

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

DEPARTAMENTO DE CURSOS INSTITUCIONALES

**COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD**

LAGUNA VERDE, VER.

3 - 7 ABRIL DE 1995

**INGENIERIA DE COSTOS**

MÉTODO DE RUTA CRÍTICA

ING. GILBERTO HERNÁNDEZ GÓMEZ

# **C O N T E N I D O**

## **1. INTRODUCCION**

## **2. SISTEMAS DE REPRESENTACION**

2.1 SISTEMA DE REPRESENTACION POR FLECHAS

2.2 MATRIZ DE PRECEDENCIAS

2.3 SISTEMA DE REPRESENTACION POR NODOS

## **3. CALCULO NUMERICO**

3.1 DURACION DE LAS ACTIVIDADES

3.2 RELACION COSTO-TIEMPO

3.3 CALCULO DE LA RED.

3.3.1 DETERMINACION DE LA RUTA CRITICA

3.3.2 HOLGURAS

3.4 DIAGRAMA DE BARRAS.

## **4. CONTROL**

## **5. INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE PRECEDENCIAS MULTIPLES.**

## **BIBLIOGRAFIA**

## 1. INTRODUCCION

La construcción, representada a través de un esquema simplificado, consiste en la transformación de los recursos o insumos a través de un proceso que los convierte en una obra terminada; dicho proceso, para que pueda ser considerado eficiente, tiene que ser controlado desde el punto de vista de calidad y en función del tiempo y el costo que consume (ver fig. 1).

La participación en cantidad y calidad de los insumos utilizados, debe ser prevista antes de iniciar el proceso de transformación o procedimiento constructivo, para estar seguros de que su empleo va a ser el más adecuado.

Asimismo, el propio proceso constructivo debe planearse para elegir la alternativa que resulte más eficiente en tiempo, costo y con la calidad prevista.

En estas condiciones, el constructor va a tener tres puntos de referencia fundamentales para garantizar el éxito de la obra: CALIDAD, COSTO Y TIEMPO. Cada uno de ellos está referido a un estándar de comparación previamente aceptado que sirve como referencia para ejercer los mecanismos de control; esto es, comparación de lo que ocurre en campo contra el estándar e implementación de una acción correctiva en caso de que se encuentren desviaciones significativas (ver fig. 2).

En este orden de ideas, el estándar de referencia relativo al tiempo de ejecución de la obra, lo constituye precisamente el PROGRAMA DE OBRA, en el cual se tiene representado gráficamente el proceso constructivo con sus fechas de ejecución.

El propósito de estos apuntes, es describir los sistemas de representación gráfica comúnmente utilizados en nuestro medio, la secuencia de cálculo para obtener información relativa a la duración total de la obra y de cada una de las actividades que la componen, holguras existentes y balance de recursos.

El proceso de programación involucra dos etapas: la primera consiste en el estudio minucioso de la obra, no solamente en lo que corresponde al proyecto representado en planos y especificaciones, sino al entorno geográfico, social y económico de la zona donde se hará la construcción, a la cuantificación de los volúmenes de obra y, finalmente, a la definición del proceso o procesos constructivos que se implementarán, de los cuales obtenemos la lista de actividades y sus interrelaciones respectivas.

Esta primera etapa corresponde desarrollarla, por razones obvias, al ingeniero encargado de la programación, quien debe tener experiencia en el campo de la construcción.

La segunda etapa se refiere a la realización de una serie de cálculos numéricos sencillos, que nos permiten obtener información relativa a la fecha de terminación prevista para el proyecto, a las fechas de inicio y terminación de cada una de las actividades y a las tolerancias que pueden tener para su inicio y terminación.

Lo anterior puede desarrollarse manualmente o con la ayuda de la computadora, lo cual permite llevar a cabo con mucha rapidez correcciones y actualizaciones. En ambos casos, es necesario que se comprendan los conceptos fundamentales de la programación lo que constituye el objetivo primordial de estos apuntes.

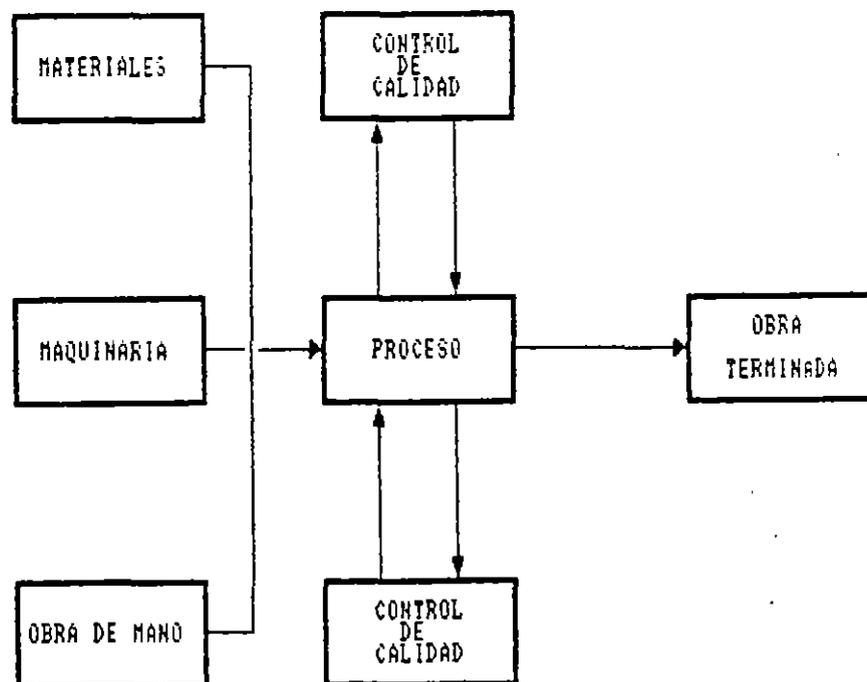


FIG. 1.- REPRESENTACION GRAFICA DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

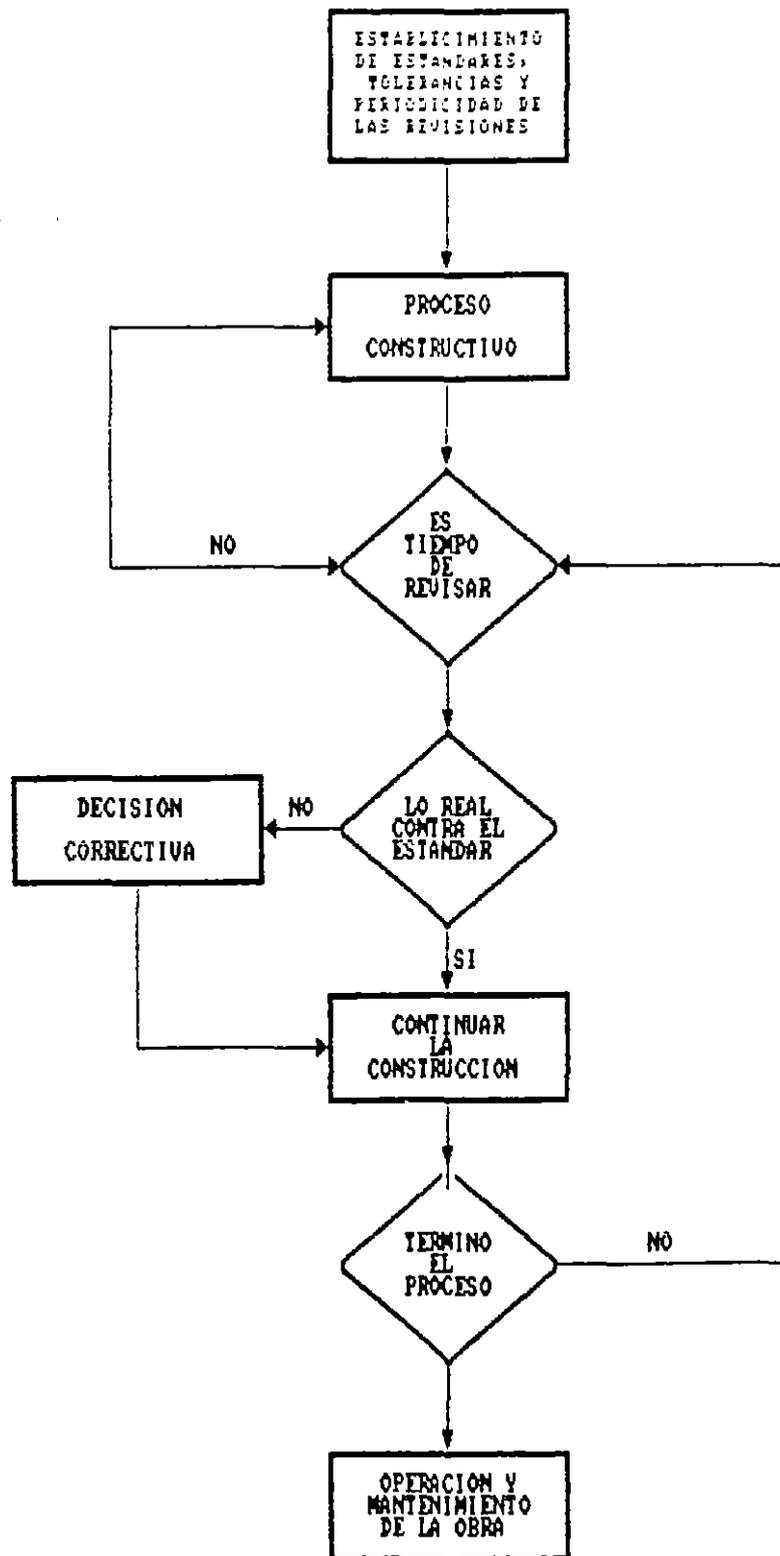


FIG. No. 2.- EL PROCESO DE CONTROL

## 2. SISTEMAS DE REPRESENTACION

Siendo el programa de obra, la representación gráfica de las actividades que conforman el procedimiento constructivo en el cual se consideran la duración, tiempo de ocurrencia y recursos necesarios para ejecutar los trabajos, se requiere primeramente definir y enlistar las actividades que integran el proyecto por construir. Se entiende por actividad la ejecución física de un trabajo que consume tiempo y recursos.

El nivel de detalle con que las actividades queden definidas, depende del usuario que vaya a utilizar el programa de obra, siendo distinto este nivel de detalles si el programa será utilizado por el Jefe de Frente, por el Jefe de Obra o por el Gerente de Construcción.

Por otra parte, con relación a los Conceptos de Obra que conforman el Presupuesto, una actividad puede quedar definida como sigue:

- a) La actividad es igual al concepto de obra.
- b) La actividad abarca varios conceptos de obra.
- c) La actividad es parte de un concepto de obra.

Definidas y enlistadas las actividades procedemos a su representación gráfica.

### 2.1 SISTEMA DE REPRESENTACION POR FLECHAS.

En este caso, cada una de las actividades que constituyen el procedimiento constructivo, se representa con una flecha (ver fig. 3).

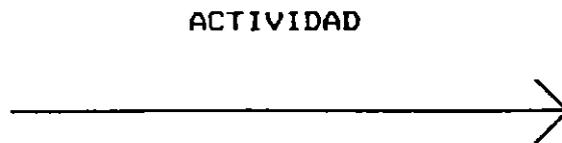


FIG. No. 3 REPRESENTACION DE LA ACTIVIDAD POR MEDIO DE UNA FLECHA

La unión de varias flechas o actividades, señala la secuencia QUE SE irán ejecutando para completar el proceso.

En las redes de flechas, estas se dibujan fuera de escala buscando únicamente que su tamaño sea el adecuado para lograr la mayor claridad del diagrama (ver fig. 4).

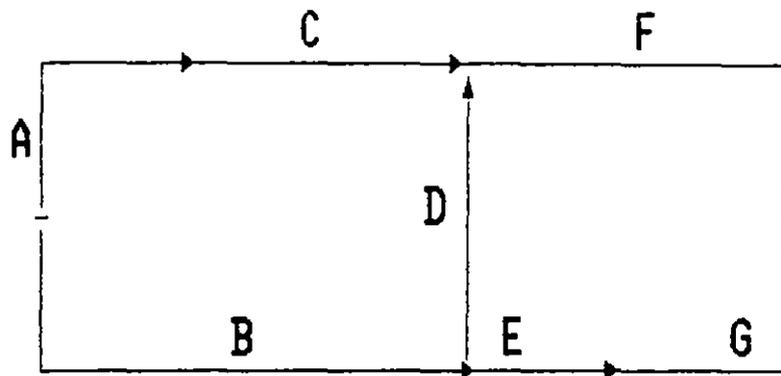


FIG. No. 4.- RED DE ACTIVIDADES REPRESENTADAS POR FLECHAS

Un segundo elemento gráfico es el EVENTO que se representa por un círculo. El evento marca el inicio o terminación de una actividad, sirve para identificarla y para escribir en él información numérica relativa a sus tiempos de inicio y terminación, no consume tiempo ni recursos.

Combinando los dos elementos gráficos se tiene (ver fig. 5):

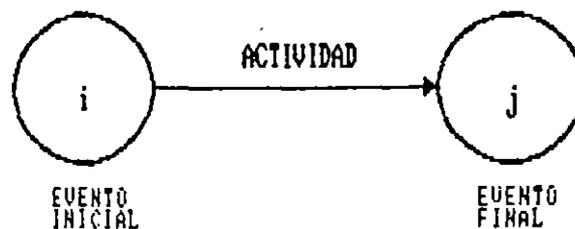


FIG. No. 5.- ACTIVIDAD DELIMITADA POR EVENTOS

Los eventos pueden identificarse con números o letras, sirviendo a su vez para identificar la actividad que delimitan.

