonces secundario (ejemplo: las componentes de un cohete espacial),
- un defecto que genere costos elevados de fabricación y que pueda ser eliminado por un escrutinio mecanizado en la línea de producción (ejemplo: los detectores se colocan sobre las líneas de fabricación de recipientes de vidrio, el análisis radiográfico de la soldadura de las aletas de una turbina hidroeléctrica),
- un defecto fácil de detectar y que pueda ser eliminado por el operador de la máquina durante el curso de la fabricación (ejemplo: el aspecto físico del embalaje).

		Producto y especificación	
		Conforme	No conforme
Decisión después de la evaluación	Aceptación	buena decisión	error tipo $\beta$
	Rechazo	error tipo $\alpha$	buena decisión

Fig. 16-5  
Errores de decisión

## PLAN DE MUESTREO

El plan de muestreo se basa en la estadística y sirve para diferenciar los lotes adecuados de los defectuosos. La pertinencia de una decisión relativa a un lote depende de la elección aleatoria de las unidades y del tamaño de la muestra. Toda distorsión en el tamaño de la muestra o la forma de tomarla puede propiciar un error de decisión (fig. 16-5). Existen varios planes de muestreo normalizados, los cuales pueden clasificarse en dos categorías principales: planes de muestreo *por atributo* (magnitud no medible) y *por variable* (magnitud medible). A todo plan de muestreo corresponde una curva de eficacia.

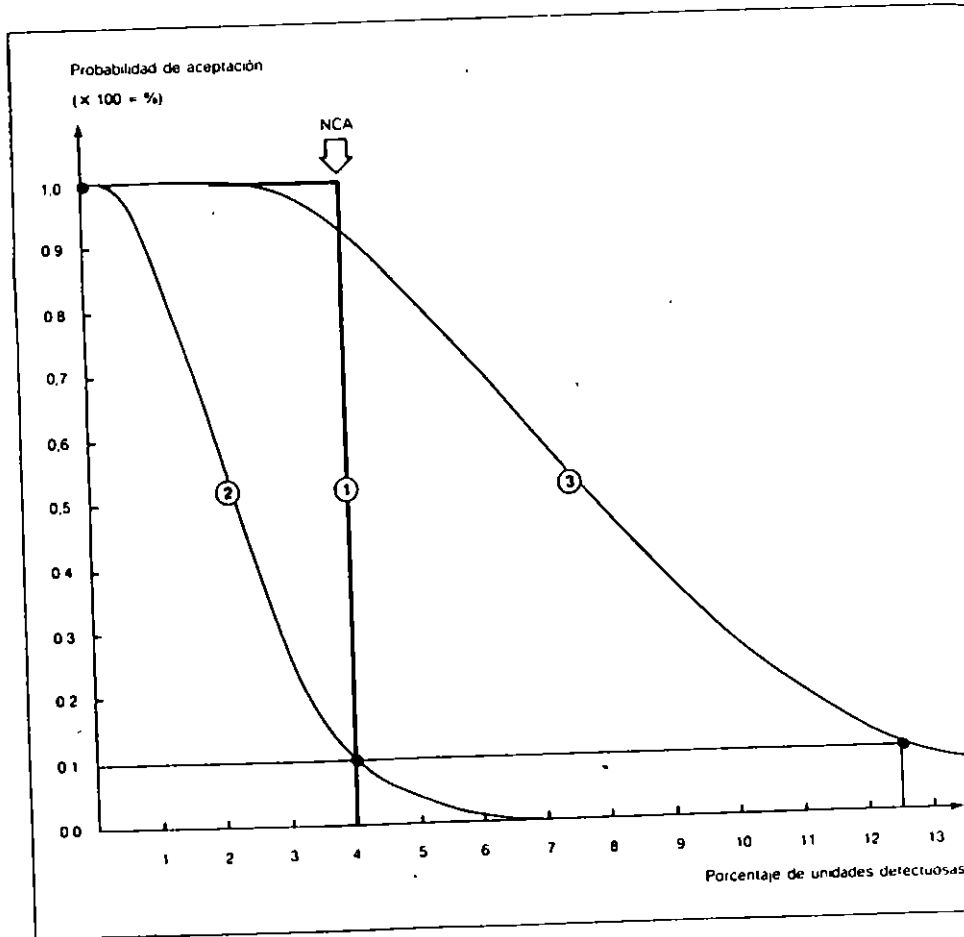


Fig 16-6  
Curvas de eficacia de un plan de muestreo

## CURVA DE EFICACIA

La decisión de aceptar o rechazar el producto sometido a la inspección depende del tamaño del lote sujeto a inspección ( $N$ ), del tamaño de la muestra ( $n$ ) y del criterio de aceptación ( $c$ ) prescrito por el plan.

El plan de muestreo ideal sería que, para un nivel de calidad aceptable de 4%, por ejemplo, todo lote cuyo porcentaje de unidades defectuosas fuera inferior o igual a 4% tuviera una probabilidad de 100% de ser aceptado, y que todo lote cuyo porcentaje de unidades defectuosas fuera superior a 4% tuviera una probabilidad de 100% de ser rechazado. Este es el plan ① de la figura 16-6. Dicho plan no existe en la práctica.

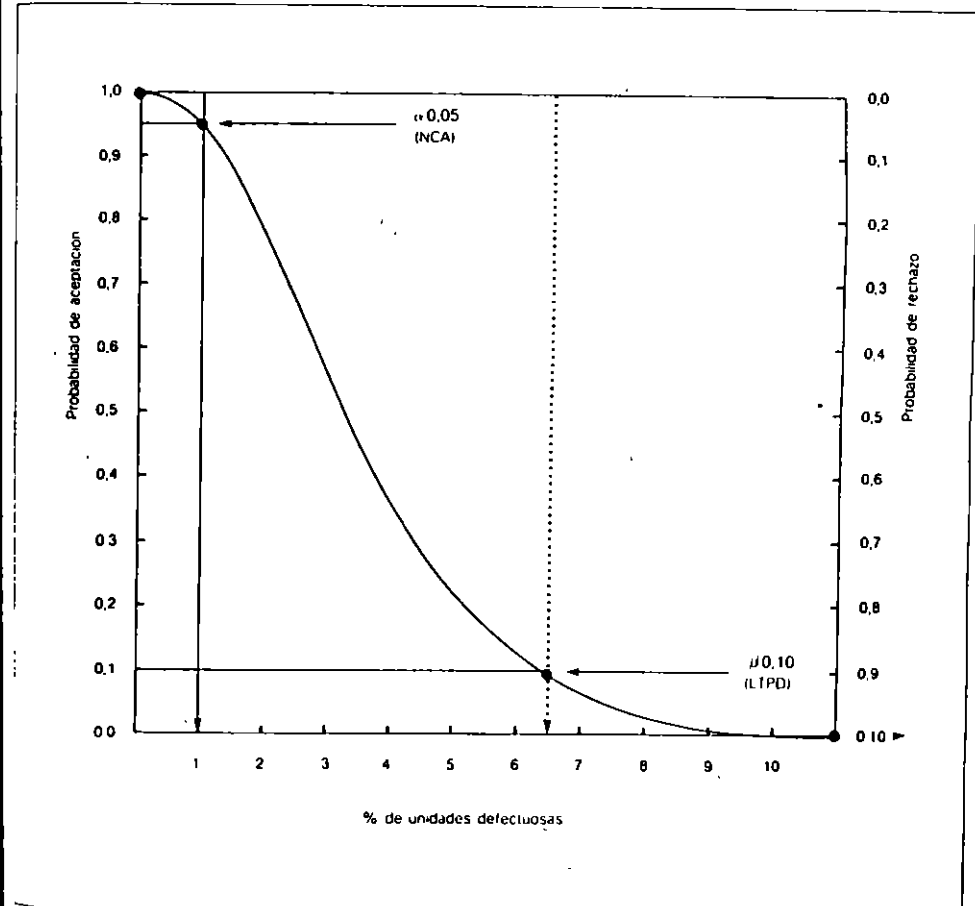


Fig 16-7  
Curva de eficacia para el plan de muestreo

El hecho de que se inspeccione una muestra cuyo tamaño sea inferior al del lote y que los defectos no se distribuyan uniformemente en el lote genera riesgos de error: el de aceptar un lote defectuoso (riesgo  $\beta$ ), que se conoce como *riesgo del cliente*, o el de rechazar un lote adecuado (riesgo  $\alpha$ ), que se conoce como *riesgo del productor*. El precio pagado para evitar una inspección al 100% es muy elevado y no garantiza la eliminación de todos los defectos cuando dicha inspección se realiza en forma manual. Por ejemplo, el plan ② de la figura 16-6 tiene una probabilidad de 10% de que se acepte un lote que tenga 4% de piezas defectuosas y una probabilidad de 90% de que se acepte un lote que contenga un 1% de piezas defectuosas. El plan ③ tiene una probabilidad de 90% de que se acepte un lote que contenga 4% de piezas defectuosas, pero presenta un riesgo más elevado (con una probabilidad de 10%) de que se acepte un lote que contenga 12.5% de piezas defectuosas.

A cada plan de muestreo corresponde por tanto una curva de eficacia, cuya ordenada indica las probabilidades de aceptación (de 0 a 1, es decir, de probabilidad nula a probabilidad de 100% de aceptar el lote) y cuya abscisa indica la proporción de unidades defectuosas contenidas en el lote sometido a inspección, expresada en fracción o porcentaje de unidades defectuosas. Esta curva (fig. 16-7) tiene cuatro puntos sobresalientes:

- una probabilidad de 100% de aceptar un lote que no contenga unidades defectuosas;
- una probabilidad de 0% de aceptar un lote que contenga 100% de unidades defectuosas;
- un riesgo alfa, que se sitúa por convención en 5%; es decir, una probabilidad de 95% de aceptar un lote que contenga el nivel de calidad aceptable (NCA) indicado por la especificación;
- un riesgo beta, que por convención se sitúa en 10% es decir, una probabilidad de 10% de aceptar un lote que contenga la proporción de unidades defectuosas tolerada dentro de un lote.

### DETERMINACION DEL NIVEL DE CALIDAD ECONOMICA

El plan de muestreo es económico cuando el nivel de calidad aceptable, definido por la fórmula siguiente, implica una relación mínima entre los costos de inspección y de fallas

$$NCA_o = \frac{I}{D_e - D_i}$$

donde  $NCA_o$  es el nivel de calidad óptimo,  
 $I$  es el costo unitario de inspección,  
 $D_e$  es el costo unitario de fallas externas,  
 $D_i$  es el costo unitario de fallas internas.

Por ejemplo, si

- el costo unitario de inspección es  $I = \$ 0.50$
- el costo unitario de fallas internas es  $D_i = \$ 15.00$
- el costo unitario de fallas externas es  $D_e = \$ 50.00$

$$NCA_o = \frac{0.50}{50 - 15} = 0.015 \text{ (es decir, 1.5\%)}$$

## CARTA DE CONTROL

Esta es una representación gráfica de la calidad de un producto o de un proceso de fabricación. Permite medir en el tiempo las variaciones entre la calidad del producto y la calidad prescrita por la especificación, y prevenir la formación de unidades defectuosas detectando toda tendencia dentro del proceso de fabricación. La carta de control no indica la razón de la variación o de la tendencia observada, sino que advierte al usuario que el proceso produce o va a producir unidades cuya calidad no satisface la especificación.

En general, una carta de control se compone de una o dos gráficas. La primera es común a todas las cartas y sirve para visualizar la *variación* entre el valor medido y el valor central prescrito. Esta gráfica corresponde a la media aritmética de los datos; hacia un lado y otro de este valor se encuentran los límites de control superior e inferior, equidistantes del valor central (fig. 16-8a). La segunda gráfica se utiliza con la primera en las cartas de control para dimensiones medibles y sirve para visualizar la *dispersión* de los puntos alrededor de la media aritmética. El valor central de esta carta corresponde a la media aritmética de la dispersión, y sólo se considera el límite de control superior (fig. 16-8b).

La carta de control puede ser utilizada en todos los niveles de un sistema de fabricación, pero sirve principalmente para las secuencias del sistema, dado que éstas permiten un control sobre el producto en las etapas de transformación.

Existen numerosos modelos de cartas de control para responder a una gran variedad de necesidades. Dichos modelos pueden clasificarse en dos grupos principales:

a) Cartas *por atributos* (dimensiones no medibles), de las cuales las más utilizadas son

- carta " $p$ ", que sirve para controlar la fracción de unidades defectuosas en muestras de tamaño variable (fig. 16-9a),
- carta " $np$ ", que sirve para controlar el número de unidades defectuosas en muestras de tamaño fijo;
- carta " $u$ ", que sirve para controlar el número de defectos por unidad en muestras de tamaño variable;
- carta " $c$ ", que sirve para controlar el número de defectos en muestras de tamaño fijo (fig. 16-9b).

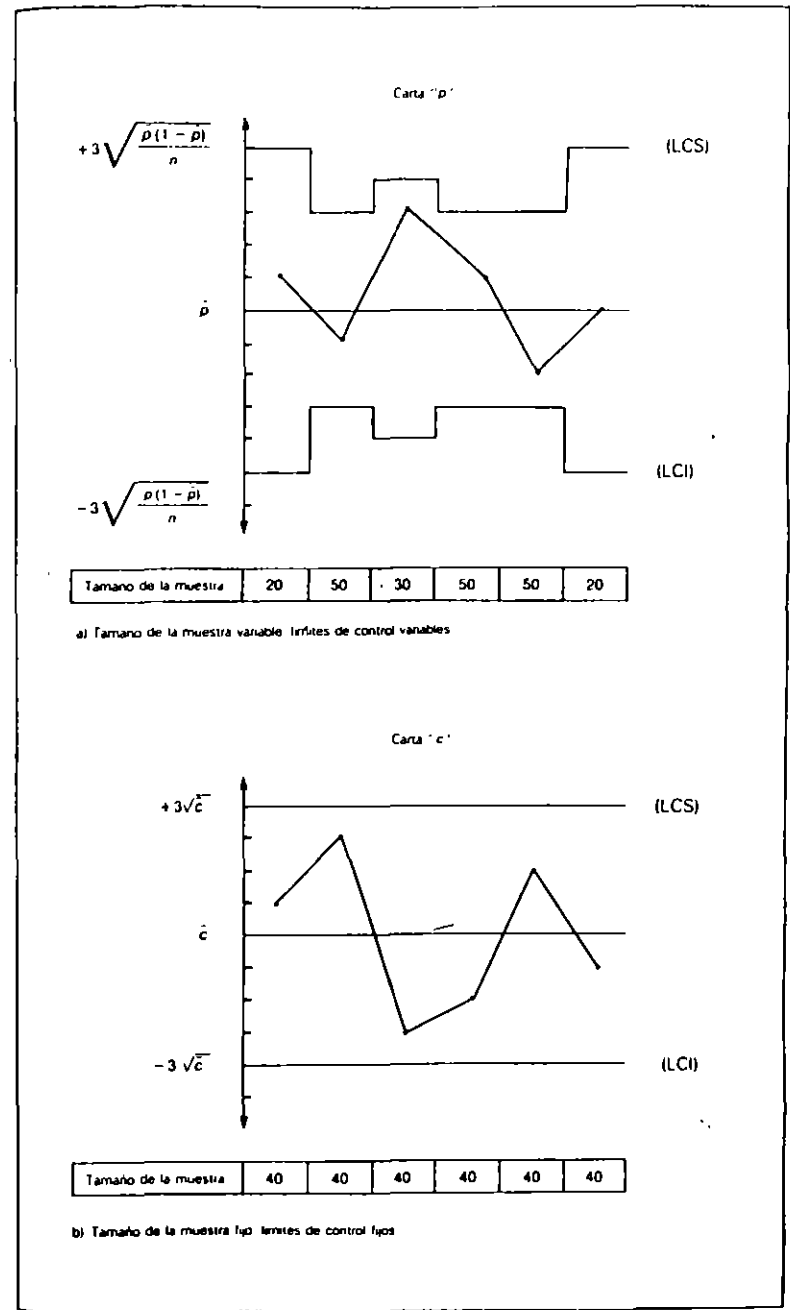
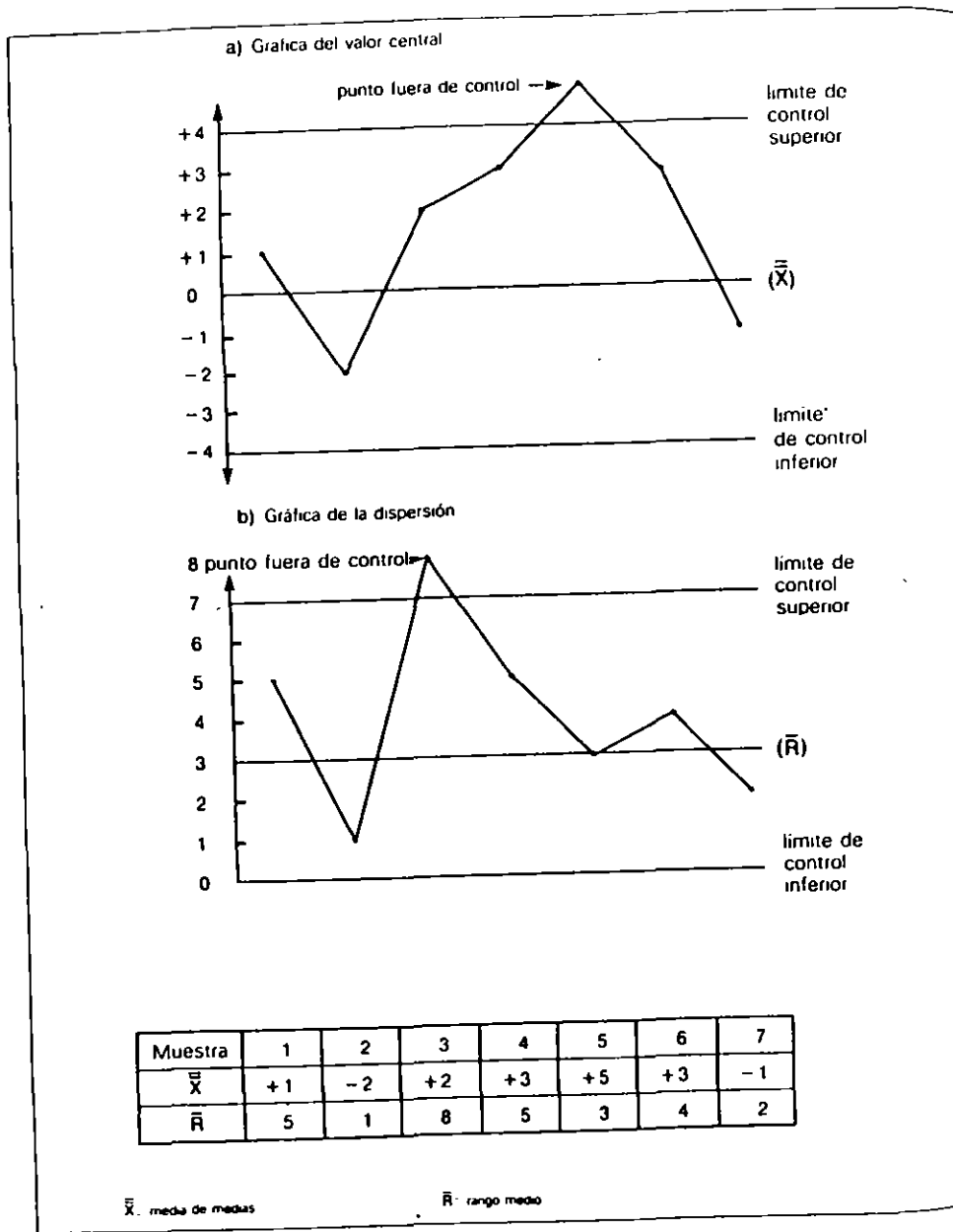


Fig 16-9  
Ejemplos de  
cartas de control  
por atributos

Fig 16-8  
Ejemplo de carta de control con dos gráficas

b) Cartas por variables (dimensiones medibles), de las cuales las más utilizadas son:

- carta " $\bar{X}, R$ ", que sirve para el control de la media aritmética de una característica y de su dispersión, expresada mediante el rango (fig 16-10a).
- carta " $\bar{X}, \sigma$ ", que sirve para el control de la media aritmética de una característica y de su dispersión, expresada mediante la desviación estándar (fig. 16-10b).

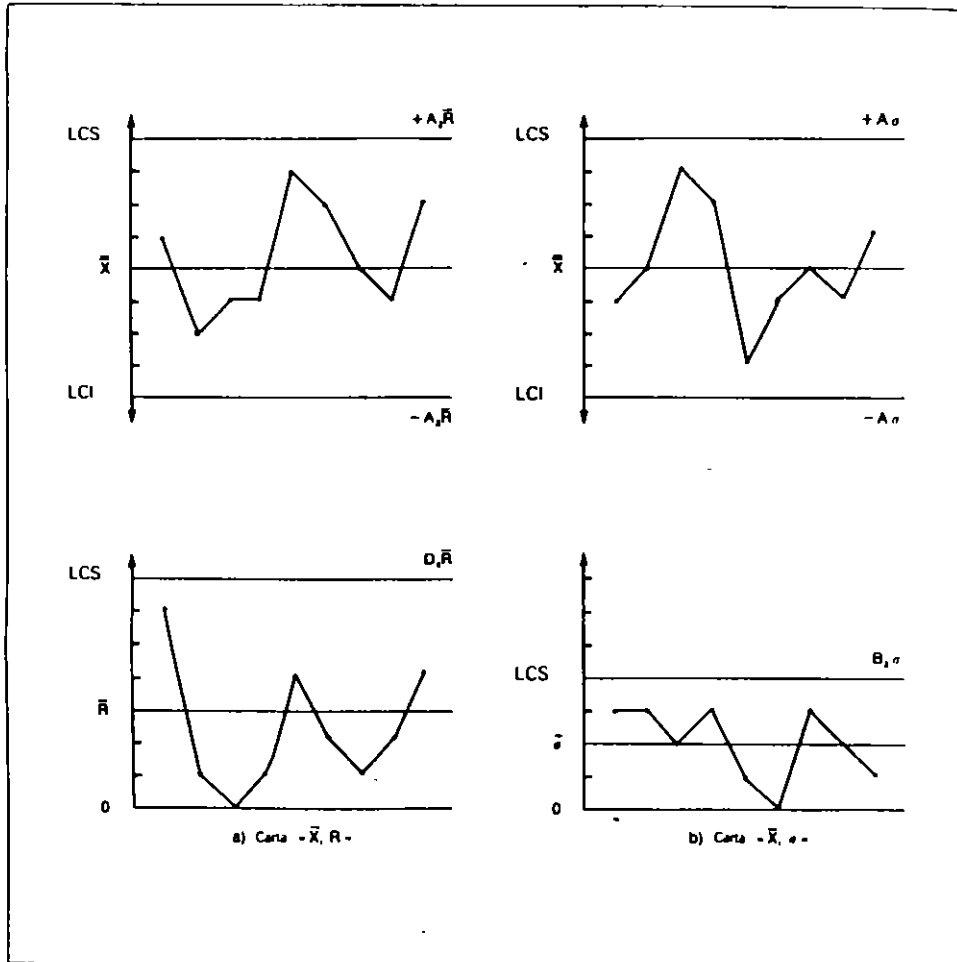


Fig 16-10  
Ejemplos de cartas de control variable

La carta " $\bar{X}, R$ " es la que se utiliza con más frecuencia en la industria debido a su simplicidad (medición de la media aritmética y del rango). Sin embargo, desde la aparición de las calculadoras de bolsillo programables, la carta " $\bar{X}, \sigma$ " presenta un nuevo atractivo, puesto que la laboriosidad de cálculo ha desaparecido y este procedimiento permite una mejor estimación de la dispersión.

### CALCULO DE LA CARTA DE CONTROL

Esta carta también puede ser utilizada para controlar valores individuales ( $n = 1$ ) y muestras cuyo tamaño puede exceder de varios cientos de unidades. El valor central corresponde a la media aritmética de la característica y por tanto no se ve afectado por el tamaño de la muestra. Por otro lado, los límites de control dependen del tamaño de la muestra según la siguiente fórmula básica

$$\bar{X} \pm \frac{3\sigma}{\sqrt{n}}$$

donde  $\bar{X}$  es el valor central,  
3 corresponde a 99.73% de la distribución de la población,  
 $n$  es el tamaño de la muestra.

Ejemplo: El peso de un material determinado tiene los siguientes valores:

$$\begin{aligned}\bar{X} &= 200 \text{ g/m}^2 \\ \sigma &= 15 \text{ g/m}^2\end{aligned}$$

Los límites de control superior e inferior son los siguientes.

Tamaño de la muestra (n)	Valor central ( $\bar{X}$ )	$\pm \frac{3\sigma}{\sqrt{n}}$	Límites de control	
			superior (LCS)	inferior (LCI)
5	200	$\pm (3 \times 15) / 5$	220	180
10	200	$\pm (3 \times 15) / 10$	214	186
20	200	$\pm (3 \times 15) / 20$	210	190

En la figura 16-11 se observa que, para todo aumento del tamaño de la muestra, los límites de control se acercan al valor central de la carta.

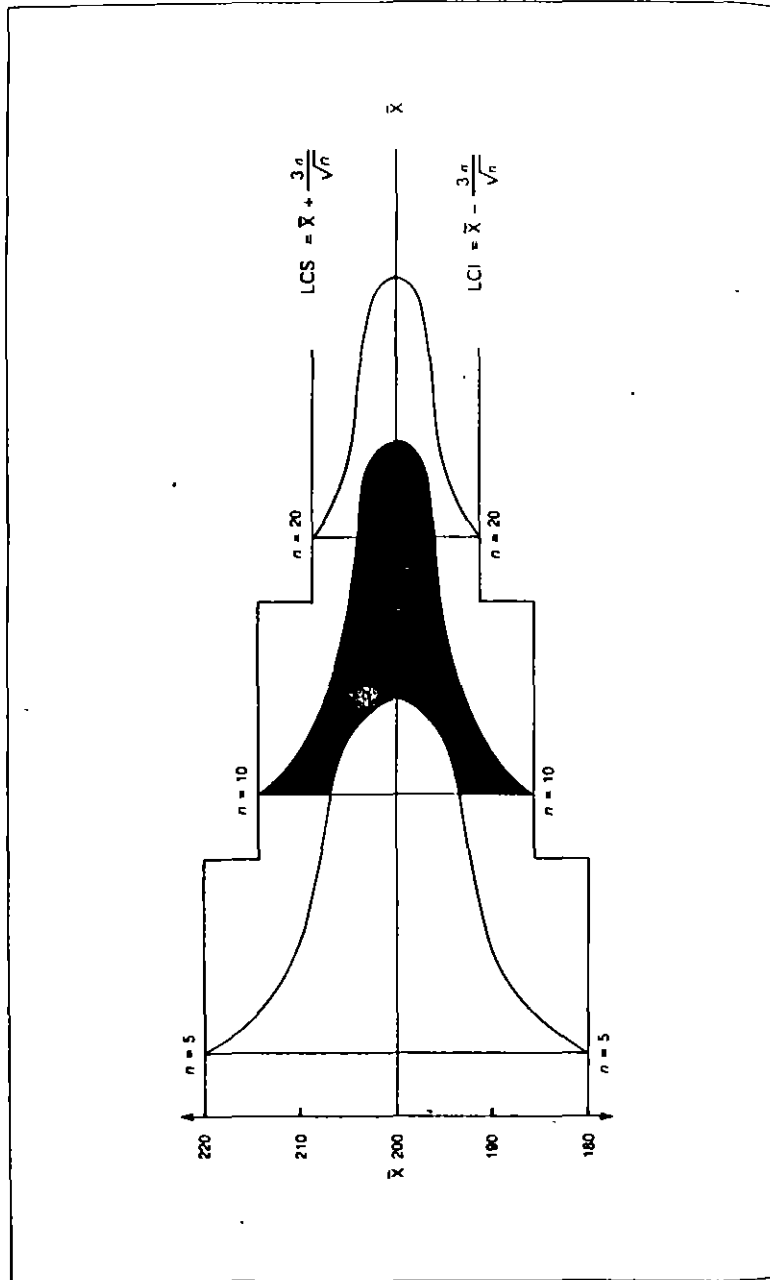
La aplicación de la fórmula básica a las cartas de control por atributos y por variables aparece en la figura 16-12.

### LECTURA DE LA CARTA DE CONTROL

La carta de control permite visualizar la calidad del producto y del proceso de fabricación, informando al operador de todo cambio e indicándole si es necesario un ajuste para mantener el nivel de calidad exigido. Por tanto, es muy importante saber leer adecuadamente una carta de control. Las reglas básicas son:



Fig. 16-11  
Influencia del tamaño de la muestra en los límites de control de una carta



CARTAS	VALOR CENTRAL	LIMITES DE CONTROL	
		SUPERIOR (LCS)	INFERIOR (LCI)
A — Carta por atributos fracción de unidades defectuosas (fig. 16 09a)	$p$	$+3 \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$	$-3 \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$
numero de unidades defectuosas	$np$	$+3 \sqrt{np(1-p)}$	$-3 \sqrt{np(1-p)}$
numero de defectos por unidad	$\bar{u}$	$+3 \sqrt{\bar{u}/n}$	$-3 \sqrt{\bar{u}/n}$
numero de defectos por muestra (fig. 16 09b)	$\bar{c}$	$+3 \sqrt{\bar{c}}$	$-3 \sqrt{\bar{c}}$
B — Carta por variables media aritmética	$\bar{X}$	$+ A_1 R$	$- A_1 \bar{R}$
rango (fig. 16 10a)	$R$	$D_1 R$	$0$
desviación estándar (fig. 16 10b)	$\sigma$	$B_1 \sigma$	$0$

Nota: Los valores  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$  y  $D_1$  son factores de los límites de control (ver el anexo 16 2)

Fig. 16-12  
Cálculo de los límites de control

1. Todo punto situado en el exterior de un límite de control indica que el proceso de fabricación se encuentra fuera de control
2. Cuando dos cartas se utilizan paralelamente (por ejemplo, carta " $\bar{X}$ , R" para la media y el rango) y un punto de una de ellas se sitúa en el exterior de un límite, el proceso de fabricación se considera fuera de control

Estas dos reglas son sencillas, porque identifican un punto fuera de control; sin embargo, llega a suceder que todos los valores medidos se encuentren dentro de los límites de control (fig. 16-13), y que el proceso de fabricación está fuera de control. Este es el caso [2] que se expone en el siguiente ejemplo:

Número total de lecturas sobre la grafica	Número de lecturas comprendidas entre la media y un sólo límite de control
7	7
11	10
14	12
17	14
20	16

La lectura de esta carta también puede indicar los siguientes fenómenos, reveladores de un proceso de fabricación que tiende a escapar de control (fig. 16-14):

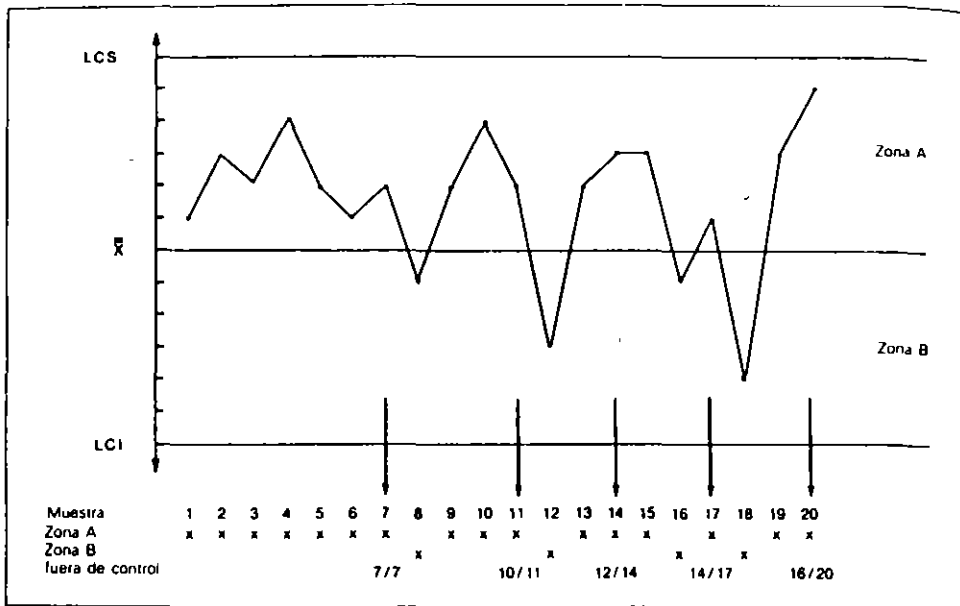


Fig. 16-13  
Indicaciones de una carta fuera de control a partir de la posición de las muestras

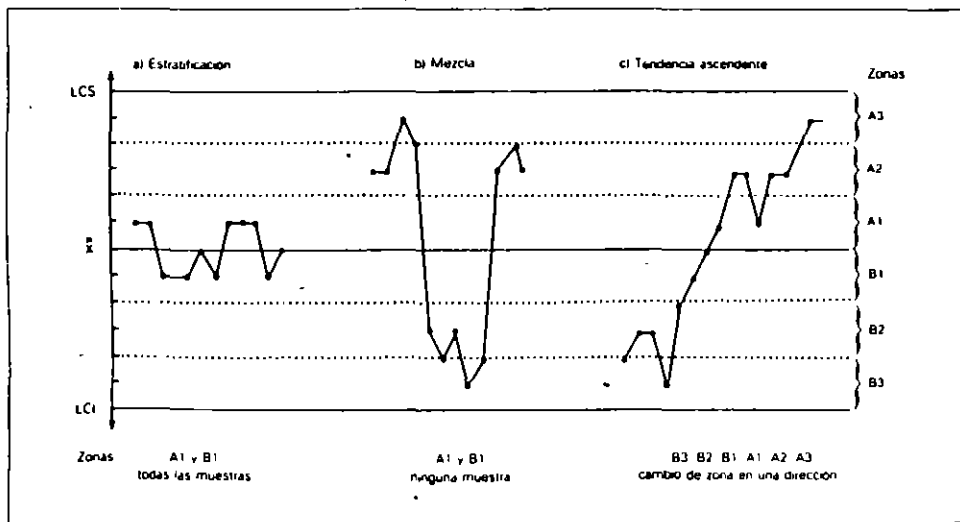


Fig. 16-14  
Otras indicaciones de una carta fuera de control a partir de la concentración y la tendencia

- *estratificación*: 15 resultados consecutivos situados a  $\pm$  una desviación estándar de la media;
- *mezcla*: 8 resultados consecutivos situados a uno y otro lados de la media, pero ninguno de ellos en la zona de  $\pm$  una desviación estándar
- *tendencia*: desplazamiento continuo ascendente o descendente, que indica un desarreglo progresivo del proceso

## RESUMEN

El control estadístico de la calidad exige una especificación completa previa que indique las características por evaluar así como las normas, las tolerancias y el método de análisis para verificar la conformidad de las características

A todo proceso de fabricación corresponde una distribución, con un valor central y una medida de dispersión. La mayoría de los procesos de fabricación industriales siguen la ley de la distribución normal, y es a partir de este hecho como pueden ser controlados mediante planes de muestreo y cartas de control. Estas últimas pueden clasificarse en dos grupos: las aplicables a dimensiones no medibles (atributos), y las aplicables a dimensiones medibles (variables).

Los planes de muestreo permiten reducir el costo de inspección. Las cartas de control requieren mayor atención, dado que incluso si todos los datos se encuentran dentro de los límites de control, es posible que el proceso de fabricación escape de control. Estas herramientas pueden aplicarse al insurno, a la secuencia y al producto. Son más económicas que la inspección al 100%, pero las decisiones que se tomen a partir de ellas tienen asociados riesgos ( $\alpha$  y  $\beta$ ).

## Preguntas

1. Indique dos defectos críticos, dos mayores y dos menores que usted podría encontrar en cinco productos de consumo popular y explique por qué los ha llamado críticos, mayores y menores
2. ¿En qué se relacionan los riesgos  $\alpha$  y  $\beta$  en la técnica de muestreo?

## Ejercicios prácticos

1. Inspeccione al 100% el texto de los objetivos, la terminología y la introducción de este capítulo

— *Especificación*: toda letra O del texto es un defecto

— *Método de evaluación*: recorrer todo el texto una sola vez en menos de un minuto, de arriba abajo y de izquierda a derecha. Usted no deberá regresar ni hacer tachones.

Cuente el número de defectos y compare su resultado con el de otros compañeros de clase ¿Qué concluye usted?

- Redacte la especificación de compra de un lapicero y de un recuadro de notas.
- Los siguientes datos se obtuvieron durante los ensayos de preproducción de una línea de llenado de alimentos en conserva.

Muestra número	Peso en gramos	Muestra número	Peso en gramos	Muestra número	Peso en gramos
1	468	11	465	21	462
2	463	12	459	22	459
3	459	13	453	23	453
4	460	14	462	24	458
5	454	15	462	25	460
6	457	16	460	26	455
7	461	17	454	27	458
8	455	18	449	28	461
9	451	19	457	29	451
10	460	20	457	30	458

La especificación temporal menciona que el contenido neto de conserva debe ser de  $459 \text{ g} \pm 6 \text{ g}$ . La norma gubernamental exige que el contenido neto mínimo sea de 453 g, con un margen inferior máximo de 1%. ¿Cumple el proceso de llenado de especificación y la norma gubernamental? ¿Debe modificarse la especificación temporal? De ser así, justifique y enuncie la especificación modificada.

- Con ayuda de la tabla de áreas bajo la curva normal, calcule el porcentaje de las poblaciones bajo la curva (vea el anexo 16-1).

a)  $\bar{X} = 203.5 \text{ g}$        $\sigma = 5 \text{ g}$   
Porcentaje entre 195.8 y 203.5 g

b)  $\bar{X} = 198 \text{ ml}$        $\sigma = 11 \text{ ml}$   
Porcentaje entre 198 y 205 ml

c)  $\bar{X} = 530 \text{ cm}^3$        $\sigma = 28 \text{ cm}^3$   
Porcentaje entre 528 y 551  $\text{cm}^3$

d)  $\bar{X} = 305 \text{ mm}$        $\sigma = 5 \text{ mm}$   
Porcentaje entre 309 y 313 mm

- Un fabricante de termostatos desea vigilar su proceso de fabricación con la ayuda de una carta de control. Las temperaturas observadas son las siguientes:

42,6	41,4	39,5	39,7	40,0	42,9	40,0
40,3	41,5	41,3	40,7	41,0	45,1	42,0
41,0	42,4	40,8	39,0	39,7	39,6	38,0
39,0	38,7	38,8	39,7	43,1	44,0	43,8
43,6	42,5	41,5	41,0	39,0	41,1	41,4
42,0	41,1	41,5	40,2	40,7	42,5	42,4
41,0	40,2	41,5	40,5	40,6	40,8	41,0
42,0	39,0	39,7	40,2	40,0	38,8	40,5
41,0	41,2	41,0	42,2			

Elabore una carta de control " $\bar{X}$ , R" para los siguientes datos: a)  $n = 5$ ; b)  $n = 10$  (Vea el anexo 16-2)

- Calcule y elabore la parte de control para los siguientes datos

$n =$	200	200	200	200	200	200	200	200
defectuosos	3	2	2	1	4	2	3	0

- Calcule y elabore la carta de control para los siguientes datos.

$n =$	100	50	75	75	100	100	50	200
defectos	2	2	3	1	0	1	2	3

## BIBLIOGRAFIA

- Burr, I.W., *Statistical quality control methods*. New York: Macmillan-Diener, 1976.
- Grant, E.L., *Statistical Quality Control*. New York: McGraw-Hill, 1964.
- Hansen, B.L., *Quality Control: Theory and Applications*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1963.
- Ott, E.R., *Process Quality Control*. New York: McGraw-Hill, 1975.
- Enrick, N.L., *Contrôle de qualité et fiabilité dans l'entreprise industrielle*. Paris: Eyrolles/Ed. d'organisation, 1968.

### Artículos

- Journal of Quality Technology*, bulletin trimestre de l'American Society for Quality Control Milwaukee.

16-1. Tabla simplificada de porcentajes de muestras bajo la curva normal.

Z	0,00
-3,0	0,1%
-2,5	0,6%
-2,0	2,3%
-1,5	6,7%
-1,0	15,9%
-0,5	30,8%
0,0	50,0%
+0,5	69,1%
+1,0	81,1%
+1,5	93,3%
+2,0	97,7%
+2,5	99,4%
+3,0	99,9%

16-2. Factores para calcular los límites de control de las cartas " $\bar{X}$ , R" y " $\bar{X}$ ,  $\sigma$ ".

Tamaño de la muestra	FACTORES			
	A	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	D <sub>4</sub>
2	2,121	1,880	1,843	3,267
3	1,732	1,023	1,856	2,575
4	1,500	0,729	1,808	2,282
5	1,342	0,577	1,756	2,115
6	1,225	0,483	1,711	2,004
7	1,134	0,419	1,672	1,924
8	1,061	0,373	1,638	1,864
9	1,000	0,337	1,609	1,816
10	0,949	0,308	1,584	1,777
11	0,905	0,285	1,561	1,744
12	0,866	0,266	1,541	1,716
13	0,832	0,249	1,523	1,692
14	0,802	0,235	1,507	1,671
15	0,775	0,223	1,492	1,652

(Tomado de las tablas del ASTM Manual, Quality Control of Material)

# 17

## Administración del mantenimiento y la seguridad en el trabajo

### OBJETIVOS

Después de haber estudiado este capítulo, el lector deberá ser capaz de

- definir la función y las actividades de un departamento de mantenimiento;
- describir las etapas de la programación de los trabajos de mantenimiento;
- reconocer los elementos del costo del mantenimiento;
- interpretar las razones de eficacia;
- definir la función y las actividades de un departamento de seguridad;
- enumerar las medidas preventivas y correctivas de un departamento de seguridad;

### TERMINOLOGIA

costo de reemplazo	medida preventiva
depreciación	razón de costos
mantenimiento correctivo	razón de eficacia
mantenimiento preventivo	razón de ejecución
mantenimiento	seguridad en el trabajo*
medida correctiva	

\*Sinónimo de este término es el de seguridad industrial (N. del T.)

## INTRODUCCION

Toda empresa posee recursos humanos y materiales los cuales debe proteger y mantener en estado funcional. Es por ello que el mantenimiento y la seguridad en el trabajo son actividades importantes para la producción.

La mayoría de las empresas de gran tamaño establecen diferencias entre el mantenimiento de los recursos materiales y la seguridad del personal en el trabajo, y confían la responsabilidad de tales actividades a dos departamentos distintos. Las empresas pequeñas y medianas descuidan en diversos grados la seguridad en el trabajo. Sin embargo, una nueva ley permite a los trabajadores rehusar, en ciertas condiciones, un trabajo que se juzgue perjudicial para la salud. La importancia y la seguridad del elemento humano en el medio de trabajo conciernen por tanto al legislador, y la empresa debe apegarse a la nueva reglamentación. Ciertos establecimientos industriales tienen una responsabilidad directa en la seguridad en el trabajo.

No obstante, en lo que concierne a los recursos materiales, el empresario no necesita de leyes para mantenerlos, a menos que no tenga conciencia de su valor económico y técnico. Cuando se considera el costo de la detención de la producción, los montos invertidos en maquinaria y equipo y el costo de su reemplazo, se aprecia la importancia de un departamento de mantenimiento.

El funcionamiento de este departamento afecta las actividades de producción, la seguridad y la productividad de los empleados. Estudiaremos primeramente la administración del mantenimiento, y después analizaremos las actividades de un departamento de seguridad laboral.

## EL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO

La función del departamento de mantenimiento es asegurar la regularidad de la ejecución de los recursos materiales y que su mantenimiento origine un estado propicio para la producción. De ello puede concluirse que la eficacia del sistema de producción está ligada con la del departamento de mantenimiento.

Las actividades de este departamento pueden dividirse en cuatro categorías: trabajos de mantenimiento; estimación y programación de estos trabajos; evaluación de los costos, control y medición de la eficacia del departamento.

## TRABAJOS DE MANTENIMIENTO

El análisis de los trabajos de mantenimiento nos lleva a distinguir dos grupos: los trabajos de rutina y los trabajos intermitentes. Los primeros se ejecutan antes de que sobrevenga una descompostura, a fin de evitar así los costos de reparación y la detención de la producción. Los segundos comprenden

- las reparaciones consecutivas a una descompostura o una producción defectuosa,
- las modificaciones e instalaciones necesarias para los mejoramientos técnicos o la renovación del equipo.

### Trabajos de rutina

El mantenimiento (engrasado, lubricación, conservación, limpieza) y la inspección constituyen el *mantenimiento preventivo*. Este tipo de mantenimiento se ejecuta a intervalos regulares, o después de que se ha alcanzado cierta tasa de utilización o uso.

Para planificar los trabajos de mantenimiento preventivo, es necesario conocer la importancia y la naturaleza de estos trabajos, y determinar la periodicidad de las intervenciones.

### Trabajos intermitentes

Estos son principalmente los trabajos de reparación y los trabajos de instalación y modificación.

a) La reparación consiste en devolver a su estado normal un equipo o una máquina que ya no tienen el funcionamiento deseado o que se han vuelto inutilizables por el uso o por una avería. Cuando las reparaciones tienen como finalidad restablecer el funcionamiento por un tiempo limitado, se las califica como actividades de reparación. Estos trabajos pertenecen al *mantenimiento correctivo*. En este tipo de mantenimiento se ignoran el estado anterior del objeto por reparar y el detalle de la reparación por ejecutar, lo cual hace difícil la planeación.

b) Los trabajos de instalación y de modificación son de un carácter particular en cuanto a la realización, pero son previsibles y se ejecutan conforme un calendario.

## PROGRAMACION DE LOS TRABAJOS DE MANTENIMIENTO

La programación de los trabajos de rutina presenta menos dificultades que la de los trabajos intermitentes. Los problemas de la programación son

- diversidad de los trabajos de mantenimiento,
- dificultades de prever la naturaleza y el momento de los trabajos;
- dispersión del personal que ha de intervenir en estos trabajos,
- dificultad de distribuir el personal de mantenimiento.

Para superar estas dificultades, es esencial un estudio a fondo de los trabajos de mantenimiento y la elaboración de un programa apropiado. En seguida se presentan las etapas de la programación de los trabajos de mantenimiento (fig. 17-1):

a) **Análisis de los trabajos.** Esta etapa es anterior a la elaboración del calendario de mantenimiento. El análisis de la historia de los trabajos, de las especificaciones técnicas y de los consejos del fabricante permitirá

- establecer las normas de mantenimiento (inspección, naturaleza y frecuencia de los trabajos),
- hacer el inventario de los trabajos de mantenimiento preventivo para cada equipo.

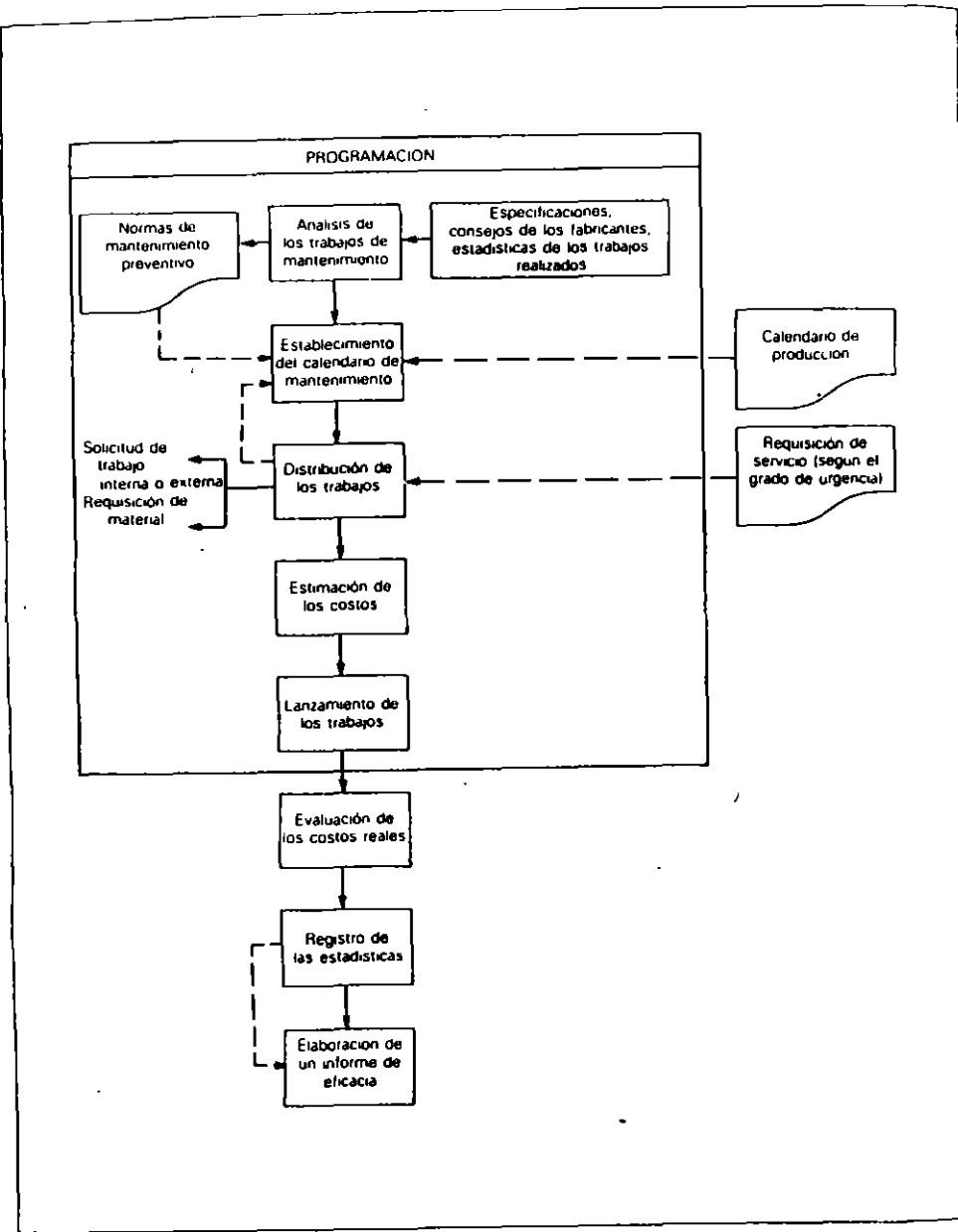


Fig 17-1  
Actividades del departamento de mantenimiento

b) Establecimiento de un calendario A partir de las normas de mantenimiento preventivo, se elabora un programa de acción en el que se precisen la calidad y la frecuencia de las intervenciones del departamento de mantenimiento. Este programa contiene un calendario que toma a menudo la forma de una gráfica de Gantt. Para los trabajos de gran envergadura se utilizan las técnicas CPM o PERT

c) Distribución de los trabajos. No puede suponerse que los trabajos correctivos no serán nunca necesarios después del mantenimiento preventivo. Las causas de los trabajos correctivos son diversas, y debe elaborarse un proce-

77072										SOLICITUD DE TRABAJO							
SEC	CC	No ENT	No DE CUENTA			EQUIPO			RECIBIDO	REQUERIDO	HORA						
											A M	P M					
DEMANDANTE			PLANIFICADO		PRIORIDAD		HRS EST		CODIGO DE OFICIOS								
			SI	NO					1	2	3	4	5	6	7		
									MEC	PLOM	ELEC	MAO	PINTURA	MLN	OTROS		
CODIGO DE TRABAJO										DESCRIPCION DE TRABAJO							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0								
DES	EP	REGL	SERV	PROY	GEN	CO	PIEZAS	IND	No CL								
. DIAS										LUN	MAR	MIER	JUE	VIER	SAB	DOM	TOTAL
HORAS NOMALES																	
HORAS SUPLEMEN																	
EMPLEADO No		TRABAJO TERMINADO		SI	NO												
TASA		EQUIPO		1	2	3											

EMPL No	EQUIPO	TASA	DEP	CODIGO	FECHA	NOMBRE DEL EMPLEADO *			
SOLICITUD DE TRABAJO	DEP	No DE MANTIENIMIENTO	No DE CUENTA	COD DE TRAB	HORAS REG	HORAS SUPL	DESCRIPCION DEL TRABAJO		HORAS DE PUNTAJE
APROBADA POR					TOTAL		CODIGO DE OFICIO		

Fig 17-2

dimiento que permita su ejecución con las demoras más pequeñas. Ciertas empresas utilizan requisiciones de servicios de diferentes colores para indicar el grado de urgencia de los trabajos correctivos (fig. 17-2)

Así, en esta etapa debe distribuirse el personal del departamento de mantenimiento y efectuarse los trabajos requeridos. Es obvio que este departamento debe algunas veces recurrir a expertos externos, lo cual le impondrá detalles particulares. En seguida se elaboran simultáneamente la solicitud de trabajo, las requisiciones de material y la estimación de los costos

d) **Estimación de los costos.** En ocasiones es difícil hacer esta estimación, sobre todo para el mantenimiento correctivo. El estimador evalúa el tiempo y el material necesarios para los trabajos, y esta estimación debe comprender los costos de mano de obra y material y los costos indirectos. Más tarde estudiaremos los elementos de cada costo

e) **Lanzamiento de los trabajos.** Después de la solicitud de trabajo y la requisición de material y herramienta, se procede a los preparativos a fin de que todo esté listo para el inicio de los trabajos.

### EVALUACION DE LOS COSTOS.

El análisis de los costos realizado en el departamento de mantenimiento no se limita a la evaluación de los trabajos ejecutados, sino que se extiende a los costos de reemplazo de los equipos usados u obsoletos.

Los costos del mantenimiento pueden dividirse en dos grandes categorías: costos directos y costos indirectos (fig. 17-3). La compilación de los costos reales se efectúa después de la ejecución de los trabajos. De esta forma, se conoce con precisión el número de horas de trabajo y la cantidad de material utilizado. Esta evaluación es necesaria para el control presupuestal, para el cálculo del precio de costo y para la medición de la eficacia del departamento de mantenimiento

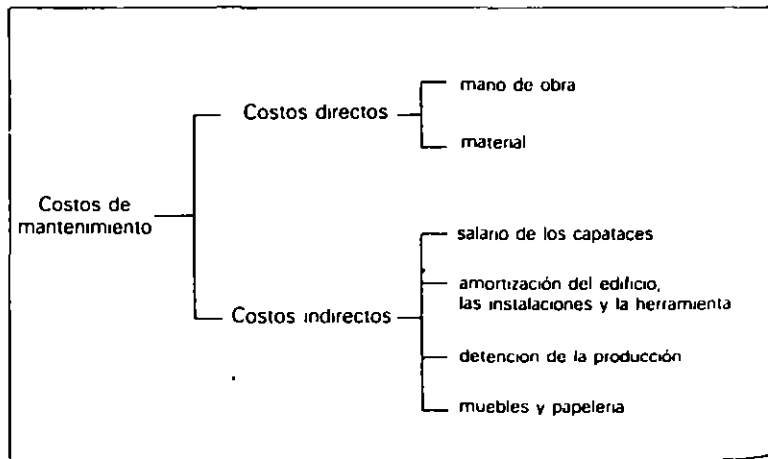


Fig. 17-3  
Costos de los trabajos de mantenimiento

El costo de reemplazo debe corresponder al ahorro obtenido después del reemplazo de un activo inmobiliario. La decisión de reemplazar una máquina por otra debe estar precedida de una comparación de su costo de funcionamiento respectivo, y debe considerarse si habrá un aumento del ingreso.

Tomemos un ejemplo. Una compañía posee desde hace cinco años la máquina A, por la cual ha pagado \$ 25 000. El tiempo de vida de dicha máquina es de 10 años y la depreciación anual de \$ 2 000. Se ha pensado en reemplazarla por la máquina B, cuyo precio es de \$ 30 000. El tiempo de vida de esta otra máquina es de 10 años y la depreciación anual de \$ 2 700. La máquina B tiene ciertas ventajas por su tasa de producción y la calidad de sus productos. En la tabla de la figura 17-4 se muestra la estimación de los ingresos y de los costos de funcionamiento para estas dos máquinas. ¿Deberá la compañía reemplazar la máquina A?

**Solución:** A partir de los datos de la figura 17-4 es posible comparar los aumentos del ingreso y de los costos de funcionamiento. En la tabla de la figura 17-5 se da el resultado de estos cálculos. La suma de la columna de los resultados es positiva; por tanto es preferible reemplazar la máquina A por la máquina B.<sup>1</sup>

Normalmente, los costos de funcionamiento de una máquina aumentan en función de la tasa de utilización. Este aumento es a menudo consecuencia de los costos de mantenimiento y la obsolescencia de la máquina. El problema consiste en encontrar el momento de reemplazo más económico. Con base solamente en el criterio económico, puede decirse que el reemplazo debe hacerse cuando el costo total anual (costo medio de mantenimiento y de depreciación) se hace igual o inferior al costo anual de mantenimiento. Tomemos otro ejemplo. La estimación de los costos anuales de mantenimiento de una máquina aparece en la tabla de la figura 17-6. El precio de esta máquina es de \$ 2 500, y su valor de rescate es nulo. ¿Cuál será el periodo económico de reemplazo?

<sup>1</sup> Para estos cálculos no se considera el cambio en el valor del dinero a través del tiempo, puesto que \$ 100 gastados dentro de 10 años no son equivalentes a \$ 100 gastados el día de hoy. Por tanto debe tenerse en cuenta el efecto de la tasa de interés. Este aspecto rebasa el alcance de nuestro texto.

DESCRIPCION	MAQUINAS	
	A	B
Ingreso anual	\$ 20 000	\$ 25 000
Costos de funcionamiento		
— mano de obra directa	\$ 12 000	\$ 13 000
— mano de obra indirecta	\$ 500	\$ 200
— mantenimiento	\$ 1 200	\$ 800
— unidades defectuosas	\$ 250	\$ 100
— depreciación	\$ 2 000	\$ 2 700

Fig. 17-4  
Ingresos y costos de funcionamiento de las máquinas A y B

DESCRIPCION	AUMENTO	DISMINUCION	RESULTADO
Efecto del reemplazo sobre el ingreso	\$ 5 000		\$ + 5 000
Efecto del reemplazo sobre los costos de funcionamiento			
— mano de obra directa	\$ 1 000		- 1 000
— mano de obra indirecta		\$ 300	+ 300
— mantenimiento		\$ 400	+ 400
— herramienta		\$ 150	+ 150
— unidades defectuosas			
— depreciación	\$ 700		- 700
— energía			0
— impuestos y seguros			0
— otros gastos			0
			\$ + 4 150

Fig. 17-5  
Comparación de los aumentos en ingresos y costos

**Solución:** En la tabla de la figura 17-7 se muestran las etapas del cálculo. El periodo económico de reemplazo se sitúa al final del sexto año, debido a que para el séptimo año el costo anual total será de \$ 620 y el costo anual de mantenimiento será de \$ 700 (No hemos tomado en consideración el cambio del valor del dinero al paso del tiempo.)

## REGISTRO DE LOS DATOS ESTADISTICOS

Es importante que el departamento de mantenimiento registre los trabajos ejecutados por cada equipo y su costo, a fin de permitir:

- la planificación de las intervenciones futuras,
- la estimación de los costos de mantenimiento,
- la evaluación de la ejecución del equipo,
- la decisión de reemplazo.

Año	Costo anual de mantenimiento
1	\$ 100
2	150
3	170
4	200
5	240
6	280
7	700
8	752

Fig. 17-6  
Estimación de los costos anuales de mantenimiento

Año	Costo anual de mantenimiento	Costo acumulativo de mantenimiento	Costo promedio de mantenimiento	Depreciación	Costo anual total
A	B	C = (B) - 1 + B	D = C ÷ A	E = 2500 ÷ A	F = D + E
1	\$ 100	\$ 100	\$ 100	\$ 2 500.00	\$ 2 600.00
2	150	250	125	1 250.00	1 375.00
3	170	420	140	834.00	974.00
4	200	620	155	625.00	780.00
5	240	860	172	500.00	672.00
6	280	1 140	190	417.00	607.00
7	700	1 840	263	357.00	620.00
8	752	2 592	324	312.50	636.50

\* La letra designa la columna y (-1) designa el periodo precedente

FIG. 17-7  
Evaluación del costo anual total

La figura 17-8 proporciona un modelo de fórmula de registro cuya información se extrae de las solicitudes de trabajo.

## EVALUACION DE LA EFICACIA DEL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO

En el caso de muchas empresas, es importante que cada departamento justifique sus gastos. Por tanto es necesario determinar los medios con los cuales se evaluará la eficacia del departamento. Estas empresas utilizan las *razones de eficacia* como índices de evaluación. Estas razones, para un departamento de mantenimiento, pueden dividirse en tres categorías [3].

### a) Razones de costos:

- razón de *crecimiento de los costos*:

$$\frac{\text{costo total de mantenimiento del año en curso}}{\text{costo total de mantenimiento del año anterior}}$$

- razón de *costo por hora-hombre*:

$$\frac{\text{costo total de mantenimiento}}{\text{número de horas-hombre pagadas}}$$

- razón de *costo total*:

$$\frac{\text{costo total de mantenimiento}}{\text{costo total de producción}}$$

### b) Razones de nivel de mantenimiento:

- razón de *mano de obra/material*:

$$\frac{\text{costo de la mano de obra}}{\text{costo del material de mantenimiento}}$$



— razón de efecto de las descomposturas.

$$\frac{\text{número de horas de detención debido a descomposturas}}{\text{número de descomposturas}}$$

c) Razones de funcionamiento del departamento:

— razón de productividad

$$\frac{\text{horas estimadas de los trabajos}}{\text{horas trabajadas}}$$

— razón de incidencia de las descomposturas

$$\frac{\text{horas dedicadas a los trabajos urgentes}}{\text{horas totales trabajadas}}$$

— razón de trabajos en espera.

$$\frac{\text{horas estimadas de los trabajos en espera}}{\text{horas disponibles por semana}}$$

## SEGURIDAD EN EL TRABAJO

Es bien sabido que sólo el trabajo puede asegurar a la persona la satisfacción de sus necesidades. Sin embargo, el trabajo puede constituir una fuente de prosperidad solamente cuando la persona conserva su salud y su vida. La salud constituye para el individuo su capacidad de trabajo y de producción. Todo lo que atenta contra la salud del individuo afecta su capacidad de trabajo, su productividad, su satisfacción y su motivación.

La seguridad en el trabajo no consiste sólo en instalar aparatos protectores o en aplicar medidas destinadas a prevenir enfermedades industriales. La seguridad en el trabajo no reside únicamente en la colocación de anuncios, de reglamentos o de consignas, ni en la instalación de un puesto de socorro sin medios de acción en cuanto a personal y material.

La seguridad en el trabajo es consecuencia de un conjunto de actividades organizadas por un responsable competente y entusiasta dedicado a la causa de la seguridad de la persona.

### PRINCIPIOS BASICOS

Los siguientes cuatro principios básicos [5] pueden guiar al responsable en la elaboración de una política de seguridad en el trabajo.

*1er principio:* Las circunstancias propicias para los accidentes deben ser identificadas.

Compañía "Hany Ltée"

No \_\_\_\_\_

Ficha de los trabajos  
de mantenimiento

Equipo o máquina	
Nombre .....	Fecha de compra .....
Código .....	Costo de compra .....
Taller .....	Duración probable .....

Trabajos de mantenimiento											
Solicitud de trabajo No		/ / / / / / / / / / / /									
Fecha											
Problema o defecto											
Tipo de intervención (reparación, reemplazo, etc.)											
Principales piezas del equipo	A										
	B										
	C										
	D										
Costos	mano de obra										
	material										
	costo total										
	costo acumulativo										

Fig 17-8

Forma de registro de los trabajos de mantenimiento para un equipo

*2o principio:* La seguridad en el trabajo debe ser administrada con la misma seriedad que las demás actividades del sistema de producción. El responsable debe velar por la seguridad estableciendo objetivos y planificando, organizando, coordinando y controlando su puesta en marcha.

3er principio: La clave de la eficacia de este departamento consiste en contabilizar la ejecución de la seguridad.

4o principio: El departamento de seguridad debe localizar y definir los errores operacionales que causen accidentes. Esta función puede realizarse

- a) buscando el origen del accidente,
- b) investigando si se han aplicado ciertas medidas de control para evitarlo

## ACTIVIDADES DE UN DEPARTAMENTO DE SEGURIDAD

Estas actividades pueden agruparse en dos categorías (fig 17-9) La primera se refiere a las *medidas preventivas*, que tienen como finalidad eliminar o reducir las causas de accidentes; la segunda, que se refiere a las *medidas correctivas*, tiene como finalidad restablecer, por medio de la medicina, la salud de la persona accidentada.

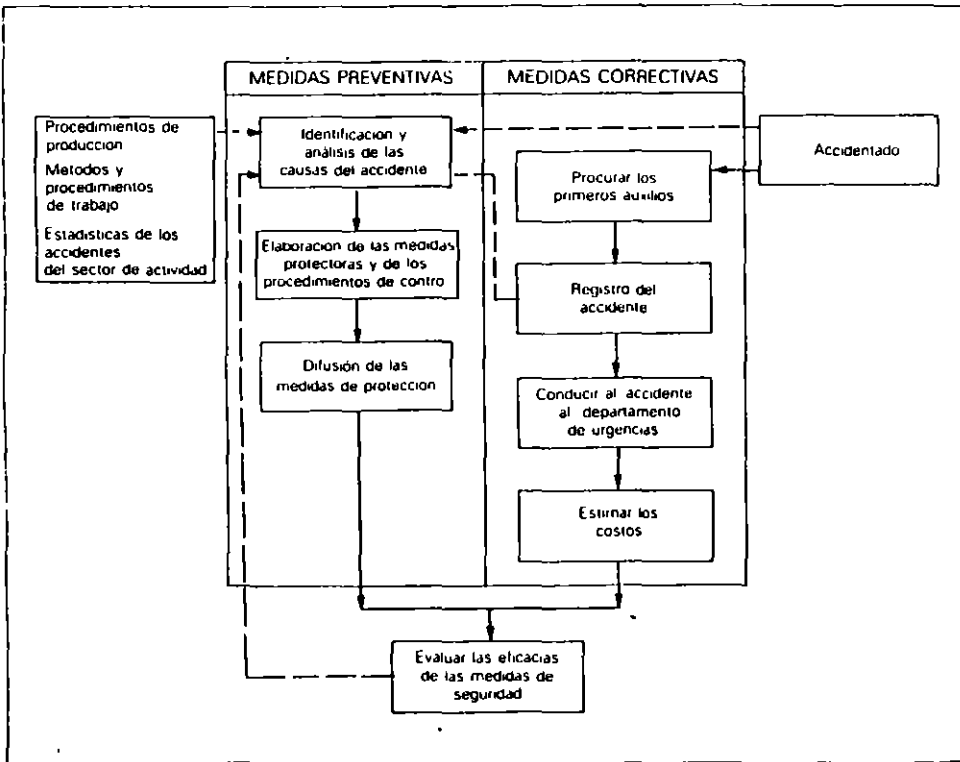


Fig. 17-9  
Ciclo de actividades de un departamento de seguridad industrial

## Identificación y análisis de las causas

Para la seguridad en el trabajo, la encuesta y la estadística son fuentes de diagnóstico necesarias para la determinación de las causas exactas de accidentes o enfermedades, cuyo conocimiento permitirá investigar un remedio eficaz. Analizar las fuentes de peligro consiste en definirlos y descubrir sus mecanismos a fin de conocer los eventos que provocan accidentes o enfermedades industriales (fig 17-10)

## Medidas de protección

Puede estimarse, sin temor a equivocación, que más del 80% de los accidentes de trabajo son atribuibles a una causa humana. Aproximadamente al 60% de dichos accidentes surgen en los trabajos manuales. Es la falta de atención o la imprudencia de la persona lo que provoca la mayoría de los accidentes.

Por tanto es necesario atraer mediante medidas adecuadas la atención de las personas hacia las fuentes de peligro, o invitarlas a la prudencia en el momento de la ejecución de los trabajos peligrosos.

## Comunicación

Esta puede efectuarse por diversos medios

- enseñanza con la ayuda de proyecciones, conferencias, manuales, revistas, etc.
- publicidad mediante carteles, campañas de seguridad, etc.
- emulación suscitada por sugerencias o concursos.

## EVALUACION DE LA EFICACIA DE LAS MEDIDAS DE SEGURIDAD

Esta evaluación es necesaria debido al progreso y el mejoramiento. En este sentido debe responderse a la siguiente pregunta: ¿Qué ha de evaluarse y como se debe evaluar? La respuesta a la primera parte de la pregunta puede ser el número de accidentes por periodo por taller, el número de horas-hombre improductivas por periodo, el costo de los accidentes, el costo de la prevención, etc. Para responder a la segunda parte de la pregunta, es necesario comparar la situación actual con

- la situación anterior,
- la situación proyectada,
- las demás empresas del mismo sector,
- una norma

A fin de establecer tales comparaciones, deben registrarse la frecuencia, la naturaleza y la gravedad de los accidentes de trabajo por centro de actividades. En la figura 17-11 se muestra una fórmula de registro, para un periodo dado, de los accidentes de trabajo y sus consecuencias. También es posible

**INFORME DEL ACCIDENTE**

Nombre del empleado \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_

Departamento \_\_\_\_\_ Capataz \_\_\_\_\_

Fecha y hora del accidente \_\_\_\_\_ Accidente con pérdida de tiempo si   
no

A) Herida \_\_\_\_\_

B) Descripción del accidente \_\_\_\_\_

C) Causas movimientos imprudentes

1  Actuar sin autorización

2  No utilizar protectores

3  Asumir una posición peligrosa

4  Falta de atención

5  No llevar el equipo de protección

6  Infracción al código de prevención

7  Otras \_\_\_\_\_

Condiciones peligrosas

1  Falta de protección en las máquinas

2  Equipo defectuoso

3  Arraigo peligroso

4  Espacio de trabajo inadecuado

5  Otras \_\_\_\_\_

Precise \_\_\_\_\_

Medidas correctivas \_\_\_\_\_

D) El empleado \_\_\_\_\_

Ocupación \_\_\_\_\_ Trabajo en el momento del accidente \_\_\_\_\_

Edad \_\_\_\_\_

Duración del empleo En la fábrica \_\_\_\_\_ En la ocupación \_\_\_\_\_

Limitaciones \_\_\_\_\_

Accidente analizado por \_\_\_\_\_

Aprobado por \_\_\_\_\_

Fecha \_\_\_\_\_

Fig 17-10

DEPARTAMENTO Higiene industrial Fecha: \_\_\_\_\_

**INFORME DE FRECUENCIA Y GRAVEDAD DE LOS ACCIDENTES**

Para el mes de \_\_\_\_\_

SECTOR	MES TRANSCURRIDO			AÑO EN CURSO				
	Horas de trabajo	Numero de accidentes	Jornadas perdidas	Horas de trabajo	Numero de accidentes	Tasa de frecuencia	Jornadas perdidas	Tasa de gravedad
Centro de distribución								
Mantenimiento fábrica y edificios								
Fábrica No 1								
Fábrica No 2								
Total de la fábrica								
Personal remunerado (mes, sitio 1)								
Personal remunerado (mes, sitio 2)								
Personal remunerado (mes, investigación)								
Total para la empresa								

( ) Estadísticas del año anterior

\* Caso anterior

Fig. 17-11

elaborar una tabla de informe acerca de estos accidentes y de la frecuencia de las prácticas peligrosas que los han causado

La tasa de frecuencia y la tasa de gravedad de los accidentes pueden ser medidas con ayuda de las siguientes ecuaciones

$$\text{Tasa de frecuencia} = \frac{\text{número de accidentes} \times 1\,000\,000}{\text{horas de trabajo}}$$

$$\text{Tasa de gravedad} = \frac{\text{número de jornadas perdidas} \times 1\,000\,000}{\text{horas de trabajo}}$$

## RESUMEN

La administración del mantenimiento y de la seguridad en el trabajo tiene como finalidad proteger y conservar en estado funcional los recursos humanos y materiales de la empresa. El desempeño del departamento de mante-

miento y de seguridad industrial tiene algunos efectos en las actividades de la producción, y en la satisfacción y la seguridad de los empleados

El cometido del departamento de mantenimiento consiste en asegurar la regularidad del funcionamiento de los recursos materiales y mantenerlos en el mejor estado posible para la producción. Las actividades de este departamento pueden resumirse en cuatro aspectos: mantenimiento, estimación y programación de los trabajos, evaluación de los costos, control y medición de la eficacia del departamento.

La seguridad en el trabajo consiste en un conjunto de actividades que tienen como finalidad eliminar los accidentes y garantizar la seguridad de las personas. Para hacer esto, el departamento responsable pone en práctica dos tipos de medidas: preventivas y correctivas. Las primeras combaten las causas de los accidentes, y las segundas, que son complementarias, tienen como finalidad restablecer la salud de los accidentados.

## Preguntas

1. ¿Cuál es la función del departamento de mantenimiento?
2. Haga una distinción entre mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo.
3. ¿Cuáles son las etapas de la programación de los trabajos de mantenimiento?
4. ¿Cuáles son los costos que deben considerarse en el momento de hacer la evaluación de los trabajos de mantenimiento, y en el momento de tomar la decisión de reemplazo de las máquinas?
5. Formule las razones de eficacia del departamento de mantenimiento.
6. Defina la función del departamento de seguridad.
7. ¿Es recomendable nombrar dos responsables para el mantenimiento y la seguridad? Exponga las ventajas y las desventajas.
8. ¿Cuáles son las actividades del departamento de seguridad?
9. Describa las principales etapas del trabajo de este departamento.
10. ¿Cómo puede medirse la eficacia del departamento de seguridad?

## Ejercicios prácticos

1. Con el objeto de racionalizar los trabajos de mantenimiento, el responsable del departamento ha emprendido el estudio de los trabajos de inspección y de reparación ejecutados en las cien máquinas de la empresa. Esta persona ha hecho notar que, si el número de inspecciones aumenta, pueden descubrirse ciertas necesidades menores de reparación (preventiva), lo cual como consecuencia reducirá el número de reparaciones correctivas. El resultado del estudio aparece en la tabla de la figura 17-12a.

El costo de una reparación preventiva es de \$ 20, y el de una reparación correctiva es de \$ 60. El costo de inspección es de \$ 2 para cada máquina. ¿Cuántas inspecciones debe efectuar el departamento de mantenimiento a fin de reducir el costo total de mantenimiento? (Utilice la tabla de la figura 17-12b para sus cálculos.)

a) Estimación del número de reparaciones correctivas y preventivas en función del número de inspecciones por semana

Inspecciones por semana	Reparaciones correctivas	Reparaciones preventivas
0	40	0
1	25	42
2	16	48
3	8	54
6	2	60

b) Tabla de evaluación del costo total

INSPECCION		REPARACIONES CORRECTIVAS		REPARACIONES PREVENTIVAS		COSTO TOTAL
Numero	Costo	Numero	Costo	Numero	Costo	
0						

Fig 17-12

2. Una compañía posee una máquina cuyo precio es de \$ 30 000. El costo anual de mantenimiento es una progresión aritmética, con valor inicial de \$ 5 000 y aumento anual de \$ 3 000 (el segundo año este costo es de \$ 8 000, el tercero es de \$ 11 000 y así sucesivamente). ¿Después de cuánto tiempo deberá reemplazarse la máquina?

## BIBLIOGRAFIA

1. Clements, R. et D. Parkes. *Entretien et travaux neufs*, Paris, Entreprise moderne d'édition, 1966.
2. Enrick, N.L., *Contrôle de qualité et habilité dans l'entreprise industrielle*, Paris, Eyrolles/Éditions d'Organisation, 1963.
3. H.E.C., *Production I*, Montréal, 1976.
4. Institut national de la productivité et du développement industriel, *Organisation de l'entretien*, Québec.
5. Petersen, D., *Techniques of Safety Management*, New York, McGraw-Hill, 2<sup>a</sup> ed. 1978.
6. Sward, K., *L'entretien de l'équipement d'une entreprise*, Paris, Éditions d'organisation, 1967.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS PARA EJECUTIVOS Y DIRECTIVOS

- 1995 -

**TECNICAS DE PLANEACION Y CONTROL DE LA PRODUCCION**

DEL 9 AL 13 DE ENERO

**2. ADMINISTRACION DE PROYECTOS**

**M. EN I. RUBEN TELLEZ SANCHEZ**

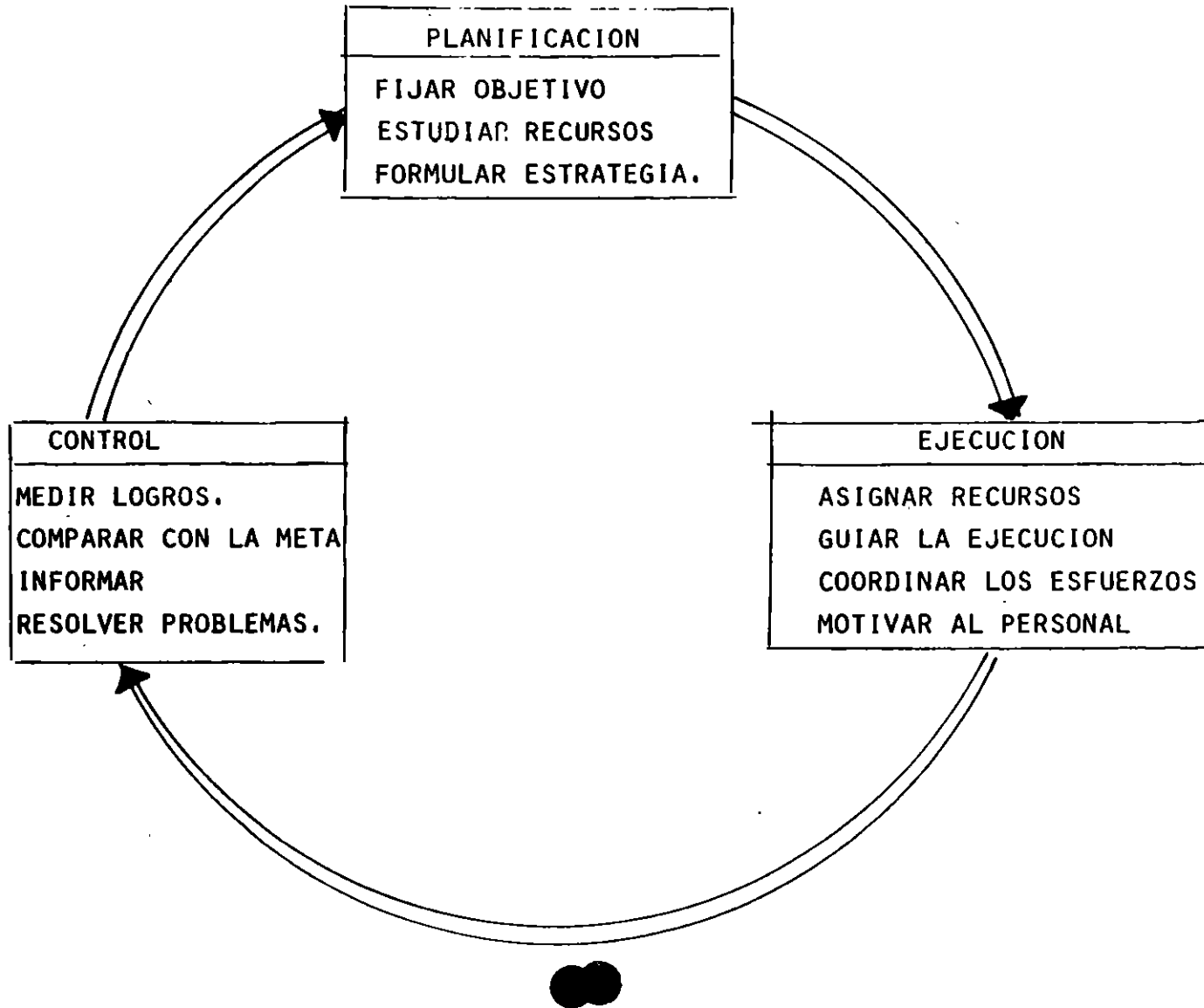
**PALACIO DE MINERIA**

**1995**

### ANALISIS DE LA CAPACIDAD DE IMPLEMENTACION

1. ¿Hay apoyo del alto nivel?. Apoyo significa presupuesto, asesoría, información, protección contra interferencia política, etc. ¿Este alto nivel es estable? ¿Cuándo cambia? ¿Cambiará antes de determinar el proyecto?
2. ¿Hay individualidades que pueden actuar como Jefe de Proyecto y personas claves en el equipo?. Si no la hay ¿puede obtenerse por reclutamiento y entrenamiento?
3. ¿Hay una unidad organizativa asignada a la función con autoridad y responsabilidad asociada para ejecutar el proyecto?
4. ¿La unidad de implementación es capaz de desarrollar un plan operativo?
5. ¿Puede la unidad de implementación proveer salarios adecuados, promociones, reconocimientos tanto como obtener más personal para el proyecto?  
¿Este motivado y recompensado por tal servicio?. Si no ¿qué provisión se ha hecho o puede hacerse para vencer esta dificultad?
6. ¿Hay suficiente espacio para trabajar, facilidades de transporte, comunicación y suministro? ¿Hay personal de soporte para esta tarea?  
¿Hay seguridad de que la calidad, cantidad y el momento de estos recursos será adecuado?. Si no ¿qué acciones deberán tomarse?
7. ¿La dirección financiera es adecuada para proveer estimados realistas de las necesidades financieras? ¿Controles razonables para no excesivos?. ¿Se auditan el uso de fondos?
8. ¿Hay procedimientos responsables de compra?
9. ¿Hay adecuado flujo de datos vinculados a:
  - el sistema externo que se trata de influir,
  - los productos del proyecto están produciendo,
  - los insumos del proyecto están siendo utilizados,
  - el cambio en los indicadores para los supuestos básicos hechos por el plan proyectados?
10. ¿La agencia de implementación alienta al equipo de trabajo?. ¿Hay factores que impiden la necesaria coordinación?. (Ejemplo: personalidad, culturales, sociales, religiosos, tribiales, ideológicos, regionales, etc.)

EL CICLO DE LA DIRECCION DE PROYECTOS



FASES DEL CICLO ADMINISTRATIVO.

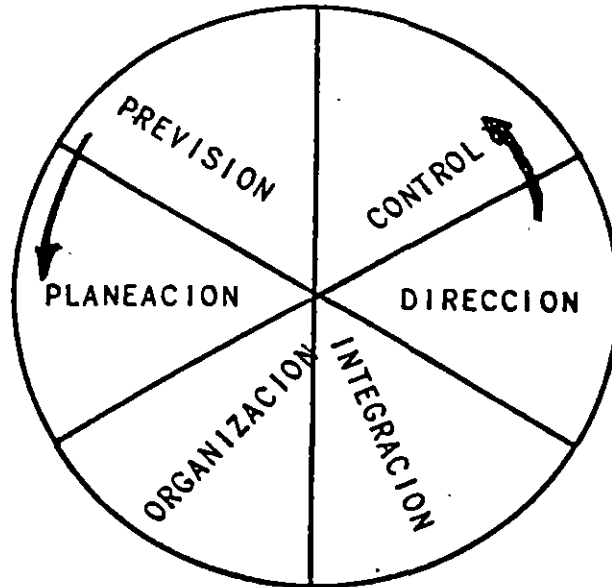
FASE MECANICA

ESTRUCTURACION

Pronósticos  
Propósitos  
Investigación  
Alternativas

Objetivos  
Políticas  
Programas  
Presupuestos  
Estrategias

Estructuras  
Funciones  
Jerarquías  
Puestos  
Equipos de trabajo  
Procedimientos  
Manuales



FASE DINAMICA

APLICACION

Interpretación  
Operación  
Instalación  
Información  
Estándares  
Medición

Comunicar  
Ejercer la autoridad  
Delegar  
Supervisar  
Motivar

Reclutar  
Seleccionar  
Inducir  
Adiestrar  
Capacitar  
Desarrollar

**Fase Mecánica o de Planteamientos Teóricos.**

1. Previsión - ¿Qué puede hacerse?
2. Planeación - ¿Qué va a hacerse?
3. Organización - ¿Cómo se va a hacer?  
¿Con qué se va a hacer?  
¿Con quién? (puestos)

**Fase Dinámica o de Aplicación Práctica.**

4. Integración - ¿Quién y con qué se va a hacer?



## 1. EL PROCESO CONSTRUCTIVO

Si se considera al proceso constructivo como un sistema, podrá representársele esquemáticamente en la siguiente forma:

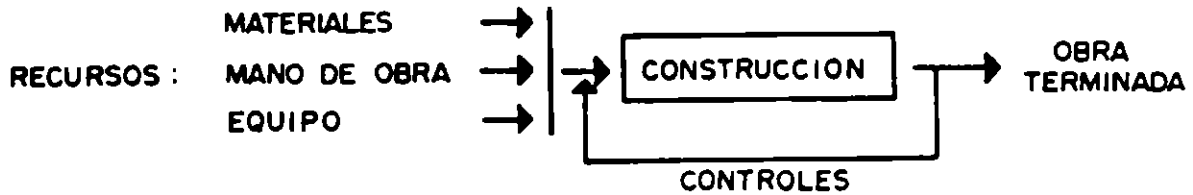


FIG 1

Para lograr un buen producto terminado, en calidad, en precio, y a tiempo, será necesario que el constructor ponga en juego toda su experiencia, conocimientos e inventiva, para poder optimizar el uso de los recursos disponibles y minimizar las desviaciones que vayan ocurriendo a lo largo de la obra con relación a lo previsto.