Incluyendo los eventos en la red anteriormente dibujada resulta el diagrama de flechas que se muestra en la Figura No. 6:

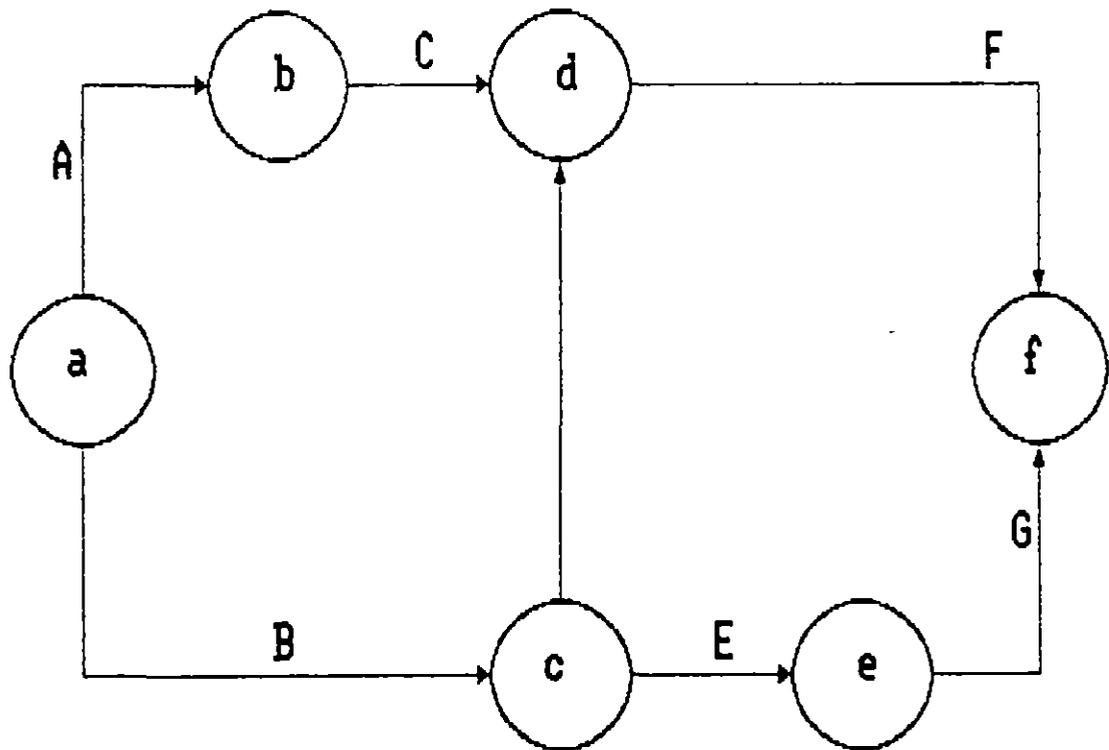


FIG. No 6.- RED DE ACTIVIDADES REPRESENTADA POR FLECHAS Y EVENTOS

Por supuesto, en la red de actividades, un evento es a la vez el evento final de la actividad precedente y el evento inicial de la actividad subsecuente.

En las redes de flechas, es obligado partir de un sólo evento llamado EVENTO FUENTE y terminar el diagrama también en un evento único llamado EVENTO TERMINAL.

## ACTIVIDADES FICTICIAS

Consideremos el caso en el cual la actividad C depende de A, y D depende de B, la representación gráfica es como se indica en el lado izquierdo de la figura. Si suponemos que de la actividad D también depende de A, la única manera de resolver la representación gráfica es utilizando la flecha con línea discontinua que se indica en el lado derecho de la figura como una actividad de liga. A esta actividad se le llama ACTIVIDAD FICTICIA y tiene la particularidad de no consumir recursos.

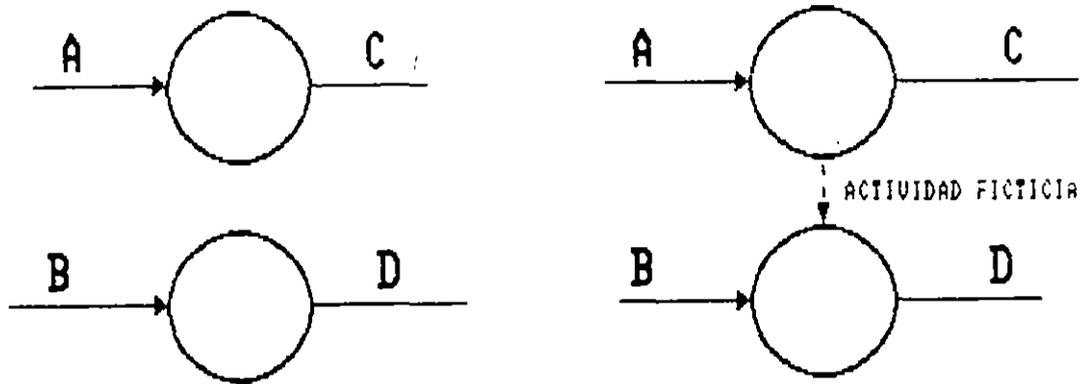


FIG. No. 7.- EMPLEO DE LA ACTIVIDAD FICTICIA

Durante el cálculo de la red se maneja como cualquier otra actividad, pero con duración igual a cero.

La Actividad Ficticia también se utiliza en el caso en que dos ó más actividades inician y terminan en el mismo evento, para evitar ambigüedad en su identificación.

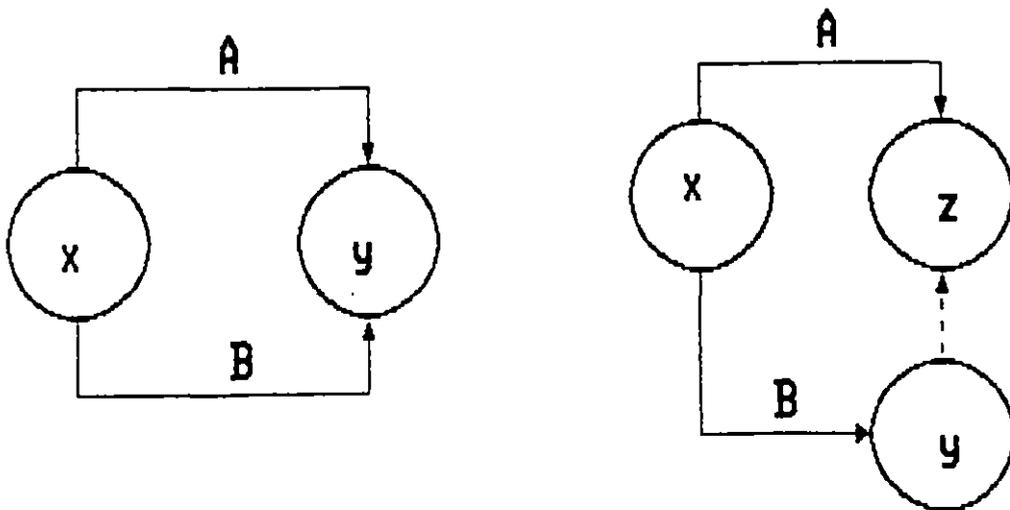


FIG. No. 8.- UTILIZACION DE LA ACTIVIDAD FICTICIA

En base a sus eventos, las actividades A y B quedan identificadas como actividad X-Y, introduciendo la actividad ficticia, la actividad A queda como actividad X-Z y la actividad B como actividad X-Y.

La posición relativa de las actividades en el diagrama, muestra la secuencia en que se irán ejecutando en campo, de acuerdo al procedimiento constructivo seleccionado. En otras palabras, refiriéndonos al diagrama anterior.

La actividad A y B inician el proceso y no dependen de nada.

La actividad C puede iniciarse cuando se termine la actividad A.

El inicio de las actividades D y E depende de la terminación de la actividad B.

Una vez que se han terminado las actividades C y D puede iniciarse la actividad F.

Para que se pueda llevar a cabo la actividad G, es necesario haber terminado la actividad E.

## 2.2 MATRIZ DE PRECEDENCIAS.

Previo al dibujo de la red conviene elaborar una matriz de precedencias como se indica en la figura 9, en la cual se enlistan todas las actividades que integran el proceso.

	A	B	C	D	E	F	G
A			X				
B				X	X		
C						X	
D						X	
E							X
F							
G							

FIG. No. 9.- MATRIZ DE PRECEDENCIAS

A continuación se analizan por renglón cada una de las actividades, formulándose dos preguntas para cada una de ellas:

- 1.- ¿Qué actividad ó actividades pueden ejecutarse simultáneamente?
- 2.- ¿Qué actividad ó actividades pueden realizarse inmediatamente después?

Posteriormente, para verificar la dependencia de actividades, se analizan ahora por columna, haciéndose la pregunta:

- 3.- ¿Qué actividad ó actividades deben haberse realizado inmediatamente antes a la actividad particular que estamos analizando?

La matriz puede "leerse" también de la siguiente forma:

A y B      no dependen de nada  
C            depende de A  
D y E        dependen de B  
F            depende de C y D  
G            depende de E

### 2.3 SISTEMA DE REPRESENTACION POR NODOS

En este sistema, las actividades quedan representadas por un elemento gráfico que puede ser un círculo o un rectángulo y las flechas se emplean para señalar la dependencia entre las actividades.



FIG. No. 10.- SISTEMA DE REPRESENTACION POR NODOS

Utilizando este sistema, el diagrama de flechas anteriormente presentado queda como sigue:

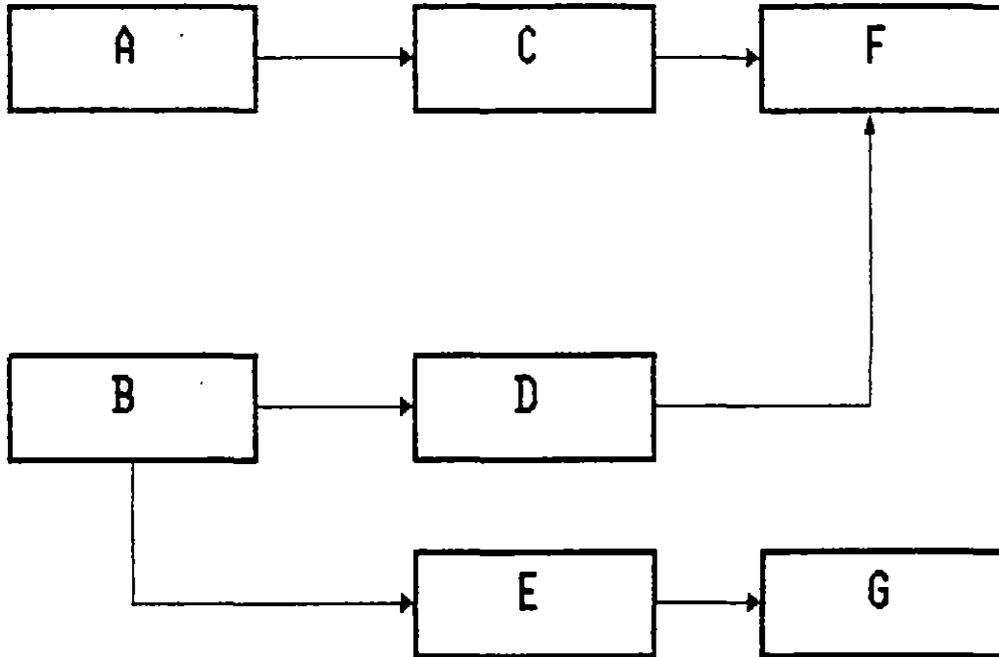


FIG. No. 11.- DIAGRAMA DE NODOS

En los diagramas de nodos, no son necesarias las actividades ficticias, ni se requiere una actividad fuente o inicial, ni una actividad única final.

## EJERCICIOS

1.- Representar gráficamente por nodos o flechas el procedimiento constructivo relacionado con la construcción de una cimentación.

### ACTIVIDADES

- |    |                             |    |  |
|----|-----------------------------|----|--|
| A) | LIMPIA Y DESYERBE           | G) | CIMBRA                                     |
| B) | TRAZO Y NIVELACION          | H) | COLADO                                     |
| C) | EXCAVACION                  | J) | ACARREO DE MATERIAL PRODUCTO DE EXCAVACION |
| D) | PLANTILLA                   | K) | RELLENO CON TEPETATE                       |
| E) | CORTE Y HABILITADO DE ACERO |    |  |
| F) | COLOCACION DE ACERO         |    |  |

2.- Representar con el sistema de nodos o flechas el procedimiento constructivo para la construcción de un salón de usos múltiples.

### ACTIVIDADES

### OBSERVACIONES

- |    |                                     |                          |
|----|-------------------------------------|--------------------------|
| A) | LIMPIA DEL TERRENO                  |                          |
| B) | TRAZO Y NIVELACION                  |                          |
| C) | CIMENTACION                         | ZAPATAS CORRIDAS         |
| D) | ESTRUCTURA                          | COLUMNAS DE CONCRETO     |
| E) | MUROS                               | DE TABIQUE ROJO RECOCIDO |
| F) | DALAS DE CERRAMIENTO                |                          |
| G) | FABRICACION DE ESTRUCTURA METALICA  | EN TALLER ESPECIALIZADO  |
| H) | SUMINISTRO LAMINA METALICA          |                          |
| I) | MONTAJE ESTRUCTURA METALICA         |                          |
| J) | COLOCACION LAMINA METALICA          |                          |
| K) | SUMINISTRO Y COLOCACION DE HERRERIA |                          |
| L) | APLANADO CON MEZCLA                 |                          |
| M) | INSTALACION ELECTRICA               | OCULTA CON TUBO CONDUIT  |
| N) | COLOCACION DE LAMPARAS              |                          |
| O) | FIRME DE CONCRETO                   |                          |
| P) | PINTURA ESMALTE EN HERRERIA         |                          |
| Q) | PINTURA VINILICA EN MUROS           |                          |
| R) | COLOCACION DE VIDRIOS               |                          |
| S) | LIMPIEZA GENERAL                    |                          |
| T) | CASTILLOS                           |                          |
| U) | PISO DE LOSETA CERAMICA             |                          |
| V) | PLANFOND FALSO DE TABLARROCA        |                          |

## NOTA .-

En caso de considerar más actividades enlistelas en orden sucesivo W, X, Y, Z, AA, AB, etc. Si considera conveniente dividir en etapas una actividad, utilice números para identificarlas, ejemplo: L1 Aplanado en interiores, L2 Aplanado en exteriores.

3.- Enlistar y representar por flechas el procedimiento constructivo para la construcción de un tramo de carretera, considerando la descripción siguiente:

- El material pétreo para la construcción de sub-base, base y carpeta, se obtiene a través de trituración de un banco localizado a 10 Km. del centro de gravedad del tramo. El banco de explotación está a 500 metros de la trituradora.
- El concreto asfáltico se elabora en una planta ubicada a 2 Km. del camino.
- Considere las actividades que juzgue convenientes divididas en etapas, ejemplo, base 1a etapa, base 2a etapa, etc.

4.- Enlistar y representar gráficamente las actividades necesarias para la construcción de un sistema de alcantarillado.

### 3. CALCULO NUMERICO

#### 3.1 DURACION DE LAS ACTIVIDADES

Como se puede observar, el diagrama de flechas o de nodos que hasta el momento hemos elaborado, no requiere conocer la duración de las actividades.

Sin embargo, para poder llevar a cabo los cálculos numéricos relativos a la duración total de la obra, fecha de inicio y de terminación de las actividades y holgura disponibles, se tiene que calcular la duración de cada una de las actividades que componen la red. Esto, es función de dos elementos: el volumen o cantidad de obra por ejecutar y el rendimiento de los recursos utilizados, esto es:

$$\text{DURACION DE LA ACTIVIDAD} = \frac{\text{CANTIDAD DE OBRA}}{\text{RENDIMIENTO}}$$

Ejemplo:

Consideremos la construcción de 100m<sup>2</sup> de muro de tabique rojo recocido junteado con mortero cemento arena. Si el rendimiento promedio de una cuadrilla integrada por oficial albañil y ayudante es de 10m<sup>2</sup> por jornada (día), la duración de la actividad descrita es igual a:

$$d = \frac{100 \text{ m}^2}{10 \text{ m}^2/\text{día}} = 10 \text{ días}$$

Si en lugar de una cuadrilla consideramos dos o más cuadrillas, la duración de la actividad disminuye pero hay que verificar qué sucede con el costo.

#### 3.2 RELACION COSTO - TIEMPO.

Refiriéndonos al costo directo de una actividad, la variación del costo en relación a su tiempo de ejecución queda representada según se muestra en la gráfica de la Fig. No. 12.

En dicha gráfica podemos observar lo siguiente:

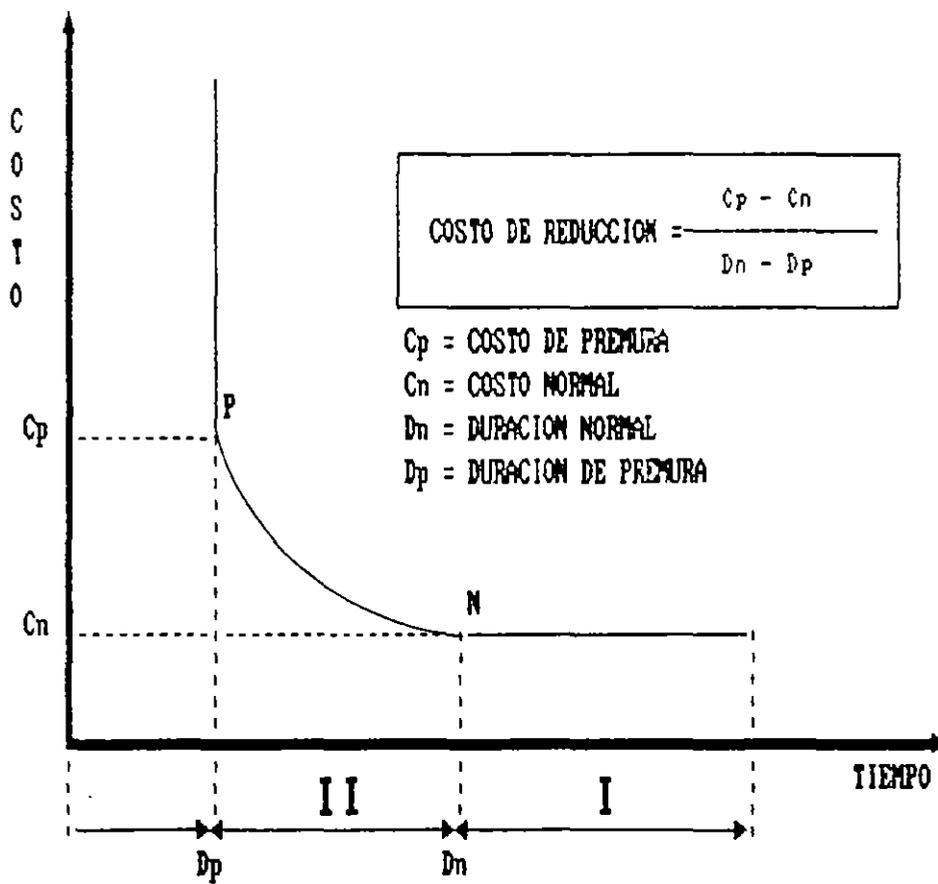


FIGURA No. 12.- VARIACION DEL COSTO DIRECTO DE UNA ACTIVIDAD EN RELACION A SU TIEMPO DE EJECUCION

Hay un rango (I) en el cual podemos reducir la duración de la actividad sin modificar el costo. Esto es claro, si consideramos que el costo directo para mano de obra y maquinaria, es la relación entre el costo y el rendimiento, esto es:

$$M = \frac{SR}{R} \quad \text{y} \quad CM = \frac{HMD}{RM}$$

Si incrementamos el numerador asignando más cuadrillas o más equipo a una actividad específica aumenta el costo, pero el rendimiento se incrementa en esa misma proporción; sin embargo, hay un límite en el cual el incremento en la asignación de recursos es proporcional al rendimiento. A partir de ahí el costo aumenta en proporción mayor al rendimiento y el costo por unidad se eleva (rango II).

En el mismo razonamiento anterior entra en juego el volumen de obra por ejecutar pues siendo este pequeño, será más costoso llevar dos máquinas al frente para que terminen el trabajo en menos tiempo.

Otro caso es cuando se decide establecer horas extras o dos o tres turnos de trabajo para lograr mayores avances, los rendimientos en general no se incrementan en la misma proporción que los costos.

Finalmente, volviendo a la gráfica, hay un punto en el cual ya no es posible reducir el tiempo de ejecución.

Si invertimos en asignar recursos a partir de ese momento, lo único que lograremos será elevar innecesariamente el costo de la actividad.

Los límites del rango II, se denominan duración normal, duración de premura, costo normal y costo de premura, con lo cual, si deseamos calcular cuál es el costo que nos ocasiona reducir una unidad de tiempo (suponiendo el comportamiento lineal dado por la recta NP), basta aplicar:

$$\text{COSTO DE REDUCCION} = \frac{CP - CN}{dn - dp}$$

### 3.3 CALCULO DE LA RED

Tomemos como ejemplo la red que se muestra en la Figura No. 13, para ilustrar la secuencia de cálculo.

#### CALCULO DE LOS TIEMPOS PROXIMOS

Conocida la duración para cada actividad nos interesa saber su fecha de inicio y su fecha de terminación, esto lo podemos calcular simplemente como:

Fecha de terminación = fecha de inicio + duración.

Como de momento no estamos manejando fechas calendarizadas, sino días efectivos de ejecución, podemos escribir:

$$\text{Terminación} = \text{inicio} + \text{duración}$$

$$T = I + d$$

Para las primeras actividades, que inician en cero, se tiene como fecha de terminación:

ACTIVIDAD	INICIO	DURACION	TERMINACION
1-2	0	5	0 + 5 = 5
1-3	0	6	0 + 6 = 6
1-4	0	8	0 + 3 = 3

Esta información se escribe en el lado derecho del evento final de cada actividad:

Fijemos nuestra atención en las actividades 1-3, 1-4, 3-4 y 4-7.

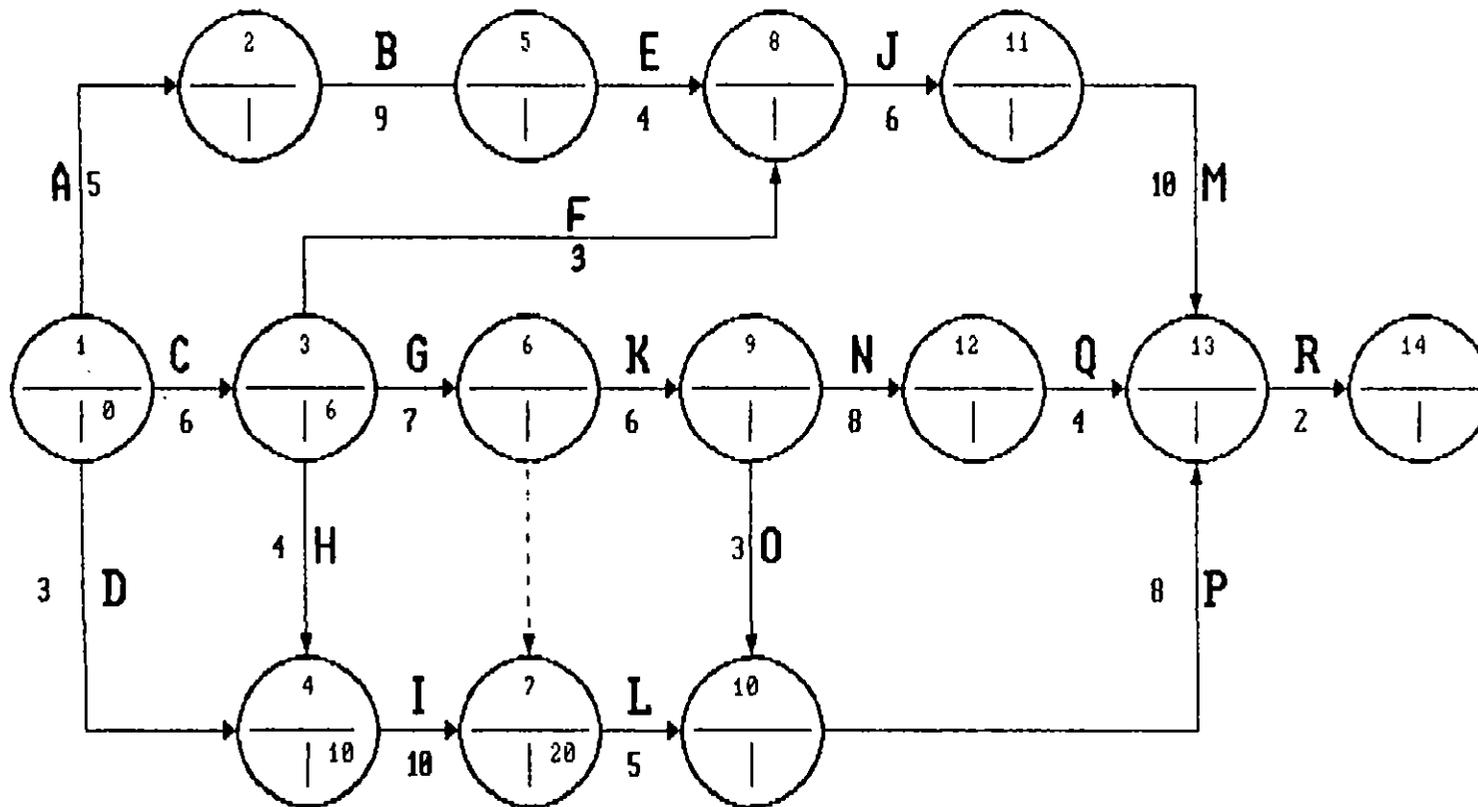


FIG. No. 13.- DIAGRAMA DE FLECHAS PROPUESTO PARA EL CALCULO DE LA RED

Calculando la terminación de la actividad 1-4, vemos que es igual a  $0+3=3$ ; sin embargo, como la terminación de la actividad 3-4 es igual a 10, la actividad 4-7 no puede iniciarse hasta el día 10 precisamente, por lo cual este último número es el que se anota en la red.

Lo anterior nos lleva a enunciar la siguiente regla:

"Al estar calculando tiempos de terminación en la red, si dos o más actividades finalizan en el mismo evento se debe anotar el número mayor que resulte de sumar la iniciación más la duración correspondiente a cada actividad".

Por otra parte, vemos que la actividad 1-4 puede iniciarse el día 0 ó el día 7 y terminarse el 3 ó el 10 sin alterar la iniciación de la actividad 4-7.

Para diferenciar los tiempos de iniciación y terminación de este tipo de actividades utilizamos la siguiente nomenclatura.

Ip = Iniciación próxima  
Ir = Iniciación remota  
Tp = Terminación próxima  
Tr = Terminación remota

Los tiempos próximos y remotos señalan posibilidades de inicio y de terminación tanto para cada una de las actividades que componen la red como para el proyecto mismo que está representado por la red el cual tendrá una fecha de inicio próxima, una terminación próxima, o bien una fecha remota de iniciación y una fecha remota de terminación.

Continuando con el procedimiento descrito, llegamos a calcular que la duración total del proyecto es de 36 días hábiles misma que anotamos en el evento final de la red (ver Fig. No. 14).

## CALCULO DE LOS TIEMPOS REMOTOS

Dado que nuestro interés es terminar la obra representada por la red en el tiempo estrictamente necesario, en el evento final hacemos coincidir el tiempo próximo de terminación con el tiempo remoto de terminación.

Conocido el tiempo remoto de terminación de una actividad y su duración, la iniciación remota podemos calcularla como:

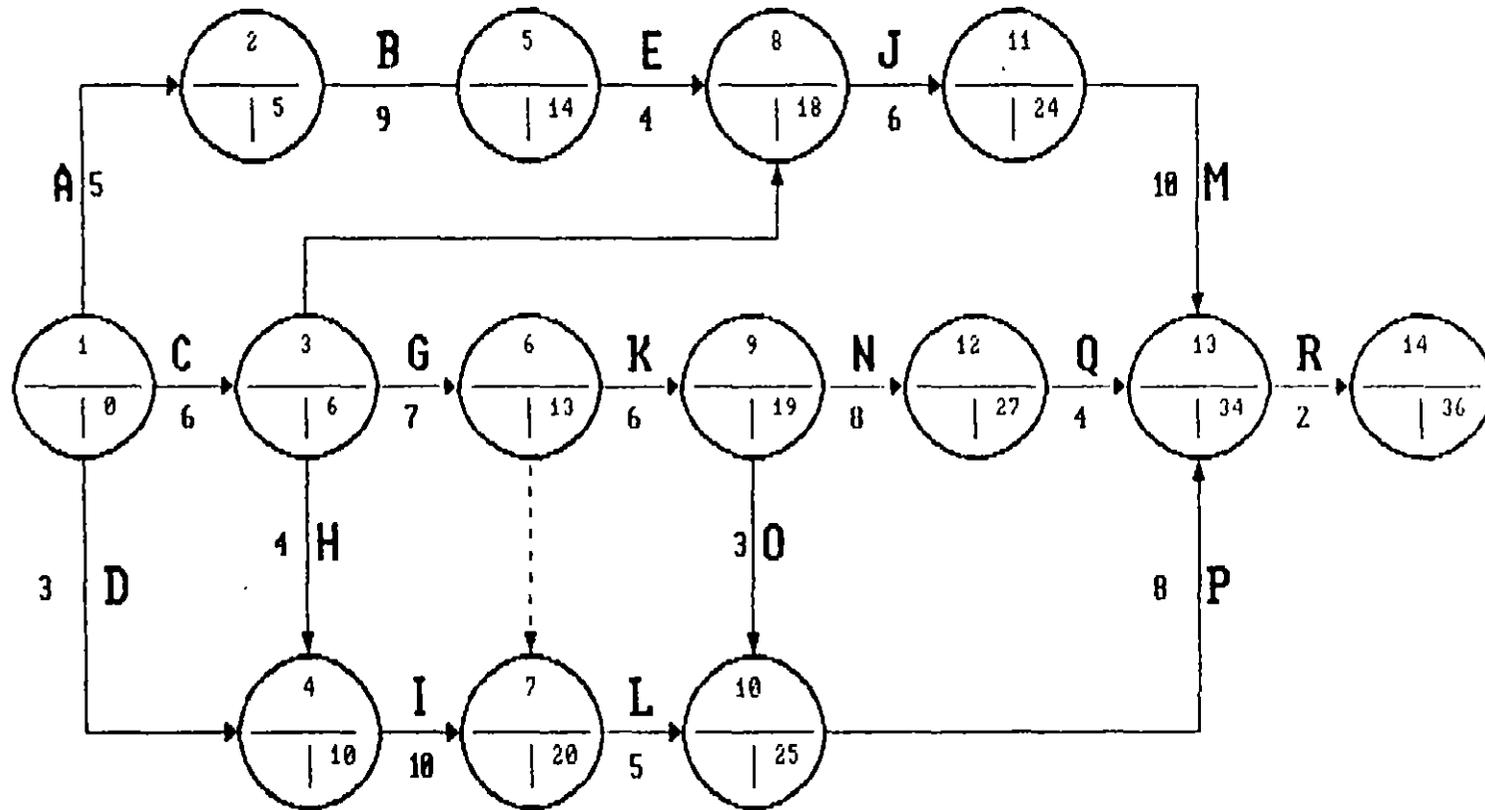


FIG. No. 14.- CALCULO DE LOS TIEMPOS PROXIMOS DE EJECUCION

Iniciación Remota = Terminación Remota - duración.

$$I_r = T_r - d$$

Analicemos las actividades 9-10 y 9-12:

Lo más tarde que debe terminarse la actividad 9-10 es el día 26, como su duración es 3, lo más tarde que debe iniciarse es el día 23; sin embargo la actividad 9-12 tiene con terminación remota 30 y duración 8 por lo cual su iniciación remota debe ser el día 22.