## 2. PLANEACION

En forma convencional, puede definirse la planeación de las obras como la etapa en donde el constructor prevé lo que acontecerá en el campo.

En esta etapa se definirán los procedimientos de construcción a seguir, los recursos con que se contará para realizar los trabajos y los rendimientos que de ellos se esperan.

De lo anterior se desprende que mientras mejor sea la calidad de la planeación, menos problemas e imprevistos se tendrán en la obra, y esta calidad dependerá del conocimiento del proyecto (alcances de las especificaciones, cubicaciones, etc...) y de la información, tanto de los recursos disponibles (materiales, mano de obra y equipo) como del lugar mismo donde se realizará la construcción (servicios existentes, clima, topografía, accesos, etc...).

El resultado de lo planeado en términos de dinero, lo constituye el presupuesto; el programa también lo es, pero en términos de tiempo. La interrelación o dependencia que existe entre planeación-programa-presupuesto, podría representarse como sigue:

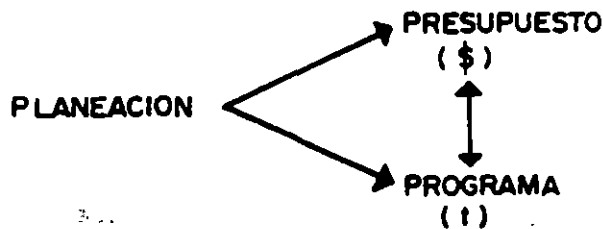


FIG. 2

Cabe aclarar que el proceso de planeación es iterativo, ya que cuando el costo o el tiempo de realización correspondiente a una determinada planeación, no son del todo satisfactorios, será necesario replanear la obra las veces que sea necesario hasta llegar a un resultado aceptable.

### 3. CONTROL

Aunque existen varias acepciones del término control, se entenderá en adelante como el detectar las desviaciones entre lo que se pensaba que iba a suceder y lo que realmente sucede en la obra.

Tradicionalmente existen tres tipos de control: control de calidad, control de costo y control de avance; aunque en realidad existen otros controles, como el financiero, el de personal, etc... Habrá tantos controles como comparaciones se hagan.

Para que un control se califique como "bueno", deberá ser completo, veraz y oportuno. Con estas tres cualidades del control, será posible tener una visión realista de las cosas, y se facilitará tomar acciones correctivas apropiadas.

Como para corregir las desviaciones será necesario replanear las actividades, el proceso constructivo puede quedar expresado de la siguiente manera:

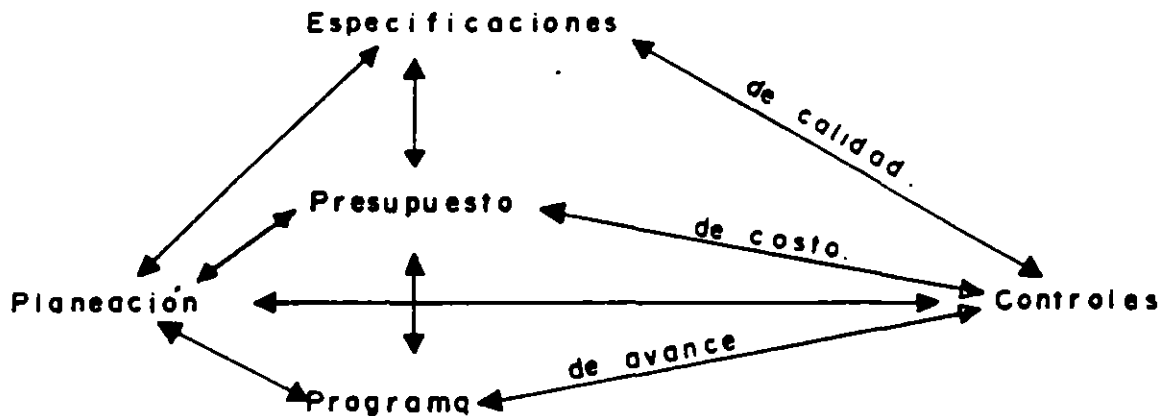


FIG . 3

## 4. EL METODO DE LA RUTA CRITICA

### 4.1 INTRODUCCION

En ocasiones se ha confundido al método de la ruta crítica o CPM (Critical Path Method) con el método PERT (Program Evaluation Research Task), porque ambos métodos de programación utilizan redes de actividades y por haber sido desarrollados prácticamente en la misma época. Sin embargo, tienen una diferencia fundamental que los hace aplicables a problemas muy distintos.

La ruta crítica es un método determinista (define una duración específica para cada actividad) y su aplicación es sumamente útil en la planeación y control de obras, siempre y cuando dicha aplicación sea dinámica y su uso sea sencillo y práctico con los recursos de que se disponga.

El PERT es un método probabilista (define duraciones medias, optimistas y pesimistas para cada actividad) y se usa en la elaboración de programas de ciertos proyectos sumamente complejos e inciertos, en los que se requiere manejar datos probabilísticos, como fue el caso del proyecto Polaris o del proyecto Apolo, en donde hubo que programar actividades que requerían de elementos que aún no se conocían y cuya duración era imposible de definir en forma determinística. Su aplicación a la construcción resulta poco recomendable, no sólo por la mayor complejidad de su cálculo, sino por el volumen de información que requiere.

Por las razones expuestas, y como estas notas están dirigidas a constructores, en adelante sólo se hablará del CPM.

Aunque en ocasiones el tamaño y la complejidad de algunos proyectos, tales como las refinerías, requieren para su aplicación del uso de una computadora, en la mayoría de las obras es posible prescindir de ella. Por ello y porque es necesario dominar la mecánica del método para sacar

provecho de él, se enfocará su descripción y su aplicación en forma manual, sin utilizar la computadora en absoluto.

Para su estudio, el método se dividirá en tres fases o etapas:

La primera se ocupa de la elaboración de la red de actividades, o sea, la representación gráfica de las secuencias definidas en la etapa de planeación.

La segunda calcula el programa de obra, definiendo las fechas de inicio y terminación de cada actividad, con sus distintos tipos de holguras y su representación gráfica. En esta etapa se incluye la reasignación de recursos y la determinación de los programas colaterales de obra, tales como de equipo, de personal, etc...

La tercera estudia la compresión de la red y el cálculo de la curva tiempo-costos mínimo.

#### 4.2 PRIMERA FASE CONSTRUCCION DE LA RED DE ACTIVIDADES

La red de actividades es la representación gráfica de la secuencia en que se desarrollarán las actividades en la obra. Para su elaboración se usan las notaciones de las flechas y la de los nodos. Ambas suponen las siguientes hipótesis:

- a) Que las actividades no se traslapen. Para poder iniciar alguna actividad, deben terminarse completamente todas las actividades que le preceden.
- b) Las actividades son independientes en cuanto a su realización, y sólo tienen relación entre sí en cuanto a su secuencia de ejecución.

La notación de las flechas fue la primera en usarse, y aunque en la práctica se le considera obsoleta, todavía es usada en la actualidad por programadores de computadora o por ciertos "consultores en ruta crítica". Los primeros la usan porque les facilita su trabajo, y los segundos, porque dicha notación implica varios problemas que hacen difícil el uso del método en obra, lo que hace necesaria su presencia y justifica su contratación.

La notación de nodos, por su sencillez y porque elimina los problemas que se presentan en la otra notación, es la más usada en la actualidad.

#### 4.2.1 Comparación de las dos notaciones

Con objeto de comparar las dos notaciones en forma clara, se escogió un problema específico muy sencillo, consistente en el tendido de una tubería en un tramo de 240m de largo, cuya excavación tiene 1 m<sup>2</sup> de sección:

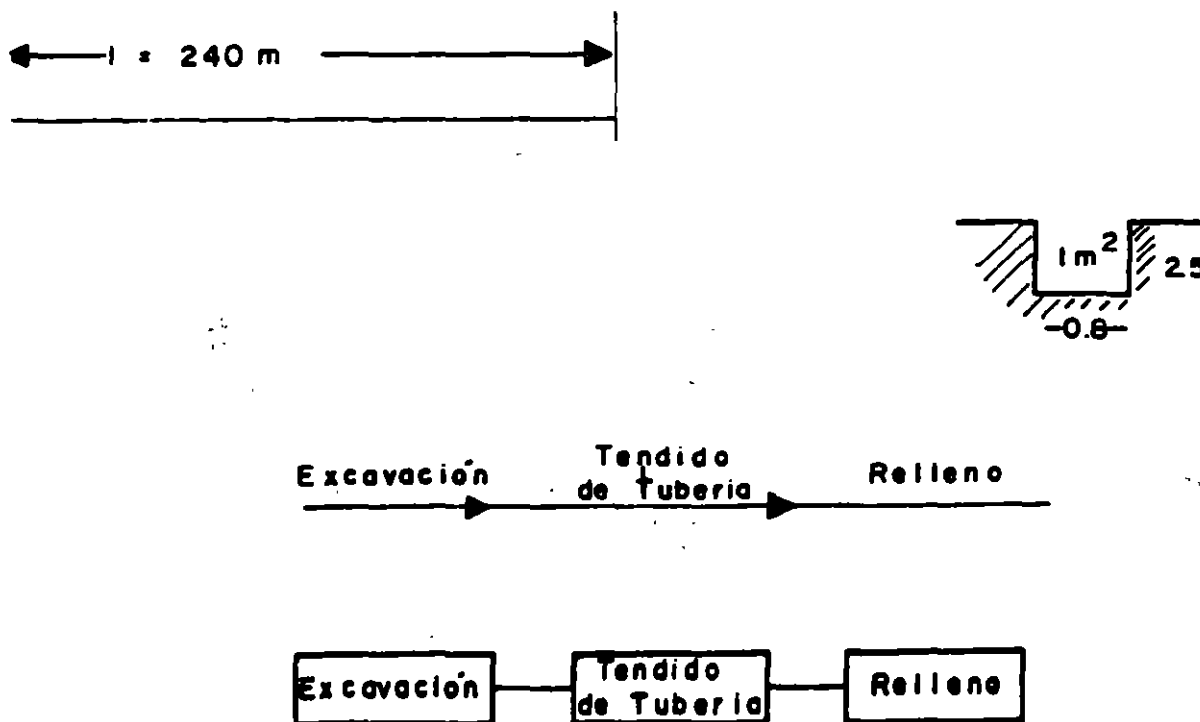


FIG. 4

Si se piensa que se debe empezar a colocar la tubería cuando esté terminada la mitad de la excavación, como por la hipótesis no se pueden traslapar las actividades, habrá necesidad de dividir la longitud total en dos partes, y si llamamos a la primera parte Zona A y a la segunda parte Zona B, la red de actividades quedará como sigue para cada notación:

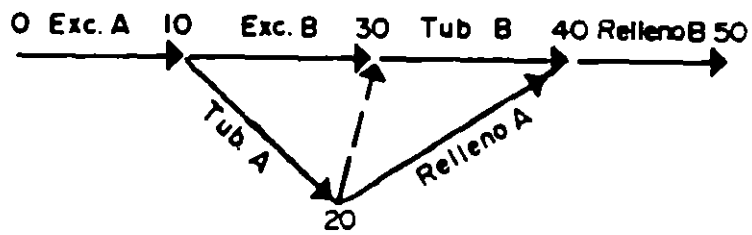


FIG. 5

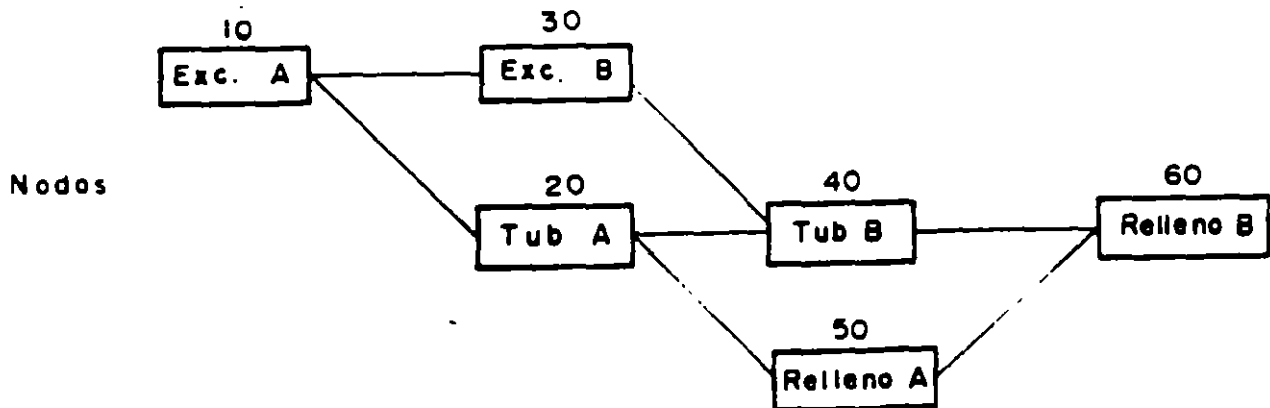


FIG. 6

Si al revisar la red, se decide o se descubre que es necesario agregar la actividad "suministro de tubería" antes del tendido de la misma, y únicamente se dibuja esta actividad en las redes originales, se tendrá lo siguiente:

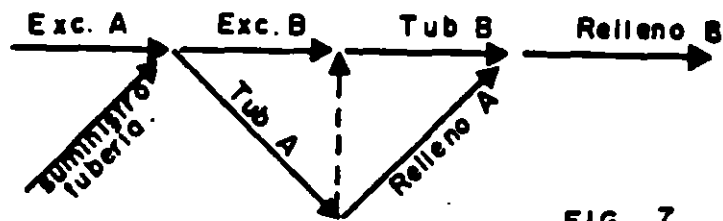


FIG. 7

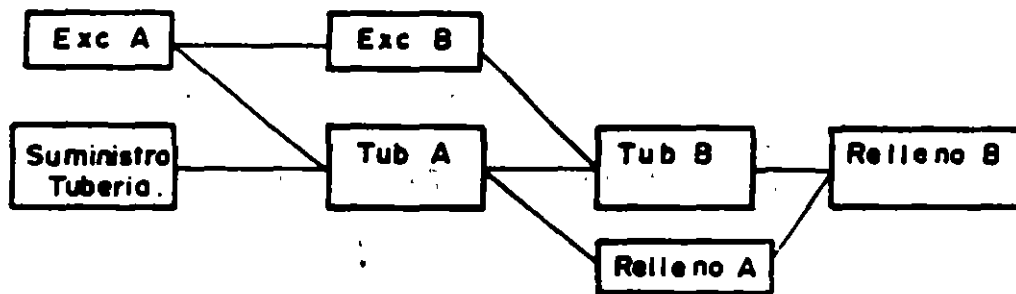


FIG. 8

En el primer caso se ve que la red no representa lo que se quiere, ya que indica que la excavación en la zona B no se podrá iniciar mientras no esté la tubería en la obra, cosa absurda, ya que no existe ninguna relación entre el suministro de la tubería y la excavación.



En resumen, puede afirmarse que los problemas que se presentan cuando se usa la notación de las flechas, se derivan de la presencia de las actividades ficticias, y que éstas no existen en la notación de nodos. Por lo anterior, en adelante ya sólo se usará la notación de nodos.

#### 4.3 SEGUNDA FASE: CALCULO Y REPRESENTACION DEL PROGRAMA DE OBRA

Para el cálculo manual de la red, será necesario usar la convención siguiente:

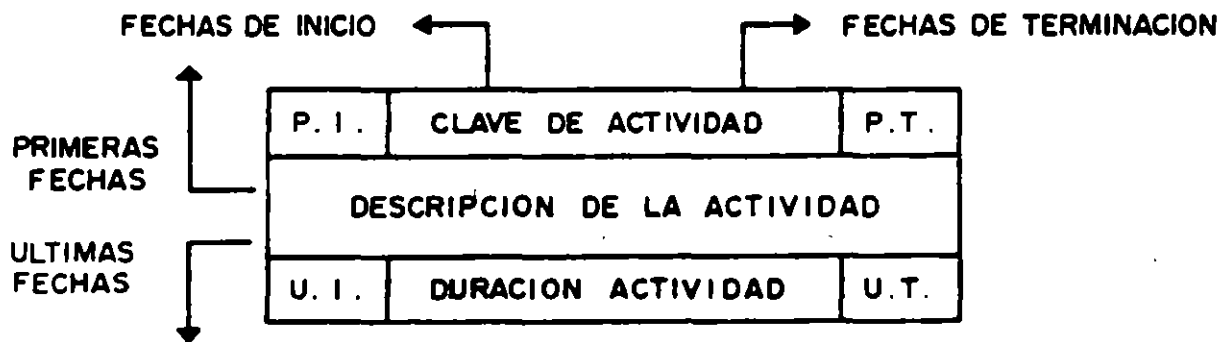


FIG. 14

- P. I. primera fecha de inicio
- P. T. primera fecha de terminación
- U. I. última fecha de inicio
- U. T. última fecha de terminación

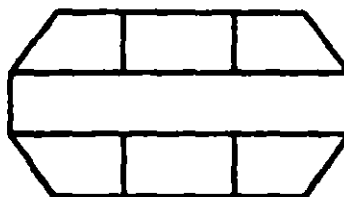
Es recomendable distinguir fácilmente en la red, las actividades que sean suministros, para lo cual éstas pueden representarse de la siguiente manera:

ACTIVIDAD DE CONSTRUCCION

P. I.	II ACT.	P. T.
DESCRIPCION		
U. I.	DURAC.	U. T.

FIG. 15

SUMINISTRO



Si una actividad específica B está precedida por n actividades A<sub>i</sub> y a ésta le siguen m actividades C<sub>i</sub> (fig 16), el cálculo numérico de la red se realizará según las siguientes fórmulas:

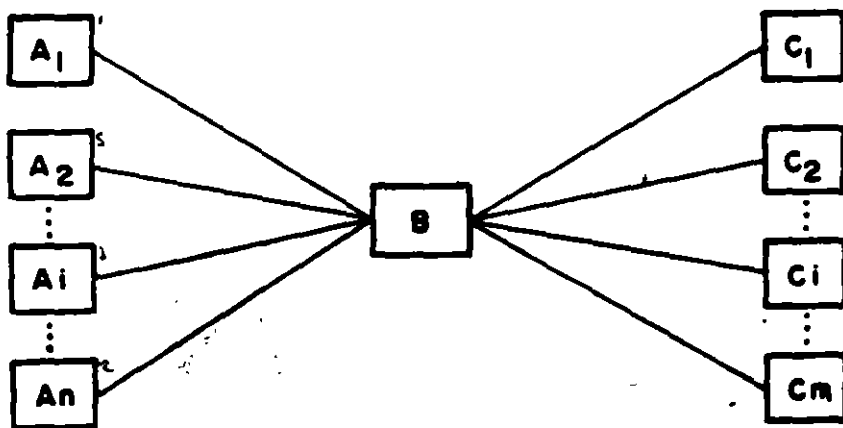


FIG. 16

$$\begin{aligned}
 (PI)_B &= \text{mayor } (PT)_{A_i} \\
 (PT)_B &= (PI)_B + (\text{duración})_B \\
 (UI)_B &= (UT)_B - (\text{duración})_B \\
 (UT)_B &= \text{menor } (UI)_{C_i}
 \end{aligned}$$

Las duraciones de las actividades deberán calcularse con base en los recursos con que se contará en la obra y con los rendimientos que de ellos se esperan.

Para el ejemplo del tendido de tubería que se ha venido desarrollando, las duraciones calculadas para cada actividad son las siguientes:

### ACTIVIDADES

#### 1 y 3 Excavación por tramo de 120m

(A - B ó B - C)

Recurso: 1 oficial + 4 peones = 1 cuadrilla

Rendimiento: 4 peones x 5 m<sup>3</sup>/día x peón = 20 m<sup>3</sup>/día

Duración: 120 m<sup>3</sup>/20 m<sup>3</sup>/día = 6 días

Costo: (\$225 + 4 x \$150)/20 m<sup>3</sup> = \$41.25/m<sup>3</sup>

### ACTIVIDADES

#### 4 y 5 Colocación tubería por tramo de 120m

(A - B ó B - C)

Recurso: 1 oficial + 1 peón = 1 pareja

Rendimiento: (40ML/pareja x día) x 1 pareja = 40ML/día

Duración: 120ML/40 ML/día = 3 días

Costo: (\$225 + \$150)/40 ML = \$9.40/m

ACTIVIDADES6 y 7 Relleno por tramo de 120m

(A-B ó B-C)

Recurso: 1 oficial + 4 peones = cuadrilla

Rendimiento: 4 peones x 15 m<sup>3</sup>/día x peón = 60 m<sup>3</sup>/díaDuración: 120 m<sup>3</sup>/60 m<sup>3</sup>/día = 2 díasCosto: (\$225 + 4 \$150) = \$14.60/m<sup>3</sup>

El cálculo de la red se hará con estas duraciones a partir de las actividades que no tienen ningún precedente, obteniéndose las primeras fechas de inicio y terminación.

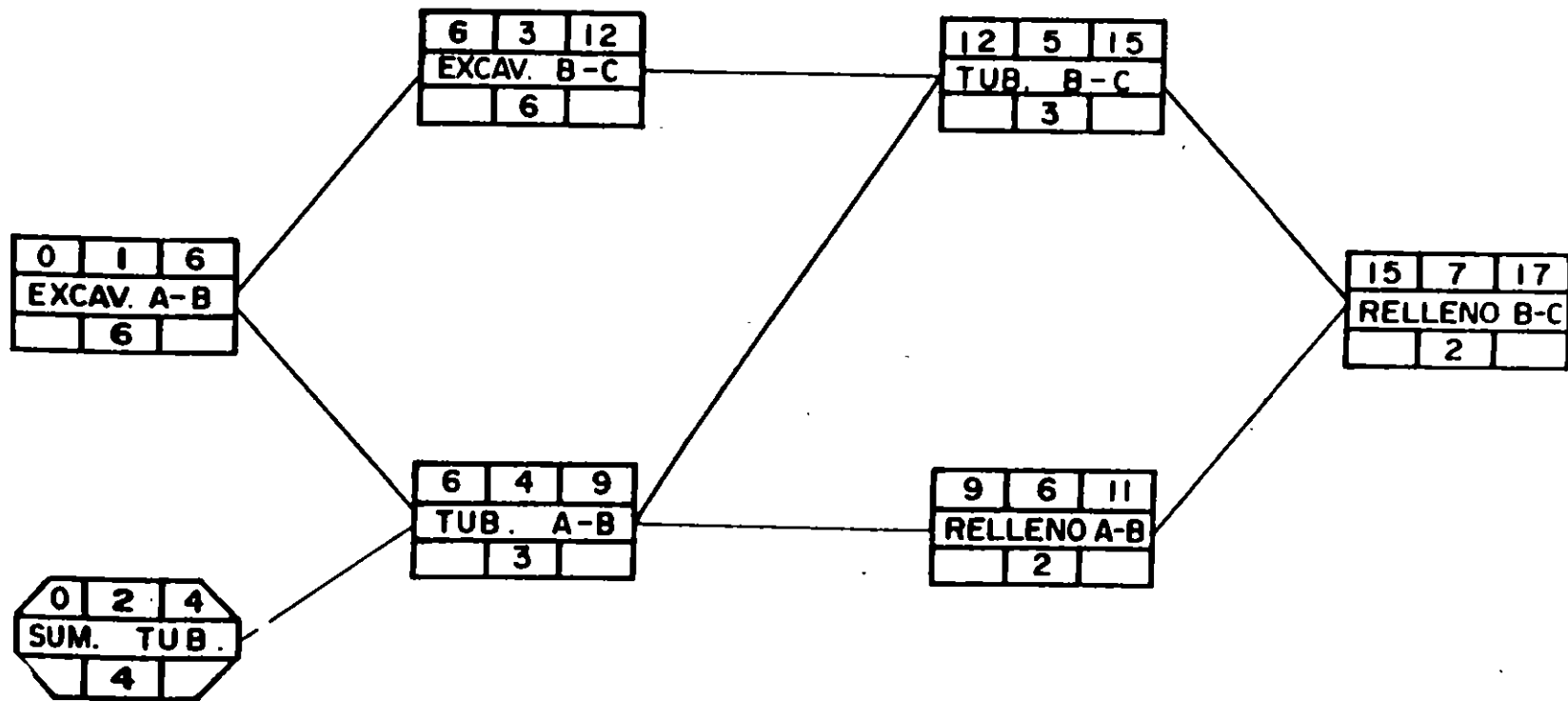


FIG. 17

A continuación se calcularán las últimas fechas de inicio y terminación, partiendo de la última actividad de la red, para lo cual se hará coincidir su primera y su última fecha de terminación (el proceso es opuesto al del cálculo de las primeras fechas)

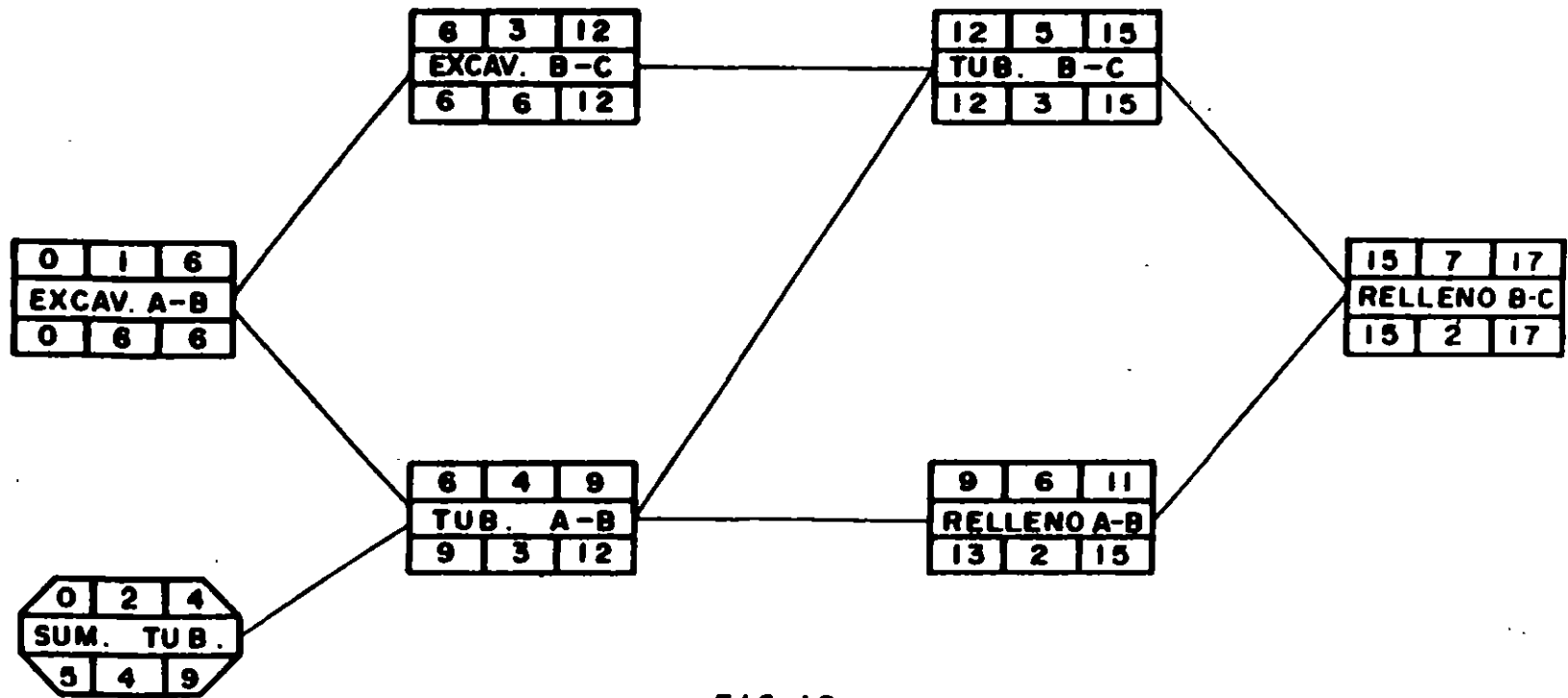


FIG. 18

Por definición, la holgura total de una actividad es el lapso de tiempo que puede posponerse la terminación de dicha actividad, sin que se modifique la fecha de terminación de la obra; su valor será la diferencia entre su primera y su última fecha de terminación.

Al analizar la actividad 2 de la figura 18 (suministro de tubería) se podrá observar que de los días que tiene de holgura total:  $(UT = 9) - (PT = 4) = 5$  días, sólo dos días puede posponerse su terminación sin afectar a ninguna otra actividad. A partir de allí, aunque se puede seguir posponiendo dicha terminación sin modificar la fecha de terminación de la obra, sí se modificarán los inicios de algunas actividades subsecuentes.

De lo anterior se deduce que la holgura total de una actividad está integrada por dos partes: la holgura libre, que es el lapso de tiempo que puede posponerse la terminación de una actividad sin modificar el inicio de ninguna otra actividad y la holgura con interferencia, que es el tiempo que puede posponerse la terminación de una actividad sin modificar la fecha de terminación de la obra, aunque sí se alteren los inicios de algunas actividades subsecuentes. Algebraicamente, lo anterior puede expresarse como:

$$(HT)_B = (HL)_B + (HI)_B$$

en donde

$(HL)_B$  : holgura libre de la actividad B

$(HI)_B$  : holgura libre con interferencia de B

Si definimos como holgura particular a la diferencia entre la  $(PI)_{Bj}$  y la  $(PT)_{Ai}$  (siempre será entre dos actividades específicas relacionadas directamente entre sí), habremos descrito el significado de los cuatro tipos de holgura que maneja el CPM.

Por razones de facilidad en el manejo de la red, se ha decidido escribir sobre la liga de dos actividades, el valor de su holgura particular. Cuando ese valor es igual a cero, habrá que identificar ese caso con una doble raya, tal como aparece a continuación:

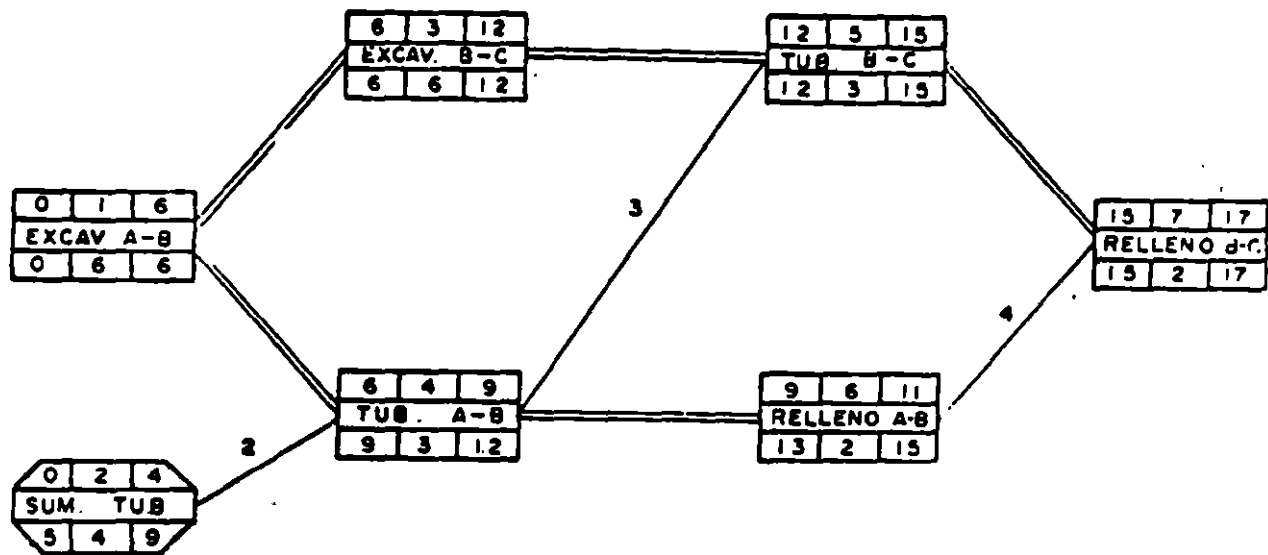


FIG. 19



Al contar con esta información, se puede calcular la holgura libre de cualquier actividad como la menor holgura particular que sale de dicha actividad:

$$(HL)_B = \text{menor } (HP)_{B-C_i}$$

Si definimos como ruta o camino crítico al conjunto de actividades que definen la fecha de terminación de una obra, será lo mismo decir, que la ruta crítica estará formada por el conjunto de actividades que no tienen holgura (actividades críticas).

Si en la red de la figura 19 identificamos una serie de actividades unidas ininterrumpidamente por doble raya (holguras particulares = 0), ésa será precisamente la ruta crítica de la red, la que deberá marcarse con triple raya.

De esta manera, la red totalmente terminada aparecerá de la siguiente forma:

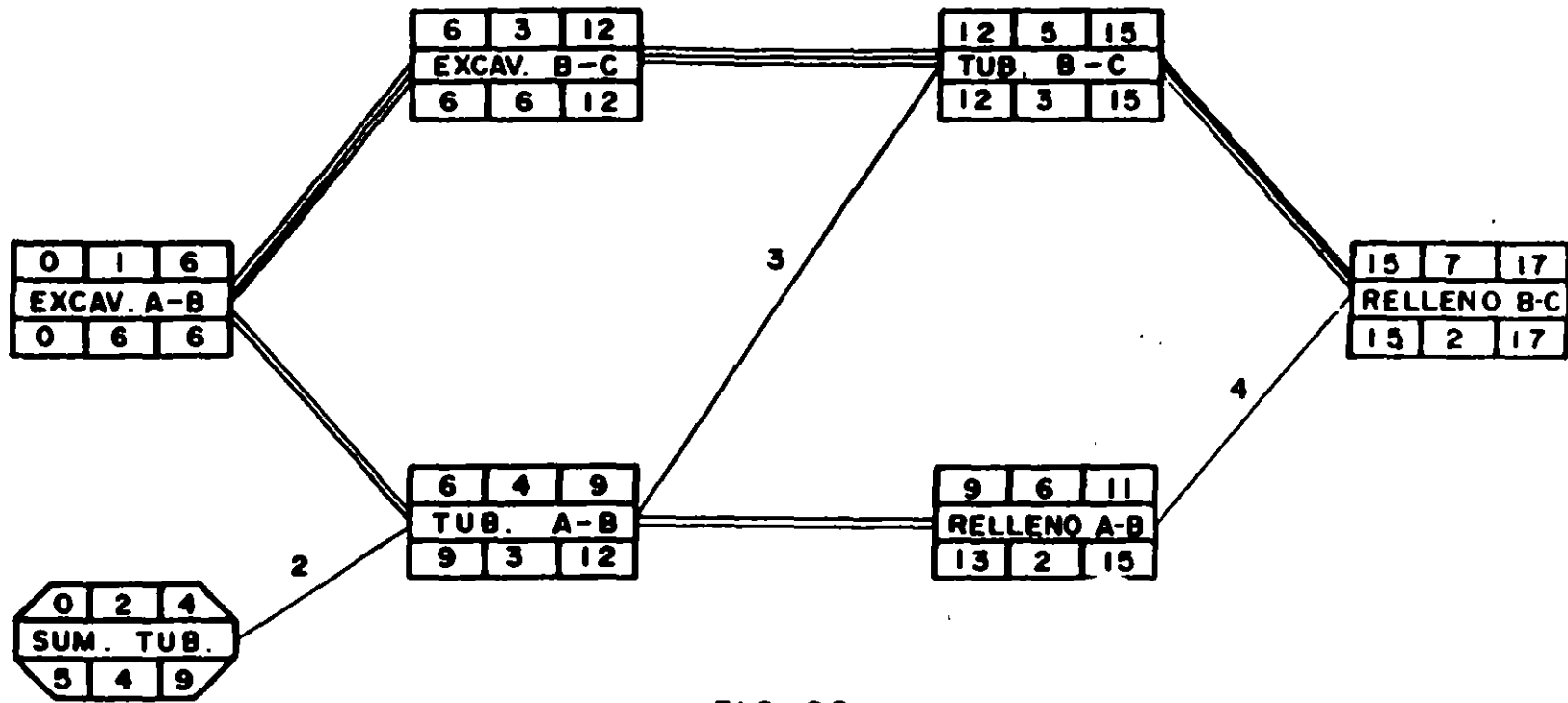


FIG. 20

Desde luego que en todas las actividades que pertenecen a la ruta crítica, la primera y última fecha de terminación coincidirán, ya que sus holguras totales necesariamente serán nulas.

Para diversas circunstancias, la representación en barras de la información que proporciona el método de la ruta crítica es sumamente útil, para lo cual se ha propuesto la siguiente convención:

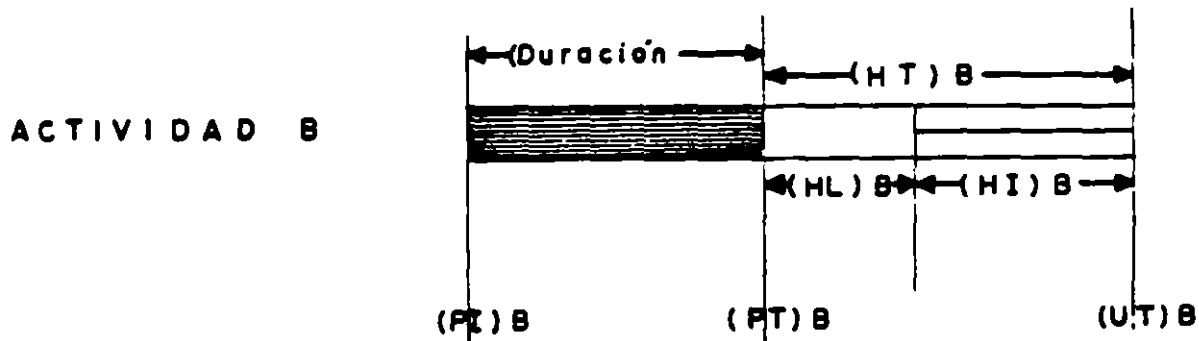


FIG. 21

Para ilustrar lo anterior, se muestra el siguiente programa de barras que corresponde a la red de la figura 20.

CLAVE	ACTIVIDAD	CANT.	UN.	1	5	6	10	11	15	16	20
1	Excavación A-B	120	m <sup>3</sup>	█							
2	Suministro Tubería	480	ML	█		█	█				
3	Excavación B-C	120	m <sup>3</sup>			█					
4	Tubería A-B	240	ML			█		█			
5	Tubería B-C	240	ML						█		
6	RELLENO A-B	120	m <sup>3</sup>					█			
7	RELLENO B-C	120	m <sup>3</sup>							█	

FIG . 2 2

Si se vacían los recursos que se piensa utilizar en la obra, en el diagrama de barras respectivo se obtendrán los programas "colaterales" de obra, tal como aparece a continuación (aunque sólo se muestra el programa de personal, en idéntica forma se obtendrían los otros programas colaterales, tales como el de equipo, de necesidades de materiales y compras, etc...)

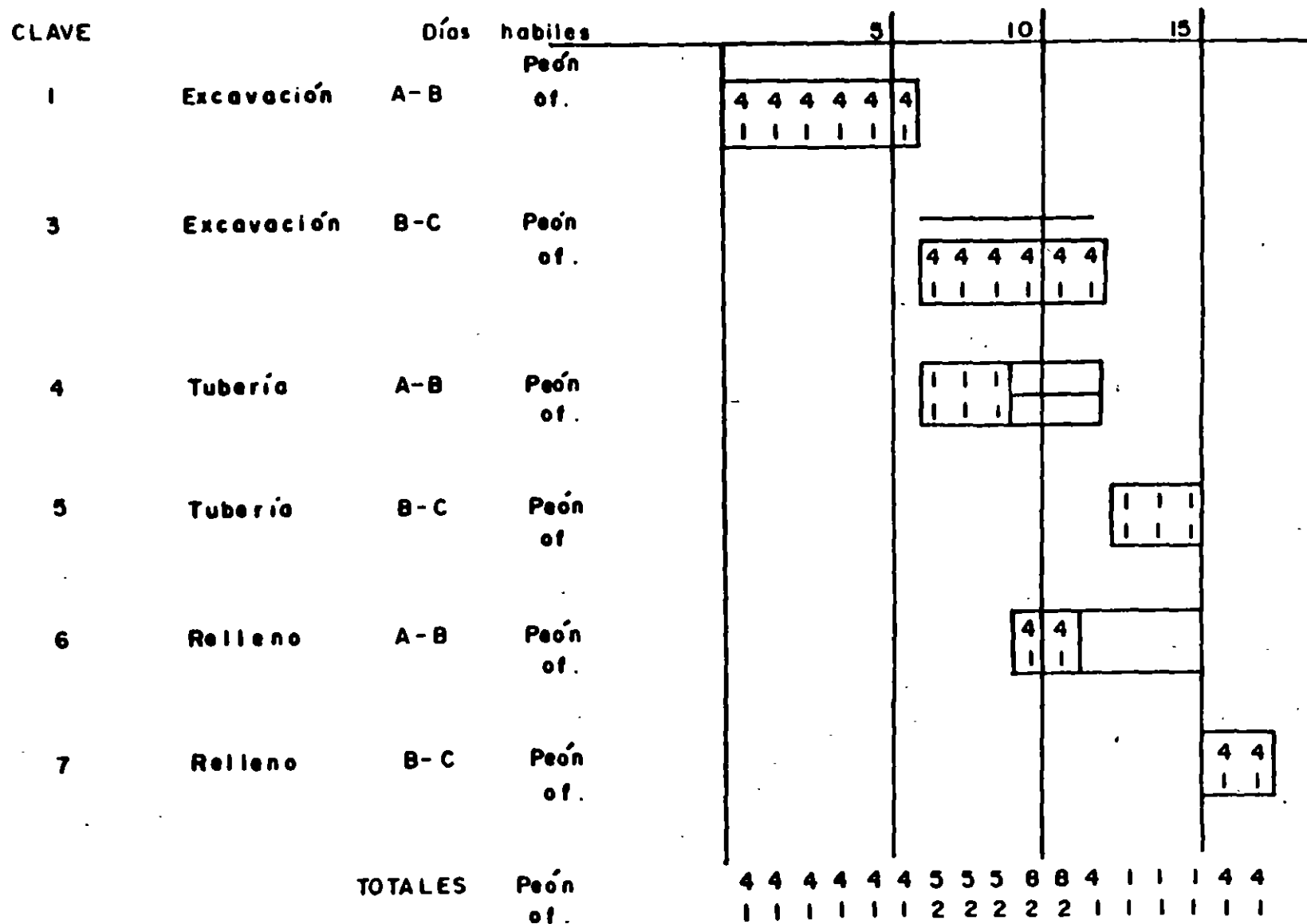


FIG. 23

Al observar los totales de la figura anterior, es fácil detectar la necesidad de redistribuir recursos para evitar problemas en la obra y minimizar los costos directos, ya que es imposible disponer de distintas cantidades de personal en determinadas fechas.

En general, puede decirse que es aconsejable eliminar los aumentos y las disminuciones frecuentes de los recursos necesarios, haciendo la distribución de dichos recursos lo más uniforme posible en el tiempo.

El conocimiento de las holguras es de gran valor y utilidad para hacer esta redistribución de recursos en una forma racional.

La red y el diagrama de barras, ya habiendo redistribuido los recursos, aparece en las figuras 24 y 25.

NUEVO PROGRAMA

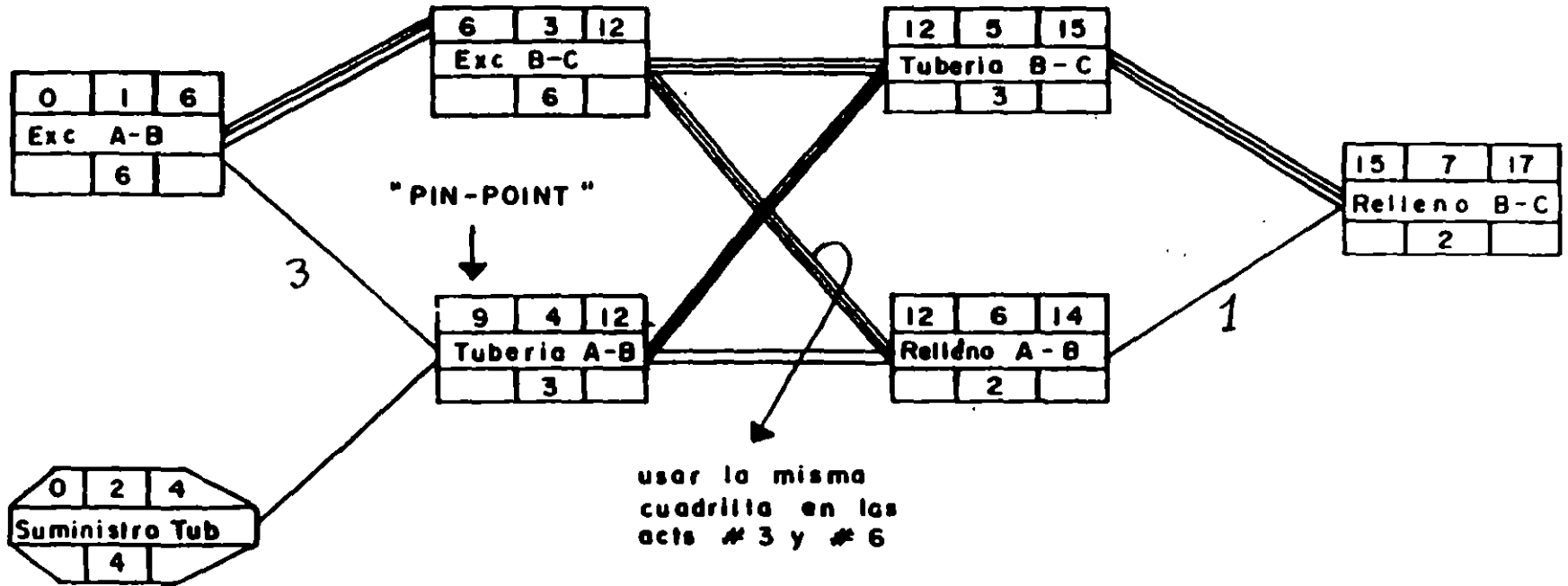
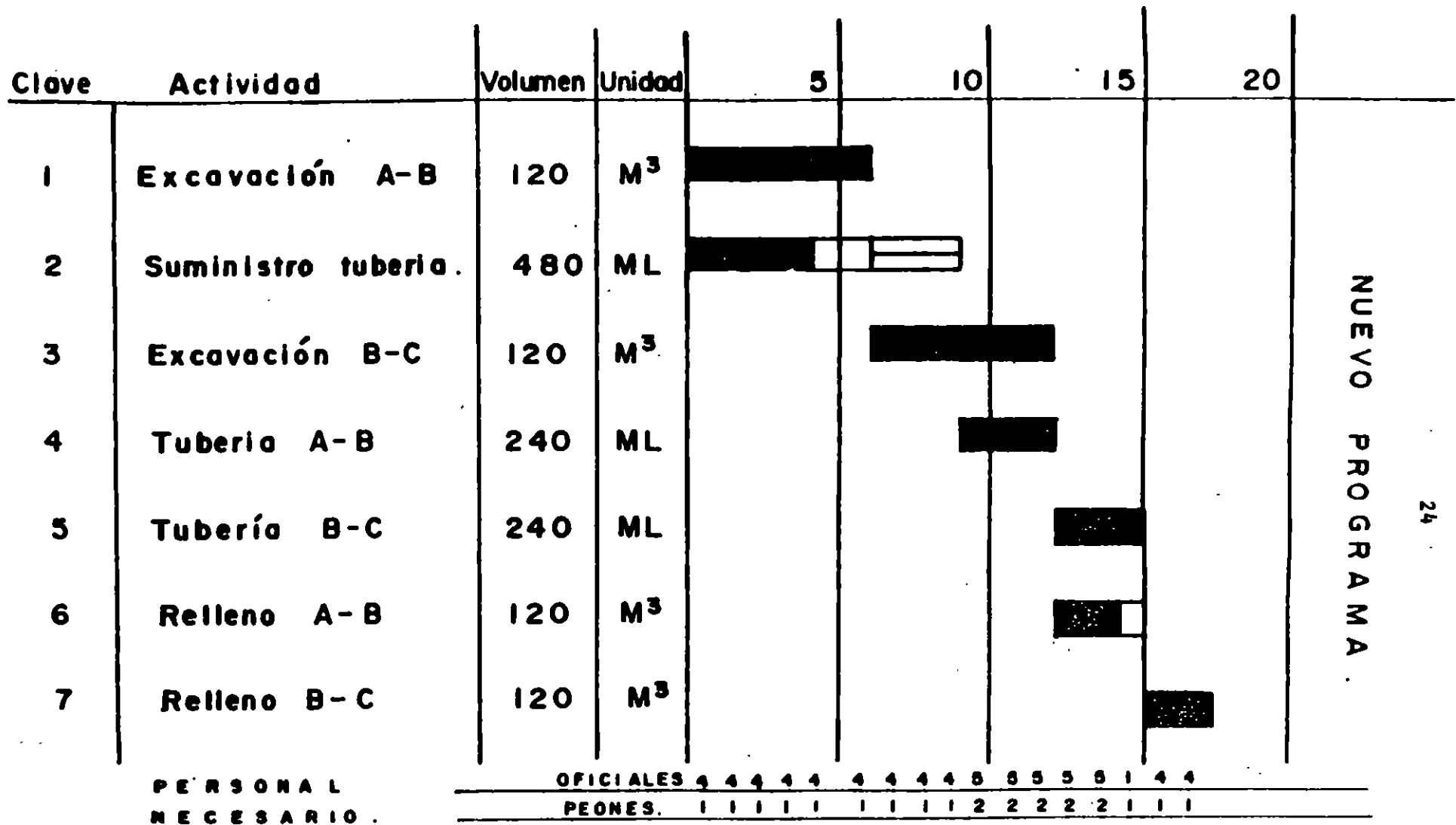


FIG. 24



NUEVO PROGRAMA

NOTA: Habría que ocupar a la cuadrilla de terracería (1 OFICIAL + 4 PEONES) en algún otro trabajo el día 15 o pensar en que en la realidad sí se traslaparán las actividades, por lo que la actividad 7 podría adelantarse 1 día.

FIG. 25



Siguiendo la misma técnica, si en vez de vaciar los recursos en el programa de barras se vacían las cantidades de obra que se piensan realizar, el monto de estimaciones por realizar, etc..., se tendrán los programas que normalmente se elaboran en el sistema conocido como "administración por objetivos", que de hecho son metas parciales muy definidas por alcanzar en períodos de tiempo determinados.

En la red de la figura 24 se introdujo el concepto que los americanos llaman "pin point" y en nuestro medio se le empieza a llamar con el anglicismo "pin-pontear". Este concepto se puede definir como el hecho de fijar arbitrariamente la fecha de inicio o terminación de una actividad específica, independientemente de las demás actividades de la red. Esta actividad sirve como origen para el cálculo del resto de la red.

En ocasiones es conveniente su uso, como podría ser el caso del ejemplo descrito anteriormente, aunque en otras puede ser delicado, ya que cuando se "pimpontean" dos o más actividades, pueden obtenerse resultados absurdos, como duraciones negativas, etc...

A veces, el desglose de actividades que se hace para superar la restricción impuesta por la hipótesis referente al traslape de actividades, origina complicaciones serias en la red; debido a esto, se ha introducido el concepto conocido como "relación principio - principio, fin - fin", con el que se supera dicha restricción.

La relación "principio - principio, fin - fin" se representa gráficamente como sigue:

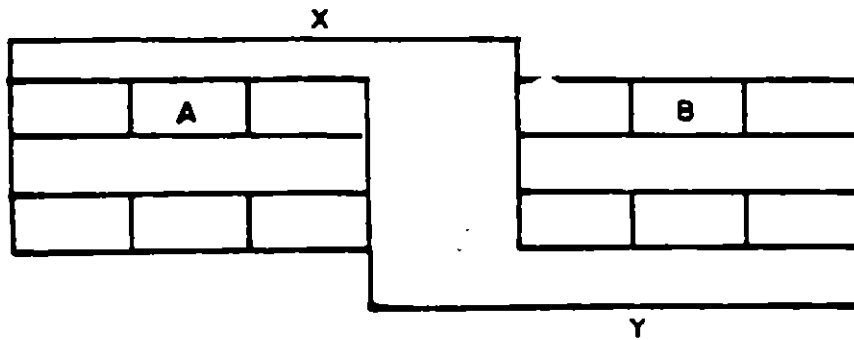


FIG. 27

Esto significa que la actividad B no puede iniciarse sino hasta después de X tiempo de iniciada la actividad A, ni tampoco terminarse antes de pasar Y tiempo de terminada la actividad A.

Para el cálculo de la red, cuando en ella existe este tipo de relación, se usarán los siguientes algoritmos:

Para obtener las primeras fechas de inicio y terminación:

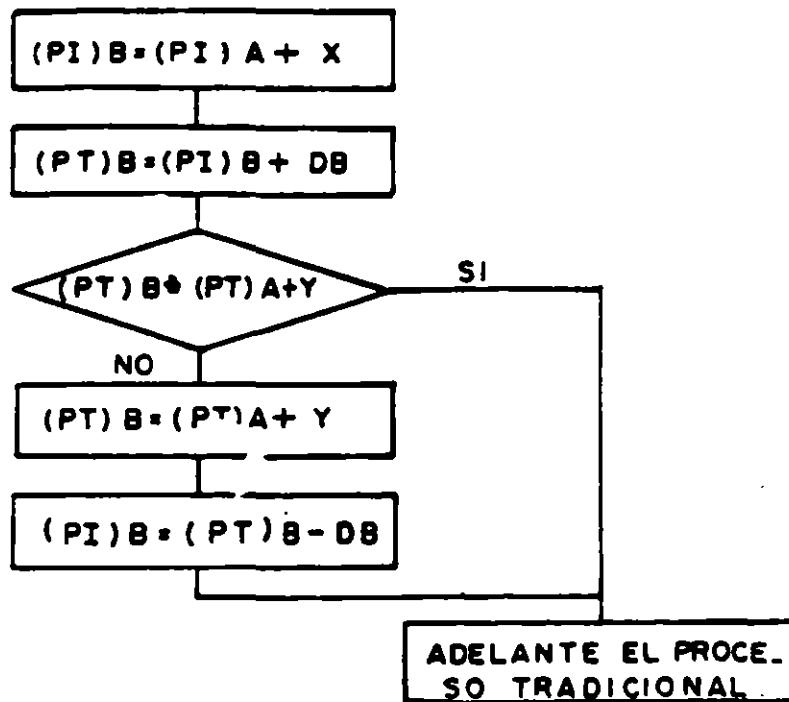


FIG . 2 B

Para obtener las últimas fechas de inicio y terminación:

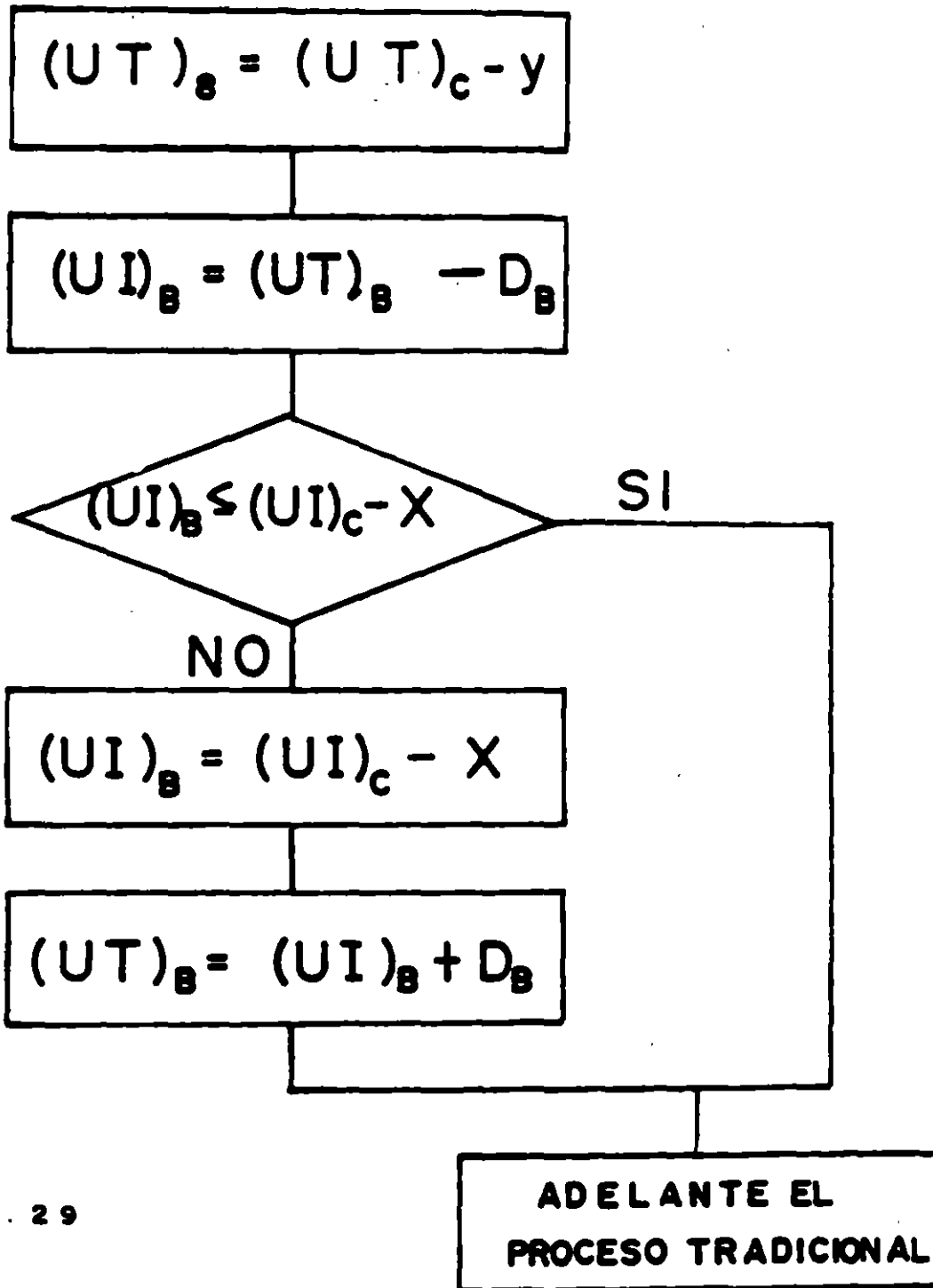


FIG. 29

De los algoritmos anteriores, es fácil detectar que existen casos en que la relación principio - principio es la que prevalece, y otros, en que la que rige es la fin - fin. Estos casos pueden representarse de la siguiente manera:

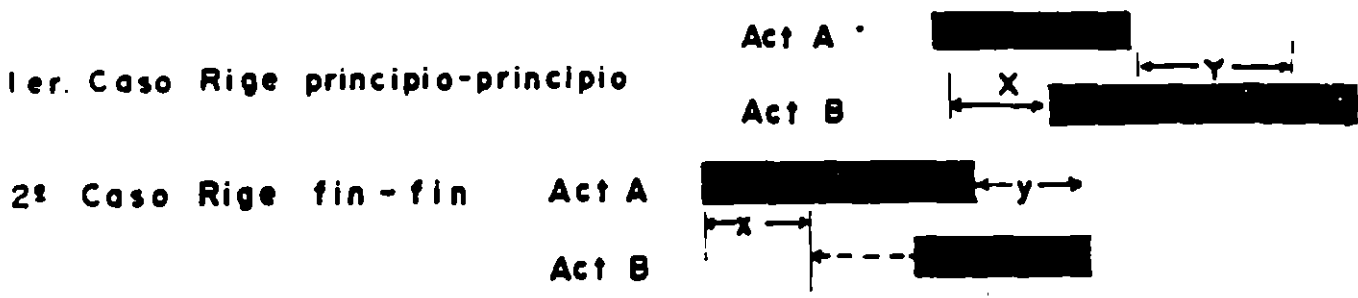


FIG. 30

La barra de la actividad B del segundo caso, tiene a su izquierda una flecha punteada. Esto significa, que si se considera conveniente aumentar la duración de la actividad B, puede hacerse hasta el límite señalado por la mencionada flecha, sin necesidad de posponer la flecha de terminación establecida.

Algunas personas se atreven a llamar "holgura invertida" a este lapso de tiempo que puede aumentar la duración de una actividad, modificando su fecha de inicio y respetando su primera fecha de terminación.

Para ilustrar lo anterior se propone el siguiente ejemplo, consistente en la construcción de una estructura de dos niveles:

La estructura se construirá a base de columnas, traveses portantes y sistema de piso prefabricado montado sobre las traveses portantes.

La red de actividades calculada según los algoritmos de las figuras 28 y 29, es la que aparece a continuación:

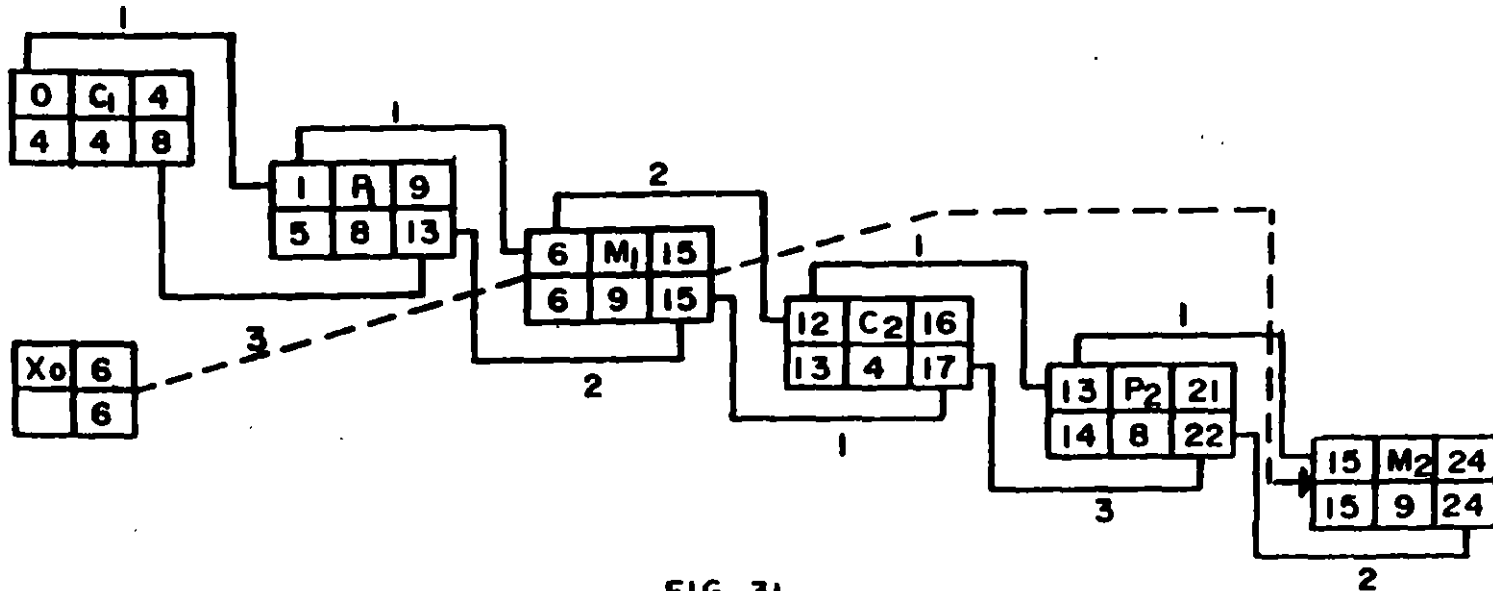


FIG. 31

en donde

C<sub>i</sub> =Columnas en el nivel i

P<sub>i</sub> =Traveses portantes en el nivel i

M<sub>i</sub> =Montaje del sistema de piso en el nivel i

La representación en barras de esta red, aparece a continuación:

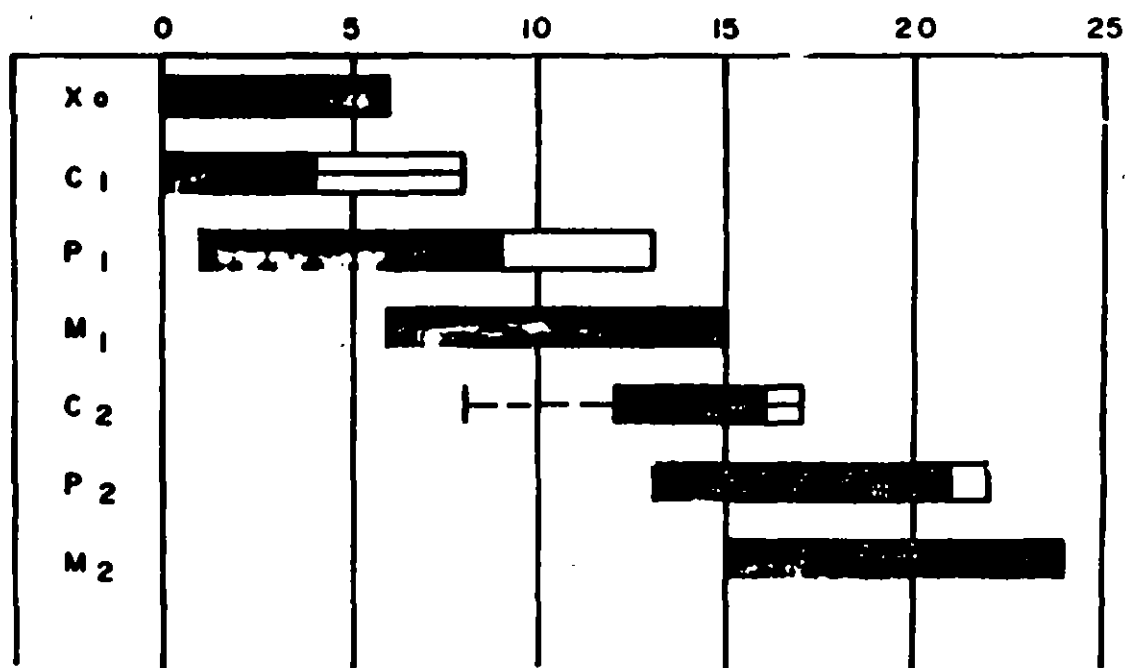


FIG 32

Desde un principio se dijo que el método de la ruta crítica deberá aplicarse en una forma dinámica, tanto en la etapa de planeación como de control. Esto significa que el programa original debidamente afinado, deberá servir como guía para la obtención de las desviaciones que vayan ocurriendo durante la ejecución de la obra, y cuando se requiera, se modificará dicho programa adecuándose a las nuevas circunstancias y a las decisiones tomadas como resultado de la replaneación de la obra.

Para ejercer el control de avance de obra, según la definición de control dada en un principio, será necesario comparar el programa vigente contra el avance reportado en una determinada fecha, y valorar las consecuencias de las desviaciones detectadas.

Esto puede lograrse si se dibuja junto a la barra correspondiente a cada actividad, otra barra que represente el trabajo desarrollado, definiendo el final que ésta tendría si se siguiera trabajando al mismo ritmo y se siguieran obteniendo los mismos rendimientos.

PRIMER CASO: Se está dentro de programa; todo O.K.

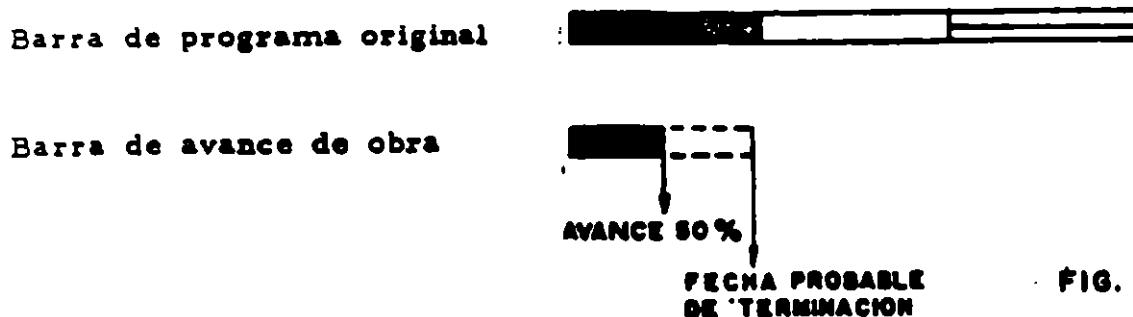
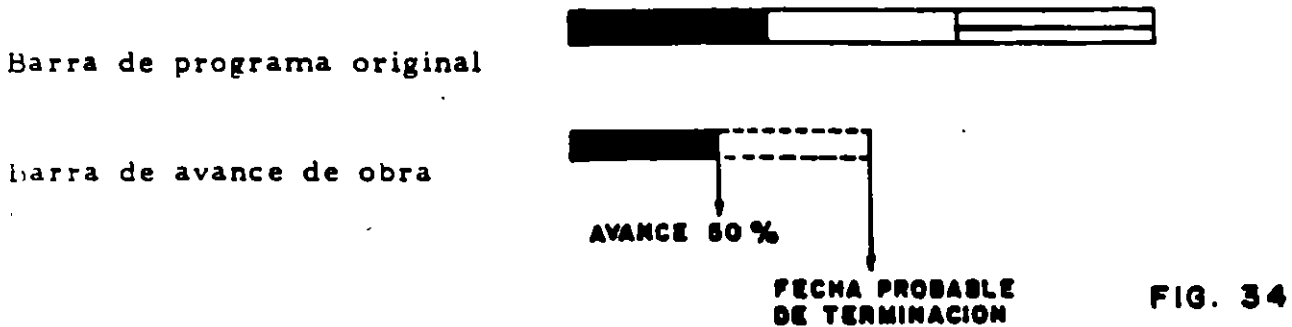


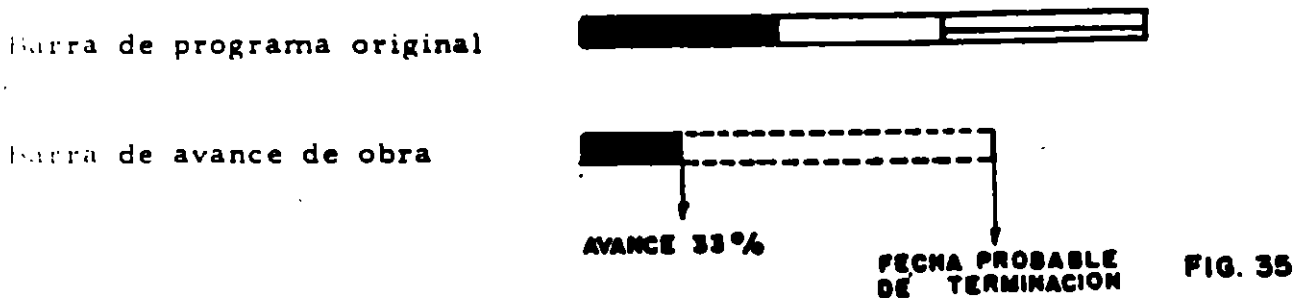
FIG. 33



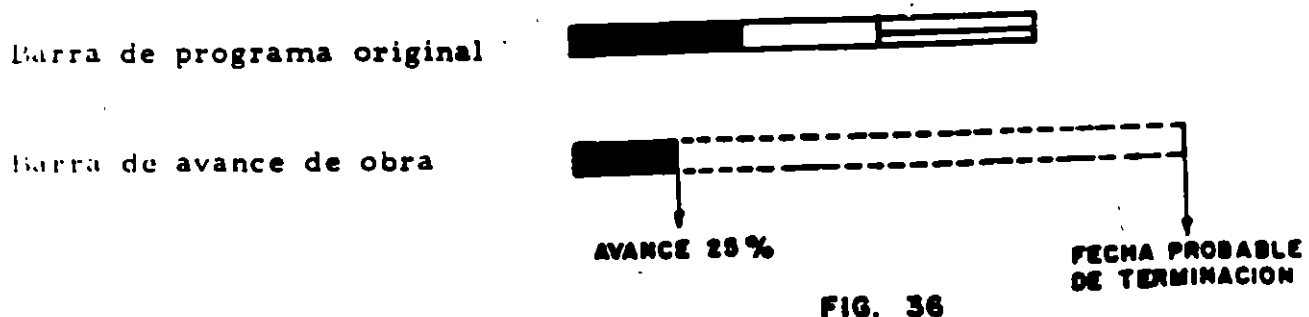
SEGUNDO CASO: La posible terminación está en la zona de holgura libre. No pasa nada, sólo disminuye la holgura de la propia actividad.



TERCER CASO: La posible terminación está en la zona de holgura con interferencia. Aunque todavía habrá posibilidad de terminar a tiempo la obra, ya se habrán usado holguras de otras actividades, y será necesario conocer si ya aparecieron nuevas actividades críticas.



CUARTO CASO: Se atrasa la terminación de la obra. Habrá que reprogramar la obra si se desea terminar en la fecha predeterminada, o comprimir la nueva red actualizada.



Habrá casos en que no pueda calcularse esta posible terminación por extrapolación de la información recibida, sino que habrá que definirla por el tipo de trabajo faltante por realizar, los problemas específicos que habrá que resolver o las nuevas fechas de suministro de los elementos requeridos para la terminación de dichas actividades.

#### 4.4 TERCERA FASE CURVA COSTO-TIEMPO MINIMO

Si se considera que los costos indirectos de una obra, son prácticamente constantes, podemos graficar la relación tiempo-costo de la siguiente manera:

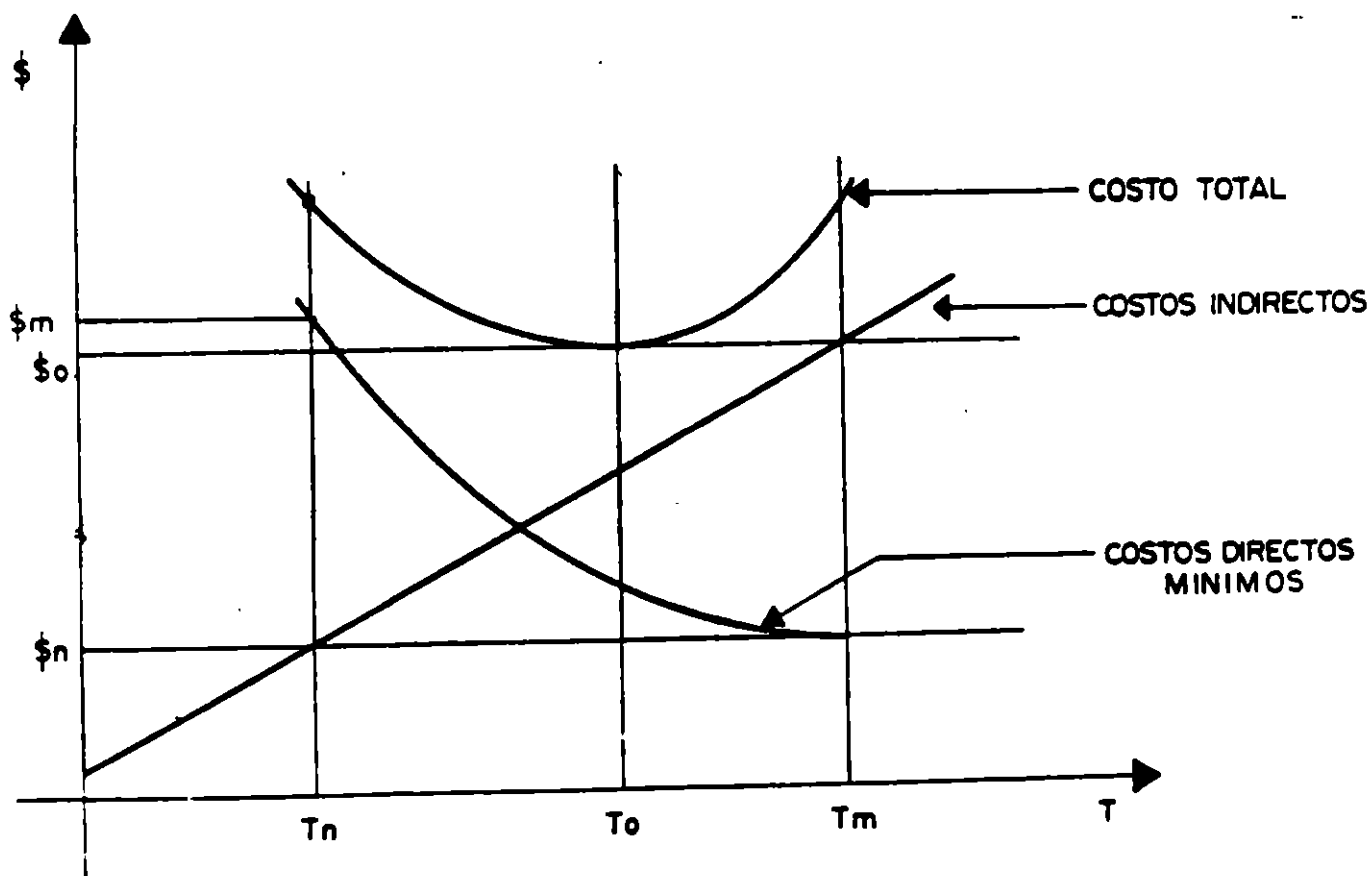


FIG. 37

en donde:

tn = (tiempo normal): tiempo de realización de la obra, en donde el costo directo es mínimo (\$) N.

tm = (tiempo mínimo): tiempo menor en que físicamente es posible realizar la obra, suponiendo que se tienen recursos ilimitados disponibles y que no interesa el importe del costo correspondiente.

to = (tiempo óptimo): tiempo de realización de la obra, en donde el costo total es mínimo: (\$) o.

La tercera fase del método de la ruta crítica, versa sobre la forma de obtener la curva tiempo-costo directo mínimo o expresando en otras palabras, cómo comprimir la red en la forma más económica.

La hipótesis que se introduce en esta etapa, consiste en suponer una variación lineal costo-tiempo para cada una de las actividades de la red, cosa que estrictamente no se cumple en la realidad.

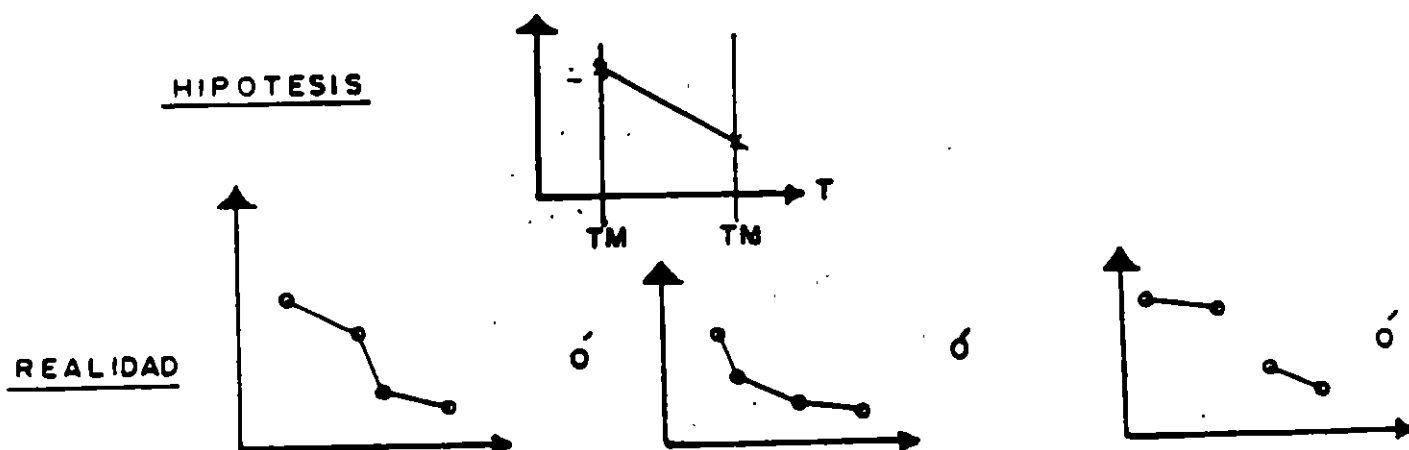


FIG . 38

El proceso de compresión de la red, es un proceso netamente iterativo y tedioso de hacer manualmente, por lo que muchas personas limitan su aplicación para los casos en que se utiliza la computadora.

Por otra parte, la experiencia ha demostrado que en la realidad el uso de la computadora en la aplicación de la tercera fase del CPM es prácticamente inútil, no sólo por las implicaciones de la hipótesis introducida (fig 38), sino por la imposibilidad de obtener la información que requiere la máquina: los  $t_n$  y  $t_m$  de cada una de las actividades de la red con sus respectivos costos.

Sin embargo, la metodología que se usa en esta etapa es muy valiosa en su aplicación manual, ya que conduce al constructor a tomas de decisiones racionales y realistas, al no perder la noción de las limitaciones que implican la hipótesis del método, ni tampoco las situaciones reales de disponibilidad de recursos en un momento dado.

La metodología para la obtención de la curva costo directo mínimo-tiempo, consiste en modificar alguna(s) actividad(es) de la red, siguiendo la secuencia que se describe a continuación:

a) Identificación de alternativas

Para lograr acortar la duración de la obra, será necesario identificar las actividades críticas cuyas duraciones puedan variarse, y que el valor de las modificaciones que se hagan coincida con la variación de la nueva fecha de terminación de la obra.

b) Selección de la alternativa más conveniente

De las alternativas identificadas, según se describe en el párrafo anterior, se debe seleccionar la más

económica. Si se cumpliera la hipótesis introducida, esta alternativa sería la que tuviera menor incremento de costo en la unidad de tiempo.

c) Determinación del acortamiento de la alternativa seleccionada

El último paso del proceso, consistirá en determinar el acortamiento de la alternativa seleccionada, y esto se hará tomando en cuenta las dos restricciones siguientes:

- El tiempo mínimo de realización de la alternativa
- Que la alternativa no deje de ser crítica

Una vez que se hayan llevado a cabo los tres pasos descritos, se volverá a repetir el proceso n veces, partiendo cada vez de la red resultante en cada caso.

Esto implica necesariamente que en cada paso existirán otras alternativas que habrá que identificar y manejar en forma semejante a como se describió anteriormente.

Con objeto de ilustrar lo anterior, se desarrollará el siguiente ejemplo, en donde se supone que los recursos que presupone la red, ya han sido distribuidos convenientemente.

En los cálculos mostrados sólo aparecen las primeras fechas de inicio y terminación, ya que no se manejan en la tercera fase las últimas fechas de inicio y terminación. Sólo cuando se obtiene la duración de la obra deseada, habrá necesidad de calcular estas últimas fechas para poder obtener el calendario de barra correspondiente, el cual se usará como base del control de avance de obra.