Como este día 22 marca el inicio remoto de las dos actividades que se inician en el evento 9, este es el número que se anota en la red.

Nos queda de esta manera una segunda regla en el cálculo de la red:

"Al estar calculando tiempos remotos de inicio si dos ó más actividades inician en un mismo evento, se anota en la red la cantidad menor que resulte de restar, a los tiempos remotos de terminación, la duración correspondiente de cada una de las actividades".

Continuando con este procedimiento, llegamos al evento inicial de la red donde como comprobación debemos terminar en cero (ver Fig. No. 15).

Observando la mecánica seguida en el cálculo de la red, vemos que en ella han quedado anotados  $I_p$  y  $T_r$  por lo cual para calcular  $I_r$  y  $T_p$  debemos servirnos de una tabla auxiliar en la cual, también, calculamos las holguras.

### 3.3.1. DETERMINACION DE LA RUTA CRITICA.

Durante el cálculo de los tiempos de iniciación y terminación próximos y remotos, nos percatamos que hay actividades que pueden empezar en dos tiempos diferentes y de terminación están fijos.

Estas últimas actividades reciben el nombre de **ACTIVIDADES CRITICAS**, pues un atraso o un adelanto en su ejecución, significan un atraso o un adelanto de toda la obra.

La unión de estas actividades resulta en la llamada **CADENA ó RUTA CRITICA**.

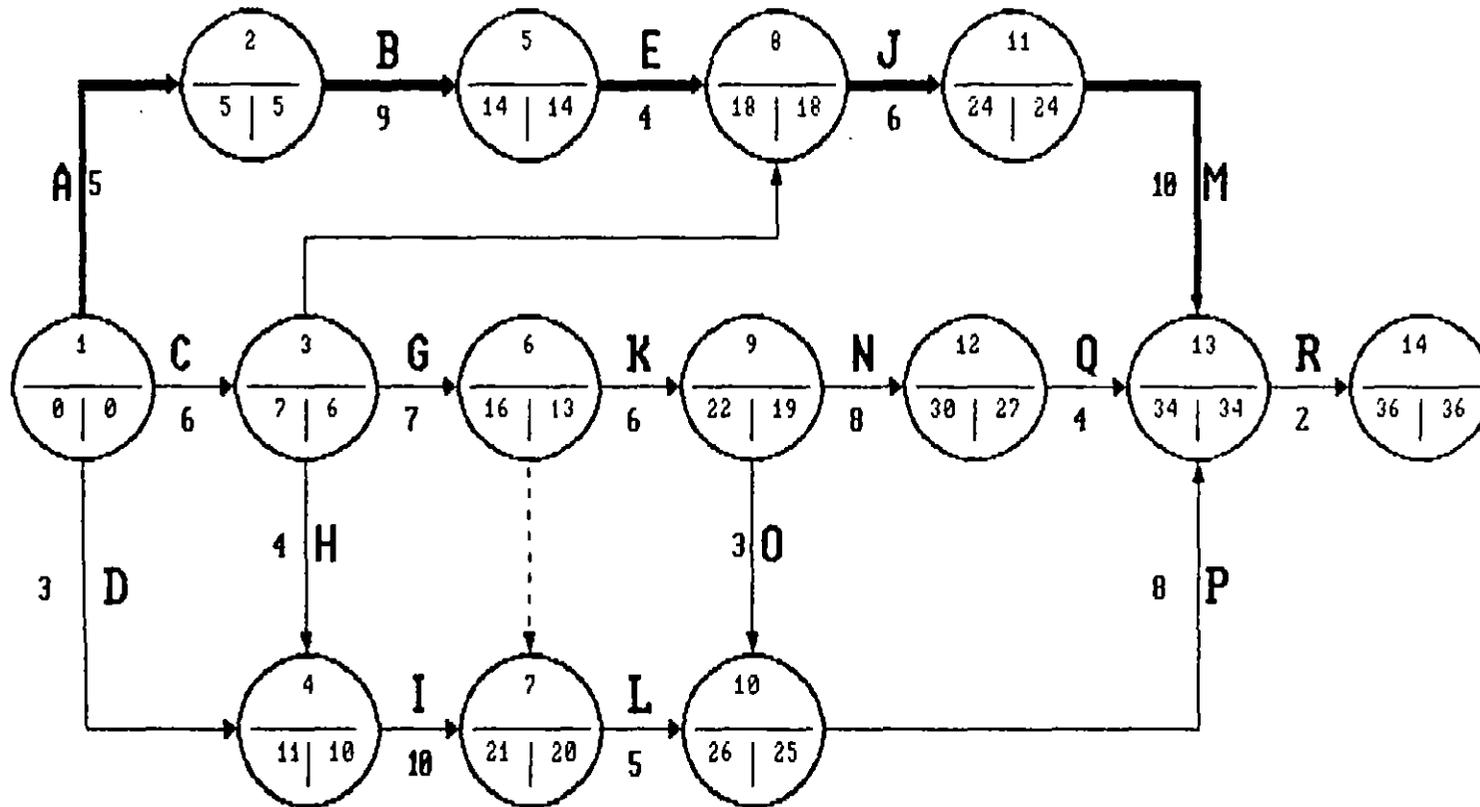


FIG. No. 15.- CALCULO DE LOS TIEMPOS REMOTOS DE EJECUCION

La condición que define el que una actividad sea crítica es:

Los tiempos de iniciación y terminación de la actividad son respectivamente iguales, esto es:

$I_p = I_r$  en el evento inicial y

$T_p = T_r$  en el evento final.

Hay ocasiones, que la primera condición basta para definir la ruta crítica, pero, cuando esto no es suficiente, recurrimos a la condición de que en las red  $T_p = I_p + d$

En el ejemplo, la Ruta Crítica esta dada por las actividades A - B - E - J - M - R.

Conocer cuales son las actividades críticas, permite poner especial cuidado en al ejecución dentro del tiempo fijado de dichas actividades. Asimismo, permite canalizar adecuadamente los recursos cuando queremos agilizar los trabajos.

### 3.3.2 HOLGURAS

A lo largo del cálculo de la red, hemos visto que algunas actividades tienen la posibilidad de iniciarse y terminarse en fechas diferentes, esto significa que tienen holgura con relación a otras actividades con las que están ligada o con relación a la terminación de la obra.

En estos apuntes consideraremos dos tipos de holguras: Total y libre mismas que se definen y explican a continuación:

#### HOLGURA TOTAL

Se define como holgura total, el tiempo que puede desplazarse la terminación de una actividad sin modificar la duración del programa de obra, aunque para ello, en ocasiones, es necesario alterar el tiempo de iniciación próximo de las actividades con la que está ligada. Gráficamente, el concepto de Holgura Total se muestra en la Fig. No. 16.

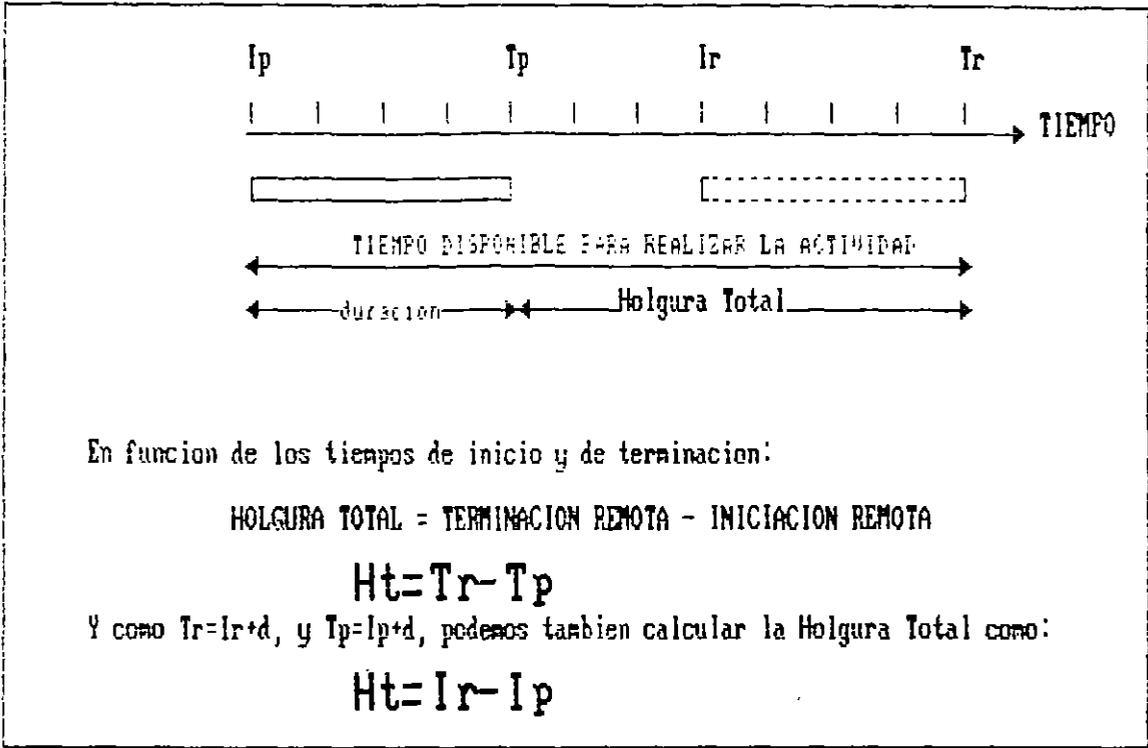


FIG. No. 16.- REPRESENTACION GRAFICA DE LA HOLGURA TOTAL

**HOLGURA LIBRE**

Se define como holgura libre, el tiempo que puede desplazarse la terminación de una actividad sin modificar la iniciación próxima de la actividad o actividades con las que esta ligada. Gráficamente, el concepto de Holgura Libre se muestra en la Fig. No. 17

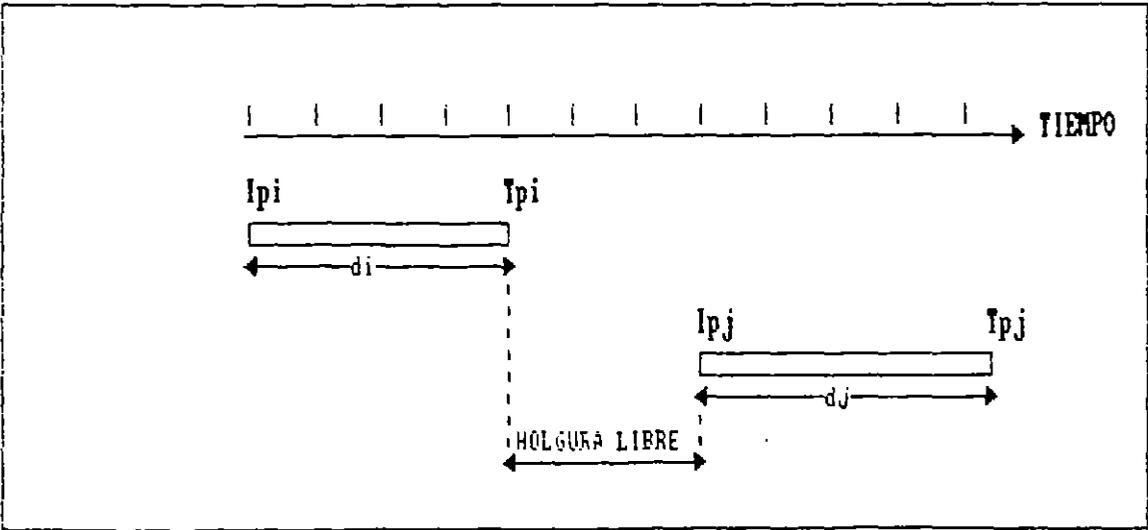


FIG. No. 17.- REPRESENTACION GRAFICA DE LA HOLGURA LIBRE

En función de los tiempos de inicio y terminación:

Holgura libre = Tiempo de iniciación próximo de la actividad subsecuente - tiempo de terminación próximo de la actividad precedente.

$$H_i = I_{pj} - T_{pi}$$

TANTO LA HOLGURA TOTAL COMO LA HOLGURA LIBRE, SE UTILIZAN PARA LLEVAR A CABO EL BALANCE DE LOS RECURSOS UTILIZADOS PARA LA EJECUCION DE LA OBRA.

### 3.4 DIAGRAMA DE BARRAS

Derivado del diagrama de flechas o de nodos, el diagrama de barras o de Gantt considera cada actividad representada a escala precisamente por una barra. En el mismo diagrama quedan representadas las holguras total y libre (ver Fig. No. 18).

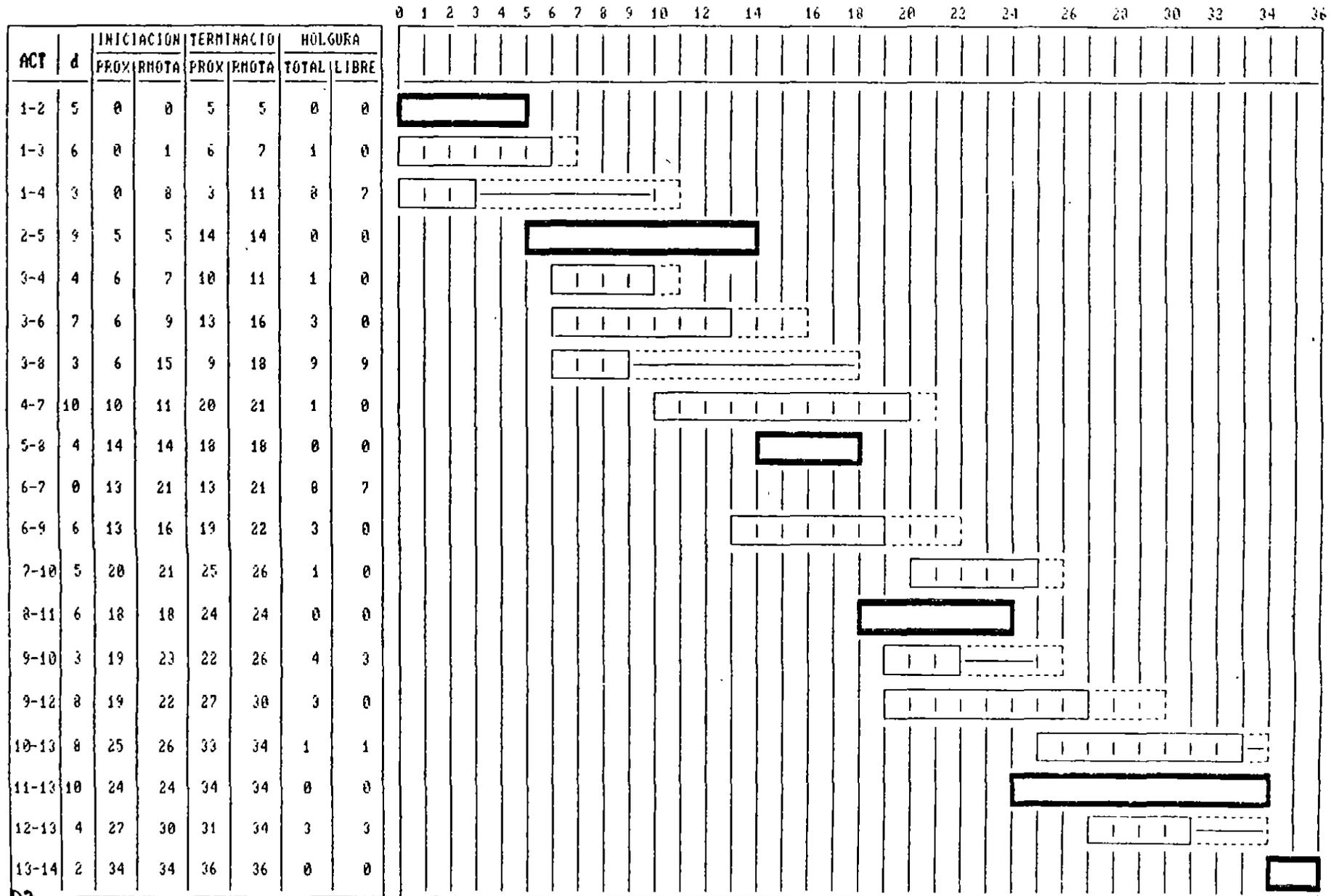


FIG. No. 18.- DIAGRAMA DE BARRAS O DE GANTT

### 3.5 CALCULO NUMERICO DEL DIAGRAMA DE NODOS

Utilizando la notación que se indica en la Fig. No.19, se dibuja y calcula la red, correspondiente al ejemplo de flechas desarrollado anteriormente.

	Ht		HI
Ip		X	Tp
Ir	duracion		Tr

FIG. No. 19.- NOTACION PARA EL CALCULO DE LA RED POR NODOS

En el diagrama se han escrito también las Holguras Total y Libre, mismas que se pueden calcular directamente sin ayuda de la tabla auxiliar puesto que, en este sistema, se dispone de la información necesaria para tal efecto (ver. Fig. No. 20).

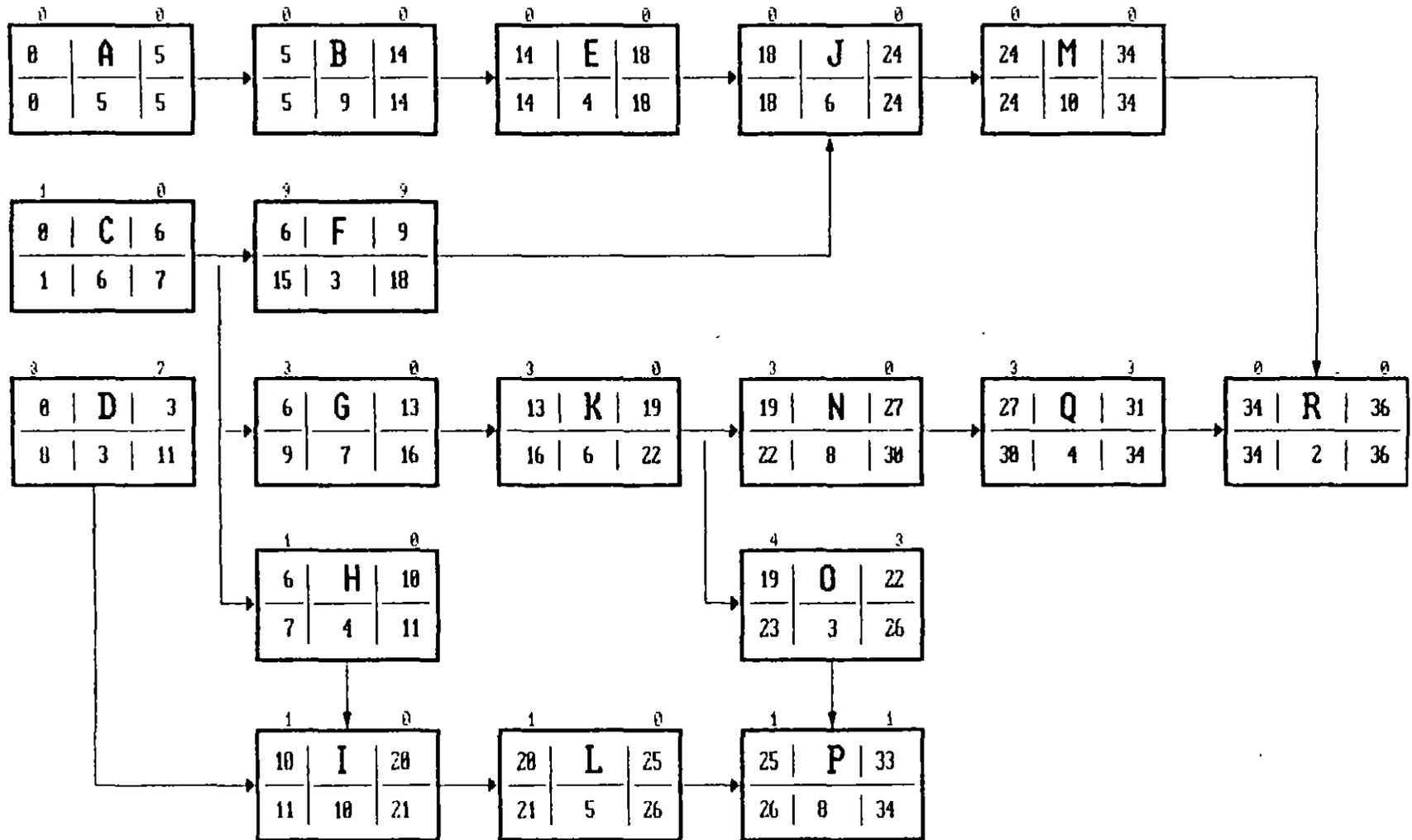


FIG. No. 28.- CALCULO DE LA RED UTILIZANDO EL DIAGRAMA DE NODOS

## BALANCE DE RECURSOS

Utilizando las holguras de las actividades representadas en el diagrama de barras, es posible lograr la mejor distribución de los recursos que intervienen en la obra.

En el ejemplo que sigue (1), se muestra con claridad cómo se logra tener una mejor distribución de los volúmenes de excavación en una obra hidráulica.

Al considerar la holgura de una actividad para balancear los recursos se pueden implementar dos estrategias (ver Fig. No. 21)

- 1.- Recorrer la iniciación y por consiguiente la terminación de la actividad sin modificar su duración, o bien,
- 2.- Estudiar la posibilidad de incrementar la duración de la actividad disminuyendo los recursos asignados a ella.

En ambos casos la holgura desaparece y la actividad se vuelve crítica.

ACTIVIDAD EN SU POSICION INICIAL ( $T_p$ )



LA ACTIVIDAD SE RECORRE HASTA SU TIEMPO REMOTO DE TERMINACION



SE ALARGA LA DURACION DE LA ACTIVIDAD



FIG. No. 21.- UTILIZACION DE LA HOLGURA DE UNA ACTIVIDAD

---

(1) Ejemplo desarrollado por Ing. Fernando Favela Lozoya.

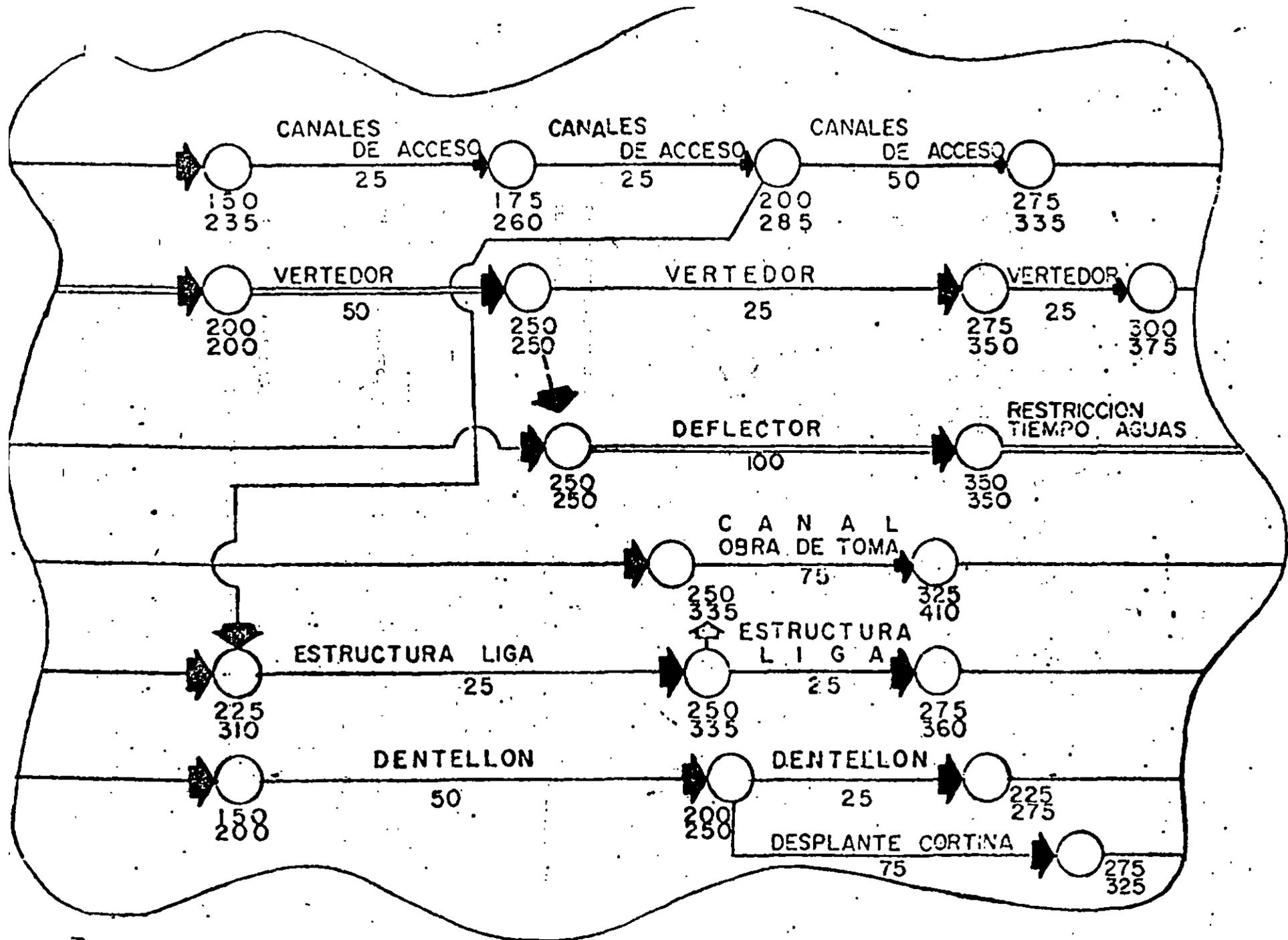
La solución óptima puede encontrarse acomodando a ojo las actividades ó bien utilizando algoritmos como el propuesto por Burges que consiste en encontrar la distribución de las barras que corresponda a la mínima suma de cuadrados. Ejemplo, si una actividad "x" requiere 6 recursos y tiene una duración de dos unidades de tiempo, las posibilidades para distribuir los recursos son (ver Fig. No. 22):

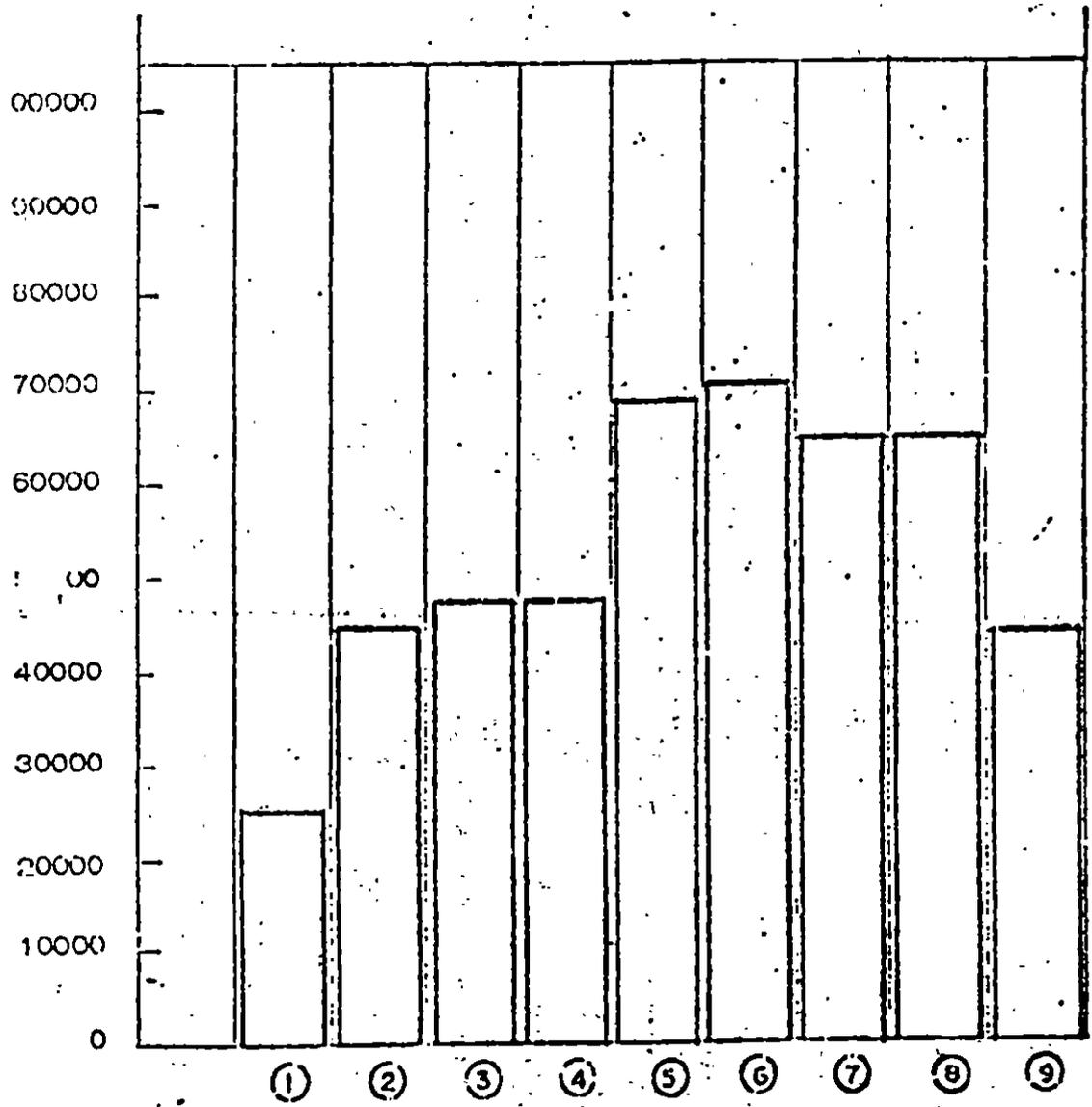
ALTERNATIVA	RECURSOS-TIEMPO	SUMA DE CUADRADOS				
1	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="padding: 2px 10px;">6</td><td style="padding: 2px 10px;"> </td><td style="padding: 2px 10px;">0</td></tr></table>	6		0	$6 + 0 = 6$	36
6		0				
2	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="padding: 2px 10px;">5</td><td style="padding: 2px 10px;"> </td><td style="padding: 2px 10px;">1</td></tr></table>	5		1	$5 + 1 = 6$	26
5		1				
3	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="padding: 2px 10px;">4</td><td style="padding: 2px 10px;"> </td><td style="padding: 2px 10px;">2</td></tr></table>	4		2	$4 + 2 = 6$	28
4		2				
4	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td style="padding: 2px 10px;">3</td><td style="padding: 2px 10px;"> </td><td style="padding: 2px 10px;">3</td></tr></table>	3		3	$3 + 3 = 9$	18
3		3				