ACTIVIDAD	NORMAL		MINIMO		$\Delta S/\Delta T$
	TIEMPO (semanas)	COSTO (miles de pesos)	TIEMPO (semanas)	COSTO (miles de pesos)	
1	4	250	3	265	15
2	10	160	7	190	10
3	15	140	13	160	10
4	7	145	6	150	5
5	8	130	5	175	15
6	1	200	1	200	-
7	6	140	4	180	20
8)	12	110	11	115	5
9	2	120	2	120	-
		<u>1,295</u>		<u>1,455</u>	

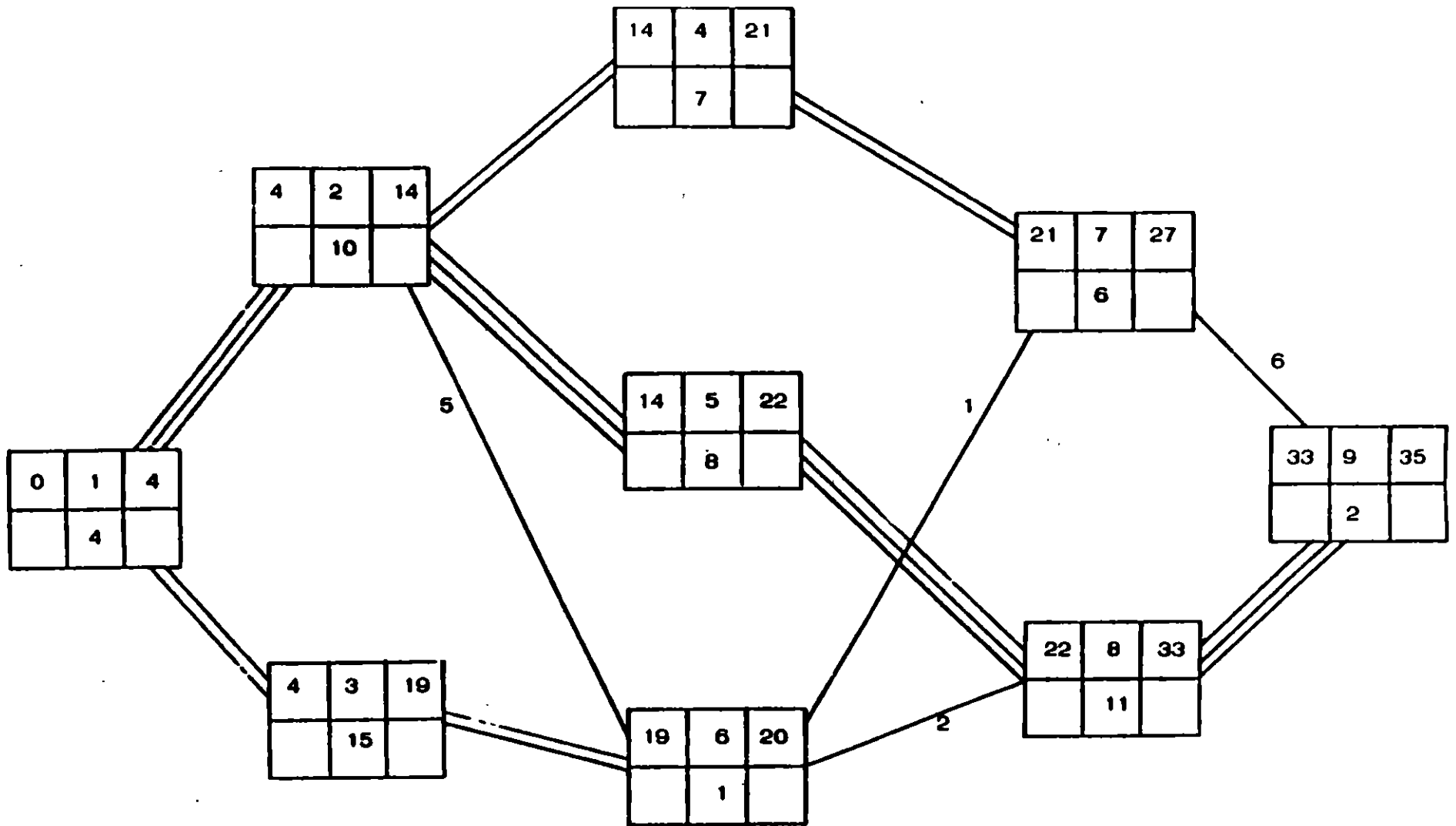
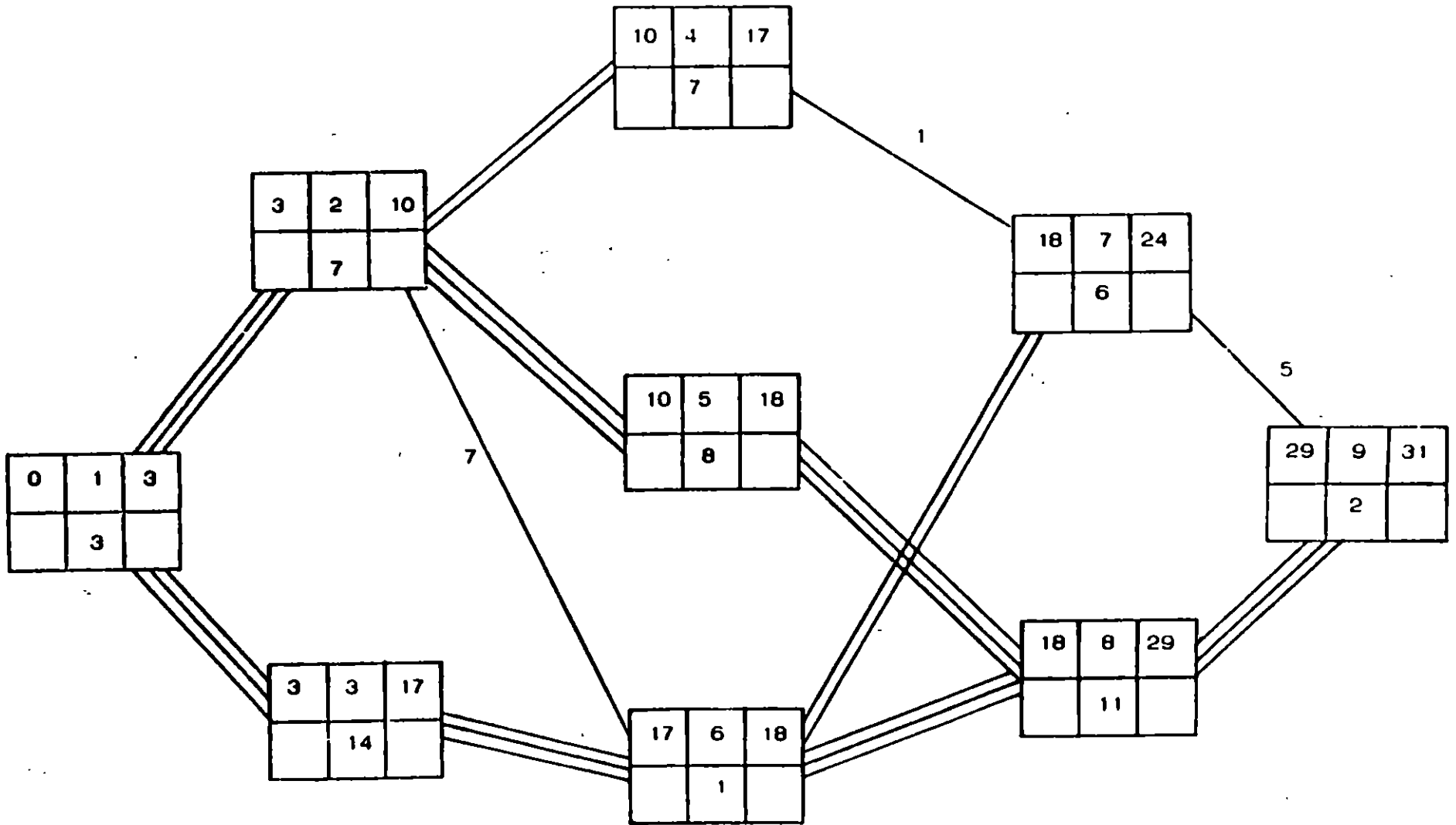


Figura 40

Tiempo duración: 35 semanas  
 Costo directo mínimo: 1,300  
 Modificación: Art. 8: 1 semana.

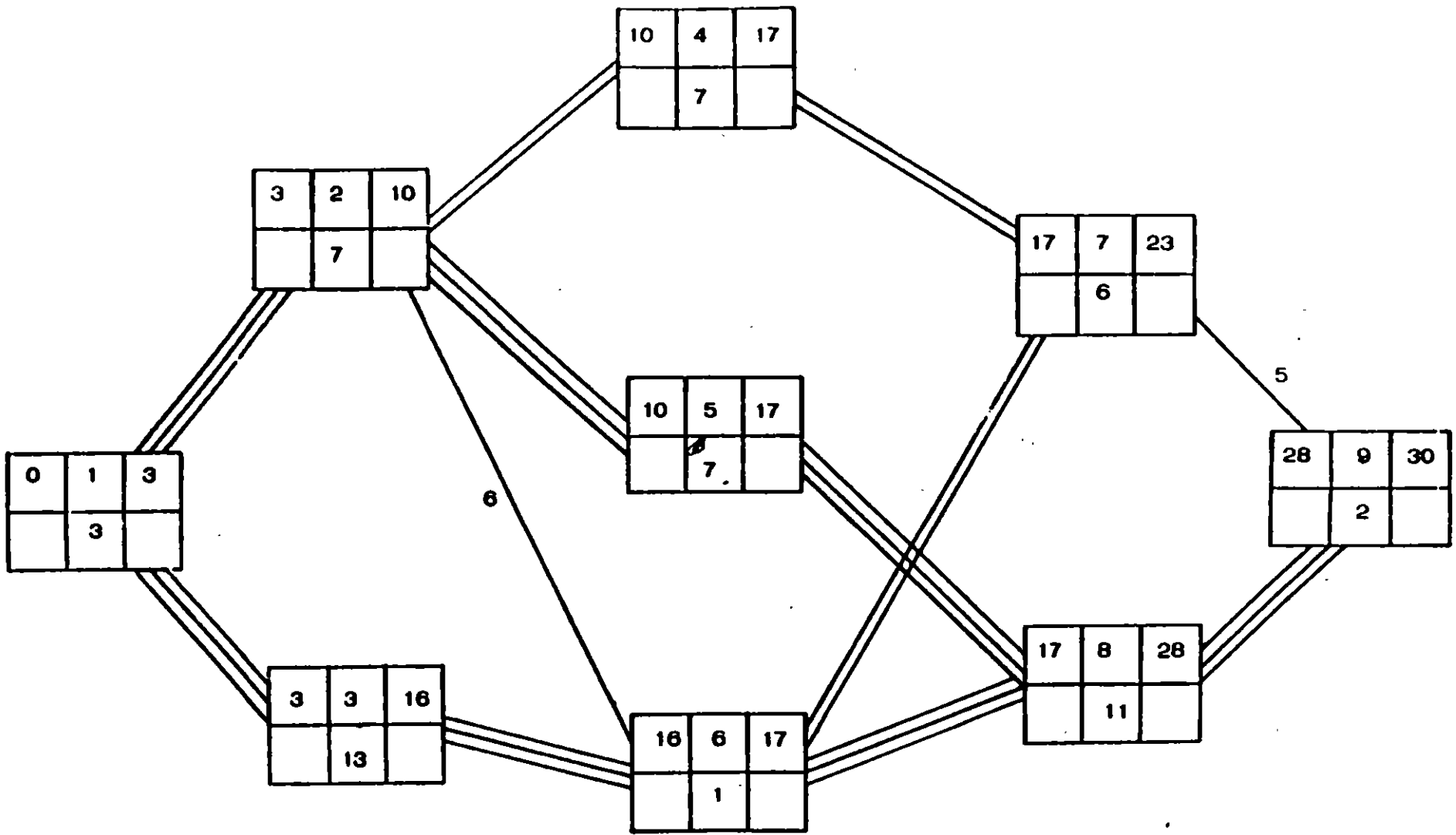


Tiempo duración:  
 Costo:  
 Modificación:

31 semanas  
 $\$1,335 + (10 + 10) = \$1,335$   
 Acts 2 y 3: 1 semana.

Figura 43.





Tiempo duración:  
 Costo:  
 Modificación:

30 semanas  
 $\$1,355 + (10 + 15) = \$1,380$   
 Acts 3 y 5: 1 semana

Figura 44

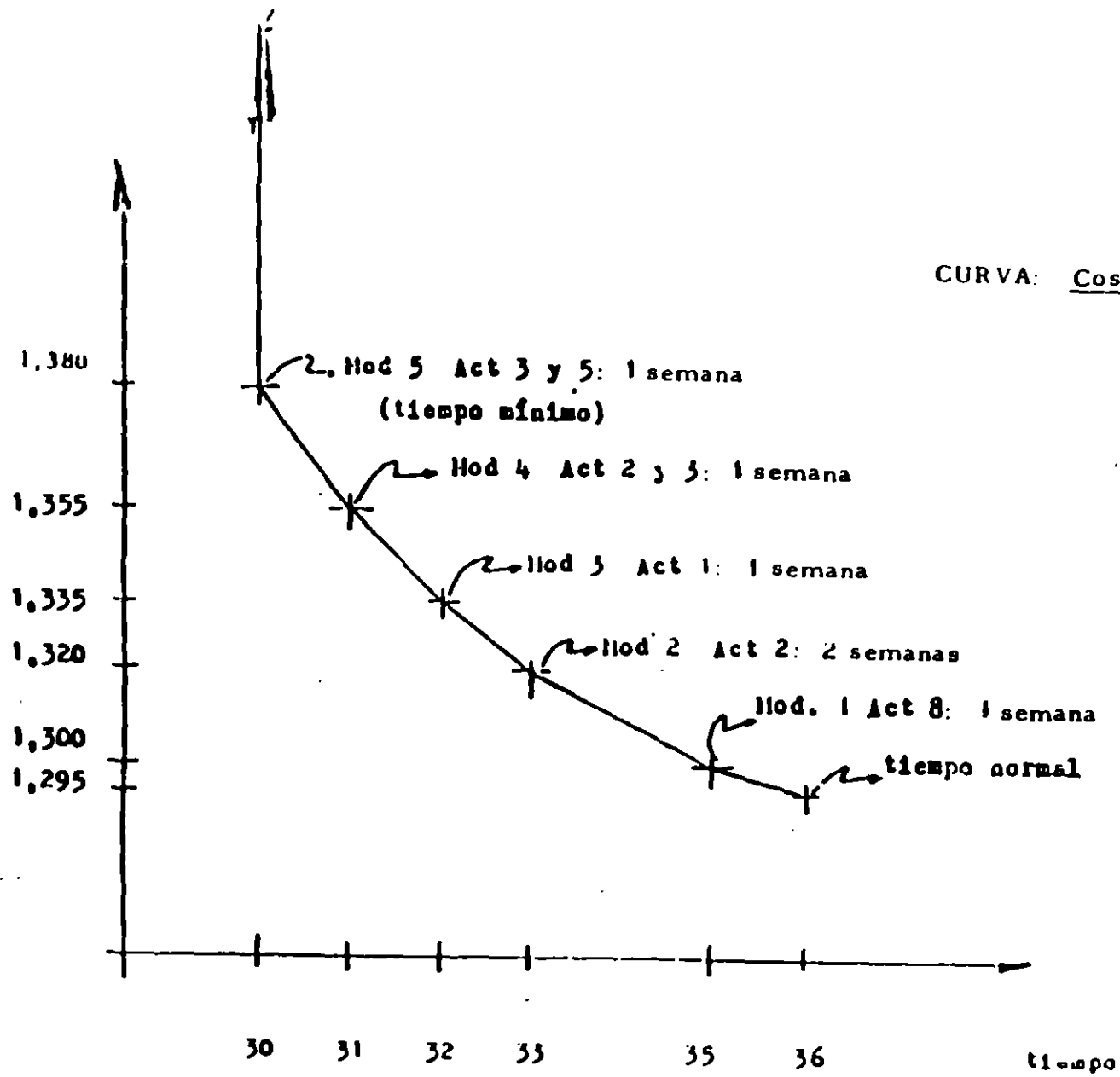


Figura 45

Para poder controlar los costos indirectos, habrá necesidad de predecirlos con base en experiencias anteriores. Una manera práctica de lograr lo anterior, lo constituye el diagrama conocido como del "punto de equilibrio" correspondiente a un determinado período de tiempo (fig. 46). En él puede observarse el volumen mínimo que deberá hacerse en ese período, para "salir a mano", es decir, para no tener pérdidas y poder absorber los costos fijos existentes.

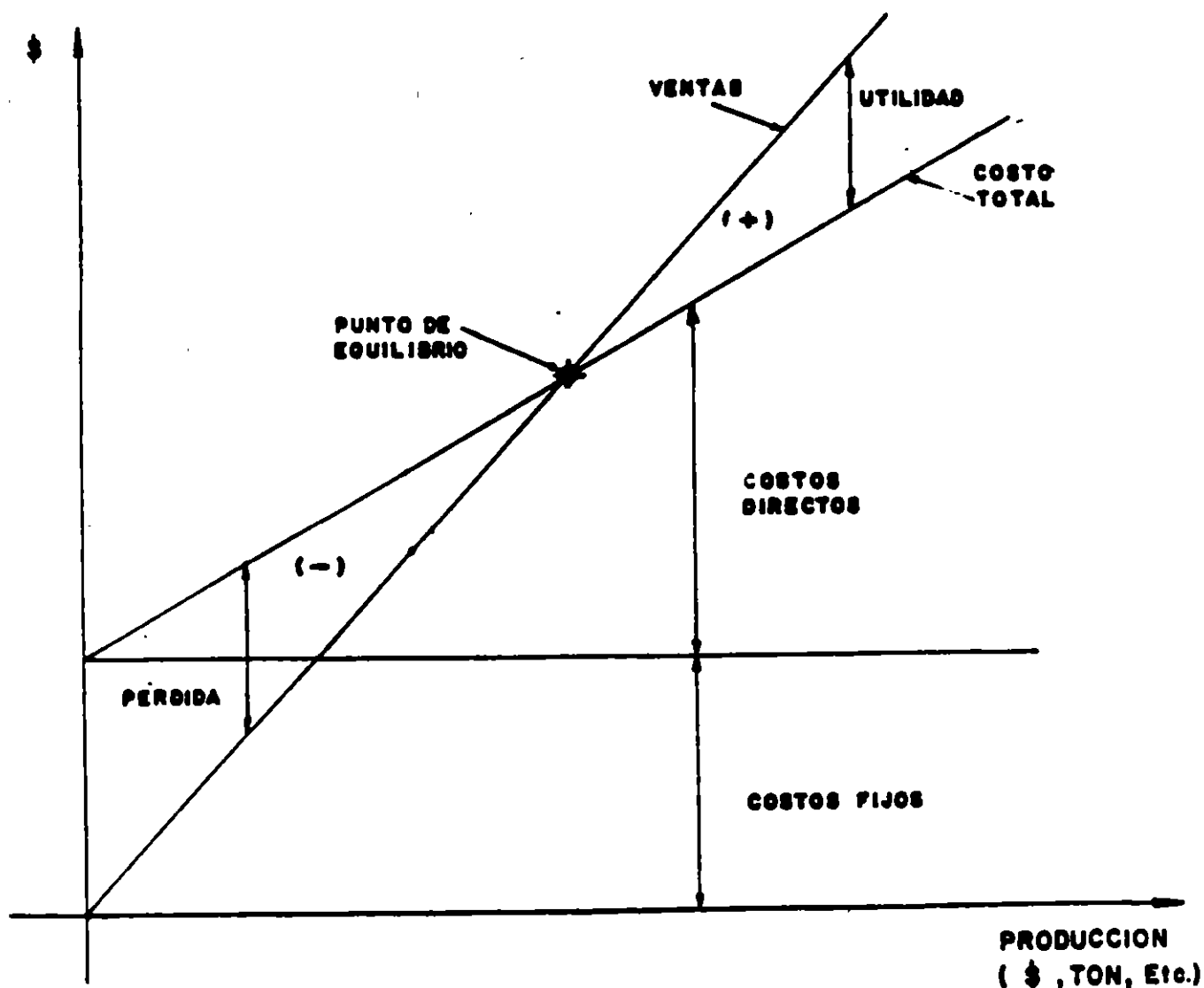


FIGURA 46

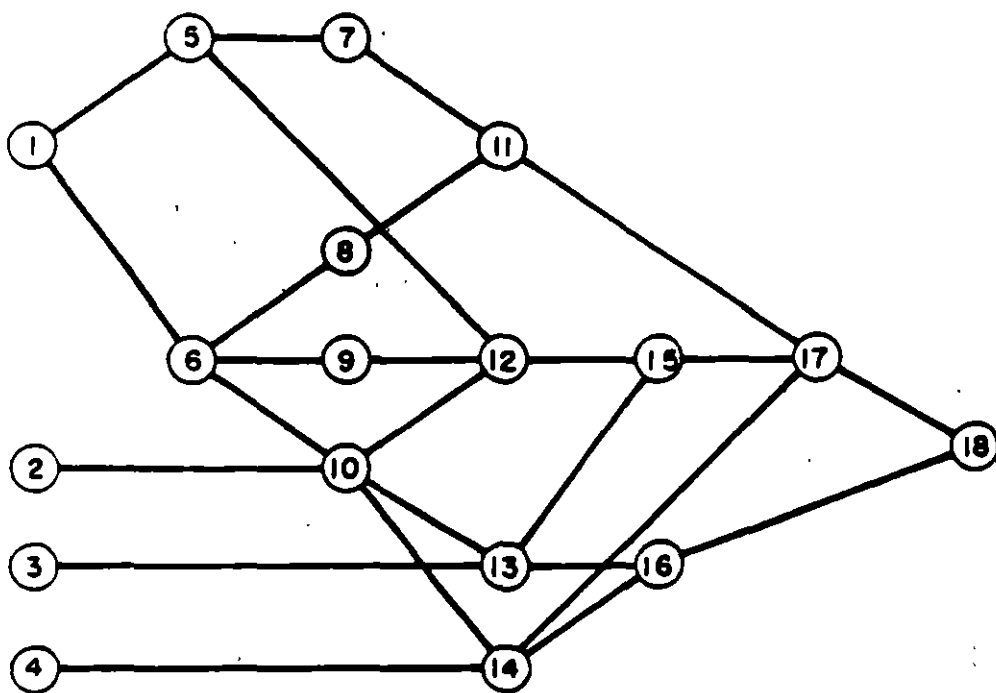
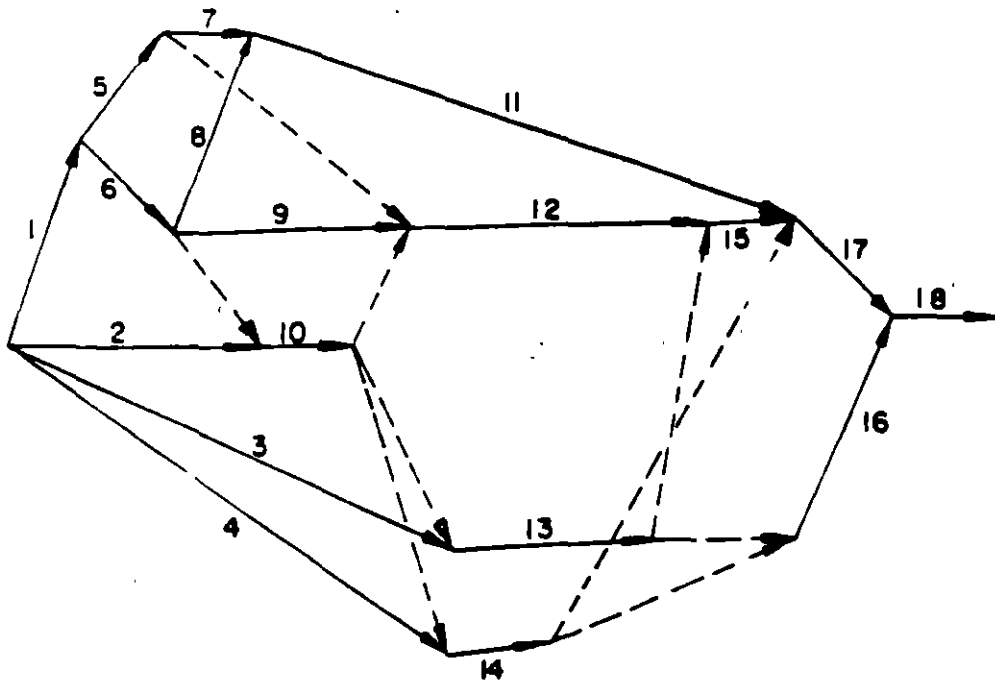
## ANEXO

EJERCICIO

Este ejercicio tomado de la referencia 12, se presenta con el objeto de que sea resuelto en forma individual, y se comparen los resultados obtenidos con las soluciones que aparecen a continuación. De esta forma se podrá verificar si los conceptos correspondientes a las tres fases del método de la ruta crítica, se asimilaron debidamente.

Operación	Debe seguir a la operación(es)	$t_n$	$t_{mínimo}$	\$ para $t_n$	\$ para $t_{mínimo}$	$\Delta S/\Delta t$
1	-	5	5	1,500	1,500	-
2	-	15	10	7,200	8,000	160
3	-	30	18	8,400	9,000	50
4	-	20	14	2,100	2,700	100
5	1	12	8	1,400	1,560	40
6	1	6	4	800	1,200	200
7	5	24	20	6,800	7,800	250
8	6	8	5	1,000	1,240	80
9	6	4	3	600	900	300
10	2-6	10	7	3,000	3,450	150
11	7-8	11	8	2,500	3,580	360
12	5-9-10	9	6	1,800	2,700	300
13	3-10	14	10	2,600	3,320	180
14	4-10	21	15	8,400	10,800	400
15	12-13	10	6	1,900	2,140	60
16	13-14	12	10	1,300	1,400	50
17	11-14-15	7	5	700	840	70
18	16-17	3	3	500	500	

FASE I



BIBLIOGRAFIA

1. Parker W. Henry, Oglesby H. Clarkson, Methods improvement for construction managers Mc Graw-Hill B.C. 1972
2. Parker W. Henry, Methods improvement techniques for construction and public works managers. Stanford University Department of Civil Engineering. Technical report N. 51. 1965
3. Nave J. Henry. Construction personnel management. Journal of the Construction Division ASCE. Jan-1968
4. Mc Nally E Harold. Labor productivity in the construction industry. Journal of the Construction Division ASCE. Sep-67
5. Schader R. Charles. Motivation of construction craftsmen. Journal of the Construction Division ASCE. Sep-72
6. Reynaud B.C. The site as the workshop of the industry. Building technology and Management. Dec-71
7. Gillham M. John. A contractor's view of factors affecting site productivity. Building Technology and Management. April-1972
8. Sprinkle B. Howard. Analysis of time-lapse construction films. Journal of Construction Division ASCE. Sep-72
9. Fondahl W. John. Photographic analysis for construction operations. Journal of the Construction Division ASCE. May-60
10. Sakuma Akiyuki. Video time study. Industrial engineering. Feb-73
11. Halpin W. Daniel, R. W. Woodhead. Design of construction and process operation. J. Wiley and Sons, 1976

12. Fondahl, John W. A Non-Computer Approach to the Critical Path Method for the Construction Industry. Technical Report N<sup>o</sup>9. Stanford: The Construction Institute, Department of Civil Engineering, Stanford University, November 1961. (Second Edition, 1962).
13. Fondahl, John W. Methods for extending the range of non-computer CPM applications. Technical Report N<sup>o</sup>47, Department of Civil Engineering, Stanford University.
14. Mc Lean, Robert C. A basic CPM with introduction to several special applications. Technical Report N<sup>o</sup>44, Department of Civil Engineering, Stanford University.
15. Paulson, Boyd C., Jr. Man-Computer Concepts for Planning and Scheduling, ASCE National Structural Engineering Meeting, Cleveland, Ohio, April 24-28, 1972, Preprint N<sup>o</sup>1644
16. Paulson, Boyd C., Jr. Man-Computer Concepts for Project Management. Technical Report N<sup>o</sup>148, Stanford: The Construction Institute, Department of Civil Engineering, Stanford University, August, 1971.
17. Antill, James M., and Ronald W. Woodhead. Critical Path Methods in Construction Practice. 2nd ed., New York: John Wiley and Sons, 1970.
18. Paulson, Boyd C., Jr. Project Planning and Scheduling a Unified Approach. ASCE Construction Division. 1974, pp 1-26

# CHAPTER 13

## PROJECT MANAGEMENT

### INTRODUCTION

The PERT/CPM technique for project planning is widely used in industry for one-time projects such as building a new plant, installing new machinery, doing a major maintenance job, or similar projects.

Projects that can take particular advantage of the PERT/CPM approach are those that consist of numerous activities where many of the activities must be done sequentially. Large numbers of sequential activities tend to create "bottlenecks" or critical paths. It is the objective of the PERT/CPM technique to identify the critical path and the activities that constitute that critical path. Management can then apply its efforts to alleviate any delays in the activities that are on the critical path and thus ensure that a project will be completed as scheduled.

The terms PERT and CPM have become generic terms for project scheduling. PERT stands for "project evaluation and review technique" and CPM stands for "critical path method." Although some authors ascribe the deterministic approach to one and the stochastic to the other, more common use in recent years is to describe the method as PERT/CPM or CPM/PERT.

### ILLUSTRATION OF CPM/PERT TECHNIQUE

The technique can best be illustrated with an example. In Figure 13-1 is a network of activities and events. The lines with the arrows are the activities which take certain time periods (hours, days or weeks) to complete and the nodes that connect each activity are called events. Events are points in time and activities cover elapsed times. For instance, an event is the beginning or end of an activity and an activity takes a certain number of time units to be completed.

The illustrated PERT/CPM network has sixteen activities which are connected by twelve nodes or events. The figures shown alongside each activity are the elapsed times for that activity. No activity can begin until a preceding activity has been completed. For instance, activity 3-6 cannot be started until activity 1-3 has been completed. Similarly, activity 5-8 cannot be started until both activities 2-5 and 4-5 have been completed.

Based on the above precedence requirements we can determine the total elapsed times for each possible path through the network from the first event (node 1) to the last event (node 12).



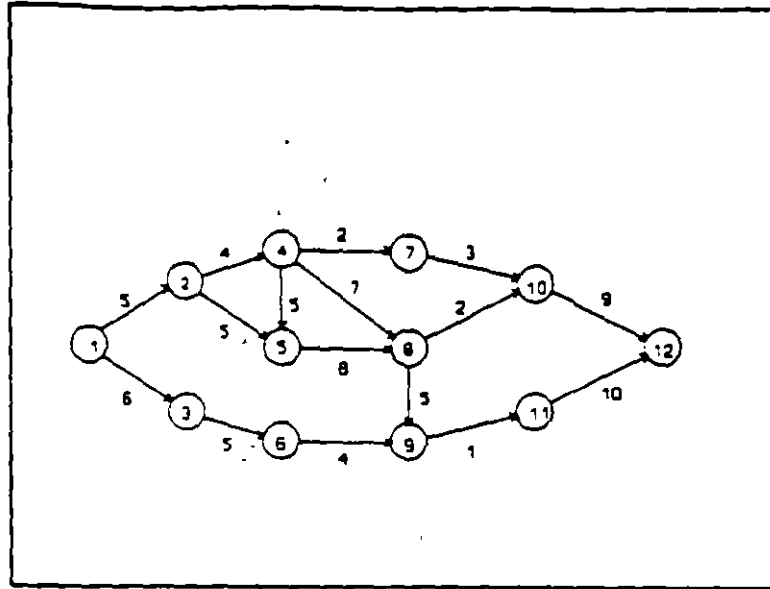


Figure 13-1: Illustrative PERT/CPM Network

The eight possible paths are listed in Table 13-1 with their respective total elapsed times. Note that the elapsed times range from 23 days to 38 days. However, the individual paths only consider precedence requirements along their own respective paths. Hence, the time along the shortest path is rather meaningless. What is important, however, is the time and the path that take the longest, because the longest path is the critical or "bottleneck" path. Any delays in the activities on the longest path will delay the entire project. Hence, the longest path determines the time required to complete the project.

### PERT THREE PARAMETER ESTIMATE

With three level time estimates it is necessary to estimate three time values for each activity in the CPM/PERT network. The three time values consist of an optimistic time value (shortest), a most likely time value (mode) and a pessimistic time value (longest). The most likely time value is one of the points of central tendency but is not necessarily the midpoint or the average of values.

The average time value can be estimated by the formula,

$$t_a = \frac{t_o + 4t_m + t_p}{6}$$

where  $t_a$  is the average time value,  $t_o$  is the optimistic time value,  $t_m$  is the most likely time value, and  $t_p$  is the pessimistic time value.

Path through Network	Elapsed Time
1-3-6-9-11-12	26
1-2-4-7-10-12	23
1-2-4-8-10-12	27
1-2-4-8-9-11-12	32
1-2-4-5-8-10-12	33
1-2-4-5-8-9-11-12	38
1-2-5-8-10-12	29
1-2-5-8-9-11-12	34

**Table 13-1: All Possible Paths through Network**

We can also estimate the variance of each activity's time by the formula,

$$V = \frac{(t_p - t_o)^2}{36}$$

Suppose we have an activity with an optimistic time estimate of seven days, a most likely estimate of eight days and a pessimistic estimate of 13 days. Based on the above formulas the estimated average time will then amount to  $8 \frac{2}{3}$  days and the variance will be one day. Since the standard deviation is the square root of the variance, it will also amount to one day.

Suppose we have a CPM/PERT network with three level time estimates as shown in Table 13-2. Also note that each activity except the first two have predecessor activities which must precede them. From the information given in the table we can then construct a network as shown in Figure 13-2. For each activity we determine the average times and the variances as shown in Table 13-3. Based on the average time values we determine the critical path and find that it follows the events 1-2-4-6, and amounts to 22 days. The time along the critical path has a variance of 3.50.

Based on the law of large numbers we can now say that the sum of individual times of each activity along the critical path is approximately normally distributed because it is made up of the sum of three average time values. If we had 30 or more activities along the critical path we could say that the time along the critical path was exactly distributed according to the normal distribution. Similarly, the variance along the critical path is equal

to the sum of the variances of each activity on the critical path. It amounts to 3.53. The standard deviation along the critical path then can be found by taking the square root of the sum of the variances along the critical path. It amounts to 1.87 days.

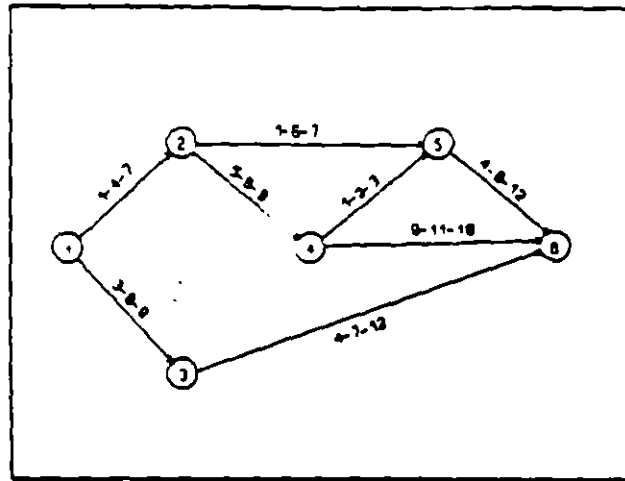


Figure 13-2: PERT Three Level Time Estimates

Activity	Optimistic Estimate	Most Likely Estimate	Pessimistic Estimate	Predecessor Activity
1-2	1	4	7	-
1-3	3	8	9	-
2-4	5	6	8	1-2
2-5	1	6	7	1-2
3-6	4	7	12	1-3
4-5	1	2	3	2-4
4-6	9	11	18	2-4
5-6	4	8	12	2-5, 4-5

Table 13-2: Tabular Array of Three Level Time Estimates

Since  $\pm 1.96$  standard deviations covers 95 percent of the area under the normal curve, we can say that the project portrayed by the network can be completed in a time period from  $22 - 3.67$  days to  $22 + 3.67$  days, or from 18.33 to 25.67 days with a 95 percent probability.

Activity	Average Time Estimate	Variance	Standard Deviation
1-2*	4.00	1.00	1.00
1-3	7.33	1.00	1.00
2-4*	6.17	0.25	0.50
2-5	5.33	1.00	1.00
3-6	7.33	1.78	1.33
4-5	2.00	0.10	0.33
4-6*	11.83	2.25	1.50
5-6	8.00	1.78	1.33
Total along CP	22.00	3.50**	

**Table 13-3: Mean and Variance Time Estimates**

\*Activities on the critical path.

\*\*Variance of 3.50 is sum of the variances of the activities along the critical path.

## PROJECTS WITH TIME-COST TRADEOFFS

The applications of CPM/PERT above are based on normal time estimates. Normal time estimates are based on performing a project during normal work times and using normal work groups. Under certain circumstances it may be necessary to speed up a project. In that case, overtime may have to be instituted and/or work groups may have to be expanded. Speeding up, or crashing, a project is usually not as efficient as doing the project under normal circumstances. Therefore, if a project needs to be speeded up we need to investigate the time- cost trade-offs associated with the speeding up or crashing of the project.

Crashing a project can best be illustrated with an example. Suppose the project represented by the CPM/PERT network in Figure 13-2 has the crash-time- cost parameters as shown in Table 13-4. The normal cost is the cost for completing each activity in the normal time. The total crash cost includes additional costs incurred if the respective activity is speeded up by the maximum amount of time. The crash cost per day is the additional cost incurred if the activity is speeded up by one day. It is assumed that the cost of shortening an activity by the first day is the same as shortening an activity by another day or a third day. If crashing is not possible for an activity (beyond its normal time), the normal time and crash times are the same as well as the normal cost and crash cost.

The critical path for the network is 1-2-4-6 with a total length of 21 days. Hence, if we want to speed up the project by one day at a time we should speed up or crash activities along the critical path, so long as no other critical path develops as we shorten the critical path. In the next section, we will solve this problem using the computer and illustrate the complete crashed project.

Activity Number	Initial Node	Final Node	Normal Time	Crash Time	Normal Cost	Crash Cost
1	1	2	4	3	\$100	\$500
2	1	3	8	6	\$200	\$400
3	2	4	6	4	\$300	\$500
4	2	5	6	4	\$400	\$800
5	4	5	2	2	\$500	\$500
6	4	6	11	5	\$100	\$500
7	5	6	8	6	\$400	\$800
8	3	6	7	6	\$200	\$500

Table 13-4: Crash-Time-Cost Parameters

### EXAMPLE 1 - DETERMINISTIC ACTIVITY TIMES (CPM)

Consider the CPM/PERT network of Figure 13-2 consisting of 6 events and 8 activities. Further, assume that the activities in this network are deterministic and activity times are the same as the most likely estimates (the activity times are presented in Table 13-4 in the Normal Time column).

The objective of the CPM/PERT program is to find the critical path and the time required to complete the project given the precedence requirements. In order to solve the above problem, select the Project Management program from the Main Menu. Once the Project Management program is loaded, move the pointer to the INPUT option. The Input option includes three sub-options, representing the three project management models as shown in Exhibit 1. Pull the pointer down to the deterministic sub-option and press the <ENTER> key.

```

Input  Edit  Print  File  Solve  Quit

Deterministic Model (CPM)
Probabilistic Model (PERT)
CPM with time-cost tradeoff

Problem title: CPM EXAMPLE

Enter number of activities: 8

Enter number of nodes: 6

Continue with activity times (Y/N) Y

```

The program will then ask if you wish to continue to enter the network data. Press the <ENTER> key to select "Y". The spread sheet data entry screen is presented below.

A1	Activity	B	C	D
	A	B	C	D
1	Activity	Begin	End	Activity
2	Label	Node	Node	Time
3	ARC1	1	2	4.00
4	ARC2	1	3	8.00
5	ARC3	2	4	6.00
6	ARC4	2	5	6.00
7	ARC5	3	6	7.00
8	ARC6	4	5	2.00
9	ARC7	4	6	11.00
10	ARC8	5	6	8.00

After completing the spread sheet data entry, press the <F10> key to exit and keep the data. At this time you should get a hard copy print-out of the model and examine it carefully to ensure that the data is correct. Once the data appears correct, save the model on disk by selecting the "FILE" option and pulling the pointer down to the save sub-option. You will be asked to enter a DOS file name. Use a file name to represent the type of model and for the three character suffix use "PRO" to indicate that the file contains a project management problem. (Note that the use of "PRO" is not mandatory and is just for convenience.) Enter a file name and press the Enter key to save the model.

Now select the SOLVE option to solve the problem. You will be presented with the usual three option sub-menu representing the type of output device desired. Select the display output to obtain the solution on the screen as shown below.

Problem Title: CPM EXAMPLE			
Event Status Report			
Event	Earliest Time	Latest Time	Slack Time
1	0.00	0.00	0.00
2	4.00	4.00	0.00
3	8.00	14.00	6.00
4	10.00	10.00	0.00
5	12.00	13.00	1.00
6	21.00	21.00	0.00

Problem Title: CPM EXAMPLE			
Activity Status Report			
Activity number	Initial node	Final node	Slack time
ARC1*	1	2	0.00
ARC2	1	3	6.00
ARC3*	2	4	0.00
ARC4	2	5	3.00
ARC5	3	6	6.00
ARC6	4	5	1.00
ARC7*	4	6	0.00
ARC8	5	6	1.00

Project completion time is : 21

\* -> Activity is on critical path(s)

As seen from the above output reports, the critical path consists of the three activities identified as arc 1, arc 3, and arc 7 with a total length of 21 days. The path is identified by activities marked with a star "\*\*". The star is placed next to the associated activity.

## EXAMPLE 2 - PERT THREE ESTIMATE PROJECT

Consider the network of Figure 13-2 again. Now suppose that the activity times are probabilistic and have been estimated by the three estimates as shown in Table 13-2. In order to solve this PERT three-estimate problem, select the Project Management program from the Main Menu. Move the pointer to the INPUT option, pull the pointer down to the second sub-option and press the Enter key. The program will ask you to enter the relevant parameters as shown below.

Problem title: PERT EXAMPLE

Enter number of activities: 8

Enter number of nodes: 6

Continue with activity times (Y/N) Y

A1	Activity	B	C	D	E	F
1	Activity	Begin	End	Best	Modal	Worst
2	Label	Node	Node	Time	Time	Time
3	ARC1	1	2	1.00	4.00	7.00
4	ARC2	1	3	3.00	8.00	9.00
5	ARC3	2	4	5.00	6.00	8.00
6	ARC4	2	5	1.00	6.00	7.00
7	ARC5	3	6	4.00	7.00	12.00
8	ARC6	4	5	1.00	2.00	3.00
9	ARC7	4	6	9.00	11.00	18.00
10	ARC8	5	6	4.00	8.00	12.00

Now select the SOLVE option to solve the problem. You will be presented with the usual three option sub-menu representing the type of output device desired. Select the Display Output to obtain the solution on the screen as shown below.



Problem title: PERT EXAMPLE

Enter number of activities: 8

Enter number of nodes: 6

Report means and standard deviations (Y/N) Y

Problem Title: PERT EXAMPLE

Activity	Mean	St. Dev.
ARC1	4.00	1.00
ARC2	7.33	1.00
ARC3	6.17	0.50
ARC4	5.33	1.00
ARC5	7.33	1.33
ARC6	2.00	0.33
ARC7	11.83	1.50
ARC8	8.00	1.33

As seen from the above output reports, upon request, the program will report the mean and standard deviation for each activity. It then solves the problem using the means as the activity times. For Example 2, the critical path consists of activities 1, 3, and 7 with an average project completion time of 22 days. The output report consists of both the "Event Status Report" and the "Activity Status Report." The event status report indicates which events are critical. The critical events have zero slack time, i.e., their earliest times and latest times are the same (see Exhibit 7). The activity status report indicates which activities are on the critical path and also reports the project completion time.

Problem Title: PERT EXAMPLE  
Event Status Report

Event	Earliest Time	Latest Time	Slack Time
1	0.00	0.00	0.00
2	4.00	4.00	0.00
3	7.33	14.67	7.33
4	10.17	10.17	0.00
5	12.17	14.00	1.83
6	22.00	22.00	0.00

Problem Title: PERT EXAMPLE  
Activity Status Report

Activity number	Initial node	Final node	Slack time
ARC1*	1	2	0.00
ARC2	1	3	7.33
ARC3*	2	4	0.00
ARC4	2	5	4.67
ARC5	3	6	7.33
ARC6	4	5	1.83
ARC7*	4	6	0.00
ARC8	5	6	1.83

Expected project completion time is : 22.00

\* -> Activity is on critical path(s)

### EXAMPLE 3 - TIME-COST TRADEOFF EXAMPLE

This example involves a project management problem in which time cost tradeoffs are possible. The network structure of Figure 13-2 will be used to illustrate the method. The normal times, crash times, normal costs, and crash costs are presented in Table 13-4. As before, select the INPUT option and pull the pointer down to the Time Cost tradeoff sub-option. Press the <ENTER> key to begin the data entry process as shown below.

```

Problem title: TIME-COST TRADEOFF

Enter number of activities: 8
Enter number of nodes: 6

Continue with activity times (Y/N) Y
    
```

Press the <ENTER> key to proceed with the spread sheet data entry. Below, the completed input data screen is shown.

A1	Activity	B	C	D	E	F	G
1	Activity	Begin	End	Normal	Crash	Normal	Crash
2	Label	Node	Node	Time	Time	Cost	Cost
3	ARC1	1	2	4.00	3.00	100.00	500.00
4	ARC2	1	3	8.00	6.00	200.00	400.00
5	ARC3	2	4	6.00	4.00	300.00	500.00
6	ARC4	2	5	6.00	4.00	400.00	800.00
7	ARC5	4	5	2.00	2.00	500.00	500.00
8	ARC6	4	6	11.00	5.00	100.00	500.00
9	ARC7	5	6	8.00	6.00	400.00	800.00
10	ARC8	3	6	7.00	6.00	200.00	500.00

If you wish to change the activities' label, use the spread sheet editor to make changes as desired. Once the input data is completed, press <F10> to accept the data and exit from the spread sheet editor.

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option. Press the <ENTER> key to proceed with solving the problem. The output screens are shown below.

Problem Title: TIME-COST TRADEOFF

Report crash costs per day (Y/N) Y

The first screen (above) shows a query from the program to display the cost of crashing per day for each arc. Press <Y> to obtain this information as shown below.

Problem Title: TIME-COST TRADEOFF  
Crash Cost Per Activity Report

Activity number	Initial node	Final node	Normal time	Crash time	Crash Cost Per Day
ARC1	1	2	4	3	400.00
ARC2	1	3	8	6	100.00
ARC3	2	4	6	4	100.00
ARC4	2	5	6	4	200.00
ARC5	4	5	2	2	Infinity
ARC6	4	6	11	5	66.67
ARC7	5	6	8	6	200.00
ARC8	3	6	7	6	300.00

As seen from the above report, the program presents information relating to the cost of crashing each activity. For example, the activity corresponding to ARC4 can be crashed from 6 days (normal time) to 4 days (crash time) at a cost of \$200 per day. Note that for an activity (arc) which cannot be crashed, or its duration shortened, the crash cost per day is infinite (e.g., ARC5). At this point, press the <ENTER> key to continue with the solution process as described below.

Problem Title: TIME-COST TRADEOFF						
* * * Activities on critical path(s) * * *						
Activity label	Initial node	Final node	Normal time	Activity time	Crash time	Crash Cost
ARC1	1	2	4.0	3.0	1.0	400.00
ARC2	1	3	8.0	8.0	0.0	0.00
ARC3	2	4	6.0	4.0	2.0	200.00
ARC4	2	5	6.0	6.0	0.0	0.00
ARC5	4	5	2.0	2.0	0.0	0.00
ARC6	4	6	11.0	8.0	3.0	200.00
ARC7	5	6	8.0	6.0	2.0	400.00
ARC8	3	6	7.0	7.0	0.0	0.00

The program will first report the set of activities which are critical (a delay in any one of these activities will delay the project completion time). It also reports the normal time, activity time, crash time, and crash cost for each activity. The activity time is the current amount of time (after crashing) that each activity requires. The crash time is the amount of time that each activity has been crashed (or shortened), and the activity cost is the total cost of crashing that activity. For example, activity ARC7 has been crashed from a normal time of 11 days to 8 days (crashed 3 days) at a cost of about \$67 per day for a total of \$200.

Problem Title: TIME-COST TRADEOFF

Optimal time-cost trade off has been achieved

Normal time : 21  
Crash time : 6  
Project completion time : 15  
Normal cost : \$2200.00  
Crash cost : \$1200.00  
Total cost : \$3400.00

The program will then proceed by reporting the total normal time (project completion time in absence of crashing), the total crash time, project completion time (after crashing), and the associated costs. For this solved example, the normal time is 21 days, the project has been crashed by 6 days at a cost of \$1200. Total normal cost is \$2200; adding the crash cost, the total project cost is \$3400. These results indicate that if you decide to complete the project at its normal time of 21 days, it will cost \$2200. But if you decide to complete the project earlier, say by 6 days, it will cost an extra \$1200.

As with the earlier two models, the computer will display reports of the event status as well as activity status as shown below.

Event Status Report			
Event	Earliest Time	Latest Time	Slack Time
1	0.00	0.00	0.00
2	3.00	3.00	0.00
3	8.00	8.00	0.00
4	7.00	7.00	0.00
5	9.00	9.00	0.00
6	15.00	15.00	0.00

Problem Title: TIME-COST TRADEOFF  
Activity Status Report

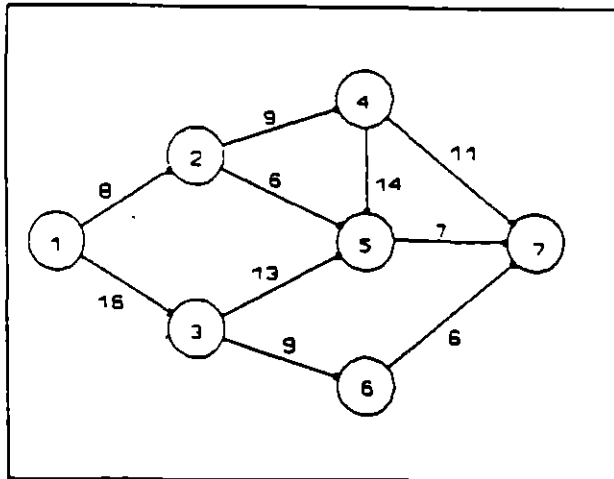
Activity number	Initial node	Final node	Slack time
ARC1*	1	2	0.00
ARC2*	1	3	0.00
ARC3*	2	4	0.00
ARC4*	2	5	0.00
ARC5*	4	5	0.00
ARC6*	4	6	0.00
ARC7*	5	6	0.00
ARC8*	3	6	0.00

\* -> Activity is on critical path(s)

As seen from the above results, all activities are marked as critical (or being on some critical path). The reason is that many activities have been crashed to their shortest possible times. This has created multiple critical paths through the network and has caused every activity to be critical. You should use the above data to verify that in fact all paths from start to finish have the same length. Use the activity times reported earlier to determine the length of each path.

## PROBLEMS

1. Find the critical path and the critical path time using the CPM/PERT computer program for the following problem.



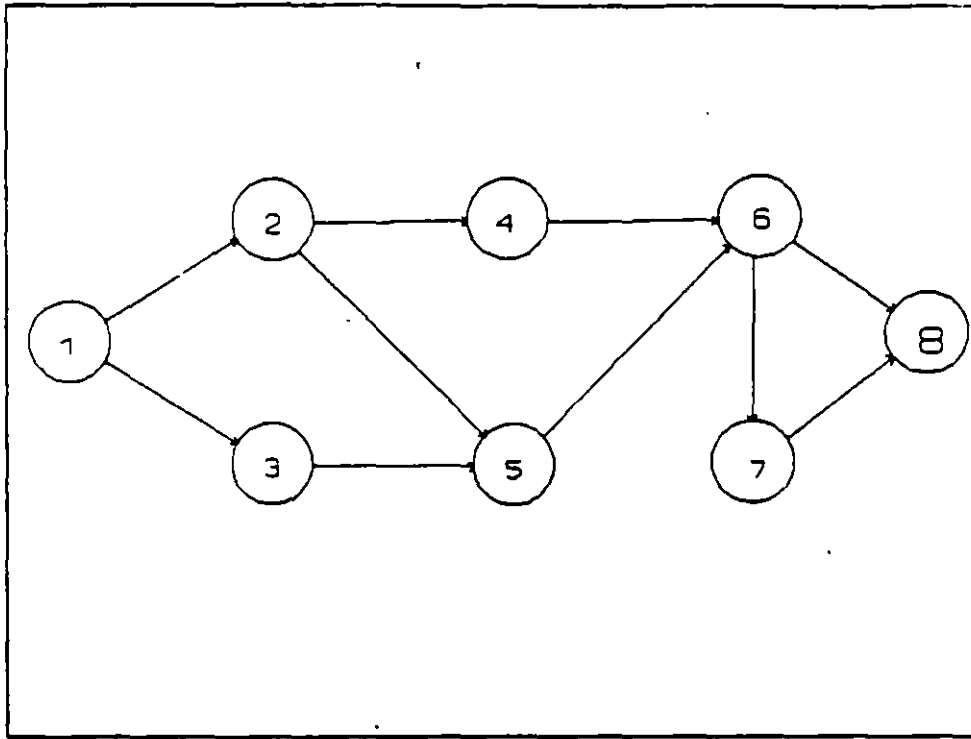
2. Develop the network diagram for the CPM/PERT problem listed below in tabular format.

Activity	Time Estimates			Predecessor Activity
	Optimistic	Most Likely	Pessimistic	
1	5	9	11	-
2	1	2	4	-
3	6	8	9	1
4	4	5	10	1
5	7	8	11	2
6	8	10	15	4
7	9	11	16	3
8	10	15	16	3
9	9	13	16	6
10	5	8	11	8

3. Based on the CPM/PERT network you developed in the above problem, solve the problem using the computer solution procedure.



4. Use the three level time estimates procedure to run the CPM, PERT network shown below.



Time Estimates

Activity	Optimistic	Most Likely	Pessimistic
1-2	5	8	9
1-3	11	12	16
2-4	6	9	10
2-5	2	3	4
3-5	7	14	16
4-6	8	9	17
5-6	6	7	8
6-7	8	9	9
6-8	14	15	19
7-8	10	15	16

5. Crash the project in problem 1 with the following crash-time-cost parameters. Crash costs are in addition to normal costs.

Activity	Normal Time	Crash Time	Normal Cost	Total Crash Cost	Crash Cost/Day
1-2	8	6	\$750	\$100	\$50
1-3	16	13	810	105	35
2-4	9	8	940	45	45
2-5	6	5	635	15	15
3-5	13	11	495	110	55
3-6	9	7	580	40	20
4-5	14	11	875	165	55
4-7	11	11	695	-	-
5-7	7	6	940	40	40
6-7	6	6	710	-	-

6. Develop the CPM/PERT Network for the following deterministic problem and then run the computer solution using the project crashing module. Crash costs are in addition to normal costs.

Activity	Normal Time	Crash Time	Normal Cost	Total Crash Cost	Crash Cost/Day
1-2	5	3	\$195	\$30	\$15
1-3	7	6	180	55	55
1-4	8	8	360	-	-
2-5	3	3	345	-	-
2-6	6	5	310	40	40
3-6	4	4	145	-	-
3-7	12	10	460	70	35
4-7	11	8	510	75	25
4-8	4	3	340	10	10
5-9	3	3	135	-	-
6-9	2	2	485	-	-
6-11	1	1	910	-	-
7-10	9	7	415	60	30
8-10	8	7	390	45	45
9-11	7	4	210	150	50
10-11	6	3	265	15	5

## 7. TROPIC OIL WELL DRILLERS

Tropic Oil Well Drillers struck oil on the latest well they drilled. You have been asked to develop a network and related PERT analysis including a critical path. The project at hand is to mount a pumping unit on the well and install the necessary pipe line to the flow station in order to bring the well into production. For simplicity's sake assume that all tasks go on around the clock. The project can commence with three activities proceeding simultaneously:

- a) The concrete slab will be poured at the well location. The supervisor of this activity estimates that it will probably take 11 hours. It may take as little as 9 hours.
- b) The pumping unit will be ordered. Since this is done by phone, the time required is negligible (zero). In any event it should not take over an hour.
- c) The field gang can commence to cut away the jungle between the flow station and the well location. Judging from the distance and trouble involved, this should take 30 hours. With luck as little as 20 hours, but definitely not more than 40 hours.

After the slab has been poured, it should take about 24 hours to set and cure. Since the type of cement is well known and weather conditions in this area do not vary much, it is unlikely that there will be much change in this estimate.

The supply house believes that if everything goes right they can get the unit on location in as little as 3 hours after receiving the order. On the other hand, the road is not in good condition and it may take as much as 9 hours, especially if they have trouble fording the river. Better use 9 hours as the most likely estimate.

Once the slab is in and cured and the unit delivered, a crew can mount the unit on the slab. This job should take 5 hours. If the crew works rapidly it may take only 4 hours. Similar jobs have taken as long as 12 hours.

After the unit is installed, the electrical gang can install the electric motor on the base. At the same time that the electrical gang is working, following installation of the unit, a production crew can install the pumping unit rods. The electrical boss estimates; pessimistic, 5 hours; realistic, 4 hours; optimistic, 3 hours. The production crew says 8 hours likely, 4 hours hopefully and maybe as long as 18 hours.

Meanwhile, back at the jungle trail, as soon as the right of way is cut, a line crew from the electric shop can run wire from a substation at the flow station to the well location at the same time as a pipe line gang is running the necessary flow line. The electric line should take 10 hours to run, as much as 12 hours and as little as 8 hours. The flow line, which is threaded and coupled, should not take too much longer, say 11 hours probable with a maximum of 14 and a minimum of 10 hours.

When the electric motor has been installed and the hot line run from the substation to the location, it will be possible to tie in and test the electric motor. This operation will take an hour, neither more nor less.

As soon as the pumping unit rods and the flow line have been installed from station to location, the well head can be connected to the flow line. This should take about an hour. It won't take less than that and may take as long as 4 hours.

As soon as the electric motor is tested and the well head connected, two final activities may be accomplished simultaneously:

a) On location, the unit must be belted up and the subsurface pump tested. This will likely take 4 hours, may take as little as 1 hour and as much as 10 hours.

b) At the same time, at the flow station, the proper valves must be opened to produce the well to the test bank. Best guess on this is 1 hour. If a pumper can be reached immediately it may take almost no time. On the other hand, it might take 2 hours.

When these tasks are done, the project may be considered complete. Complete the following activities:

1. Compute the expected time and variance for each activity.
2. Draw the arrow diagram; number each event.
3. Determine the critical path(s).
4. Determine the expected time and variance for the completion of the entire project.
5. What is the probability that the job will be complete within 54 hours?

8. Mr. Smith decided to have his own house built. To complete this project he had analyzed the following activities and had time values estimated for these activities. The first activity consisted of obtaining a loan which included enlisting the services of a legal advisor. He estimated that this would take about 5 weeks, could take as long as 8 weeks but might also be accomplished in 2 weeks.

The next two activities could be done simultaneously. These are purchasing a lot on which to build the house and obtaining an architectural plan and related blueprints. The first activity was expected to take 6 weeks, could take as little as 1 week but might take as long as 11 weeks. The second activity was expected to take at least 6 weeks, possibly 12 weeks, but most likely 9 weeks.

Upon completing the previous two activities, the basement can be excavated. This was expected to take two weeks, no more or less. After the excavation, the basement walls and foundation could be poured, which was expected to take anywhere from 1 to 3 weeks but most likely 2 weeks.

The woodwork activity was next; it was expected to take about 7 weeks, no more or less. The electrical and plumbing work would occur during the foundation and woodwork activity and was not considered part of the network.

Finishing and painting was expected to take 6 weeks, but because of the unpredictability of the weather it would probably take 9 weeks and could take as long as 12 weeks.

- a) Draw a PERT network with expected time values and standard deviations.
- b) What is the expected time required for completing the project?
- c) What is the probability that the project will be completed in 33 weeks or less?

9. General Hospital Supply Company has received a special order for a number of units of a custom-made product that consists of 2 components, A and B. The product is a non-standard product that the company has never produced before, and the scheduling department has determined that the application of CPM is warranted. A team of manufacturing engineers has prepared the following table:

<u>ACTIVITY</u>	<u>DESCRIPTION</u>	<u>PREDECESSOR</u>	<u>TIME</u>
A	Plan Production	--	6
B	Procure Materials for A	A	15
C	Manufacture Part A	B	10
D	Procure Materials for B	A	16
E	Manufacture Part B	D	11
F	Assemble Parts A & B	C, E	5
G	Inspect Parts	F	3
H	Completed	G	0

- a) Develop a network for General Hospital Supply Company.
- b) State the project completion time and the critical path.

10. Trent Leasing Company has employed the services of Serchware Unlimited, a computer software company, to develop an information system to keep leasing and maintenance records on its fleet of moving vans. Two Trent employees and two Serchware employees have formed a project team to decide what needs to be done. They have come up with the following tasks and their estimated optimistic, most likely, and pessimistic times:

<u>ACTIVITY</u>	<u>PREDECESSOR</u>	<u>O</u>	<u>M</u>	<u>P</u>
1. Basic Design	--	3	4	6
2. Detail Design A	1	4	5	7
3. Detail Design B	1	7	9	12
4. Code A	2	6	7	10
5. Code B	3	7	9	11
6. Detail Design C	3	5	6	7
7. Test A & B	4,5	6	7	10
8. Code C	6	3	4	5
9. Test C	4,5,8	2	4	6
10. Documentation	4,5,8	5	6	9
11. Integrate System	7,9	3	4	6
12. Test System	11	6	10	12

- a) Draw the appropriate network based on the above data.
- b) Give the earliest time, latest time, and slack time for each event.
- c) What is the critical path and the project completion time that Trent can expect from Serchware?

11. The H.B. Laboratory Company has manufactured chemistry supplies for many years. Recently, a member of the company's new product research team submitted a report suggesting that the company manufacture a new non-breakable test tube that could withstand extreme heat and cold. Because no other manufacturer has such a product, management hoped that the new product could be manufactured at a reasonable cost.

H.B. Laboratory's top management would like to initiate a project to study the feasibility of this idea. The end result of the feasibility study would be a report recommending the appropriate action to be taken on the test tube. The project manager has identified a list of activities and a range of times necessary to complete each activity. The information is given below.

- a) Develop a PERT/CPM analysis for this project. Include a project network, calculation of expected times, critical activities, and the expected project completion time.
- b) Compute the probabilities for completing the project by weeks 23, 27, and 29.

<u>ACTIVITY</u>	<u>PREDECESSOR</u>	<u>Q</u>	<u>M</u>	<u>P</u>
1. R&D Product Design	--	4	8	12
2. Plan Market Research	--	3	3.5	7
3. Manufacturing Study	1	3	4	5
4. Build Prototype	1	7	8	15
5. Prepare Market Survey	1	3	4	5
6. Develop Cost Estimates	3	3.5	4	4.5
7. Prelim. Product Tests	4	3.5	5	6.5
8. Market Survey	2,5	5.5	6.5	10.5
9. Price & Forecast Report	8	2	3	4
10. Final Report	6,7,9	2	3	4

12. Suppose that you are going to construct a small storeroom with an office. The structure will be used to store computer equipment and will have a large air conditioning system placed in the attic of the storeroom. The equipment cannot be installed until the steel roof frame is in place, but must be installed before the roof is built. The roof frame is to extend down over the top of the exterior cement wall and cannot be installed until the wall is complete. Suppose also that the company has decided that it will not put the asphalt paving around the storeroom until the fence has been erected and the exterior wall of the storeroom is completed. The times for these stages and corresponding activities are given below.

- a) Develop an appropriate network.
- b) Give project completion time and critical path.

<u>STAGE</u>	<u>TIME</u>	<u>PREDECESSOR</u>
1. Install Air Conditioning Activities:		
a. Install Electric	7	
b. Install A.C.	3	Install Electric
2. Construct Roof Frame Activities:		
a. Dig Floor	2	
b. Pour Floor	3	Dig Floor
c. Erect Steel	4	Pour Floor
3. Place Roof On Activities:		
a. Construct Roof	10	
4. Build Exterior Wall Activities:		
a. Put Up Walls	5	
5. Pave Around Storeroom Activities:		
a. Lay Gravel	2	
b. Pour Asphalt	3	Lay Gravel
c. Roll Asphalt	2	Pour Asphalt
6. Erect Fence Activities:		
a. Put Support Posts In	7	
b. Install Fence Panels	6	Put Support Posts In

# CHAPTER 14

## QUALITY ASSURANCE

### INTRODUCTION

Two quality control models will be presented in this chapter. The first model is the acceptance sampling model and the second is the process control model.

When shipments or large numbers of pieces are received by a firm from a supplier it is common to randomly select a number of pieces from the shipment (lot) and inspect the sampled pieces. If more than a specified number of the sampled pieces are defective the entire shipment or lot is rejected, otherwise the lot is accepted. Random sampling reduces the cost of inspection but it does not provide full assurance that the percentage of defectives in the inspected random sample is similar to the percentage of defectives in the entire lot. The acceptance sampling model described in detail below provides considerable information on how closely and under which conditions the results of the random sampling process represent the actual condition of the entire lot.

Process quality control, also called process control, is a statistical sampling process which selects at predetermined frequencies samples from the process output and inspects the pieces in the sample to ensure that they are within process specifications. The process specifications are measured in quantitative terms such as grams of weight, millimeters in diameter, etc. The number of pieces in each sample also is specified beforehand. On the basis of several samples the computer then determines the grand mean of the dimensions of the process output as well as the upper control limit (UCL) and the lower control limit (LCL) of the process mean dimension. Any future sample means then are considered to be acceptable, if their dimensions fall within the upper and lower control limits.

Control charts are also used when the process characteristic is counted, as in number of defective in a batch, rather than measured. The control charts we use for counting number of defective are called attribute control charts. There are two types of attribute control charts, one for the number of defective items in a sample, called the p-chart, and one for the number of defects in a composite unit such as number of spelling errors on a page. This type of control chart we call a c-chart.

Below we shall describe and illustrate both the acceptance sampling and the process control models in more detail.

### ACCEPTANCE SAMPLING

The acceptance sampling model provides information on the probability of accepting a lot or shipment as a function of the actual percent or fraction of defectives in the lot for



those cases where the number of pieces in the lot ( $N$ ), the number of pieces in the sample ( $n$ ) and the maximum number of allowable defective pieces in the sample ( $c$ ) are specified. That is, let  $X$  be the number of defectives in a sample of size  $n$ . Then  $X$  has a Binomial distribution with parameters  $n$  and  $p$ , where  $p$  is the fraction of defectives. The probability of having  $x$  defectives is given as,

$$P[X = x] = \binom{n}{x} p^x (1 - p)^{n-x} \quad x=0,1,\dots,n$$

To find the probability of having  $c$  or fewer defectives in the sample, add  $P[X = x]$  for  $x$  from 0 to  $c$ ,

$$P[X \leq c] = \sum_{x=0}^c P[X = x] = \sum_{x=0}^c \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}$$

Based on the above information the quality control analyst can then plot the probability of accepting a lot as a function of the actual percent or fraction of defectives in the lot. The resulting graph which connects the plotted points is called the operating characteristic (OC) curve. Figure 14-1 represents the OC curve for  $N = 5000$ ,  $n = 15$ , and  $c = 2$ . Note that the plotted points are spaced .05 fractions or the equivalent 5 percentage points apart. Other spacings of the fraction of defectives are of course also possible.

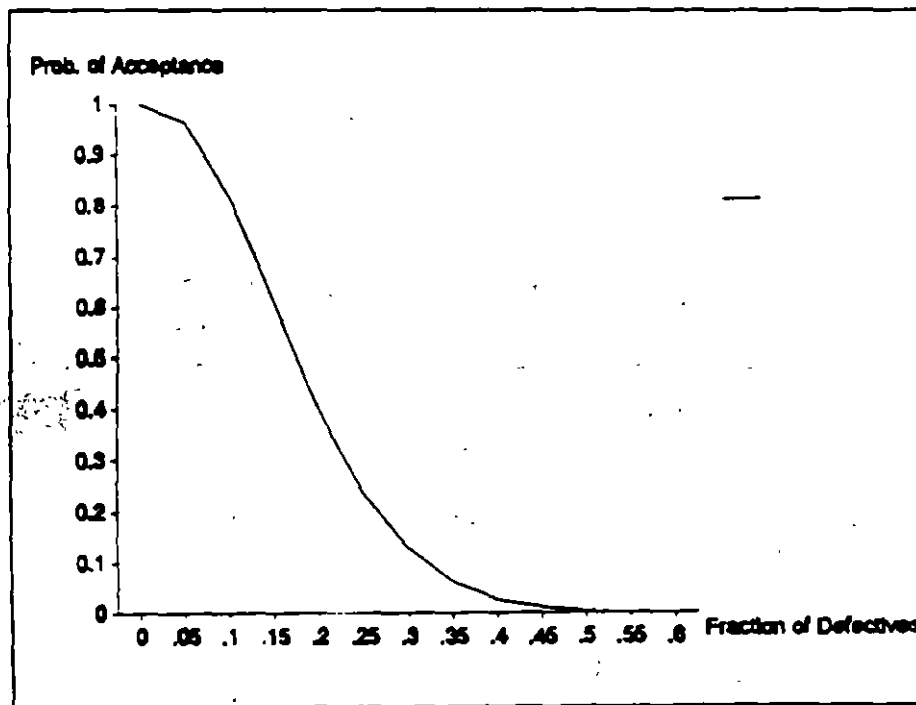


Figure 14-1: Operating Characteristic Curve

There are several underlying assumptions that must be satisfied before the operating characteristic curve can be applied. First, the probability of any one item being defective must be independent of any other item being defective. Secondly, the probability calculations of small samples are calculated by using the Binomial probability distribution (as discussed above) while for larger samples (over 20 pieces) the Poisson approximation to the Binomial is utilized. That is, let  $\mu = np$  be the expected number of defectives. Then the probability of  $x$  defectives, in a sample of size  $n$ , is approximated by,

$$P\{X = x\} = \frac{\mu^x e^{-\mu}}{x!}$$

The probability of having  $c$  or fewer defectives is determined in a similar form to that of the Binomial equation. That is,

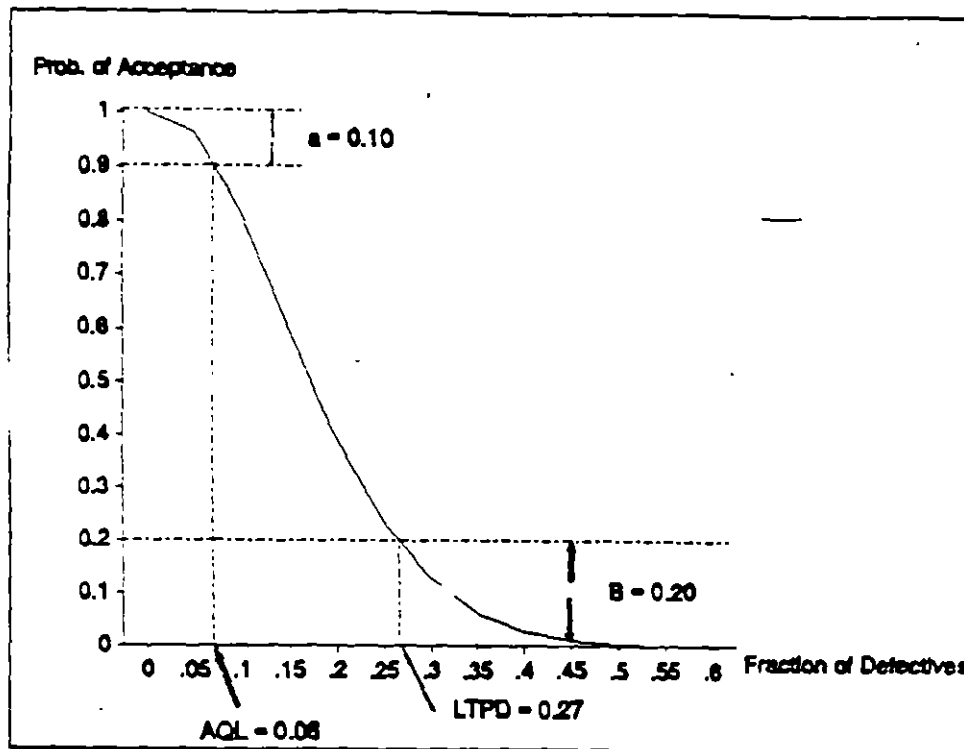
$$P\{X \leq c\} = \sum_{x=0}^c P\{X = x\} = \sum_{x=0}^c \frac{\mu^x e^{-\mu}}{x!}$$

Utilizing the operating characteristic curve you will discover that the curve will be generally lowered if, (1) the sample size ( $n$ ) is increased; and (2) the maximum number of allowed defective pieces ( $c$ ) is decreased. Lowering the curve, of course, means that the probability of acceptance will be reduced for a given fraction of defectives in the entire lot. Similarly, the operating characteristic curve can also be raised by doing the opposite of what was done above.

To determine what is the most desirable operating characteristic curve is not an easy task. However, from the above description and with the use of the computer model you can quickly generate any number of different operating characteristic curves.

To approximate the desirable operating characteristic curve we need to specify what is an acceptable fraction of defectives in a lot. This acceptable level is called the acceptable quality level (AQL). It is shown on Figure 14-2 and is .06 or 6 percent. Connecting the AQL with the OC curve reveals that the Type I error ( $\alpha$ ) is 10 percent. The Type I error is the probability of rejecting an acceptable lot, that is, a lot which has less than 6 percent of defectives.

It is also necessary to specify a fraction of defectives in a lot beyond which it is totally unacceptable. This fraction is called the lot tolerance percent defective (LTPD), a term coined by statistical quality control people but which is not very descriptive. A more descriptive term would be "unacceptable quality level." However, we shall stay with common practice and use the LTPD term. In the example on Figure 14-2 it is .27 or 27 percent. Connecting the LTPD with the OC curve reveals the type II error ( $\beta$ ) which is 20 percent. The type II error is the probability of accepting an unacceptable lot, that is a lot which has more than 27 percent of defectives.



Notes: AQL = Acceptance Quality Level  
 LTPD = Lot Tolerance Percent Defective

Figure 14-2: Defining Type I ( $\alpha$ ) and Type II ( $\beta$ ) Errors

With the above information we can specify such parameters as acceptable quality level (AQL) and lot tolerance percent defective (LTPD) or parameters for type I error ( $\alpha$ ) and type II error ( $\beta$ ). By varying the sample size ( $n$ ) and/or the maximum number of defectives allowed in a sample ( $c$ ) the above specifications can be approximated. Experimentation with the computer model will reveal that relatively large samples are required if both AQL and LTPD are set at low values.

Another useful curve that can be constructed from the data generated for the OC curve is the average outgoing quality (AOQ) of the inspected lots measured in terms of fraction of defectives. The average outgoing quality is found by multiplying the fraction defective of the lot times the probability of acceptance of the lot. The computer model provides the results for each specific increment of the lot fraction defective.

Plotting the calculated values of the AOQ produces the AOQ curve as shown in Figure 14-3. Note that the AOQ values are based on the previous examples. The AOQ curve provides the maximum average outgoing quality level as a function of the lot fraction defective for a specific sampling plan. A sampling plan is a specification of the sample size ( $n$ ) and the allowed number of defectives ( $c$ ) in a sample.

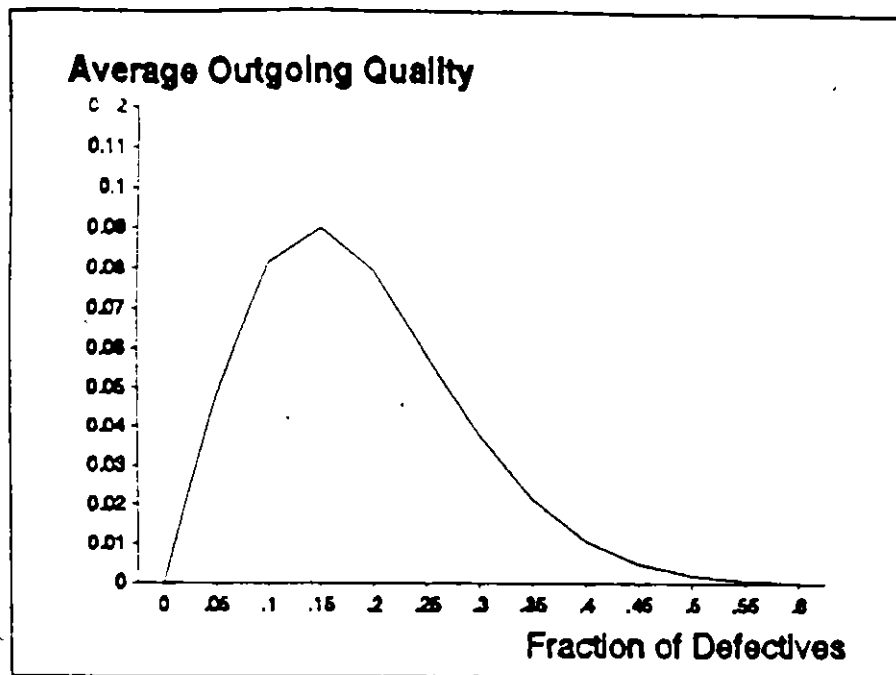


Figure 14-3: Average Outgoing Quality Curve

## PROCESS CONTROL OF QUALITY

In process control of quality the main concern is that the process continues unchanged. The statistical control method of process control is designed to identify if the process changes, i.e., goes out of control. For instance, if a box filling process is designed to fill a box so that it contains on average 301 grams and if it is able to do that when the box filling equipment is performing satisfactorily, i.e., is under control, then a statistical control process can be developed to identify when the process changes and either under-fills or overfills the boxes.

In process control we therefore want to identify when a change occurs in the process. To identify a change in the process we take small samples of say 4 or 5 pieces (boxes), calculate the mean of the measurement we are controlling and then compare that mean value with the means of previous samples. It is also common practice to plot the means on a chart which is called a process or quality control chart. A control chart for means has an upper value called the upper control limit (UCL) and a lower value, called the lower control limit (LCL). If the calculated mean of the sample falls within the two limits, that is between the LCL and the UCL then the process is considered to be under control. If it falls outside the limits then we may want to investigate if the process has changed and needs to be adjusted.

To illustrate how the upper and lower control limits are estimated we shall take five samples of five pieces with measurements or observations as shown in Table 14-1. For each

sample we calculate the sample mean and record the sample range. For the 25 pieces we also determine the grand mean as shown, and for the five samples we also determine the mean of the range as shown. The next step is to calculate the standard deviation of the sample means which is generally referred to as the standard error of the mean. This standard error will then be used as an estimate of the process standard error. The estimated standard error amounts to 1.57, the grand mean is 58.8, and the range mean is 9.8.

<u>Sample</u>	<u>Observations of Sample Pieces</u>					<u>Total</u>	<u>Sample Mean</u>	<u>Range</u>
1	59	58	57	54	56	284	56.8	5
2	56	52	60	57	55	280	56.0	8
3	58	74	52	79	71	334	66.8	27
4	62	58	59	58	57	294	58.8	5
5	54	55	54	58	57	278	55.6	4
Aggregate Total or Mean						1470	58.8	9.8

**Table 14-1: Illustration of Determining Sample Means and Grand Mean**

To determine the upper control limits for the sample mean we shall take the grand mean and add to it two standard errors. For the lower control limits of the sample mean we shall take the grand mean and subtract two standard errors. Sample mean control limits with two standard errors will cover slightly over 95 percent of measurements if the process remains in control. If a sample mean falls outside of the control limits there is thus less than a five percent chance that the process is still in control.

For the illustration the control limits then are  $UCL = 68.08$ , and  $LCL = 49.52$ . In Figure 14-4 the two control limits and the grand mean are plotted on the process control chart and future sample means can be plotted on it for future samples.

When the process variation (standard deviation of the mean) is not available, the mean range (referred to as  $R\text{-BAR}$ ), is used to estimate the variability in sample mean. The equations for the control limits are given as,

$$LCL_{\bar{x}} = M - A_2 \bar{R}$$

$$UCL_{\bar{x}} = M + A_2 \bar{R}$$

where  $M$  is the grand mean and values of  $A_2$  are tabulated in Grant<sup>1</sup>.

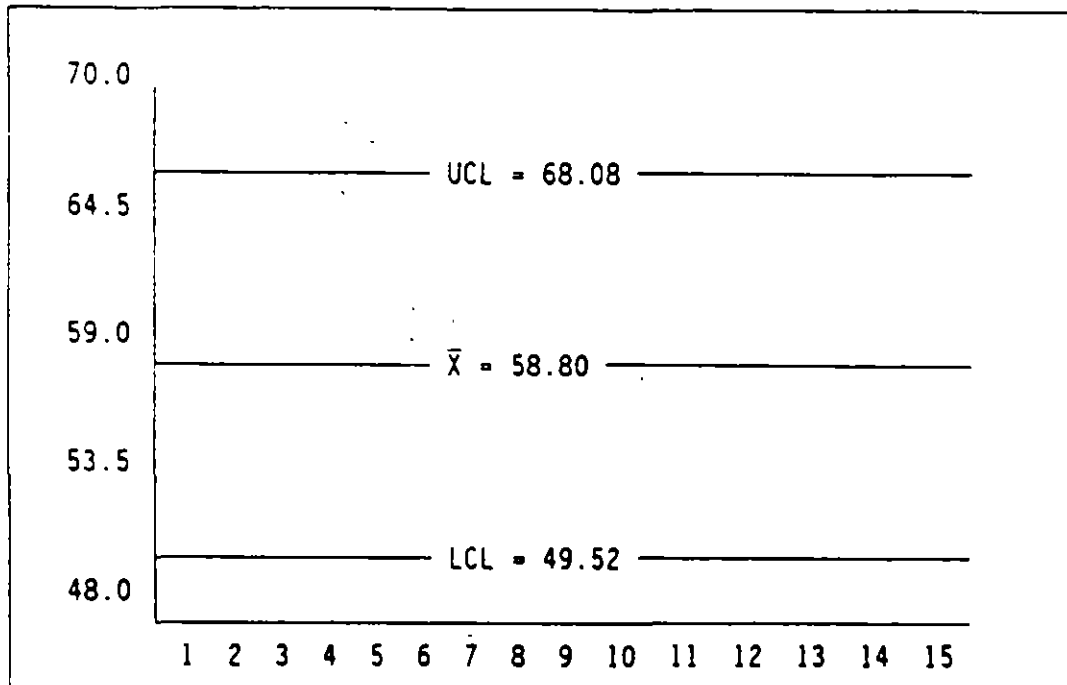


Figure 14-4: Process Control Chart for Sample Means

We can also develop a sample range control chart as shown on Figure 14-5. The mean of the sample range is 9.8. The upper and lower control limits are determined by an interval look up chart which is based on established and accepted quality control procedures (see for example Grant, *et al*). For a sample size of five observations the lower control limit for the range is zero and the upper control limit is based on multiplying the mean of the sample range by 2.11, which then amounts to 20.67. Both the upper and lower control limits of the sample range are based on three standard errors. You can of course also specify other values for the number of standard errors.

## PROCESS CONTROL FOR ATTRIBUTES

To determine the control charts for number of defectives in a sample we use the p-chart. Similarly, to control numbers of defects on an assembly, component or system we

<sup>1</sup>E. L. Grant and R. Leavenworth, *Statistical Quality Control* (New York: McGraw-Hill, 1964).

use the c-chart.

The theoretical basis for the p-chart is the binomial distribution. However, for large sample sizes the normal distribution is used as an approximation. The p-chart is constructed in the same way as the mean process control chart with both upper and lower control limits.

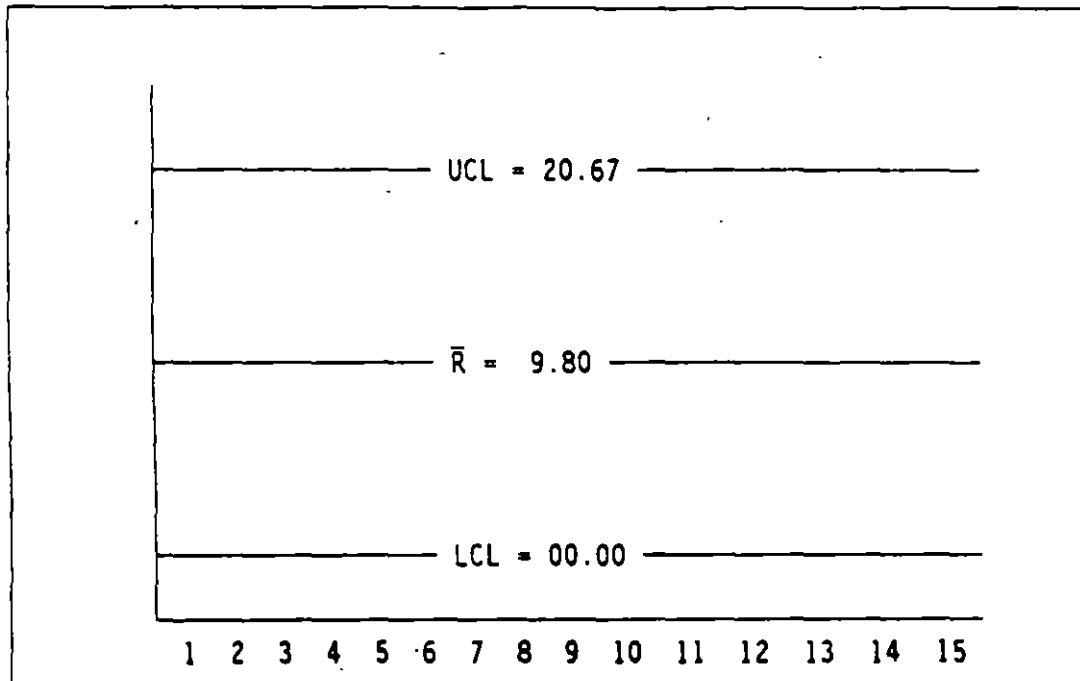


Figure 14-5: Process Control Chart for Sample Ranges

The grand mean or center line on a p-chart is the average of the fraction defectives in the samples on which the center line,  $\bar{p}$ , is based. The standard error of the sampling distribution can be estimated using the formula,

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{n}}$$

Upper and lower control limits can then be determined for three standard errors by the formulas,

$$UCL = \bar{p} + 3\sigma_p$$

$$LCL = \bar{p} - 3\sigma_p$$

For example, consider the data presented in Table 14-2. The entries represent the number of defectives in samples of size 10. As seen from the table, the mean number of

defectives is 0.133 and the standard error of the mean is 0.107. Using 95% percent control limits, the lower control limit is 0 (the control limit is actually negative but has been replaced with 0) and the upper control limit is 0.344.

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Mean	STDV
Defective	2	1	3	0	1	2	1	0	2	1	0	3	0.133	0.107

**Table 14-2: Number of Defectives for Samples of Size 10**

The same procedure as above is used to determine upper and lower control limits for the c-chart. The underlying distribution for the c-chart is the Poisson distribution. It assumes that number of defects occur over some continuous region. The mean number of defects per unit, i.e. spelling errors per page, is then identified as  $c$  and the standard error is  $\sqrt{c}$ . Upper and lower control limits can then be determined for two standard errors by the formulas:

$$UCL = \bar{c} + 2\sqrt{\bar{c}}$$

$$LCL = \bar{c} - 2\sqrt{\bar{c}}$$

For example, consider the data presented in Table 14-3. The entries represent the number of defects per unit. As seen from the table, the mean number of defects is 5.4 and the standard error of the mean is 2.32. Using 3 sigma control limits, the lower control limit is 0 and the upper control limit is 12.37.

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Mean	STDV
Defects	5	4	7	9	2	8	2	5	7	7	8	3	4	6	4	5.4	2.3

**Table 14-3: Number of Defects Per Unit**

In both the p-chart and c-chart situations the lower control limit cannot be lower than zero. However, the above formulas could actually determine negative values for the lower control limit. If this occurs then set the lower control limit equal to zero.