FIG. No. 22.- ILUSTRACION DEL METODO DE BURGES

En el ejemplo anterior vemos que la mejor distribución de los recursos corresponde con la menor suma de cuadrados que es 18. Extrapolando este razonamiento, podemos encontrar la distribución óptima de los recursos referidos a un grupo de actividades.

Evidentemente los extremos posibles en cuanto a distribución de recursos, son cuando todas las actividades se inician lo más pronto y cuando todas las actividades se inician lo más tardíamente posible. La solución óptima estará contenida entre estos extremos (ver Fig. No. 23).





# FLUJO DE EROGACIONES

EJEMPLO

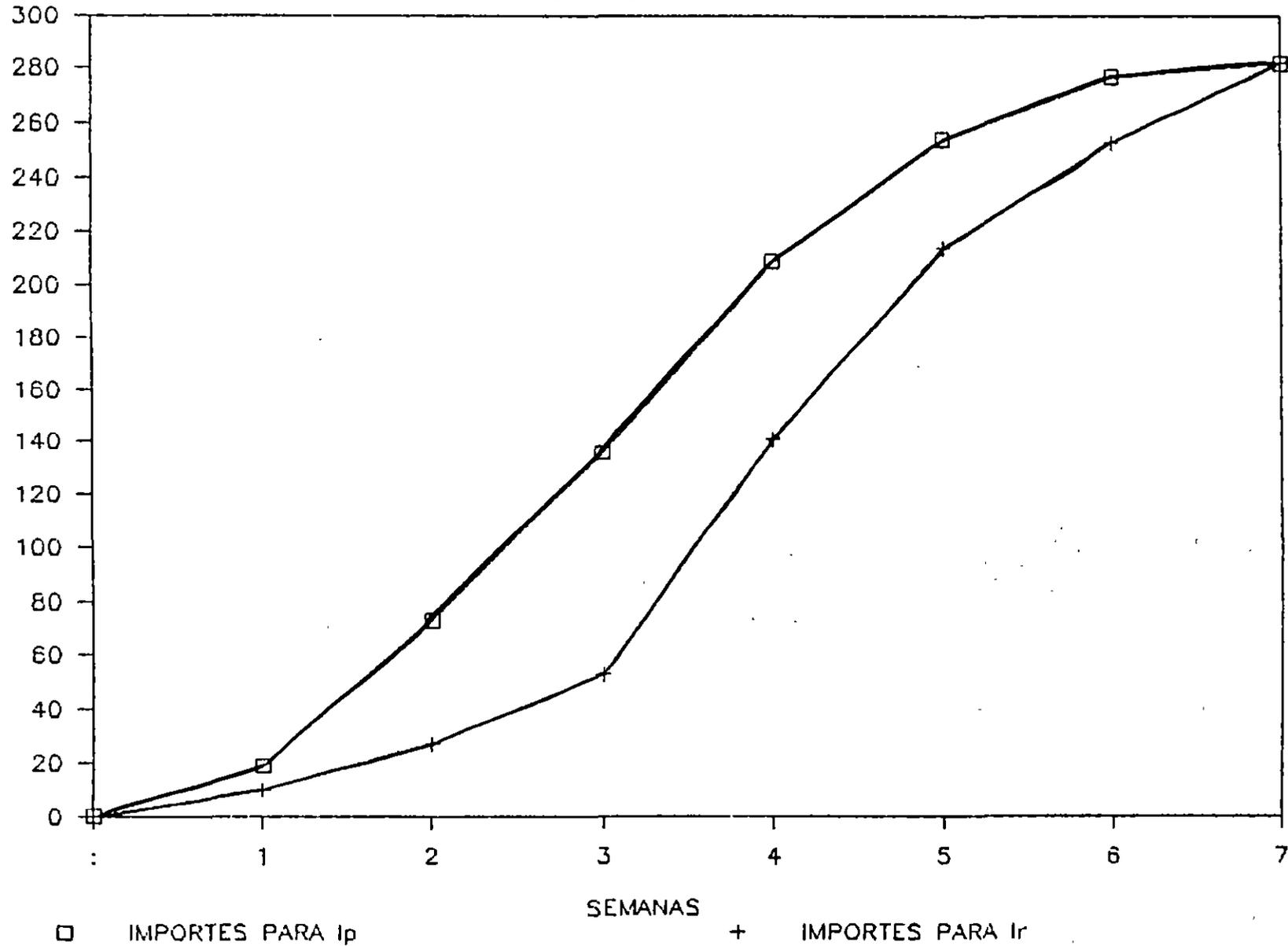


FIG. No. 23.- RANGOS EXTREMOS PARA DETERMINAR LA SOLUCION OPTIMA EN LA DISTRIBUCION DE RECURSOS

#### 4. CONTROL

- Como ya se mencionó, el proceso de Control involucra el establecimiento de un estándar que, en el caso que nos ocupa ya ha sido elaborado.

El siguiente paso, es comparar lo real contra el estándar. En esta etapa puede haber desviaciones por lo cual es necesario identificar la variable o variables que la están ocasionando. El diagrama de flujo de la Figura No. 24, propuesto por el Ing. Federico Alcaraz Lozano, muestra la secuencia lógica en que conviene revisar las variables para incluirlas todas en el análisis de la desviación.

Otra utilización del programa, es tomarlo como referencia para reportar los avances periódicos tanto de cada una de las actividades como de la obra en general. La Figura No. 25 muestra un reporte de avance real comparándolo contra lo programado.

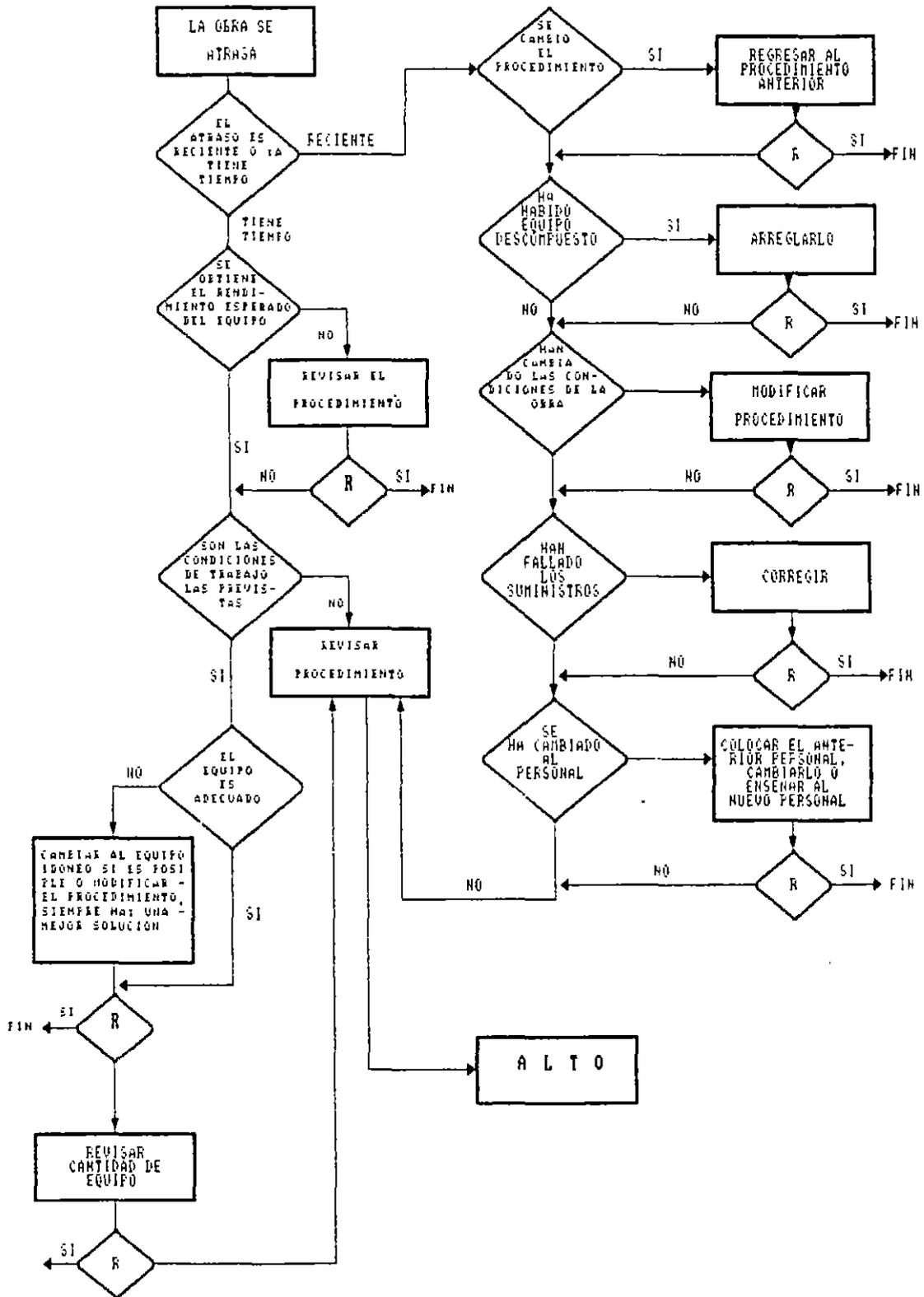


FIG. No. 24.- REVISION DE LAS VARIABLES EN EL PROCESO DE CONTROL

## 5. INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE PRECEDENCIAS MULTIPLES

Durante el desarrollo de los temas anteriores, se observa que los sistemas gráficos de representación son susceptibles de mejorarse:

El diagrama de flechas, tiene como inconvenientes la necesidad de utilizar actividades ficticias, así como el tener que dividir en etapas las actividades cuando queremos representar gráficamente la situación de traslape entre ellas.

Con el sistema de representación por nodos se elimina la necesidad de utilizar actividades ficticias, pero se sigue requiriendo la utilización de actividades divididas en etapas cuando se trata de representar un traslape entre ellas.

Con el sistema de precedencias múltiples, se resuelve esta última situación, estableciendo relaciones entre actividades en función de su inicio y terminación, complementándolas a la fijación de tiempos guía o tiempo de espera entre ellas.

La Figura No. 26, muestra las relaciones de enlace que se pueden establecer entre actividades, dichas relaciones son: Inicio a Inicio, Inicio a Terminación, Terminación a Inicio y Terminación a Terminación.

Para fijar la idea de estas relaciones, vale la pena mencionar que la relación que hemos utilizado en los sistemas de flechas y de nodos han sido de terminación a inicio, es decir, la terminación de las actividades precedentes define el inicio de las actividades subsecuentes.

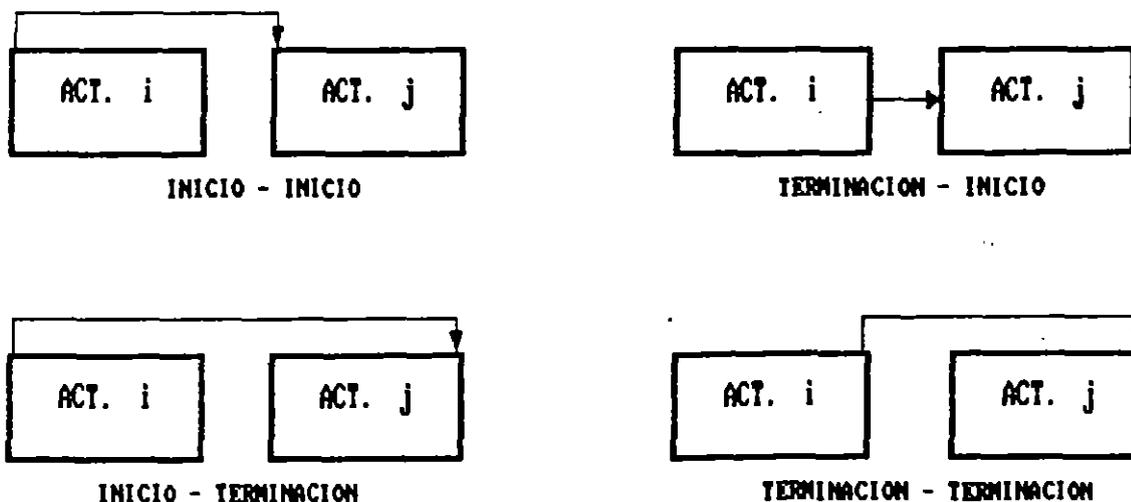


FIG. No. 26.- RELACIONES DE ENLACES ENTRE ACTIVIDADES

**EJEMPLO 1.- RELACION TERMINACION - INICIO**

La Figura No. 27 muestra una relación término-inicio, se trata de las actividades: 1.- Preparación de base y Riego de Impregnación con duración de 1 día. 2.- Espera por especificación con duración de 3 días y 3.- Tendido de carpeta incluyendo riego de liga con duración de 10 días.

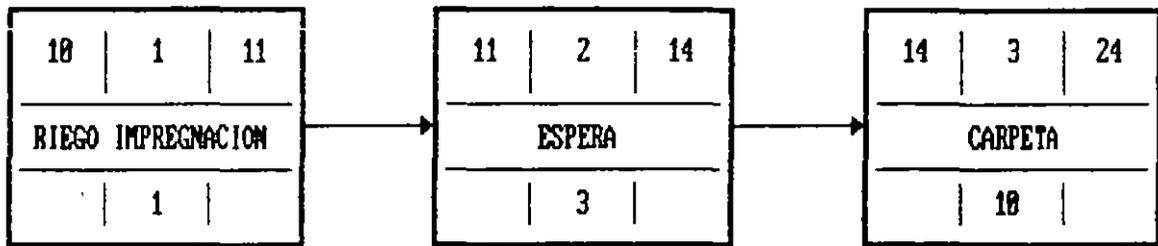


DIAGRAMA DE NODOS

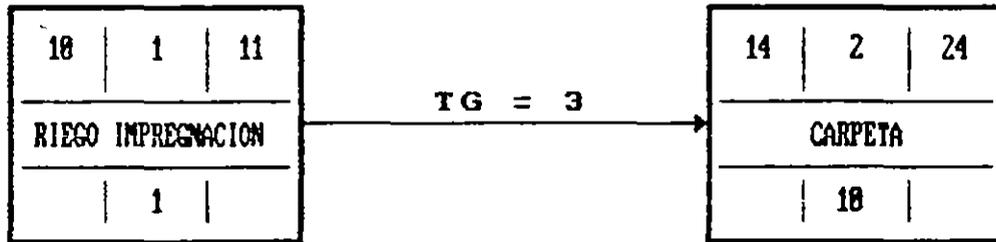


DIAGRAMA DE PRECEDENCIAS

$IP_2 = TP_1 + TG$
--------------------

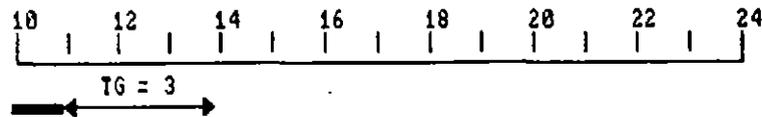


DIAGRAMA DE BARRAS

FIGURA No. 27.- RELACION DE TERMINO A INICIO

**EJEMPLO 2.- RELACION INICIO - INICIO**

La Figura No. 28 muestra una relación inicio-inicio. Se refiere a un tendido de tubería posterior a la excavación de la zanja. Evidentemente no conviene esperar a terminar la totalidad de la excavación para iniciar el tendido, por lo cual establecemos que 5 días después de haber iniciado la excavación comenzamos el tendido de la tubería.

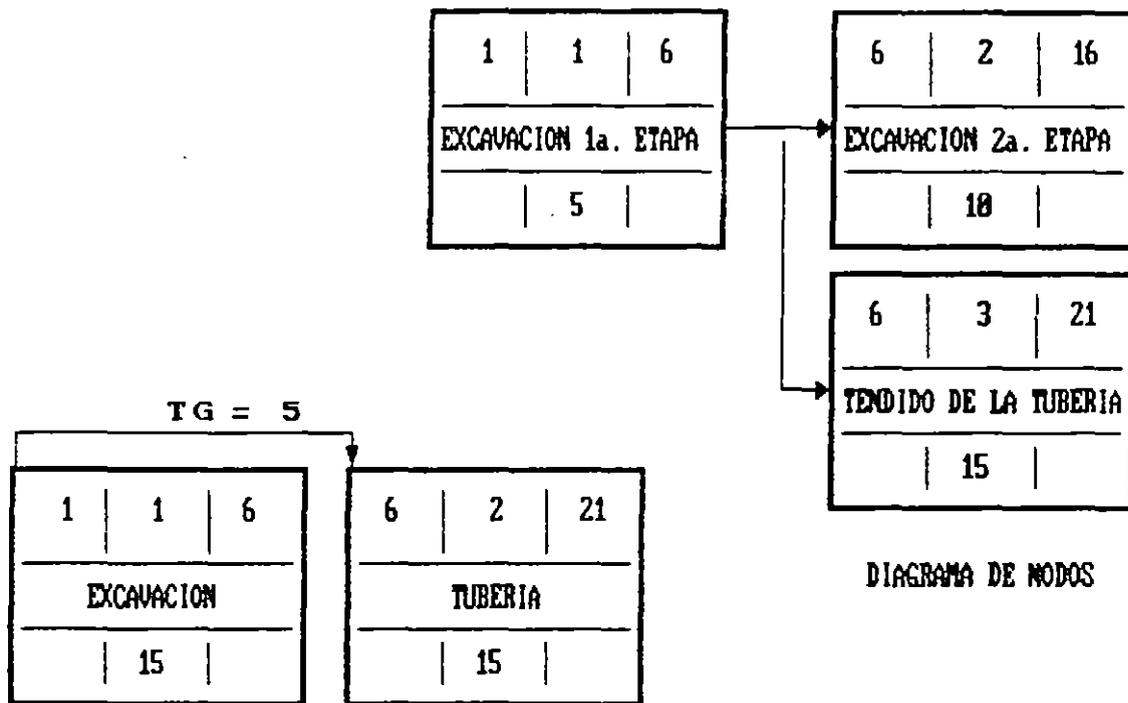


DIAGRAMA DE NODOS

PRECEDENCIAS MULTIPLES

$$I P_2 = I P_1 + T G$$



DIAGRAMA DE BARRAS

FIGURA No. 28.- RELACION DE INICIO A INICIO

**EJEMPLO 3.- RELACION DE TERMINACION A TERMINACION**

La figura No. 29, muestra una relación de terminación a terminación. Supongamos que se están acondicionando ciertos muros para llevar a cabo el montaje de tableros eléctricos en una subestación, a medida que se acondicionan los muros se puede iniciar el montaje de los tableros, sin embargo el montaje del último tablero requiere 3 días, por lo cual la terminación de la actividad precedente asociada al tiempo guía de 3 días, define la terminación de la actividad subsecuente.

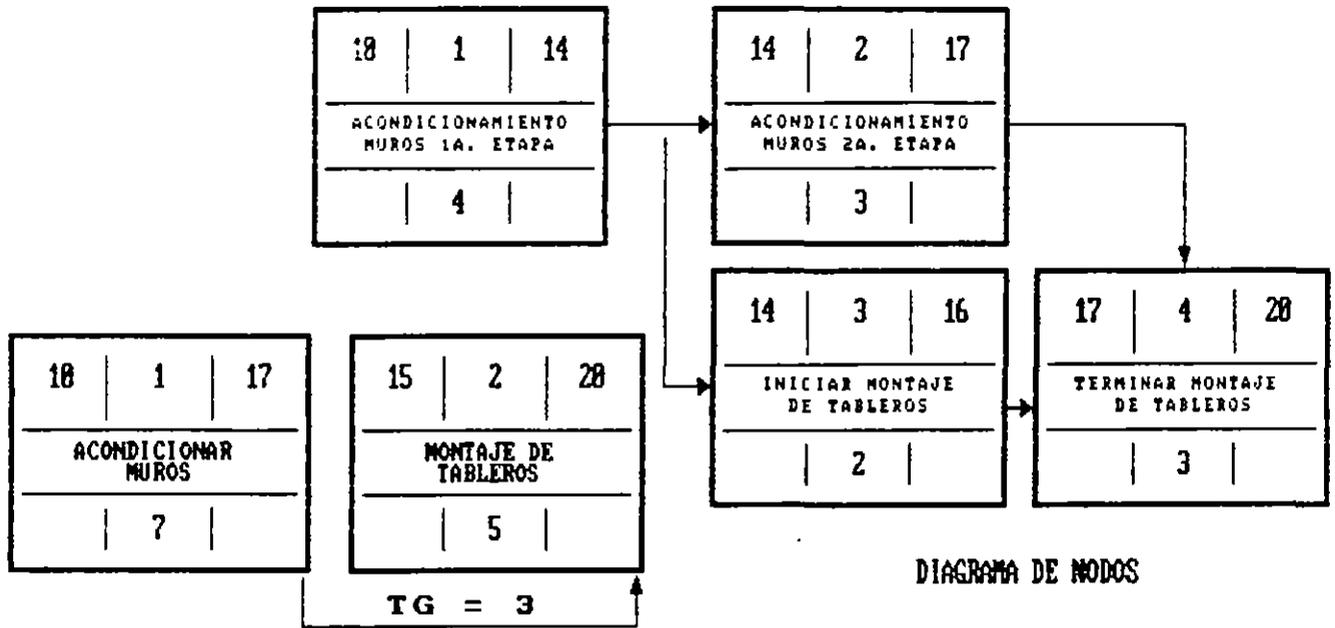


DIAGRAMA DE NODOS

PRECEDENCIAS MÚLTIPLES

$$T_{P_2} = T_{P_1} + TG$$

$$I_{P_2} = T_{P_2} - d_2$$

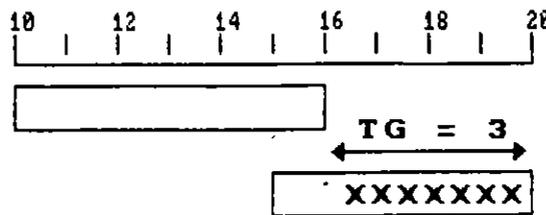
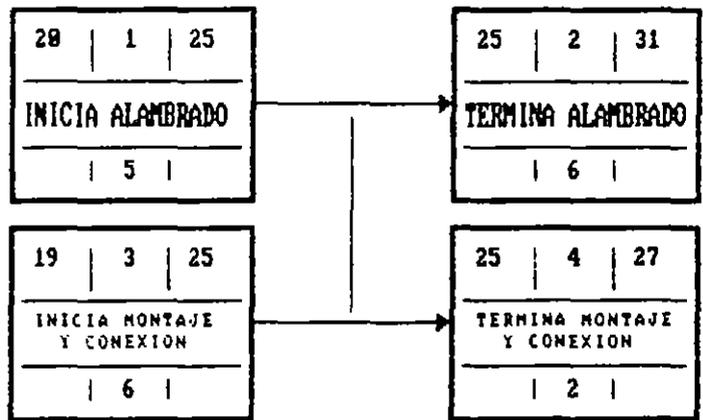


DIAGRAMA DE BARRAS

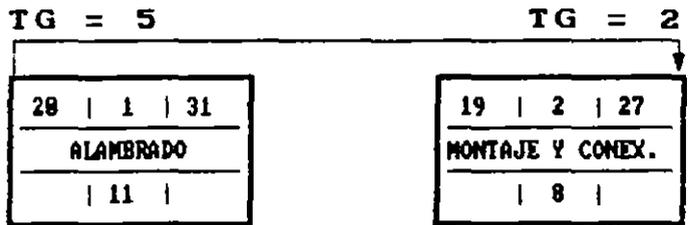
FIGURA No. 29.- RELACION DE TERMINACION A TERMINACION

**EJEMPLO 4.- RELACION DE INICIO A TERMINACION**

La Figura No. 30, muestra una relación de inicio a terminación. Supongamos que un transformador se va a montar y conectar a un sistema de control, se calcula que tardará 5 semanas para que el alambrado esté lo suficientemente avanzado para iniciar la conexión con el transformador, asimismo, una vez hecho lo anterior, para completar la operación de conexión se requieren 2 semanas más.

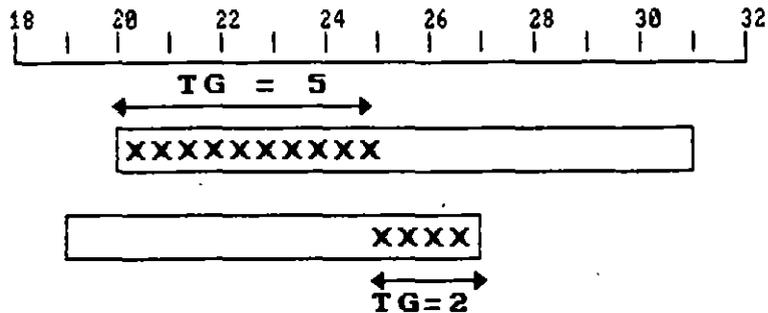


**DIAGRAMA DE NODOS**



**PRECEDENCIAS**

$$\begin{aligned}
 TP_2 &= IP_1 + TG_1 + TG_2 \\
 IP_2 &= TP_2 - d_2
 \end{aligned}$$



**DIAGRAMA DE BARRAS**

**FIGURA No. 30.- RELACION DE INICIO A TERMINACION**

## RELACIONES COMBINADAS

Para ciertas actividades, puede ser conveniente combinar las relaciones que acabamos de definir, por ejemplo: consideremos las actividades "Construcción de Muros de Tabique" y "Construcción de Castillos". Lo usual, es que se inicien los muros y que, después de un cierto avance, se empiecen los castillos; al finalizar la construcción de los muros se requiere de cierto tiempo para terminar la construcción de los últimos castillos. Esta secuencia, se representa en la Fig. No. 31 con el sistema convencional de Nodos. Al elaborar el diagrama de barras, se observa una discontinuidad en la actividad "Construcción de Castillos" que no es conveniente.

Utilizando el sistema de precedencias múltiples, podemos representar gráficamente las actividades descritas, utilizando una doble relación: inicio a inicio y terminación a terminación (ver Fig. No. 32).

Los tiempos próximos de inicio y terminación se calculan por separado. La pareja de valores seleccionada es la que corresponde al tiempo de ejecución máximo, en este caso a dado por la relación terminación - terminación. Esta consideración retrasa el inicio de la actividad Construcción de Castillos pero, a cambio de ello, se tiene como una actividad continua. Queda a elección del programador la alternativa que más convenga.