## EXAMPLE 1 - ACCEPTANCE SAMPLING

This example involves the acceptance sampling problem presented earlier in this chapter. To solve the problem, load DSSPOM into the computer and select the Quality Assurance Module. When presented with the Quality Assurance main menu, move the pointer to the INPUT option. For this module, the INPUT option has four sub-options as shown below.

```
Input Edit Print File Solve Quit
Acceptance Sampling
X-Bar Chart
P-Chart
C-Chart
```

The menu will initially point to the Acceptance Sampling sub-option. Press the <ENTER> key to select this choice. The program will begin the data entry process by placing the pointer in the title field. Type ACCEPTANCE SAMPLING and press <ENTER>. The remainder of the data entry process is shown below.

```
Problem title: ACCEPTANCE SAMPLING

Lot Size:      5000

Sample Size:   15

Acceptable Number of Defective:      2

Increment For the Fraction of Defective: .05

Enter problem parameters as requested. Press RETURN to
accept, or ESC to exit. Sample size must be less than or
equal to lot size. Parameter values should be within
0-99999.
```

You may now save the model on disk for future use. To save the model, move the pointer to the FILE option and select the Save Current File sub-option then press <ENTER>. The computer will display the current drive and sub-directory and request a file name. Enter an appropriate DOS file name and use the suffix QLY to indicate that

the file contains a quality assurance problem. You may also obtain a hard copy printout of the problem. Move the pointer to the PRINT option and press <ENTER>. The computer will ask you to make sure that the Printer is On and Ready. Press <ENTER> to obtain a printout.

You are now ready to solve the above acceptance sampling problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option. The computer will pause for a few seconds and then display the solution report as shown below.

Problem Title: ACCEPTANCE SAMPLING		
Fraction of defective (p)	Prob. of acceptance	Average out-going quality
-----	-----	-----
0.0000	1.0000	0.0000
0.0500	0.9638	0.0482
0.1000	0.8159	0.0816
0.1500	0.6042	0.0906
0.2000	0.3980	0.0796
0.2500	0.2361	0.0590
0.3000	0.1268	0.0380
0.3500	0.0617	0.0216
0.4000	0.0271	0.0108
0.4500	0.0107	0.0048
0.5000	0.0037	0.0018
0.5500	0.0011	0.0006

Problem Title: ACCEPTANCE SAMPLING		
Fraction of defective (p)	Prob. of acceptance	Average out-going quality
-----	-----	-----
0.6000	0.0003	0.0002
0.6500	0.0001	0.0000

As seen from the above output report, the probability of acceptance for a sample from a population with no defective (0 percent) is 1. This probability is 0.9638 when there are 5 percent defective, 0.8159 for 10 percent defective, etc.. The average out-going quality is 0, 0.0482 (or 4.82 percent), 0.0816 (or 8.16 percent) for 0, 5 and 10 percent defective. The average out-going quality represents the expected number of percentage of defective which will be included in the accepted lots. For the above example, this value is maximum for a population in which 15 percent is defective. The plots of the probability of acceptance and average outgoing quality are represented in Figures 14-1 and 14-3.

## EXAMPLE 2- PROCESS CONTROL: X-BAR CHART

In this example you will solve the process control problem presented in Table 14-1. Load DSSPOM into the computer and select the Quality Assurance module. After a few seconds the computer will load the program and display the main menu. Move the pointer to the INPUT option.

The program will begin the data entry process by displaying the four sub-options associated with INPUT option. Move the bar down to X-BAR Chart sub-option and press <ENTER>. The computer will resume the data entry process by placing the pointer in the title field. Type "PROCESS CONTROL" and press <ENTER>. The initial data entry screen is presented below.

Problem title: PROCESS CONTROL
Number of Samples: 5
Number of Observations in Each Sample: 5

Enter problem parameters as requested. Press RETURN to accept, or ESC to exit. Maximum number of samples is 50, maximum number of observations (per sample) is 10.

Enter 5 for the number of samples and 5 for the number of observations per sample. The computer will then ask if you are ready to continue with the spread sheet data entry for the observations as shown below.

Continue with the observations (Y/N) Y

Press <ENTER> to begin the spread sheet data entry process. The computer will display the initial spread sheet. Enter the sample observations into their appropriate cells. Begin with the sample observations in the first column (entering data one column at a time is much easier than one row at a time since you do not need to press the <ENTER> key to move to another cell). Move the pointer to cell B2 and type 59 then press the down arrow key. Then type 56 and press the down arrow key. Enter all the of the observations in column 1. When you reach cell B6, press the <ENTER> key and move the pointer up to cell C2. Next enter the data in column 2 and proceed to enter all of the observations in a similar fashion. The completed spread sheet is shown below.

F6 57							READY
	A	B	C	D	E	F	
1	Sample	Obser 1	Obser 2	Obser 3	Obser 4	Obser 5	
2	Sample	59.00	58.00	57.00	54.00	56.00	
3	Sample	56.00	52.00	60.00	57.00	55.00	
4	Sample 3	58.00	74.00	52.00	79.00	71.00	
5	Sample 4	62.00	58.00	59.00	58.00	57.00	
6	Sample 5	54.00	55.00	54.00	58.00	57.00	

After entering all of the observations, press <F10> to keep the data in memory and exit from the spread sheet data editor.

You may now save the model on disk for future use. To save the model, move the pointer to the FILE option and select the Save Current File sub-option then press <ENTER>. The computer will display the current drive and sub-directory and requests a file name. Enter an appropriate DOS file name and use the suffix QLY to indicate that the file contains a quality assurance problem. You may also obtain a hard copy printout of the problem. Move the pointer to the PRINT option and press <ENTER>. The computer will ask you to make sure that the Printer is On and Ready. Press <ENTER> to obtain a printout.

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option and press <ENTER>. The computer will pause for a few seconds and then report the solution as shown below.

Problem Title: PROCESS MEAN			
Control limits for the Sample Mean:			
	R-BAR	2-Sigma	3-Sigma
Lower control limit =	53.116	49.52	44.88
Grand Mean =	58.800		
Upper control limit =	64.484	68.08	72.72
Control limits for the Sample Range:			
Lower control limit =	0.000		
Mean Range =	9.800		
Upper control limit =	20.678		
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">           Wish to see the sample means (Y/N) Y         </div>			

As seen from the above solution reports, the grand mean is 58.8 and the mean range is 9.8.

The sample mean lower and upper control limits, based on R-Bar (mean range formula), are 53.116 and 64.484, respectively. These values indicate that a sample with a mean outside of this range is out of control. The 2-sigma and 3-sigma control limits are somewhat wider. In particular, the 2-sigma lower and upper control limits are 49.52 and 68.08. This interval covers about 95 percent of the sample means (assuming a Normal distribution). Using the 2-sigma control limits will result in more samples to pass inspections. However, the chance of an out-of-control process not being detected (type II error) will also increase.

Similarly, the lower and upper control limits for the mean range are 0 and 20.678. A sample having a range outside of these limits is out of control. You can also request a list of the sample means by providing a positive response to the question displayed at the bottom of the screen. Press <ENTER> to obtain a list of the sample means as shown below.

Problem Title: PROCESS CONTROL		
Sample	Mean	In Control
Sample 1	56.800	Yes
Sample 2	56.000	Yes
Sample 3	66.800	No
Sample 4	58.800	Yes
Sample 5	55.600	Yes

As seen from the above output report, using the R-Bar control limits, the third sample is out of control. The sample mean for sample number 3 is 66.8 which is 4.4 units above the upper control limit.

### **EXAMPLE 3- PROCESS CONTROL: P-CHART**

In this example you will solve a p-chart process control problem. Consider the data presented in Table 14-2, the problem is to determine various intervals for the fraction defective. To solve this problem, Load DSSPOM into the computer and select the Quality Assurance module. After a few seconds the computer will load the program and display the main menu. Move the pointer to the INPUT option and select the P-Chart sub-option then press <ENTER>.

The computer will resume the data entry process by placing the pointer in the title field. Type "P-CHART EXAMPLE" and press <ENTER>. The initial data entry screen is presented below.

Problem title: P-CHART EXAMPLE

Number of Samples: 12

Number of Observations in Each Sample: 10

Enter problem parameters as requested. Press RETURN to accept, or ESC to exit. Maximum number of samples is 50.

Enter 12 for the number of samples and 10 for the number of observations per sample. The computer will then ask if you are ready to continue with the spread sheet data entry for the observations as shown below.

Continue with the observations (Y/N) Y

Press <ENTER> to begin the spread sheet data entry process. The computer will display the initial spread sheet. Enter the number of defectives in each sample in column B across from the associated sample number. For example, enter 2 in cell B2 as the number of defectives in the first sample. Then press the down arrow to move the pointer to cell B3. Enter 1 and press the down arrow key again. Enter all of the 12 observations in column B. The completed spread sheet is shown below.

A1	Sample	
	A	B
	Sample	# of Def
1	Sample 1	2.00
2	Sample 2	1.00
3	Sample 3	3.00
4	Sample 4	0.00
5	Sample 5	1.00
6	Sample 6	2.00
7	Sample 7	1.00
8	Sample 8	0.00
9	Sample 9	2.00
10	Sample 10	1.00
11	Sample 11	0.00
12	Sample 12	3.00

After entering all of the observations, press <F10> to keep the data in memory and exit from the spread sheet data editor.

You may now save the model on disk for future use. To save the model, move the

pointer to the FILE option and select the Save Current File sub-option then press <ENTER>. The computer will display the current drive and sub-directory and requests a file name. Enter an appropriate DOS file name and use the suffix QLY to indicate that the file contains a quality assurance problem. You may also obtain a hard copy printout of the problem. Move the pointer to the PRINT option and press <ENTER>. The computer will ask you to make sure that the Printer is On and Ready. Press <ENTER> to obtain a printout.

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option and press <ENTER>. The computer will pause for a few seconds and then report the optimal production schedule as shown below.

Problem Title: P-CHART EXAMPLE					
p-Chart Control limits:					
Mean Number of Defective = 0.133					
Standard Error of the Mean = 0.107					
Interval percent	80%	85%	90%	95%	99%
Lower Limit	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Upper Limit	0.2715	0.2881	0.3102	0.3440	0.4101

As seen from the above solution reports, the mean number of defectives is 0.133 and the standard error of the mean is 0.107. The output consists of five different lower and upper control limits for 80%, 85%, 90%, 95%, and 99% levels. For example, the 95% interval level is 0-0.34 which indicates that, in a sample of size 10, the fraction of defectives must be within 0 and 0.34 (or about 34 percent).

#### EXAMPLE 4- PROCESS CONTROL: C-CHART

In this example you will solve a c-chart process control problem: Consider the data presented in Table 14-3; the problem is to determine various control intervals for the number of defects per unit. To solve this problem, Load DSSPOM into the computer and select the Quality Assurance module. After a few seconds the computer will load the program and display the main menu. Move the pointer to the INPUT option and select the C-Chart sub-option then press <ENTER>.

The computer will resume the data entry process by placing the pointer in the title field. Type "C-CHART EXAMPLE" and press <ENTER>. The initial data entry screen

is presented below.

Problem title. C-CHART EXAMPLE

Number of Samples: 15

Enter problem parameters as requested. Press RETURN to accept, or ESC to exit. Maximum number of samples is 50.

Enter 15 for the number of samples. The computer will then ask if you are ready to continue with the spread sheet data entry for the observations as shown below.

Continue with the observations (Y/N) Y

Press <ENTER> to begin the spread sheet data entry process. The computer will display the initial spread sheet. Enter the number of defects in each unit in column B across from the associated sample number. For example, enter 5 in cell B2 as the number of defects in the first unit. Then press the down arrow to move the pointer to cell B3. Enter 4 and press the down arrow key again. Enter all of the 15 observations in column B. The completed spread sheet is shown below.

B16 4		READY	
	A	B	
	Sample	# of Def	
1	Sample 1	5.00	
2	Sample 2	4.00	
3	Sample 3	7.00	
4	Sample 4	9.00	
5	Sample 5	2.00	
6	Sample 6	8.00	
7	Sample 7	2.00	
8	Sample 8	5.00	
9	Sample 9	7.00	
10	Sample 10	7.00	
11	Sample 11	8.00	
12	Sample 12	3.00	
13	Sample 13	4.00	
14	Sample 14	6.00	
15	Sample 15	4.00	



After entering all of the observations, press <F10> to keep the data in memory and exit from the spread sheet data editor.

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option and press <ENTER>. The computer will pause for a few seconds and then report the optimal production schedule as shown below.

Problem Title: C-CHART EXAMPLE							
c-Chart Control limits:							
Mean Number of Defective	=	5.400					
Standard Deviation of the Mean	=	2.324					
No. of Sigmas		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
-----							
Lower Limit		3.08	1.91	0.75	0.00	0.00	0.00
Upper Limit		7.72	8.89	10.05	11.21	12.37	13.53

As seen from the above report, the mean number of defects is 5.4 and the standard deviation is 2.324. The output report includes six different control intervals for different sigma values. For example, the control limits associated with 3 sigma values is 0-12.37. This implies that as long as the number of defects in the process is within this range, the process is in control.

## PROBLEMS

1. Run the acceptance sampling module and plot the operating characteristic curve and average outgoing quality curve for a batch of 4000 pieces with a random sample of 20 pieces and an allowed number of defectives of 2 pieces. Use fraction of defective increments of 0.05.
2. Run the acceptance sampling module and plot both the operating characteristic curve and the average outgoing quality curve for a batch of 7500 pieces with a random sample of 16 pieces and an allowed number of defectives of 1. Use fraction of defective increment of 0.025.
3. For the observations in the six samples below run the mean and range process control module and plot both the mean and range control charts.

Samples	Observations			
	1	2	3	4
1	19.4	19.2	18.9	19.7
2	18.0	18.9	19.2	19.3
3	19.6	19.4	19.1	19.0
4	18.6	19.1	18.8	18.9
5	18.4	18.9	18.7	19.0
6	18.8	18.4	18.9	18.7

4. Run the p-chart control chart module for 9 samples each consisting of thirty pieces with 0, 1, 0, 1, 2, 0, 0, 1, 2 defectives per sample. Plot the upper and lower control limits and the p for the 90 percent confidence interval.
5. Run the c-chart control chart module for 12 pages which show spelling errors of 5, 4, 3, 2, 4, 2, 3, 5, 6, 0, 1, 4 errors per page respectively. Plot the upper and lower control limits and the c for two standard errors.
6. Run the p-chart control chart module for 6 samples each consisting of fifty pieces with 2, 3, 5, 0, 4, 1 defectives per sample. Plot the upper and lower control limits and the p for the 85 percent confidence interval.

7. Run the c-chart control chart module for 20 randomly selected yards of cloth which show defects per yard of cloth of 2, 0, 3, 4, 5, 6, 0, 1, 2, 3, 1, 4, 2, 3, 0, 1, 4, 3, 2, 1 defects per yard respectively. Plot the upper and lower limits and the  $c$  for three standard errors.
  
8. Run the acceptance sampling module and plot the operating characteristic curve and average outgoing quality curve for a batch of 4000 pieces with a random sample of 20 pieces and an allowed number of defectives of 2 pieces. Use fraction of defective increments of 0.05.
  
9. Rockford Manufacturing randomly inspects samples of  $n=90$  of a component for one of its wheel assemblies each time a shipment of about 2500 items ( $N=2500$ ) is received. The acceptable quality level (AQL) is 0.02 and lots are rejected if number of defectives in a lot is 3 or more ( $C=2$ ). Develop OC curve. What is probability ( $\beta$ ) that a lot will be accepted for LTPD of 0.05? What is  $\alpha$  for AQL=0.02?
  
10. Develop the operating characteristics curve for  $N=2600$ ,  $n=80$ ,  $c=2$ . What is  $\alpha$  if AQL is 0.02 and  $\beta$  if LTPD = 0.06? Plot the average outgoing quality level (AOQL) for 0.02 increments.
  
11. Develop the operating characteristics curve for  $N=1500$ ,  $n=40$ ,  $c=1$ . What is  $\alpha$  for AQL = 0.03 and  $\beta$  if LTPD = 0.06. Plot the average outgoing quality level for 0.05 increments.
  
12. Erie county has averaged 2.3 traffic deaths per week during the past twelve months. Develop a c-chart with  $\pm 2$  standard deviations.
  
13. Grain Belt Cereals monitored its 15 ounce corn flake box packing machine by taking random samples at about 107 minute intervals to ensure the correct weight was packed in each box. Underweight boxes could be construed as cheating the public and overweight boxes would be costly to the company. Below is a listing of 12 recorded samples of four boxes each. Develop a  $\bar{x}$ -chart and a R chart with  $\pm 2$  standard deviations. Estimate the sample variance from the twelve samples.

Sample	Box Weights			
1	15.08	15.11	15.02	15.09
2	15.02	15.03	15.04	15.06
3	14.99	14.96	14.98	15.01
4	15.00	15.06	15.10	15.06
5	14.96	14.97	14.95	14.93
6	14.98	15.06	15.07	15.01
7	15.02	15.09	15.10	15.11
8	15.05	15.01	14.99	15.03
9	15.01	15.03	15.05	15.05
10	15.02	15.06	15.10	15.09
11	14.98	14.99	14.99	15.01
12	15.01	15.06	15.07	15.11

14. Develop a c-chart with  $\pm 2$  standard deviations for the number of arrests per week of the Waterford Police Department. The arrest data for the past 18 weeks is listed below.

Week	Number of Arrests	Week	Number of Arrests
1	11	10	11
2	6	11	9
3	5	12	12
4	19	13	14
5	7	14	16
6	9	15	17
7	11	16	8
8	15	17	12
9	14	18	13

15. For the N.Y. State Department of Transportation's Monroe County Office, develop a p-chart for the number of randomly-selected automobiles which failed annual inspections because of unacceptable tires. Number of randomly selected automobiles number 25 per week.

Week	Number of Failures	Week	Number of Failures
1	2	11	2
2	5	12	0
3	1	13	5
4	0	14	3
5	6	15	2
6	1	16	1
7	3	17	0
8	5	18	2
9	0	19	1
10	1	20	3

19. Grain Belt Cereals monitored its 15 ounce corn flake box packing machine by taking random samples at about 107 minute intervals to ensure the correct weight was packed in each box. Underweight boxes could be construed as cheating the public and overweight boxes would be costly to the company. Below is a listing of 12 recorded samples of four boxes each. Develop a  $\bar{x}$  chart and a R chart with  $\pm 2$  standard deviations. Estimate the sample variance from the twelve samples.

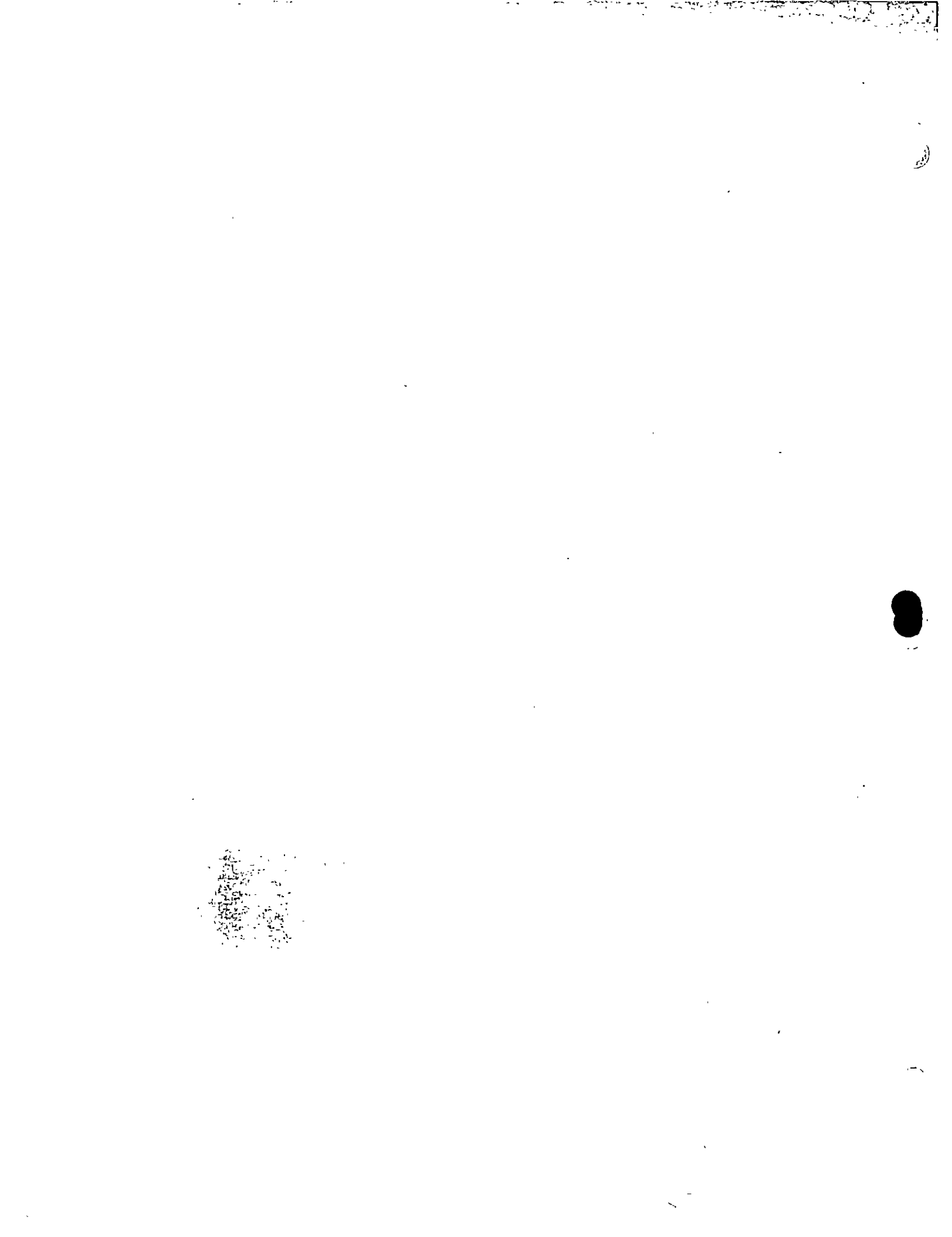
Sample	Box Weights			
1	15.08	15.11	15.02	15.09
2	15.02	15.03	15.04	15.06
3	14.99	14.96	14.98	15.01
4	15.00	15.06	15.10	15.06
5	14.96	14.97	14.95	14.93
6	14.98	15.06	15.07	15.01
7	15.02	15.09	15.10	15.11
8	15.05	15.01	14.99	15.03
9	15.01	15.03	15.05	15.05
10	15.02	15.06	15.10	15.09
11	14.98	14.99	14.99	15.01
12	15.01	15.06	15.07	15.11

20. Develop a c-chart with  $\pm 2$  standard deviations for the number of arrests per week of the Waterford Police Department. The arrest data for the past 18 weeks is listed below.

Week	Number of Arrests	Week	Number of Arrests
1	11	10	11
2	6	11	9
3	5	12	12
4	19	13	14
5	7	14	16
6	9	15	17
7	11	16	8
8	15	17	12
9	14	18	13

21. For the N.Y. State Department of Transportation's Monroe County Office, develop a p-chart for the number of randomly-selected automobiles which failed annual inspections because of unacceptable tires. Number of randomly selected automobiles number 25 per week.

Week	Number of Failures	Week	Number of Failures
1	2	11	2
2	5	12	0
3	1	13	5
4	0	14	3
5	6	15	2
6	1	16	1
7	3	17	0
8	5	18	2
9	0	19	1
10	1	20	3





**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS PARA EJECUTIVOS Y DIRECTIVOS**

**- 1995 -**

**TECNICAS DE PLANEACION Y CONTROL DE LA PRODUCCION**

Del 19 al 23 de junio

DECISION SUPPORT SYSTEMS

FOR

PRODUCTION AND OPERATIONS MANAGEMENT

(DSSPOM)

AUTORES: VAHID LOTFI  
C. CARL PEGELS

EXPOSITOR: M. EN I. RUBEN TELLEZ SANCHEZ  
Palacio de Minería  
1995





# DECISION SUPPORT SYSTEMS

FOR

# PRODUCTION AND OPERATIONS MANAGEMENT (DSSPOM)

SECOND EDITION

*Vahid LOTFI, Ph.D.*

The University of Michigan-Flint  
Flint, Michigan 48502

*C. Carl PEGELS, Ph.D.*

State University of New York at Buffalo  
Buffalo, New York 14260

**IRWIN**

Homewood, IL 60430  
Boston, MA 02116

## TABLE OF CONTENTS

<i>Chapter</i>	<i>Page</i>
Overview of Decision Support Systems for POM . . . . .	1
1 Forecasting Analysis--Time Series . . . . .	25
2 Multiple Regression . . . . .	52
3 Decision Analysis . . . . .	73
4 Linear Programming . . . . .	104
5 Transportation Method . . . . .	127
6 Assignment Method . . . . .	146
7 Locational Layout Analysis . . . . .	162
8 Facilities Layout Analysis . . . . .	190
9 Line Balancing . . . . .	219
10 Aggregate Planning . . . . .	242
11 Inventory Analysis . . . . .	259
12 Material Requirements Planning . . . . .	284
13 Project Management . . . . .	313
14 Quality Assurance . . . . .	337

## OVERVIEW OF DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR PRODUCTION AND OPERATIONS MANAGEMENT

Decision Support Systems for Production and Operations Management (DSSPOM) is a software package designed to be used in a Production/Operations Management (POM) course. The package consists of two 5 1/4 inch diskettes (or one 3 1/2 inch diskette) which contains the computer programs and this book. This text serves as the instruction manual for using the programs and also provides summary descriptions of each of the underlying models. The diskette contains fourteen programs for modeling, solving and analyzing the most commonly encountered problems in POM. The fourteen POM modules are listed below. A more detailed description is presented at the end of this chapter.

<u>Module Name</u>	<u>Short Description</u>
Time Series Analysis	Time series analysis with five forecasting techniques
Multiple Regression	Multiple regression with up to 10 independent variables
Decision Analysis	Decision analysis using decision trees and decision tables
Linear Programming	Simplex method with MIN/MAX and <, >, and = constraints
Transportation Method	Transportation method for balanced and unbalanced problems
Assignment Method	Assignment method for MIN/MAX and unbalanced problems
Location Analysis	Location analysis using work flows and locaoun distances
Layout Analysis	Layout analysis using preference ratings
Line Balancing	Line balancing using four heuristics
Aggregate Planning	Multi-item, multi-period production scheduling
Inventory Analysis	Deterministic and stochastic inventory models
Materials Planning	Multi-item problems with scheduled receipts
Project Management	Deterministic and probabilistic models with time-cost tradeoffs
Quality Assurance	Acceptance sampling and quality control charts

### SYSTEM REQUIREMENTS

The programs have been developed and compiled in the Quick Basic<sup>1</sup> language for the IBM<sup>2</sup> Personal Computer (PC) or a PS/2 with a minimum of 512K bytes of RAM, and one or two disk drives. The package can be used on a machine with either a *Color* or a *Monochrome* Display. No graphics capability is required. Use of the Color Display is highly recommended since the display screens, in all of the programs, have been color coded to present information more effectively.

---

<sup>1</sup>Quick Basic is a Copyrighted product of Microsoft Corporation

<sup>2</sup>IBM is a registered trademark of International Business Machines Corporation

Disk Operating Systems (DOS) version 2.1 or higher is required. The package can also be installed on a hard disk. Use of a hard disk can substantially improve the performance of the programs. In addition, the programs have file management capability for more efficient file processing.

Throughout, it is assumed that the user has some familiarity with the use of a PC and DOS. In particular, the user should know how to boot the PC with DOS and be familiar with DOS file naming conventions. Those using a PC with the hard disk drive, should know the various sub-directory commands such as DIR, CD (Change Directory), and file referencing using drive and path.

### PREPARING A BACKUP COPY OF DISKETTE

The DSSPOM diskettes contain the programs for fourteen POM models. The diskettes have not been copy protected and may be copied for backup. An easy way of doing this is to perform the three steps outlined below. You will need either one 3 1/2 diskette or two 5 1/4 inch diskettes.

- 1 - Place the DOS disk in drive A:
- 2 - Type DISKCOPY A: A:
- 3 - Follow the prompts from the DISKCOPY program.

Repeat the above three steps for both System Disk #1 and System Disk #2, if you have the two diskette version.

### HARD DISK INSTALLATION

The DSSPOM diskettes include various batch files which are designed to install DSSPOM on a hard disk. If you are already familiar with DOS directory commands, you may create a sub-directory, call it "DSSPOM", and then copy all of the files from the system disks to that sub-directory. If you are installing the system from the 5 1/4 inch diskettes, you should also perform the following DOS copy command,

COPY MENUH.EXE MENU.EXE

Alternatively, you may use the batch file provided in the system disk to perform the hard disk installation as described below. The batch file will install the package on a sub-directory called DSSPOM.

### 3 1/2 inch System

To install the package on the hard disk, place System Disk in one of the floppy drives. These drives are usually referred to as A: or B:. Make this drive the default drive by typing the drive letter followed by a ":" and press <ENTER>. For example, if the floppy drive is A, then type,

A:

Next, type,

INSTC X: Y:

where X is the name of the floppy drive and Y is the name of the hard disk drive. For example, to install the package on C: drive from the A: drive, type,

INSTC A: C:

Then follow the prompts from the installation program to complete the installation procedure.

### 5 1/4 inch System

To install the package on the hard disk, place System Disk #1 in one of the floppy drives. These drives are usually referred to as A: or B:. Make this drive the default drive by typing the drive letter followed by a ":" and press <ENTER>. For example, if the floppy drive is A, then type,

A:

Next, type,

INSTC X: Y:

where X is the name of the floppy drive and Y is the name of the hard disk drive. For example, to install the package on C: drive from the A: drive, type,

INSTC A: C:

Then follow the prompts from the installation program to complete the installation procedure.

## HOW TO LOAD THE PROGRAMS

DSSPOM may be loaded from any floppy drive (e.g., A:, B:, etc.). To load DSSPOM, you must first boot the system with a DOS version 2.1 or higher. Then, place System Disk #1 (or the 3 1/2 inch System Disk) in one of the floppy drives. If this drive is not the default drive already, make it the default drive by typing the drive letter followed by a ":". For example, if you wish to run DSSPOM from drive B and your boot drive is A, first place System Disk #1 in drive B: then type,

B:

Next type,

DSSPOM

*Note that for the 5 1/4 inch system (the two floppy version), DSSPOM must be loaded by using System Disk #1.*

### Hard Disk

Turn the system on and wait for the hard disk prompt (systems with a hard disk are self booting and do not require the DOS disk). Then change the sub-directory to DSSPOM by typing,

CD \DSSPOM

Next, load the package by typing,

DSSPOM

## THE DSS-POM MAIN MENU

The DSSPOM Main Menu enables you to select and run the module of interest. Fourteen common POM techniques are available. Below, we will illustrate the use of the Main Menu. We assume that you have prepared a working copy of the DSSPOM diskette or it has been installed on your hard disk.

Load the DSSPOM into the computer (see "HOW TO LOAD DSSPOM"). The computer will take a few seconds to load the library of the routines. The time it takes for the computer to load the programs is dependent on the speed of your system and may take several seconds. The computer will then display the first introductory screen as shown below.

DECISION SUPPORT SYSTEMS  
FOR  
PRODUCTION AND OPERATIONS MANAGEMENT  
(DSS-POM)

Second Edition

· Vahid Lotfi and C. Carl Pegels

Version 2.1

Copyright Richard D. Irwin, Inc. 1990

The computer will ask that you press a key to continue. Press any key to continue with the copyright message as shown below.

Decision Support Systems for Production and Operations Management

This software package is provided in a copyable format for your convenience. You are permitted to make backup copies, copies for students who are enrolled in a course and for teaching assistants and other faculty teaching a course for which the book: DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR PRODUCTION AND OPERATIONS MANAGEMENT by Vahid Lotfi and Carl C. Pegels is a required textbook. This software package may not be copied, distributed and/or used for any other purpose.

The computer will ask you to press a key again. Press a key to continue with the Main Menu as shown below.

```

DSS-POM Version 2.1

*** MAIN MENU ***

Time Series Analysis
Multiple Regression
Decision Analysis
Linear Programming
Transportation Method
Assignment Method
Location Analysis
Layout Analysis
Line Balancing
Aggregate Planning
Inventory Analysis
Materials Planning
Project Management
Quality Assurance
Exit DSS-POM

*** OVERVIEW ***

TIME SERIES FORECASTING
This program performs forecasting for
time series data with up to 50 points.
The forecasting techniques include:
Weighted Moving Average(WMA), Exponential
Smoothing(ES) without trend, Double
Smoothing (with trend), Decomposition
Method (additive model), and Adaptive
Exponential Smoothing. In each case,
Mean-Squared Error (MSE), Mean Absolute
Deviation (MAD), Bias of the forecast,
Coefficient of Variation, and Tracking
Signal are reported

Use ↑ and ↓ to highlight and press Enter (↵) to select.

```

As seen from the above display screen, the screen consists of two distinct areas enclosed in double-lined squares. The square on the left side of the screen is a vertical menu system, entitled "MAIN MENU". The square to the right is entitled "OVERVIEW" and contains a short overview of the highlighted option. A highlighted option, in the MAIN MENU as well as other menus throughout the package, is either displayed in a different color (usually Red) or reverse video. Throughout this text, the highlighted option will be referred to as the *Pointer*. For example, the phrase "move the *pointer*" implies using an arrow key to highlight another option as instructed.

Initially, the first option, "Time Series Analysis" is highlighted and the OVERVIEW section displays a short description of the Time Series Module. As you use the up and down arrow keys to highlight other options (move the *Pointer* up or down) in the MAIN MENU, the OVERVIEW section is updated and presents the description for the highlighted option.

To select an option, move the pointer to a desired option and press the <ENTER> key. To exit from DSSPOM and return to DOS, move the pointer to the last option "Exit DSSPOM" and press <ENTER>.

### BYPASSING THE LOGO AND/OR MAIN MENU: QUICK LOAD

After using DSSPOM several times, you may wish to bypass the introductory screens containing the Logo and Copyright message. The advanced user can also bypass the MAIN MENU and execute the desired module directly at the DOS prompt.

To bypass the introductory screens and execute the MAIN MENU directly, change the sub-directory to DSSPOM then type MENU (hard disk system). If you are running the programs from floppy system, place the System Disk (3 1/2 inch version) or System Disk #1 (5 1/4 inch version) in a floppy drive. Make the drive the default drive, then type MENU.

You may also bypass the MAIN MENU (only hard disk and 3 1/2 inch disk users) and execute a particular program directly. To do this, change the sub-directory to DSSPOM (for hard disk system) then type the program name (see below) for the desired module. If you have a 3 1/2 inch system, boot the system with DOS. Then place your System Disk in a floppy drive. Make that drive the default drive then type the program name (see below) for the desired module.

<u>Module Name</u>	<u>Program Name</u>
Time Series Analysis	FORCAST
Multiple Regression	REGRESS
Decision Analysis	DECISION
Linear Programming	LINPRO
Transportation Method	TRANSP
Assignment Method	ASSIGN
Location Analysis	LOCATION
Layout Analysis	LAYOUT
Line Balancing	BALANCE
Aggregate Planning	AGGPLAN
Inventory Analysis	INVENT
Materials Planning	MRP
Project Management	PERT
Quality Assurance	QUALITY

For example, to execute the Location Analysis program directly, without going through the introductory screens and MAIN MENU, place the System Disk in the default drive and type LOCATION. Note that the computer will require several seconds to first load the program library and then execute the desired module.

### USING THE MODULES: A TUTORIAL

In order to minimize the amount of time a user must spend in learning how to operate each new program, we have tried to keep the instructions for each program similar. For this reason each program operates through the same six-option menu. We will refer to this menu as the common menu. Most of the programs also contain

the common menu and the spreadsheet editor. For this example, you need not be familiar with the details of the Assignment Method at this time. Just follow the instructions in this tutorial to become familiar with loading a module, using the common menu, and using the spreadsheet editor to enter the problem data.

The example problem involves assigning three candidates, Joe, Marry, and Bob to three jobs, A, B, and C so as to minimize the total training time. The training times (in hours) for the three candidates and three jobs are as follows.

	A	B	C
Joe	20	10	8
Marry	25	15	25
Bob	15	20	17

To solve the problem, load DSSPOM into the computer and press a key twice to display the MAIN MENU. Next, press the down arrow key several times to move the pointer to the Assignment Method. The computer will update the OVERVIEW section as shown below.

DSS-POM Version 2.1

\*\*\* MAIN MENU \*\*\*

- Time Series Analysis
- Multiple Regression
- Decision Analysis
- Linear Programming
- Transportation Method
- Assignment Method
- Location Analysis
- Layout Analysis
- Line Balancing
- Aggregate Planning
- Inventory Analysis
- Materials Planning
- Project Management
- Quality Assurance
- Exit DSS-POM

\*\*\* OVERVIEW \*\*\*

**ASSIGNMENT METHOD**

This program solves the assignment problem. The problem may include up to 30 rows (candidates) and 30 columns (jobs). The solution method consists of the standard assignment algorithm. The program solves maximization and minimization problems. If the problem is unbalanced, dummy candidates or dummy jobs are added. The input data consists of the number of candidates, the number of jobs, and the assignment costs for each candidate-job combination.

Use ↑ and ↓ to highlight and press Enter (↵) to select.

Press the <ENTER> key to load the Assignment Module. The computer will pause for a few seconds and then displays the common menu (for the Assignment Method) as shown below:

= Input Edit Print File Solve Quit

F1-Help F2-Calculator      ASSIGNMENT METHOD      File:

As seen from the above display screen, the common menu screen contains two non-blank lines; the top line (row 1 of the display), and the bottom line (row 25 of the display). The items in the top line (except for the first one =) are the six menu options. These six options are common throughout all of the fourteen modules. Below, we describe each item separately.

**=** Pressing the <ENTER> key while the pointer is on this option will give general directions on how to use the common menu.

**Input** This menu option is used to enter input data for a new problem from the keyboard. If a model already exists, the computer will give a warning message and ask whether it should erase the current model and begin a new one.

**Edit** This menu option is used to edit and/or view problem data. The edit option is used as a view mechanism for a problem which has been loaded from a disk file. In certain modules this option has several sub-options to edit various parameters of a problem independently. In other modules, including the Assignment Method, it does not have any sub-options. Choosing this option will trace the problem parameters, starting with the first one. To keep the values which are not being changed, just press the <ENTER> key to proceed.

**Print** This option is used to send problem data to a printer. As with the Edit option, it has several sub-options for certain modules to allow printing separate parameters independently. Upon choosing this option, the computer will ask you to make sure that the Printer is On and Ready (or "On Line").

**File** This option provides several file management commands as shown below:

*Retrieve a file:* To load a previously saved data file from disk

*Save current file:* To save the current model on disk

*Copy a file:* To make a backup copy of a file

14. Foots Shoe Maker produces footwear for women. They are in the process of introducing a new shoe to their vast collection. Before they can actually produce the new shoe, an MRP must be formulated. A pair of ladies shoes, Model 16-67, is made of two units of vinyl and 4 units of rubber. The vinyl is made from 3 units of chemical AA and 4 units of chemical BB. Chemical AB consists of 1 unit each of raw material A and B. The lead time for the purchase/fabrication of each unit is: final assembly takes 2 weeks; raw material A takes 1 week; raw material B takes 2 weeks; chemicals AA and AB each take 1 week; vinyl takes 1 week; and rubber takes 2 weeks. Assume that all components are ordered on a LFL basis.

Fifty pairs of model 16-67 are required in week 10 and 30 pairs are required in week 15.

- a) Draw a product structure tree.
- b) Develop an MRP planning schedule showing gross and net requirements, order release and receipt dates for the model 16-67, vinyl, and rubber elements.

## CHAPTER 13

### PROJECT MANAGEMENT

#### INTRODUCTION

The PERT/CPM technique for project planning is widely used in industry for one-time projects such as building a new plant, installing new machinery, doing a major maintenance job, or similar projects.

Projects that can take particular advantage of the PERT/CPM approach are those that consist of numerous activities where many of the activities must be done sequentially. Large numbers of sequential activities tend to create "bottlenecks" or critical paths. It is the objective of the PERT/CPM technique to identify the critical path and the activities that constitute that critical path. Management can then apply its efforts to alleviate any delays in the activities that are on the critical path and thus ensure that a project will be completed as scheduled.

The terms PERT and CPM have become generic terms for project scheduling. PERT stands for "project evaluation and review technique" and CPM stands for "critical path method." Although some authors ascribe the deterministic approach to one and the stochastic to the other, more common use in recent years is to describe the method as PERT/CPM or CPM/PERT.

#### ILLUSTRATION OF CPM/PERT TECHNIQUE

The technique can best be illustrated with an example. In Figure 13-1 is a network of activities and events. The lines with the arrows are the activities which take certain time periods (hours, days or weeks) to complete and the nodes that connect each activity are called events. Events are points in time and activities cover elapsed times. For instance, an event is the beginning or end of an activity and an activity takes a certain number of time units to be completed.

The illustrated PERT/CPM network has sixteen activities which are connected by twelve nodes or events. The figures shown alongside each activity are the elapsed times for that activity. No activity can begin until a preceding activity has been completed. For instance, activity 3-6 cannot be started until activity 1-3 has been completed. Similarly, activity 5-8 cannot be started until both activities 2-5 and 4-5 have been completed.

Based on the above precedence requirements we can determine the total elapsed times for each possible path through the network from the first event (node 1) to the last event (node 12).

6. In problem 5, assume that the scheduled receipts for component F consists of 1000 units in period 4, 1500 units in period 6, and 500 units in period 9. Develop the explosion report for F.

7. In problem 5, assume that F can be ordered according to POQ. Let the annual demand be 50,000 units; setup cost be \$200, and holding cost equal \$10. Develop the explosion report for F. Is the planned orders release different from that of problem 1. Why?

8. Rad Products, Inc., produces two types of AM/FM cassette players for cars. Both units are identical, but the mounting hardware and finishing trim differ. Model A fits intermediate and full-size cars, while Model B fits small sports cars.

Rad Products configures the products in the following way. The chassis (radio/cassette unit) is assembled in South America and has a manufacturing lead time of 3 weeks. The mounting hardware is purchased from a local steel company and has a 2 week lead time. The finishing trim is purchased from a Japanese electronics firm with a warehouse in the United States. The finish trim has a lead time of 1 week. Final assembly time may be disregarded since the addition of the trim package and the mounting are performed by the customer.

Rad Products supplies wholesalers and retailers who place specific orders for both the models up to 9 weeks in advance. These orders, together with enough additional units to satisfy the small number of individual sales, are summarized as follows:

	WEEK								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Model A				400				600	
Model B					300				200

There are currently 50 units of each type (of AM/FM player) on hand and no safety stock are required.

- Prepare the product structure trees
- Prepare an MRP to meet the demand schedule. Specify the gross and net requirements and the planned order release and receipt periods for the AM/FM cassette players, Model A and B trim units, and the mounting hardware. Assume a LFL order policy.

9. In problem 8, suppose that there are two new orders for the cassette players. They consist of 500 units of Model A in period 12 and 300 units of model B in period 15. Develop the explosion report for all of the items.

10. In problem 9, suppose that the chassis is to be ordered according to lot sizes of 75 units. Further, suppose that there is a scheduled receipt of 100 chassis in period 4. Develop the explosion report for Chassis.

11. Cartoy Manufacturing produces plastic cars for children. The toy cars consist of the body plus 4 wheels. The body consists of a hood, top, base, and 2 sides. Six hundred cars are needed by week 10 and 300 cars are needed in week 12. Current inventory levels and lead times are given below.

- Draw a product structure tree for the toy car.
- Develop an MRP for the toy cars to meet the required demand. Give net and gross requirements, planned releases, and planned receipts. Assume a lot for lot order policy and assume that no safety stocks are required.

	ON HAND UNITS	LEAD TIME (WEEKS)
Toy Car	200	2
Body Assembly	250	2
Hood	100	2
Top	200	1
Base	350	1
Side	400	2
Wheels	1800	1

12. In problem 11, assume that a safety stock of 50 units is needed for every item. Develop the explosion report for Side and Wheels.

13. In problem 11, assume that there are 3 scheduled receipts for the Toy Car. They include 200 units in week 5, 300 units in week 6, and 200 units in week 7. Develop the explosion report for the Toy Car and compare it with that in problem 11.



2. Change problem 1 so that there are 500 AAs, 500 CCs, and 500 EEs on hand. Also change the order policy for CC to lot-sizing and use a lot size of 200 units. Develop the explosion report for CC and EE.

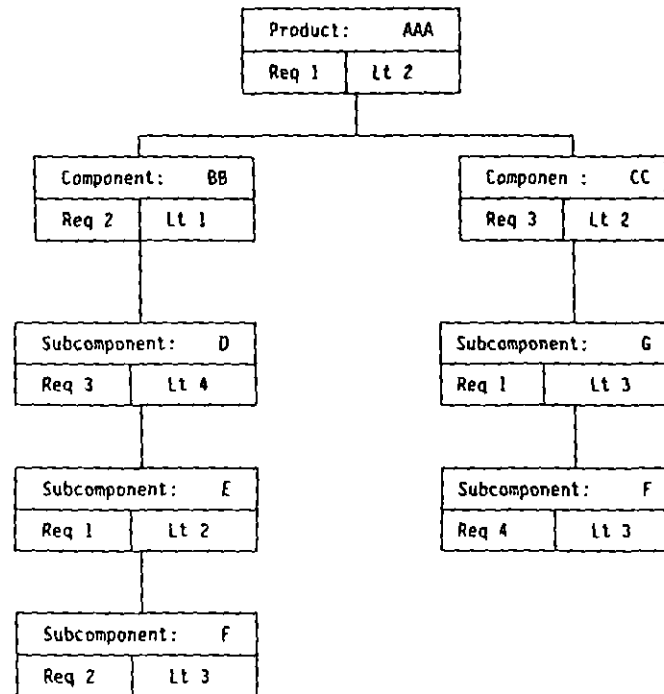
3. In problem 2, assume that there is a scheduled receipt of 200 Backs in week 5. Develop the explosion report for items CC and EE. Compare the planned order releases with those in problem 2.

4. Solve problem 1, assuming the following inventory record file.

Item	On Hand	Safety Stock	Order Policy	Annual Demand	Order Cost	Hold. Cost	Lot Size
Chair	100	50	LFL	10,000	10	2	-
Leg	200	50	LFL	25,000	5	1	-
Seat	150	50	LFL	10,000	5	1	-
Back	150	50	LFL	10,000	5	1	-
AA	-	-	LOT	50,000	100	.5	400
BB	-	-	LOT	40,000	100	.5	400
CC	-	-	LOT	20,000	100	.5	500
DD	-	-	LOT	60,000	200	.5	500
EE	-	-	LOT	60,000	200	.5	500

- Develop the explosion report for items AA, DD, and EE.
- Report the operating costs of all items.
- Change the order policy for component Back to POQ, determine the operating cost and compare with that in part b.

5. Consider the following product structure tree.



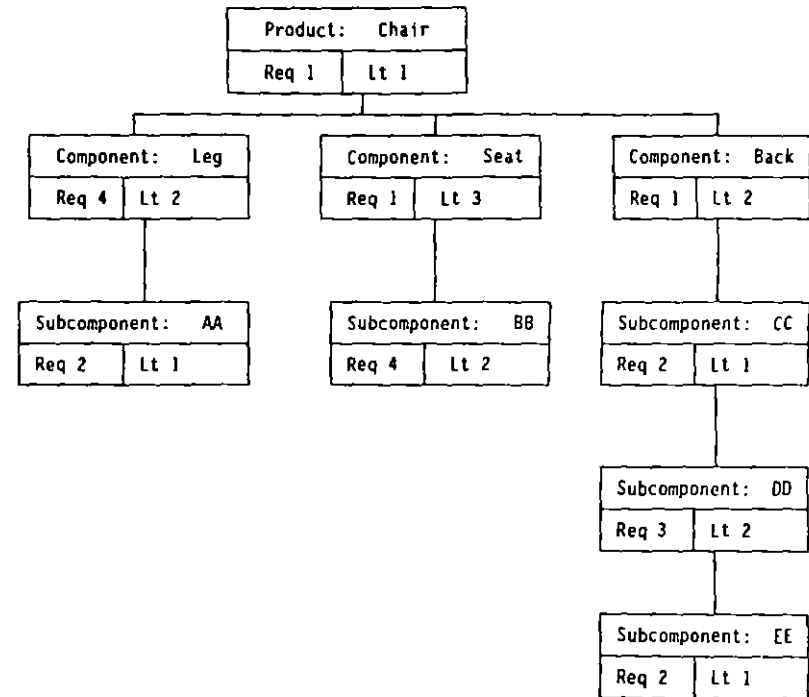
The gross requirements for Product AAA are 400 units in week 10 and 900 units in week 12. There are lot size requirements of 2000 units for subcomponent D, and 500 units for subcomponent G; all other items are ordered according to LFL and no safety stocks are required. Units on hand amount to 600 units for subcomponent D, 1000 units for subcomponent E, 1200 units for subcomponent F, and 500 units for subcomponent G. Develop the explosion report for AAA, BB, CC and F.

Problem Title: BUS INC.						
Item: HDD		Lead time: 2	Demand: 210			
ID: 22		Lot Size: 0	H-Cost: 15.00			
Method: LFL		Safety: 4	S-Cost: 10.00			
Period	Gross Required	Sched. Receipt	On-Hand	Net Required	Planned Receipt	Planned Release
1	0	0	6	0	0	0
2	0	0	6	0	0	0
3	0	0	6	0	0	0
4	0	0	6	0	0	24
5	0	0	6	0	0	0
6	0	0	4	24	24	0
7	26	0	4	0	0	0
8	0	0	4	0	0	0
9	0	0	4	0	0	0
10	0	0	4	0	0	0
11	0	0	4	0	0	0
12	0	0	4	0	0	0

As seen from the above report, the gross requirement for HDD is 26 units in week 7. This solution differs from the previous one in that the 8 units needed in period 3 is no longer necessary. Also, in week 7 instead of requiring 30 units, the new requirement is 26 units. The change is due to the scheduled receipts of 12 DSAs in period 1 as described above.

## PROBLEMS

1. Consider the following product structure tree.



The gross requirements for the end item chair are 300 units in week 8, 400 units in week 10, and 500 units in week 12. Assume that all items are ordered on a lot-for-lot basis and that there are no initial inventories and safety stocks. Develop the explosion report for sub-components DD and EE.

<ENTER> and move the pointer to the right and enter 12. Next move the pointer to cell C8 and enter 3. Press <ENTER> and move the pointer to the right one cell and enter 20. Now press <F10> to keep the data in memory and exit from the spread sheet. The completed spread sheet is shown below.

C8 3				
	A	B	C	D
1	Component	ID	Prd-1	Quant
2	FD-PC	1	.	.
3	HD-PC	2	.	.
4	CPU	11	.	.
5	MOM	12	.	.
6	COM	13	.	.
7	DSA	14	1	12
8	FDD	21	3	20
9	HDD	22	.	.

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option. When presented with the Solution Menu, move the bar to the Explode One Item and press <ENTER> (process not shown here). The computer will display the list of components as before. Move the pointer to DSA and press <ENTER>. The computer will display the explosion report for DSA as shown below.

Problem Title: BUS INC.						
Item: DSA	Lead time:	1	Demand:	200		
ID: 14	Lot Size:	0	H-Cost:	25.00		
Method: LFL	Safety:	0	S-Cost:	10.00		
Period	Gross Required	Sched. Receipt	On-Hand	Net Required	Planned Receipt	Planned Release
1	0	12	12	0	0	0
2	0	0	12	0	0	0
3	0	0	12	0	0	0
4	8	0	4	0	0	0
5	0	0	4	0	0	0
6	0	0	4	0	0	0
7	0	0	4	0	0	26
8	30	0	0	26	26	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0

As seen from the above report, the scheduled receipt of 12 units during week 1 is carried to the end of week 3. 8 units are used to satisfy the requirement of week 4 and the planned order release is no longer needed. Further, the remaining 4 units are carried to week 8 which reduces the net requirement from 30 to 26 units. Press <ENTER> to return to the Solution Menu and select the explosion report for FDD (process not shown here). The explosion report is shown below.

Problem Title: BUS INC.						
Item: FDD	Lead time:	2	Demand:	2500		
ID: 21	Lot Size:	30	H-Cost:	10.00		
Method: LOT	Safety:	10	S-Cost:	50.00		
Period	Gross Required	Sched. Receipt	On-Hand	Net Required	Planned Receipt	Planned Release
1	0	0	20	0	0	0
2	0	0	20	0	0	0
3	0	20	40	0	0	0
4	0	0	40	0	0	0
5	0	0	40	0	0	0
6	0	0	40	0	0	90
7	118	0	12	88	90	0
8	0	0	12	0	0	0
9	0	0	12	0	0	0
10	0	0	12	0	0	150
11	140	0	22	138	150	0
12	0	0	22	0	0	0

The scheduled receipt for FDD is 20 units, available at the beginning of week 3. This is added to the inventory of 20 units and carried to week 7. This changes the net requirement to 88 units with the next larger multiple of 10 (lot size) equal to 90 units.

Next obtain the explosion report for HDD as shown below (process not shown here).

Problem Title: BUS INC.						
Item: DSA	Lead time: 1	Demand: 200				
ID: 14	Lot Size: 0	H-Cost: 25.00				
Method: LFL	Safety: 0 ***	S-Cost: 10.00				
Period	Gross Required	Sched. Receipt	On-Hand	Net Required	Planned Receipt	Planned Release
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	8
4	8	0	0	8	8	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	30
8	30	0	0	30	30	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0

Problem Title: BUS INC.						
Item: HDD	Lead time: 2	Demand: 210				
ID: 22	Lot Size: 0	H-Cost: 15.00				
Method: LFL	Safety: 4 ***	S-Cost: 10.00				
Period	Gross Required	Sched. Receipt	On-Hand	Net Required	Planned Receipt	Planned Release
1	0	0	6	0	0	6
2	0	0	6	0	0	0
3	8	0	4	6	6	0
4	0	0	4	0	0	0
5	0	0	4	0	0	0
6	0	0	4	0	0	30
7	30	0	4	0	0	0
8	0	0	4	30	30	0
9	0	0	4	0	0	0
10	0	0	4	0	0	0
11	0	0	4	0	0	0
12	0	0	4	0	0	0

Problem Title: BUS INC.						
Item: FDD	Lead time: 2	Demand: 2500				
ID: 21	Lot Size: 30	H-Cost: 10.00				
Method: LOT	Safety: 10 ***	S-Cost: 50.00				
Period	Gross Required	Sched. Receipt	On-Hand	Net Required	Planned Receipt	Planned Release
1	0	0	20	0	0	0
2	0	0	20	0	0	0
3	8	0	12	0	0	0
4	0	0	12	0	0	0
5	0	0	12	0	0	120
6	0	0	12	0	0	0
7	122	0	10	120	120	0
8	0	0	10	0	0	0
9	0	0	10	0	0	150
10	0	0	10	0	0	0
11	140	0	20	140	150	0
12	0	0	20	0	0	0

Examine the above output reports by observing the planned order releases for the three components. DSA has two orders, an order of 8 units in week 3 and an order of 30 units in week 7. FDD has two orders, an order of size 120 in week 5 and an order of size 150 in week 9. HDD has two orders, one for 6 units in week 1 and another for 30 units in week 5.

Now select the Exit option to return to the MRP menu. Move the pointer to the EDIT option and select the Scheduled Receipts sub-option. The computer will respond by asking you to enter the maximum number of scheduled receipts for any part. In this case, the maximum number is 1 (if there were 2 orders for the same item, it would be 2). Enter a 1 and press <ENTER> as shown below.

Max # of scheduled receipts of any part (0 to 5): 1

The computer will then display the spread sheet editor for the scheduled receipts. The first column of the spread sheet contains the names of all of the components and the second column has the ID numbers. The third column is entitled "Prd-1" and is assigned to hold the timing of the scheduled receipt. The fourth column is entitled "Quant" and is to contain the size of the order.

Move the pointer to cell C7 and enter a 1 for the timing of the order for DSA. Press the

Problem Title: BUS INC.						
Item: MOM	Lead time:	1	Demand:	650		
ID: 12	Lot Size:	0	H-Cost:	5.00		
Method: POQ	Safety:	0	S-Cost:	40.00		
Period	Gross Required	Sched. Receipt	On-Hand	Net Required	Planned Receipt	Planned Release
1	0	0	5	0	0	0
2	0	0	5	0	0	0
3	0	0	5	0	0	0
4	0	0	5	0	0	0
5	0	0	5	0	0	111
6	0	0	5	0	111	0
7	46	0	70	41	0	0
8	0	0	70	0	0	0
9	0	0	70	0	0	0
10	0	0	70	0	0	0
11	70	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0

As indicated earlier, using the POQ method results in combining the two orders into one. Note that this approach has resulted in 70 units of inventory to be carried for four periods. To determine the impact on the operating costs, press <ENTER> to return to the Solution Menu again. Move the bar to the Costs Report option and press <ENTER>. The computer will display the costs report as shown below.

Problem Title: BUS INC.			
Item	Holding Cost	Setup Cost	Total Cost
FD-PC	61.54	200.00	261.54
HD-PC	66.35	300.00	366.35
CPU	19.62	120.00	139.62
MOM	29.81	40.00	69.81
COM	12.98	40.00	52.98
DSA	0.00	20.00	20.00
FDD	32.31	100.00	132.31
HDD	15.00	20.00	35.00

As seen from the above report, the total cost for both MOM and COM has decreased. In particular, the order cost of the revised policy is \$40 (for each component) and the holding costs are \$29.81 for MOM and \$12.98 for COM. These costs compare favorably with the total costs associated with the previous order policy.

Note that the POQ policy may be appropriate for a certain component and result in smaller operating costs but produce sub-optimal results for other components. As a general rule, if an item has a large setup or order cost, small inventory carrying cost, and is being ordered too often, POQ may be a more appropriate order policy.

### EXAMPLE 3 - SCHEDULED RECEIPTS

This example will illustrate the use of the scheduled receipts component of MRP system. Suppose that in Example 1, 12 Disk Storage Assemblies are currently being tested and will be ready for use during week 1. Further, Chip had misplaced an order for 20 FDDs which were re-ordered and are scheduled to arrive in week 3. Determine the impact of the above information on the timed phase plans.

The scheduled receipts of an item affect the timed phase plan (explosion report) for that item and all of its sub-components. To illustrate this phenomenon, first solve the problem in its original form and observe the explosion report for DSA, FDD, and HDD. Then add the scheduled receipts and re-solve the problem and compare the solutions as described below.

If you are continuing this example after example one or two, return to the MRP menu first. If you are solving this example for the first time, you need to refer to the data for Example 1 and solve it first. Then return to this example to use the scheduled receipts option.

Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option. From the solution menu, select the Explode One Item option three times and obtain the report for DSA, FDD, and HDD as shown below.

Problem Title: BUS INC.						
Item: MOM	Lead time: 1	Demand: 650				
ID: 12	Lot Size: 0	H-Cost: 5.00				
Method: LFL	Safety: 0	S-Cost: 40.00				
Period	Gross Required	Sched. Receipt	On-Hand	Net Required	Planned Receipt	Planned Release
1	0	0	5	0	0	0
2	0	0	5	0	0	0
3	0	0	5	0	0	0
4	0	0	5	0	0	0
5	0	0	5	0	0	0
6	0	0	5	0	0	41
7	46	0	0	41	41	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	70
11	70	0	0	70	70	0
12	0	0	0	0	0	0

Chip recalled that in his Quantitative Analysis class, several years earlier, the teacher had discussed various methods of ordering inventory items. Looking at the explosion report for MOM and observing the small amount of inventory carried, he wondered if another order policy would be more appropriate. The word POQ did not ring a bell, but anything that would save him some money was fine. Help Chip to find an answer to his 'what if' question.

Note that by using the POQ method, the two planned order releases for MOM in periods 6 and 10 may be grouped together as one order of 111 units. The impact of this approach is that the cost of order decreases from \$80 to \$40 for just one order. However, the inventory level will increase and will result in additional inventory holding costs. To determine whether the increase in inventory carrying cost is offset by the decrease in the order cost, develop the explosion report for MOM as described below.

Exit from the Solution Menu by moving the bar down to the Exit option and press <ENTER>. Now move the pointer to the EDIT option and select the Inventory File sub-option. You will be presented with the spread sheet editor for IRF. Move the pointer to the cell corresponding to the order method for MOM (cell F6) and enter POQ (be sure to enter POQ all in upper case letters). Next move the pointer down to cell F6 and enter POQ again to change the order policy for item COM to POQ also. The completed spread sheet is presented below.

F7 POQ										READY
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
	Component	ID	On-Hand	Safety Stock	Lead Time	Ord Mth	Annual Demand	Setup Cost	Hold. Cost	
1										
2	FD-PC	1	7	3	1	LFL	600	100	50	
3	HD-PC	2	5	3	2	LFL	200	150	75	
4	CPU	11	10	5	1	LOT	850	30	10	
5	MOM	12	5	0	1	POQ	650	40	5	
6	COM	13	5	0	1	POQ	210	40	5	
7	DSA	14	0	0	1	LFL	200	10	25	
8	FDD	21	20	10	2	LOT	2500	50	10	
9	HDD	22	6	4	2	LFL	210	10	15	
10										

Next press <F10> to keep the changes in memory and exit the spread sheet editor. You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option. When presented with the solution menu, select the Explode One Item option and press <ENTER>. The computer will display the list of components in a menu. Move the pointer to MOM and press <ENTER>. The explosion report for item MOM will be displayed as shown below.

\*\*\* SOLUTION MENU \*\*\*

Explode All Items  
Explode One Item  
Report Costs  
Exit Solve Option

Use the arrow keys to highlight an option. Press ENTER to select or ESC to exit.

Problem Title: BUS INC.						
Item: FDD		Lead time: 2	Demand: 2500			
ID: 21		Lot Size: 30	H-Cost: 10.00			
Method: LOT		Safety: 10	S-Cost: 50.00			
Period	Gross Required	Sched. Receipt	On-Hand	Net Required	Planned Receipt	Planned Release
1	0	0	20	0	0	0
2	0	0	20	0	0	0
3	8	0	12	0	0	0
4	0	0	12	0	0	120
5	0	0	12	0	0	0
6	0	0	12	0	0	0
7	122	0	10	120	120	0
8	0	0	10	0	0	0
9	0	0	10	0	0	150
10	0	0	10	0	0	0
11	140	0	20	140	150	0
12	0	0	20	0	0	0

The first gross requirement consists of 8 units in period 3. This gross requirement is the first planned order releases for disk storage assembly (DSA) component which occurs in period 3 (DSA has a 1 week lead time). Initially, 20 FDDs are available which are carried through the end of period 2. The 8 units needed in period 3 are taken out of the inventory which results in the remaining inventory equal 12 units. Since this is still larger than the safety stock of 10 units, no order is needed in this period.

The next gross requirement is for 122 units (92 units for 46 FD-PCs and 30 units for 30 HD-PCs) in period 7. The net requirement is  $122 - 12 = 110$  units plus 10 units as safety stock for a total of 120 units. FDDs are ordered in lots of 30 units each. Hence the planned order receipts is 120 units in period 7. With the lead time equal to 2 weeks, the first planned order release is for 120 units in period 5.

Note that the second net requirement is 140 units, ordering according to lots of 30. The next largest multiple of 30 is 150 units which is the second planned receipts.

Press <ENTER> to return to the Solution Menu. Now move the pointer to the Report Costs option and press <ENTER>. The computer will display the cost reports for all of the components as shown below.

Problem Title: BUS INC.			
Item	Holding Cost	Setup Cost	Total Cost
FD-PC	61.54	200.00	261.54
HD-PC	66.35	300.00	366.35
CPU	19.62	120.00	139.62
MOM	2.88	80.00	82.88
COM	1.44	80.00	81.44
DSA	0.00	20.00	20.00
FDD	32.31	100.00	132.31
HDD	15.00	20.00	35.00

As seen from the above report, the setup cost for FD-PC is \$200 which is for two orders, each at a cost of \$100. Also, the holding cost for HD-PC is \$66.35 which consists of 5 units carried for 5 weeks at a cost of  $5 \times 5 \times \$1.442 = \$36.05$  (per unit holding cost for HD-PC is  $\$75/52 = \$1.442$  per week) and 3 units carried for 7 weeks at a cost of  $7 \times 3 \times \$1.44 = \$30.28$ , for a total of \$66.25.

### EXAMPLE 2 - USING POO TO REDUCE OPERATING COSTS

After examining the cost report in Solved Example 1, Chip Megahertz noticed a rather large difference between the inventory holding costs and order costs for two components namely, MOM and COM. The order costs for these two items equals \$80 each. This indicates that there are two planned releases (for each item) during the planning horizon (each item has an order cost of \$40). To verify this, Chip decided to examine the explosion report for MOM.

To help Chip look at the desired report, move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option. When presented with the solution menu, choose the Explode One Item option and press <ENTER>. The computer will display the list of all components, highlight MOM and press <ENTER> (process not shown here). The computer will display the explosion report for MOM as shown below.

Move the pointer to FD-PC and press <ENTER>. The computer will display the explosion report for FD-PC as shown below.

Problem Title: BUS INC.						
Item: FD-PC	Lead time: 1	Demand: 600				
ID: 1	Lot Size: 0	H-Cost: 50.00				
Method: LFL	Safety: 3	S-Cost: 100.00				
Period	Gross Required	Sched. Receipt	On-Hand	Net Required	Planned Receipt	Planned Release
1	0	0	7	0	0	0
2	0	0	7	0	0	0
3	0	0	7	0	0	0
4	0	0	7	0	0	0
5	0	0	7	0	0	0
6	0	0	7	0	0	0
7	0	0	7	0	0	46
8	50	0	3	46	46	0
9	0	0	3	0	0	0
10	0	0	3	0	0	0
11	0	0	3	0	0	70
12	70	0	3	70	70	0

As seen from the above report, the first three lines of the report consist of the various statistics for the end item FD-PC. These include its name, ID number, method of ordering, lead time, lot size, safety stock, annual demand, holding cost and setup cost.

The lower portion of the report is the timed phase (or explosion) report for FD-PC. It indicates that the gross requirements for this item consist of 50 units in period 8 and 70 units in period 12. There are no scheduled receipts. The on hand inventory is 7 units which are carried to the end of period 7. The first positive net requirement occurs in period 8 for 46 units. The gross in this period is 50 units, adding 3 units as safety stock results in 53 units. Subtracting the inventory of 7 units results in the net being 46 units. Since FD-PC is ordered according to net requirements (or lot-for-lot), the planned order receipt is for 46 units in period 8. The item has a lead time of 1 week, hence the first planned order release is for 46 units in period 7.

The second gross requirement for this item occurs in period 12 for 70 units. With inventory of 3 units, safety stock equal to 3 units, the net is 70 units in period 12. The computation of the planned receipts and planned releases are similar to those of the first order.

Press the <ENTER> key to return to the Solution Menu. Move the pointer to Explode One

Item option again and press <ENTER>. When the menu of the components is displayed, move the pointer to the HD-PC and press <ENTER> (the process is not shown here). The computer will pause for a few seconds and then displays the explosion report for HD-PC as shown below.

Problem Title: BUS INC.						
Item: HD-PC	Lead time: 2	Demand: 200				
ID: 2	Lot Size: 0	H-Cost: 75.00				
Method: LFL	Safety: 3	S-Cost: 150.00				
Period	Gross Required	Sched. Receipt	On-Hand	Net Required	Planned Receipt	Planned Release
1	0	0	5	0	0	0
2	0	0	5	0	0	0
3	0	0	5	0	0	0
4	0	0	5	0	0	0
5	0	0	5	0	0	8
6	10	0	3	8	8	0
7	0	0	3	0	0	0
8	0	0	3	0	0	0
9	0	0	3	0	0	30
10	30	0	3	0	0	0
11	0	0	3	30	30	0
12	0	0	3	0	0	0

As seen from the above report, the first gross requirement for HD-PC is for 10 units in period 6. There are no scheduled receipts. The on hand inventory is 5 units which is carried to the end of period 5. The first positive net requirement for this item occurs in period 6 for 8 units. This end item is also ordered according to LFL method, hence the first planned receipt is 8 units in period 6. HD-PC requires two weeks to assemble and test (lead time) which results in the first planned order release of 8 units in period 4. Calculation of the second planned release is similar to the first.

Now press <ENTER> to return to the Solution Menu again. The next item of interest is the explosion report for FDD. This item is used in both FD-PC and HD-PC. Move the pointer to the Explode One Item option and press <ENTER>. When represented with the list of all components, move the pointer to FDD and press <ENTER> (process not shown here). The explosion report for FDD is shown below.



In the above display, the information relating to the quantity needed per unit of parent for sub-component 3 (Sub-3) is not shown. After completing the data entry for the BOM file, press <F10> to keep the data in memory and continue with the data entry for inventory record file.

The items of information needed for the inventory record file (IRF) includes on-hand stock, safety stock, lead time, order policy (or method), annual demand, holding cost, setup or order cost, and lot size. Enter this information for each component. The completed spread sheet is presented below.

AI	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Component	ID	On-Hand	Safety Stock	Lead Time	Ord Mth	Annual Demand	Setup Cost	Hold. Cost
2	FD-PC	1	7	3	1	LFL	600	100	50
3	HD-PC	2	5	3	2	LFL	200	150	75
4	CPU	11	10	5	1	LOT	850	30	10
5	MOM	12	5	0	1	LFL	650	40	5
6	COM	13	5	0	1	LFL	210	40	5
7	DSA	14	0	0	1	LFL	200	10	25
8	FDD	21	20	10	2	LOT	2500	50	10
9	HDD	22	6	4	2	LFL	210	10	15

In the above display screen, the column for lot-size is not shown. The components with non-zero lot-sizes are CPU (lot size of 10) and FDD (lot size of 30). Press the <F10> to keep the data in the memory. The computer will ask if you wish to enter the scheduled receipts. Since there are no scheduled receipts available at this time, press <N> followed by <ENTER> to end the data entry process.

You may now save the model on disk for future use. To save the model, move the pointer to the FILE option and select the Save Current File sub-option then press <ENTER>. The computer will display the current drive and sub-directory and requests a file name. Enter an appropriate DOS file name and use the suffix MRP to indicate that the file contains an MRP problem.

You may also obtain a hard copy printout of the problem. The print option for this module, unlike other modules, has four sub-options as shown below.

Input	Edit	Print	File	Solve	Quit				
<table border="1"> <tr> <td>Master Schedule</td> </tr> <tr> <td>Bill of Materials</td> </tr> <tr> <td>Inventory File</td> </tr> <tr> <td>Scheduled Receipts</td> </tr> </table>						Master Schedule	Bill of Materials	Inventory File	Scheduled Receipts
Master Schedule									
Bill of Materials									
Inventory File									
Scheduled Receipts									

To print any of the four MRP components, highlight the option and press <ENTER>. The computer will ask you to make sure that the Printer is On and Ready. Press <ENTER> to proceed with the print option as needed.

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option. The computer will display the solution menu as shown below.

<p>*** SOLUTION MENU ***</p> <table border="1"> <tr> <td>Explode All Items</td> </tr> <tr> <td>Explode One Item</td> </tr> <tr> <td>Report Costs</td> </tr> <tr> <td>Exit Solve Option</td> </tr> </table> <p>Use the arrow keys to highlight an option. Press ENTER to select or ESC to exit.</p>	Explode All Items	Explode One Item	Report Costs	Exit Solve Option
Explode All Items				
Explode One Item				
Report Costs				
Exit Solve Option				

Begin the solution process by requesting the Explosion reports for the two end items first. Move the pointer to the Explode One Item option and press <ENTER>. The computer will display another menu containing the list of all of the components and sub-components as shown below.

Problem Title: BUS INC.								
<table border="1"> <tr> <td>FD-PC</td> </tr> <tr> <td>HD-PC</td> </tr> <tr> <td>CPU</td> </tr> <tr> <td>MOM</td> </tr> <tr> <td>COM</td> </tr> <tr> <td>DSA</td> </tr> <tr> <td>FDD</td> </tr> <tr> <td>HDD</td> </tr> </table>	FD-PC	HD-PC	CPU	MOM	COM	DSA	FDD	HDD
FD-PC								
HD-PC								
CPU								
MOM								
COM								
DSA								
FDD								
HDD								
Use the arrow keys to highlight a component. Press ENTER to select or ESC to exit.								

to as a 'file'. However, the information in MPS is maintained in the memory and not a disk file. When a problem is saved on disk, all of the information related to the same problem is stored in the same disk file.

The MPS for this solved example is shown in Figure 12-1. Enter this information into the spread sheet. The completed spread sheet is shown below.

READY			
C1	HD-PC	B	C
	A	FD-PC	HD-PC
1	Period	0	0
2	Period1	0	0
3	Period2	0	0
4	Period3	0	0
5	Period4	0	0
6	Period5	0	0
7	Period6	0	10
8	Period7	0	0
9	Period8	50	0
10	Period9	0	0
11	Period10	0	30
12	Period11	0	0
13	Period12	70	0

After completing the data entry for MPS, press <F10> to keep the data in the memory and continue with the BOM file.

The information needed for the BOM file consists of the total number of components and the maximum number of sub-components of any component. It can be found by counting the number of components (not including the two main assemblies) and the maximum number of subcomponents per component shown in Figure 12-2. The total number of components in this case is 8 and the maximum number of sub-components is 3. Enter this information into the computer as shown below. Remember to low-level code first.

Total No. of Components (including end-items): 8

Maximum number of sub-components of any component: 3

Enter problem parameters as requested. BOM must have been low level coded so that every sub-component is placed after its parent item in the list. Maximum number of components is 25, maximum number of sub-components (of any component) is 4.

The computer will then resume the data entry process for the BOM by displaying the spread sheet editor again. Begin the data entry by first entering the structure of the two end items. Move the pointer to cell A3 and enter FD-PC. Now move the pointer down to cell A4 and enter HD-PC. The computer has assigned ID numbers 1 and 2 to FD-PC and HD-PC, respectively. Move the pointer to cell C3 and enter 11 which is the ID for CPU (see Figure 12-3).

Next move the pointer one cell to the right (cell D3) and enter 1, the number of CPUs needed for one FD-PC. Move the pointer to the right again and enter 12 (the ID number for MOM). Press the <ENTER> key and move the pointer to the right again. Type 1 and press <ENTER>. Enter the remaining information relating to the BOM. Be sure that the order of the components entered into the BOM file is consistent. That is, the row corresponding to each component must always precede its sub-components. The completed spread sheet is presented below.

READY								
E3	I2	A	B	C	D	E	F	G
			ID	Sub-1	Quant/Parent	Sub-2	Quant/Parent	Sub-3
1	Component		ID	ID		ID	ID	ID
2	FD-PC	1	11	1	12	1	21	
3	HD-PC	2	11	1	13	1	14	
4	CPU	11	.	.	.	.	.	.
5	MOM	12	.	.	.	.	.	.
6	COM	13	.	.	.	.	.	.
7	DSA	14	21	1	22	1	.	.
8	FDD	21	.	.	.	.	.	.
9	HDD	22	.	.	.	.	.	.

order) cost be known a priori.

### Low Level Coding

The MRP module requires that all components and sub-components be assigned an identification (ID) number. The ID number assigned to each item identifies that item in a special way. That is, the ID number identifies the component number and level, in the structure tree, at which that item is used. Tree levels are numbered sequentially from top to bottom, with top level (or end items) components having a single digit ID. Sub-components, at next lower level, making up the end items should have ID numbers which are two digits and begin with the digit 1. Components at the third level of the tree (level 2) should have two digit numbers with the first digit being 2. To avoid unnecessary errors, the MRP module automatically assigns ID numbers to the end items. These IDs should not be altered.

In a case where the same component is used in one or more end items, at different levels of the tree, the product structure tree must be revised, using a technique referred to as *low level coding*. In short, low level coding involves lowering a sub-component (in the tree) such that it is used at the same level in all of the components, sub-components, and end items. In the example presented above, FDD is used in both FD-PC and HD-PC, at different levels and therefore must be *low level coded*. Figure 12-3 represents the revised product structure trees after low level coding of FDD.

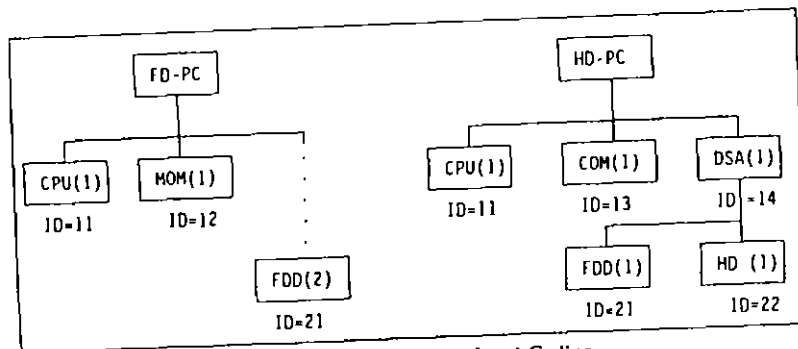


Figure 12-3: Product Structure Trees after Low Level Coding

As seen from Figure 12-3, all items have been assigned ID numbers, consistent with the method described above. The end items FD-PC and HD-PC have no ID numbers because the MRP module will automatically assign them numbers 1 and 2. Note that the first digit of the

ID number identifies the tree level at which the component is used. It is *extremely important* that when you enter the bill of materials (or product structure tree) into the computer, begin with the top level, enter all of the end items first. Then continue with items in the next lower level (level 1) and enter all of the components at this level. Then enter the components at the next level and so on. No sub-component should appear in BOM in such a way that its parent component falls below it in the list. If this occurs, the MRP output will most likely be erroneous.

### EXAMPLE 1 - CASE OF BUS, INC.

In this example you will use the MRP module to solve the above problem. Load DSSPOM into the computer and select the MRP module. Move the pointer to the INPUT option and press the <ENTER> key. The data input process will begin by asking for inputs for the MPS, followed by BOM, followed by IRF. The data entry for the scheduled receipts (SR) is optional and is used only when such information is available.

The initial data entry for MPS consists of problem title, the number of end items, the number of periods in the planning horizon, and the number of periods in a year as shown below

Problem title: BUS INC.
Number of end-items (products): 2
Number of periods in planning horizon: 12
Number of periods per year: 52
Enter problem parameters as requested. Press RETURN to accept, or ESC to exit. Maximum problem size is 5 end-items (products) and 26 periods, MPS quantities should be within 0-9999.

The number of periods per year is used in the computations of the operating costs. This number is 52 for a weekly planning horizon and 12 for problems with a monthly planning horizon.

After pressing the <ENTER> key, the computer will begin the spread sheet data entry process for the master production schedule (MPS) file. Note that in the MRP module, MPS is referred

the parts for building a unit are available, it takes one week to assemble, test, and ship the unit.

BUS purchases the CPUs and FDDs from Disks Repairs Unlimited Systems (Disks\_R\_US), a wholesale supplier of computer components. However, Disks\_R\_US sells the CPUs in boxes of 10 each and the FDDs in boxes of 30 each. Other components may be purchased at odd units depending on the quantity needed. Additional information such as safety stock, units on hand, annual demand, order cost, holding cost, lot size and order policy (to be discussed below) collectively referred to as the inventory record file (IRF), is presented in Table 12-1.

Item	On-hand (units)	Safety Stock (units)	Order Policy	Annual Demand (units)	Order Cost (\$)	Hold. Cost (\$)	Lot Size (units)
FD-PC	7	3	LFL	600	100	50	-
HD-PC	5	3	LFL	200	150	75	-
CPU	10	5	LOT	850	30	10	10
MOM	5	0	LFL	650	40	5	-
FDD	20	10	LOT	2500	50	10	30
COM	5	0	LFL	210	40	5	-
DSA	0	0	LFL	200	10	25	-
HDD	6	4	LFL	210	10	15	-

Table 12-1: Inventory Record File for BUS Inc.

The annual demand for several components exceeds the total quantity needed to assemble the two end items. These additional units are either sold separately or are used for servicing the units which are under guarantee. Holding cost is in dollars per unit per year. Order cost is in dollars per order and represents charges for shipping and handling. For assembled items (e.g., disk storage assembly), order cost represents setup cost. Annual demand, holding cost, and order cost are required for items ordered according to the period order quantity (POQ) policy. They are also used in determination of the annual operating costs.

#### Safety Stocks

As seen from Table 12-1, several items such as FD-PC require a certain number of units (in this case 3) be carried as safety stock. Safety stocks are usually carried as a hedge against

delays in the delivery of ordered items or shipments containing one or more defective items. For a problem to be consistent, the units on hand must be greater than or equal to the safety stock.

#### Order Policy

The column entitled "Order Policy" refers to the method by which an item is ordered. For instance, the CPUs and FDDs must be ordered in batches of 10 and 30, respectively. This method of ordering is called "Lot Size" (LOT) ordering and require the lot-size to be known a priori. Other items may be ordered according to the number of units needed. This method of ordering is referred to as lot-for-lot (LFL) or net-requirement ordering.

The MRP program also provides a third order method referred to as "period order quantity" or POQ. Whereas LFL order policy usually has high setup or order cost but low holding cost, LOT ordering has low setup or order cost but high holding cost. POQ balances ordering and holding costs and is described below.

Suppose that annual demand is denoted by  $D$ , setup or order cost is  $S$ , and inventory holding cost is  $H$  dollars per unit per year. The classical economic order quantity, which minimizes total annual costs of ordering or setup and inventory holding is given as,

$$EOQ = \sqrt{\frac{2DS}{H}}$$

Further, let  $NET$  denote the total net requirements during the planning horizon  $T$ . The planning horizon is typically 12 weeks (periods) long. The maximum  $T$  for DSSPOM is 26 weeks. The average net requirement,  $\mu_{NET}$ , is then,

$$\mu_{NET} = \frac{NET}{T}$$

Next determine  $POQ$ , the number of average net requirements,  $\mu_{NET}$ , in one  $EOQ$ , is

$$POQ = \frac{EOQ}{\mu_{NET}}$$

$POQ$  is then rounded up to the next integer. The  $POQ$  order policy is then to place an order for  $POQ$  weeks (or periods) worth of net requirements upon encountering the first positive net requirement. This order policy requires that annual demand, unit holding cost, and setup (or

## CHAPTER 12

# MATERIAL REQUIREMENTS PLANNING

### INTRODUCTION

Material requirements planning also known as MRP is a widely used computer-based technique for planning the material flows and production in manufacturing facilities. MRP is an important and necessary tool because of the complexity of product assemblies that consist of many sub-assemblies, components, sub-components and parts. Each product assembly, subassembly, component, sub-component and part has its own lead time which is the time required between the beginning and end of the manufacture of the respective product or product component. Frequent delays occur when sub-components or components have not been ordered or manufactured in time for use in the final product assembly.

A material requirements planning system consists of four modules or files. The first module is the master production schedule (MPS). MPS contain information about the quantities and timing (period of completion) of the various orders for the end-items or finished products. The next important module is the product structure tree, also referred to as the bill of materials (BOM). This file shows how the various parts, sub-components, components, and sub-assemblies fit together to make up the end-items or final assemblies. The third file is the inventory record file (IRF). IRF contains several items of information for every part. These include initial inventory (or on-hand), safety stock, lead time, order policy, setup or order cost, holding (or inventory carrying) cost, and lot-size. The fourth module or file is called scheduled receipts and is optional. That is, if one or more of the components have outstanding orders, from the previous planning horizon, which are scheduled to arrive (or be completed) in the current planning horizon, the timing and quantities of these orders are placed in the scheduled receipts (SR) file. MRP is best illustrated by the example shown below.

Chip Megahertz is the president of Basement Unlimited Supplies (BUS) Inc., a mail-order personal computer (PC) retailer. BUS offers two popular models of personal computers, FD-PC and HD-PC at discounted prices. BUS purchases various parts, needed for FD-PC and HD-PC, from several wholesale outlets around the country and assembles the PCs. Chip is about to develop a time-phased plan for the next three months. At present he has two orders for the FD-PC of 50 and 70 units and two orders for the HD-PC of 10 and 30 units as shown in Figure 12-1.

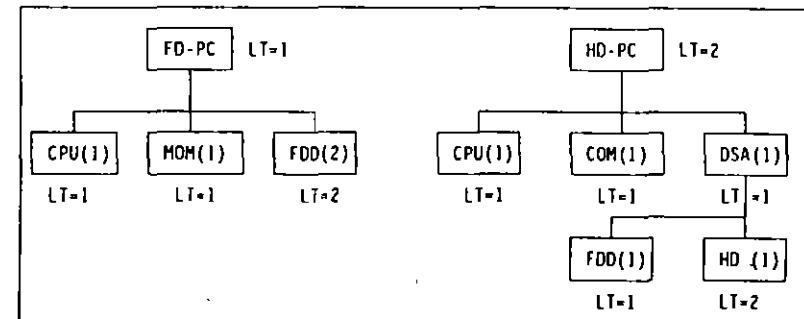
Week

End item	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
FD-PC								50				70
HD-PC						10				30		

Figure 12-1: Master Production Schedule for BUS Inc.

The MPS lists the number of units of each final product assembly that must be ready for delivery by specific dates. The dates are usually shown by week number as shown in Figure 12-1. Each week number, of course, corresponds to a specific date. For instance, week 8 could mean November 15, 1990. Note that 50 completed units of FD-PC must be ready for delivery in week 8 and 70 units must be ready in week 12. Since all components have lead times, they must of course be ready earlier than the week 8 and week 12 dates.

Model FD-PC includes a CPU (with the power supply), two floppy disk drives (FDD), and a monochrome monitor (MOM). HD-PC includes the same CPU, a color monitor (COM), and disk storage assembly (DSA). The disk storage assembly consists of one FDD and one 20 Meg hard disk drive (HDD). Figure 12-2 shows the product structure trees for FD-PC and HD-PC.



Note: Number in parenthesis is quantity needed per unit of parent  
LT is lead time

Figure 12-2: Product Structure Trees for FD-PC and HD-PC

Also shown is the lead time (LT) in weeks required for each component or product assembly. For example, the lead time for FD-PC is one week which indicates that once all of

model year was determined on the basis of expected demand over the next several years, and on the basis of the economic order quantity formula. Since the economic order quantity formula provided the most economical amount to order, it surprised Mr. Knight that the replacement parts division seemed to expend inordinate amounts on repeat runs. Mr. Knight attributed the decline in profitability to these repeat runs.

John Service, who had worked on a variety of special projects for Mr. Knight, was assigned to investigate the problems associated with the high cost of replacement parts batch runs. Following a thorough investigation he found that:

1. Replacement parts demand forecasting was not very accurate.
2. Start up costs during each replacement parts run was not considered in the economic order quantity calculations.
3. Estimates for set up cost and variable costs were based on two times the costs in effect during the high volume model year run.
4. A capital carrying cost of 50 percent per year was charged to replacement parts inventory.

John Service discussed his findings with engineering, production, and accounting staff and found that historical demand of a similar part was not an accurate prediction of demand. He also found that start up costs were never considered although there was a general awareness that the cost at the beginning of a batch run was much higher than at the end. They felt, however, that the doubling of original costs in the cost estimate should compensate for that. The capital carrying cost was based on the rate of return Cabrolet was earning on its physical assets after accumulated depreciation. The Cabrolet plant had a relatively low book value which, with high earnings, produced an average return on assets of 50 percent. Rate of return on cash holdings was not considered in determining the asset base since all the cash holdings were in the hands of the CENTRAL staff of Universal Motors. At the time, Universal Motors had substantial holdings of cash and convertible securities on which it was earning about 7.5 percent.

John Service decided at that point to investigate some actual data in order to determine how economic order quantities should be calculated. He collected data, shown below, on twelve randomly selected parts and was debating how large the carrying charge should be on the capital invested. He felt 50 percent was much too high; 15 to 25 percent seemed much more reasonable given that Cabrolet was a division of Universal Motors and Universal Motors was earning about 20 percent on its total assets. The set up costs were apparently quite accurate, but the variable costs were only accurate for a short production run of one day and too high for production runs of several days.

Determine economic lot sizes for several levels of holding cost, such as 50%, 35% and 20%. Also consider the two year demand data as demand for a single two year period. Does it change the economic lot sizes?

Cost and Volume Data - Universal Motors

Part Number	Annual Volume Forecast		Set Up Cost per Set Up	Variable Unit Cost
	1989	1990		
03641	900	780	\$ 580	\$ 5.60
47826	3000	4715	1200	4.20
81428	6000	4975	1470	1.60
05729	4200	3160	960	2.80
46211	28000	22600	2350	0.70
73589	1300	1800	400	5.10
47614	1200	2600	590	3.70
82947	3200	3300	860	8.40
32821	22000	21600	470	1.90
52682	1500	4600	910	3.20
43741	2400	1900	420	6.40
57892	16000	9500	380	2.20

9. Solve the quantity discount problem, for a product based on a 365-day year. The annual demand for the product is 60,000 units. Order cost per order amounts to \$350 and holding cost per unit per year is 25 percent of purchase price. The price list is as shown below.

Lot Size Category	Price
0 - 999	\$5
1000 - 4999	4.75
5000 - 9999	4.50
10000 - .....	4.40

10. Find the optimal reorder point, optimal safety stock and purchase lot size for problem 4. The demand distribution during the five day lead time is shown below. There are 365 days per year.

Demand during Lead Time	Frequency of Demand
350	20
400	40
450	80
500	40
550	20

11. Find the optimal reorder point, optimal safety stock and production lot size for problem 7. The demand distribution during the five day lead time is shown below. There are 365 days per year.

Demand during Lead Time	Frequency of Demand
280	5
290	10
300	30
310	35
320	15
330	5

12. Bleaker Manufacturing's President, faced with rising costs, asked his systems analyst to investigate the production practices of the company's major product line. The analyst found that he had to determine optimal production policy for a production rate of 1500 units per month and annual demand of 10,000 units. Set up cost amounted to \$200, and holding cost was \$1.50 per unit per month. He was also asked to investigate how much Bleaker could save if the current policy to have a production run once per month were changed to an economic production lot-size policy. What would you advise and why?

13. Determine the minimum cost production cycle for the following group of products, assuming 250 working days per year.

Product Number	Annual Unit Sales ( $D_i$ )	Daily Production Run ( $P_i$ )	Annual Holding Cost/Unit ( $IC_i$ )	Set up Cost per Run ( $S_i$ )
1	5000	100	\$1.00	\$40
2	9000	60	.80	25
3	8000	40	.40	35
4	16000	70	.60	30
5	6000	50	.20	90
6	10000	90	.30	60

#### 14. UNIVERSAL MOTORS (A)

The Cabrolet division of Universal Motors produces and markets automobiles in most parts of the world. Following the sale of its products the Cabrolet division guarantees to its buyers that replacement parts will be available for fifteen years in case of failure and normal wear. Since automobile models change from year to year the fifteen year parts availability placed an enormous burden on the replacement parts operation of the division. Although the replacement parts operation is usually considered the most profitable of all operations in the automobile industry, at the Cabrolet division the profitability of replacement parts had been declining. Jim Knight, the general manager of the operation thought that the profit decline could be attributed to the high set up and start up cost of each batch run.

In the automobile industry it is common practice for the replacement parts operation to order, at the end of a model year, a relatively large supply of those parts that are to be discontinued. Many parts continue from year to year, but some do not. By stock piling these discontinued parts, the replacement parts operation acquired at high volume production cost, replacement parts it could market over the year, or several years, depending on their respective demands. The supply of replacement parts ordered at the end of a

The first output report consists of the relative frequency distribution. The relative frequencies represent the fraction of times that the demand assumes the associated value. For example, demand during lead time is 10 units about 10 percent of the time, 15 units 30 percent of the time, etc. Also, the average demand during lead time is 19.10 units. Press the <ENTER> key to continue with the next report as shown below.

Problem Title: DISCRETE DEMAND Stochastic Demand Model with Lead-time				
Summary of Total Costs at Various Reorder Points				
Reorder Point	Safety Stock	Carrying Cost (\$)	Stockout Cost (\$)	Total Cost (\$)
10.0	0.0	0.00	910.00	910.00
15.0	0.0	2.50	460.00	462.50
20.0	0.9	12.50	160.00	172.50
25.0	5.9	32.50	60.00	92.50
30.0	10.9	55.00	10.00	65.00
35.0	15.9	79.50	0.00	79.50

Optimal Reorder Point = 30.0 units  
Optimal Safety Stock = 10.9 units

The second and final report presents the approximate optimal reorder policy. That is, for this example, the optimal reorder point is when the inventory is at about 30 units with a safety stock of about 10.9 units. This policy approximately minimizes the cost of inventory and stock-out. The solution procedure used here is a heuristic search process and not an exact solution method. The search procedure produces a solution which is sub-optimal but fairly reasonable.

## PROBLEMS

1. Economic purchase lot size problem (no shortages) - Suppose demand is 10,000 units per year, order cost per order amounts to \$150, and inventory holding cost per year is \$15 per unit. Find the optimal purchase lot size.
2. Economic purchase lot size problem (no shortages) - Suppose demand is 160,000 units per year, order cost per order amounts to \$300, and inventory holding cost per unit amounts to \$1.00. Find the optimal purchase lot size.
3. Economic purchase lot size problem (with shortages) - Suppose demand is 21,000 units per year, order cost per order amounts to \$220, inventory holding cost per year is \$9 per units and shortage cost per year is \$21 per unit. Find the optimal purchase lot size.
4. Economic purchase lot size problem (with shortages) - Suppose demand is 330,000 units per year, order cost is \$1,200 per order, inventory holding cost amounts to \$4.50 per unit per year, and shortage cost is \$2.00 per unit per year. Find the optimal purchase lot size.
5. Optimal production run size (no shortages) - Suppose the annual demand rate is 4,000 units and the annual production rate is 20,000 units. Set up cost is \$3,200 per set up and inventory holding cost is \$2 per unit per year. Find the optimal production run size.
6. Optimal production run size (no shortages) - Annual production capacity is \$240,000 units and annual demand is 20,000 units. Set up cost amounts to \$900 per set and inventory holding cost is \$3 per unit. Find the optimal production run size.
7. Optimal production run size (with shortages) - Shortage cost amounts to \$5 per year per unit and inventory holding cost amount to \$1.50 per year per unit. Set up cost is \$3,900 per set up, while annual demand is 98,000 units. Production capacity is 640,000 units per year. Find optimal production run size.
8. Optimal production run size (with shortages) - Set up cost to set up a production line with 140,000 units of annual capacity amounts to \$960. Annual demand is 68,000 units, inventory holding cost is \$6 per unit per year and shortage cost is \$1.50 per unit per year. Find optimal production run size.



Problem title: DISCRETE DEMAND

Enter number of days per year: 365  
 Enter annual demand: 1000  
 Enter annual production rate (0 if none): 0  
 Enter purchase price in dollars per unit: 0  
 Enter setup or order cost in dollars per order: 25  
 Enter the Lead-Time in days (0 if none): 5  
 Enter holding cost in dollars per unit per year: 5  
 Enter unit shortage cost in dollars/year (0 if none): 10

Enter problem parameters as requested. Press RETURN to accept, or ESC to exit.

After completing the initial data entry screen, the computer will ask if it should continue with the data entry for the demand distribution as shown below.

Continue with the distribution of demand during lead time (Y/N) Y

Press <Y> to continue the data entry process. The computer will then ask you to enter the number of observations as shown below.

Enter number of order quantities during ROP (up to 20): 6

Enter a 6 in this field and press the <ENTER> key to proceed. The computer will then display the spread sheet editor for entering the demand distribution. The completed spread sheet data entry is shown below.

C7 1		READY		
	A	B	C	
1	Observ.	Demand	Frequency	
2	1	10.0	5.0	
3	2	15.0	15.0	
4	3	20.0	20.0	
5	4	25.0	5.0	
6	5	30.0	4.0	
7	6	35.0	1.0	

After completing the spread sheet data entry, press the <F10> key to return to the main menu and keep the input data.

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option. Press the <ENTER> key to continue the solution process. The solution output report is shown below.

Problem Title: DISCRETE DEMAND		
Stochastic Demand Model with Lead-time		
Demand during Lead-time	Frequency of demand	Relative Frequency
10	5	0.100
15	15	0.300
20	20	0.400
25	5	0.100
30	4	0.080
35	1	0.020
Average Demand during Lead-time =		19.10 units

Problem Title: EOQ WITH DISCOUNTS

Economic Lot Size with Quantity Discounts:

The total cost for the feasible EOQ is 9219.52

Since this is larger than the total cost of ordering  
700 units, the optimal order quantity is 700

The above report indicates that the cost of ordering 700 units at a time is less than \$9,219.52 and therefore the optimal policy is to order 700 units at a time. The next display screen will report the itemized costs components for the optimal policy as shown below.

Problem Title: EOQ WITH DISCOUNTS

Economic Lot Size with Quantity Discounts:

Optimal order quantity is	700.0
Days between order	127.8
Annual holding cost	280.00
Annual order cost	142.86
Purchase price	8000.00
Total cost	8422.86

The optimal order policy requires an order size of 700 units, to be placed every 127.8 days, at a total annual cost of \$8,422.86.

### EXAMPLE 6 - STOCHASTIC DEMAND MODEL

The stochastic demand inventory model refers to a problem in which the demand during lead time is not constant (a fixed number of units per day) and varies probabilistically. In this case, demand during lead time is usually estimated via a discrete distribution consisting of the various amounts and associated frequencies of demand during lead time.

Consider a problem in which the annual demand is 1000 units, the lead time is 5 days, and the shortage cost is \$10. Holding cost is \$5 per unit per year and the order cost is \$25. The frequency distribution of the number of units demanded during the specified lead time is summarized in Table 11-1.

Demand During Lead Time	Frequency
10	5
15	15
20	20
25	5
30	4
35	1
Total	50

Table 11-1. Demand Levels During Lead Time and Respective Frequencies

You are now ready to solve the above problem. Load the DSSPOM program and select the Inventory Analysis program. After a few seconds the computer will load the program and displays the Inventory Menu.

Move the pointer to the INPUT option and pull the bar down to the "Discrete Demand Dist." sub-option, then press the <ENTER> key. The computer will proceed with the data entry process. Note that for this problem, production rate is not used and should be assigned 0. The purchase price is also assumed 0. The completed data entry screen is shown below.

include annual demand equal to 2000 units, setup or order cost equal to \$50, and the number of days per year is assumed to be 365.

To solve the above problem, load the DSSPOM program and select the Inventory Analysis from the Main Menu. When presented with the Inventory Menu, move the pointer to the INPUT option and select the "EOQ with Discount" sub-option by pulling the bar down one level and press the <ENTER> key

The computer will begin the data entry process by displaying a message about the special structure of this problem. The requirement for the EOQ with discounts model is that the order ranges be contiguous and span the positive Q axis.

Enter a proper title for this problem and press the <ENTER> key to continue with the data entry process. The computer will ask the number of days per year, followed by annual demand, setup or order cost, and the number of price break ranges. The completed initial data entry screen is presented below.

```

Problem title: EOQ WITH DISCOUNTS

Enter number of days per year: 365
Enter annual demand: 2000
Enter setup or order cost in dollars per order: 50

Enter the number of pricebreak ranges (up to 20): 5

Enter problem parameters as requested. Press RETURN to
accept, or ESC to exit. Quantity discount model: Note
that the pricebreak-ranges must be continuous and span the
positive Q-axis. The first (lowest) range must start at 0
and the last (highest) range should end at infinity.
    
```

Enter a 5 for the number of price ranges and press the <ENTER> key to proceed. The computer will then display the spread sheet data entry screen for the price break information. Note that the "Largest Quantity" for the last range is preset to a very large number. Do not change this number and make sure that the order sizes that you enter are sorted increasingly and will not exceed this number.

Proceed by entering the price break information in the appropriate columns and rows and press the <F10> to keep the data and exit the spread sheet editor. The completed spread sheet is shown below.

D7	4					READY
1	Upper	B	C	D		
2	Range	Largest	Holding	Unit		
3	1	Quantity	Cost	Price		
4	2	99.0	1.000	5.00		
5	3	199.0	0.960	4.80		
6	4	399.0	0.920	4.60		
7	5	999999.0	0.880	4.40		
			0.800	4.00		

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option. The computer will pause for a few seconds and then report the solution as shown below.

Problem Title: EOQ WITH DISCOUNTS

Economic Lot Size with Quantity Discounts:

Order	Range	EOQ	Status	Total cost
0	- 99	447.2136	Infeasible	10447.21
100	- 199	456.4	Infeasible	10038.18
200	- 399	466.3	Infeasible	9628.95
400	- 699	476.7	Feasible	9219.52
700	- ...	500	Infeasible	8400.00

The above report indicates that there is one feasible EOQ point in the range of 400 to 699. The total annual cost for this point is \$9,219.52. Because this EOQ point is not in the lowest price range, the total cost of the following break points must be computed and compared with this value. The next display screen will perform the comparison and reports the optimal policy as shown below.

The above report indicates that the optimal policy in this case is to produce 1,870.8 (or about 1,871) units at time. The resulting cycle is 136.6 days with 97.6 days of production. The maximum inventory is 534.5 units, having an annual cost of \$267.26 with a setup cost of \$267.26. The total annual cost, including cost of production, is \$50,534.52.

#### EXAMPLE 4 - PRODUCTION RUN SIZE MODEL WITH BACKLOG

This solved example is similar to the previous example, except that in this example backlog is permitted. Again, the cost of backlog is \$4 per unit.

To solve the above problem, move the pointer to the EDIT option and press the <ENTER> key to begin the edit process. Keep the parameters the same as in Solved Example 3 by pressing the <ENTER> key eight times (to accept the current data for the eight parameters). Change the shortage penalty cost to 4 and press <ENTER>. The completed data edit screen is shown below.

```

Problem title: PRODUCTION RUN
Enter number of days per year: 365
Enter annual demand: 5000
Enter annual production rate (0 if none): 7000
Enter purchase price in dollars per unit: 10
Enter setup or order cost in dollars per order: 100
Enter the lead-time in days (0 if none): 0
Enter holding cost in dollars per unit per year: 1
Enter unit shortage cost in dollars/year (0 if none): 4
    
```

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option by pressing the <ENTER> key. The computer will pause for a few seconds and then display the following solution report.

Problem Title: PRODUCTION RUN	
Economic run size model with shortage :	
Days between production runs	152.7
Shortage period is	30.5
Re-Production Point is	0.0
Optimal run size is	2091.7
Maximum inventory level is	478.1
Maximum shortage is	119.5
Holding cost	191.24
Setup cost	239.05
Shortage cost	47.81
Purchase price	50000.00
<b>Total cost</b>	<b>50478.09</b>

As seen from the above report, the optimal policy for this problem is to produce up to 2091.7 in each run, resulting in a cycle of length 152.7 days. The maximum inventory is 478.1 units and the maximum shortage is 119.5 units. The inventory holding cost is \$191.24 with a annual setup cost of \$239.05. The shortage penalty cost amounts to \$47.81 per year with a total annual cost, including production cost, of \$50,478.09.

#### EXAMPLE 5 - EOQ MODEL WITH QUANTITY DISCOUNTS

This example involves solving an EOQ problem in which the purchase of larger batches qualifies for unit price reduction. Consider for example the following price table with volume discounts.

Order Quantity	Unit Price (\$)	Holding Cost*
0 - 99	5.00	1.00
100 - 199	4.80	0.96
200 - 399	4.60	0.92
400 - 699	4.40	0.88
700 -	4.00	0.80

\* Holding cost is in \$ per unit per year and is 20% of unit price.

The above table indicates that if the order size is from 0 to 99 units, the unit price will be \$5.00. For orders between 100 and 199, a discount of \$0.20 is provided and the unit price is therefore \$4.80. Additional increase in the size of the order qualifies for further discounts in the purchase price as shown in the table. Other relevant information for this problem

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the "Display Output" sub-option. Press the <ENTER> key to solve the problem as shown below.

Problem Title: EQO WITH SHORTAGE	
Economic purchase lot size model with shortage :	
Days between orders	81.6
Shortage period is	16.3
Re-Order Point is	41.1
Optimal order quantity is	1118.0
Maximum inventory level is	894.4
Maximum shortage is	223.6
Holding cost	357.77
Setup cost	447.21
Shortage cost	89.44
Purchase price	50000.00
Total cost	50894.43

As seen from the above output report, the optimal order policy has slightly changed. In particular, now the optimal order quantity is 1,118 units every 81.6 days. This policy causes a shortage period of about 16.3 days in every cycle. The various cost components are: \$357.77 for inventory holding cost; \$447.21 for order cost; and \$89.44 for shortage cost. The total annual cost including purchase price is \$50,894.43.

### EXAMPLE 3 - THE PRODUCTION RUN SIZE MODEL

This example involves the use of the production run size model to solve an inventory problem in which items are being produced as well as consumed. As an example problem, suppose that in Solved Example 1, instead of purchasing the product you produce it. Further, suppose the maximum production rate is 7000 units per year and that the setup cost is the same as the order cost and is equal to \$100. The number of days per year is 365 and the inventory holding cost is \$1.00 per unit per year with a unit production cost of \$10 (note that the data is intentionally kept the same as in Example 1 to provide for a comparison). The lead time is set to 0 for this example.

To solve this problem, move the pointer to the INPUT option and select "Lot/Run Size Models" sub-option and press the <ENTER> key. If you have just begun with this exercise, the computer will immediately begin the data entry process. However, if you are continuing from the previous example, the computer will display a warning message, indicating that there is another model in the memory. It will then ask you if the current model should be discarded. This solved example, is a continuation of the previous one, therefore the following message is displayed.

Erase current model and begin a new one (Y/N) Y

Press <Y> to erase the current model and continue with the new example problem. The computer will then present a new data entry screen, requesting the relevant parameters one at a time. The completed data entry screen is shown below.

Problem title: PRODUCTION RUN	
Enter number of days per year:	365
Enter annual demand:	5000
Enter annual production rate (0 if none):	7000
Enter purchase price in dollars per unit:	10
Enter setup or order cost in dollars per order:	100
Enter the Lead-Time in days (0 if none):	0
Enter holding cost in dollars per unit per year:	1
Enter unit shortage cost in dollars/year (0 if none):	0
Enter problem parameters as requested. Press RETURN to accept, or ESC to exit.	

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the "Display output" sub-option. The computer will pause for a few seconds and then display the following output report.

Problem Title: PRODUCTION RUN	
Production run size model with no shortage :	
Days between production runs	136.6
Length of run is	97.6
Optimal run size is	1870.8
Re-Production Point is	0.0
Max inventory level is	534.5
Annual holding cost is	267.26
Annual setup cost is	267.26
Purchase price is	50000.00
Total cost is	50534.52

the Inventory Analysis main menu. Move the pointer to the INPUT option. This option has three sub-options as shown below.

```

Input Edit Print File Solve Quit
┌───────────────────────────────────┐
│ Lot/Run Size Models              │
│ EOQ with Discount                │
│ Discrete Demand Dist.           │
└───────────────────────────────────┘

```

Because the problem at hand involves the basic EOQ model, press the <ENTER> key to select the first choice. The computer will continue with the data entry process. You will be asked to enter the relevant parameters one at a time. For the parameters for which you do not have a value, press the <ENTER> key to input a zero. For this problem assumes that there are 365 days per year. The completed data entry screen is presented below.

```

Problem title: BASIC EOQ

Enter number of days per year: 365
Enter annual demand: 5000
Enter annual production rate (0 if none): 0
Enter purchase price in dollars per unit: 10
Enter setup or order cost in dollars per order: 100
Enter the Lead-Time in days (0 if none): 3
Enter holding cost in dollars per unit per year: 1
Enter unit shortage cost in dollars/year (0 if none): 0

```

After completing the data entry process, obtain a hard copy print-out of the input data. Examine the print out carefully for any typing mistakes. If there are any errors, move the pointer to the EDIT option and press <ENTER>. The computer will place the pointer back on the title field and resume the edit process. Edit the data as needed and correct any errors.

You may also wish to save the problem on disk for future use. To do this, move the pointer to the FILE option and select the "Save Current File" sub-menu. The computer will ask you to enter a DOS file name. Use a proper suffix such as "INV" in the file name for ease of recognition in future.

You are now ready to solve this basic EOQ problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the "Display Output" sub-option. The computer will solve the problem and provide the following report.

Problem Title: BASIC EOQ	
Economic purchase lot size model with no shortage:	
Days between orders	73.0
Optimal order quantity is	1000.0
ReOrder Point is	41.1
Annual holding cost	500.00
Annual order cost	500.00
Purchase price	50000.00
Total cost	51000.00

As seen from the above report, the optimal order quantity for this product is 1000 units at a time. This implies five orders per year, or every 73 days. The order cost is \$500 (five orders at \$100 each), the annual holding cost is \$500, and the total annual cost is \$51000. Because the lead time is three days, the order should be placed when the inventory level reaches 41.1.

#### EXAMPLE 2 - THE BASIC EOQ MODEL WITH BACKLOG

Consider the above example, but now suppose that backlog is permitted with the shortage penalty cost at \$4 per unit. To solve this problem, move the pointer to the EDIT option and press the <ENTER> key. The program will resume the edit process by advancing the pointer to the title field. Change the title to "EOQ WITH SHORTAGE" and press <ENTER>. Press the <ENTER> key seven times to accept the current values of other parameters and to reach the shortage cost inquiry. Change the shortage cost to 4 and press <ENTER>. The completed edit screen is shown below.

```

Problem title: EOQ WITH SHORTAGE

Enter number of days per year: 365
Enter annual demand: 5000
Enter annual production rate (0 if none): 0
Enter purchase price in dollars per unit: 10
Enter setup or order cost in dollars per order: 100
Enter the Lead-Time in days (0 if none): 3
Enter holding cost in dollars per unit per year: 1
Enter unit shortage cost in dollars/year (0 if none): 4

```

## PRODUCTION RUN SIZE MODEL WITH BACKLOG

The production run size model with backorders or shortages is illustrated in Figure 11-4. Note that backorders and shortages are allowed and, as a result, the economic production run size (Q) is substantially higher than the maximum inventory ( $I_M$ ).

The formula for the economic production run size is,

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \sqrt{\frac{(B+H)}{B}} \sqrt{\frac{P}{(P-D)}}$$

In this case as well as in the previous model, the production rate P must be larger than the demand rate D.

The formula for the maximum inventory level ( $I_M$ ) is,

$$I_M = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \sqrt{\frac{B}{(B+H)}} \sqrt{\frac{(P-D)}{P}}$$

In this model and in the previous model, the amount of backordering or shortages allowed will depend on the relationship between the inventory holding cost (H) and the shortage cost (B). The higher B, the lower will be the backorders or shortages allowed.

## ECONOMIC LOT SIZE WITH QUANTITY DISCOUNTS

The quantity discount model enables you to find the optimum purchase lot size if the purchase price depends on the number of units ordered at a time. Suppose the purchase price is \$5.00 per unit if you order from 1 to 99 units; if you order from 100-499 units the price drops to \$4.95 per unit and if you place an order of 500 units or more the price drops to \$4.90 per unit. In the above situation, we must consider the purchase price in the optimal purchase lot size decision. The number of units at which the price changes is called the price break. In the above example price breaks occur at 99 and 499 units.

The quantity discount model only applies to purchase lot sizes with no shortages. The DSS model calculates the optimal lot size for a given price and then checks if the calculated lot size agrees with the purchase price. If it does not, the computer model will recalculate the optimal lot size until both the lot size and purchase price agree.

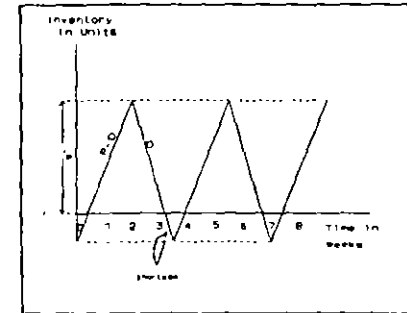


Figure 11-4: Production Run Size with Backlog

## STOCHASTIC DEMAND MODEL WITH LEAD TIME

The stochastic demand model evaluates and balances the holding and shortage costs for varying re-order point and safety-stock levels with the objective of minimizing the total costs. Application of the model requires a listing of the demands during lead time. That is, a table of demands with respective frequencies of demand must be supplied to the computer. This demand and frequency data is based on either demand estimates, or a historical tabulation of demand data with historical frequencies. An example of such demand and frequency data is shown on Table 11-1. Also required is a specification of the approximate annual demand as well as the number of days per year on which the data is based.

Based on that input data, the computer then provides a summary of several reorder points and the resultant safety stock, inventory holding costs, inventory shortage costs, and total costs. Based on the tabulated total costs, an optimal solution is selected which provides the optimal re-order point and the optimal safety stock.

### EXAMPLE 1 - THE BASIC EOQ MODEL

This example involves the use of the basic economic order quantity (EOQ) model to find an optimal order policy. Suppose that the demand for a product is 5000 units per year and it has a purchase price of \$10. The product is small but quite fragile. Consequently, the supplier charges \$100 for shipping and handling regardless of the order size. It takes 3 days for an order to arrive. The holding (inventory carrying) cost of this product is \$1.00 per unit per year and no backlog is permitted.

To solve the above problem, load the DSSPOM program and select the Inventory Analysis program from the Main Menu. After a few seconds, the computer will display

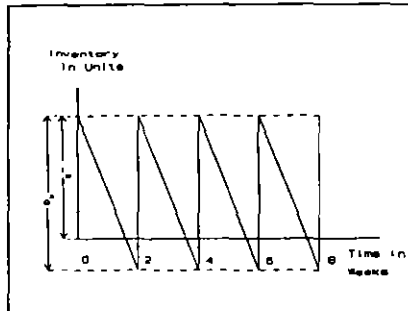


Figure 11-2: Economic Lot Size Model With Shortage

The amount of demand that can be backordered or shorted will depend largely on the relationship between inventory holding cost ( $H$ ) and shortage cost ( $B$ ). If  $H$  is about equal to  $B$  then the amount backordered will be about equal to the maximum inventory level. The larger  $H$  is in relation to  $B$  the larger will be the backordered units. Similarly the smaller  $H$  is in relation to  $B$  the smaller will be the allowed backordered units.

### PRODUCTION RUN SIZE MODEL WITHOUT SHORTAGES

In the production run size model, the replenishment of inventory is not instantaneous but gradual, at a constant rate equal to production. It is assumed in this model that as soon as the inventory level reaches zero, a production run is started up to replenish the depleted inventory.

The above scenario can be seen in Figure 11-3. As in the previous model, the production run size ( $Q$ ) will be larger than the maximum inventory ( $I_M$ ). However,  $Q$  cannot be shown on the graph. At time 0, production is started, and between time 0 and 2, inventory is replenished at the production rate  $P$  minus the demand rate  $D$  for a net inventory replenishment rate  $P-D$ . From time 2 to time 3 the accumulated maximum inventory ( $I_M$ ) is depleted at the demand rate  $D$  until all inventory is used up and the production process is started up again. Hence, between time 2 and time 3 there is no production taking place. Presumably, the production equipment will be idle or engaged in producing another product.

The formula for the economic production run size model is,

$$Q = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \sqrt{\frac{P}{P-D}}$$

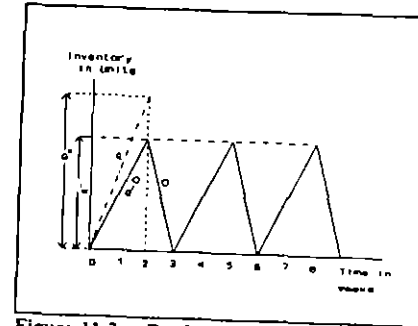


Figure 11-3: Production Run Size Model Without Backlog

where  $S$  is the production line set up cost per set up in dollars, and  $P$  is the annual production rate in units per year. All other symbols are identical to those used in the other models. The production rate is the rate of production which will produce  $P$  units per year if the production line were utilized continuously.

The formula for determining the maximum inventory level ( $I_M$ ) is,

$$I_M = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \sqrt{\frac{(P-D)}{P}}$$

Both formulas are derived from the total cost ( $TC$ ) formula,

$$TC = \frac{I_M H}{2} + \frac{DS}{Q} + CD$$

You may observe that this formula is identical to the economic purchase lot size model except for the first term, where  $I_M$  instead of  $Q$  is used. Also note that  $I_M$  is related to  $Q$  by the formula,

$$I_M = \frac{Q(P-D)}{P}$$



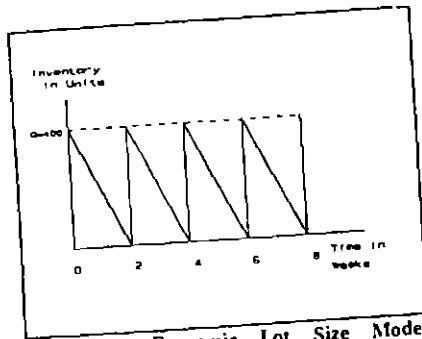


Figure 11-1: Economic Lot Size Model Without Backlog

where  $Q^*$  is the optimal lot size in units,

D is annual demand in units  
 S is ordering cost per order in dollars  
 H is inventory holding cost per unit per year in dollars  
 C is acquisition cost per unit in dollars.

The formula is derived by minimizing the total cost (TC).

$$TC = \frac{QH}{2} + \frac{DS}{Q} + CD$$

Hence, the optimal lot size will increase as annual demand (D) or ordering cost (S) increases. Similarly, the optimal lot size will decrease as the inventory holding cost (H) increases.

### EOQ MODEL WITH BACKORDERS AND SHORTAGES

The economic purchase lot size model with backorders and shortages assumes that shortages are allowed and any units short will be delivered upon receipt of the inventory replenishment order. For each unit short there is an inventory shortage cost based on the length of time the unit is short. Otherwise, the assumptions underlying this inventory model are the same as the economic purchase lot size model without backorders and shortages.

The shortage model is illustrated in Figure 11-2. Note that in the non-shortage model the maximum inventory level was equal to the economic purchase lot size. In the shortage model the maximum inventory ( $I_M$ ) is less than the economic purchase lot size ( $Q^*$ ). The amount that is backordered and short in each order cycle amounts to  $Q^* - I_M$  units. If the economic purchase lot size ( $Q^*$ ) amounts to 400 units and maximum inventory is 360 units then 40 units can be backordered or shorted.

The formula for the economic purchase lot size with backorders and shortages allowed is,

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \sqrt{\frac{(B+H)}{B}}$$

where B is the shortage cost per unit per year in dollars.

Note that the first part of the above formula is identical to the formula for the economic purchase lot size. The second part of the above formula modifies  $Q^*$  to take account of the backorders and shortages.

The formula to determine the maximum inventory level is,

$$I_M = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \sqrt{\frac{B}{(B+H)}}$$

From the above two formulas, we can derive the backorder or shortage level. It is determined by the formula,

$$Q^* - I_M = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \left[ \sqrt{\frac{(B+H)}{B}} - \sqrt{\frac{B}{(B+H)}} \right]$$

The above formulas are derived from the total cost (TC) formula,

$$TC = \frac{I_M^2 H}{2Q} + \frac{DS}{Q} + CD + \frac{(Q - I_M)^2 B}{2Q}$$

10. Jobe Industries is expanding its product line to include a new model, XT-40. It will be produced on the same equipment as Jobe's other products and the objective is to meet the demand. The demand forecast in units for the next four months is 800, 600, 900, and 1150, respectively.

Because the model XT-40 deteriorates quickly, there is a large loss in quality, and, consequently, a high carryover cost into subsequent periods. Each unit of the XT-40 carried over into future months costs \$7.50 per month per unit.

Production can take place during regular hours or during overtime. The rate of pay for regular time is \$6 per hour and overtime is time and a half. Workers are under union contract and work 20 days per month. Each unit requires 5 hours to build.

The available production capacity in units for regular time and overtime is:

	PERIOD			
	1	2	3	4
Regular	700	700	700	700
Overtime	105	175	210	245

Find an optimal production schedule.

11. In problem 10, assume that XT-40 can be sub-contracted at a cost of \$45 and the sub-contract capacity is 20% of regular time capacity. Find the optimal schedule.

## CHAPTER 11 INVENTORY ANALYSIS

### INTRODUCTION

The six inventory models to be presented below are used in the determination of optimal purchase or production lot sizes. By optimal lot sizes we refer to minimum cost lot sizes where costs consist of set up or ordering cost, inventory holding costs, and shortage costs if appropriate. The case of quantity discounts and the stochastic demand model will also be covered. Data that needs to be entered in order to help solve the six inventory models consist of annual demand, annual production rate, purchase price per unit, holding cost per unit, shortage cost per unit, set up or order cost per unit, number of days per year, quantity discounts, and demands during lead time with associated frequencies.

The six inventory models consist of; the economic purchase lot size model, without back orders and without shortages allowed; the economic purchase lot size model with backorders and shortages allowed; the production run size model without backorders and shortages allowed; the production run size model with back orders and shortages allowed; the quantity discount model; and the stochastic demand model. Below we shall discuss each of the six inventory models in detail. In the first five models it is assumed that annual demand is deterministic.

### ECONOMIC PURCHASE LOT SIZE MODEL

The economic purchase lot size model assumes that there are no shortages. In other words, as soon as the inventory is depleted there will be an immediate replenishment of the inventory with a new lot size of inventory. It is also assumed that the inventory is used up at a constant rate.

The above assumptions are illustrated in Figure 11-1. Note that the assumed economic lot size of  $Q = 400$  units is used up every two weeks for an annual demand of  $(26)(400) = 10,400$  units. As soon as the economic lot size of 400 units is used up, a replenishment shipment of 400 additional units arrives for the next two week period.

The formula for the economic purchase lot size without backorders and shortages is,

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{H}}$$

6. Tyson Motor Company has the following demand forecast for the next year, expressed in six bi-monthly periods:

PERIOD	PRODUCT A	PRODUCT B	PRODUCT C
1	250	300	450
2	270	300	500
3	350	300	450
4	430	300	400
5	500	300	400
6	400	300	400
Total	2,200	1,800	2,700

The regular time and overtime production capacities are:

PERIOD	Regular Time	Overtime
1	1000	200
2	1000	200
3	900	180
4	900	180
5	1000	200
6	1000	200
Total	5,800	1,160

Regular time cost is estimated at \$10 per unit and increases by 10% in each period. Overtime cost is fixed at \$20 per unit with inventory carrying cost equal \$2.00 for Product A, \$2.50 for B, and \$3.00 for C. Back-order cost is 20% higher than inventory carrying cost plus regular time production cost. Find the optimal production schedule.

7. In problem 6, suppose that up to 100 units can be sub-contracted in each period. Further, let the sub-contract cost be 150% of regular time cost. Find the optimal production schedule.

8. Videotek Enterprises is producing two brands of video telephones for the home market. Quality is not quite as high as it could be at this point, but the selling price is high and Videotek has the opportunity to study the market response while spending more time on research and development.

At this stage, Videotek needs to develop an aggregate production plan for the following year. You have been retained to assist the managers in this task.

Monthly demand for the two brands A and B are given below. The manufacturing labor cost is \$75 per unit for Brands A and B. Inventory holding costs are \$7 per unit per month for each brand. Backorder costs amount to \$20 per unit for Brand A and \$40 per unit for Brand B.

Ten labor hours are required per telephone set and the work day is 8 hours. Assume 20 working days each month, except for August when the plant closes for 2 weeks vacation. VideoTek employs five workers and each is allowed 25% of overtime. Overtime cost is estimated at 20% in excess of manufacturing cost.

MONTH	Expected Demand in Units	
	A	B
JANUARY	40	40
FEBRUARY	60	40
MARCH	60	50
APRIL	40	40
MAY	30	30
JUNE	25	25
JULY	20	20
AUGUST	20	20
SEPTEMBER	30	20
OCTOBER	50	40
NOVEMBER	60	40
DECEMBER	50	60

9. In problem 8, suppose that backorder is not permitted. Add as many workers as needed to develop an optimal feasible production schedule.

Problem Title: AGGREGATE PLANNING	
*** Cost Report: By Product ***	
Product: Prod2	
Regular Time Production Cost	33000.00
OverTime Production Cost	9000.00
Sub-Contracting Cost	0.00
Inventory Carrying Cost	0.00
Back-Order Cost	0.00
Product Sub-Total Cost	42000.00

As seen from the above report, the cost values for product 2 is the same as in Example 1. The total cost for product 1 is \$48,900 which is \$200 less than that in Example 1. The lower cost is due to the smaller regular time production cost (\$42,000 instead of \$45,000), and back-order cost (\$1,500 instead of \$3,500). The sub-contract cost for this schedule is larger (\$4,800 compared with 0 in Example 1) but is offset by the lower regular time and back-order costs. This difference which amounts to \$200 is reflected in the overall cost as shown below.

Problem Title: AGGREGATE PLANNING	
*** Cost Report: Summary ***	
Regular Time Production Cost	75000.00
OverTime Production Cost	9000.00
Sub-Contracting Cost	4800.00
Inventory Carrying Cost	600.00
Back-Order Cost	1500.00
Overall Total Cost	90900.00

As seen from the above output report, the overall cost of production for both products is \$90,900 which is \$200 less than that in Example 1.

## PROBLEMS

1. The demand forecast for a product, over a six-month period, consists of 100, 350, 200, 300, 350, and 400 units for months one through six, respectively. The regular time capacity is 250 units per month and overtime capacity is 20% of regular time. Regular time production cost is \$50 per unit and overtime cost is 10% over the regular time. The inventory carrying cost is \$6 per unit per month and backorder cost is \$12 per unit. Find the optimal production schedule.
2. In problem 1, suppose that no back-ordering is allowed. Find the optimal production schedule.
3. In problem 1, suppose that the demand forecasts and the regular time production cost is adjusted for inflation. In particular, let the inflation rate be 2% per month. Revise the regular time production costs accordingly and solve the problem.  
Hint: Assume that the production cost in each month is 2% more than in the previous month.
4. Suppose that there is an initial inventory of 100 units available in problem 1. Find the optimal production schedule. Hint: Reduce demand forecast in month 1 by 100 units.
5. The Premain Company provides preventative maintenance and minor repair service at a fixed charge for clients within a 20 mile radius. The company's customers have seasonal businesses and try to postpone some maintenance until their slow season. This results in a seasonal demand for Premain's services. The number of jobs forecasted for the 4 quarters of next year are 720, 940, 820, and 1060, respectively. The typical service call requires one hour, including travel and paperwork. Employees are paid \$10.00 per hour, and the typical employee provides 480 hours of direct work per quarter. Based on the nature of the business, it is not possible to service units before they fail. Overtime is allowed up to 25% of regular time at a cost of 50% higher than regular time.  
  
Skilled workers who are reliable enough to make these service calls are scarce and Premain wants to provide job security to those it can attract. Give an appropriate production schedule, along with the associated cost for Premain. Begin with 2 workers and find the optimal schedule. Hint: Use a very large positive number for inventory cost.

Note that the dots (periods) have been replaced by their proper values. To enter the sub-contract capacity, move the pointer to cell D3 and type 100 then press <ENTER>. As before, you need not enter the capacities for the remaining four periods since the dots will be interpreted as having the same value as in period 1. Move the pointer to cell H3 and type 48 and then press <ENTER>. The edit process is complete so, press <F10> to keep the data in memory and exit from the spread sheet editor. The completed spread sheet is shown below.

H3	48	A	B	C	D	E	F	G	H
1			Capacity				Cost		
2	Resources	R-Time	O-Time	Sub-Con		R-Time	O-Time	Sub-Con	
3	Period1	800	200	100		30.00	45.00	48.00	
4	Period2	600	150	.		30.00	45.00	.	
5	Period3	400	100	.		30.00	45.00	.	
6	Period4	400	100	.		30.00	45.00	.	
7	Period5	400	100	.		30.00	45.00	.	
8									
9									

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the solve option and select the Display Output sub-option. The computer will pause for a few seconds and then display the production schedule as shown below.

Problem Title: AGGREGATE PLANNING						
*** Production Schedule ***						
		Product: Prod1				
Period	Reg-Time	Over-Time	Sub-Cont.	Demand	Invent.	
1	600.0	0.0	0.0	500.0	100.0	
2	400.0	0.0	0.0	500.0	0.0	
3	100.0	0.0	100.0	300.0	-100.0	
4	150.0	0.0	0.0	100.0	-50.0	
5	150.0	0.0	0.0	100.0	0.0	

Problem Title: AGGREGATE PLANNING						
*** Production Schedule ***						
		Product: Prod2				
Period	Reg-Time	Over-Time	Sub-Cont.	Demand	Invent.	
1	200.0	0.0	0.0	200.0	0.0	
2	200.0	100.0	0.0	300.0	0.0	
3	300.0	100.0	0.0	400.0	0.0	
4	250.0	0.0	0.0	250.0	0.0	
5	150.0	0.0	0.0	150.0	0.0	

As seen from the above output report, the production schedule for product 1 is slightly different than that in Example 1. In particular, the regular time production in period 5 is 150 units which is 100 less than the schedule in Example 1. Instead, the 100 units have been sub-contracted in period 3. Note that the 100 units was used as back-order in Example 1. Apparently, it is more cost effective to sub-contract the 100 units in period 3 than to back-order it two periods. The cost report should indicate the difference. Press a key to continue and press <ENTER> to see the cost report as shown below.

Problem Title: AGGREGATE PLANNING	
*** Cost Report: By Product ***	
Product: Prod1	
Regular Time Production Cost	42000.00
OverTime Production Cost	0.00
Sub-Contracting Cost	4800.00
Inventory Carrying Cost	600.00
Back-Order Cost	1500.00
<b>Product Sub-Total Cost</b>	<b>48900.00</b>

Problem Title: AGGREGATE PLANNING  
\*\*\* Cost Report: By Product \*\*\*

Product: Prod1

Regular Time Production Cost	45000.00
OverTime Production Cost	0.00
Sub-Contracting Cost	0.00
Inventory Carrying Cost	600.00
Back-Order Cost	3500.00
Product Sub-Total Cost	49100.00

The first report is for product 1. It indicates that the cost of regular time production is \$45,000, and no overtime and/or sub-contracting have been used. The inventory carrying cost is \$600 and back-order cost is \$3,500 with the total cost being \$49,100. Press any key to obtain the cost report for the second product as shown below.

Problem Title: AGGREGATE PLANNING  
\*\*\* Cost Report: By Product \*\*\*

Product: Prod2

Regular Time Production Cost	33000.00
OverTime Production Cost	9000.00
Sub-Contracting Cost	0.00
Inventory Carrying Cost	0.00
Back-Order Cost	0.00
Product Sub-Total Cost	42000.00

The costs for product 2 consists of \$33,000 for regular time, \$9,000 for overtime for a total of \$42,000. For this product no inventory or back-order were used and therefore these costs are 0. Press a key to continue with the summary of cost figures as shown below.

Problem Title: AGGREGATE PLANNING  
\*\*\* Cost Report: Summary \*\*\*

Regular Time Production Cost	78000.00
OverTime Production Cost	9000.00
Sub-Contracting Cost	0.00
Inventory Carrying Cost	600.00
Back-Order Cost	3500.00
Overall Total Cost	91100.00

The above results indicate that the overall regular time production cost is \$78,000, overtime production cost amounts to \$9,000, inventory carrying cost is \$600, and back-ordering costs \$3,500. The total cost of production schedule is \$91,100.

**EXAMPLE 2 - USING SUB-CONTRACTS**

In this example you will consider the use of sub-contracting to provide additional production capacity. Consider the two-product problem in Example 1. Now suppose that the products may be sub-contracted for \$48 per unit and that sub-contract capacity is 100 units per period.

To solve the above problem, move the pointer to the EDIT option and press the <ENTER> key several times to invoke the spread sheet editor and edit the problem data in Example 1. The initial screen, before the edit process is shown below.

A1								READY
1	A	B	C	D	E	F	G	H
2	Resources	R-Time	O-Time	Sub-Con		R-Time	O-Time	Sub-Con
3	Period1	800	200	.		30.00	45.00	.
4	Period2	600	150	.		30.00	45.00	.
5	Period3	400	100	.		30.00	45.00	.
6	Period4	400	100	.		30.00	45.00	.
7	Period5	400	100	.		30.00	45.00	.
8								
9								

After entering all of the demand forecasts, proceed with the data entry by entering the holding costs and back-order costs. Move the pointer to cell J8 and enter 6 and press <ENTER>. Then move the pointer to cell K8 and enter 9 then press <ENTER>. To enter the back-order costs, move the pointer to cell J9 and enter 10 then press <ENTER>. Next move the pointer to cell K9 and enter 15 followed by <ENTER>. The completed spreadsheet is shown below.

K9	15	E	F	G	H	I	J	K
1	.	D	R-Time	Cost	Sub-Con	Demands	Prod1	Prod2
2	.	Sub-Con	30.00	45.00	.	Period1	500	200
3	.	.	.	.	.	Period2	500	300
4	.	.	.	.	.	Period3	300	400
5	.	.	.	.	.	Period4	100	250
6	.	.	.	.	.	Period5	100	150
7	.	.	.	.	.	Hold-Cost	6.00	9.00
8	.	.	.	.	.	Back-Cost	10.00	15.00
9	.	.	.	.	.			

After completing the spreadsheet data entry, press <F10> to exit from the spreadsheet editor and keep the data in memory.

You may now obtain a hard copy printout of the input data by moving the pointer to the PRINT option and press <ENTER>. Be sure that the printer is on and ready before you proceed. You can also save the problem on the disk for future references. If so, move the pointer to the FILE option and select the "Save current file" sub-option by pulling the bar down one level. Press the <ENTER> key to select. The program will display the current drive and sub-directory and asks you to enter a file name. Enter an appropriate DOS file name.

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option and press <ENTER>. The computer will pause for a few seconds and then report the optimal production schedule as shown below.

Problem Title: AGGREGATE PLANNING					
*** Production Schedule ***					
Period	Product: Prod1			Demand	Invent.
	Reg-Time	Over-Time	Sub-Cont.		
1	600.0	0.0		500.0	100.0
2	400.0	0.0		500.0	0.0
3	100.0	0.0		300.0	-200.0
4	150.0	0.0		100.0	-150.0
5	250.0	0.0		100.0	0.0

Press a key to obtain the production schedule for product 2 as shown below.

Problem Title: AGGREGATE PLANNING					
*** Production Schedule ***					
Period	Product: Prod2			Demand	Invent.
	Reg-Time	Over-Time	Sub-Cont.		
1	200.0	0.0		200.0	0.0
2	200.0	100.0		300.0	0.0
3	300.0	100.0		400.0	0.0
4	250.0	0.0		250.0	0.0
5	150.0	0.0		150.0	0.0

As seen from the above solution reports, the optimal production schedule for the two products consists of a combination of resources utilizing regular time, overtime, inventory, and back-orders. All of the demands for product 1 have been satisfied through regular time production, inventory on hand, and back-ordering. The demands for product 2 have been met by using regular time and overtime production. For this product, no back-order or on hand inventory has been used.

The Aggregate Layout program also reports the various cost components of the schedule. Press any key to proceed with the cost reports. The computer will ask if you wish to see the cost reports. Press <ENTER> to see the reports as shown below.

### Entering the Production Capacities

The spread sheet editor for this problem has three separate sections (two of which are shown above). The first section entitled "Capacity" is designed for entering the regular time, overtime, and sub-contract capacities for various periods. Initially, all of the cells in this section contain periods "A" (The use of the "A" character is to center the cell entry). The periods have special meanings to the program. In particular, for a problem in which the production capacity (such as regular time) does not change over time, you need not enter all of the data. Just enter the fixed value for the first time period and leave the remaining entries as "A". The program will interpret this as other time periods having the same production amount. Note that the use of a "0" instead of a period will not work.

Begin the data entry process by moving the pointer to cell B3 and type 800 then press <ENTER>. Next move the pointer to cell B4 and type 600 and press <ENTER>. Enter the regular time production capacities for all of the five periods.

Next proceed to enter the overtime production capacities. Move the pointer to cell C3 and type 200 then press <ENTER>. Move the pointer down to cell C4 and type 150 then press <ENTER>. Enter the remaining three overtime capacities in the same form. For this problem, no subcontracting is allowed, hence leave the column (column D) associated with subcontracting empty.

### Entering the Production Costs

The second section of the spread sheet editor is assigned to production costs (see above). The periods "." in this section work the same way as in section one. That is, in a problem where production costs remain constant through time, you only need to enter the cost for the first period. Since in this solved example, the production costs do not vary with time, you may take advantage of this provision.

Move the pointer to cell F3 and type 30 then press <ENTER>. Then move the pointer to cell G3 and enter 45 then press <ENTER>. The costs for the remaining periods will be set to these two values. Since this problem does not involve subcontracting, leave the third column of this section empty. The completed spread sheet is shown below.

G3	45	A	B	C	D	E	F	G	H
1				Capacity				Cost	
2	Resources	R-Time	O-Time	Sub-Con			R-Time	O-Time	Sub-Con
3	Period1	800	200	.			30.00	45.00	.
4	Period2	600	150	.			.	.	.
5	Period3	400	100	.			.	.	.
6	Period4	400	100	.			.	.	.
7	Period5	400	100	.			.	.	.
8									
9									

### Entering the Demand Forecasts

The third section of the spread sheet involves the demand forecasts. You can move to this section of the spread sheet by pressing the <TAB> key. Alternatively, you may press the right arrow key several times. The initial spread sheet for the third section is shown below.

D3	^	D	E	F	G	H	I	J	K
1					Cost				
2	Sub-Con		R-Time	O-Time	Sub-Con	Demands	Prod1	Prod2	
3	.		30.00	45.00	.	Period1	.	.	
4	.		.	.	.	Period2	.	.	
5	.		.	.	.	Period3	.	.	
6	.		.	.	.	Period4	.	.	
7	.		.	.	.	Period5	.	.	
8						Hold-Cost	0.00	0.00	
9						Back-Cost	0.00	0.00	

As seen from the above display, the upper part of the third section is reserved for the demand forecasts for the two products. The lower portion consists of two rows. One is used for entering the holding costs, and the second row is for back-order costs.

Move the pointer to cell J3 to enter the demand forecast of product 1 in period 1. Type 500 and press <ENTER>. Next move the pointer to cell J4 and enter 500 and press <ENTER>. Enter the remaining three demand forecasts for product 1 in the same form. Then move the pointer to cell K3 and enter the demand forecast of product 2 in period 1. Enter the remaining four forecasts in the same manner.



Production Schedule						
Month	Product 1			Product 2		
	Regular Time	Over Time	End-Inventory	Regular Time	Over Time	End-Inventory
1	500	0	0	300	200	300
2	500	0	0	100	100	200
3	300	0	0	100	100	0
4	100	0	0	250	0	0
5	100	0	0	150	0	0
Total	1500	0	0	900	400	500

Table 10-3: A Production Schedule for the Two-Product Problem

The method of developing the production schedule is rather ad-hoc and there is no guarantee that it will produce an optimal production schedule. The algorithm in DSSPOM utilized to solve the production scheduling problem however, is an exact method and will find the optimal solution. The method can solve problems with variable production capacities, and production costs. Backordering is also allowed. DSSPOM can solve problems with up to four products and 12 periods.

### EXAMPLE 1 - A TWO PRODUCT PROBLEM

In this example you will solve the two-product production scheduling problem presented earlier in this chapter. Load DSSPOM into the computer and select the Aggregate Planning module. After a few seconds the computer will load the program and display the Aggregate Planning Menu. Move the pointer to the INPUT option and press <ENTER>. The program will begin the data entry process by placing the pointer in the title field. Type "AGGREGATE PLANNING" and press <ENTER>. The initial data entry screen is presented below.

```

Problem title: AGGREGATE PLANNING

Number of periods: 5

Number of products: 2

Allow backorders: Y

Enter problem parameters as requested. Press RETURN to
accept, or ESC to exit. Maximum problem size is 12 periods
and 4 products.
  
```

Enter 5 for the number of periods and 2 for the number of products. For this example problem, assume that backorder (or backlog) is allowed. Enter "Y" for this question and press <ENTER> as shown above.

The computer will then ask if you are ready to begin the spread sheet data entry for the demands and production capacities as shown below.

```

Continue with the cost and requirements (Y/N) Y
  
```

Press <ENTER> to begin the spread sheet data entry process. The computer will display the initial spread sheet as shown below.

A1	A	B	C		D	E	G		H
	Resources	R-Time	O-Time	Sub-Con			R-Time	O-Time	Sub-Con
1	Period1	.	.	.	.	.	.	.	.
2	Period2	.	.	.	.	.	.	.	.
3	Period3	.	.	.	.	.	.	.	.
4	Period4	.	.	.	.	.	.	.	.
5	Period5	.	.	.	.	.	.	.	.
6									
7									
8									
9									

## CHAPTER 10

### AGGREGATE PLANNING

#### INTRODUCTION

Aggregate production planning is an operations planning method which allows the evaluation of future work schedules for one or more products, especially evaluation of the desirability and need for overtime and/or sub-contracting. The method is also referred to as "multi-item, multi-period production scheduling."

A production manager typically has to consider the alternative of changing regular time production through layoffs or hiring and the utilization of idle time or overtime. With varying demand levels and high inventory carrying costs it is not easy to develop a production schedule for a future time period which will simultaneously minimize production costs and inventory holding costs.

The aggregate production planning model described in this chapter intends to provide the production manager with the operating results of various production schedules. Typically, a production manager looks at the demands forecasts of one or more products (or items) for the next six months and attempts to develop a feasible production schedule. If the demand forecast is relatively constant on a week to week basis then the problem is rather straight-forward. However, demand usually varies from week to week, and sometimes substantially. It is primarily for the latter problem that the aggregate production planning model is developed.

Suppose monthly demand for two products varies from a low of 100 units to a high of 500 units over a five month period as shown in Table 10-1. The two products use the same production resources and per-unit consumption of the resources are the same. The production resources includes regular time production and overtime production as shown in Table 10-1. Regular time production capacity varies over time and overtime production capacity is 25% of regular time. The production, inventory, and backorder costs are presented in Table 10-2. The problem is to determine a production schedule for these two products which minimizes the total cost of production, inventory, and backorder.

One alternative for solving the above problem is to satisfy the demands through regular time production first and then, for any additional demands through overtime. Table 10-3 presents an example of a production schedule.

Month	Demand Forecasts		Production Capacity	
	Product 1	Product 2	Regular Time	Over Time
1	500	200	800	200
2	500	300	600	150
3	300	400	400	100
4	100	250	400	100
5	100	150	400	100
Total	1500	1300	2600	650

Table 10-1: A Two-Product Production Planning Problem

Regular Time Cost (\$/Unit)	\$30.00
Overtime Cost (\$/Unit)	\$45.00
Inventory Cost (\$/Unit/Period)	
Product 1	\$ 6.00
Product 2	\$ 9.00
Backorder Cost (\$/Unit/Period)	
Product 1	\$10.00
Product 2	\$15.00

Table 10-2: Production and Inventory Costs

11. Chambers Manufacturing was modifying its assembly line for its middle line of snow blowers. The tasks, task times and predecessor tasks are shown below. Required output was 500 units per 390 minutes shift. Rebalance the line for output of 300 units per shift.

Task	Task Time in Seconds	Predecessor
1	28	1
2	25	1
3	10	2
4	12	2
5	17	2,3
6	25	4
7	10	4
8	5	6,7
9	8	7
10	9	7
11	18	9,10
12	21	11
13	9	11
14	16	11

12. The Arcade Toy Company produces battery-driven motorized toy vehicles for children. One of its products, a single seater car, is to be assembled on a new assembly line. The tasks, task times, and predecessors are shown below. Develop a balanced line for a required output of 500 units per 410 minute shift. Rebalance the line for output of 300 units per shift.

Task	Task Time in Seconds	Predecessor
1	35	-
2	25	-
3	13	-
4	19	1
5	21	1
6	25	1
7	30	2,3
8	11	3
9	22	5
10	25	5
11	17	6,7
12	11	8,9
13	14	11
14	19	11
15	21	12

13. Plainview Electronics produces electronic devices and will begin assembly of a new model device in about two months. An assembly line is under development and the tasks need to be balanced across the necessary work stations on the line. The work day amounts to 400 minutes per shift and required output is 600 units per shift. The tasks, task times, and predecessors are shown below. Balance the assembly line as well as possible. Rebalance the line for 240 units per shift.

Task	Task Time in Seconds	Predecessor
1	31	none
2	34	none
3	14	1
4	21	2
5	34	3
6	39	3
7	11	5
8	12	5
9	9	5
10	32	6,7
11	25	8
12	17	9
13	19	11
14	14	11
15	30	14
16	8	14

7. A large manufacturer of clay masks is planning to add a new line of stands for the masks. They have called you in to balance the production process. A minimum of 450 stands must be produced per 8 hour day. The tasks, times, and predecessors are given below.

- Draw the precedence diagram.
- Formulate a balanced line based on the longest task first.
- How many stations are required? What is the resulting cycle time?
- Is the efficiency satisfactory?

TASK	TIME (hrs)	PREDECESSOR
A	2.0	--
B	2.2	A
C	2.1	--
D	3.1	B,C
E	1.9	--
F	2.6	E
G	2.1	D,F
H	3.0	G

8. Sunwell Plastics is developing an assembly line to produce a plastic household product. It plans to produce 400 units per 410 minute shift. The tasks, task times and predecessors are shown below. Rebalance line for output of 280 units per shift.

Task	Task Time in Seconds	Predecessor
1	18	-
2	36	-
3	24	-
4	48	1
5	42	2
6	18	3
7	54	4
8	6	6
9	18	8,6
10	24	7,9

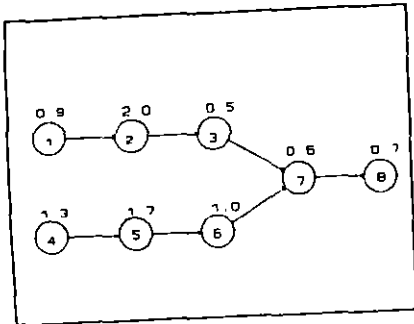
9. The Elma Appliance Company manufactures small household appliances. The company is developing a new assembly line for a new food processor. The tasks, task times and predecessor tasks are shown below. What is the maximum output per 400 minute shift? Rebalance the line for 250 units per shift.

Task	Task Time in Seconds	Predecessor
1	25	-
2	15	-
3	5	1
4	9	1
5	11	2
6	15	2,4
7	20	5
8	5	7
9	11	5
10	15	8
11	7	8
12	5	10

10. Clark Furniture Manufacturing (CFM) assembled a line of furniture on an assembly line. CFM decided to do a time study of the thirteen tasks required to assemble one unit on the assembly line. The tasks, task times and predecessor tasks are given below. Required output is 400 units and 420 minutes per shift are available. Rebalance line for output of 220 units per shift.

Task	Task Time in Seconds	Predecessor
1	17	1
2	19	1
3	21	1
4	27	2
5	16	2,3
6	9	3,4
7	11	6
8	27	7
9	8	7
10	14	7,8
11	19	7,9
12	22	11
13	17	11

3. For the assembly line problem depicted by the precedence diagram below, develop balanced assembly lines. For an eight hour shift there are 420 minutes of work station time available. Required output per shift is 200 units in August, September and October and 100 units for the rest of the year. Task times are shown in minutes.



4. Assign the tasks to work stations for the assembly line problem depicted in the following precedence table. There are 410 minutes per shift and required output is either 120 units or 280 units. Solve for both output levels.

Task	Task Time in Minutes	Predecessor Task
1	0.3	None
2	0.5	1
3	0.4	None
4	1.4	2, 3
5	0.2	None
6	0.9	5
7	0.4	4, 6
8	1.3	7

5. Bigalow Food Company produces packaged food and is planning to begin production of a new menu item. An assembly line is to be developed that will produce 10 units per 8 hour workday. The tasks, times, and precedence requirements are shown below.

- Draw the corresponding precedence diagram.
- Determine the work stations by selecting the longest task first. Give the efficiency of the line.
- How well balanced is the line?
- Solve the problem using the other 3 heuristic rules. Which method gives the best efficiency of the line?

TASK	TIME (min.)	PREDECESSOR
A	27	--
B	30	A
C	10	A
D	17	A
E	30	B
F	33	B
G	7	D
H	11	G
I	26	G
J	15	I

6. Shown below are the tasks, times, and precedence requirements for the work required to assemble a tricycle. The company wants to produce 83,200 trikes a year. Assume a 5 day, 8 hour a day work week.

- Draw the precedence diagram with the task times included.
- Determine the work stations, cycle time, efficiency rate of a balanced line using highest positional weight.

TASK	TIME (min)	PREDECESSORS
A	.6	--
B	.9	--
C	.7	--
D	1.1	A
E	1.0	B
F	.6	C
G	1.2	D
H	.4	F
I	.6	H, E
J	.7	G, I

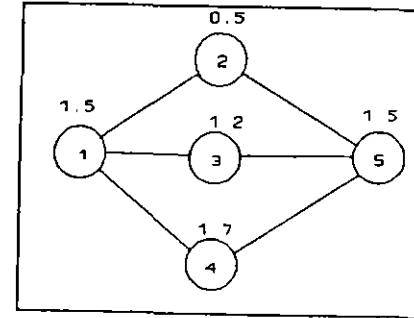
As seen from the above solution, the revised problem requires only 4 stations instead of the original 7. The increase in the cycle time (from 2.1 minutes to 3.6 minutes) has made it possible for more tasks to be grouped into the same station. Press <ENTER> for the next report as shown below.

Problem Title: TALKMAN II	
Actual cycle time	3.5 minutes
Total work station idle time =	3.91 minutes
Assembly line efficiency	72.07 percent

The revised solution has an actual cycle time of 3.5 minutes and a line efficiency of about 72 percent. The revised solution implies that the desired rate of output of 100 units can be achieved by reconfiguring the line and assigning the 16 tasks to 4 stations.

## PROBLEMS

1. For the assembly line problem depicted by the precedence diagram below, develop a balanced assembly line for the case where 440 minutes are available per shift. Required output is 250 units per shift, and task times shown are in minutes.



2. Assign the tasks to work stations for the assembly line problem depicted in the precedence table below. There are 400 minutes per shift and required output is 420 units.

Task	Task Time in Minutes	Predecessor Task
1	0.9	None
2	0.7	None
3	0.3	1
4	0.8	2, 3
5	0.6	4
6	0.4	5
7	0.2	6
8	0.5	7

## EXAMPLE 2 - RADIO HUT REDUCES PRODUCTION

Five years ago, Radio Hut adopted your proposal and developed a seven station assembly line which produced the Talkman AM Radio. Talkman became one of the most popular AM radios and sold beyond its projected demand. However, within the last nine months, sales have decreased drastically due to competition and Radio Hut is considering a production cut. In particular, the management is considering a reduction in production by as much as 50 percent to 100 units per day. Further, the production time is also cut back to 360 minutes per day. This reduction is presumed to have a significant impact on the assembly line configuration. Help the management solve its problem.

The revised production amount has an impact on the desired cycle time and in turn, on the number of stations needed. To solve the problem, move the pointer to the EDIT option and press the <ENTER> key. The computer will begin the edit process by placing the pointer in the title field. Change the title to "TALKMAN II" and press <ENTER>. Since the number of tasks has not changed, press <ENTER> to accept the current value. Change the desired output to 100 and the daily production time to 360 minutes. The task definition has not been changed, therefore when asked to revise the task definition, press <N>. The completed edit process is shown below.

```

Problem title: TALKMAN II
Enter number of tasks: 16
Enter the desired number of units per day: 100
Enter daily production time (minutes per day): 360

Continue with task definition (Y/N) N
    
```

You are now ready to solve the revised problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the "Display Output" sub-option. The computer will display the menu of the four heuristic solution procedures. Press the <ENTER> key to select the first option (this process is the same as in Example 1 and is not shown here). The computer will pause a few seconds and then display the following output report.

Problem Title: TALKMAN II	
Total task times	10.49 minutes
Minimum cycle time	1.50 minutes
Maximum cycle time	3.60 minutes
Minimum number of stations	3

This report indicates that the cycle time is 3.60 minutes with the minimum number of stations equal 3. Press <ENTER> to continue. The next output is shown below.

Problem Title: TALKMAN II				
Work station	Task Name	Task Time (min)	Remaining Time (min)	Station Time (min)
1	JIG-CKT	0.36	3.24	0.36
	IC-#3	0.60	2.64	0.96
	IC-#2	0.44	2.20	1.40
	IC-#1	0.24	1.96	1.64
	SOLD-IC	1.50	0.46	3.14
2	BOARD	1.20	2.40	1.20
	SPEAKER	1.10	1.30	2.30
	SP-WIRES	0.85	0.45	3.15
3	SOLD-SP	0.60	3.00	0.60
	ANTENNA	0.30	2.70	0.90

Problem Title: TALKMAN II				
Work station	Task Name	Task Time (min)	Remaining Time (min)	Station Time (min)
4	BATTERY	0.50	2.20	1.40
	PHONE	0.50	1.70	1.90
	INSPECT	1.00	0.70	2.90
	CHK-CKT	0.60	0.10	3.50
	PUT-TOP	0.20	3.40	0.20
	WARP	0.50	2.90	0.70

Press <ENTER> to continue with the solution process and obtain the next output report as shown below.

Problem Title: AM RADIO

Work station	Task Name	Task Time (min)	Remaining Time (min)	Station Time (min)
1	JIG-CKT	0.36	1.74	0.36
	IC-#3	0.60	1.14	0.96
	IC-#2	0.44	0.70	1.40
	IC-#1	0.24	0.46	1.64
2	SOLD-IC	1.50	0.60	1.50
3	BOARD	1.20	0.90	1.20
4	SPEAKER	1.10	1.00	1.10
	SP-WIRES	0.85	0.15	1.95
5	SOLD-SP	0.60	1.50	0.60
	ANTENNA	0.30	1.20	0.90

Problem Title: AM RADIO

Work station	Task Name	Task Time (min)	Remaining Time (min)	Station Time (min)
6	BATTERY	0.50	0.70	1.40
	PHONE	0.50	0.20	1.90
	INSPECT	1.00	1.10	1.00
	CHK-CKT	0.60	0.50	1.60
7	PUT-TOP	0.20	0.30	1.80
	WARP	0.50	1.60	0.50

The above output reports present the task assignments and number of stations used. For this problem, the 16 tasks have been grouped into 7 stations. The task grouping consists of: tasks 1-4 assigned to station 1, task 5 to station 2, task 6 to station 3, tasks 7 and 8 to station 4, tasks 9, 10, 11, and 12 to station 5, tasks 13, 14, and 15 to station 6, and task 16 to station 7. The report also contains remaining station time which is the difference between

cycle time and cumulative task times assigned to each station. Press the enter key to continue the solution report as shown below.

Problem Title: AM RADIO

Actual cycle time	1.95	minutes
Total work station idle time =	4.21	minutes
Assembly line efficiency	69.16	percent

The above report indicates that the actual cycle time, the longest station time, is 1.95 minutes. The total idle time, over all stations, is 4.21 minutes (based on maximum cycle time of 2.1 minutes) which results in the line efficiency of about 69 percent. The line efficiency is obtained as follows:

$$\text{Efficiency} = \left(1 - \frac{4.21}{(7)(1.95)}\right) 100 = 69.16\%$$

It should be noted that in certain references, instead of using the actual cycle time, the maximum cycle time (in this case 2.10 minutes) is used. The use of actual cycle time results in under-estimating the line efficiency. For example, if in the above equation, you use the maximum cycle time, the line efficiency is about 71.36 percent.

The above reports indicate that, Radio Hut should construct an assembly line with 7 stations (usually for each station there is one worker, hence the number of stations represent the number of employees needed) and assign the 16 tasks to the stations as indicated above. Because the actual observed cycle time is about 1.95 minutes, it is possible to produce  $420/1.95 = 215$  radios per day.



Enter the task definitions one row at a time. Make sure that the number of predecessors (column C) for each task is entered correctly. The completed spread sheet is presented below.

A1	Task	B	C	D	E	F	G	H
	A	Task	No of	Pred.	Pred.	Pred.	Pred.	Pred.
	Label	Time	Pred.	One	Two	Three	Four	Five
3	JIG-CKT	0.36	0					
4	IC-#1	0.24	1	1				
5	IC-#2	0.44	1	1				
6	IC-#3	0.60	1	1				
7	SOLD-IC	1.50	3	2	3	4		
8	BOARD	1.20	1	5				
9	SPEAKER	1.10	1	6				
10	SP-WIRES	0.85	2	6	7			
11	SOLD-SP	0.60	1	8				
12	ANTENNA	0.30	1	9				
13	BATTERY	0.50	1	10				
14	PHONE	0.50	1	10				
15	INSPECT	1.00	2	11	12			
16	CHK-CKT	0.60	1	13				
17	PUT-TOP	0.20	1	14				
18	WARP	0.50	1	15				

After completing the spread sheet data entry process, press <F10> to keep the data and exit the spread sheet.

You may now obtain a hard copy printout of the input data by moving the pointer to the PRINT option and press <ENTER>. Be sure that the printer is ON and Ready. Obtain the printout and study it carefully to make sure there are no data entry errors. You may proceed to save the problem on disk for future use. Move the pointer to the FILE option and select "Save current file" sub-option then press <ENTER>. The program will ask for a DOS file name. Select a proper name and use a related suffix such as "BAL" to imply line balancing.

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the "Display Output" sub-option then press <ENTER>. The program will pause a few seconds and then present the following solution options menu.

Largest processing time first  
Largest number of following tasks first  
Largest number of preceding tasks first  
Highest positional weight first

Use the arrow keys to highlight the solution method, press ENTER to select or ESC to exit.

As mentioned earlier, the program provides four heuristic solution procedures to choose from. Select the "Largest processing time first" solution option by pressing the <ENTER> key.

The program will pause a few seconds and then report the first output report as shown below.

Problem Title: AM RADIO	
Total task times	10.49 minutes
Minimum cycle time	1.50 minutes
Maximum cycle time	2.10 minutes
Minimum number of stations	5

As seen from the above report, the total task times for the sixteen tasks is 10.49 minutes. The longest task requires 1.50 minutes which constitutes the minimum cycle time. Based on the availability of 420 minutes of production time and a desired output of 200 units, the calculated maximum cycle time is 2.10 minutes and this requires a minimum of 5 work stations. Note however that the actual number of work stations used depends on the task precedence relationships and may exceed this value.

## EXAMPLE 1 - THE CASE OF RADIO HUT

Radio Hut is planning to add a new brand of AM radio for marketing in its overseas stores. Radio Hut Plant #3 in Flint, Michigan has 420 minutes of unused capacity per day which can be re-allocated for the production of the new Talkman AM Radio. The management has determined that in order for Talkman to earn a reasonable profit, the line should produce 200 units per day. The production process involves 16 tasks as shown below.

Task	Description	Time (min.)	Predecessors
1	Put Ckt board on jig	0.36	-
2	Insert IC #1	0.24	1
3	Insert IC #2	0.44	1
4	Insert IC #3	0.60	1
5	Solder IC connectors	1.50	2,3,4
6	Attach board to frame	1.20	5
7	Attach speaker to frame	1.10	6
8	Connect speaker wires to board	0.85	6,7
9	Solder speaker connectors	0.60	8
10	Plug antenna terminals	0.30	9
11	Attach battery terminals	0.50	10
12	Attach phone terminals	0.50	10
13	Inspect unit visually	1.00	11,12
14	Test circuits for integrity	0.60	13
15	Attach top Cover	0.20	14
16	Box unit and instructions	0.50	15

Figure 9-2 presents the precedence diagram for the stated 16 tasks. You have been asked to determine a balanced assembly line for this new product and identify the number of workers needed.

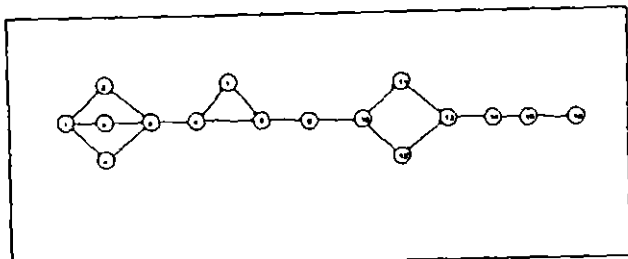


Figure 9-2: Precedence Diagram for the Talkman AM Radio

To solve the above problem, load the DSSPOM into the computer and select the Line Balancing program. After a few seconds the computer will load the program and display the Line Balancing Menu. Select the INPUT option by moving the pointer one level to the right and press <ENTER>.

The program responds by invoking the data entry process and requests a problem title. Type "AM RADIO" and press the <ENTER> key. The next query involves the number of tasks. Type "16" and press <ENTER>. The next two queries relate to the desired output in units and the available production time in minutes. Enter 200 and 420, respectively. The completed initial data entry screen is presented below.

Problem title: AM RADIO

Enter number of tasks. 16

Enter the desired number of units per day: 200

Enter daily production time (minutes per day): 420

Enter problem parameters as requested. Press RETURN to accept, or ESC to exit. Maximum problem size is 30 tasks, each having up to five predecessors. Task times should be within 0 and 999.

The program will resume the data entry process by asking if it should continue with the task definition process as shown below.

Continue with task definition (Y/N) Y

Press <Y> to continue the task definition process using the spread sheet editor. The program initializes the spread sheet editor by defining 16 rows. The default task names are Task1, Task2, etc., and the times as well as the number of predecessors are set to zero.

Work station	Task	Task time (minute)	Remaining time (minute)	Number of Follower Tasks
1	1	1.2	1.80	5
	2	1.2	0.60	4
2	3	1.8	1.20	4
3	4	1.6	1.40	3
	5	1.3	0.10	3
4	6	2.0	1.00	2
5	7	1.4	1.60	1
	8	1.3	0.30	0

Table 9-3: Task Assignment Based on Largest Number of Follower Tasks

The efficiency of the task assignments based on the largest number of following tasks is,

$$Efficiency = \left(1 - \frac{3.2}{(2.9)(5)}\right) 100 = 77.93\%$$

Note that the efficiency is slightly less than in the previous assignment. Actual cycle time is 2.9 minutes and idle time has remained at 3.2 minutes (based on maximum cycle time of 3.0 minutes).

The next step is to position the tasks according to the largest number of preceding tasks. It produces an efficiency of 61.73 percent as shown on Table 9-4. In this case actual cycle time is 2.7 minutes and total idle time is 6.2 minutes because 6 stations were required.

Finally, the last assignment rule using positional weights is applied. It produces an efficiency of 78.67 percent and is therefore tied with the first rule. It also generates an assignment that is slightly different than the first rule as shown on Table 9-5.

Work station	Task	Task time (minute)	Remaining time (minute)	Number of Preceding Tasks
1	1	1.2	1.80	0
	2	1.2	0.60	1
2	5	1.3	1.70	2
3	3	1.8	1.20	0
4	4	1.6	1.40	1
5	6	2	1.00	5
6	7	1.4	1.60	6
	8	1.3	0.30	7

Table 9-4 : Task Assignment Based on Largest Number of Preceding Tasks

Work station	Task	Task time (minute)	Remaining time (minute)	Weight
1	1	1.2	1.80	8.4
	3	1.8	0.00	8.1
2	2	1.2	1.80	7.2
	4	1.6	0.20	6.3
3	5	1.3	1.70	6.0
4	6	2	1.00	4.7
5	7	1.4	1.60	2.7
	8	1.3	0.30	1.3

Table 9-5 : Task Assignment Based on Largest Positional Weight

2. Place the task which has the largest number of following tasks before placing other tasks. Since the first task is followed by many other tasks it is nearly always positioned to the first station. Subsequent tasks are then positioned to stations that follow the first station.
3. Position the task which has the larger number of preceding tasks before positioning other tasks.
4. Position the task which has the higher positional weight before other tasks, where positional weight is the task time plus the task times of all of the followers.

Note that, in all of the above four heuristics, all assigned tasks must be preceded by their predecessor tasks

#### SOLUTION OF ASSEMBLY LINE BALANCING EXAMPLE

We shall now apply the solution method to the example. Suppose that required output volume in one shift is 140 units. Also suppose that there are 420 minutes of assembly line time available in one shift. Then the required cycle time will be  $420/140 = 3$  minutes. Hence, the maximum cycle time is 3 minutes. It can, of course, be shorter if that is the way the task positioning works out.

Rule 1 will be applied first. It specifies that the longest task be assigned to a work station first. The two feasible candidates are Tasks 1 and 3. We select the one with the larger task time. Task 3, having a task time of 1.8 minutes, is assigned to work station 1 (see Table 9-2). The next 2 candidate tasks are 1 and 4. Task 4 cannot be included since its task time is larger than the remaining time for station 1 (i.e.  $3 - 1.8 = 1.2$  min). We assign task 1 to this station; the remaining time is then  $3 - (1.8 + 1.2) = 0$  minutes. We open a new station, number 2. There are two feasible candidates to be assigned, tasks 2 and 4. We select task 4 because it is longer. The remaining station time is  $3 - 1.6 = 1.4$  minutes. Next, we assign task 2 to station 2. The remaining station time is now  $3 - (1.6 + 1.2) = .20$  minutes. Since no more feasible candidates exist, we open station 3. There is only one feasible candidate, task 5. We assign this task to station 3. Now task 6 becomes a candidate. But its task time is larger than the remaining station time, so we open station 4 and assign task 6 to station 4. The remaining time for this station is  $3 - 2 = 1$  minutes, which is smaller than the time for task 7. Therefore, we open station 5 and assign task 7 and then task 8 to this station.

Work station	Task	Task time (minute)	Remaining time (minute)	Station time (minute)
1	3	1.8	1.20	3.0
	1	1.2	0.00	
2	4	1.6	1.40	2.8
	2	1.2	0.20	
3	5	1.3	1.70	1.3
4	6	2.0	1.00	2.0
5	7	1.4	1.60	2.7
	8	1.3	0.30	

Table 9-2: Task Assignment Based on Longest Task First

This process assigns the eight tasks to five work stations. The maximum work station time is 3.0 minutes for station 1. The lowest work station time is for station 3 with only 1.3 minutes. The efficiency of the task assignment is,

$$\text{Efficiency} = \left(1 - \frac{3.2}{(5)(3.0)}\right) 100 = 78.67\%$$

For the next assignment example we shall use the second assignment rule. It requires that the task which has the largest number of following tasks be positioned first. From the precedence diagram we can observe that task 1 has the largest number of following tasks. It is positioned first to station 1 as shown on Table 9-3. The next assignment produces a tie with tasks 2 and 3. Whenever a tie occurs, the task with the lowest sequential number is assigned first. Hence, task 2 is assigned to station 1 which is feasible because the combined time of tasks 1 and 2 is 2.4 minutes. This, therefore satisfies the maximum cycle time rule. Task 3 is then assigned to station 2. The next assignment finds a tie between tasks 4 and 5. Task 4 is positioned first and is assigned to station 3. Task 5 is then assigned to station 3. We next continue assigning tasks 6, 7, and 8 and find that they can all be assigned to five stations.

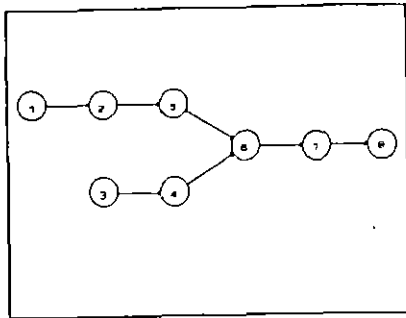


Figure 9-1: Precedence Diagram of Assembly Line Tasks

Each task takes a specified time for its completion. Although, theoretically, any task could take any amount of time, in order to aid the assembly line balancing process it is desirable to have each task take a similar amount of time. Longer tasks therefore should be broken up into smaller tasks, if feasible.

Table 9-1 lists the eight tasks, the time each task takes to do and the immediate predecessor of each task. The immediate predecessor is the preceding task that must be completed first before the task under consideration can be started. Note that the total time for all eight tasks amounts to 11.8 minutes.

The objective of the assembly line balancing technique is to assign the eight tasks to work stations along the assembly line in such a way that the required output volume is completed in time with a minimum amount of collective station time. Station time needs to be minimized because it determines the cost of production. Any idle station time increases the cost of the overall production process.

Based on the above, we therefore have for any assembly line product, a total task time which consists of the sum of all the task times. We also have collective station time which consists of the number of stations required to complete the assembly of the product multiplied by the station time which takes the longest. The station which takes the longest time to complete the assigned task(s) determines what is called the cycle time of the assembly line. The cycle time is the speed with which products roll off the assembly line.

Task	Immediate Predecessor	Task Time (Minutes)
1	-	1.2
2	1	1.2
3	-	1.8
4	3	1.6
5	2	1.3
6	4, 5	2.0
7	6	1.4
8	7	1.3
TOTAL		11.8

Table 9-1: Precedence Diagram Summary Table - Example Problem

From the total task time and the collective station time we can determine the efficiency of the assembly line. Efficiency of the assembly line is determined by the formula,

$$\text{Efficiency} = 1 - \frac{\text{Total Idle Time}}{\text{Collective Station Time}}$$

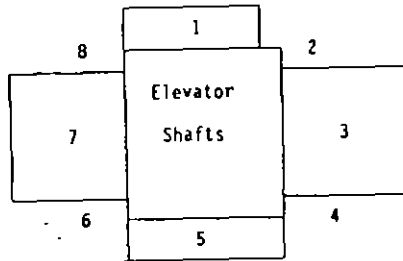
For the example problem there are eight tasks with a total idle time of 4.16 minutes. Suppose that collective station time is 16.0 minutes, then the efficiency of the assembly line is,

$$\text{Efficiency} = 1 - \frac{4.16}{16} = 0.74 \text{ or } 74\%$$

There are a variety of heuristics to position tasks to work stations on an assembly line. We shall use four different heuristic rules in the computer program. Each rule will be applied and whichever rule produces the best result, that is the rule which provides the highest efficiency, will be utilized. The four heuristic rules are:

1. Position longer tasks to station before shorter tasks. To apply this rule we must approximate the location of the station on the basis of whether a task is early in the sequence, late in the sequence, or is in the middle of the sequence. In other words there is no fixed rule for selecting the station.

13. The tenth floor of a hexagonal office tower, with elevators in the center of the tower was layed out as shown below. The eight room locations are to be allocated to seven laboratories and one office. The rooms are of approximate equal size so that the



laboratories A, B, C, D, E, F and G and office H can be allocated to any one of the eight rooms. The nearness priorities of the seven laboratories and office are shown in the matrix below. Develop best location layout.

	A	B	C	D	E	F	G	H
A	-	A	I	X	E	E	O	E
B		-	U	O	I	O	I	X
C			-	I	X	U	A	I
D				-	I	I	I	I
E					-	X	U	X
F						-	U	U
G							-	A
H								-

14. Suppose the office in the hexagonal building above must be located adjacent to laboratories C and F. How would you change the nearness ratings shown in the problem above. Will the requirement change the best layout found before?

## CHAPTER 9

### LINE BALANCING

#### INTRODUCTION

The assembly line balancing technique is widely used in assembly line operations to balance the workloads of stations positioned along an assembly line. The objective is to produce a specified number of units of output with a minimum of worker idle time.