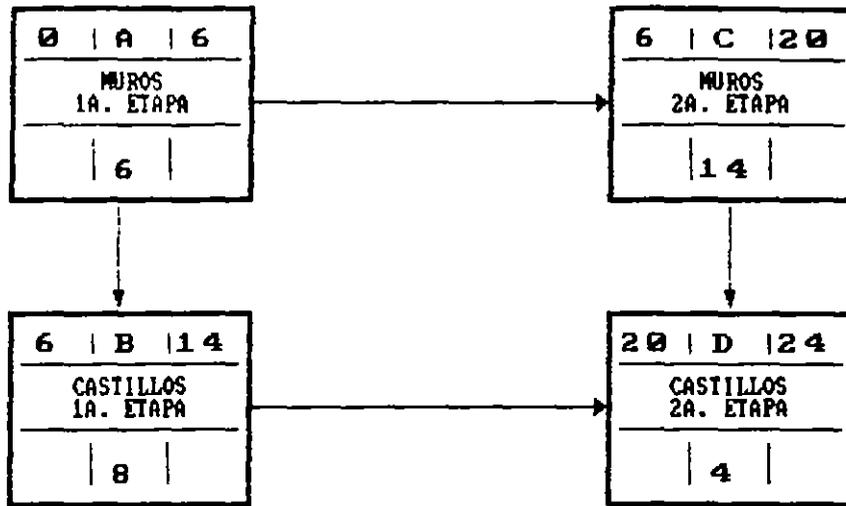


DIAGRAMA DE NODOS

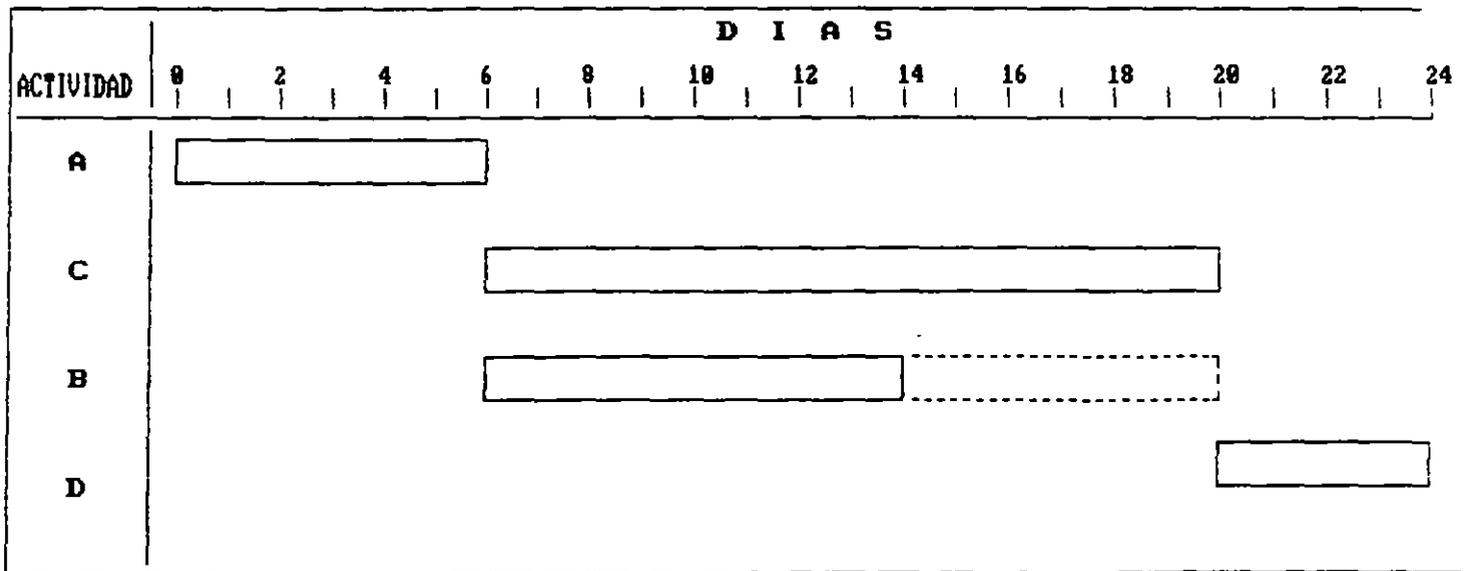


DIAGRAMA DE BARRAS

FIGURA No. 31.- PRESENTACION GRAFICA DE UNA RELACION COMBINADA POR EL SISTEMA CONVENCIONAL DE NODOS

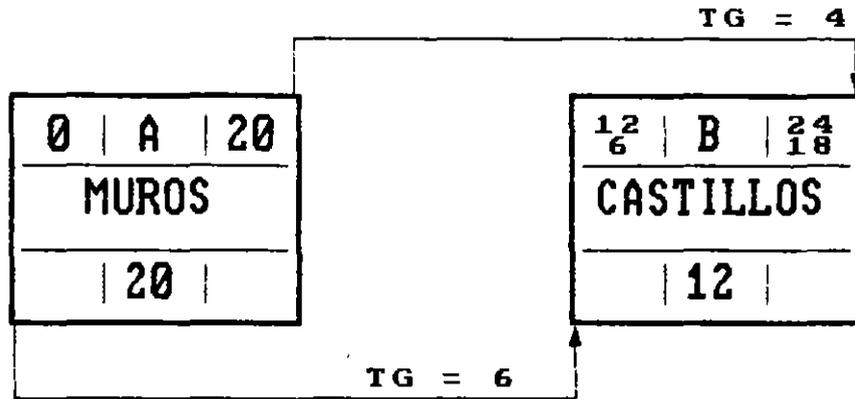


DIAGRAMA DE NODOS

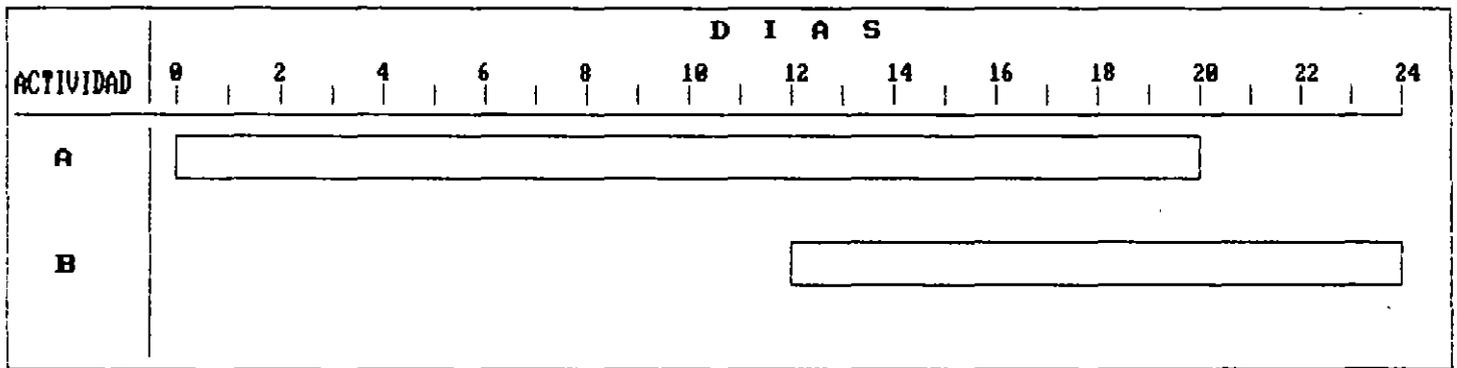


DIAGRAMA DE BARRAS

FIGURA No. 32.- PRESENTACION GRAFICA DE UNA RELACION COMBINADA CON EL SISTEMA DE PRECEDENCIAS

Aplicando la explicación dada para las diferentes relaciones, se presenta en la Fig. No. 33 el cálculo numérico de la red. Asimismo, la Fig. No. 34 muestra el diagrama de barras correspondiente, señalando la ruta crítica, las holguras y las relaciones de enlace.

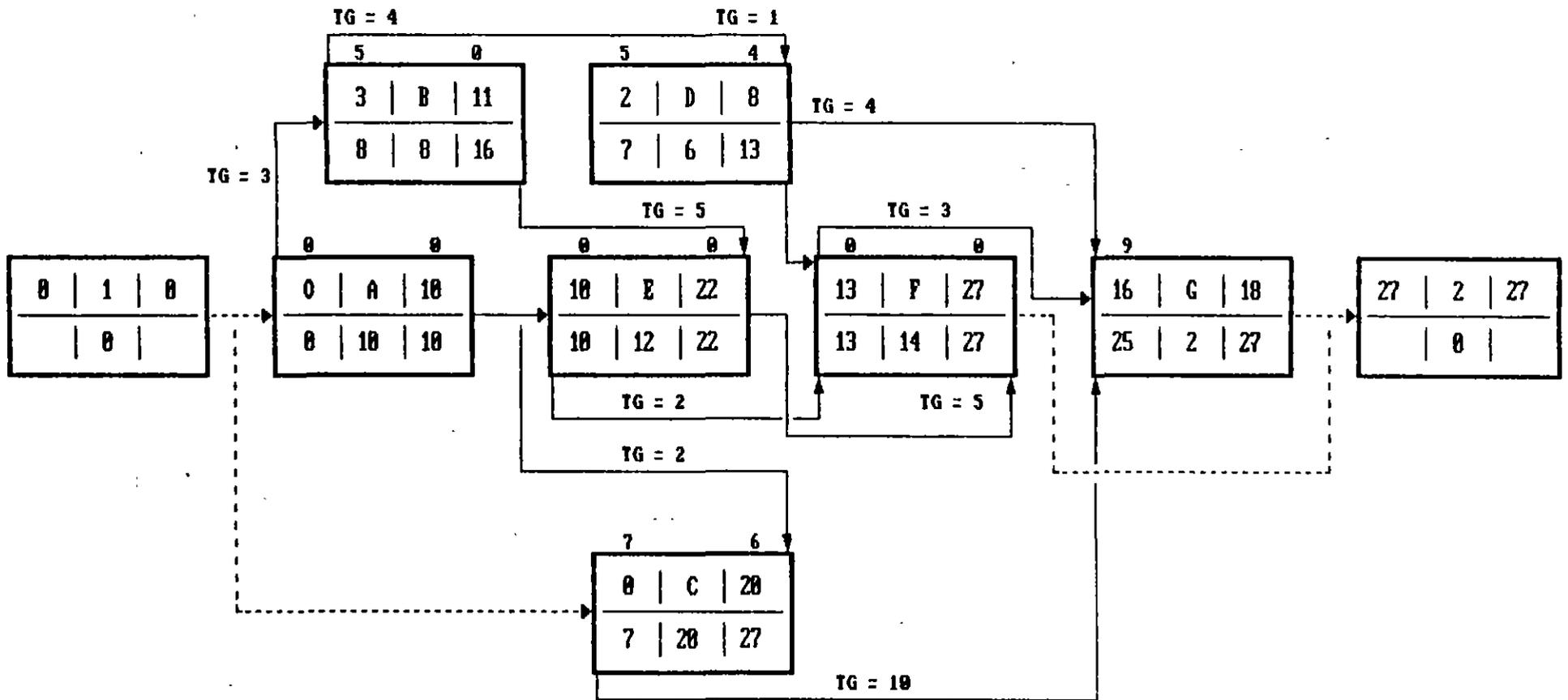


FIGURA No. 33.- CALCULO NUMERICO DEL DIAGRAMA DE PRECEDENCIAS

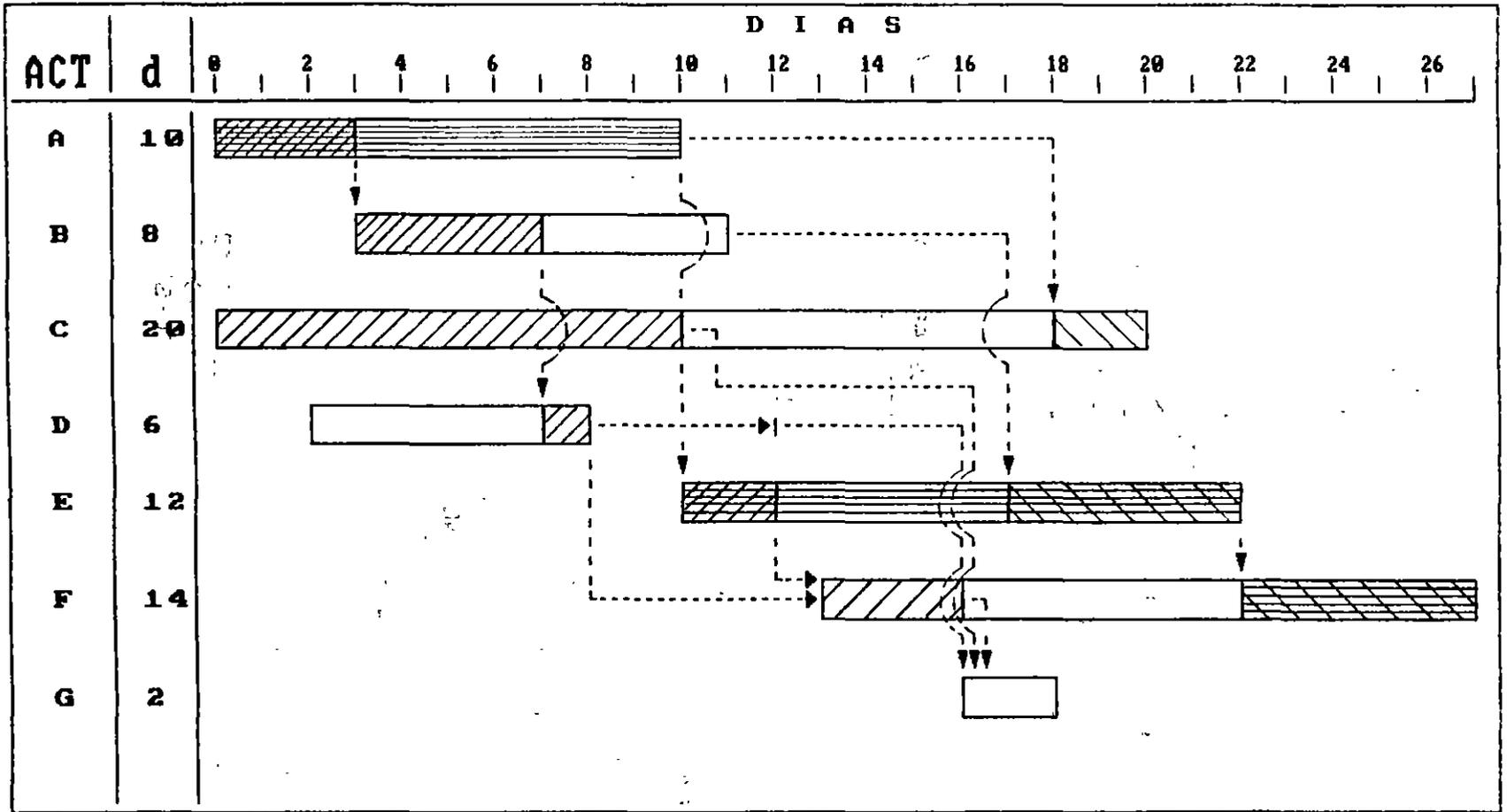


FIGURA No. 34.- DIAGRAMA DE BARRAS

## BIBLIOGRAFIA

**METODO DEL CAMINO CRITICO**  
Catalytic Construction Company  
23 de Mayo de 1974  
Editorial Diana

**METODO DE LA RUTA CRITICA Y SUS APLICACIONES A LA CONSTRUCCION**  
James M. Antill - Ronald W. Woodhead  
5 de Enero de 1983  
Editorial Limusa

**TECNICAS DE REDES DE FLECHAS Y PRECEDENCIAS PARA CONSTRUCCION**  
Robert B. Harris  
4 de Octubre de 1983  
Editorial Limusa

**RUTA CRITICA AL ALCANCE DE TODOS**  
Mario Shjetnan Dantan  
1977  
U. N. A. M.

**DETERMINACION DE LA RUTA CRITICA (TOMO I)**  
**PLANEACION DE OPERACIONES APLICADAS (TOMO II)**  
**ASIGNACION Y PROGRAMACION DE RECURSOS (TOMO III)**  
Dr. R. L. Martino  
Editora Técnica, S.A.