The most common applications of line balancing are found in manufacturing operations such as automobile assembly, television set assembly, etc. However, there are also a number of assembly line balancing applications in the growing service industry. Two examples of this are the order preparation in fast food industries and the processing of blood donors at blood donation sites.

The techniques developed for assembly line balancing do not always produce optimal solutions, because of the high degree of complexity as well as the numerous possible task combinations. The solution methods used are therefore heuristic in nature which means they produce good solutions, but not necessarily optimal solutions.

The computer solution methods to be illustrated here consist of four different versions of heuristic methods.

#### ILLUSTRATION OF ASSEMBLY LINE BALANCING TECHNIQUES

The technique will be illustrated with an example. Figure 9-1 shows a network of tasks that need to be performed in the order indicated. That is task 1 must be completed before task 2 can be started. Similarly, task 3 must be completed before task 4 can be started. Before task 6 can be started both tasks 4 and 5 must be completed. Hence, the network shows the eight tasks along the assembly and the order in which the tasks must be performed. Of course, there are certain tasks that can be performed independent of each other. For instance, tasks 1, 2, and 5 are independent of tasks 3 and 4.

9. Assign the eight departments, with the adjacency ratings presented below, to the following grid.

A	B	C
D	G	E
F		H

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	I	O	A	E	U	I	A
2		-	O	E	X	A	I	U
3			-	A	I	O	A	X
4				-	U	O	O	E
5					-	X	I	O
6						-	U	A
7							-	U
8								-

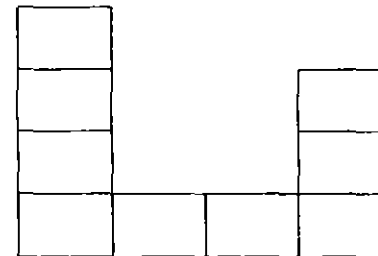
10. The Nouret Chocolate Company is designing a new plant with six departments. The locations of the six departments on a 2x3 grid is quite critical as represented by the nearness ratings (adjacency constraints) shown in the matrix below. The departments are identified by the letters A, B, C, D, E and F. Develop the layout for the company.

	A	B	C	D	E	F
A	-	O	X	A	O	A
B		-	I	E	U	X
C			-	X	A	I
D				-	A	U
E					-	I
F						-

11. The Nouret Chocolate Company decides to add three departments, identified as departments G, H and I to the proposed plant being developed in problem above. The new plant will be a 3x3 grid and the nearness ratings of the three departments in relation to each other and in relation to the six departments in the existing plan is shown below. Find a reasonably good layout.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
G	X	A	I	A	I	U	-		
H	O	U	I	X	U	X	A	-	
I	I	O	U	A	O	U	X	O	-

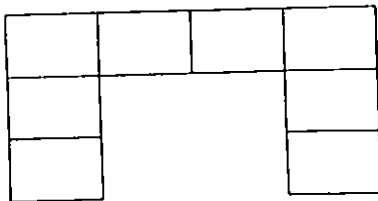
12. Assign the nine departments of problem 11 to the following floor-space:



4. The Fairport Machine Shop planned to move from three different dispersed locations to a new building. Its eight departments were to be laid out on a 4x2 grid in the new building with nearness priorities (adjacency ratings) as shown in the table below. Determine a reasonable layout design for the machine shop.

Departmental Pair	Preference Rating	Departmental Pair	Preference Rating
1-2	I	3-4	A
1-3	E	3-5	O
1-4	E	3-6	I
1-5	A	3-7	X
1-6	X	3-8	U
1-7	O	4-5	O
1-8	U	4-6	U
2-3	I	4-7	O
2-4	U	4-8	U
2-5	X	5-6	X
2-6	A	5-7	I
2-7	E	5-8	U
2-8	U	6-7	I
		6-8	E
		7-8	A

5. Consider the adjacency ratings presented in Fairport Machine Shop (above problem). Assign the eight departments to the following floor space.

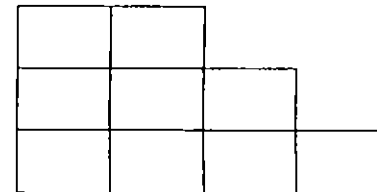


6. Solve problem 5, assume that department 1 must be located at a corner.

7. A small college campus with nine classroom-faculty office buildings needs to be designed so that the amount of traffic over longer distances is minimized. It is difficult to determine the exact amount of traffic between buildings but a listing of nearness priorities (adjacency ratings) has been developed and is shown in the matrix below. The buildings are identified as buildings 1 to 9. Find an appropriate layout design.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-	A	U	O	A	U	O	U	A
2		-	I	E	U	I	I	O	O
3			-	U	A	U	U	A	I
4				-	E	O	E	U	U
5					-	I	U	I	U
6						-	E	U	A
7							-	O	I
8								-	E
9									-

8. Assign the nine buildings in the above problem to the following grid space.





Problem Title: IRREGULAR PLAN

Number of Trials: 15      No. of Successful Trials: 9  
 Best Assignment Found on Trial: 0  
 Aggregate Layout Value: 136

Department	Row	Column
DEP1	3	4
DEP2	3	3
DEP3	2	1
DEP4	1	2
DEP5	1	1
DEP6	1	4
DEP7	4	1
DEP8	4	3
DEP9	4	4

Problem Title: IRREGULAR PLAN

Number of Trials: 15      No. of Successful Trials: 9  
 Best Assignment Found on Trial: 0  
 Aggregate Layout Value: 136

Department	Row	Column
DEP10	2	3
DEP11	2	4
DEP12	3	1
DEP13	1	3
DEP14	2	2
DEP15	3	2
DEP16	4	2

As seen from the above solution, the aggregate value of the proposed layout is 136. Note also that the dummy departments have been assigned to the fictitious locations as requested by the input data.

The above solution appears to be a reasonably good layout. It does not contain any adjacent department pair with an undesirable rating "X". However, there is no guarantee that this solution is an optimal solution because the solution methods which were applied were all heuristics.

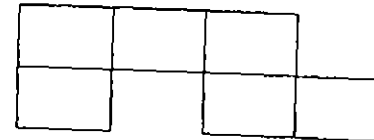
### PROBLEMS

1. For the following departmental pair preference rating list for an eight department facility, develop a reasonable departmental layout for a departmental configuration consisting of two rows and four columns.

Departmental Pair	Preference Rating	Departmental Pair	Preference Rating
1-2	I	3-4	A
1-3	E	3-5	O
1-4	E	3-6	I
1-5	A	3-7	X
1-6	X	3-8	U
1-7	O	4-5	O
1-8	U	4-6	U
2-3	I	4-7	O
2-4	U	4-8	U
2-5	X	5-6	X
2-6	A	5-7	I
2-7	E	5-8	U
2-8	U	6-7	I
		6-8	E
		7-8	A

2. In problem 1, pre-assign department 3 to location (2,3). Solve the problem using 10 random trials and 5 pairwise exchanges.

3. Consider the first six departments in problem 1. Assign these six departments to the following grid layout:



Use 10 random trials and 10 pairwise exchange trials.

As seen from the above output report, the new layout is much more efficient than the previous one. The aggregate value of the layout is 72 and the best assignment was found during trial 14 and there were nine successful trials.

### EXAMPLE 3 - USER EXCHANGE

You may improve the above solution still further by studying the resulting layout. For example, the current location for department DEP7 is (4,1) and that of department DEP6 is (3,1). Departments 6 and 7 have an adjacency rating of "X" which is undesirable. You may exchange the location of department DEP6 with another department that does not have an "X" rating with DEP7. As seen from Table 8-1, department DEP12 has an "A" rating with DEP7. Use the SOLVE option to explore the consequence of this exchange as described below.

Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option. The computer will ask if you wish to use the results of the last run as initial solution. Press <ENTER> to do so (screens not shown here). The computer will then display the menu of the solution methods. Move the bar down to the User Exchange and press <ENTER>. The computer will display the following screen.

```

*** USER PAIRWISE EXCHANGE ***
Aggregate Layout Value:   72.00   Improvements:   0.00

DEP1
DEP2
DEP3
DEP4
DEP5
DEP6*
DEP7

Use the arrow keys to highlight a Department. Press ENTER
to select or ESC to exit.
  
```

Move the bar down to department DEP6 and press <ENTER>. The computer will mark DEP6 as the first department selected and ask you to select the second department as shown below.

```

*** USER PAIRWISE EXCHANGE ***
Aggregate Layout Value:   72.00   Improvements:   0.00

DEP1
DEP2
DEP3
DEP4
DEP5
DEP6*
DEP7

Use the arrow keys to highlight another department. Press
ENTER to select or ESC to exit. First department has been
marked with (*).
  
```

Move the pointer down to DEP12 and press <ENTER>. The computer will perform the pairwise exchange and reports the results as shown below.

```

*** USER PAIRWISE EXCHANGE ***
Aggregate Layout Value:  136.00   Improvements:   64.00

More Exchanges (Y/N) N
  
```

Press <ENTER> to exit from the User Exchange solution option and display the final solution as shown below.

Problem Title: IRREGULAR PLAN

Number of Trials: 20      No. of Successful Trials: 2  
 Best Assignment Found on Trial: 13  
 Aggregate Layout Value: -218

Department	Row	Column
DEP10	3	1
DEP11	1	3
DEP12	2	1
DEP13	1	1
DEP14	2	2
DEP15	3	2
DEP16	4	2

As seen from the above output report, the aggregate value of the proposed solution is -218. This implies that the proposed layout contains several adjacent department pairs with undesirable or "X" rating. You can improve the above layout by solving the problem again, using the above layout as a starting solution and using the Pairwise Exchange solution method. Move the pointer to the SOLVE option and press <ENTER>. You will be asked if you wish to use the results of the last run as an initial solution. Press <ENTER> to indicate yes as shown below.

Use the result of last run as initial assignment (Y/N) Y

The computer will then display the menu of solution methods. Select the pairwise exchange option and request 15 trials as shown below. (Note that depending on the speed of the personal computer model that you are using, this step may take somewhat longer).

\*\*\* SOLUTION METHOD \*\*\*

Number of trials: 15

The computer will pause for a few seconds and then displays the output report as shown below.

Problem Title: IRREGULAR PLAN

Number of Trials: 15      No. of Successful Trials: 9  
 Best Assignment Found on Trial: 14  
 Aggregate Layout Value: 72

Department	Row	Column
DEP1	3	4
DEP2	3	3
DEP3	2	1
DEP4	1	2
DEP5	1	1
DEP6	3	1
DEP7	4	1
DEP8	4	3
DEP9	4	4

Problem Title: IRREGULAR PLAN

Number of Trials: 15      No. of Successful Trials: 9  
 Best Assignment Found on Trial: 14  
 Aggregate Layout Value: 72

Department	Row	Column
DEP10	2	3
DEP11	2	4
DEP12	1	4
DEP13	1	3
DEP14	2	2
DEP15	3	2
DEP16	4	2

G4	'O	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1		DEP6	DEP7	DEP8	DEP9	DEP10	DEP11	DEP12	DEP13	DEP14	DEP15	DEP16
2										2	2	2
3												
4		O	X	U	U	I	I	U	U	U	U	U
5		O	X	U	U	I	I	U	U	U	U	U
6		A	X	X	X	E	E	U	U	U	U	U
7		A	X	X	X	E	E	U	U	U	U	U
8		A	X	X	X	U	U	U	U	U	U	U
9			X	X	X	U	U	A	U	U	U	U
10				A	U	X	X	U	U	U	U	U
11					A	X	X	U	U	U	U	U
12						X	A	U	U	U	U	U
13								U	U	U	U	U
14									A	U	U	U
15										U	U	U
16											U	U
17												U
18												U

Note that the last three departments (DEP14, DEP15, and DEP16) are the three fictitious departments. They have been pre-assigned to the dummy locations (2,2), (2,3), and (2,4).

After completing the spread sheet data entry process, press <F10> to keep the data in memory and exit the spread sheet editor.

You may now save the input data on disk for future use. Move the pointer to the FILE option and select the Save Current File sub-option. The computer will display the current drive and sub-directory. Enter an appropriate file name and use the suffix "LAY" to indicate that this file contains a layout analysis problem.

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option. The computer will ask if you have an initial solution as shown below.

Wish to enter an initial assignment (Y/N) N

Press <ENTER> to indicate that there is no initial solution available at this time. The computer will then display the menu of solution methods as shown below.

\*\*\* SOLUTION METHOD \*\*\*

Random Assignments  
Pairwise Exchange  
User Exchange

Use the arrow keys to highlight a method. Press ENTER to select or ESC to exit.

Begin the solution process by selecting the Random Assignment method with 20 trials (process not shown). The computer will pause for a few seconds and then display the following output report.

Problem Title: IRREGULAR PLAN		
Number of Trials:	20	No. of Successful Trials: 2
Best Assignment Found on Trial:	13	
Aggregate Layout Value:	-218	
Department	Row	Column
DEP1	4	3
DEP2	2	4
DEP3	4	1
DEP4	1	4
DEP5	1	2
DEP6	2	3
DEP7	3	3
DEP8	3	4
DEP9	4	4

departments should all be "unimportant" or "U". Recall that the weight associated with U is zero, hence the existence of the fictitious departments will not affect the aggregate layout value. Note that the revised preference rating chart is the same as the chart in Table 8-1 with three additional columns containing "U" ratings.

As a last modification to the problem, you should ensure that the fictitious departments are all assigned to dummy locations. This is done by pre-assigning the three fictitious departments to the three fictitious cells as shown in Figure 8-5(b).

You are now ready to enter the problem into the computer. Load DSSPOM and select the Layout Analysis program. Move the pointer to the INPUT option and press <ENTER>. The computer will begin the data entry process by asking you to enter a problem title. Type "IRREGULAR PLAN" and press <ENTER>. The computer will then ask the number of rows, type "4" and press <ENTER>. The next item is the number of columns, type "4" and press <ENTER> as shown below.

```

Problem title: IRREGULAR PLAN

Number of Grid Rows:  4

Number of Grid Columns:  4

Enter problem parameters as requested. Press RETURN to
accept, or ESC to exit. Maximum problem size is 30
departments.
  
```

The computer will then ask if you are ready to enter the preference ratings as shown below.

Continue with rating matrix (Y/N) Y

Press <ENTER> to continue with the spread sheet data entry process. The computer will then invoke the spread sheet editor for entering the preference ratings. Initially, all of the pairwise ratings are set to "U". Note that you only need to enter ratings which are different than "U". To do this, move the pointer to each cell for which the rating is other than a "U"

and enter the rating. For example, the pairwise rating between departments 1 and 2 is "A". To enter this rating, move the pointer to cell C4 and type <A> and then <ENTER>. Note that you may enter the ratings in lower case such as "a" and the program will recognize them properly. If you wish to enter the ratings in upper case, press the <Caps Lock> key once at this time. The completed spread sheet for the first part of the preference ratings, involving departments 1 through 9 is shown below.

C4 'A		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	READY
1	Department	DEP1	DEP2	DEP3	DEP4	DEP5	DEP6	DEP7	DEP8	DEP9		
2	Site Row											
3	Site Col											
4	DEP1		A	U	U	O	O	X	U	U		
5	DEP2			U	U	O	O	X	X	U	U	
6	DEP3				A	A	A	X	X	X	X	
7	DEP4					A	A	X	X	X	X	
8	DEP5						A	X	X	X	X	
9	DEP6							A	X	X	X	
10	DEP7								X	X	X	
11	DEP8									A	U	
12	DEP9										A	
13	DEP10											
14	DEP11											
15	DEP12											
16	DEP13											
17	DEP14											
18	DEP15											

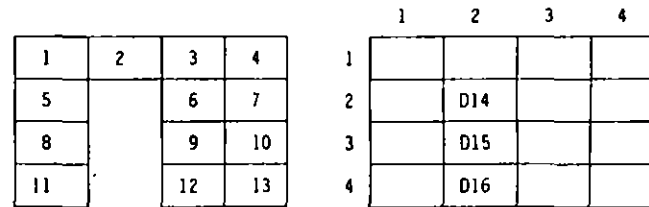
To enter the ratings of the remaining cells, press the <TAB> key or the right arrow key to move to the next screen. The completed spread sheet is shown below.

Problem Title: LAYOUT EXAMPLE		
Number of Trials: 10	No. of Successful Trials: 5	
Best Assignment Found on Trial: 10		
Aggregate Layout Value: 112		
Department	Row	Column
DEP1	1	2
DEP2	2	2
DEP3	3	2
DEP4	1	1
DEP5	3	1
DEP6	2	3
DEP7	2	1
DEP8	1	3
DEP9	3	3

As seen from the above report, the proposed layout has an aggregate value of 112. The best solution was obtained in trial 10 and that there were 5 successful pairwise exchange trials. This implies that 50 percent of the pairwise exchange trials resulted in improvements. When the number of trials (either random or pairwise exchange) is large and the percentage of successful trials is very low, finding an improved solution is rather unlikely. You may continue to try to improve the proposed solution by selecting the SOLVE option again and requesting additional trials of pairwise exchange.

### EXAMPLE 2 - AN L-SHAPED LAYOUT

In this example you will solve a layout problem which involves assigning 13 departments to an L-shaped layout. Figure 8-5(a) represents the L-shape floor space with 13 department locations. The preference ratings for the 13 departments are shown in Table 8-1. The problem is to assign the 13 departments to the 13 locations so as to maximize the aggregate preference value of the layout.



(a) (b)  
Figure 8-5: An L-Shaped Layout Design

Dep	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	A	U	U	O	O	X	U	U	I	I	U	U
2		U	U	O	O	X	U	U	I	I	U	U
3			A	A	A	X	X	X	E	E	U	U
4				A	A	X	X	X	E	E	U	U
5					A	X	X	X	U	U	U	U
6						X	X	X	U	U	U	U
7							A	U	X	X	A	U
8								A	X	X	U	U
9									X	X	U	U
10										A	U	U
11											U	U
12												A

Table 8-1: Preference Rating for the L-Shaped Layout Example

To solve the above, you should revise the problem data slightly. In particular, since the Layout Analysis program requires that the available space be a rectangular grid, you need to introduce additional fictitious spaces and departments to convert the L-shape space into a rectangular grid. Figure 8-5(b) presents the modified floor space. Three fictitious (dummy) cells have been added to the original space to make it rectangular.

The next step is to define three fictitious departments to be assigned to the dummy cells. The preference rating between the three fictitious departments and the existing 13

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option. The computer will ask if you have an initial layout as shown below

Wish to enter an initial assignment (Y/N) N

Press <ENTER> to indicate that there is no initial layout. The computer will then present a menu of the available solution techniques as shown below.

```

*** SOLUTION METHOD ***
  Random Assignments
  Pairwise Exchange
  User Exchange

Use the arrow keys to highlight a
method. Press ENTER to select or ESC to
exit.
  
```

To begin the solution process, select the Random Assignments option by pressing the <ENTER> key. The computer will ask you to enter the number of trials. Press <ENTER> to accept the default value of 10 as shown below.

```

*** SOLUTION METHOD ***

Number of trials: 10
  
```

The computer will pause for a few seconds and then display the solution report as shown below.

Problem Title: LAYOUT EXAMPLE		
Number of Trials: 10	No. of Successful Trials: 1	
Best Assignment Found on Trial: 3	Aggregate Layout Value: -56	
Department	Row	Column
DEP1	2	2
DEP2	2	3
DEP3	3	1
DEP4	1	1
DEP5	1	2
DEP6	1	3
DEP7	2	1
DEP8	3	3
DEP9	3	2

As seen from the above report, the aggregate value of the layout is -56. The negative value indicates that the proposed layout contains at least one adjacent department pair with an "X" rating. You may proceed to improve the layout by solving the problem again. To do this, move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output (process not shown here).

The computer will ask if you wish to use the results of the last run as an initial solution. Press <ENTER> to accept "Y" as shown below.

Use the result of last run as initial assignment (Y/N) Y

The computer will then display the menu of solution techniques. This time move the bar down to select the Pairwise Exchange option (process not shown here). The computer will ask you to enter the number of trials. Press <ENTER> to accept the default value of 10. The computer will then display the solution report as shown below.

## EXAMPLE 1 - THE NINE DEPARTMENT LAYOUT PROBLEM

In this example, you will solve the layout analysis problem presented earlier in this chapter. The preference rating chart for this problem is presented in Figure 8-3. The nine departments are to be assigned to a 3 by 3 grid so as to maximize the aggregate value of the layout (total preference value).

Load DSSPOM into the computer and select the Layout Analysis program. The computer will pause for a few seconds and then display the Layout Menu. Move the pointer to the INPUT option and press <ENTER>. The computer will begin the data entry process by placing the pointer in the title field. Enter a title such as "LAYOUT EXAMPLE" and press <ENTER>. The computer will then ask the number of rows in the grid, type "03" and press <ENTER>. The next item involves the number of columns in the grid, type "03" and press <ENTER>. The initial data entry screen is presented below.

```

Problem title: LAYOUT EXAMPLE

Number of Grid Rows: 03

Number of Grid Columns: 03

Enter problem parameters as requested. Press RETURN to
accept, or ESC to exit. Maximum problem size is 30
departments.
    
```

The computer will then ask if you are ready to enter the pairwise preference ratings. Press <ENTER> to invoke the spread sheet editor to enter the preference ratings as shown below.

Continue with rating matrix (Y/N) Y

The computer will then display the spread sheet of pairwise preference ratings. All of the ratings are initialized to "U" or unimportant. You only need to enter the ratings which are different than "U".

The first row of the spread sheet contains the department labels initialized to DEP1, DEP2, etc.. If you wish to use more meaningful labels, move the pointer to the cells in row 1 and change the labels as needed. Note that the editor only uses the labels in row one (and not column one) to identify the departments. Rows two and three of the spread sheet have been labeled as "Site Row" and "Site Column". These two rows are used to assign certain departments to permanent locations (sites). You will use these rows in the next example and not at this time.

The pairwise ratings may be entered in lower or upper case letters. The program will recognize both. However, entering the ratings in upper case letters is less confusing. To enter the ratings all in upper case, you may press the <CAPS Lock> key once and then proceed with the data entry process.

Begin with department pair (1,3). The rating for this pair is "A" for absolutely important. Move the pointer to cell D4 and type "A" then press <ENTER>. The ratings between department 4 and departments 1,2, and 3 are all different than "U". To enter these ratings, move the pointer to column E, cell E4. Enter "I" and press the down arrow key to move the pointer to cell E5. Now type "E" and press enter. Move the pointer to other cells, one at a time and enter the associated ratings. The completed spread sheet is shown below.

J11 '1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	READY
1	Department	DEP1	DEP2	DEP3	DEP4	DEP5	DEP6	DEP7	DEP8	DEP9	
2	Site Row	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
3	Site Col	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
4	DEP1	.	U	A	I	I	E	U	U	X	
5	DEP2	.	.	I	E	U	A	I	E	U	
6	DEP3	.	.	.	X	U	I	A	U	I	
7	DEP4	.	.	.	.	U	I	U	X	U	
8	DEP5	.	.	.	.	.	I	A	A	X	
9	DEP6	.	.	.	.	.	.	U	A	J	
10	DEP7	.	.	.	.	.	.	.	U	X	
11	DEP8	.	.	.	.	.	.	.	.	I	

After completing the data entry process, press <F10> to keep the data in memory and exit from the spread sheet editor.

If you wish to save the problem for future use, move the pointer to the FILE option and select the Save Current File sub-option. The computer will ask you to enter a file name. Enter an appropriate DOS file name and use a suffix such as "LAY" to indicate that the file contains a Layout Analysis problem. To obtain a hard copy printout of the model, move the pointer to the PRINT option and press <ENTER>. The computer will pause a few seconds and then print the model.



## SOLUTION METHOD

The solution methods available for solving the Facilities Layout problem consist of (1) Random Assignments, (2) Pairwise Exchange, and (3) User Exchange. We now describe the underlying procedures in each of the above options.

### Random Assignments

The first approach, Random Assignments, consists of generating layout designs which are purely random. If a problem has six departments to be assigned to a 2 by 3 grid, first the six department numbers are ordered at random. In absence of forced assignments, the first department (in the sequence) is then assigned to grid (1,1), the northwest corner cell. The assignment continues horizontally until the first row is completed. It then continues with the next row and so on. For example, the sequence 6, 3, 2, 1, 5, 4 will result in the following layout:

6	3	2
1	5	4

The next step in this procedure consists of computing the aggregate preference value of the generated layout based on the adjacency ratings and the associated weights. This is done by summing the weights associated with preference ratings for department pairs which are adjacent. For instance, in the above example, department pairs (6,3), (6,5), (6,1), (3,2), (3,4), (3,5), (3,1), (2,4), (2,5), (1,5), and (5,4) are considered adjacent. Hence, the weights associated with their preference ratings will be added to give the aggregate value of that layout. Each random layout constitutes one random trial. When all random trials are completed, the layout with the largest aggregate value is presented as the best solution.

### Pairwise Exchange

The second approach, Pairwise Exchange consists of starting with an initial layout and trying to improve its aggregate preference value. The initial layout is either entered by the user, generated at random, or obtained from a previous run. A trial of the pairwise exchange consists of selecting a department at random and comparing it with other departments (starting at (1,1) and moving horizontally) for possible exchange. A trial ends as soon as an exchange is found which results in an increase of the aggregate value. Note, however, that a trial may end without the occurrence of any improvement (any exchange) in the aggregate value. In either case, the next trial begins by using the layout from the previous trial and examining it for a possible pairwise exchange. As with the random layouts, when the requested number of trials are performed, the layout with the largest aggregate value is presented as the best solution.

### User Exchange

This solution option consists of allowing the user to selectively perform pairwise exchanges of department pairs and observe the impact on the overall layout design. The option involves asking the user to highlight a department to be selected for exchange. It then presents the list of departments again and asks the user to select a second department to be exchanged with the first one. If any of the two departments have fixed locations, the program will warn the user that one or both departments have fixed locations. Note that allowing the user to change the location of departments with fixed sites (in this option) has been intentional. The reason is that for certain situations the decision maker (or user) may wish to explore the possibility of moving a department with fixed site.

### Fixed Locations

In certain situations, it may be desirable and probably necessary to pre-assign one or more departments to fixed locations or sites. For example, in a faculty and staff office assignment, it is usually customary (and efficient) to situate the staff or secretarial office space at a corner point or the entrance. In industrial applications, the shipping and receiving department is often placed at the entrance to the plant or department.

The Layout Analysis program provides for pre-assigning one or more department to fixed locations (or sites). This is done by entering the coordinates (row and column numbers) of departments with pre-assigned locations in rows two and three of the spreadsheet data editor. The program will scan these rows for non-zero entries and utilizes the information if present.

During the solution process, any departments with pre-assigned locations are first assigned to their permanent sites and then the remaining departments are assigned as appropriate.

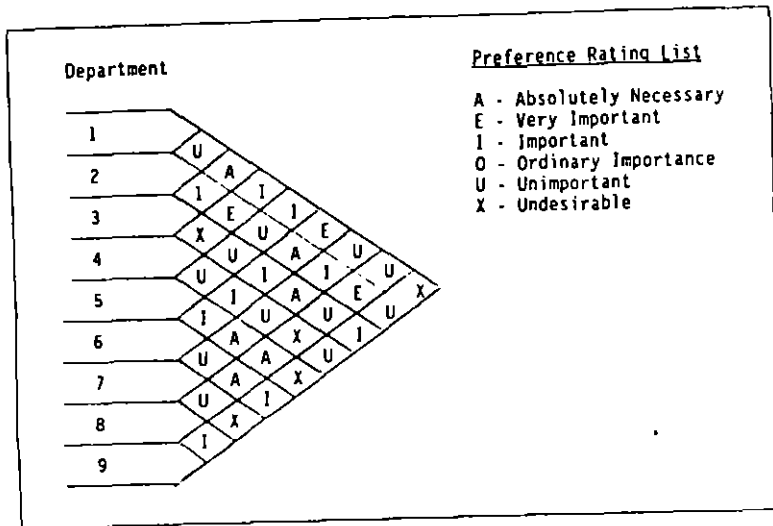


Figure 8-3 Graphical Display of Departmental Pair Preference

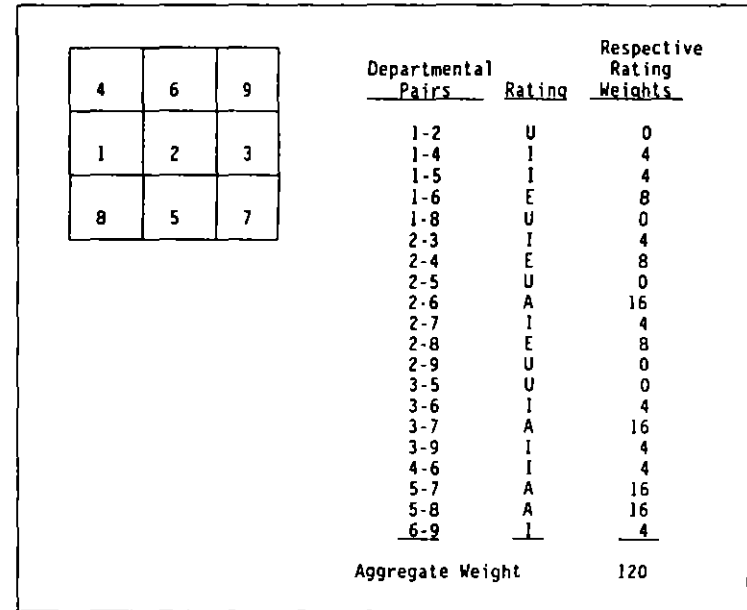


Figure 8-4: Layout Developed Based on Departmental Pair Rating Weight Assignments

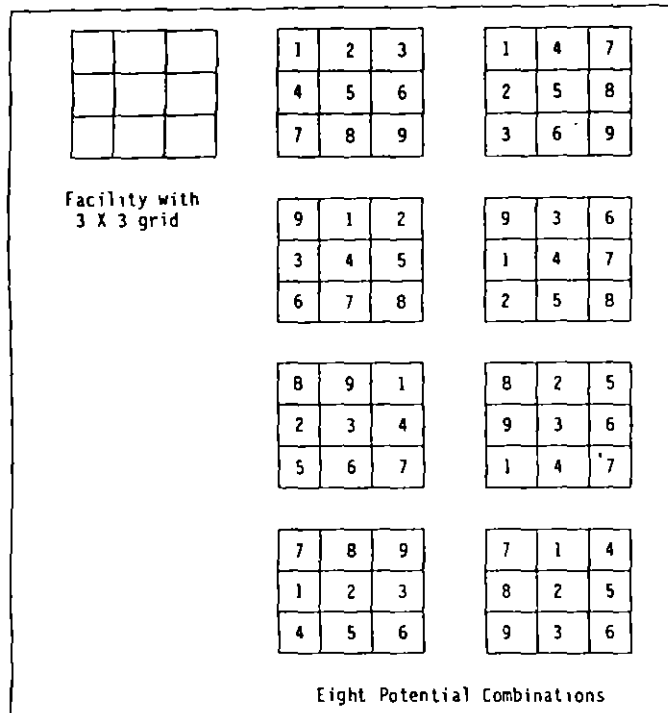


Figure 8-1 Nine-grid Facility with Some Potential Layouts

<u>Department Pair</u>	<u>Preference Rating</u>	<u>Department Pair</u>	<u>Preference Rating</u>
1 - 2	U	4 - 5	U
1 - 3	A	4 - 6	I
1 - 4	I	4 - 7	U
1 - 5	I	4 - 8	X
1 - 6	E	4 - 9	U
1 - 7	U	5 - 6	I
1 - 8	U	5 - 7	A
1 - 9	X	5 - 8	A
2 - 3	I	5 - 9	X
2 - 4	E	6 - 7	U
2 - 5	U	6 - 8	A
2 - 6	A	6 - 9	I
2 - 7	I	7 - 8	U
2 - 8	E	7 - 9	X
2 - 9	U	8 - 9	I
3 - 4	X		
3 - 5	U		
3 - 6	I		
3 - 7	A		
3 - 8	U		
3 - 9	I		

Figure 8-2 Preference Rating of All Departmental Pairs

## CHAPTER 8

### FACILITIES LAYOUT ANALYSIS

#### INTRODUCTION

Facilities layout analysis using preference ratings has been widely adopted and is presented in nearly all text books on production and operation management. The approach is popular because it allows inclusion of a number of considerations in determining the location of facilities. As a result the approach is a general method for developing an acceptable layout of physical facilities such as manufacturing plants, inventory warehouses, department stores and service facilities.

An application of the facilities layout method will be illustrated by an example of a facility with nine relatively equal-sized departments. The departments are located in a three by three grid as shown in Figure 8-1. Also shown are a number of potential combinations of various layouts that can occur and from which the manager or layout engineer must choose. The facilities layout method attempts to find the best layout according to a number of preferences shown in Figure 8-2. The preference table shows the preferred relationships between each pair of the nine departments. Since there are nine departments there will be  $(9)(8)/2 = 36$  department pairs, each with its preference rating. Preference ratings are limited to six categories: absolutely necessary (A), very important (E), important (I), ordinary importance (O), unimportant (U) and undesirable (X).

The tabular listing of the departmental pairs can be shown in a more graphical format by using an arrowlike graphical matrix device as shown in Figure 8-3. Note that each of the 36 departmental pairs are listed by preference rating as indicated in the previous figure.

With smaller facility layouts one can use the departmental pair preference ratings and arrive at a reasonable layout that satisfies most of the listed departmental pair preferences. However, with larger facilities a manual layout becomes rather cumbersome. For instance, the computer method to be discussed below is able to consider up to thirty departments. Sixteen departments generate 190 departmental pairs and to consider that many departmental pair constraints in developing a desirable facilities layout becomes rather difficult.

#### PAIRWISE RATINGS WEIGHTS

In order to develop a solution method for obtaining a layout design which will maximize the preference relationships, one may associate a weight structure with the pairwise preference ratings. For example, large positive weights can be assigned to more desirable ratings such as "A", "E", and "I", and a large negative weight can be assigned to "X". Then, for any given layout design, one can determine an aggregate weight or value based on the number of occurrences of "A's", "E's", etc. The aggregate value can be used to evaluate and compare different layouts.

The internal weight structure which is used in the computer program for the Layout Analysis consists of using a weight of 16 for "A", 8 for "E", 4 for "I", 2 for "O", 0 for "U", and -80 for "X". This weight structure has a nice property in that each more desirable rating is weighed twice the previous one. In addition, the weight assigned to "X" or undesirable adjacency is -80 which is 5 times worse than the most desirable rating "A". The choice of this particular weight structure is rather ad-hoc. For another layout engineer, absolutely important rating "A" may have a much higher degree of importance than essentially important rating "E". In this case, the weight associated with "A" should be more than twice the weight of "E". The Layout Analysis program edit option enables you to edit and change the weights. If the pre-assigned weights are not appropriate for your particular application, use the editor to change the weights as appropriate.

#### CALCULATING THE AGGREGATE LAYOUT VALUE

With the earlier problem we only have to consider thirty-six departmental pairs. A departmental layout that satisfies most of the departmental pairs' preference ratings appears in Figure 8-4. Assuming the numerical weight preference rating used in the computer program we arrive at an aggregate weight assignment of 120. This weight assignment is based on a weight of 16 to A, of 8 to E, of 4 to I, of 2 to O, of 0 to U and of -80 to X. The layout shown is not necessarily the best layout. You may be able to develop one with a higher aggregate weighting. If you cannot improve upon it, one would expect that the computer program at least will be able to make a marginal improvement.

18. The Administrative Building at Weaver University contains 6 rooms that are 20 feet square in size. You are called in to help the University decide where each department should reside within the Administrative Building, which is 40 feet long and 60 feet wide. The two way flows between departments are shown below. Besides minimizing the distance that must be traveled, the following considerations must be taken into account; student accounts and scheduling must be close together because they share a computer; the Dean and the Vice President, who resides in the advisement department, must be close because they share a secretary; and the career counseling people aren't real happy with some of the Dean's decisions and there is animosity between them.

Develop nearness priorities and formulate a layout design.

	S.A.	SCHED.	PAYROLL	DEAN	CAREER	ADVISEMENT
Student Acct.	--	400	100	200	50	100
Scheduling	--	--	50	300	300	250
Payroll			--	25	75	50
Dean				--	100	100
Career Counsel.					--	300
Advisement						--

19. As the facility layout engineer of your company, you have been given the task of assigning 6 work centers to a 90 foot long by 60 foot wide area. Each work center is 30 feet wide by 30 feet long. Below are the distances in feet between locations and the number of trips between locations each day. Assume work center 6 must be in spot A.

- Assign the work centers to minimize the total distance traveled.
- Compute the cost of this plan if transportation costs per load per foot is \$3.00.

To/From	DISTANCE BETWEEN LOCATIONS (FEET)					
	A	B	C	D	E	F
A	-	35	85	35	65	115
B		--	35	75	25	55
C			--	125	45	35
D				--	35	105
E					--	35
F						--

To/From	NUMBER OF TRIPS PER DAY BETWEEN CENTERS					
	1	2	3	4	5	6
1	--	85	20	18	6	13
2	30	--	3	1	5	9
3	32	0	--	0	0	2
4	36	7	0	--	1	0
5	9	11	0	4	--	1
6	27	33	8	0	0	--



15. As design and development for the Snyder Packing Plant proceeded it was decided to use different methods of material handling. As a result the cost of material handling was not equal. A matrix was developed which shows the relative cost of moving a load per unit distance between departments. The matrix is shown below. Develop a revised layout for the Snyder Packing Plant.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	-	2	1	2	3	1	3	1	3
B		-	3	2	3	3	2	3	1
C			-	1	2	1	1	3	2
D				-	1	3	3	3	2
E					-	1	3	1	3
F						-	2	2	3
G							-	2	1
H								-	2
I									-

16. You are called in to be a consultant for a major luggage company. They are calling on you to arrange the plant in order to minimize transportation costs. The number of trips between departments and the cost per unit of distance are shown in the table below.

Develop nearness priorities and give a layout design to minimize the transportation costs. The facility should be 3 x 2.

MOVEMENT	FROM	TO	EXPECTED NUMBER OF TRIPS	COST PER UNIT OF DISTANCE
	A	B	100	.10
	A	C	200	.15
	A	D	300	.10
	A	E	100	.10
	A	F	250	.20
	B	C	200	.15
	B	D	300	.10
	B	E	100	.20
	B	F	150	.15
	C	D	300	.15
	C	E	275	.15
	C	F	100	.20
	D	E	225	.10
	D	F	150	.10
	E	F	185	.20

17. Zigmond Manufacturing Company is a job shop that produces many varied items. Flow within the plant is also varied. Some departments deal with heavy items that are expensive to transport. The costs to move items between departments is shown below. Also shown is an estimate of the number of items expected to flow between departments this year.

- Develop nearness priorities for each of the departments.
- Formulate a layout design (2 x 3) to minimize expenses.

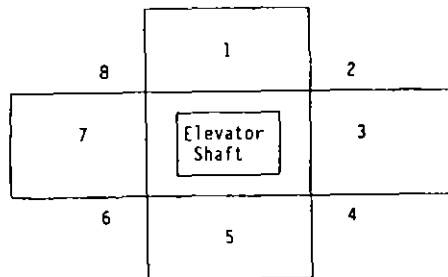
		COST PER UNIT OF DISTANCE					
From	To	Lathe	Mills	Drills	Casting	Finishing	Assembly
Lathe		--	.04	.05	.02	.05	.03
Mills		.02	--	.07	.03	.04	.02
Drills		.03	.02	--	.04	.07	.10
Casting		.05	.03	.10	--	.03	.07
Finishing		.07	.04	.03	.07	--	.05
Assembly		.04	.10	.04	.05	.07	--

		EXPECTED NUMBER OF TRIPS BETWEEN DEPARTMENTS					
From	To	Lathe	Mills	Drills	Casting	Finishing	Assembly
Lathe		--	100	400	100	400	200
Mills		100	--	300	200	100	100
Drills		200	100	--	300	100	250
Casting		400	200	250	--	200	300
Finishing		300	100	200	300	--	400
Assembly		100	250	100	400	300	--

10. Upon re-examination of the Lockport Machine Shop problem it became clear that the cost of moving each load per unit distance was not equal because of the different means of transportation used. To respond to that variation a matrix was developed which showed the relative cost of moving a load per unit distance between departments. The matrix is shown below. Develop a layout for the Lockport Machine Shop.

Relative Unit Cost per Distance Matrix						
	A	B	C	D	E	F
A	-	1	1	2	3	1
B		-	3	4	1	2
C			-	3	4	2
D				-	3	1
E					-	3
F						-

11. The Wheatport Clinic was in the process of moving to the second floor of a hexagonal tower. The eight office locations on the second floor were on the periphery of the building with the elevator shaft located at the center of the building as shown below. The eight office locations were about equal size and each office location was about 50 feet from the adjacent office.



Develop distance matrices for the eight office locations on the basis of:

- One-way traffic only (e.g., clockwise movements)
- Two-way traffic

12. The number of trips per day between the Wheatport Clinic's six offices and two laboratories are as shown below in the number of trips matrix. Develop an appropriate location for the Clinic's six offices and laboratories identified as A and B for laboratories and C, D, E, F, G and H for offices.

	A	B	C	D	E	F	G	H
A	-	55	70	95	40	30	85	15
B	30	-	15	25	35	65	40	65
C	10	20	-	5	15	90	25	20
D	5	55	65	-	10	60	45	35
E	25	90	80	45	-	20	15	15
F	40	50	15	75	10	-	10	10
G	75	10	40	10	70	10	-	85
H	70	50	55	25	75	85	15	-

13. Snyder Packing was in the process of designing a new plant layout for a nine-department packing plant. The departments are all about equal size and measure about 6400 square feet. The plant will be a square building measuring 240 ft by 240 ft. The department locations are numbered 1 through 9. The routes through the plants run parallel to the outside walls of the building and through the center of each departmental location. Develop a distance matrix for the nine square departmental locations. Show the locations on a 3x3 grid.

14. The material flow in loads per week for the Snyder Packing Plant discussed above is shown below. Develop a minimum cost plant layout.

Facilities	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	0	150	740	630	310	120	950	840	130
B	150	0	160	710	210	790	890	150	180
C	740	160	0	900	350	480	760	730	350
D	630	710	900	0	510	220	240	510	760
E	310	210	350	510	0	980	560	590	410
F	120	790	480	220	980	0	120	270	910
G	950	890	760	240	560	120	0	840	240
H	840	150	730	510	590	270	840	0	360
I	130	180	350	760	410	910	240	360	0

Material Flow Matrix

5. The West Valley Machine Shop was moving to a new building. The three locations, identified as 1, 2 and 3 in the building were separated as shown in the distance matrix below. The material flow per week between the three departments, identified as A, B and C, amounted to the number of loads shown in the material flow matrix below. Develop an appropriate layout which minimizes loads x distance travelled.

Locations	1	2	3
1	0	75	30
2	75	0	95
3	30	95	0

Distance Matrix

Facilities	A	B	C
A	0	565	410
B	565	0	395
C	410	395	0

Material Flow Matrix

6. The Dryden Cereals Corporation is opening a new four department plant. The distances between the four departmental locations are shown on the distance matrix below. The four departments identified as A, B, C and D are projected to have material flow (loads) per day as shown in the material flow matrix below. Develop an appropriate layout which minimize loads x distance travelled.

Locations	1	2	3	4
1	0	195	265	125
2	195	0	430	85
3	265	430	0	315
4	125	85	315	0

Distance Matrix

Facilities	A	B	C	D
A	0	5	15	25
B	5	0	30	20
C	15	30	0	10
D	25	20	10	0

Material Flow Matrix

7. The Lockport Machine Shop is in the process of moving to a new building where its six equally-sized departments will be located in a 3x2 grid building as shown below with the six building locations numbered from 1 to 6. Each location measures 100 ft by 100 ft.

1	2	3
4	5	6

The distances between departmental locations are measured from the center of each department to the center of each other department. Travel routes in the building are parallel to outside walls and pass through the center of each departmental location. Develop the distance matrix for the six departmental locations

8. The loads to be transported daily between departments of the Lockport Machine (see problem 7) are shown below. The cost of moving each load between each department is equal per unit distance. Develop a layout which minimizes total departmental loads x distance travelled. Departments are identified as A, B, C, D, E and F.

Loads Matrix						
	A	B	C	D	E	F
A	-	50	75	40	30	85
B	85	-	145	10	10	35
C	95	30	-	25	95	60
D	15	40	25	-	40	115
E	75	40	35	40	-	45
F	55	50	45	10	85	-

9. In problem 8, suppose that department A must be situated at location 6. Find a minimum cost layout.



3. Ace Manufacturing plans to open a new warehouse for distribution of its recently launched new product. The new warehouse will be supplied from two plants (A,B) to be located at locations 1 and 2. The distance and cost matrices below represent the problem. Find the locations of the new plants.

Locations	1	2	3	4	5
1	0	0	75	125	95
2	0	0	90	110	105
3	75	90	0	60	75
4	125	110	60	0	135
5	95	105	75	135	0

Distance Matrix

Facilities	A	B	C	D	E
A	0	0	560	560	560
B	0	0	390	390	390
C	560	390	0	60	95
D	560	390	60	0	110
E	560	390	95	110	0

Material Flow Matrix

4. The distances between the nine departments in the plant layout shown below consist of one distance unit for adjacent departments, two distance units for diagonally adjacent departments, and four distance units for all other departments. The material flow matrix for the nine departments is also listed below. Find a low cost plant layout.

1	4	7
2	5	8
3	6	9

Location Layout

Facilities	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	0	150	740	630	310	120	950	840	130
B	150	0	160	710	210	790	890	150	180
C	740	160	0	900	350	480	760	730	350
D	630	710	900	0	510	220	240	510	760
E	310	210	350	510	0	980	560	590	410
F	120	790	480	220	980	0	120	270	910
G	950	890	760	240	560	120	0	840	240
H	840	150	730	510	590	270	840	0	360
I	130	180	350	760	410	910	240	360	0

Material Flow Matrix

Problem Title: LOCATION EXAMPLE

Number of Trials: 30      No. of Successful Trials: 3  
 Best Assignment Found on Trial: 8  
 Transportation Cost: 188550

Department	Location
DEP2	LOC1
DEP4	LOC2
DEP1	LOC3
DEP3	LOC4
DEP6	LOC5
DEP5	LOC6

As seen from the above solution report, department A (DEP1) has been assigned to location 3 and department F (DEP6) has been assigned to location 5 as requested. The total transportation cost however is 3800 units higher than the cost of the best solution in Example 2. This is due to the additional cost incurred by requiring departments A and F with relatively high inter-departmental work flow ( $90 \times 2 = 180$  units) to be located relatively far from each other (115 distance units).

**PROBLEMS**

1. Based on the distance matrix and the material flow matrix below, find the best possible facilities layout.

Locations	1	2	3	Facilities	A	B	C
1	0	75	30	A	0	565	410
2	75	0	95	B	565	0	395
3	30	95	0	C	410	395	0

Distance Matrix                      Material Flow Matrix

2. Based on the distance matrix and the material flow matrix below, find the best possible facilities layout.

Locations	1	2	3	4	Facilities	A	B	C	D
1	0	195	265	125	A	0	5	15	25
2	195	0	430	85	B	5	0	30	20
3	265	430	0	315	C	15	30	0	10
4	125	85	315	0	D	25	20	10	0

Distance Matrix                      Material Flow Matrix

Problem Title: LOCATION EXAMPLE	
Number of Trials: 40	No. of Successful Trials: 0
Best Assignment Found on Trial: .0	
Transportation Cost: 185950	
Department	Location
-----	-----
DEP6	LOC1
DEP1	LOC2
DEP4	LOC3
DEP5	LOC4
DEP2	LOC5
DEP3	LOC6

As seen from the above solution, department 2 has been assigned to location 5 and department 4 has been assigned to location 3.

### EXAMPLE 2 - DEPARTMENTS WITH FIXED LOCATIONS

In this example you will solve the above problem, this time requiring that departments A (DEP1) and F (DEP6) have fixed or permanent locations. In particular, suppose that department DEP1 is pre-assigned to location 3 (LOC3) and department DEP6 is pre-assigned at location 5.

To solve the above problem, move the pointer to the EDIT option and press <ENTER>. The computer will begin the data edit process by placing the pointer in the title field. Press <ENTER> five times to accept the current values of the initial parameters and invoke the spread sheet editor. When presented with the spread sheet containing the flow matrix and distance matrix, move the pointer to cell B2 to enter the fixed location for department DEP1. Enter a 3 in this cell and press <ENTER>. Next move the pointer to cell G2 and enter a 5, then press <ENTER>. The completed spread sheet is presented below.

G2 5		READY					
	A	B	C	D	E	F	G
1	Dept. Flow	DEP1	DEP2	DEP3	DEP4	DEP5	DEP6
2	Fixed Site	3	.	.	.	.	5
3	DEP1	.	50.00	30.00	65.00	15.00	90.00
4	DEP2	60.00	.	25.00	70.00	75.00	80.00
5	DEP3	30.00	35.00	.	60.00	5.00	85.00
6	DEP4	65.00	90.00	60.00	.	40.00	35.00
7	DEP5	75.00	95.00	15.00	40.00	.	10.00
8	DEP6	90.00	90.00	85.00	35.00	10.00	.
9							
10	Distance	LOC1	LOC2	LOC3	LOC4	LOC5	LOC6
11	LOC1	.	55.00	75.00	195.00	175.00	120.00
12	LOC2	.	.	90.00	165.00	140.00	140.00
13	LOC3	.	.	.	130.00	115.00	105.00
14	LOC4	.	.	.	.	70.00	220.00
15	LOC5	.	.	.	.	.	145.00
16	LOC6	.	.	.	.	.	.

As seen from the above display, the fixed site for DEP1 is location 3 and that of DEP6 is location 5. Press <F10> to keep the data and proceed with the solution process as described below.

Move the pointer to the SOLVE option and select the Display output sub-option. The computer will pause for a few seconds and then ask if you wish to enter an initial solution. Press <ENTER> to indicate that there is no initial solution available. The computer will then display the menu of solution options. Select the random assignment solution method and request 30 trials as shown below.

*** SOLUTION METHOD ***
Number of trials: 30

The computer will pause a few seconds and then report the following solution.

### "What If" Analysis - User Exchanges

In practical application of location analysis, one is often faced with inquiries regarding the consequences of making changes to a layout. For example, you may wish to determine what will be the total transportation cost for the above solution, if you re-assign department 2 to location 5 instead of its current location 3.

To solve the above problem, move the pointer to the SOLVE option again and select the Display Output sub-option. Next press enter to keep the results of the last run as initial solution. When presented with the menu of solution methods, move the bar down to "User Exchange" and press <ENTER>. The computer will display the following screen.

```
*** USER PAIRWISE EXCHANGE ***
Transportation Cost: 184750.00   Savings: 0.00

DEP1
DEP2
DEP3
DEP4
DEP5
DEP6

Use the arrow keys to highlight a Department. Press ENTER
to select or ESC to exit.
```

The above display indicates that the total cost of the current solution is 184750, and the savings is 0 (since no exchange has been made there is no saving). Move the bar down to department 2 (e.g., DEP2) and press <ENTER>. The computer will then display the following screen.

```
*** USER PAIRWISE EXCHANGE ***
Transportation Cost: 184750.00   Savings: 0.00

LOC1
LOC2
LOC3*
LOC4
LOC5
LOC6

Use the arrow keys to highlight a Location. Press ENTER to
select or ESC to exit. Current location has been marked
with (*).
```

The above screen indicates that department 2 is currently assigned to location 3 (marked by an "\*"). Move the bar down to location 5 (LOC5) and press <ENTER>. The computer will pause for a few seconds and then displays the following screen.

```
*** USER PAIRWISE EXCHANGE ***
Transportation Cost: 185950.00   Savings: -1200.00

More Exchanges (Y/N) N
```

The above report indicates that moving department 2 to location 5 will increase the total transportation cost by 1200 to 185950. You may keep this new layout by pressing <ENTER> to indicate no more user exchanges are needed. Alternatively, you can restore the solution back to its original one by asking for another exchange. In this case you will select department 2 again and assign it to location 3 (this process is not shown here) Press <N> to keep this new solution and continue with the next report as shown below.

```

*** SOLUTION METHOD ***
Number of trials: 10

```

The computer will pause for a few seconds and then report the results as shown below.

```

Problem Title: LOCATION EXAMPLE
Number of Trials: 10      No. of Successful Trials: 1
Best Assignment Found on Trial: 10
Transportation Cost: 195600

Department      Location
-----
DEP1             LOC1
DEP6             LOC2
DEP4             LOC3
DEP2             LOC4
DEP5             LOC5
DEP3             LOC6

```

As seen from the above report, the suggested solution indicates that department 1 should be assigned to location 1, department 6 to location 2, 4 to 3, 2 to 4, 5 to 5, and department 3 to location 6. The total cost of transportation 195600. The report indicates that, as requested, 10 random layouts were generated of which 1 had a lower transportation cost than the initial solution (also generated at random).

#### Improving the Solution - Pairwise Exchange

The random assignment solution method is heuristic and there is no guarantee that the above solution is the least cost one. To explore the possibility of improving the above solution, you may use several iterations (trials) of pairwise exchanges. Move the pointer to the SOLVE option again and select the Display Output as sub-option. The computer will ask if you wish to use the results of the last run as an initial solution. Press "Y" to use the previous solution as an initial one as shown below.

```

Use the result of last run as initial assignment (Y/N) Y

```

The computer will then display the solution option menu. Move the bar to "Pairwise Exchange" and press <ENTER>. When asked to enter the number of trials, press <ENTER> to select 10 which is the default number as shown below.

```

*** SOLUTION METHOD ***
Number of trials: 10

```

The computer will pause for a few seconds and then display the solution report as shown below.

```

Problem Title: LOCATION EXAMPLE
Number of Trials: 10      No. of Successful Trials: 3
Best Assignment Found on Trial: 3
Transportation Cost: 184750

Department      Location
-----
DEP6             LOC1
DEP1             LOC2
DEP2             LOC3
DEP5             LOC4
DEP4             LOC5
DEP3             LOC6

```

As seen from the above report, the initial solution from the previous run has been improved. The total cost of the new solution is 184750 which was obtained during the third trial. There were also three successful trials. The above layout is more efficient than the previous one but there is no guarantee that it is the best possible layout. You may continue to solve the problem over and over again using either the random assignments or pairwise exchanges. When no further improvement can be found, you may select the suggested solution as a reasonably good solution.

<ENTER> key. Now move the pointer one cell to the right, to cell D3 to enter the flow from department 1 to department 3. Enter 30 and press <ENTER>. Move the pointer to the right again and proceed by entering the flows from department 1 to departments 4, 5, and 6. Next move the pointer to cell B4 to enter the flow from department 2 to 1. Enter 60 and press <ENTER>. Repeat the process to complete the flows for all of the departments.

### Entering the Distance Matrix

The distance matrix is symmetric and therefore you only need to enter the elements of the upper triangular matrix. Move the pointer to cell C11 to enter the distance between locations 1 and 2. Enter 55 and press <ENTER>. Next move the pointer to cell D11 to enter the distance between locations 1 and 3. Enter 75 and press <ENTER>. Enter the remaining distances as appropriate. The completed spread sheet is shown below.

G15 145		A	B	C	D	E	F	G
1	Dept. Flow	DEP1	DEP2	DEP3	DEP4	DEP5	DEP6	
2	Fixed Site	.	.	.	.	.	.	.
3	DEP1	.	50.00	30.00	65.00	15.00	90.00	
4	DEP2	60.00	.	25.00	70.00	75.00	80.00	
5	DEP3	30.00	35.00	.	60.00	5.00	85.00	
6	DEP4	65.00	90.00	60.00	.	40.00	35.00	
7	DEP5	75.00	95.00	15.00	40.00	.	10.00	
8	DEP6	90.00	90.00	85.00	35.00	10.00	.	
9								
10	Distance	LOC1	LOC2	LOC3	LOC4	LOC5	LOC6	
11	LOC1	.	55.00	75.00	195.00	175.00	120.00	
12	LOC2	.	.	90.00	165.00	140.00	140.00	
13	LOC3	.	.	.	130.00	115.00	105.00	
14	LOC4	.	.	.	.	70.00	220.00	
15	LOC5	.	.	.	.	.	145.00	
16	LOC6	.	.	.	.	.	.	

After completing the spread sheet data entry process, press <F10> to keep the data in memory and exit the spread sheet editor.

You may wish to save this problem for future use. To save the problem, move the pointer to the FILE option and select the Save Current File sub-option and press <ENTER>. The computer will show the current drive and sub-directory and will ask you to enter a file name. Use an appropriate name and a suffix such as "LOC" to indicate that this file contains a Location Analysis problem. You may also obtain a hard copy printout

of the problem by selecting the PRINT option. Be sure that the printer is On and Ready. Press <ENTER> to print or <ESC> to abort print and exit.

### Solving the Problem - Random Assignments

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option. The computer will pause a few seconds and then ask if you have an initial assignment as shown below.

Wish to enter an initial assignment (Y/N) N

Since there is no initial assignment available, press <ENTER> to proceed. The computer will then display the solution option menu as shown below.

\*\*\* SOLUTION METHOD \*\*\*

Random Assignments  
Pairwise Exchange  
User Exchange

Use the arrow keys to highlight a method. Press ENTER to select or ESC to exit.

As seen from the above exhibit, three solution methods are available. The first method involves random assignment of the departments to the locations and storing the solutions with lower transportation cost. This solution option is much faster than the next option which involves pairwise exchanges.

Select the Random Assignment option by pressing the <ENTER> key. The computer will ask you to enter the number of trials. It suggests a default value of 10. Press <ENTER> to accept 10 and perform 10 trials of random layouts as shown below.

Move the pointer to the INPUT option and press <ENTER>. The computer will begin the data entry process by asking you to enter the title. Type "LOCATION EXAMPLE" and press <ENTER>. The computer will then ask you to enter the number of departments. Type 06 and press <ENTER>. The next question relates to the flow matrix. The flow matrix for this example is not symmetric therefore press <N> followed by <ENTER>. The distance matrix however is symmetric, press <ENTER> to request a symmetric distance matrix. The initial data entry process is shown below.

```

Problem title: LOCATION EXAMPLE

Number of Departments: 6

Flow Matrix Symmetric (Y/N): N

Distance Matrix Symmetric (Y/N): Y
  
```

Enter problem parameters as requested. Press RETURN to accept, or ESC to exit. Maximum problem size is 30 departments, distance values and flow values should be within 0 and 999.

After the initial data entry process, the computer will ask if you are ready to enter the distance and flow matrix as shown below.

Continue with distance/flow matrix (Y/N) Y

Press <ENTER> to continue with the spread sheet data entry process. The computer will then display the spread sheet data entry with all distances and flows initialized to 0 as shown below.

A1 Dept. Flow	A	B	C	D	E	F	G
1 Dept. Flow	DEP1	DEP2	DEP3	DEP4	DEP5	DEP6	
2 Fixed Site	.	.	.	.	.	.	.
3 DEP1	.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4 DEP2	.	0.00	.	0.00	0.00	0.00	0.00
5 DEP3	.	0.00	0.00	.	0.00	0.00	0.00
6 DEP4	.	0.00	0.00	0.00	.	0.00	0.00
7 DEP5	.	0.00	0.00	0.00	0.00	.	0.00
8 DEP6	.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	.
9							
10 Distance	LOC1	LOC2	LOC3	LOC4	LOC5	LOC6	
11 LOC1	.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12 LOC2	.	.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13 LOC3	.	.	.	0.00	0.00	0.00	0.00
14 LOC4	.	.	.	.	0.00	0.00	0.00
15 LOC5	.	.	.	.	.	0.00	0.00
16 LOC6	.	.	.	.	.	.	0.00

#### Description of the Initial Spread Sheet

The first row of the spread sheet (row 1) contains the department default labels. For example the label for the department 1 is DEP1, for department 2 is DEP2, etc. Row 2 of the spread sheet is labeled "Fixed Site" and is initialized with periods. This row is used for problems in which one or more departments are pre-assigned to fixed locations. In this example, you will not use this row. Rows 3 through 8 are used for the flow matrix with all diagonal entries initialized by periods. The use of the period (.) in the spread sheet indicates that no data is needed for that cell. Since the flow matrix is not symmetric, all of the entries below the diagonal have also been initialized to 0.

Row 10 of the spread sheet is labeled "Distance" and contains the default labels for the six locations. If you prefer to use more meaningful labels for the locations or departments you may move the pointer to these cells and change them as appropriate. Rows 11 through 16 are reserved for the distance matrix. The diagonal as well as below diagonal elements of this matrix have been initialized with periods to indicate that no data is needed for these cells. Note that any data placed in these cells will not be used.

#### Entering the Flow Matrix

You are now ready to enter the flow and distance matrices. Move the pointer to cell C3 to enter the flow from department 1 to department 2. Enter 50 and press the

## SOLUTION METHOD

The solution methods available for solving the Location Analysis problem consist of (1) Random Assignments, (2) Pairwise Exchange, and (3) User Exchange. We now describe the underlying procedures in each of the above options.

### Random Assignments

The first approach, Random Assignments, consists of assigning the departments to locations at random, excluding departments having fixed locations or sites. If a problem has six departments to be assigned to six locations, first the six department numbers are ordered at random. In absence of forced assignments, the first department (in the sequence) is then assigned to the first location, the second department is assigned to the second location and so on. The assignment continues until all of the departments have been assigned. For example, consider a problem with four departments. Let 4, 2, 3, 1, be a random ordering of the numbers 1 through 4. These numbers are then used as department numbers and are assigned to locations. The resulting solution is

<u>Location</u>	<u>Department</u>
1	4
2	2
3	3
4	1

The next step is to compute the total transportation cost. This is done by adding the products of the flow between each department pair and their respective distance. When the requested number of trials are completed, the assignment with the lowest transportation cost is presented as the best solution.

### Pairwise Exchange

The second approach, Pairwise Exchange consists of starting with an initial assignment and trying to improve its aggregate transportation cost. The initial assignment is either entered by the user, generated at random, or obtained from a previous run. A trial of the pairwise exchange consists of selecting a department at random and comparing it with other departments (starting at 1 and continuing sequentially, skipping departments with fixed locations) for possible exchange. A trial ends as soon as an exchange is found which results in a decrease in the total transportation cost. Note, however, that a trial may end without the occurrence of any improvement (any exchange) in the aggregate value. In either case, the next trial begins by using the layout from the previous trial and examining it for a possible pairwise exchange. As with the random assignments, when the requested number

of trials are performed, the solution with the lowest transportation cost is presented as the best solution.

### User Exchange

This solution option consists of allowing the user to selectively perform pairwise exchanges of department pairs and observe the impact on the overall solution. The option involves asking the user to highlight a department to be selected for exchange. It then presents the list of locations, with the current location of the selected department marked by an "\*". The user then selects a new location for the selected department. If any of the two departments have fixed locations, the program will warn the user that one or both departments have fixed locations. Note that allowing the user to change the location of departments with fixed sites (in this option) has been intentional. The reason is that for certain situations the decision maker (or user) may wish to explore the possibility of moving a department with fixed site.

### Fixed Locations

In certain situations, it may be desirable and probably necessary to pre-assign one or more departments to fixed locations or sites. For example, in industrial applications, the shipping and receiving department is often placed at the entrance to the plant or department

The Location Analysis program provides for pre-assigning one or more department to fixed locations (or sites). This is done by entering the location numbers of departments with pre-assigned locations in row two (this row has been labeled "Fixed Site") of the spread-sheet data editor. The program will scan row two for non-zero entries and utilizes the information if present. Note that locations should be numbered sequentially starting with location 1. In the spread sheet editor's Distance Matrix section, the first location is considered location number 1.

During the solution process, any departments with pre-assigned locations are first assigned to their permanent sites and then the remaining departments are assigned as appropriate.

## EXAMPLE 1 - THE SIX DEPARTMENT PROBLEM

In this example you will use the Location Analysis program to solve the six-department location problem presented earlier. Load DSSPOM into the computer and select the Location Analysis program. The computer will pause for a few seconds and then display the Location Menu.



		TO					
	Location	1	2	3	4	5	6
FROM	1	0	55	75	195	175	120
	2	55	0	90	165	140	140
	3	75	90	0	130	115	105
	4	195	165	130	0	70	220
	5	175	140	115	70	0	145
	6	120	140	105	220	145	0

Table 7-1: Costs or Distances Between the Six Locations

		TO					
	Facilities	A	B	C	D	E	F
FROM	A	0	50	30	65	15	90
	B	60	0	25	70	75	80
	C	30	35	0	60	5	85
	D	65	90	60	0	40	35
	E	75	95	15	40	0	10
	F	90	90	85	35	10	0

Table 7-2: Product Flow Between the Six Facilities

Movement Between Facility and Location	Product Flow	Cost or Distance	Flow X Cost
B1 - A2	60	55	3300
B1 - C3	25	75	1875
B1 - D4	70	195	13650
B1 - E6	75	120	9000
B1 - F5	80	175	14000
A2 - B1	50	55	2750
A2 - C3	30	90	2700
A2 - D4	65	165	10725
A2 - E6	15	140	2100
A2 - F5	90	140	12600
C3 - A2	30	90	2700
C3 - B1	35	75	2625
C3 - D4	60	130	7800
C3 - E6	5	105	525
C3 - F5	85	115	9775
D4 - A2	65	165	10725
D4 - B1	90	195	17550
D4 - C3	60	130	7800
D4 - E6	40	220	8800
D4 - F5	35	70	2450
F5 - A2	90	140	12600
F5 - B1	90	175	15750
F5 - C3	85	115	9775
F5 - D4	35	70	2450
F5 - E6	10	145	1450
E6 - A2	75	140	10500
E6 - B1	95	120	11400
E6 - C3	15	105	1575
E6 - D4	40	220	8800
E6 - F5	10	145	1450
Total Flow Times Cost			219200

Table 7-3: Flow-Cost Calculation for Configuration 1

## CHAPTER 7

### LOCATIONAL LAYOUT ANALYSIS

#### INTRODUCTION

The locational layout analysis program assigns or locates departments, facilities or plants to certain locations such that the transportation cost between the several departments, facilities or plants is minimized. Up to thirty facilities and locations can be accommodated in the program.

This concept is based illustrated by a simple example. Suppose there are six facilities and six locations. We can locate each facility therefore in six different locations, but the number of different configurations is much larger. As the number of facilities and locations increases so does the size of the problem.

Two alternative configurations are shown in Figure 7-1. Note that the locations as indicated by the numbers 1 to 6 are fixed. However, the departments, facilities or plants can be moved to any one of the six locations.

Between each location is a given or known distance or cost per unit moved or transported. These costs can be summarized in a cost matrix as shown in Table 7-1. The locations shown are not necessarily located to scale. Also, the distance between locations 1 and 2 is assumed to be the same as between locations 2 and 1. Hence, the upper triangular part of the matrix is a mirror image of the bottom triangular part of the matrix. This type of a distance matrix is called "symmetric." This is, however, not always true and actual distances between locations should be used.

The next piece of information that is required is the volume of material flow between the departments, facilities or plants. This volume of material flow can be measured in tons of material, truck loads of products, gallons of oil or by whatever measure is common in the respective industry. We shall assume that it is measured in tons of product per day. The product flow can then be summarized in the flow matrix shown in Table 7-2. Note that the flow is measured between facilities or departments and the matrix is not symmetric.

For any configuration of facilities onto the locations we can now develop a single cost value by multiplying the distances or costs between locations with the product flow between the facilities assigned to the respective locations. For instance, for configuration 1 on the above figure we find that the total transportation cost amounts to \$219200 as calculated in Table 7-3. We can, of course, repeat the same calculation for any other configuration.

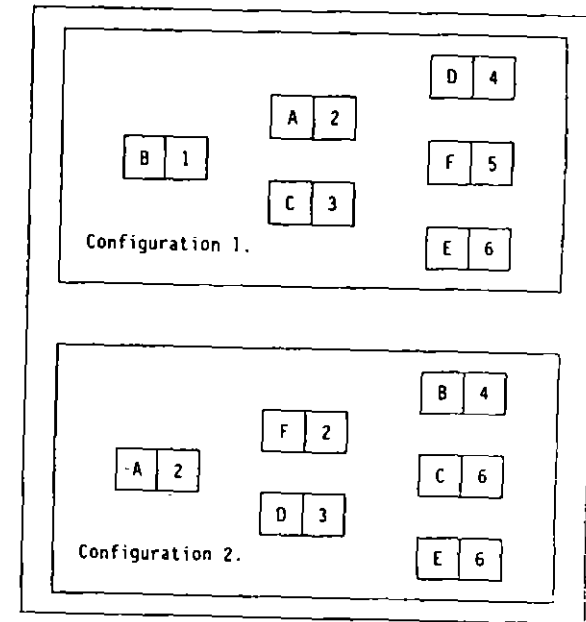


Figure 7-1: Two Facility Configurations

Note: Numbers 1 to 6 indicate locations; letters A to F indicate facilities.

16. The Knicknak Company produces 3 types of statues at 3 different plants. The time required to produce one statue, regardless of type, and the costs at each plant are shown below. Each week 100 statues of each type must be produced. Each plant is open 40 hours a week.

Formulate and solve a balanced transportation problem to minimize the cost of Knicknak's requirements.

	COST			Time (min)
	Statue 1	Statue 2	Statue 3	
Plant 1	\$20	\$15	\$9	30
Plant 2	\$16	\$10	\$10	20
Plant 3	\$14	\$7	\$7	12

17. There are 3 school districts in the town of Mexicana, a large town on the California - Mexico border. The number of whites and Mexicans in each school district are shown below. The town would like to balance the schools racially in order to provide the best possible education for all of the students. Each school must have 300 students and an equal number of Mexicans at each school. The distance between school districts is shown below.

Formulate and solve a balanced transportation problem to minimize the distance that students must be bussed. Assume that if the student attends school in his own district, there is no bussing.

	STUDENTS		DISTANCE TO (MILES)	
	American	Mexican	District 1	District 2
District 1	95	150	-	-
District 2	150	105	5	-
District 3	250	150	3	7

18. Textco Corporation is trying to determine how many books to manufacture over the summer to meet the demand for the Fall start of classes. Assume students can begin purchasing text books in May. They can purchase books throughout the summer (June, July, August), but all students must have their books by September 1. Textco has an initial inventory of 100 books. Because it takes time to set-up manufacturing and train workers, only 100 books can be produced in May. As efficiency improves and more skilled labor is added, Textco can increase production by 10% per month (assume integers). These production levels are met by running the plant at full capacity. Therefore, no overtime can occur. However, Textco may subcontract some books to another manufacturer for \$5, place their own label on them for \$2, and sell them to the students. The number of books that Textco can subcontract for resale is limited to 30 a month. The books may be backlogged, but a fee of \$3 per book per month is incurred. Conversely, if there are books left over at the end of the month, the holding cost is \$2 per book per month. The demand is as follows: May 200, June 100, July 100, and August 250. Each book Textco manufactures incurs a cost of \$4.50.

Formulate and solve a balanced transportation problem to minimize Textco's costs. State your answer in sentence form.

### 15. CORDOBA FOODS

Cordoba Foods is a national producer and marketer of packaged dried foods which it sells nationally under the Cordoba brand name. Cordoba operates three plants from which it ships to regional warehouses or directly to warehouse depots of large customers. Demand for Cordoba products amounted to 48,000,000 pounds in 1990, distributed over six sales regions.

Sales Region	Demand in Million of Pounds
New York	7
Atlanta	4
Chicago	14
Denver	7
Los Angeles	12
Seattle	4
<b>Total Demand</b>	<b>48</b>

Each of the six regional warehouses were under direct supervision of a regional sales manager. Transfer prices were \$0.40 per pound from each plant but regional managers had to pay for shipping from the supplying plant to their respective warehouses. A schedule of shipping rates (in cents) and plant capacities are shown below.

Shipping Costs in Center per Pound and Plant Capacities - Cordoba

Warehouse	Boston Plant	Des Moines Plant	Dallas Plant
New York	12	26	25
Atlanta	17	20	16
Chicago	15	10	21
Denver	22	14	11
Los Angeles	34	30	18
Seattle	32	25	24
<b>Plant Capacity in Millions of Pounds</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>19</b>

Since each plant had a limited production capacity and regional managers attempted to obtain their supplies at the lowest transportation cost, there were frequent conflicts between regional managers and plant managers about shipping schedules. As a result, considerable dissatisfaction resulted and some regional managers felt their region's profits were adversely affected by the haphazard shipping schedules.

Suppose you are called in as a consultant to analyze the complaints and, if possible, to arrive at a minimum cost shipping schedule. How would you go about it? How much could Cordoba Foods save by utilizing the optimal schedule? Which regional managers would be satisfied with the new schedule if the current schedule is as shown below? How could you overcome the regional managers' resistance to the new schedule?

Current Shipping Schedule in Millions of Pounds - Cordoba

Warehouse	Boston Plant	Des Moines Plant	Dallas Plant
New York	7		
Atlanta			4
Chicago	9	5	
Denver		7	
Los Angeles			12
Seattle		4	
<b>Excess Capacity</b>		<b>1</b>	<b>3</b>
<b>Total Capacity</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>19</b>

9. Determine the optimum shipping plan for the transportation matrix below.

		Warehouse					Plant Capacities
		1	2	3	4	5	
Plants	1	20	22	26	18	11	500
	2	33	17	14	21	9	100
	3	10	16	23	20	16	200
	4	16	14	13	18	18	300
	5	14	12	18	21	26	150
	6	17	9	17	11	19	250
Warehouse Requirements		150	150	300	400	500	1500

10. Suppose a new warehouse is added to problem 9 with requirements of 200 units. The unit shipping costs from the plants to the new warehouse are 9, 15, 17, 22, 19 and 11, respectively. What is the optimum cost solution?

11. Solve the following aggregate production planning problem using the transportation model. Assume that backorders are not allowed.

	Period (Month)		
	1	2	3
Demand	550	600	750
Capacity			
Regular	450	450	450
Overtime	75	85	50
Subcontract	120	90	100
Beginning inventory	100		
Costs			
Regular time	\$20 per unit		
Overtime	\$25 per unit		
Subcontract	\$30 per unit		
Inventory holding	\$2.00 per unit per month		

12. Solve problem 11, assuming that backorders are permitted at a cost of \$5 per unit per month.

13. Solve problem 11, assuming that there is no initial inventory but the regular time production capacity of the first period is 500 units.

14. Solve problem 11, assuming that the regular time production capacity for the first period is 550 and you will need an ending inventory of 75 units. Note that an ending inventory is not unused capacity but units that are produced and carried to the next planning horizon.

**PROBLEMS**

1. Find the minimum cost solution for the transportation problem shown below.

		Warehouse						Plant Capacities
		1	2	3	4	5	6	
Plants	1	14	24	18	28	22	19	450
	2	17	18	25	16	23	21	250
	3	30	16	22	30	25	18	500
Warehouse Requirements		350	250	150	175	200	75	

2. Suppose a new plant is added to problem 1 with a capacity of 300 units. The unit shipping costs from the new plant to warehouses 1, 2, 3, 4, 5, and 6 amount to \$25, \$14, \$17, \$24, \$19, and \$16, respectively. What is the minimum cost solution?

3. Suppose two new warehouses are added to problem 1 with requirements of 75 and 125 units, respectively. The unit shipping costs from the plants to the first new warehouse amount to \$25, \$29, and \$15, respectively, and to the other warehouse the shipping costs amount to \$27, \$19, and \$23, respectively. What is the minimum cost solution?

4. Find the minimum cost solution for the transportation problem below.

		Warehouse					Plant Capacities
		1	2	3	4	5	
Plants	1	9	8	6	8	12	860
	2	12	7	11	9	13	350
	3	11	1	14	3	5	420
	4	13	10	8	15	4	280
Warehouse Requirements		180	350	400	470	250	

5. Suppose a new plant, plant 5, is added to problem 4 with capacity of 380 units and shipping costs of 3, 9, 8, 4 and 2 to warehouses 1, 2, 3, 4 and 5, respectively. Find minimum cost solution.

6. Suppose a new warehouse is added to problem 5 with requirements of 160 units and shipping costs of 4, 9, 12, 8 and 4 to plants 1, 2, 3, 4 and 5, respectively. Find the minimum cost solution.

7. Find the minimum cost solution for the following transportation problem.

		Destinations							Source Capacities
		1	2	3	4	5	6	7	
Sources	1	5	6	5	10	9	7	11	350
	2	11	3	7	4	11	10	15	270
	3	10	12	9	8	13	11	20	400
	4	7	15	11	9	10	13	22	330
	5	9	8	13	6	7	9	16	150
	6	8	9	15	10	12	7	14	350
Requirements		250	200	200	150	400	300	350	1850

8. Suppose a new source 7 is added to problem 7 with capacity of 200 units and shipping costs of 10, 9, 8, 11, 6, 7 and 13 to destinations 1, 2, 3, 4, 5, 6 and 7, respectively. Find the minimum cost solution.

As seen from the display screen, the three destinations, representing the three periods have been labeled P-1, P-2, and P-3, respectively. The source corresponding to the initial inventory has been labeled BI and the three production sources in the first period have been labeled RT-1 (for regular time), OT-1 (for overtime) and SB-1 (for sub-contracting). The labels for the other six sources are analogous. The demands are set at 500, 650, and 700 for periods one, two, and three, respectively. The supply of the first source is 100 units corresponding to the initial inventory. The supplies for the other sources are the available capacities. Note that for the cells corresponding to backlogs, a shipping cost of \$1000 per unit is used to prevent allocation of real supplies to these cells.

You are now ready to proceed with solving the problem. Select the SOLVE option and pull the pointer down to the Display Output sub-option. Press the < ENTER > key to solve the problem and display the results on the screen. In this problem the total demand is less than the total supplies. The program will display a message informing you that a "Dummy" column will be added with shipping costs equal to zero and demand equal to the extra supply amount as shown below.

As seen from the above results, the 500 units demand of the first period is satisfied from the initial inventory of 100 units (source BI to dest. P-1) and 400 units regular time production during the first period (source RT-1 to dest. P-1). The 650 units demand of the second period is satisfied from 50 units of regular time production in period 1 (source RT-1 to dest. P-2), 50 units of overtime in period 1 (source OT-1 to P-2), 50 units of sub-contracting in period 1 (source SB-1 to dest. P-2), 450 units of regular time in period 2 (source RT-2 to dest. P-2), and 50 units of overtime in period 2 (source OT-2 to dest. P-2). The 700 units demand in period 3 is satisfied from 100 units of sub-contracting in period 2 (source SB-2 to dest. P-3), 450 units of regular time production in period 3 (source RT-3 to dest. P-3), 50 units of overtime production in period 3 (source OT-3 to dest. P-3), and 100 units of sub-contracting in period 3 (source SB-3 to dest. P-3). The extra unused capacity is 50 units (total capacity minus total demand) which in this case corresponds to the remaining 50 units of sub-contracting in period 1 (source SB-1 to dest. WH-4 which is dummy). The total cost of optimal production plan is \$57,875.

Total demand is less than total supply, a dummy column will be added with shipping costs equal to 0.

Problem Title: PRODUCTION PLANNING  
Optimal Solution: Total Shipping Cost = 57875.00

Ship	100.00 units from source BI	to dest. P-1
Ship	400.00 units from source RT-1	to dest. P-1
Ship	50.00 units from source RT-1	to dest. P-2
Ship	50.00 units from source OT-1	to dest. P-2
Ship	50.00 units from source SB-1	to dest. P-2
Ship	450.00 units from source RT-2	to dest. P-2
Ship	50.00 units from source OT-2	to dest. P-2
Ship	0.00 units from source OT-2	to dest. P-3
Ship	100.00 units from source SB-2	to dest. P-3
Ship	450.00 units from source RT-3	to dest. P-3
Ship	50.00 units from source OT-3	to dest. P-3
Ship	100.00 units from source SB-3	to dest. P-3
Ship	50.00 units from source SB-1	to dest. WH-4

Once all of the data has been entered, press <F10> to exit the spread sheet data entry mode and keep the data.

You may now continue and obtain a hard copy printout of the input data by moving the pointer to the print option and press <ENTER>. Be sure that your printer is "ON" and ready before continuing at this point. The program will display this message and ask you to verify the status of the printer. Examine the printout of the data carefully and make sure the input data is correct. If the data contains any errors, move the pointer to the EDIT option and select the sub-option "Input Data". Correct the input data if necessary and proceed to solve the problem as described below.

To solve the problem, move the pointer to the SOLVE option and select the sub-option Display Output, and press <ENTER>. The program will continue and solve the problem using the transportation simplex method. It will then report the optimal solution as shown below.

```

                Problem Title: BALANCED PROBLEM
    Optimal Solution: Total Shipping Cost =    5130.00

    Ship    115.00 units from source PLANT-3 to dest. WH-1
    Ship    100.00 units from source PLANT-3 to dest. WH-2
    Ship     10.00 units from source PLANT-2 to dest. WH-1
    Ship    175.00 units from source PLANT-1 to dest. WH-4
    Ship     75.00 units from source PLANT-2 to dest. WH-3
    Ship      0.00 units from source PLANT-2 to dest. WH-4
  
```

As seen from the above output report, the optimal solution has a total shipping cost of \$5,130.00. The solution consists of shipping 115 units from plant 3 to warehouse 1, 100 units from plant 3 to warehouse 2, 10 units from plant 2 to warehouse 1, 175 units from plant 1 to warehouse 4, 75 units from plant 2 to warehouse 3, and nothing (zero units) from plant 2 to warehouse 4.

## EXAMPLE 2 - PRODUCTION PLANNING PROBLEM

In this example, you will solve the aggregate production planning problem presented earlier in this chapter. The data for this example is shown in Table 5-7. To enter the problem data, select the INPUT option and proceed as requested. The number of sources for this problem is 10, including the nine production sources and one source for the initial inventory. The number of destinations is three, corresponding to the three production periods. The initial data entry screen is shown below.

```

    Problem title: PRODUCTION PLANNING

    Number of sources: 10

    Number of destinations: 3

    Continue with the cost and requirements table (Y/N) Y
  
```

Press <Y> to continue with spread sheet data entry of the cost and requirements table. The completed spread sheet screen is shown below.

A1	A	B	C	D	E
1		P-1	P-2	P-3	Supply
2	BI	0.00	0.50	1.00	100.0
3	RT-1	30.00	30.50	31.00	450.0
4	OT-1	40.00	40.50	41.00	50.0
5	SB-1	45.00	45.50	46.00	100.0
6	RT-2	1000.00	30.00	30.50	450.0
7	OT-2	1000.00	40.00	40.50	50.0
8	SB-2	1000.00	45.00	45.50	100.0
9	RT-3	1000.00	1000.00	30.00	450.0
10	OT-3	1000.00	1000.00	40.00	50.0
11	SB-3	1000.00	1000.00	45.00	100.0
12	Demand	500.0	650.0	700.0	



Using the approach, the transportation model for our numerical example is presented in Table 5-7. As we will show, we can solve this problem using the transportation program.

Period	Beginning inventory	Period 1	Period 2	Period 3	Capacity
		0	.5	1.0	
1	Reg. time	30	30.5	31.0	450
	Overtime	40	40.5	41.0	50
	Subcont.	45	45.5	46.0	100
2	Reg. time	M	30	30.5	450
	Overtime	M	40	40.5	50
	Subcont.	M	45	45.5	100
3	Reg. time	M	M	30	450
	Overtime	M	M	40	50
	Subcont.	M	M	45	100
	Demand	500	650	700	

Table 5-7 Transportation Model for the Numerical Example

### EXAMPLE 1 - BALANCED TRANSPORTATION PROBLEM

This example involves solving the balanced transportation problem presented in Table 5-3. To solve the problem, select the Transportation Method from the Main Menu. The computer will then load the transportation method and display the Transportation Menu. Move the pointer to the INPUT option and press the <ENTER> key. Use "BALANCED PROBLEM" for the title. The problem has 3 sources and 4 destinations. The initial data entry screen for this problem is shown below.

```

Problem title: BALANCED PROBLEM
Number of sources: 3
Number of destinations: 4

Continue with the cost and requirements table (Y/N) Y
  
```

Press <Y> to continue with the spread sheet data entry process to enter the cost and requirements table. The initial spread sheet for this problem will have three sources labeled SOR1, SOR2, and SOR3, and four destinations labeled as DTN1, DTN2, DTN3, and DTN4. You may keep the default labels for the sources and destinations or change them to more meaningful labels (such as BFLO, NYC, ATHENS, etc.). To change the labels, move the pointer to cell A2 and type "PLANT-1." Press the down arrow key to move to cell A3 and type "PLANT-2." Repeat this process for the other source and destinations to change their labels to "PLANT-3" for source 3 and WH-1, WH-2, WH-3, and WH-4 for destinations one to four, respectively. The completed spread sheet data entry screen is displayed below

A1	A	B	C	D	E	F
1		WH-1	WH-2	WH-3	WH-4	Supply
2	PLANT-1	14.00	21.00	8.00	7.00	175.0
3	PLANT-2	21.00	19.00	15.00	16.00	85.0
4	PLANT-3	18.00	5.00	17.00	23.00	215.0
5	Demand	125.0	100.0	75.0	175.0	

## APPLICATION TO THE PRODUCTION PLANNING PROBLEM

The transportation model can be used to solve aggregate production planning problems. The aggregate planning problem involves the development of a production schedule, over a fixed number of time periods, to satisfy occasional demands called "lumpy" demands. The production amount in each period is subject to limitations of available production capacity. The production capacity may consist of regular time capacity, overtime capacity, and subcontracting. In addition, excess production in one period may be carried forward as inventory to satisfy the demand of a later period. Consider the numerical example presented in Table 5-5. The problem is to determine the production schedule to satisfy the demands of 500, 650, and 700 for months 1, 2, and 3, respectively. The general formulation of the aggregate planning problem as a transportation model is shown in Table 5-6.

	Period (Month)		
	1	2	3
Demand	500	650	700 *
Capacity			
Regular	450	450	450
Overtime	50	50	50
Subcontract	100	100	100
Beginning inventory	100		
Costs			
Regular time	\$30 per unit		
Overtime	\$40 per unit		
Subcontract	\$45 per unit		
Inventory holding	\$0.50 per unit per month		

Table 5-5: Aggregate Production Planning Example

\* No backorder is allowed

Period	Beginning inventory	Period 1	Period 2	Period 3	...	Ending invent.	Capacity
		0	h	2h	...	nh	I
1	Reg. time	p	p+h	p+2h	...	p+nh	R <sub>1</sub>
	Overtime	q	q+h	q+2h	...	q+nh	O <sub>1</sub>
	Subcont.	s	s+h	s+2h	...	s+nh	S <sub>1</sub>
2	Reg. time	M	p	p+h	...	p+(n-1)h	R <sub>2</sub>
	Overtime	M	q	q+h	...	q+(n-1)h	O <sub>2</sub>
	Subcont.	M	s	s+h	...	s+(n-1)h	S <sub>2</sub>
3	Reg. time	M	M	p	...	p+(n-2)h	R <sub>3</sub>
	Overtime	M	M	q	...	q+(n-2)h	O <sub>3</sub>
	Subcont.	M	M	s	...	s+(n-2)h	S <sub>3</sub>
Demand		D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	...	E	

Table 5-6: Transportation Model for Aggregate Planning Problem\*

\*Legend: I = initial inventory    n = number of periods  
 p = regular time production cost per unit  
 q = overtime production cost per unit  
 s = subcontracting cost per unit  
 h = holding cost per unit per period  
 R<sub>i</sub> = regular time capacity for period i  
 O<sub>i</sub> = overtime capacity for period i  
 S<sub>i</sub> = subcontracting capacity for period i  
 D<sub>i</sub> = demand in period i  
 E = required ending inventory  
 M = a large positive number used to avoid backorders

to use 4. Similarly, plant 2 ships 10 units per month to warehouse 1 and 75 units to warehouse 2. Finally, plant 3 ships 115 units per month to warehouse 1 and 100 units to warehouse 2. The total cost per month of the above arrangement will amount to  $75(8) + 100(7) + 10(21) + 75(16) + 115(18) + 100(5) = \$5280$ . Whether this solution is the lowest cost solution we do not know. With the computer solution method we will be assured that we will arrive at the lowest cost solution.

		Warehouses (Destinations)			
		1	2	3	4
Plants (Sources)	1	14	21	8	7
	2	21	19	15	16
	3	18	5	17	23

Table 5-1: Unit Transportation or Distribution Cost Matrix

Note: The cell entries are the transportation or distribution costs per unit.

Plants (Sources)	Plant Supply Capacities (Units/Month)	Warehouses (Destinations)	Warehouse Demands (Units/Month)
1	175	1	125
2	85	2	100
3	215	3	75
		4	175
Total	475	Total	475

Table 5-2: Plant Capacities and Warehouse Requirements

		Warehouses (Destinations)				Supplies
		1	2	3	4	
Plants (Sources)	1	14	21	8	7	175
	2	21	19	15	16	85
	3	18	5	17	23	215
Warehouse Demands		125	100	75	175	475

Table 5-3: Transportation Method Cost Matrix

		Warehouses (Destinations)				Supplies	
		1	2	3	4		
Plants (Sources)	1	14	21	75	8	100	175
	2	21	19	15	16	75	85
	3	18	5	17	23	115	215
Warehouse Demands		125	100	75	175	475	

Table 5-4: Solution to Transportation Problem

Note: The entries in the lower parts of the cells are the transportation or distribution allocations.

The transportation problem can also be formulated as a linear programming problem and solved by using the linear programming solution method. However, it is more efficient and easier to solve this type of problem with the transportation solution method.

TRANSPORTATION METHOD

14. U.S.A. Lemonade Company sells bags of lemons and cartons of lemonade. U.S.A. Lemonade grades the lemons on a scale of 1 (poor) to 10 (excellent). Currently, U.S.A. Lemonade has 50,000 pounds of grade 8 lemons and 50,000 pounds of grade 5 lemons. The average quality of lemons sold by the bag must be 6 and an average grade of 7 must be in the lemonade. Each pound of lemons sold in juice form yields \$1.90 in revenue and incurs costs of \$0.80. Likewise, each pound of lemons sold by the bag yields \$1.05 in revenue and incurs costs of \$0.45.

Formulate and solve an LP to maximize U.S.A. Lemonade's profits.

15. A grocery store requires a different number of full time workers depending on the day of the week. The number of full time workers needed each day is shown below. Store practice is that each full time employee works 5 consecutive days and has 2 days off each week. For example, a full time employee working Monday through Friday receives Saturday and Sunday off.

Formulate and solve an LP that minimizes the number of full time workers needed, while meeting the staffing requirements (fractional number of workers are allowed).

	NUMBER OF WORKERS
Day 1 - Monday	15
Day 2 - Tuesday	13
Day 3 - Wednesday	13
Day 4 - Thursday	15
Day 5 - Friday	19
Day 6 - Saturday	14
Day 7 - Sunday	9

INTRODUCTION

The transportation method or distribution method is a technique which provides an optimal allocation of inventories from multiple sources, such as supplier plants, to multiple destinations, such as distribution warehouses. The measure of effectiveness used is usually the cost of transportation which is therefore minimized. However, in certain formulations, the problem may be stated so that the measure of effectiveness is profit or utility. In that case, the measure of effectiveness, profit or utility, is maximized.

This can best be illustrated with an example. Suppose we have four distribution warehouses and three supplier plants. The distribution or transportation costs between each of the three supplier plants (sources) and the four distribution warehouses (destinations) can be readily estimated. Suppose the transportation or distribution costs are as shown in Table 5-1. For example, note that the cost to move one unit of inventory from plant 2 to warehouse 3 amounts to \$15.

In Table 5-2 we provide a listing of the plant supply capacities in units per month and the warehouse demands in units per month. Note that the plant supply capacities and warehouse demands are exactly equal. This is a rather unusual situation and in most cases the two will not be equal. When the two are not equal we add a "dummy" plant or a "dummy" warehouse. For the "dummy" plant or "dummy" warehouse we then insert transportation costs of \$0. Before we explore this alternative let us first set up the above problem.

The transportation cost data and the plant supply capacity and warehouse demands data are combined in Table 5-3. Note that the warehouse demands are shown at the bottom margin of the matrix. The plant supply capacities are shown in the right-hand margin of the matrix. The transportation cost values are shown in each respective matrix cell. Each cell intersects with one plant (source) and one warehouse (destination).

The goal of the transportation method is to find the lowest cost transportation arrangement between plants and warehouses. The computer program is designed to achieve this objective.

Suppose we have a solution to the above problem as shown in Table 5-4. Note that the cost of that solution can be determined by multiplying the units shipped between plants (sources) and warehouses (destinations) by the respective transportation costs. The above allocation solution directs that plant 1 ship 75 units per month to warehouse 3 and 100 units

Direct transfer prices, and contributions to overhead and profits

Item	Product A	Product B	Product C
Subcontract cost	\$0.65	\$0.80	-
Cost of Machining	0.25	0.15	\$0.35
Cost of assembly and packaging	0.40	0.25	0.25
Cost of casting (in house)	0.20	0.25	0.30
Price	2.25	2.35	2.35

Solve the problem. Give economic interpretations for all of the shadow prices. Give a detailed explanation for the right hand side ranges (reported in the sensitivity analysis).

11. Grabo Company has two plants that produce white wine and red wine. Because of the different process required and a different set-up at each plant, there are differences in the yields and costs of producing each wine. Each plant has 100,000 pounds of grapes available. A minimum of 400 bottles of white wine and 600 bottles of red wine must be produced. The yields and costs are shown in the table below.

Formulate and solve an LP to minimize Grabo's costs.

	PLANT 1	PLANT 2
Grapes/bottle red wine	80 lbs.	100 lbs.
Cost/bottle red wine	\$10	\$8
Grapes/bottle white wine	50 lbs.	70 lbs.
Cost/bottle white wine	\$8	\$7

12. Streetsmart Investment Company must determine its investment strategy for the next three years. Streetsmart has four investments to choose from -- A, B, C, and D. In year 1, there is \$40,000 available to invest. In year 2, there will be \$20,000 to invest and in year 3 there will be \$10,000. The cash outflows and NPV of each investment are shown in the table below.

Formulate and solve the LP to maximize Streetsmart's profits. \*Assume fractional investments can be made.

	INVESTMENTS (\$000)			
	A	B	C	D
Year 1 Outflow	10.0	50.0	7.0	15.0
Year 2 Outflow	3.5	8.0	6.5	18.0
Year 3 Outflow	15.0	7.0	4.0	13.0
NPV	18.0	24.0	10.0	15.0

13. BBB Deodorant Company manufactures two types of deodorant--scented and unscented. These two deodorants are produced by blending 2 raw materials together in varying proportions. The scented deodorant must contain at least 60% raw material A, and the unscented deodorant must contain at least 50% raw material A. The scented deodorant sells for \$3/oz and the unscented deodorant sells for \$2/oz. Raw materials A and B can be processed in one of two ways. Running process 1 for one hour requires 4 ounces of chemicals and 3 hours of labor, and yields 4 ounces of each raw material. Running process 2 for one hour requires 3 ounces of chemicals and 4 hours of labor, and yields 3 ounces of raw material A and 1 ounce of raw material B. A total of 140 hours of labor and 112 ounces of chemicals are available.

Formulate and solve an LP that will maximize profits for BBB Deodorant Company.

- b - Add the constraint  $X_2 < 2000$  and solve the problem. How has the optimal objective value changed? Why?
- c - Delete the added constraint (in Part b) and variable  $X_2$  and solve the problem. How has the optimal objective value changed? Why?

7. Consider the following linear programming problem:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } C &= 5X_1 + 14X_2 + 20X_3 \\ \text{subject to } &3X_1 + X_2 \geq 16 \\ &X_1 + X_2 + X_3 \geq 24 \\ &X_1 \leq 10 \\ &X_1 \geq 0 \quad X_2 \geq 0 \quad X_3 \geq 0 \end{aligned}$$

- a - Solve the problem.
  - b - Assume that  $X_3$  is unrestricted in sign, make the appropriate changes to the problem and solve (Hint:  $X_3$  must be replaced by the difference between two nonnegative variables). What has happened to the optimal solution? Why?
  - c - Add the constraint  $X_2 \leq 50$  to the problem in Part b and solve. Compare the new problem to that obtained in Part a. What is the value of  $X_3$ ?
8. Two products, A and B, during the manufacturing process must pass through four machine operations I, II, III and IV. The machine times (in hours per unit produced) and machine time availabilities are listed below.

	I	II	III	IV
Product A	2	4	3	1
Product B	1/4	2	1	4
Total Machine Time Available	45	100	300	50

Product A sells for \$6 per unit and Product B sells for \$4 per unit. What combination of A and B should be manufactured in order to maximize profits? Suppose 22 units of A are required as a minimum.

9. Superior Steel has 10,000 tons of ore  $B_1$ , 30,000 tons of ore  $B_2$ , and 9,000 tons of ore  $B_3$ . Four steel products can be extracted from the three ores:
- Product  $x_1$  requires 3 tons of  $B_1$ , 8 tons of  $B_2$ , and 2 tons of  $B_3$ .
  - Product  $x_2$  requires 4 tons of  $B_1$ , 2 tons of  $B_2$  and 1 ton of  $B_3$ .
  - Product  $x_3$  produces 1 ton of  $B_1$ , but requires 5 tons of  $B_2$ , and 1 ton of  $B_3$ .
  - Product  $x_4$  requires 2 tons of  $B_1$ , and produces 1 ton of  $B_2$  and 3 tons of  $B_3$ .

Profits are: \$2 per ton on product  $x_1$ ,  
 \$3 per ton on product  $x_2$ , and  
 \$1 per ton on product  $x_4$ .

Product  $x_3$  has to be disposed of and the cost of disposal is \$1 per ton.

Formulate the above problem as a linear programming problem and solve.

### 10. INTERNATIONAL MOTORS

The Machine Shop Division of International Motors was faced with the problem of having to decide whether to machine several products themselves or to subcontract. The products were to be used by the assembly division. The machine shop would be credited with a specified transfer price and management was anxious to supply the product or products in the quantities that would be most profitable.

Each of the products required casting, machining, and assembly and packaging. Casting operations for products A and B could be subcontracted, but the castings for product C required special equipment which precluded the use of subcontractors. Direct costs of the three operations, the transfer of prices for the products, and the respective contributions to overhead and profits are shown below.

Each unit of product A required nine minutes of casting time, nine minutes of machining time, and five minutes for assembly and packaging. For product B, the times were fifteen minutes, five minutes, and three minutes, respectively. A unit of product C took twelve minutes for casting, twelve minutes for machining, and three minutes for assembly and packaging.

The Machine Shop Division had capacities of 12,000 minutes of casting time, 18,000 minutes of machining time, and 15,000 minutes of assembly and packaging time per week.

## PROBLEMS

For each of the following two problems:

- Solve the problem,
- identify the objective function value at optimum,
- identify the values of the decision and slack variables at optimum, and
- identify the shadow prices and reduced costs.

1. Maximize  $P = X_1 + 5X_2$

subject to  $5X_1 + 6X_2 \leq 30$   
 $3X_1 + 2X_2 \leq 12$   
 $X_1 \geq 0 \quad X_2 \geq 0$

2. Minimize  $C = 3X_1 + 4X_2$

subject to  $X_1 + X_2 \geq 6$   
 $2X_1 + 4X_2 \geq 21$   
 $X_1 \geq 0 \quad X_2 \geq 0$

For each of the following two problems:

- Solve the problem,
- identify which variables are Basic/Nonbasic,
- identify the range of objective function coefficients for which each variable remains Basic, and
- identify the range of right-hand side values for each row such that the current solution remains optimal.

3. Maximize  $P = 50X_1 + 60X_2 + 120X_3$

subject to  $2X_1 + 4X_2 + 6X_3 \leq 160$   
 $3X_1 + 2X_2 + 4X_3 \leq 120$   
 $X_1 \geq 0 \quad X_2 \geq 0 \quad X_3 \geq 0$

4. Maximize  $P = 32X_1 + 15X_2 + 12X_3$

subject to  $1X_1 + 2X_2 + 3X_3 \leq 10$   
 $2X_1 + 1X_2 + 2X_3 \leq 15$   
 $X_1 \geq 0 \quad X_2 \geq 0 \quad X_3 \geq 0$

5. Consider the following linear programming problem:

Maximize  $R = 6X_1 + 4X_2$

subject to  $8X_1 + X_2 \leq 180$   
 $2X_1 + X_2 \leq 50$   
 $3X_1 + X_2 \leq 300$   
 $X_1 + 4X_2 \leq 50$   
 $X_1 \geq 0 \quad X_2 \geq 0$

- Solve the problem and identify the optimal solution,
- determine which of the four constraints are satisfied as equality (binding),
- determine the value of the objective function if the second right-hand side is changed from 50 to 53, and
- determine the value of the objective function if the objective coefficient of  $X_1$  is changed from 6 to 9.

6. Consider the following linear programming problem:

Maximize  $R = 2X_1 + 3X_2 - 1X_3 + 1X_4$

subject to  $3X_1 + 4X_2 - X_3 + 2X_4 \leq 10000$   
 $8X_1 + 1X_2 - 5X_3 - X_4 \leq 3000$   
 $2X_1 + X_2 + X_3 - 3X_4 \leq 9000$   
 $X_1 \geq 0 \quad X_2 \geq 0 \quad X_3 \geq 0 \quad X_4 \geq 0$

- Solve the problem.

linear programming module will give the results as shown below (the data entry process has not been shown).

Warning: This problem is poorly scaled. The results may include round-off errors and not represent the actual solution to the problem.

Problem Title: SCALING EFFECTS			
***** Optimal Solution *****			
No. of iterations = 9		OBJECTIV = -176818.187	
Variable	Decision Variables Section Status	Value	Reduced Cost
Var1	Nonbasic	0.000	4.000
Var2	Basic	57272.729	0.000
Var3	Nonbasic	0.000	5.364
Var4	Basic	5000.000	0.000

Problem Title: SCALING EFFECTS			
***** Optimal Solution *****			
No. of iterations = 9		OBJECTIV = -170000.000	
Variable	Decision Variables Section Status	Value	Reduced Cost
Var1	Nonbasic	0.000	4.000
Var2	Basic	54999.999	0.000
Var3	Nonbasic	0.000	4.000
Var4	Basic	5000.000	0.000

Note that the round-off error, in the objective function value, due to inadequate scaling amounts to about 4.01% (6,818.187 in 170000). Further, the value of the decision variable X2 is off by 2,272.

In order to scale this problem properly, we multiply both sides of constraints 1 and 4 by 1000, divide both sides of constraints 9 by 100, and divide both sides of constraints 6 and 10 by 1000. The scaled problem is shown below.

$$\text{Min } Z = 4 X_1 - 3 X_2 + 6 X_3 - X_4$$

s. t.

$$\begin{array}{l} 1 ) \quad .1 X_1 + .1 X_2 < 10000 \\ 2 ) \quad \quad \quad \quad X_3 + X_4 < 20000 \\ 3 ) \quad X_1 + \quad \quad X_3 < 40000 \\ 4 ) \quad \quad .1 X_2 + \quad .1 X_4 < 6000 \\ 5 ) \quad X_1 - 10 X_2 < 0 \\ 6 ) \quad \quad \quad 6 X_3 - 5 X_4 < 0 \\ 7 ) \quad 2 X_1 - 8 X_2 < 0 \\ 8 ) \quad \quad \quad 2 X_3 - 8 X_4 < 0 \\ 9 ) \quad .1 X_1 + .1 X_2 > 5000 \\ 10 ) \quad .1 X_3 + \quad .1 X_4 > 500 \end{array}$$

The ratio of the largest coefficient (in absolute value) to the smallest coefficient (among the constraint equations) is now 10/0.1 or 100. Solving this problem with the linear programming module will give the results as shown below.



(5 times: 10 times 2), from the previous value of 600. Furthermore, the status of the decision variables will not be changed ( $X_1$ ,  $X_2$  are basic and  $X_3$  is nonbasic) according to the sensitivity analysis.

Make the above changes to the original data by using the editor. Move the pointer to the EDIT option and select the first sub-option "Input Data". Press <ENTER> several times to accept the current values of the title, type of objective, number of constraints, and number of variables. Then press <Y> to continue with the spread sheet editor. Change the right-hand sides of the second and third constraints as stated above. The completed spread sheet is presented below.

	A	B	C	D	E	F
1	$X_1$	$X_2$	$X_3$			RHS Val.
2	PROFIT	8.00	-4.00	4.00		
3	Row1	3.00	1.00	1.00	<	360.00
4	Row2	1.00	-1.00	2.00	<	65.00
5	Row3	1.00	1.00	-1.00	<	130.00

After the change is made, press the <F10> key to return to the Linear Program Menu. Now move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option. Press <N> to bypass the intermediate solutions. The optimal solution is then displayed as shown below.

Problem Title: MAXIMIZING PROFIT			
***** Optimal Solution *****			
No. of iterations = 2		PROFIT =	650.000
Variable	Decision Variables Section Status	Value	Reduced Cost
$X_1$	Basic	97.500	0.000
$X_2$	Basic	32.500	0.000
$X_3$	Nonbasic	0.000	6.000

The optimum value of the objective function (PROFIT) is 650 with  $X_1 = 97.5$ ,  $X_2 = 32.5$ , and  $X_3 = 0$ . The value of Profit went up by 50 as explained by the shadow prices. Note that the value of  $X_3$  is still zero. You can only vary the right hand side values of constraints and explain the resulting increase in Profit using shadow prices so long as the status of the decision variables remains unaltered. Continued changes in resources available

will, at some point, change the status of the decision variables (e.g., becoming a basic variable) and the resulting optimum solution can no longer be explained by the shadow prices as given in the original solution.

### EXAMPLE 4 - SCALING LARGE NUMBERS TO REASONABLE SIZE

A digital computer such as IBM-PC performs arithmetic operations with limited accuracy. This accuracy is directly related to the word size of the computer. In most personal computers, real numbers can include up to five decimal places. Therefore, problems that are solved through many arithmetic operations can suffer from round-off errors which either generate an infeasible solution or at best a solution which is not accurate or incorrect.

For the above reason it is therefore necessary to scale large numbers in problem formulations down to smaller numbers. For instance a number such as 10,000 can be inserted in the formula as 10, which then means 10 units of 1000 each. Reducing large numbers in a problem formulation such as the one above is called scaling down. In scaling we redefine the amount of each constraint that is available. Hence, each constraint can be scaled back by varying amounts.

Scaling therefore refers to the relative magnitude of the numbers that comprise the problem data. An easy way to check the proper scaling of a linear programming problem is to determine the ratio of the largest number (in absolute value) to the smallest non-zero number (in absolute value) among all of the constraint coefficients. If this ratio is larger than say 10,000, then the computer solution may include round-off errors and produce the wrong solution. Such problems need proper scaling before they are entered into the computer. We illustrate this phenomenon through the following linear programming problem.

$$\text{Min } Z = 4 X_1 - 3 X_2 + 6 X_3 - X_4$$

$$\text{s.t.}$$

- 1 ) .0001  $X_1$  + .0001  $X_2$  < 10
- 2 )  $X_3$  +  $X_4$  < 20000
- 3 )  $X_1$  +  $X_3$  < 40000
- 4 ) .0001  $X_2$  + 0001  $X_4$  < 6
- 5 )  $X_1$  - 10  $X_2$  < 0
- 6 ) 6000  $X_3$  - 5000  $X_4$  < 0
- 7 ) 2  $X_1$  - 8  $X_2$  < 0
- 8 ) 2  $X_3$  - 8  $X_4$  < 0
- 9 ) 10  $X_1$  + 10  $X_2$  > 500000
- 10 ) 100  $X_3$  + 100  $X_4$  > 500000

Note that, in the above problem, the ratio of the largest (6000) to the smallest (.0001) nonzero number is 60,000,000 which is larger than 1000. Solving this problem with the

The above solution report indicates that the optimal solution has a profit of \$600.00. The value of the first decision variable X1 is 90 and the value of X2 is 30. X3 is non-basic and is equal 0. Press <ENTER> to proceed as shown below.

Problem Title: MAXIMIZING PROFIT			
***** Optimal Solution *****			
No. of iterations = 2	PROFIT =	600.000	
Variable	Slack Variables Status	Section Value	Shadow Price
Row1	Basic	60.000	0.000
Row2	Nonbasic	0.000	6.000
Row3	Nonbasic	0.000	2.000

As seen from the above report, constraint 1 (Row1) is non-binding and its slack variable is equal to 60. The other two constraints have been satisfied in the form of equality and their associated slack variables are equal to zero.

The shadow prices in the slack variables section indicate by how much the objective function value will change for each unit of change in the resources available (the right-hand side of the constraint equations). For instance, the shadow price of the 3rd row is 2 implying that if we increase the right-hand side of the third constraint from 120 to 121 profit will increase by 2.

Similarly, the reduced cost for a decision variable indicates the minimum increase (for a maximization problem), in the per unit profit, needed for that variable to make it attractive. For example, in the above problem, the reduced cost of X3 is 6. This implies that X3 would become an attractive activity (one that would enter the basis and take a positive value at optimum) if it had a profit coefficient of 10 or more (6 units more than its original value of 4).

Press the <ENTER> key to continue the solution process and then press <Y> to obtain the sensitivity analysis report as shown below.

Problem Title: MAXIMIZING PROFIT			
Variable	Objective Function	Coefficients Ranges	
	Original Coefficient	Maximum Increase	Maximum Decrease
X1	8.000	Infinity	4.000
X2	-4.000	4.000	4.000
X3	4.000	6.000	Infinity

Problem Title: MAXIMIZING PROFIT			
Row	Right-Hand Side	Ranges	
	Original RHS	Maximum Increase	Maximum Decrease
Row1	360.000	Infinity	60.000
Row2	60.000	60.000	180.000
Row3	120.000	30.000	60.000

The objective function coefficient ranges and right-hand side ranges in the Sensitivity Analysis shows the maximum increase and decrease of those values without changing the status of the decision variables (i.e. from basic to nonbasic or vice versa). For example, the original objective function coefficient of X3 which is 4.0 may be increased by 6.0 units to 10.0 without changing the optimal solution. This coefficient may also be decreased by an infinite amount without changing the optimal solution. Note that X3 is nonbasic and therefore has a value of 0 at the optimum solution.

As another example, consider the right-hand side of the third constraint which has an original value of 120. This value may be increased by 30 to 150 or may be decreased by 60 to 60 without changing the set of basic variables forming the optimal solution.

### EXAMPLE 3 - "WHAT IF" ANALYSIS ON RESOURCE AVAILABILITY

The relevance of shadow prices was explained in the previous section. Suppose that the second (constraint) resource is increased from 60 to 65 units and the third resource from 120 to 130 units. Based on the shadow prices, the value of profit will increase by 50

Problem Title: SPAGHETTI+MEATBALL			
Row	Right-Hand Side Ranges		Maximum Decrease
	Original RHS	Maximum Increase	
WEIGHT	15.000	Infinity	2.000
REQ MEAT	4.000	2.000	4.000
REQ SPAG	6.000	2.000	Infinity
REQ SAUC	3.000	2.000	3.000

As seen from the above output, the sensitivity analysis report contains the maximum increase and maximum decrease values for the right-hand sides. For example, the maximum increase, for the REQ MEAT constraint is 2.00 and the maximum decrease is 4.00. This implies that the current solution remains optimal for as long as the requirement for the ounces of meat remains in the range of 0 to 6. Outside of this range the optimal solution will change and the current mix is no longer the best one.

### EXAMPLE 2 - PROFIT MAXIMIZATION

In this example, you will use the linear programming module to solve a profit maximization problem. Consider the following three variable, three constraint problem.

$$\begin{aligned} \text{Maximize Profit} &= \$8X_1 - \$4X_2 + \$4X_3 \\ \text{Subject to:} & \quad 3X_1 + X_2 + X_3 < 360 \\ & \quad X_1 - X_2 + 2X_3 < 60 \\ & \quad X_1 + X_2 - X_3 < 120 \end{aligned}$$

Load the DSSPOM program and select the Linear Programming module. After a few seconds the computer will display the Linear Program Menu. Move the pointer to the INPUT option and press <ENTER>. (If you are continuing Example 1, the computer will ask if it should erase the current problem, press <Y> and continue). The computer will begin the data entry process by asking the problem title and other relevant parameters as shown below.

```

Problem title: MAXIMIZING PROFIT
Minimize or Maximize objective (MIN/MAX): MAX
Enter number of constraints: 3
Enter number of variables: 3

Continue with coefficients (Y/N) Y
  
```

Next press <Y> and continue with the spread sheet data entry process.

A2 'PROFIT						READY
	A	B	C	D	E	F
	X1	X2	X3			RHS Val.
1						
2	PROFIT	8.00	-4.00	4.00		
3	Row1	3.00	1.00	1.00	<	360.00
4	Row2	1.00	-1.00	2.00	<	60.00
5	Row3	1.00	1.00	-1.00	<	120.00

Press <F10> to complete the data entry process. You are now ready to solve this profit maximization problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option. Press <N> to avoid the intermediate solutions. The computer will pause a few seconds and then report the optimal solution as shown below.

Problem Title: MAXIMIZING PROFIT			
***** Optimal Solution *****			
No. of iterations =	2	PROFIT =	600.000
Decision Variables Section			
Variable	Status	Value	Reduced Cost
X1	Basic	90.000	0.000
X2	Basic	30.000	0.000
X3	Nonbasic	0.000	6.000

Problem Title: SPAGHETTI+MEATBALL			
***** Optimal Solution *****			
No. of iterations = 4		COST = 107.000	
Variable	Slack Variable Status	Section Value	Shadow Price
WEIGHT	Nonbasic	0.000	-4.000
REQ MEAT	Nonbasic	0.000	-8.000
REQ SPAG	Basic	2.000	0.000
REQ SAUC	Nonbasic	0.000	-5.000

The above report shows the status of the constraints (slack variables). It indicates that the slack of the weight constraint is 0 which implies that this constraint has been satisfied as an equality (i.e., if you substitute the values of the decision variables in this constraint, the left hand side equals the right hand side). Constraints which are satisfied as equalities are referred to as "binding constraints". The slack variables for the meat, spaghetti and sauce requirements are also equal 0. These constraints are also binding. However, the spaghetti requirement constraint has a slack of 2. The reason is that the number of ounces of spaghetti in the optimal solution is 8 which is 2 ounces more than its minimum requirement.

### SHADOW PRICES

Every constraint in a linear programming problem has an associated entity referred to as the "shadow price" for that constraint. In short, a shadow price represents the per unit change in the objective value due to a unit change in the right-hand side of that constraint. For example, in a profit maximization linear program, the shadow price associated with a less than or equal to constraint represents the increase in profit due to one additional unit of the right-hand side of that constraint. Therefore, the shadow price can also be interpreted as the marginal value of the resource as represented by the slack of that constraint. Shadow prices are of special interest to decision makers because they represent the marginal worth of the resources at optimum.

The Slack Variable Section of the optimal solution report contains the values of the shadow prices. Consider the shadow price of the Weight constraint. This shadow price, as indicated in the output report, is -4.00 which implies that if the weight requirement is decreased (marginally) from 15 to 14, the optimal cost of the mix would decrease by 4 cents. On the other hand, the shadow price for the Required Spaghetti constraint is 0 which implies that if the minimum requirement is decreased from 6 to 5, the optimal cost of the mix would not decrease. This is quite logical because the minimum requirement of this constraint has been over-satisfied by 2 units.

Note that the interpretation of the shadow prices should be done with special care because shadow prices only apply in the marginal and not absolute sense. That is, there is no guarantee for example, that the decrease in the weight requirement of the above example from 15 to 14 would not change the optimal mix and consequently the shadow prices. In the next section, addressing sensitivity analysis, the range of right-hand side for which a solution remains optimal will be discussed. This in turn will delineate the range for which the associated shadow price remains valid.

### SENSITIVITY ANALYSIS

Continue the solution process by pressing the <ENTER> key. The computer will ask if you wish to examine the sensitivity analysis report as shown below.

Do sensitivity analysis (Y/N) Y

The computer will then display the sensitivity analysis report.

Problem Title: SPAGHETTI+MEATBALL			
Variable	Objective Function Coefficients Ranges		Maximum Decrease
	Original Coefficient	Maximum Increase	
MEAT	12.000	Infinity	8.000
SPAGHETT	4.000	5.000	4.000
SAUCE	9.000	Infinity	5.000

The first part of the sensitivity analysis involves the objective function coefficients. As seen from the above report, for each variable, the maximum increase and maximum decrease are reported. For example, the maximum increase in the coefficient of MEAT is Infinity and the maximum decrease is 8 cents. This implies that the current mix in the optimal solution remains valid for as long as the cost coefficient of the MEAT variable remains in the range of  $12 - 8 = 4$  and above (to infinity). Outside of this range, the current optimal solution is no longer the minimum cost (optimal) solution. The range for the SPAGHETT variable is much tighter and is equal 0-9. This indicates that the optimal mix is quite sensitive to the price of spaghetti.

Press <ENTER> to continue with the sensitivity analysis report for the right-hand side values as shown below.

Now proceed to change the row labels as shown below.

- Move the pointer to cell A3 type WEIGHT <ENTER>
- Move the pointer to cell A4 type REQ MEAT <ENTER>
- Move the pointer to cell A5 type REQ SPAG <ENTER>
- Move the pointer to cell A6 type REQ SAUCE <ENTER>

### Entering the Objective Function

Proceed with the data entry to enter the objective function coefficients as shown below.

- Move the pointer to cell B2 type 12.0 <ENTER>
- Move the pointer to cell C2 type 4.0 <ENTER>
- Move the pointer to cell D2 type 9.0 <ENTER>

### Entering the Constraints

The last stage of the data entry involves entering the structural constraints. This process involves entering the constraint coefficients, relational operator (<, >, or =), and the right-hand side value for each constraint. The following is the illustration of the process for the first constraint.

- Move the pointer to cell B3 type 1.0 <ENTER>
- Move the pointer to cell C3 type 1.0 <ENTER>
- Move the pointer to cell D3 type 1.0 <ENTER>
- Move the pointer to cell E3 type > <ENTER>
- Move the pointer to cell F3 type 15 <ENTER>

The data entry for the remaining three constraints is analogous. The completed spread sheet is presented below. Note that the zero coefficients do not need to be entered. However, the implied coefficient 1 must be entered as shown above.

F3	15	A	B	C	D	E	F
			MEAT	SPAGHETT	SAUCE		RHS Val.
1							
2	COST		12.00	4.00	9.00	>	15.00
3	WEIGHT		1.00	1.00	1.00	>	4.00
4	REQ MEAT		1.00	0.00	0.00	>	6.00
5	REQ SPAG		0.00	1.00	0.00	>	3.00
6	REQ SAUCE		0.00	0.00	1.00	>	

After completing the data entry process, press <F10> to keep the data in memory and exit from the spread sheet editor.

You may now obtain a hard copy printout of the problem by moving the pointer to the PRINT option and press <ENTER>. You may also save the problem on disk for future use. Move the pointer to the FILE option and select the "Save current file" sub-option. The computer will display the current drive and sub-directory and will ask you to enter a file name. Enter an appropriate name and use the suffix "LP" to identify the file as one containing a linear programming problem. Press <ENTER> to save the file.

You are now ready to solve the Spaghetti and Meatball linear programming problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the Display output sub-option. The computer will begin the solution process by asking if you wish to see the intermediate solutions as shown below.

Show intermediate solutions (Y/N) N

The intermediate solutions are the extreme point solutions that the simplex method generates to achieve the optimal solution. For this example, you do not need to examine the intermediate solutions. Press <ENTER> to continue the solution process. The computer will pause for a few seconds and then will display the optimal solution as shown below.

Problem Title: SPAGHETTI+MEATBALL			
***** Optimal Solution *****			
No. of iterations =	4	COST =	107.000
Decision Variables Section			
Variable	Status	Value	Reduced Cost
MEAT	Basic	4.000	0.000
SPAGHETT	Basic	8.000	0.000
SAUCE	Basic	3.000	0.000

As seen from the above report, the optimal solution consists of using 4 ounces of meatballs, 8 ounces of spaghetti, and 3 ounces of sauce. The cost of the optimal solution is 107 cents. Note that the total weight of the optimal mix is 15 ounces as required by the weight constraint.

The program will also report the status of the constraints. Press <ENTER> to proceed as shown below.

The solution to the above problem is rather trivial. Since you must minimize cost (C), you should try to minimize the cost of the more expensive ingredients. That is, you should use as few meatballs as possible and as little spaghetti sauce as possible in each meal. However, you must use at least four ounces of meatballs and at least three ounces of spaghetti sauce. If you use four ounces of meatballs in each meal and three ounces of spaghetti sauce, then you must use also at least eight ounces of spaghetti to satisfy the constraint which specifies that the meal must weigh at least fifteen ounces. Hence, the solution to the cost minimization problem is to make up a meal consisting of four ounces of meatballs ( $X_1 = 4$ ), eight ounces of spaghetti ( $X_2 = 8$ ), and three ounces of spaghetti sauce ( $X_3 = 3$ ). The total cost of the meal will then amount to:

$$C = 12(4) + 4(8) + 9(3) = 107$$

### SENSITIVITY ANALYSIS

It is frequently desirable to evaluate to what extent the objective function coefficients and the values on the right hand side of the constraint equations can be varied. For example, in the spaghetti and meatball problem presented earlier, we may wish to know the range of spaghetti price for which the optimal mix remains the same (i.e.,  $X_1 = 4$ ,  $X_2 = 8$ , and  $X_3 = 3$ ). Similarly, in the truck assembly problem, we may wish to know the range of assembly line capacity for which the optimal solution remains the same.

For the coefficients of the objective function and for the right hand sides of the constraint equations the maximum increase and maximum decrease are shown. This information is useful for evaluating changes in the linear programming formulation.

### EXAMPLE 1 - THE SPAGHETTI PROBLEM

In this example you will use the Linear Programming module to solve the spaghetti and meatball problem presented earlier. To solve the problem load the DSSPOM program into the computer and select the Linear Programming module from the Main Menu. The computer will pause for a few seconds and then will display the Linear Program Menu. Move the pointer to the INPUT option and press the <ENTER> key to begin the data entry process as described below.

The computer will begin the input process by placing the pointer in the title field. Enter a title such as "SPAGHETTI+MEATBALL" and press <ENTER>. The program continues by requesting the type of objective. This problem is a cost minimization problem, hence enter "MIN" and press <ENTER>. The program will continue by requesting the number of constraints and the number of variables. For this problem, there are four constraints and three decision variables. Enter these numbers as shown below.

Problem title: SPAGHETTI+MEATBALL

Minimize or Maximize objective (MIN/MAX): MIN

Enter number of constraints: 4

Enter number of variables: 3

Enter problem parameters as requested. Press RETURN to accept, or ESC to exit. Maximum problem size is 30 constraints and 50 variables. Constraint coefficients should be within -9999 and 9999. Right-hand side values should be within -99999 and 99999.

The computer will proceed the data input process by asking you if it should continue with the constraints and objective coefficients as shown below.

Continue with coefficients (Y/N) Y

Press <Y> to proceed. The computer will then display the spread sheet data editor. The spread sheet is initialized with three variables labeled VAR1, VAR2, and VAR3. The variable names appear in the first row of the spread sheet. The second row (row 2) is used for the objective function and has been labeled OBJECTIVE. The objective function coefficients should be entered in this row. There are also three constraints (rows), labeled ROW1, ROW2, and ROW3. These rows correspond to the three structural constraints. The constraints' directions are all set to "<" and placed in column E. Note that the width of this column is one character and should hold "<", ">", or "=", depending on the constraint type. The last column of the spread sheet contains the right-hand side values, all initialized to zero. Note that the constraints are  $\leq$ ,  $\geq$ , or  $=$ . However, for ease of data entry and presentation we use the symbols <, >, and =.

### Entering Variable Names and Row Labels

You are now ready to begin the spread sheet data entry process. To begin, change the variable names from the default labels to more meaningful labels as shown below.

Move the pointer to cell B1	type	MEAT <ENTER>
Move the pointer to cell C1	type	SPAGHETT <ENTER>
Move the pointer to cell D1	type	SAUCE <ENTER>
Move the pointer to cell A2	type	COST <ENTER> (label for the objective)

# CHAPTER 4

## LINEAR PROGRAMMING

### INTRODUCTION

Linear programming is a widely utilized technique to allocate scarce resources to competing activities. Its use is best illustrated with a profit maximization or cost minimization problem. The decision variables are usually measures of the level of the activities.

In a profit maximization problem the profit generated by the aggregate of all activities represented by the decision variables are then maximized subject to availability of the constrained resources that are required to supply and support the activities.

In a cost minimization problem the cost incurred by the aggregate of all activities represented by the decision variables are then minimized subject to the requirements of the demands of the system for which the activities are performed.

Below we shall first give an example of a profit maximization problem. Suppose a manufacturer of trucks assembles two types of trucks, a five-ton model and a ten-ton model. The manufacturer has only one assembly line with a weekly capacity of 200 trucks. The engines supplied for the ten-ton truck cannot exceed 60 per week. Profits on each truck produced amount to \$200 on each five-ton truck and \$600 on each ten-ton truck. How can you formulate the above problem in a linear programming framework?

There are two decision variables in the profit maximization problem. They represent the number of five-ton trucks to produce and the number of ten-ton trucks to produce. There are two constraints, the assembly line capacity constraint and the engine supply constraint for the ten-ton truck. You can now formulate the problem. It will appear as,

$$\begin{aligned} \text{Maximize } P &= 200X_1 + 600X_2 \\ \text{subject to } X_1 + X_2 &\leq 200 \text{ assy. line constraint} \\ X_2 &\leq 60 \text{ engine constraint} \\ X_1 &\geq 0 \\ X_2 &\geq 0 \end{aligned}$$

In the above formulation the two decision variables are represented by  $X_1$  and  $X_2$  which respectively stand for the number of five-ton and for the number of ten-ton trucks. The two coefficients of 200 and 600 stand respectively for profit per unit for five and ten ton trucks. The upper equation is called the objective function and the lower relations are the constraint equations. You can ignore the last two constraint equations because all linear programming solution methods assume that the decision variables are larger than or equal to zero.

The solution to the above problem is rather simple. Since you want to maximize profit (P) you should attempt to manufacture as many ten-ton trucks ( $X_2$ ) as possible since the profit per unit is three times as high on ten-ton trucks as it is on five-ton trucks. However, you only have sufficient engines for 60 ten-ton trucks, which thus puts an upper limit on the ten-ton truck production. If you manufacture 60 ten-ton trucks then you can only manufacture 140 five-ton trucks per assembly line constraint. Hence, the solution to the profit maximization problem is to manufacture 140 five-ton trucks ( $X_1 = 140$ ) and 60 ten-ton trucks ( $X_2 = 60$ ) for a total profit of \$64,000 per week. We were able to solve the simple problem by inspection because it was only a two variable problem with two constraints. Most realistic linear programming problems are not so simple and need the computer for obtaining the solution.

A typical cost minimization problem is the spaghetti and meatball meal planning problem. The three decision variables consist of how many ounces of uncooked meatballs ( $X_1$ ), how many ounces of uncooked spaghetti ( $X_2$ ), and how many ounces of spaghetti sauce ( $X_3$ ) to use in each meal. The total meal must weigh at least 15 ounces before it is cooked. Also, each meal must contain at least four ounces of meatballs, six ounces of spaghetti, and three ounces of spaghetti sauce.

The formulation of this problem is straightforward and the solution is simple. The objective is cost minimization. The formulated problem will appear as,

$$\begin{aligned} \text{Minimize } C &= 12X_1 + 4X_2 + 9X_3 \\ \text{subject to } X_1 + X_2 + X_3 &\geq 15 \text{ meal weight constraint} \\ X_1 &\geq 4 \text{ meatball constraint} \\ X_2 &\geq 6 \text{ spaghetti constraint} \\ X_3 &\geq 3 \text{ sauce constraint} \end{aligned}$$

In the above formulation the three decision variables are represented by  $X_1$ ,  $X_2$ , and  $X_3$  which respectively stand for ounces of meatballs, ounces of spaghetti, and ounces of spaghetti sauce. The upper equation is now a cost minimization objective function and the constraints are all larger than or equal to constraints. The cost per ounce of uncooked meatball is 12 cents, the cost per ounce of uncooked spaghetti is 4 cents, and the cost of spaghetti sauce is 9 cents per ounce.

7. Cytonic Research Associates is considering submitting a proposal to the Federal government to develop a unique system for transporting the aged and poor in an urban community between their respective residences and places where they must appear at regular or irregular intervals such as health clinics, etc. Management of Cytonic estimates that it would cost \$40,000 to prepare the proposal; the chance of being awarded the contract were estimated at about 0.40.

Cytonic systems personnel had three alternative systems were they to be awarded the contract. Approach A would cost \$500,000 with an estimated probability of success of 0.50; approach B would cost \$800,000 with probability of success of 0.75; and approach C would cost \$1,000,000 but would be successful with near certainty. Management therefore attached a probability of success of 0.95 to the latter approach.

The contract, if awarded, would provide for payments of \$1,200,000, if successful and payments of only \$750,000 if not successful.

- a. Prepare a decision tree analysis for Cytonic Research Associates to provide them with information in making their decision.
- b. Make your recommendation to Cytonic in the form of a memo.

## 8. MURGEON CHEMICAL CORPORATION

In early January 1988, Murgeon Chemical Corporation received an order for 10,000 gallons of its new product, Murgo. Murgo is an ingredient used to manufacture a new variety of drugs. This was by far the largest order ever received for Murgo - total production in 1987 had been only 1,200 gallons. The order called for 5,000 gallons to be delivered in June and the remainder in November.

The process now used to synthesize Murgo is a long one which involves processing small batches of raw material through several stages. The company would need to invest \$400,000 in new equipment to bring the production capacity up to the 1,000 gallons per month level to meet the order. (It would take the month of January to order and set up the equipment.) The variable manufacturing cost per gallon using this process was known to be \$25.

One of the research chemists at Murgeon had just discovered a new process for synthesizing Murgo. If the process could be made to work on a large scale, it would greatly simplify the production process, with potentially great savings in cost. Ordinarily, a discovery of this sort would be tested thoroughly in the laboratory as well as a small pilot plant to be sure it worked and to estimate production costs. This would take about a year. However, because of the potential savings, management wondered if it should shorten this test period. The engineering department suggested a crash testing program lasting five months. At the end of this period, it would be known whether or not the process would work, and estimated production costs would be determined. This test would cost \$80,000 more than the more extended test.

It was estimated that there was a probability of 0.9 the new process would work. Further, given that the new process worked, the probability was 0.4 that the production cost would be \$4 per gallon, 0.4 that it would be \$20 per gallon, and 0.2 that it would be \$36 per gallon.

If a decision was made at this stage to use the new process, the month of June would be used to set up the new manufacturing process. Thus, if this testing program were utilized, the company would have to set up and run the first 5,000 gallons using the old process.

Note that only the incremental testing costs associated with crashing the test program need to be charged against that alternative. Since Murgeon Chemical would test and buy the equipment for the new process, if the tests were successful independent of this decision, the costs associated with these activities need not be considered at this point.

- a. Draw a decision tree for Murgeon Chemical Corporation so that management can analyze this problem.
- b. What decisions do you recommend? What is the expected cost of filling this order?
- c. What would be the worst decision alternative to select?



4. Idaho Company has the opportunity to drill on a certain property with three levels of outside participation. The first level is no outside participation at all, the second level is partial participation and the third level is significant participation by outside investors. The profits for each outcome are shown in the decision matrix. Solve the problem for the case under uncertainty and under risk using the indicated probabilities for each state of nature.

Level of Participation	States of Nature			
	Dry Well	Partial Flow	Good Flow	Excellent Flow
None	-85	-15	450	750
Partial	35	50	250	450
Significant	65	145	200	275
Probability	.40	.30	.20	.10

Note: Outcomes are payoffs in thousands of dollars.

5. The Bloomfield Company produces special items for the Halloween season. Revenue amounts to \$10 per item. From previous years' sales experience, probability estimates of sales levels have been derived. Production cost data in the form of variable and nonvariable costs are also available. These data are shown below.

Demand in Units	Estimated Probability	Nonvariable Cost	Variable Cost	Total Cost
100	0.1	\$650	\$ 50	\$700
150	0.3	650	75	725
200	0.3	650	100	750
250	0.2	650	125	775
300	0.1	650	150	800

Excess production can be disposed off at \$1.00 per unit up to 100 items. Remaining items have no value. Production can be done only in blocks of 50 units.

- Prepare a profit table for Bloomfield showing revenue and cost for each of the five demand levels.
- What is expected profit for Bloomfield at the full price \$10 per unit?
- How many units should Bloomfield produce under the optimal production level?

6. Using the data in the problem 5, what is the expected value of perfect information for Bloomfield Company? How much could Bloomfield afford to spend to acquire the information?

2. A corporation is planning to launch a new consumer product. It is very uncertain how the public will react to the product. The three alternatives it decides to explore are: 1. distribute the product locally, 2. distribute the product regionally, or 3. distribute the product nationally. The profits that the product will produce depend on either good, fair or poor public acceptance of the product. If acceptance is poor the profits will be, respectively, 0, -6 and -18 for local, regional and national distribution. If acceptance is fair profits will be 4, 9, and 8, respectively, and if acceptance is good profits will be 10, 14, and 52, respectively, for local, regional, and national distribution. All profits are in millions of dollars.

- a. Develop the decision matrix.
- b. Use decision analysis program to find best solutions under pessimistic criterion, optimistic criterion, equal likelihood criterion, and opportunity loss regret criterion.
- c. If probabilities are 0.5 for poor, 0.2 for fair and 0.3 for good public acceptance, determine the best solution for the expected profit maximization criterion.
- d. What is the expected value of perfect information?
- e. Does the distribution method change if the probabilities for public acceptance are 0.2, 0.1 and 0.7 for poor, fair, and good public acceptance, respectively?

3. Central Airlines is considering adding several routes because of aircraft availability. Five different configurations are being considered and three states of nature are anticipated. The states of nature are stated in terms of percentage seats filled on each route configuration. The outcomes are measured in terms of profits in units of \$10,000 and are listed below in the decision matrix. Apply both decision analysis models under uncertainty and under risk. Also, find expected value of perfect information.

	Percentage of Seats Filled		
	50%	60%	75%
Route Configurations	S1	S2	S3
A1	15	45	95
A2	10	40	100
A3	-10	15	90
A4	0	65	85
A5	-50	20	120
Probability	.30	.60	.10

Seen from the above results, the conditional expected payoff (or expected profit) is \$865. The left arrows in the solution output point to the optimal decision alternatives. For example, the first arrow points to branch (1,3), labeled "MMF", which corresponds to the alternative associated with buying money market funds. The expected payoff in this case is \$865. Therefore the best alternative (investment plan) is to buy MMF and earn an expected profit of \$865. Clearly, if the economy is rosy, the investor will profit \$1,000. When economy is stable, the profit is \$900. But what should the investor do if the economy is gloomy? The second left arrow in the output points to branch (7,15) which is labeled "NOTHING". This corresponds to the best alternative when the economy is gloomy. That is, the investor should do nothing and collect a profit of \$700. The three "\*" in the output report represent the chance branches and their expected payoffs associated with the best decision alternative.

## PROBLEMS

1. For the decision matrix with profits shown below, find the best solution under the following criteria under uncertainty and under risk, using the indicated probabilities for each state of nature. Also show what the value of each solution is. The cell entries are payoffs.

- Pessimistic criterion
- Optimistic criterion
- Equal likelihood criterion
- Opportunity loss regret criterion
- Assume that the probabilities of states of nature are 0.20, 0.25, 0.15, and 0.40. What is the best alternative? What is the expected value of perfect information?

Alternative Actions	States of Nature			
	S1	S2	S3	S4
A1	90	80	-15	-40
A2	75	70	10	-20
A3	0	65	80	55
A4	-30	0	35	60
A5	-30	-10	75	110

A1	BRANCH	B	C	D	E
	A	BEGIN	END	PROB-	
	BRANCH	NODE	NODE	ABILITY	PAYOFF
1	CB	1	2	1.000	-10000.00
2	MMF	1	3	1.000	-8000.00
3	GB	1	4	1.000	-15000.00
4	ROSY	2	8	0.250	11000.00
5	STABLE	2	5	0.450	0.00
6	GLOOMY	2	6	0.300	0.00
7	ROSY	3	12	0.250	9000.00
8	STABLE	3	13	0.450	8900.00
9	GLOOMY	3	7	0.300	0.00
10	ROSY	4	16	0.250	16000.00
11	STABLE	4	17	0.450	15900.00
12	GLOOMY	4	18	0.300	14500.00

The probabilities for a Chance Node should sum to 1. The probability of a Decision Node is 1. If the Payoff is not available, enter a 0 or "0h".

To enter the tree structure, first enter the branch labels by moving the pointer to cell A3 and type "CB". Press the <ENTER> key to accept and then the down arrow key to move the pointer to cell A4. Type "MMF" and press the <ENTER> key. Repeat this process for all of the 18 branches. Now, move the pointer to cell B3 and enter a "1" as the initial node for branch 1. Press the <ENTER> key followed by the right arrow to move to cell C3. Enter "2" for the end node of branch 1. Proceed as above to enter the end-nodes of all of the 18 branches. Next, enter the probability associated with each branch. Note that for a decision branch, the probability is 1.0 and for chance nodes, the sum of the probabilities of the branches emanating from it should be 1.0. After completing the data entry for the decision tree problem, press <F10> to keep the data and exit the spread sheet program.

If you wish to save the data, move the pointer to the "FILE" option, pull the bar down to the "Save current file" option and press the <ENTER> key. The program will display the current drive and sub-directory and ask for a file name. Enter an appropriate file name and press <ENTER> to save the model on disk.

You are now ready to solve the decision tree example problem. Move the pointer to the "SOLVE" option and select the display output. The program continues by solving the decision tree problem and presenting the optimal solution as presented below.

Problem Title: DECISION TREE				
Decision Tree Analysis				
Branch Number	Branch Name	Nodes	Probability	Conditional Payoff
1	CB	1 --> 2	Decision	655.000
2	MMF	1 --> 3	Decision	865.000 <==
3	GB	1 --> 4	Decision	505.000
4	ROSY	2 --> 8	0.250	2750.000
5	STABLE	2 --> 5	0.450	4905.000
6	GLOOMY	2 --> 6	0.300	3000.000
7	ROSY	3 --> 12	0.250	2250.000 *
8	STABLE	3 --> 13	0.450	4005.000 *
9	GLOOMY	3 --> 7	0.300	2610.000 *
10	ROSY	4 --> 16	0.250	4000.000
11	STABLE	4 --> 17	0.450	7155.000
12	GLOOMY	4 --> 18	0.300	4350.000

Problem Title: DECISION TREE				
Decision Tree Analysis				
Branch Number	Branch Name	Nodes	Probability	Conditional Payoff
13	SELL	5 --> 9	Decision	10900.000
14	NOTHING	5 --> 10	Decision	10500.000
15	REAL EST	6 --> 11	Decision	10000.000
16	NOTHING	6 --> 19	Decision	9800.000
17	SELL	7 --> 14	Decision	8550.000
18	NOTHING	7 --> 15	Decision	8700.000 <==
Conditional Payoff of the Solution is:				865.000

### EXAMPLE 3 - DECISION TREE PROBLEM

This solved example involves the use of decision tree analysis to solve the problem presented in Figure 3-1. The problem involves an investor who must decide which of the three investment alternatives to choose from so that his expected profit is maximized. In order to solve the problem, you must first make sure that all of the branches in the decision tree have numbered end-nodes. As seen from Figure 3-1, several of the terminal branches do not end in numbered nodes. Therefore, the decision tree is revised so that all of these branches have end-nodes. Figure 3-2 presents the completed decision tree. Also note that for several terminal branches (e.g. (5,9), (6,11), and (7,4)) the net payoff has been computed by subtracting the associated costs from the payoffs. The tree is now ready for input into the decision analysis program.

Load the DSSPOM software and select the "Decision Analysis" option from the Main Menu. Move the pointer to INPUT option and pull the bar down to the second level to highlight "Decision Tree" sub-option and press the <ENTER> key. Proceed to enter the initial problem parameters as shown below.

```

Problem title: DECISION TREE
Minimize or Maximize payoffs (MIN/MAX): MAX
Number of branches: 18

Continue with the decision tree (Y/N) Y
    
```

Press <Y> to continue with entering the decision tree structure as shown below.

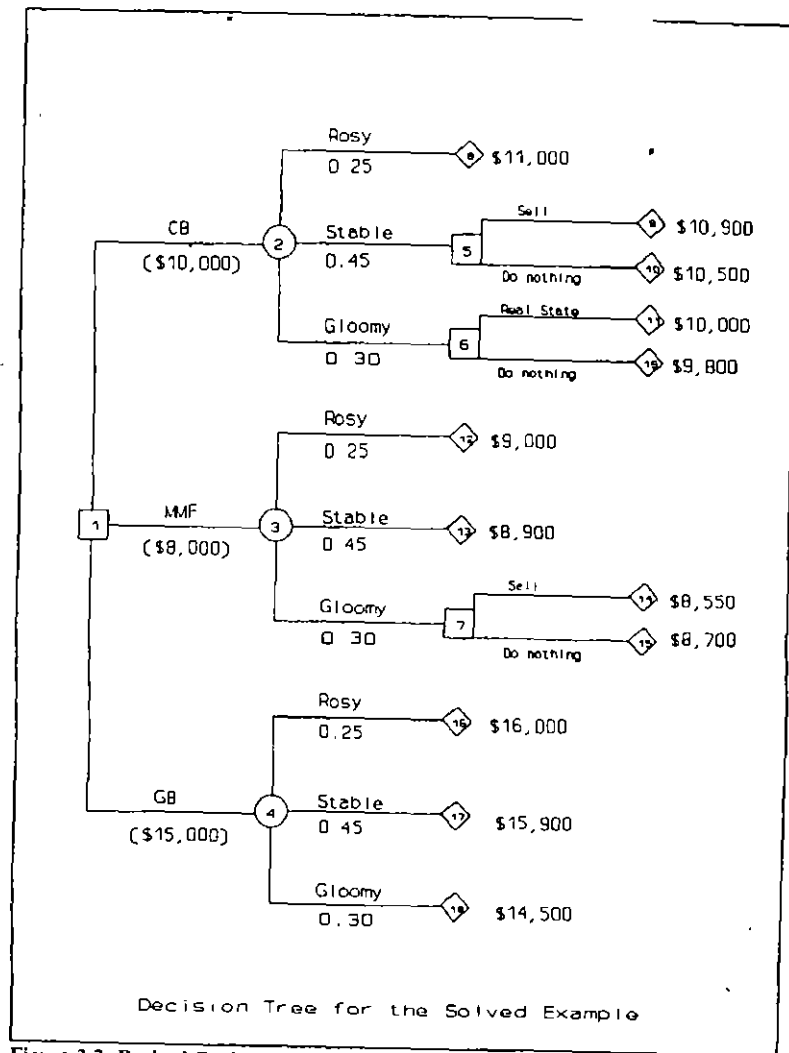


Figure 3-2: Revised Decision Tree

To convert the current model to decision making under risk, move the pointer to the EDIT option again. This time pull the bar down to the "Change Model Type" and press the <ENTER> key as show below.

```

Input  Edit  Print  File  Solve  Quit
-----
Input Data
Change Model Type
Delete a State
Delete an Alternative

The current Model is: Decision Under Uncertainty with
Payoffs Maximized.

Do you wish to change it (Y/N) Y
  
```

Press <Y> to proceed with changing the model. A vertical menu bar will be displayed, presenting various decision models. The pointer is on the first entry which is called "Decision Under Risk, Maximize the Payoff". Select this choice by pressing the <ENTER> key as shown below.

```

Decision under Risk , Maximize the Payoff
Decision under Risk , Minimize the Payoff
Uncertainty Model  , Maximize the Payoff
Uncertainty Model  , Minimize the Payoff
  
```

The program will proceed by displaying the spread sheet data entry process for entering probabilities for the various states of nature. Enter the probabilities into their appropriate cells, as shown below.

E2	.1						{READY}
		A	B	C	D	E	
1			Stn1	Stn2	Stn3	Stn4	
2		Prob.	0.400	0.300	0.200	0.100	

Press the <F10> key to exit the spread sheet and keep the values as entered. At this point, proceed to solve the model as before. The output screens are presented below.

```

Problem Title: DECISION EXAMPLE-2
Decision Making: Under Risk

Alternative      Expected Payoff
-----
Alt1             20.00
Alt2             30.00 <=== Maximum
Alt3             21.00
  
```

```

Problem Title: DECISION EXAMPLE-2

Expected value of perfect information is:      14.00
  
```

The program reports the optimal decision alternative having the maximum expected payoff as well as the expected value of perfect information.

## EXAMPLE 2 - DECISION MAKING UNDER RISK

solved example involves decision making under risk. Decision making under risk consists of a decision table problem in which the underlying probability distribution associated with the states of nature is known. The problem data for this example is the same as those of Solved Example 1 above. The probabilities of the states of nature are those presented in Exhibit 3-6.

To begin the data entry process, recall that you saved Solved Example 1 using the file name "DEC1.DEC". Move the pointer to the "FILE" option the pull the bar one level down to the "Retrieve a file" option and press the <ENTER> key. The program will ask if it should erase the current model and begin a new one. Note that we could have edited the current model and added the probabilities of states of nature. (The use of the file retrieve option at this point is for demonstration purposes only.) The file retrieve process is shown below.

```
Input Edit Print File Solve Quit
      |-----|
      | Retrieve a file |
      | Save current file|
      |-----|
      | Copy a file     |
      | Erase a file    |
      | Rename a file   |
      |-----|
      | List current DIR|
      | Change the DIR  |
      |-----|
      | Erase current model and begin a new one (Y/N)Y |
```

Next, you will be asked to enter a file specification. Press the cursor to the end of the edit field. Now press the <BACK> key to move the cursor to the beginning of the edit field and type "DEC" as shown below. Press the <END> key to move the cursor to the end of the edit field and press the <ENTER> key once to erase the current model and begin a new one.

```
Enter file spec. C:\DSS2\*.DEC
```

The program will display a vertical menu bar containing all file names with the three letter suffix "DEC" as shown below. In this case, there are three file names with suffix "DEC". Move the pointer to the proper file name and press the <ENTER> key.

```
DEC1.DEC
DEC2.DEC
DEC3.DEC

Use || to highlight, ENTER to select, ESC to Exit.
```

After loading the decision problem presented in Solved Example 1, proceed to edit the data to add the probabilities of the states of nature and convert the decision model to one of decision making under risk. Move the pointer to the EDIT option and select the Input Data option. Change the problem title to "DECISION EXAMPLE-2" and press the <ENTER> key. Press the <ENTER> key three more times to accept the current values of the other three parameters. The program will ask if it should continue with the payoff table. Press <N> to bypass editing the payoff table.

Problem Title: DECISION EXAMPLE-1  
Decision Making: Under Uncertainty

Alternative	Expected Payoff
Alt1	20.00
Alt2	40.00
Alt3	45.00 <--- Maximum

Problem Title: DECISION EXAMPLE-1  
MaxiMin Criterion (Pessimistic)

Alternative	Worst (Minimum)
Alt1	20.00 <--- MaxiMin
Alt2	0.00
Alt3	-30.00

Problem Title: DECISION EXAMPLE-1  
MaxiMax Criterion (Optimistic)

Alternative	Best (Maximum)
Alt1	20.00
Alt2	60.00
Alt3	120.00 <--- MaxiMax

After reporting the optimal decision alternative under the Equally Likely, Optimistic (or MaxiMax), and Pessimistic (or MaxiMin) criteria, the program will ask if you wish to see the regret table for this problem. Press <Y> to see the regret table as shown below.

Problem Title: DECISION EXAMPLE-1

Display the Opportunity Loss Table (Y/N) Y

Alt	A	B	C	D	E
1		Stn1	Stn2	Stn3	Stn4
2	Alt1	0.00	20.00	40.00	100.00
3	Alt2	20.00	0.00	0.00	60.00
4	Alt3	50.00	10.00	0.00	0.00

Press the <ESC> key to continue with the solution process. The program will then display the optimal decision alternative under the Minimax Regret Criterion as show below.

Problem Title: DECISION EXAMPLE-1  
Minimax Regret Criterion

Alternative	Maximum Regret
Alt1	100.00
Alt2	60.00
Alt3	50.00 <--- MiniMax



Accordingly, the expected profit is  $\$8,865 - \$8,000 = \$865$ . The computation for the expected payoff associated with CB is analogous and results in an expected profit of  $\$655$ . Clearly, among the investment plans, the MMF investment has the highest expected profit of  $\$865$ . The investor, therefore should buy MMF and if the economy happens to be gloomy he should keep the MMF and do nothing. Later in this chapter, we will illustrate the use of the computer to solve the problem.

### EXAMPLE 1 - DECISION MAKING UNDER UNCERTAINTY

This example problem involves decision making under uncertainty. The decision table presented in Exhibit 3-2 will be used for this solved example. To solve the problem, select the "Decision Analysis" program from the Main Menu. Once the decision analysis program is loaded, move the pointer to the INPUT option. The INPUT option includes two sub-options: 1-Decision Tables, and 2-Decision Trees. Pull the pointer down to the first option and press the <ENTER> key. The data input screens are shown below.

Problem title: DECISION EXAMPLE-1

Minimize or Maximize payoffs (MIN/MAX): MAX

Number of decision alternatives (rows): 3

Number of states of nature (columns): 4

Continue with the payoff table (Y/N) Y

A1	A	B	C	D	E
1		Stn1	Stn2	Stn3	Stn4
2	Alt1	20.00	20.00	20.00	20.00
3	Alt2	0.00	40.00	60.00	60.00
4	Alt3	-30.00	30.00	60.00	120.00

READY

After completing the data entry process, press the <F10> key to exit the spreadsheet entry program and keep the data. At this point, you may proceed to select the PRINT option to obtain a hard copy printout of the input data. Examine your data carefully to ensure it is correct.

Since the data for this example will be used for the next example, proceed to save the problem on disk. To save the model on disk, move the pointer to the FILE option. Several options will be presented under the file management option. Pull the pointer down two levels to highlight the "Save current file" option and press the <ENTER> key. The file save display screen is presented below.

Input Edit Print File Solve Quit

- Retrieve a file
- Save current file
- Copy a file
- Erase a file
- Rename a file
- List current DIR
- Change the DIR

Enter file name C:\DSS2\DEC1.DEC

Note that when the save file option is selected, the program will display the current sub-directory and ask you to enter a file name. In this solved example, the current sub-directory is \DSS2 on drive C:. Press the <END> key to move the cursor to the end of the input field. Type "DEC1.DEC" and press the <ENTER> key. The use of the three letters "DEC" as file suffix will identify this file as one containing a decision analysis problem data. This will greatly simplify the file retrieve process later.

You are now ready to solve the example problem. Move the pointer to the SOLVE option and pull the pointer down one level to highlight DISPLAY OUTPUT. Press the <ENTER> key to select it. The program will begin to solve the decision table problem and reports outcomes from several solution criteria.

chance nodes represent the possible states of nature. The decision branches have associated costs or profits and chance branches or states of nature have associated probabilities. For a terminal chance branch there is both an associated cost or profit and probability. The method is best illustrated by an example.

An investor can invest his money in one of three different investment plans over an 18-month period. At the end of the 18-month period, he will determine the value of his initial investment plus (minus) the return (the loss). The return on his investment depends on the type of investment plan purchased and the future state of the economy. The three investment plans consist of buying convertible bonds (CB), purchasing government bonds (GB), or investing in money market funds (MMF). In particular, he can buy CB for \$10,000, invest \$8,000 in MMF, or buy \$15,000 worth of GB. The returns on the three investment plans depend on the state of the economy within the next 18 months. That is, the economy may be gloomy with a probability of 0.30, stable with a probability of 0.45, or rosy with a probability of 0.25. The total amount collected, including his initial investment, for the GB is \$16,000 for rosy economy, \$15,900 for stable economy, and \$14,500 for gloomy economy. The amount collected for the MMF investment is \$9,000 for rosy economy and \$8,900 for stable economy. However, when the economy is gloomy, the investor can pay a fee of \$350 and sell his MMF prematurely (before the end of 18 months) in which case he collects \$8,950. Otherwise, he may wish to do nothing and collect \$8,700. The CB investment will result in collecting \$11,000 in rosy economy. Under a stable economy, the investor can sell the CB prior to maturity for a fee of \$200 and collect \$11,100, or wait until the end of the 18 months and collect \$10,500. When the economy is gloomy, he can sell the CB prematurely and invest in real state bonds at a cost of \$500 in which case he will collect \$10,500, or he can do nothing and collect \$9,800. We wish to determine the optimal investment plan which will maximize his expected profit.

This problem can be represented by a decision tree as in Figure 3-1, in which the square nodes represent the decision events and the circle nodes are chance events. In order to solve the problem, we utilize a backward procedure in which we successively determine the expected payoffs and subtract the associated cost. For example, consider the expected payoff (EP) associated with buying government bonds (GB). The expected payoff is given as:

$$\begin{aligned} EP(GB) &= \$16,000(0.25) + \$15,900(0.45) + \$14,500(0.30) \\ &= \$15,505. \end{aligned}$$

To determine the expected profit we subtract the cost (initial investment) from the expected payoff. That is:

$$\text{Expected Profit (GB)} = \$15,505 - \$15,000 = \$505.$$

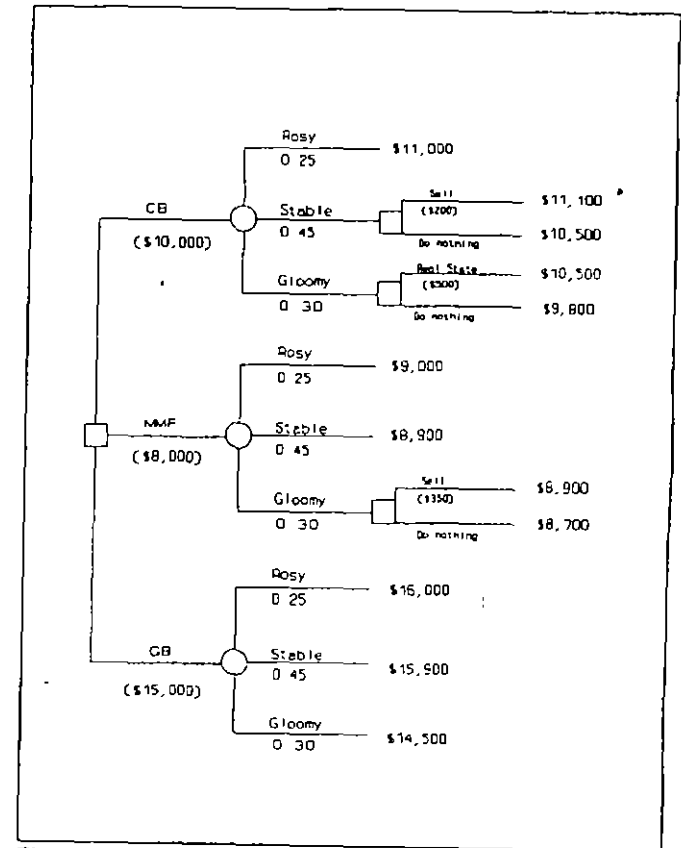


Figure 3-1: Decision Tree for the Investment Problem

To determine the expected payoff for MMF, we note that when economy is gloomy and he decides to sell, the payoff is \$8,550 (\$8,900 - \$350). Compared with doing nothing which pays \$8,700, the sell option should not be selected

Therefore, the expected payoff for the MMF option is:

$$\begin{aligned} EP(MMF) &= \$9,000(0.25) + \$8,900(0.45) + \$8,700(0.30) \\ &= \$8,865. \end{aligned}$$

Criteria	Alternative Action Selected
Equal Likelihood	A3
Maximin-Conservative	A1
Maximax-Gambler's	A3
Minimax Opportunity Loss Regret	A3

Exhibit 3-5: Summary of Decision Criteria Selections for Plant Size Decision Problem

Alternative Actions	States of Nature				Expected Profit
	S1 P(S1)=.40	S2 P(S2)=.30	S3 P(S3)=.20	S4 P(S4)=.10	
A1	20	20	20	20	20
A2	0	40	60	60	30
A3	-30	30	60	120	21

Exhibit 3-6: The Maximum Expected Profit Criterion - Plant Size Problem

Note: Outcomes are profits in millions of dollars  
P(S1) stands for probability of S1, etc.

The maximum expected value under risk (EVUR) amounts to 30 monetary units for alternative A2.

To find the EVUC for the example problem we take the maximum profit for each state of nature and multiply it by the respective probability for that state of nature. We then sum the resultant expected values for the four states of nature to obtain the EVUC with the formula shown below,

$$EVUC = S1 \cdot P(S1) + S2 \cdot P(S2) + S3 \cdot P(S3) + S4 \cdot P(S4)$$

where S1 is the maximum profit for S1, etc. and P(S1) is the probability that S1 will take place. Hence,

$$EVUC = 20(.40) + 40(.30) + 60(.20) + 120(.10) = 44$$

which translates into \$44 million.

We can now find the EVPI which is

$$EVPI = EVUC - EVUR = 44 - 30 = 14$$

Hence, the expected value of perfect information amounts to \$14 million.

### COSTS OR LOSSES VERSUS PROFITS OR PAYOFFS

In the preceding analysis we used profits for the outcomes except in the case of the minimax opportunity loss regret criterion. Frequently, decision problems arise where the outcomes are not profits or payoffs which one would like to maximize, but costs or losses which one would like to minimize.

In order to apply the same model and procedures one can always convert costs or losses to profits or payoffs by multiplying each cost or loss outcome by (-1). Although there are other ways of dealing with costs or losses the (-1) multiplication method is the easiest and most straightforward. Similarly if the outcomes are costs or losses the expected value criterion becomes a minimize expected cost criterion instead of a maximize expected profit criterion.

### DECISION TREES

Decision trees are useful graphical tools to represent sequential decision problems. A decision tree consists of chance events (nodes) and decision events (nodes). It is customary to use squares for decision nodes and circles for chance nodes. Branches emanating from decision nodes represent decision alternatives and those emanating from

four states of nature. The objective of the criterion is to ensure that the largest opportunity losses are avoided.

The minimax regret criterion is applied as follows. For each alternative action the maximum opportunity loss is identified. Then the minimum of the three maximum opportunity losses is selected and the alternative action that produces that minimum opportunity loss is the chosen alternative action.

Alternative Actions	States of Nature			
	S1	S2	S3	S4
A1	0	20	40	100
A2	20	0	0	60
A3	50	10	0	0

Exhibit 3-4: Opportunity Loss Matrix for Regret Problem

Note: Opportunity losses (cell entries) are shown in millions of dollars. Based on the minimax regret criterion, we select alternative A3.

For the plant size decision problem we find that the maximum opportunity losses, from Exhibit 3-4, for each alternative action are a \$100 million opportunity loss for A1, a \$60 million opportunity loss for A2 and a \$50 million opportunity loss for A3. The minimum of these three opportunity losses is \$50 million for A3, or, build the large plant. A3 is therefore selected under the minimax opportunity loss regret criterion.

Based on the above application of the four decision criteria we find that alternative action A3 is selected for the equal likelihood criterion, alternative action A1 is selected for the pessimistic (conservative) criterion, alternative action A3 is selected for the optimistic (gambler's) criterion, and alternative action A3 is also selected for the minimax opportunity loss regret criterion. The results of the above are summarized in Exhibit 3-5.

### THE MAXIMUM EXPECTED PROFIT CRITERION

The four decision criteria applied above assume that there was no explicit probabilistic information available. There are, however, situations where that assumption is not necessary. That kind of situation will be discussed below and applied to the plant size decision problem.

Suppose that the demand probabilities for the plant size decision problem are the following. The probability of low demand, S1, is 0.40, the probability of moderate demand, S2, is 0.30, the probability of considerable demand, S3, is 0.20 and the probability of large demand, S4, is 0.10.

Applying these demand probabilities to the plant size decision problem we find, as displayed in Exhibit 3-6, that alternative action A2, to build a medium-size plant, is the most desirable because it produces the largest expected profit of \$30 million. Alternative action A1, to build a small plant produces an expected profit of \$20 million. Alternative action A3, to build a large plant produces an expected profit of \$21 million. Hence, based on the maximum expected profit criterion alternative A2, to build a medium-size plant, is selected. The expected profit of \$30 million for alternative A2 is also called the expected value under risk.

### EXPECTED VALUE OF PERFECT INFORMATION

When probabilistic data is available for the states of nature we are able to determine the expected value of perfect information. The expected value of perfect information is a useful value because it specifies the maximum amount management should pay to obtain perfect information on the outcomes of the four states of nature. Perfect information is really never available in our uncertain world, but, through market research considerable additional information can often be obtained. The expected value of perfect information is then the absolute maximum one would want to pay for that additional market research information about the probabilities of the states of nature.

To find the expected value of perfect information (EVPI) we must first find the expected value under certainty (EVUC). We then subtract the maximum expected value under risk (EVUR) which we calculated in the previous section from the EVUC to obtain the EVPI. To show it arithmetically we thus have,

$$EVPI = EVUC - EVUR$$

For the plant size decision problem we find that the minimum profits for each alternative action are a \$20 million profit for A1, break-even for A2, and a \$30 million loss for A3. The maximum of these three minimum payoffs is \$20 million for A1, build a small plant. A1 is therefore selected under the conservative or maximin criterion.

**OPTIMISTIC, GAMBLER'S OR MAXIMAX CRITERION**

Under the gambler's criterion there is again an assumption of no knowledge about the respective probabilities of the four states of nature. The objective of the criterion is to ensure that the highest possible profit is obtained if the associated state of nature occurs. Since this criterion could also produce high losses it is called a speculator's or gambler's criterion.

Alternative Actions	States of Nature				Average Profit
	S1	S2	S3	S4	
A1	20	20	20	20	20
A2	0	40	60	60	40
A3	-30	30	60	120	45

**Exhibit 3-3: Solution with Equal Likelihood Criterion**

Note: Outcomes (cell entries) are profits in millions of dollars

The maximax criterion is applied as follows. For each alternative action the maximum profit is identified. Then the maximum of the three maximum profits is selected and the alternative action that produces that maximum profit is the chosen alternative action.

For the plant size decision problem we find that the maximum profits for each alternative action are a \$20 million profit for A1, a \$60 million profit for A2 and a \$120 million profit for A3. The maximum of these three profits or payoffs is \$120 million for A3, to build a large plant. A3 is therefore selected under the gambler's optimistic or maximax criterion.

**MINIMAX REGRET FOR OPPORTUNITY LOSS CRITERION**

Under the minimax regret for opportunity loss criterion there is again an assumption of no knowledge about the respective probabilities of the four states of nature. The objective of the criterion is to ensure that the larger opportunity losses are avoided.

To apply the regret criterion we must first convert the decision matrix for the plant size decision problem from a profit matrix to an opportunity loss matrix. The results are shown in Exhibit 3-4

For each state of nature we select the largest profit. For that outcome cell, we assign a zero opportunity loss. The other outcome cells for the same state of nature are then assigned opportunity losses equal to the difference between the largest profit and their respective profits.

To illustrate this we shall apply it to the plant size decision problem. For state of nature S1 the profit outcomes are, respectively, \$20 million for A1, \$0 for A2 and \$-30 million for A3. Hence, the opportunity loss for A1 is 0 because it is the largest profit of the three outcomes. The opportunity loss for A2 is \$20 million - the difference between \$20 million for A1 and zero for A2 and the opportunity loss for A3 is \$50 million - the difference between \$20 million for A1 and -\$30 million for A3.

We shall repeat this opportunity loss determination for state of nature S2. For S2 the profit outcomes are, respectively, \$20 million for A1, \$40 million for A2 and \$30 million for A3. Hence, the opportunity loss for A2 is zero because it is the largest profit of the three outcomes. The opportunity loss for A1 is \$20 million - the difference between \$40 million for A2 and \$20 million for A1 - and the opportunity loss for A3 is \$10 million - the difference between \$40 million for A2 and \$30 million for A3.

After we have completed the opportunity loss matrix for all the four states of nature we can apply the minimax regret for opportunity loss criterion. Under this criterion there is again an assumption that there is no knowledge about the respective probabilities of the

Actions	States of Nature	
	S1-RAIN	S2-NO RAIN
A1-Take along umbrella	You are able to remain dry when it rains	You are annoyed for having to carry the umbrella on a nice dry day
A2-Leave umbrella at home	You are annoyed because you will get wet when it rains	You are delighted because it remains dry and you have no umbrella to carry around

Exhibit 3-1: Decision Matrix for Long Walk Scenario

Actions	States of Nature			
	S1-Low Demand	S2-Moderate Demand	S3-Considerable Demand	S4-Large Demand
A1-Build Small Plant	20	20	20	20
A2-Build Medium-Size Plant	0	40	60	60
A3-Build Large Plant	-30	30	60	120

Exhibit 3-2: Decision Matrix for Plant Size Problem

Note: Outcomes (cell entries) are millions of dollars of profit.

To further complicate the situation the decision maker (management) feels that any one of the four states of nature could occur. Clearly if one knew beforehand that low demand (S1) would occur, then the small plant should be built. Similarly if moderate demand (S2) were to occur a medium size plant should be built. If considerable demand (S3) were to occur either a medium-size or a large plant could be built and if large demand (S4) were sure to occur, management would opt for the large plant.

To solve the dilemma, we shall find a solution under several criteria. This problem is called the decision making under "uncertainty" because no probabilistic data on the states of nature is available. The four criteria are: 1. Equal likelihood; 2. Pessimistic, also called conservative or maximin; 3. Optimistic, also called gambler's or maximax; and 4. the minimax regret for opportunity loss. Each one of the four criteria will be described below.

### EQUAL LIKELIHOOD CRITERION

Under the equal likelihood criterion we assume that each-one of the four states of nature is equally likely. Alternatively, one could say that the probability of each state of nature is 0.25 (or 1/4). Then we apply the average profit maximization method to the decision problem and we find that alternative action A4, to build a large plant, will provide the largest average profit as shown in Exhibit 3-3. Alternative action A1, to build a small plant, will produce an average profit of \$20 million, alternative action A2, the medium size plant, will produce an average profit of \$40 million and alternative action A3, the large plant, will produce the maximum average profit of \$45 million.

Note that the equal likelihood criterion does not consider the risk of incurring big losses. Although alternative action A3 produces the highest average profit, it also leaves open a strong possibility of incurring a loss of \$30 million. For many small firms this may be too high a risk to take.

### PESSIMISTIC, CONSERVATIVE OR MAXIMIN CRITERION

Under the conservative criterion there is again an assumption that there is no knowledge about the respective probabilities of the four states of nature. The objective of the criterion is to avoid the worst outcomes. Hence, it is a pessimistic or conservative criterion.

The conservative or maximin criterion is applied as follows. For each alternative action the minimum profit is identified. Then the maximum of the three minimum profits selected and the alternative action that produces that maximum profit is chosen.

## CHAPTER 3

### DECISION ANALYSIS

#### INTRODUCTION

Decision analysis is concerned with finding the most desirable alternative from several alternative actions within a setting or scenario in which outcomes are dependent on several potential states of nature. A state of nature is essentially an environmental condition which produces a certain specified outcome depending on the alternative action.

This concept can best be illustrated by a simple example. Suppose you decide to go on a long walk and you know that there is a slight probability of rain. You can take your umbrella along to keep you dry if it rains. However, the umbrella is a nuisance to carry around especially if it turns out to be dry on your long walk.

In this example, the setting explains the alternative actions, the states of nature and hints at the outcomes. The two alternative actions are: 1. to take along an umbrella, and 2. to leave the umbrella at home. The two states of nature are: 1. no rain will fall on you during your walk; and 2. you will get rained on during your walk. The four possible outcomes represent the intersections of the two alternative actions and the two states of nature. The outcomes are illustrated in Exhibit 3-1 in the form of a decision matrix including the alternative actions, the states of nature and the outcomes.

The decision matrix completely summarizes the alternative actions A1 and A2, the states of nature, S1 and S2, and the resultant four outcomes. In our example the outcomes are non-quantitative verbal descriptions of the unfolding of the scenario. In most practical applications the outcomes are quantitative measures such as sales revenues, costs, profits, losses, etc. We shall illustrate such a case below.

Exhibit 3-2 shows a scenario of a capital investment decision for a large corporation. The corporation must decide what size plant to build to produce a new product for which the future demand is not known. If demand is large then a large plant will provide the largest profits while if demand is small, a smaller plant would be profitable while a large plant would result in losses. Similarly if a small plant were built and demand were high, profits would be low because of the lost opportunity to fulfill demand. For instance, note that profits of \$20 million result if a small plant is built regardless of the demand. If a medium-size plant is built profits could be as high as \$60 million and as low as break-even (\$0 profits) depending on the demand. A large plant could produce profits as high as \$120 million but if demand is low it might produce a loss of \$30 million.

Actions	States of Nature	
	S1-RAIN	S2-NO RAIN
A1-Take along umbrella	You are able to remain dry when it rains	You are annoyed for having to carry the umbrella on a nice dry day
A2-Leave umbrella at home	You are annoyed because you will get wet when it rains	You are delighted because it remains dry and you have no umbrella to carry around

Exhibit 3-1: Decision Matrix for Long Walk Scenario

Actions	States of Nature			
	S1-Low Demand	S2-Moderate Demand	S3-Considerable Demand	S4-Large Demand
A1-Build Small Plant	20	20	20	20
A2-Build Medium-Size Plant	0	40	60	60
A3-Build Large Plant	-30	30	60	120

Exhibit 3-2: Decision Matrix for Plant Size Problem

Note: Outcomes (cell entries) are millions of dollars of profit.

## CHAPTER 3

### DECISION ANALYSIS

14. Collins University would like to revise its admission standards. Administrators have found that college GPA is correlated with high school averages, SAT scores, and ACT scores. They base their findings on the data below which was acquired over the past several years. This, of course, is not the entire data base, but is a representative sample.

- Calculate a regression equation that will help the Administrators decide on the best students to accept.
- The second table shows data on 5 students wishing to attend Collins University. The school can only admit 3 of these students. Use the regression equation calculated in (a) to decide which students should be accepted.

STUDENT	GPA	H.S. AVERAGE	SAT	ACT
1	3.9	98	1300	28
2	3.2	92	1270	27
3	3.7	93	1310	27
4	2.6	88	900	19
5	2.9	85	1100	23
6	3.3	87	1300	24
7	2.7	80	1000	21
8	2.2	82	850	15

STUDENT	H.S. AVERAGE	SAT	ACT
Sue	90	1000	26
Bob	88	1100	24
Joe	93	1050	26
Todd	94	1300	20
Sara	85	1200	27

#### INTRODUCTION

Decision analysis is concerned with finding the most desirable alternative from several alternative actions within a setting or scenario in which outcomes are dependent on several potential states of nature. A state of nature is essentially an environmental condition which produces a certain specified outcome depending on the alternative action.

This concept can best be illustrated by a simple example. Suppose you decide to go on a long walk and you know that there is a slight probability of rain. You can take your umbrella along to keep you dry if it rains. However, the umbrella is a nuisance to carry around especially if it turns out to be dry on your long walk.

In this example, the setting explains the alternative actions, the states of nature and hints at the outcomes. The two alternative actions are: 1. to take along an umbrella; and 2. to leave the umbrella at home. The two states of nature are: 1. no rain will fall on you during your walk; and 2. you will get rained on during your walk. The four possible outcomes represent the intersections of the two alternative actions and the two states of nature. The outcomes are illustrated in Exhibit 3-1 in the form of a decision matrix including the alternative actions, the states of nature and the outcomes.

The decision matrix completely summarizes the alternative actions A1 and A2, the states of nature, S1 and S2, and the resultant four outcomes. In our example the outcomes are non-quantitative verbal descriptions of the unfolding of the scenario. In most practical applications the outcomes are quantitative measures such as sales revenues, costs, profits, losses, etc. We shall illustrate such a case below.

Exhibit 3-2 shows a scenario of a capital investment decision for a large corporation. The corporation must decide what size plant to build to produce a new product for which the future demand is not known. If demand is large then a large plant will provide the largest profits while if demand is small, a smaller plant would be profitable while a large plant would result in losses. Similarly if a small plant were built and demand were high, profits would be low because of the lost opportunity to fulfill demand. For instance, note that profits of \$20 million result if a small plant is built regardless of the demand. If a medium-size plant is built profits could be as high as \$60 million and as low as break-even (\$0 profits) depending on the demand. A large plant could produce profits as high as \$120 million but if demand is low it might produce a loss of \$30 million.



11. You are a budding artist just wanting to make your first million dollars. In order to begin your career, you have decided to draw cartoons to be placed in the Sunday newspaper and an area magazine. Your income level depends on the circulation of the newspaper, circulation of the magazine, and the number of cartoons you get published each week.

Based on the information in the following table, project your income for the next four months (October to January)

	<u>INCOME</u>	<u>NEWSPAPERS</u>	<u>MAGAZINES</u>	<u>STRIPS PRODUCED</u>
January	4	10	8	.02
February	4.5	11	10	.05
March	3.8	12	7	.04
April	3	13	6	.03
May	3.7	14	7	.05
June	4	15	8	.06
July	4.4	12	8	.04
August	3.9	11	7	.02
September	3.8	10	7	.04
October		15	10	.04
November		13	11	.03
December		10	9	.01
January		12	8	.04

NOTE: All numbers are in hundreds

12. An experiment was conducted for three weeks to study the effect of refrigerator temperature and refrigerator storage density on refrigerator power usage (in kilowatt hours) for a certain type of residential refrigerator. Temperature and storage density are measured in standard deviations from the levels normally used. For example, in the first observation the temperature setting was 15 degrees below the normal setting and the storage density was 15% points below the normal density. The results of the study are given below.

- Run the multiple regression program on this data. State the resulting equation.
- How confident are you in this predictive function?

<u>DAY</u>	<u>TEMPERATURE</u>	<u>DENSITY</u>	<u>POWER USED</u>
1	-15	-15	250
2	0	-15	190
3	+15	-15	160
4	-10	-10	230
5	0	-10	180

6	+10	-10	175
7	-10	0	259
8	-10	+10	287
9	0	+10	189
10	0	0	207
11	-5	-5	204
12	-5	+5	253
13	+5	-5	182
14	+5	+5	161
15	0	-5	159

13. Below are statistics from St. Elsewhere Hospital during last year's flu season. St. Elsewhere is trying to determine how to stock the hospital in order to be prepared for this year's flu outbreak. Doctors have reason to believe that the number of outbreaks this year will be similar to last year. Doctors also believe the number of outbreaks is contingent on the number of flu shots given and the amount of aspirin sold. Actual data from last year is shown below.

- Find a regression equation to fit the data that will predict the number of flu outbreaks for this year.
- How good is this equation?
- Based on this equation, predict the number of flu outbreaks St. Elsewhere can expect over the 7 week season.

<u>WEEK</u>	<u>FLU OUTBREAKS</u>	<u>NUMBER OF SHOTS</u>	<u>ASPIRIN SOLD</u>
1	100	50	600
2	200	100	700
3	300	150	800
4	500	200	900
5	400	250	900
6	200	100	700
7	50	50	500

---

1	75	700
2	100	750
3	150	800
4	200	850
5	225	900
6	275	800
7	100	700

8	31	172	68	105	170
9	29	139	65	135	160
10	25	145	64	140	150
11	23	162	69	115	150
12	52	166	72	125	220
13	51	159	68	135	240
14	48	182	73	140	210
15	47	143	64	110	200
16	36	162	70	125	190
17	33	172	71	125	160
18	31	181	71	140	170
19	29	149	69	135	150
20	48	159	69	130	190

9. Girard Drug, a drug chain with 84 stores wants to forecast sales on the basis of approximate population in each sales territory and on advertising expenditures in each territory. Girard's stores are located in seven separate territories, each of which consists of a large metropolitan area. For the data given below predict the territory sales of Girard Drug on the basis of population in each territory and advertising expenditures using multiple regression with population and advertising expenditures as independent variables.

Territory	Sales in Millions $y$	Population in Millions $x_1$	Advertising Expenditures in Tens of Thousands $x_2$
1	\$6.8	5.4	\$ 5.2
2	7.8	4.6	4.7
3	8.3	8.9	10.2
4	2.2	2.4	2.7
5	7.4	3.8	5.2
6	3.7	1.7	3.3
7	6.9	4.3	5.2

10. The Holsam Corporation wants to know if disposable personal income and industry sales were reliable indicators for forecasting Holsam Corporation sales. Over a period of ten years it had accumulated the data listed below

Year	Holsam Sales in Millions $y$	Disposable Personal Income in Billions $x_1$	Industry Sales in Millions $x_2$
1	\$5.35	1.253	\$51
2	5.40	1.331	53
3	5.55	1.406	56
4	5.65	1.487	58
5	5.65	1.569	59
6	5.75	1.644	60
7	4.95	1.701	62
8	5.20	1.783	63
9	5.25	1.854	62
10	5.35	1.932	65

Using multiple regression, forecast Holsam's sales for the eleventh year if industry sales are expected to increase to 67 million dollars and disposable income is expected to rise to two billion dollars.

4. The daily rates of rejection of a manufactured product are listed below together with the ambient temperature measured from the optimum of 65 degree F., and with the ambient humidity rate also measured from the optimum of 55% of relative humidity

Observation	Rejects	Temperature	Humidity
1	14	-5	+1
2	12	-8	+1
3	16	+1	+4
4	20	+6	+6
5	24	+8	+7
6	29	+12	+14
7	24	+3	+17
8	14	-2	+2
9	16	-7	+1
10	10	-3	-1
11	14	-8	-2
12	8	-2	+3

Run the multiple regression program with the above data to investigate the relation between daily rejection rate and temperature and humidity.

5. For problem 4, suppose you have a third independent variable, batch size. The observations on batch size are (1 to 12) 510, 460, 600, 650, 720, 770, 600, 550, 400, 475, 525, 375. Run the multiple regression program with the added variable, batch size.

6. For problem 2, suppose you have a fourth independent variable, cigarettes smoked per day on average. The number of cigarettes smoked by each of the 12 salesreps are 30, 20, 15, 25, 30, 35, 30, 10, 40, 10, 0, 5. Run the multiple regression program with the added variable, cigarettes smoked per day.

7. State College has decided to do a study of the relationship between college admission tests, performance in school and reported family household income. The question is whether or not there is a statistical relationship between school performance and college admission tests and family income. The results of a random sample of 20 students is shown below. Can school performance be predicted? How?

Student	Test Score	School Performance	Family Income(000)
1	700	3.95	\$60.0
2	550	3.05	45.0
3	540	3.10	47.0
4	590	3.10	47.0
5	610	3.65	52.3
6	620	3.75	55.0
7	615	3.70	53.0
8	605	3.45	47.5
9	695	3.85	48.5
10	645	3.90	65.0
11	585	3.60	60.0
12	545	3.40	55.5
13	515	3.50	56.0
14	560	3.20	40.0
15	640	3.80	57.0
16	510	3.10	35.0
17	595	3.50	40.0
18	590	3.60	42.0
19	610	3.80	59.0
20	540	3.10	48.5

8. A health spa provides ongoing health evaluation services for its members. At each checkup data is collected on, age, weight, height, blood pressure and blood cholesterol. The health spa has collected data on 20 members as shown below. Is there a statistical relationship among the five variables? Can cholesterol level be predicted? Which variables are statistically significant for predicting cholesterol level, if any?

Member	Age	Weight	Height	Blood Pressure	Cholesterol Level
1	25	165	71	110	130
2	27	150	69	120	125
3	39	140	70	140	140
4	35	175	73	130	135
5	42	163	70	120	160
6	26	162	69	110	140
7	38	181	73	115	180

```

Problem Title: FORECASTING

Enter value for TIME:      13
Enter value for X1:      1
Enter value for X2:      0
Enter value for X3:      0

The value of Y is      16.500

More (Y/N) N

```

The forecast for the demand during the first quarter of the fourth year is therefore 16.5. Press <ENTER> to exit the SOLVE option and return to the Regression Menu. At this point, you may move the pointer to QUIT option and either exit to DSSPOM and return to DOS or return to the Main Menu and select another DSSPOM program.

## PROBLEMS

1. You are asked to see if there is a statistical relationship between absentee rate (days absent), years employed, and age of employee. Run the Multiple Regression program with the data below. Interpret.

Observation	Days Absent (Y)	Years Employed (X1)	Age (X2)
1	5	5	30
2	4	15	45
3	2	10	42
4	6	6	30
5	8	8	32
6	6	7	35
7	5	10	40
8	3	2	28
9	7	5	50
10	2	19	54

2. You are asked to check the statistical relationship between annual sales (Y), age of salesperson (X1), years of higher education of salesperson (X2), and days absent (X3). The data are shown below. Interpret.

Observation	Sales (Y)	Age (X1)	Education (X2)	Absence (X3)
1	75	40	4	2
2	65	35	3	5
3	60	50	6	6
4	85	45	2	3
5	80	40	4	2
6	75	40	1	6
7	45	60	6	18
8	90	35	5	2
9	75	35	2	7
10	50	60	4	14
11	45	65	2	9
12	65	50	3	7

3. Run problem 2 again but with the *absent* variable deleted.

	A	B	C	D	E	F
1		DEMAND	TIME	X1	X2	X3
2	Obs1	10.50	1.00	1.00	0.00	0.00
3	Obs2	12.00	2.00	0.00	1.00	0.00
4	Obs3	15.80	3.00	0.00	0.00	1.00
5	Obs4	13.20	4.00	0.00	0.00	0.00
6	Obs5	12.70	5.00	1.00	0.00	0.00
7	Obs6	14.60	6.00	0.00	1.00	0.00
8	Obs7	17.90	7.00	0.00	0.00	1.00
9	Obs8	15.20	8.00	0.00	0.00	0.00
10	Obs9	14.30	9.00	1.00	0.00	0.00
11	Obs10	16.70	10.00	0.00	1.00	0.00
12	Obs11	19.10	11.00	0.00	0.00	1.00
13	Obs12	17.40	12.00	0.00	0.00	0.00

After completing the spread sheet data entry, press <F10> to keep the data and exit from the spread sheet. You can now print the data on the printer to obtain a hard copy printout of the problem and then save the problem on disk for future sessions.

To solve the problem, move the pointer to the SOLVE option and select the Display Output sub-option to display the output reports on the screen. The first display screen reports the regression function coefficients as shown below.

Problem Title: FORECASTING			
Regression Function Coefficients:			
Coeff.	Value	St. Dev.	T-Ratio
B0	11.267	0.303	37.132
B1	0.500	0.029	17.019
B2	-1.267	0.285	-4.439
B3	0.167	0.278	0.600
B4	2.833	0.273	10.380

As seen from the above report, the regression function equation is:

$$\text{Demand} = 11.267 + 0.5t - 1.267 X_1 + 0.167 X_2 + 2.833 X_3$$

Press the <ENTER> key to continue with the ANOVA table report.

Problem Title: FORECASTING			
Analysis of Variance Table			
Source	DF	SS	MS
Regress.	4	72.177	18.044
Residual	7	0.773	0.110
Total	11	72.950	
Coefficient of Determination R-Squared =			0.989
Residual Standard Deviation =			0.332
Predicted Y Values (Y/H) N			

The above results indicate that the regression model is quite strong with a R-squared value of 0.989.

If you wish to examine the predicted values press <Y>. The computer will display the predicted values and associated error terms (This report is skipped in this solved example.)

The program will then ask if you wish to predict another observation. Press <Y> to continue with obtaining the forecast for the desired time period. Note that in this case you wish to forecast the demand during the first quarter of the fourth year. Hence, the values of the independent variables are:

$$t = 13, X_1 = 1, X_2 = X_3 = 0.$$

The completed data entry screen is shown below.

### EXAMPLE 3 - FORECASTING WITH MULTIPLE REGRESSION

This example involves the use of multiple regression in time series forecasting. In particular, multiple regression will be used to account for seasonality in time series analysis. The data in Table 2-2 represents quarterly demand for a seasonal component, collected over a three year period. You will use this data to forecast the demand for the first quarter of the fourth year.

To solve the problem, you must first find the regression function equation which represents the demand. Because the data has been collected on a quarterly basis, you hypothesize that the demand may vary depending on the season as represented by each quarterly period. The forecasting equation then becomes:

$$Y_t = b_0 + b_1 t + b_2 X_1 + b_3 X_2 + b_4 X_3,$$

where,  $Y_t$  is the demand at time  $t$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ , and  $X_3$  are three binary variables used to represent the seasonal (quarter) effect. For example, for time periods corresponding to the first quarter (e.g.,  $t = 1, t = 5, t = 9$ , etc.), let  $X_1 = 1, X_2 = X_3 = 0$ . For time periods corresponding to the second quarters (e.g.,  $t = 2, t = 6, t = 10$ , etc.) let  $X_1 = 0, X_2 = 1$ ,

Table 2-2: Quarterly Demands

Year	Quarter	Demand (in 000)
1	1	10.5
	2	12.0
	3	15.8
	4	13.2
2	1	12.7
	2	14.6
	3	17.9
	4	15.2
3	1	14.3
	2	16.7
	3	19.1
	4	17.4

Table 7-3: Input Data for Multiple Regression

Demand(Y)	Time(t)	X1	X2	X3
10.5	1	1	0	0
12.0	2	0	1	0
15.8	3	0	0	1
13.2	4	0	0	0
12.7	5	1	0	0
14.6	6	0	1	0
17.9	7	0	0	1
15.2	8	0	0	0
14.3	9	1	0	0
16.7	10	0	1	0
19.1	11	0	0	1
17.4	12	0	0	0

and  $X_3 = 0$ . For the third quarters, let  $X_1 = X_2 = 0$ , and  $X_3 = 1$ , and for the fourth quarters let  $X_1 = X_2 = X_3 = 0$ . Table 2-3 represents the completed data which will be entered into the multiple regression program. Note that the problem has 4 independent variables and 12 observations. The initial data entry screen is presented below.

Problem title: FORECASTING

Number of independent variables: 4

Number of observations: 12

Continue with observations (Y/N) Y

Press <ENTER> to continue with the spread sheet data entry. The completed spread sheet is shown below.

Problem title: MULTIPLE REGRESSION  
 Number of independent variables: 3  
 Number of observations: 12

Continue with observations (Y/N) Y

Press <Y> to continue with the spread sheet data entry. Note that the spread sheet now contains one more variable labeled "VAR3" with all observations equal 0. Move the pointer to the variable heading (cell E1) and change it to "WEIGHT". Now move the pointer down and enter the data values for the 12 observations under WEIGHT. The completed spread sheet is presented below.

E13	150				
	A	B	C	D	E
1		CHOLES	AGE	HEIGHT	WEIGHT
2	Obs1	50.00	20.00	67.00	85.00
3	Obs2	100.00	25.00	67.00	110.00
4	Obs3	150.00	20.00	65.00	121.00
5	Obs4	157.00	33.00	60.00	150.00
6	Obs5	600.00	60.00	65.00	317.00
7	Obs6	300.00	26.00	67.00	230.00
8	Obs7	175.00	35.00	78.00	130.00
9	Obs8	476.00	36.00	61.00	268.00
10	Obs9	243.00	41.00	70.00	147.00
11	Obs10	250.00	44.00	71.00	160.00
12	Obs11	198.00	27.00	78.00	132.00
13	Obs12	200.00	33.00	60.00	150.00

After completing the data entry, press <F10> to keep the data and exit from the spread sheet editor.

You are now ready to solve the revised problem. Move the pointer to SOLVE option and select the display output as before. The output reports are shown below.

Problem Title: MULTIPLE REGRESSION  
 Regression Function Coefficients:

Coeff.	Value	St. Dev.	T-Ratio
B0	-283.844	120.878	-2.348
B1	2.335	1.190	1.962
B2	1.738	1.692	1.028
B3	1.982	0.206	9.632

The revised regression function equation is:

$$\text{Cholesterol} = -283.844 + 2.335 (\text{AGE}) + 1.738 (\text{HEIGHT}) + 1.982 (\text{WEIGHT}).$$

The next report will present the analysis of variance table as shown below.

Problem Title: MULTIPLE REGRESSION  
 Analysis of Variance Table

Source	DF	SS	MS
Regress.	3	259476.076	86492.025
Residual	8	7776.841	972.105
Total	11	267252.917	

Coefficient of Determination R-Squared = 0.971  
 Residual Standard Deviation = 31.179

Predicted Y Values (Y/N) N

Notice the increase in the value of R-squared due to the inclusion of the new variable. The regression model can now explain about 97 percent of variance.

Problem Title: MULTIPLE REGRESSION  
Analysis of Variance Table

Source	DF	SS	MS
Regress.	2	169285.847	84642.924
Residual	9	97967.069	10885.230
Total	11	267252.917	

Coefficient of Determination R-Squared = 0.633  
Residual Standard Deviation = 104.332

Predicted Y Values (Y/N) Y

The second output screen consists of the analysis of variance table. In this report you will find a measure of the strength of the relation namely, the coefficient of determination, R-squared. This value is 0.633 which implies that about 63.3 percent of the variance (in Cholesterol) can be explained by variation in AGE and person's HEIGHT.

To examine the predicted values, press <Y>. The following output report will be displayed.

Problem Title: MULTIPLE REGRESSION

Observ.	Actual (Y)	Predicted	Error	ST. Error
Obs1	50.00	102.96	-52.96	-0.51
Obs2	100.00	155.70	-55.70	-0.53
Obs3	150.00	112.69	37.31	0.36
Obs4	157.00	274.18	-117.18	-1.12
Obs5	600.00	534.66	65.34	0.63
Obs6	300.00	166.25	133.75	1.28
Obs7	175.00	207.64	-32.64	-0.31
Obs8	476.00	300.96	175.04	1.68
Obs9	243.00	309.88	-66.88	-0.64
Obs10	250.00	336.66	-86.66	-0.83
Obs11	198.00	123.24	74.76	0.72
Obs12	200.00	274.18	-74.18	-0.71

The computer will then ask you if you wish to predict for another observation.

Wish to determine Y value for an observation (Y/N) Y

To find the cholesterol level for a person of age 55 and 62 inch tall, press <Y> and enter the data in appropriate fields as shown below.

Problem Title: MULTIPLE REGRESSION

Enter value for AGE: 55  
Enter value for HEIGHT: 62  
The value of Y is 496.522

More (Y/N) N

Press <N> to return to the Regression Menu and continue with the next solved example.

### EXAMPLE 2 - ADDING ANOTHER VARIABLE

Suppose you have data on an additional variable (i.e., WEIGHT) for 12 individuals in the above example. The values are 85, 110, 121, 150, 317, 230, 130, 268, 147, 160, 132, and 150 for individuals 1 through 12, respectively. In order to add this new variable to the model, you can invoke the model editor and enter the data. To begin, move the pointer to the EDIT option. The EDIT option has three sub-options, the first one is labeled "Input Data". Press <ENTER> to select this option. The computer will respond by placing the pointer in the existing fields on the screen. You may edit these fields one at a time as desired.

Press the <ENTER> key to accept the current title and move to the next field. Move the cursor one position to the right and type <3> as the number of independent variables. Press <ENTER> once to enter 3 and one more time to accept 12 as the number of observations. The completed display screen is presented below.



Problem title: MULTIPLE REGRESSION  
 Number of independent variables: 2  
 Number of observations: 12

Continue with observations (Y/N) Y

As seen from the above display screen, there are 2 independent variables and 12 observations. The two independent variables correspond to AGE and HEIGHT. Press the <ENTER> key to continue with data entry process. The completed spread sheet is shown below.

A1	A	B	C	D
1		CHOLES	AGE	HEIGHT
2	Obs1	50.00	20.00	67.00
3	Obs2	100.00	25.00	67.00
4	Obs3	150.00	20.00	65.00
5	Obs4	157.00	33.00	60.00
6	Obs5	600.00	60.00	65.00
7	Obs6	300.00	26.00	67.00
8	Obs7	175.00	35.00	78.00
9	Obs8	476.00	36.00	61.00
10	Obs9	243.00	41.00	70.00
11	Obs10	250.00	44.00	71.00
12	Obs11	198.00	27.00	78.00
13	Obs12	200.00	33.00	60.00

Check the data carefully and make sure there are no typing mistakes. Press <F10> to keep the data and exit from the spread sheet editor.

You can now obtain a hard copy printout of the input data by moving the pointer two levels to the right to the PRINT option and press <ENTER>. Make sure that the printer is on and ready before you proceed.

To save the input data on disk, move the pointer to the FILE option and pull the bar down to the "Save current file" sub-option. Now press the <ENTER> key to select this option. The computer will display the current drive and path and will ask you to enter a file name. Press the <END> function to move the cursor to the end of the edit field. Enter a DOS file name to save the data and press <ENTER>. The computer will save the data on disk for future sessions.

You are now ready to solve the problem. Move the pointer to the SOLVE option and select the "Display Output" sub-option. The computer will take a few moments to solve the problem and display the following results.

Problem Title: MULTIPLE REGRESSION			
Regression Function Coefficients:			
Coeff.	Value	St. Dev.	T-Ratio
B0	218.193	364.956	0.598
B1	10.549	2.777	3.798
B2	-4.869	5.175	-0.941

The first screen (above) reports the regression function equation. That is, the estimated value of intercept (b<sub>0</sub>), and the coefficients of the two independent variables AGE (b<sub>1</sub>) and HEIGHT (b<sub>2</sub>) are reported as well as their standard deviations and t scores. As seen from the above report, the intercept is 218.192, the coefficient of AGE is 10.549, and that of HEIGHT is -4.869. The regression function equation is therefore:

$$\text{Cholesterol} = 218.198 + 10.549 (\text{AGE}) - 4.869 (\text{HEIGHT}).$$

Press the <ENTER> key to continue with additional output report as shown below.

## CHAPTER 2

### MULTIPLE REGRESSION

#### INTRODUCTION

Multiple regression allows one to evaluate the statistical relationship between two or more variables. The method also allows the establishment of prediction equations such that one variable, the dependent variable, can be predicted on the basis of one or more other, independent variables. The multiple regression method can be used to forecast sales, costs and other numeric values on the basis of other numeric variables.

Although the statistical relationship between two or more variables is evaluated by the multiple regression technique, the causal relationship is not. Hence, the user of multiple regression must assure him or herself of the relevance of the relationship between two variables. In some cases this is easy and straightforward. In other cases this is not so. For instance, the relationship between price of a product and demand for a product is clearly related, and a solid causal relationship can be assured. The multiple regression analysis will then be able to tell you if a statistical relationship also exists. Sometimes a statistical relationship may exist but a causal relationship cannot be explained or assumed. In that case the relationship should not be used.

#### MULTIPLE REGRESSION ANALYSIS

Multiple regression can be symbolically stated as follows,

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

where Y is the dependent variable which is predicted on the basis of the independent variables  $X_1, X_2, \dots, X_n$ .

For four independent variables the symbolic equation above would be expressed as follows,

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4$$

The coefficients consist of  $\beta_0$ , the intercept and  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ , and  $\beta_4$ .

The purpose of the multiple regression calculation is to estimate the values of the coefficients. Estimates of the coefficients  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ , and  $\beta_4$  are usually written as  $b_0, b_1, b_2, b_3$ , and  $b_4$ .

To estimate the coefficients we need a certain number of observations on the values of

$Y, X_1, X_2, X_3$ , and  $X_4$ . The recommended number of observations is usually about five times the number of independent variables. Hence in the above case one would need about twenty observations. The program described below will take up to 60 observations and will be able to apply the multiple regression technique to up to ten independent variables.

#### EXAMPLE 1 - MULTIPLE REGRESSION

In this example you will use multiple regression to explore the statistical relationship between cholesterol level and age and height. In case there is a significant relation, you can use multiple regression to predict the cholesterol level of a new observation. The data for this example problem is presented in Table 2-1 below.

Table 2-1: Cholesterol Level for 12 Individuals

Cholesterol Level (units)	Age (years)	Height (inches)
50	20	67
100	25	67
150	20	65
157	33	60
600	60	65
300	26	67
175	35	78
476	36	61
243	41	70
250	44	71
198	27	78
200	33	60

Load the DSSPOM into the computer and select Multiple Regression from the Main Menu. After the program has been loaded, move the pointer to the right one level to select the INPUT option. Press <ENTER> to select this option and continue with data entry process as shown below.

- c) Jannie Harmer is also trying to plan its purchasing requirements for its chocolate fudge. Managers had forecasted a stable weekly demand of 16,000 pounds, but only 14,500 were sold last week and 17,000 were sold the week before. Determine what Hannie Harmer's forecast for the week should be using a smoothing constant of 0.10.
- d) The production team went with your forecast in (c) and actual demand turned out to be 16,500 pounds. What forecast will you provide the team with for the following week?

	4 wks. ago	3 wks. ago	2 wks. ago	Last Week
Monday	1800	2000	1900	2000
Tuesday	1600	1700	1800	1800
Wednesday	1900	2000	1900	2100
Thursday	1400	1500	1400	1600
Friday	1500	1400	1700	1600
Saturday	1200	1200	1200	1300
Sunday	1200	1100	1400	1200

13. Lerner Industries cannot decide which forecasting method is best suited to their needs. Demand for the past 11 months is shown below.
- a) Forecast demand for June through November using a 3 month moving average.
- b) Forecast the demand for June through November using exponential smoothing without trend and a smoothing constant of 0.10. Use actual data as the initial forecast.
- c) Compare estimated demand with the actual demand. Based on MAD and MSE, choose the best method and state your reasons.

MONTH	ACTUAL DEMAND	MONTH	ACTUAL DEMAND
January	150	September	130
February	120	October	140
March	110	November	145
April	130		
May	145		
June	105		
July	125		
August	150		

14. Afreka Corporation is involved in their yearly planning session in which they forecast revenues and profits for the remaining part of the year. They have called you in to provide a forecast of weekly and monthly sales figures. Actual sales data from the first half of the year is given below.

- a) Give a monthly forecast for each month in the third quarter of this year. Use an exponential smoothing approach with  $\alpha = 0.10$  and  $\beta = 0.30$ .
- b) Calculate a weekly forecast for the third quarter using the same approach as in (a).
- c) Do both methods produce the same monthly results? If not, which forecasts would you rather have? Why?

	WEEKLY SALES(000)	MONTHLY SALES(000)
January		50.0
1	15.0	
2	7.9	
3	8.1	
4	19.0	
February		56.0
1	21.0	
2	17.0	
3	10.0	
4	8.0	
March		53.0
1	9.5	
2	13.0	
3	14.0	
4	16.5	
April		58.0
1	18.0	
2	16.0	
3	12.0	
4	12.0	
May		56.0
1	12.0	
2	17.0	
3	11.0	
4	16.0	
June		54.0
1	14.0	
2	12.0	
3	11.0	
4	17.0	

- b) Using exponential smoothing with trend what will supply be in the year 1989? Use smoothing constants of 0.2.
- c) What is mean absolute deviation, mean squared error and tracking signal in part b?

Year	Tons(000)	Year	Tons(000)
1979	5.60	1984	8.30
1980	6.10	1985	8.90
1981	6.30	1986	9.50
1982	7.00	1987	10.50
1983	7.50	1988	10.60

9. A health maintenance organization is attempting to project its membership growth over the next three years. Over the past three years it has kept track of quarterly net membership growth. Net membership growth consists of new members, less members who resigned. The net membership growth is shown below.

- a) Using a moving average with four quarters determine what the net membership projections will be in the four quarters of 1989?
- b) Using exponential smoothing with and without trend what will net membership growth be in the first quarter of 1989? Use smoothing constants of 0.3.
- c) What is mean absolute deviation, mean squared error, and tracking signal for the historical data?

Quarter	Membership(000)
1-86	70.119
2-86	73.467
3-86	78.835
4-86	83.911
1-87	85.716
2-87	86.481
3-87	87.329
4-87	92.916
1-88	96.980
2-88	97.453
3-88	97.314
4-88	97.193

10. The Oxford Company is in the process of evaluating its demand forecasting methods. Up through December 1988, the company has used a five month moving average forecast unadjusted for trend. For 1989, it is considering using an exponential smoothing approach adjusted for trend. It is planning to use a smoothing constant of 0.2 for the basic component and 0.4 for the trend component. The following is a history of demand during 1988 for the Oxford Company.

	Year	Sales in
1	1988	Units
1	January	100
2	February	105
3	March	95
4	April	100
5	May	100
6	June	140
7	July	105
8	August	110
9	September	110
10	October	115
11	November	120
12	December	125

Compute the sales forecast (trend adjusted) for June to December 1988 using both the moving average and the exponential smoothing techniques.

11. Determine Mean Absolute Deviation (MAD) and Bias for both the five month moving average and the exponential smoothing model forecasts of the Oxford Company (previous problem).

12. Hannie Harmer Candy Company sells its products through a chain of specialty chocolate stores. It has been prone to high production variation due to forecasting errors by inexperienced management. Below are the demands for pounds of Coconut Clusters in the past 4 weeks. The manufacturing plant is closed on Saturday, so Friday's production must meet the demand for Saturday and Sunday.

Forecast the demand for next week based on the following:

- a) Daily demand using a 3 week moving average.
- b) Daily demand using a weighted average of 0.4, 0.2, and 0.4 for the past 3 weeks.

**PROBLEMS**

1. Apply all forecasting methods, except the decomposition method, to the actual observed values of 20, 25, 27, 24, 23, 29, 26, 27, 28, and 26 for periods 1 to 10 respectively. Set the initial value of the forecast equal to 25 when requested. Use  $\alpha$  and  $\beta$  values of 0.3 and 0.4 respectively and use from 3, 4 and 5 periods in your moving average. Do not use weighting in moving average method.

2. For the data in problem 1 develop a table to show the comparison between the forecast errors of the four forecasting methods as shown below.

Method	MSE	MAD	BIAS	CV
Weighted Moving Average				
Exponential Smoothing No Trend				
Double Exponential Smoothing				
Adaptive Exponential Smoothing				

3. Repeat problem 2 but use the following parameter values,  $\alpha = 0.2$  and  $\beta = 0.3$ . Also for the weighted moving average method use three periods with weights of 0.2 for the most distant period, 0.3 for the middle period and 0.5 for the most recent period.

4. For the set of actual observed data shown below, evaluate the four forecasting methods in the forecasting module. For the moving average method use five periods and equal weights, for the no-trend exponential method use a smoothing constant ( $\alpha$ ) value of 0.2, for the exponential forecasting method with trend use a smoothing constant value of  $\alpha = 0.2$  and a trend smoothing constant of  $\beta = 0.1$ , and for adaptive smoothing set the initial forecast to 100. The actual observed data for periods 1 to 10 are respectively: 110, 95, 85, 110, 100, 98, 97, 108, 106, and 104.

5. You are provided with historical monthly sales figures for the year 1987 consisting of 85, 90, 95, 98, 100, 110, 115, 112, 106, 120, 125, and 124 units respectively for the months January through December. Using a trend adjusted exponential smoothing model, what is the sales forecast for January, 1988? Would you recommend a trend or a no-trend exponential smoothing forecasting method for the data in this problem? Use  $\alpha = 0.3$  and  $\beta = 0.2$ .

6. For problem 5 use an adaptive smoothing forecasting model with initial forecast equal to 100. Compare the error measures with problem 5 error measures.

7. Apply the decomposition forecasting method to the following set of historical data

Year	Quarter	Units	Year	Quarter	Units
1	1	1020	2	3	1600
1	2	900	2	4	240
1	3	1500	3	1	1160
1	4	210	3	2	950
2	1	1080	3	3	1700
2	2	910	3	4	250

8. A canning factory contracts with local tomato growers for a specified acreage of tomatoes every year. The number of acres contracted has increased at the rate of about 10 percent per year and management of the canning factory plans to continue the 10 percent annual increase in acreage in the future. Based on the contracted acreage, the tomato growers can deliver their entire crop to the canning factory at an agreed upon price. Management of the canning factory would like to project a trend of tomato processing volume into the future to determine what plant additions are required in the future. The tomato supply in tons per year is shown below for the past 10 years.

a) Using four year moving average what will supply be in 1989?

Problem Title: SOFTWARE SALES				
Time	Actual	Forecast	Error	Tracking Signal
1	700.000	704.369	-4.37	-1.00
2	725.000	719.222	5.78	0.28
3	720.000	721.149	-1.15	0.07
4	730.000	729.343	0.66	0.31
5	740.000	736.583	3.42	1.41
6	745.000	751.744	-6.74	-0.65
7	760.000	753.393	6.61	1.02
8	755.000	761.593	-6.59	-0.54
9	770.000	768.798	1.20	-0.29
10	785.000	784.265	0.73	-0.12

Problem Title: SOFTWARE SALES				
Time	Actual	Forecast	Error	Tracking Signal
11	780.000	785.638	-5.64	-1.56
12	800.000	793.843	6.16	0.01
13		801.906		

MSE = 24.56    MAD = 4.09    Bias = -0.01  
Coefficient of variation = 0.01

As seen from the above output report, the decomposition technique is by far the most accurate forecasting technique (for the time series data at hand) than those used in earlier examples. The value of MSE in this case is 24.56 with a MAD of 4.09 and bias equal -0.01.

### EXAMPLE 5 - ADAPTIVE SMOOTHING

This example involves the use of adaptive smoothing to obtain a forecast for the software sales data. Move the pointer to the SOLVE option and select the display output sub-option. When presented with the menu of solution techniques, move the bar to the last

row, "Adaptive Expon. Smooth.", and press <ENTER>. The computer will ask if you have an initial forecast. Press <N> to continue. The computer will then inform you that the first data point will be used as the initial forecast. Press <ENTER> to continue with the output report as shown below.

Problem Title: SOFTWARE SALES					
Time	Actual	Forecast	Error	Tracking Signal	Alpha
1	700.000				
2	725.000	700.000	25.00	1.00	1.000
3	720.000	725.000	-5.00	1.33	1.000
4	730.000	720.000	10.00	2.25	0.994
5	740.000	729.945	10.06	3.20	0.995
6	745.000	739.945	5.05	4.09	0.995
7	760.000	744.973	15.03	5.14	0.995
8	755.000	759.919	-4.92	5.15	0.995
9	770.000	755.026	14.97	6.24	0.979
10	785.000	769.686	15.31	7.31	0.980

Problem Title: SOFTWARE SALES					
Time	Actual	Forecast	Error	Tracking Signal	Alpha
11	780.000	784.688	-4.69	7.34	0.980
12	800.000	780.092	19.91	8.53	0.954
13		799.075			0.957

MSE = 200.37    MAD = 11.81    Bias = -9.16  
Coefficient of variation = 0.02

As seen from the above report, the adaptive exponential smoothing is not as appropriate as the previous forecasting technique for the time series data at hand. The mean squared error is much larger and the forecast is somewhat more biased.

Problem Title: SOFTWARE SALES

Do you wish to see the deseasonalized data (Y/N) Y

Press <Y> to obtain a report of the deseasonalized data as shown below.

Problem Title: SOFTWARE SALES				
Time	Actual	Trend	Ratio	Deseasonalized
1	700.000	706.410	0.99	702.03
2	725.000	714.487	1.01	720.23
3	720.000	722.564	1.00	721.41
4	730.000	730.641	1.00	731.30
5	740.000	738.718	1.00	742.14
6	745.000	746.795	1.00	740.10
7	760.000	754.872	1.01	761.49
8	755.000	762.949	0.99	756.34
9	770.000	771.026	1.00	772.23
10	785.000	779.103	1.01	779.83
11	780.000	787.179	0.99	781.53
12	800.000	795.256	1.01	801.42

The next output report includes the trend equation. This equation is the usual linear regression line through the data points as shown below.

Problem Title: SOFTWARE SALES				
Time	Actual	Trend	Ratio	Deseasonalized
-----				
The trend equation is: Intercept = 698.333 , Slope = 8.077				

The slope of the regression line represents the annual rate of growth in sales. The computer will then ask if you wish to forecast for another time period. Press <Y> to continue.

Problem Title: SOFTWARE SALES

Forecast for another time period (Y/N) Y

Next, enter 13 and press <ENTER> to obtain the forecast for time period 13 as shown below.

Problem Title: SOFTWARE SALES	
Enter the time period: 13	
For time period: 13	
Trend = 803.33	
Forecast = 801.01	
Forecast for another time period (Y/N) N	

As seen from the above output report, the forecast for time period 13, or the first quarter of the fourth year, is 801.01 with a trend value of 803.33. Next, press <N> to continue with the solution process as shown below.

The computer will report that the initial data will be used as initial forecast. It will then present the output report as shown below.

Problem Title: SOFTWARE SALES

Time	Actual	Forecast	Error	Tracking Signal
1	700.000			
2	725.000	700.000	25.00	1.00
3	720.000	720.000	0.00	2.00
4	730.000	724.000	6.00	3.00
5	740.000	732.800	7.20	4.00
6	745.000	743.520	1.48	5.00
7	760.000	750.816	9.18	6.00
8	755.000	764.512	-9.51	4.72
9	770.000	764.721	5.28	5.61
10	785.000	775.240	9.76	6.67

Problem Title: SOFTWARE SALES

Time	Actual	Forecast	Error	Tracking Signal
11	780.000	790.189	-10.19	5.29
12	800.000	790.740	9.26	6.33
13		805.220		

MSE = 120.25    MAD = 8.44    Bias = -4.86  
 Coefficient of variation = 0.01

Note that the above forecast is even more accurate than the previous two. The mean squared error is about 120 with a mean absolute deviation of 8.44. The forecast for time period 13 is 805.22.

### EXAMPLE 4 - TIME SERIES DECOMPOSITION

When time series data is influenced by variations due change in seasons, a time series decomposition, accounting for seasonal variations, may result in a better forecast. For the above example, suppose that the data represent quarterly sales, collected over a 3 year period. Obtain a seasonally-adjusted forecast for the first quarter of the fourth year (time period 13).

To solve this problem, move the pointer to the SOLVE option and select the display output sub-option. When presented with the menu of solution techniques, select the "Decomposition Method". The computer will ask you to enter the number of seasons per year. Enter 4 for this value and press <ENTER> as shown below.

Number of seasons per year 4

The computer will continue the solution process by reporting the seasonal indexes as shown below.

The seasonal indices are:

Season	Index
1	0.997
2	1.007
3	0.998
4	0.998

Seasonal indexes indicate the variation in the data as a percentage of trend. For example, the first seasonal index is 0.997. This value implies that the sales during the first quarter is about 99.7 percent of the trend. The four seasonal relatives presented above, indicate that variation in sales due to seasonality is not substantial (all four indexes are close to 1). Press <ENTER> to continue with the solution process. The computer will ask if you wish to see the deseasonalized data as shown below.



**EXAMPLE 2 - USING EXPONENTIAL SMOOTHING**

The previous forecast appears to have a relatively large MSE. Try to obtain a better forecast by utilizing exponential smoothing. Move the pointer to the SOLVE option and select the "Display output" sub-option. When presented with the menu of the solution techniques, pull the bar down two levels to "Exponential Smoothing", and press the <ENTER> key (process not shown here). The computer will continue the solution process by asking you to enter a smoothing constant. Use a smoothing constant of 0.40 and press <N> to indicate that there is no initial forecast as shown below.

Enter the Smoothing Constant 0.40

Do you have an initial forecast (Y/N) N

The computer will report that the initial data will be used as the initial forecast as shown below.

Initial data will be used as initial forecast.

Press a key to continue and obtain the following solution report.

Problem Title: SOFTWARE SALES				
Time	Actual	Forecast	Error	Tracking Signal
1	700.000			
2	725.000	700.000	25.00	1.00
3	720.000	710.000	10.00	2.00
4	730.000	714.000	16.00	3.00
5	740.000	720.400	19.60	4.00
6	745.000	728.240	16.76	5.00
7	760.000	734.944	25.06	6.00
8	755.000	744.966	10.03	7.00
9	770.000	748.980	21.02	8.00
10	785.000	757.388	27.61	9.00

Problem Title: SOFTWARE SALES				
Time	Actual	Forecast	Error	Tracking Signal
11	780.000	768.433	11.57	10.00
12	800.000	773.060	26.94	11.00
13		783.836		

MSE = 443.84 MAD = 19.05 Bias = -19.05  
Coefficient of variation = 0.03

As seen from the above output reports, the exponential smoothing forecast with a constant of 0.4 is performing better than the earlier forecast. In this case, MSE is 443.84 and MAD is 19.05. The BIAS of the forecast is also slightly better than the earlier forecast and is equal -19.05.

**EXAMPLE 3 - USING EXPONENTIAL SMOOTHING WITH TREND**

This example involves using the exponential smoothing technique again but this time include a trend component. Move the pointer to the SOLVE option and select the display output sub-option. From the menu of solution techniques, select the "Expon. Smooth. & Trend" option. The computer will ask you to enter two smoothing constants: one for single smoothing; and a second for double smoothing. Enter 0.40 for both as shown below.

Enter the Single Smoothing Constant 0.40

Enter the Double Smoothing Constant 0.40

Do you have an initial forecast (Y/N) N

Input Edit Print File Solve Quit

Display output  
Print output  
Save output

The computer will begin the solution process by displaying several solution techniques as shown below.

Weighted Moving Average  
Decomposition Method  
Exponential Smoothing  
Expon. Smooth. & Trend  
Adaptive Expon. Smooth.

Use the arrow keys to highlight a method, press the ENTER key to forecast ESC to exit.

The first forecasting option is weighted moving average. Select this option by pressing the <ENTER> key. The computer will request the number of terms and also inquire if the weights are equal. Use a 4-period equally weighted forecast. The completed screen is shown below.

Number of terms to average 4

Are the weights equal (Y/N) Y

The computer will resume the solution process by displaying the following output report.

Problem Title: SOFTWARE SALES

Time	Actual	Forecast	Error	Tracking Signal
1	700.000			
2	725.000			
3	720.000			
4	730.000			
5	740.000	718.750	21.25	1.00
6	745.000	728.750	16.25	2.00
7	760.000	733.750	26.25	3.00
8	755.000	743.750	11.25	4.00
9	770.000	750.000	20.00	5.00
10	785.000	757.500	27.50	6.00

Problem Title: SOFTWARE SALES

Time	Actual	Forecast	Error	Tracking Signal
11	780.000	767.500	12.50	7.00
12	800.000	772.500	27.50	8.00
13		783.750		

MSE = 514.29 MAD = 20.31 Bias = -20.31  
Coefficient of variation = 0.03

Based on the above report, the forecast for time period 13 is 783.75. The forecast has mean squared error equal 514.29, mean absolute deviation is 20.31, a bias of -20.31, and the coefficient of variation is 0.03.

## SOLVED EXAMPLE - TIME SERIES FORECASTING

To demonstrate the use of the Time Series Forecasting Program, suppose the sales for a software package over the past 12 months are shown below. The objective of this program is to forecast the sales volume for the software for the 13th month using the methods of Moving Averages, Decomposition Method, Exponential Smoothing (with and without trend), and Adaptive Exponential Smoothing

Month	Sales Volume (Units)
1	700
2	725
3	720
4	730
5	740
6	745
7	760
8	755
9	770
10	785
11	780
12	800

To begin the forecasting process, load the DSSPOM program into the computer and select the "Time Series Forecasting" program from the Main Menu. The computer will pause for a few seconds and then display the Forecast Menu. Move the pointer to the INPUT option and press <ENTER> to select this option. The program will begin the data input process by moving the pointer to the title field. Type "SOFTWARE SALES" and press <ENTER>. The program will then ask for the number of data points. This problem has 12 data points, enter "12" and press <ENTER>. The input data screen is shown below.

Problem title: SOFTWARE SALES

Number of observations: 12

Enter problem parameters as requested. Press RETURN to accept, or ESC to exit. Maximum problem size is 50 data points, observations should be within -9999 and 9999.

The computer will then ask if you wish to continue to enter the data points as shown below.

Continue with the observations (Y/N) Y

Press <Y> to continue with the data entry process. The computer will then display a spread sheet editor for the data entry. The first column of the spread sheet (column A) has been initialized with the 12 time periods and contains numbers 1,2,...,12. The second column (column B) is entitled "Value". Move the pointer to cell B2 to enter the first data point. Press the <ENTER> key and move the pointer to cell B3 to enter the second data point. Repeat the process and enter all of the 12 data points. The completed spread sheet data entry screen is shown below.

A1	Period	A	B
1	Period	Value	
2	1	700.00	
3	2	725.00	
4	3	720.00	
5	4	730.00	
6	5	740.00	
7	6	745.00	
8	7	760.00	
9	8	755.00	
10	9	770.00	
11	10	785.00	
12	11	780.00	
13	12	800.00	

After completing the data entry process, press <F10> to keep the data in memory and exit the spread sheet editor.

You may obtain a hard copy printout of the input data by moving the pointer to the PRINT option and press <ENTER>. Be sure that the printer is ON and Ready. After obtaining a hard copy printout, examine it carefully for possible typing mistakes. If the input data contains an error, move the pointer to the EDIT option and press the <ENTER> key. The program will resume the edit process. The edit process is exactly the same as the initial data input process. Complete the editing and return to the Forecast Menu.

You are now ready to solve the problem. Begin the forecasting process by moving the pointer to the SOLVE option. The program will display three sub-options: 1- Display output; 2-Print output; and 3-Save output. Initially the first option is high-lighted. Press the <ENTER> key to choose this option as shown below.

## MEASURES OF ERROR

The Forecasting program will present several error measures. These measures will be illustrated below. We shall present six forecasts for six periods, the actual values for the six periods, and the forecast errors and their measures for the six periods.

The table shows data points for the six periods. Note that the error measure,  $E_t$ , is the difference between the actual value and the forecast.

Period (t)	Actual ( $A_t$ )	Forecast ( $F_t$ )	Forecast Error ( $E_t$ )
1	177	180	-3
2	206	185	+21
3	182	190	-8
4	193	186	+7
5	175	187	-12
6	201	182	+19
Totals	1134	1110	+24

The first error measure is the mean squared error (MSE) which is determined from the actual observations ( $A_t$ ), the forecasts ( $F_t$ ) and the number of observations  $n$ . The formula used is,

$$MSE = \frac{\sum (A_t - F_t)^2}{n - 1} = \frac{1068}{5} = 213.6$$

The mean squared error provides a measure of the squares of the errors. In other words large errors carry more weight than small errors.

The second error measure is the mean absolute deviation (MAD). It is determined by the formula,

$$MAD = \frac{\sum |A_t - F_t|}{n} = \frac{70}{6} = 11.67.$$

The mean absolute deviation is the average of each error regardless of whether the forecast was too high or too low.

The third error measure identifies the bias of the forecast (BIAS). It identifies to what extent the forecast is too high or too low, on average. It is determined by the formula,

$$BIAS = \frac{\sum (F_t - A_t)}{n} = \frac{-24}{6} = -4$$

If the BIAS is positive the forecast is too high on average, while if the BIAS is negative, the forecast is too low on average.

The fourth error measure is the tracking signal (TS). The tracking signal focuses on the ratio of the cumulative forecast error to the corresponding value of the mean absolute deviation (MAD). It is found by the formula,

$$TS_t = \frac{\sum (A_t - F_t)}{MAD_t}$$

for  $t = 3$ ,

$$TS_3 = \frac{-3 + 21 - 8}{(3 - 21 + 8)/3} = 0.94.$$

The fifth error measure is the coefficient of variation (CV). The coefficient of variation is the ratio between the standard deviation and the mean of the actual observed values. It is determined by the formula,

$$CV = \frac{\sqrt{MSE}}{\sum (A_t)/n} = \frac{\sqrt{213.6}}{1134/6} = 0.077$$

The coefficient of variation modifies the square root of the errors by the average magnitude of the actual variation in observed values. As such, it is used as a comparison measure when comparing forecasts based on different sets of data.

determined by the formula,

$$E_t = \beta(A_t - F_t) + (1 - \beta)E_{t-1}$$

where  $\beta$  is a value between 0 and 1.

Similarly, the modified form of the absolute value of the forecast error can be determined by the formula,

$$M_t = \beta |A_t - F_t| + (1 - \beta)M_{t-1}$$

where  $\beta$  is again a value between 0 and 1. Selection of the value for  $\beta$  is determined by the forecaster. A reasonable value is 0.1 or 0.2. With  $\beta = 0.2$ , the weight given to the most recent forecast error is 20 percent and the aggregate of earlier errors is given a weight of 80 percent.

To apply the adaptive exponential smoothing method the forecaster must provide an initial forecast value. Otherwise, the DSS program will use the initial data as the initial forecast.

Suppose the following data is available for actual sales of a product in periods 1 through 8. That is  $A_1 = 150$ ,  $A_2 = 160$ ,  $A_3 = 145$ ,  $A_4 = 155$ ,  $A_5 = 165$ ,  $A_6 = 150$ ,  $A_7 = 170$ , and  $A_8 = 175$ . Also let  $\beta = 0.2$ , and set  $F_1 = E_0 = M_0 = A_1 = 150$ , and  $\alpha_1 = 1.0$ . Then,

$$F_2 = \alpha_1 A_1 + (1 - \alpha_1)F_1 = 150 + 0 = 150$$

$$E_1 = \beta(A_1 - F_1) + (1 - \beta)E_0 = 0.2(150 - 150) + 0.8(150) = 120$$

$$M_1 = \beta |A_1 - F_1| + (1 - \beta)M_0 = 0.2|150 - 150| + 0.8(150) = 120$$

$$\alpha_2 = \frac{|E_1|}{|M_1|} = \frac{|120|}{|120|} = 1$$

$$F_3 = \alpha_2 A_2 + (1 - \alpha_2)F_2 = 160 + 0 = 160$$

The forecast for period 3 is therefore 160 units. We now proceed to make the forecast for period 4 by the same approach as shown above.

$$E_2 = \beta(A_2 - F_2) + (1 - \beta)E_1 = 0.2(160 - 150) + 0.8(120) = 98$$

$$M_2 = \beta |A_2 - F_2| + (1 - \beta)M_1 = 0.2|160 - 150| + 0.8(120) = 98$$

$$\alpha_3 = \frac{|E_2|}{|M_2|} = \frac{|98|}{|98|} = 1$$

$$F_4 = \alpha_3 A_3 + (1 - \alpha_3)F_3 = 145 + 0 = 145$$

The forecast for period 4 is then 145 units. The computations for periods 5, 6, 7, and 8 are shown in Table 1-1.

Period t	Actual observed $A_t$	Forecast $F_t$	Smoothed error $E_t$	Modified error $M_t$	Adjusted constant $\alpha_t$
1	150	150.00	120.0	120.0	
2	160	150.00	98.0	98.0	1.000
3	145	160.00	75.4	81.4	1.000
4	155	145.00	62.3	67.1	0.926
5	165	154.26	52.0	55.8	0.928
6	150	164.23	38.7	47.5	0.931
7	170	150.98	34.8	41.8	0.815
8	175	166.49	29.5	35.1	0.832
9		173.57			0.841

Table 1-1: Illustration of Adaptive Exponential Smoothing

From the above illustration, one may observe that initially the smoothing constant,  $\alpha_1$ , has a rather high value which then declines to lower values. If the difference between the actual and the forecast remains small over a period of time, the value of  $\alpha_t$  will increase towards its maximum value of 1.

$$S_{t-2}^* = \beta S_{t-2} + (1-\beta)S_{t-3}^*$$

In the above formulas  $\alpha$  and  $\beta$  are the single and double smoothing constants respectively. Each constant has a value between 0 and 1, and each is usually set at 0.1 or 0.2. Note that to start up the forecasting sequence requires estimates for  $S_{t-2}^*$  and  $S_{t-3}^*$ . One way to obtain these estimates is to set  $S_{t-2}^*$  equal to  $S_{t-3}^*$  and use the average of the actual values over the past three or four periods.

To illustrate the double exponential smoothing forecasting method we shall continue with the actual observed values of the previous example. The observed values for periods 1, 2 and 3 are 25, 30 and 28 respectively. Using double exponential smoothing we will forecast demand in period 4,  $F_4$ , with the formula,

$$F_4 = 2S_3 - S_2^*$$

First we must determine  $S_3^*$  and  $S_2^*$  by their respective formulas. We use values of 0.2 and 0.1 for  $\alpha$  and  $\beta$  respectively. The formula for  $S_3^*$  is,

$$S_3^* = \alpha A_3 + (1-\beta)S_2^*$$

and the formula for  $S_2^*$  is,

$$S_2^* = \beta S_2 + (1-\beta)S_1^*$$

For estimates of  $S_2^*$  and  $S_1^*$  we will use the value 30, which is based on recent actual sales levels. We then obtain,

$$S_3^* = 0.2(28) + 0.8(30) = 29.6$$

$$S_2^* = 0.1(30) + 0.9(30) = 30$$

$$F_4 = 2(29.6) - 30 = 29.2$$

where  $F_4$  is the forecast for period 4.

## DECOMPOSITION METHOD

The decomposition method takes into account both additive trend effects and multiplicative seasonal effects. The method decomposes the time series into a component

for each season from which a seasonal index or seasonal relative can be generated. For applications where seasonality is critical decomposition is an important and often used method. Other techniques which do not consider seasonal effects will give inaccurate results.

The decomposition method uses linear regression whereby the slope of the linear regression line determines the additive trend. Alternatively, a centered moving average can also be used. The forecast then provides the seasonal index or seasonal relative for each season, the trend value, the ratio of actual to trend, the deseasonalized data, the forecast, the forecast error and the tracking signal. Also provided for the entire forecast horizon are the mean squared error (MSE), the mean absolute deviation (MAD), the bias of the forecast (BIAS), and the coefficient of variation. If requested, a plot of the data and of the forecasts can also be displayed (error measures are discussed below).

The above information is all based on a historical time series of data which must be provided to DSS. Based on the historical data, estimates of the parameters are calculated as stated above. If a forecast for a future period is required, the forecaster then only needs to provide the computer with the time period for which the forecast is required.

## ADAPTIVE EXPONENTIAL SMOOTHING

In adaptive exponential smoothing the computer program determines the value of the smoothing constant on the basis of past forecast errors. The constant itself is then adjusted by applying exponential smoothing to a modified form of the forecast error as well as to a modified form of the absolute value of the forecast error.

The forecast equation is given as,

$$F_{t+1} = F_t + \alpha_t(A_t - F_t)$$

where  $F_t$  is the forecast for period  $t$ ,  $A_t$  is the actual value for period  $t$ , and  $\alpha_t$  is the smoothing constant in period  $t$ . The smoothing constant  $\alpha_t$  is determined by the formula,

$$\alpha_{t+1} = \frac{|E_t|}{|M_t|}$$

where  $E_t$  is a modified form of the forecast error and  $M_t$  is a modified form of the absolute value of the forecast error. As a result  $E_t$  can be any value and  $M_t$  can only be non-negative. However, since absolute values are used for  $E_t$  and  $M_t$ , the value for  $\alpha_t$  will always be positive.  $\alpha_t$  is also  $\leq 1$ . The modified form of the forecast error,  $E_t$ , can be

weights can vary in each of the  $n$  periods. However, if the weights vary, the weights must sum to one (1).

Suppose that we need to make a forecast for period 4 on the basis of historical data for the prior three periods (i.e.,  $n = 3$ ). Also suppose that the weight for period 1 is 0.2, for period 2 is 0.3, and for period 3 is 0.5. The actual observed values for periods 1, 2, and 3 are 25, 30 and 28 respectively. What is the forecast for period 4 using the weighted moving average forecasting method? The forecast for period 4 will then be determined by the formula,

$$F_4 = 0.2(25) + 0.3(30) + 0.5(28) = 28$$

$F_4$  or 28 is the forecast for period 4.

### EXPONENTIAL SMOOTHING FORECASTING WITHOUT TREND

Exponential smoothing is a more complex form of moving average forecasting. In exponential smoothing, theoretically, all actual historical values are considered in the forecast. Hence, instead of just basing a forecast on the most recent three or four periods, a much longer history of data is considered. Features of exponential smoothing are the relative ease of calculation, and the small amount of historical data needed to calculate the next term in the forecast.

The formula for exponential smoothing forecast is of the following form,

$$F_t = \alpha A_{t-1} + (1 - \alpha)F_{t-1}$$

where  $F_t$  is the forecast for period  $t$ ,  $A_{t-1}$  is the actual observed value in the previous period ( $t - 1$ ) and  $F_{t-1}$  is the forecast made for the previous period. The coefficient  $\alpha$  is a weight between 0 and 1, and is usually set at 0.1 or 0.2. Larger values of  $\alpha$  attach more importance to more recent actual values and smaller values of  $\alpha$  use a larger sequence of historical data.

To begin using the exponential forecasting method it is necessary to have a beginning value for  $F_{t-1}$ . One way of estimating the value for  $F_{t-1}$  is to use the actual observed value of  $A_{t-2}$ . Then the first forecast will be based on the last two actual observed values.

To illustrate the exponential smoothing forecasting method we shall use the actual observed values of the previous example. The actual observed values for periods 1, 2, and

3 were 25, 30, and 28 respectively. Using an  $\alpha$  value of 0.2 we shall now use the exponential smoothing method to forecast  $F_3$  for period 3. We then find,

$$F_3 = \alpha A_2 + (1 - \alpha)F_2$$

but since we let  $F_2 = A_1$  the formula becomes,

$$\begin{aligned} F_3 &= \alpha A_2 + (1 - \alpha)A_1 \\ F_3 &= 0.2(30) + 0.8(25) = 26 \end{aligned}$$

Since the actual observed value for period 3 is 28, the forecast for period 4,  $F_4$ , can be determined by the formula,

$$\begin{aligned} F_4 &= \alpha A_3 + (1 - \alpha)F_3 \\ F_4 &= 0.2(28) + 0.8(26) = 26.4 \end{aligned}$$

As one can observe from the above examples, the three items of data that enter each exponential smoothing forecasting equation are the most recent actual observed values ( $A_{t-1}$ ), the smoothing constant ( $\alpha$ ), and the previous forecasted value ( $F_{t-1}$ ). Hence, once the forecasting process has begun, it is rather straightforward to continue it each period.

### DOUBLE EXPONENTIAL SMOOTHING - TREND EFFECTS

Double exponential smoothing will smooth the variation in the forecast more and pick up trend changes quicker than the single exponential smoothing method shown in the previous section. The double exponential smoothing forecast for period  $t$  is  $F_t$ . It is found by the formula,

$$F_t = 2S'_{t-1} - S''_{t-2}$$

where  $S'_{t-1}$  is the single exponential smoothed value. It is found by the formula,

$$S'_{t-1} = \alpha A_{t-1} + (1 - \alpha)S'_{t-2}$$

Similarly, the double exponential smoothed value  $S''_{t-2}$  can be found by the formula,

The Time Series Analysis module includes three new forecasting techniques and also reports various error terms. The Multiple Regression module allows the user to input their own variable names.

Both Transportation and Assignment modules allow the user to input row names and column names. Further, the user can request the intermediate solutions.

The new Decision Analysis module provides decision trees and decision tables. The user can input his/her own alternative names and states of nature.

The Location Analysis and Layout Analysis modules allow user defined row and column labels. Further, a new solution option is available which enables the user to perform pairwise exchanges of the departments to perform "what if" analysis.

The Line Balancing module allows user defined labels and also provides for entering the desired cycle time.

The Aggregate Planning module has been extended to allow multiple product problems. The solution output consists of the production schedules as well as cost summary. Various type of capacities such as regular time, overtime, and sub-contracting are available.

The Inventory Analysis includes new stochastic demand model. The solution output has been extended to include reports of various cost components.

The MRP module has been extended to include multi-product problems. It also allows lot-size, lot-for-lot, and period order quantity ordering. The solution output has been extended to include various cost components.

The Project Management module now includes time cost tradeoffs (or crashing). The Quality Assurance module now reports the samples which are out of control.

## CHAPTER 1

### FORECASTING ANALYSIS - TIME SERIES

#### INTRODUCTION

There are a variety of techniques for forecasting on the basis of past historical data. These historical data are usually referred to as time series since they consist of a series of actual figures over a past time period.

Much research has been done to find the best forecasting method based on the squared error minimization criterion. The search for the best method has been difficult because some forecasting methods work better on certain sets of historical data than other methods. Hence, the best forecasting method can usually be found after the data has been generated, not before.

Not all forecasting methods are equally easy to apply. Some are more difficult to apply as well as to understand. Some of the complex forecasting methods may give only marginally lower forecast error rates than the easier-to-apply and easier-to-understand methods. Because of their ease of application, the easier-to-apply and easier-to-understand forecasting techniques are usually more popular.

In this chapter we shall present computer models for time series forecasting which use relatively easy to understand methods. They consist of the weighted moving average, the exponential smoothing method without trend, and the exponential smoothing method with trend effects. Also included are the decomposition method and the adaptive exponential smoothing method. The user thus has a choice of five techniques for application to production problems.

We shall explain how each method works starting with weighted moving average forecasting method.

#### WEIGHTED MOVING AVERAGE FORECASTING

Weighted moving average forecasting uses the weighted average of the most recent  $n$  periods. The value for  $n$  must be determined by the decision maker but is usually relatively small, say 3 or 4. The term "moving" is used because as each subsequent period forecast is made, it is based on the most recent  $n$  periods and the  $n$  periods thus move along the time series chain. The weights can be equal for each of the  $n$  periods or the



The Inventory Analysis module provides the minimum cost solutions for the following inventory models:

- A-Economic Lot Size without shortage
- B-Economic Lot Size with shortage
- C-Economic Run Size without shortage
- D-Economic Run Size with shortage
- E-Economic Lot Size model with quantity discounts
- F-Stochastic Demand model with lead-time

For each model, the program reports the optimum order quantity, total cost, holding cost, setup or order cost, and length of the cycle.

### Material Requirements Planning

This module solves the multi-item material requirements planning (MRP) problem. The problem may include up to 5 end-items, 30 parts, and 26 periods. Components may include up to 4 sub-components. The input data consist of the master production schedule, bill of materials, inventory record file, and scheduled receipts. Items can be ordered according to lot-for-lot, lot-size, and/or period order quantity policy. Output consists of the time phase plan and cost report for all components or a selected component.

### Project Management

The Project Management module solves project management problems using the activity on arc method for up to 30 events and 50 activities using PERT/CPM. Both deterministic activity times and three level time estimate problems can be solved. Events (nodes) must be numbered from 1 to N, with the beginning event as node 1 and the ending event as node N. Each activity also receives a separate number although it can also be identified by its two end nodes. To speed up a project, individual activities can be speeded up (crashed) through time cost trade-offs.

### Quality Assurance

The Quality Assurance module provides the parameters and helps solve two quality control models: the acceptance sampling model and the process control model. The acceptance sampling model provides data to plot the operating characteristics curve and the average outgoing quality curve on the basis of the inputs: lot size, sample size and number of acceptable defectives in sample. The process control model provides the mean and the lower and upper control limits for mean, range, and p and c control charts on the basis of number of defectives found in each of the specified samples.

## CHANGES FROM THE FIRST EDITION

Based on the feedback from the users, we have modified and extended DSSPOM extensively. In revising the package, our main goals have been to make the software more user friendly, add to the substance, and increase the number and quality of the end-of-chapter problems. The major modifications are described below

### Data Entry Modifications

The primary change in the data entry process is the replacement of the prompted input with a spread sheet type data input process. Using a spread sheet, for the data entry process, is both easy to learn and easy to use. The spread sheet data editor, incorporated in the new version, is almost self-explanatory and does not require referring to the text. More importantly, the same spread sheet editor is used in all of the modules. Consequently, learning the spread sheet data entry process in one module will significantly decrease the amount of time needed to learn its use in other modules.

Another improvement in the data entry process involves using various mechanisms to avoid unnecessary typing. For example, in the Layout Analysis and Location Analysis modules, when the matrix is symmetric, the mirror image need not be entered. As another example, in the Aggregate Planning module, when the demand forecasts (or other parameters) for all of the time periods are the same, the value for the first time period is entered and the remaining values are left as default "...". The editor will recognize the default values as being the same as that of the first period

### Program Extensions

Several new features have been added to the modules in the first edition and a new module "Decision Analysis" has been added. The new features are extensive, we present a summary of the major improvements below.

An important improvement, common to all of the modules, includes the ability to both print the solution output on the printer and save the output in a disk file. A file management utility has been added which provides file copying, file renaming, file deleting, listing the directory, and changing the directory.

Another improvement, common to all of the modules, consists of availability of a "context sensitive" help facility. The function key <F1> has been used to provide help for all of the menu options and sub-options. The user can obtain help by moving the pointer to a desired option or sub-option and press <F1>. A calculator is also available for you convenience. To invoke the calculator, press <F2> while the common menu is being displayed.

The second module performs multiple regression with up to 10 independent variables and 60 observations. The output consists of the regression function coefficients, standard deviations of coefficients, and t-statistics. It also provides the analysis of variance table, coefficients of determination, and predicted values.

#### Decision Analysis

The third module solves decision analysis problems utilizing decision trees and decision tables. For decision trees, with up to 50 branches, the conditional payoffs as well as the optimum alternative is provided. For decision tables, with up to 20 alternatives and 20 states of nature, decision analysis under uncertainty and under risk is performed. A decision matrix is used for decision tables with the rows representing the alternative actions and the columns representing the states of nature.

#### Linear Programming

The Linear Programming module uses the regular simplex method to solve problems of up to 50 variables and 30 constraints. The problem can be in MIN or MAX form, subject to equality, less than or equal to, and/or greater than or equal to constraints. The output consists of the optimal objective value, values for the decision variables, and the associated reduced costs. Also reported are the values of the slack variables and their shadow prices. Sensitivity analysis of the right-hand values as well as of the objective function coefficients are provided.

#### Transportation Method

This module solves the transportation problem, using the transportation simplex method. The program solves problems with up to 20 sources (plants) and 20 destinations (warehouses). If the problem is unbalanced a dummy warehouse or dummy plant is added. Initial solution is obtained by using the northwest corner method. The program reports the intermediate solutions, presenting the cost as well as the quantities to be shipped for each route.

#### Assignment Method

The Assignment Module solves the assignment problem. The problem may include up to 30 rows (candidates) and 30 columns (jobs). The solution method consists of the standard assignment algorithm. The program solves maximization and minimization problems. If the problem is unbalanced dummy candidates or dummy jobs are added. The input data consists of the number of candidates, the number of jobs, and the assignment costs for each candidate-job combination.

#### Location Analysis

The Location Analysis module solves the location analysis problem which consists of assigning  $n$  departments or facilities to  $n$  locations while minimizing the total transportation cost. The problem can include up to 25 facilities. The solution methods consist of a random assignment heuristic and a pairwise exchange heuristic. The user may also request pairwise exchanges of selected department pairs. The input data consists of number of departments, number of locations, the inter-departmental work-flows, and the inter-location distances.

#### Layout Analysis

This module solves the layout design problem which consists of developing a layout design for departments or facilities while maximizing the total adjacency preference ratings. The problem may include up to 30 facilities. The solution methods consist of a random assignment heuristic and a pairwise exchange heuristic. The user may also request pairwise exchanges of selected department pairs. The input data consist of number of facilities, grid size, and pairwise adjacency ratings using an adjacency preference scale.

#### Assembly Line Balancing

The Line Balancing module solves the assembly line balancing problem with up to 30 tasks. The solution methods consist of four heuristic rules which prescribe the task that should be scheduled first. The rules are:

- 1- Longest processing time
- 2- Largest number of following tasks
- 3- Largest number of predecessor tasks
- 4- Largest positional weight.

The output consists of the minimum cycle time, number of work stations required, and the assembly line efficiency.

#### Aggregate Planning

The Aggregate Planning module solves the multi-product aggregate or intermediate production planning problem with up to 4 products and 12 periods. The problem may include regular time, overtime, sub-contracting, and backlogs. The solution methods consist of an optimizing procedure based on the transportation model formulation. The output consists of the optimal production schedule and cost report for each product. An overall cost summary report is also provided.

Press <Y> to erase the current model and retrieve a new one. The computer will display the current drive and path and ask you to enter the file specification as shown below.

Enter file spec. C:\DSSPOM\\*.\*

The file specification may be a specific file name such as "TUTOR.ASN" or an expression using the DOS wild characters "?" and "\*". For example, to display the list of files having the suffix "ASN", the file specification would be "\*.ASN". As mentioned earlier, when saving data files, using an appropriate suffix greatly improves the file retrieve process through the use of "\*" and the suffix.

Move the cursor to the first position after the last character "\*" by pressing the <END> key. Now press the <Backspace> key once to delete the last "\*". Then type the three characters "ASN" and press <ENTER> as shown below.

Enter file spec. C:\DSSPOM\\*.ASN

The computer will display a vertical menu containing a list of all file names having the suffix "ASN" as shown below.

```

■ Input Edit Print File Solve Quit
  Retrieve a file
  Save current file
  Copy a file
  Erase a file
  Rename a file
  List current DIR
  Change the DIR
  TUTOR.ASN
  EXAMPLE.ASN
  Use || to highlight, ENTER to select, ESC to Exit.
  
```

Note that in this case, there are two files having the suffix "ASN". These include "EXAMPLE.ASN" and "TUTOR.ASN" ("EXAMPLE.ASN" is another assignment problem that the author had saved earlier).

To retrieve "TUTOR.ASN", use the arrow keys to highlight the file name and press the <ENTER> key. Since the pointer is already on this file name, press the <ENTER> key to retrieve it. The computer will pause for a few seconds and then load the data file. Note that the "File:" section of the bottom line is immediately updated and contains the file name.

### SUMMARY DESCRIPTION OF THE MODULES

The fourteen programs included in DSSPOM Version 2.1, are among the most commonly used techniques in POM and may be found in nearly all POM textbooks. The fourteen programs consist of:

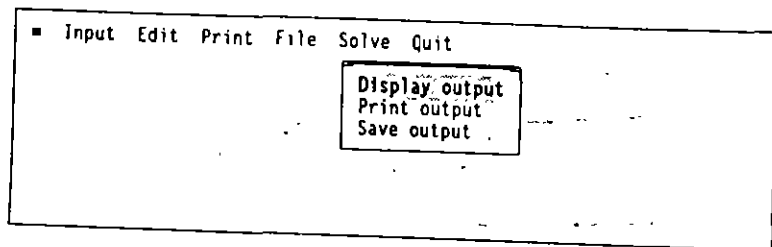
1. Time Series Analysis
2. Multiple Regression
3. Decision Analysis
4. Linear Programming
5. Transportation Method
6. Assignment Method
7. Location Analysis
8. Layout Analysis
9. Line Balancing
10. Aggregate Planning
11. Inventory Analysis
12. Materials Planning
13. Project Management
14. Quality Assurance

Below we present a brief summary for each program to familiarize the user with its contents and limitations.

#### Time Series Analysis

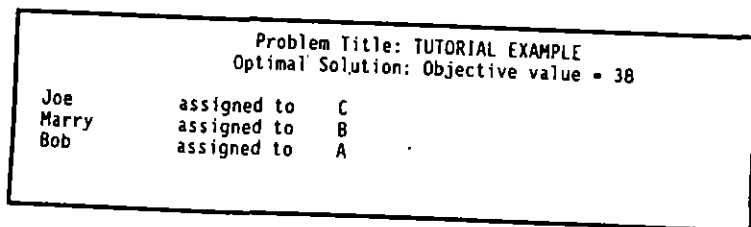
The first module, called "Time Series Analysis," is designed to perform time series forecasting. The program includes five forecasting methods consisting of exponential smoothing with and without trend, weighted moving averages, adaptive smoothing, and the decomposition method involving seasonality. The program can solve problems with up to 50 data points. It will report mean square error, mean absolute deviation, bias of the forecast, coefficient of variation, and the tracking signal.

You are now ready to solve the assignment problem. Move the pointer to the SOLVE option by pressing the right arrow key several times. The computer will display the following menu.



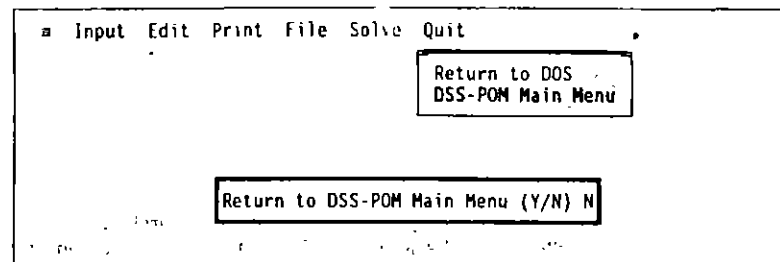
The SOLVE option has three sub-options as shown above. The first choice, entitled "Display output" is designed to solve the problem and display the results on the screen. The other two choices will send the results to the printer or a disk file, respectively.

Since the pointer is already on the "Display output" sub-option, press <ENTER> to select this choice. The computer will pause for a few seconds and then display the solution as shown below.



The above solution indicates that the total optimal training time is 38 hours. Further, Joe should be assigned to job C, Marry to job B, and Bob to job A. Press a key to return to the Assignment Menu.

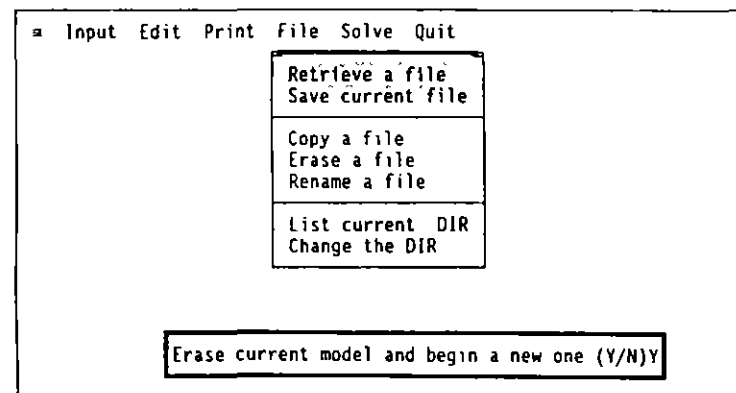
You have completed the data entry and solution process for the example problem. At this point you may exit from the Assignment Module by moving the pointer to the QUIT option. The computer will display the following two choices.



The default choice is to "Return to DOS". In the above screen, the pointer has been moved down to the second choice "DSS-POM Main Menu". Pressing the <ENTER> key will result in the computer asking if you to verify terminating the Assignment Module (do not exit from the Assignment Module at this time). You may end the Assignment Module by pressing the <Y> Key. Alternatively, you may press <ENTER> to remain within the assignment module. Press <ENTER> to return to the Assignment Module and resume with the next exercise involving file retrieval.

#### Retrieving Data Files

Although, the assignment problem is still in memory, we will retrieve the "TUTOR.ASN" file, saved earlier to illustrate the file retrieve option. Move the pointer to the FILE option and select the "Retrieve a file" sub-option by pressing the <ENTER> key. Since there is a model in memory already, the computer will ask if you wish to begin a new problem as shown below.



Type the letter "A" and press <ENTER> (note that pressing the <ENTER> key here is necessary because using the right arrow key will move the cursor (not the pointer) one space to the right)

Press the right arrow key and type the letter "B" and press <ENTER>

Press the right arrow once more and type the letter "C" and press <ENTER>.

After completing the data entry for the job titles and candidates' names, you can proceed with the data entry for the assignment costs as described below.

Move the pointer to cell B2, type 20, then press the down arrow key.

Type 25, then press the down arrow key.

Type 15, then press <ENTER>.

Press <F5>, then enter C2 and press <ENTER>.

Type 10, then press the down arrow key.

Type 15, then press the down arrow key.

Type 20, then press <ENTER>.

Press <F5>, then enter D2 and press <ENTER>.

Type 8, then press the down arrow key.

Type 25, then press the down arrow key.

Type 17, then press <ENTER>.

While entering the problem data, the computer may display the message "Working! Press any key to continue". This message is not an error message and has been incorporated into the programs as a safety mechanism for preventing a system halt when DOS performs memory management operations. If you encounter this message, just press the space bar once and resume with the data entry process.

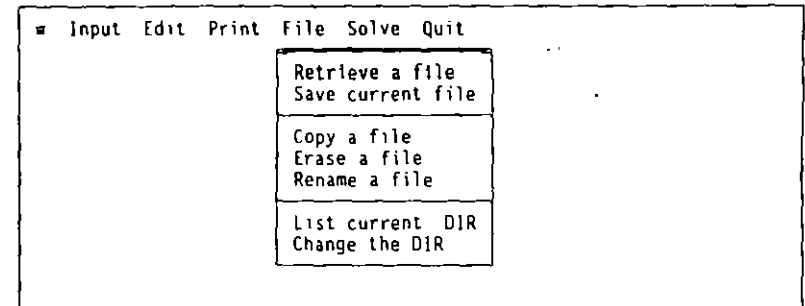
The data entry for the assignment costs have been completed. Check the cell entries to make sure there is no mistake. In case of an error, move the pointer to that cell and re-enter the value. Alternatively, move the pointer to the cell in error and press <F2>. You can edit the contents, using the right and left arrow keys, the <DEL>, and Backspace keys. The completed spread sheet is presented below

D4	17		A	B	C	D
1			A	B	C	D
2		Joe		20	10	8
3		Marry		25	15	25
4		Bob		15	20	17

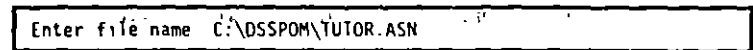
Press <F10> to exit from the spread sheet editor and keep the problem data in memory. Note that you have not saved the problem data on disk at this time and exiting from DSSPOM or turning the machine off will result in loss of problem data. The computer will terminate the spread sheet editor and display the Assignment Menu again.

### Saving the Problem on Disk

You can now save the problem data on disk for future reference. To do so, move the pointer to the FILE option by pressing the right arrow key several times. The computer will display the FILE option sub-menu as shown below.



As seen from the above display, the pointer initially points to the first sub-option "Retrieve a file". Press the down arrow key once to move the pointer to the "Save current file" option and press <ENTER>. The computer will respond by asking you to enter a file name as shown below.



Note that the computer will display the current drive and sub-directory. In this case, the current drive is "C" and the sub-directory is "DSSPOM". Use the right arrow key to move the cursor to the first position after the second back slash. Then type "TUTOR.ASN" and press <ENTER>. The problem data will be saved in a file named "TUTOR.ASN".

The last three characters of a file name (after the period) are called a file extension (or suffix). Using meaningful suffixes results in easier file search later during the file retrieve process. For example, using the suffix "ASN" for files containing assignment problem data will make the retrieval process easier later on (see Retrieving Data Files below).

= Input Edit Print File Solve Quit				
A1				
1		Job1	Job2	Job3
2	Candid1	0	0	0
3	Candid2	0	0	0
4	Candid3	0	0	0

F1:Help F2:Edit F5:Goto HOME:Cell A1 ESC:Exit no save F10:Exit.

As seen from the above display screen, the spread sheet has several rows and columns. The rows are identified by integer numbers and the columns are identified by the letters of alphabet. The cells are referenced through their addresses: A cell address consists of its column letter followed by its row number. For example, the address of the top left corner cell is A1. A pointer is utilized to move from one cell to another and update its contents. Initially, the pointer is located in cell A1 (in the above display, cell A1 is empty). The contents of the pointed cell is displayed in front of its address in the top row of the spread sheet.

### Cell Contents

Cell contents are either *labels* (a series of alpha-numeric characters) or *values* (real or integer numbers). A label must be preceded with either a single quote (') or a carat sign (^). Labels preceded by single quotes will be left-justified and labels preceded by carat signs will be centered. Even though, a label can be preceded by a double quote ("), which will be right-justified, double quotes should not be used (labels preceded by double quotes will cause unpredictable results when saving files). When entering a label which begin with a letter, it need not be preceded by (') or (^). The spread sheet will automatically recognize it as a label and will left justify it (precede it with a single quote).

A *value* is numeric entity and must be preceded by plus or minus sign, a period (.), or a digit. For some modules, certain cells have been formatted to display the value in a special way. For example, if a cell value represents dollar amount, the cell may have been formatted to display the value using two decimal places.

For this solved example, the job titles (A, B, and C), and the candidates' names (Joe, Marry, and Bob) are labels and the training costs are values.

### Function Keys

The last line (row 25 of the display screen) presents the definitions of various function keys which are used within the spread sheet editor. The description of the keys are as follows.

**F1:Help** Pressing the function key <F1> will produce general information about cell data entry and format.

**F2:Edit** Pressing the function key <F2> will invoke the cell editor. The contents of the cell where the pointer is located can be edited. Note that in the above display screen, the pointer is located in cell A1 as indicated by the cell address in the top left corner of the spread sheet.

**F5:Goto** Function key <F5> is designed for quick movement through the spread sheet. For example, to move the pointer to cell G20, press <F5> then enter G20 and press <ENTER>. The pointer will be placed in cell G20.

**HOME** The <HOME> key is used to return to the top left corner (cell A1) of the spread sheet using one key stroke.

**ESC** The <ESC> key is used to exit from the spread sheet without updating the contents (various problem parameters). This key is especially useful when the spread sheet editor is used to view a problem data or invoked by mistake.

**F10** The <F10> function key is used to exit from the spread sheet and update the problem parameters.

### Resuming the Tutorial

Begin the data entry process for the tutorial example by entering the job titles and the candidates' names as described below.

Use the down arrow key to move the pointer to cell A2 and type "Joe" (recall that Joe begins with a letter and will be entered as a label)

Use the down arrow key to move the pointer to cell A3 (it is not necessary to press <ENTER> after typing the letter "e.") and type "Marry"

Press the down arrow key again, type "Bob" and press <ENTER>

Press <F5> to move the pointer to cell B2. The computer will ask you to enter the cell address. Type B2 and press <ENTER>

*Erase a file:* To delete a file from disk

*Rename a file:* To rename a data file

*List current DIR:* To display a list of files in current directory (or disk)

*Change the DIR:* To change the current sub-directory (mainly for hard disk)

**Solve** This option is used to solve the problem. It has three sub-options:

*Display output:* To solve the problem and display the results on the screen

*Print output:* To solve the problem and print the results on printer

*Save output:* To solve the problem and save the results in a text file

**Quit** This option is used to exit from the current module. It has two sub-options:

*Return to DOS:* End from the module and return to DOS

*DSS-POM Main Menu:* End the module and return to DSSPOM Main Menu

The bottom line (row 25 of the display screen) is the help and message area. It contains four items. The first two are function key definitions as described below.

**F1: Help** Throughout DSSPOM, function key <F1> is used as the help key. The help facility is context sensitive. That is, pressing the help key <F1> will provide information for the menu option or sub-option which is highlighted by the pointer.

**F2: calculator** Pressing the function key <F2> from the common menu will invoke a calculator.

The third item (middle of the line) is the name of the current module (in this case *Assignment Method*). The last item, *File:* is used to display the name of the current data file. It remains blank until the current model is saved on disk or a new model is retrieved from disk.

To solve the assignment problem, move the pointer to the *Input* option by pressing the right arrow key once and press <ENTER>. The computer will begin the data entry process by asking you to enter a problem title. Type TUTORIAL EXAMPLE and press the <ENTER> key to continue with the next item. If you make a typing mistake before pressing the <ENTER> key, you can use either the backspace key or the left arrow key to correct the mistake. If you have already pressed the <ENTER> key, do not worry, there is a way to return to this item and correct it later.

After pressing the <ENTER> key, the computer will ask you to enter the "Objective type". For this example problem, the objective is to minimize the total training time, hence type "MIN" and press <ENTER>. Note that the computer will not accept values other than "MIN"

or "MAX". Before pressing the <ENTER> key (after typing the last letter of "MIN"), you may press the up arrow key to backtrack to the title field and correct any mistakes.

The computer will then ask you to enter the number of candidates. The number of candidates for this problem is 3. Be sure to type "03" and then press <ENTER>. Alternatively, you can press the right arrow key once to move the cursor one position to the right, then type "3".

The next query involves the number of jobs. The number of jobs is 3. Type "03" and press <ENTER>. The completed screen is shown below.

```

Input Edit Print File Solve Quit

Problem title: TUTORIAL EXAMPLE
Objective type (MIN/MAX): MIN
Number of candidates (rows): 03
Number of jobs (columns): 03

Enter problem parameters as requested. Press RETURN to
accept, or ESC to exit. Maximum problem size is 30 by 30,
assignment costs should be within 0 and 9999.
```

After pressing the <ENTER> key, the computer will ask if you wish to continue with the assignment costs as shown below.

```
Continue with assignment costs (Y/N): Y
```

### Spread Sheet Editor

Before resuming with the tutorial, we will present a more detailed description of the spread sheet editor. The spread sheet editor is used for entering problem data in most of the modules. Becoming familiar with it at this point will save you much search for information later. We will present the spread sheet editor in the context of the tutorial example.

After pressing the <ENTER> key, the computer will invoke the spread sheet editor for entering the assignment costs. The initial spread sheet is presented below.