

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

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V: ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA :DESARROLLO HISTORICO

**EXPOSITOR: M. EN I. OCTAVIO ESTRADA CASTILLO
1996**

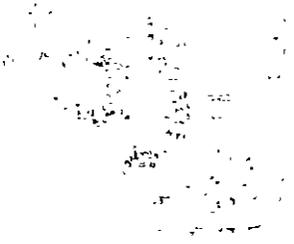
19

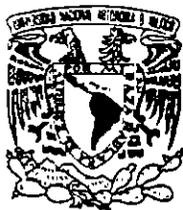
LA O. M. J. J. J. J. J.

19

19

19





**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

DIPLOMADO EN INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN

MODULO V: ANÁLISIS Y CONTROL DE CALIDAD

**del 21 al 31 de Octubre de 1996
de 17 a 21 hrs L a V y de 9 a 13 hrs S**

M. en I. Octavio Estrada Castillo

NOVIEMBRE DE 1996

Actuar), el cual establece una metodología para resolver los problemas de calidad de una empresa y conduce al mejoramiento continuo.

En la Segunda Guerra Mundial, la simple reorganización de los sistemas productivos resulta inadecuada para cumplir las exigencias del estado de guerra y semiguerra, pero con el uso del control de calidad, los Estados Unidos logran producir artículos militares de buena calidad, a bajo costo y en gran cantidad, lográndose que la producción norteamericana durante la guerra fuera muy elevada. Las normas para tiempos de guerra publicadas entonces se denominaron normas Z-1.

Por otra parte, Inglaterra, cuna de la estadística moderna, también desarrolla el control de calidad muy pronto y adopta, ya en 1935, las normas británicas 600 basadas en el trabajo estadístico de E. S. Pearson. Más tarde se adoptaron la totalidad de las normas Z-1 norteamericanas como normas británicas 1008. Durante la guerra, Inglaterra también formuló y aplicó otras normas. Muchos de los métodos estadísticos investigados y empleados por las potencias aliadas resultaron tan eficaces, que estuvieron clasificados como secretos militares hasta la derrota de la Alemania nazi.

En 1946 se crea la American Society for Quality Control (ASQC) nombrando como primer presidente de la asociación a George Edwards. A partir de este momento los conceptos básicos de la calidad son difundidos rápidamente; surgen profesionales en aseguramiento de la calidad y se desarrollan técnicas para el análisis de fallas. Los ingenieros de calidad comienzan a involucrarse en algunas de las primeras etapas del diseño de productos y comienzan a hacerse pruebas del desempeño de éstos. Sin embargo, también muchas compañías empiezan a ver los esfuerzos realizados durante la guerra como innecesarios para el creciente mercado de la posguerra, pues la industria norteamericana era prácticamente la única que no había sido arrasada por la guerra y la única capaz de surtir este mercado. Esta falta de competencia provoca, en Estados Unidos, el detenimiento casi total del progreso del concepto de calidad aplicado a las empresas.

El Dr. William Edwards Deming ⁽³⁾, 1900 - 1993, quién hizo su maestría en Física y Matemáticas en la Escuela de Minas del Colorado y su doctorado en Física en Yale, conoció al Dr. Shewhart en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y de él aprendió los fundamentos de la disciplina de calidad. En 1940, Deming ingresa a la Oficina de Censos y trata de demostrar que el control estadístico puede ser aplicado a la industria y en 1942 es contratado para aplicar esta herramienta en la industria armamentista, convirtiéndose cuatro años más tarde en socio y fundador de la ASQC. Viviendo apartado de la colonia aliada en el Japón y estudiando la lengua y cultura autóctonas, Deming logró hacerse de amistades en ese país y por la labor que desempeñaba, contactó a la Unión de Científicos e Ingenieros Japoneses (JUSE por sus siglas en inglés), y a través de ellos empezó a impartir una serie de seminarios. En estos seminarios trató principalmente tres puntos:

- 1) Cómo mejorar la calidad mediante el ciclo PHVA (Planear, Hacer, Verificar y Actuar).
- 2) La importancia de captar la dispersión en las estadísticas.
- 3) El control de procesos mediante el empleo de gráficas de control y cómo implantar dicho control.

Hubo también un seminario para ejecutivos y presidentes de corporaciones japonesas. Las conferencias fueron claras y benéficas y fueron tomadas con toda seriedad, siendo a partir de ellas que se inicia propiamente el despegue del control de calidad japonés. En 1951, con las regalías del libro basado en estas conferencias se establecen los premios Deming, que aún se otorgan cada año a las empresas e individuos que alcanzan logros importantes en el diseño y aplicación del control de calidad, y de los cuales se hablará más adelante. Nueve años más tarde y ante el inminente renacimiento de la industria japonesa, Deming es galardonado con la Segunda Orden del Sagrado Tesoro, reconocimiento de alto honor en el Japón. A su regreso a Estados Unidos, Deming se retira del trabajo en 1967 y siendo totalmente desconocido en su país, no es "descubierto" sino hasta 1980, cuando logra contactarlo la reportera Clare Crawford Mason, quién recaba información para un documental de la NBC que cuestionaba la

pérdida del ingenio americano y la posición de EUA ante el Japón. A partir de este momento, el enfoque de calidad de Deming empieza a aplicarse en gran parte de los EUA. Empresas como la Nashua Corporation, Ford Motor Company, General Motors, Dow Chemical y Hughes se convierten en pioneras en la aplicación de los principios de Deming. En 1985 gana por primera vez el premio Deming una empresa norteamericana, Texas Instruments.

Para Deming la calidad sólo puede definirse en función del sujeto que la juzga; menciona como ejemplos que para el operario de una línea de producción, él fabrica calidad si puede estar orgulloso de su trabajo; para el gerente de planta la calidad significa cumplir las metas y cumplir las especificaciones. Establece que el "cliente" es la pieza más importante en la línea de producción y sostiene que lo fundamental es el principio de que el objetivo de la investigación sobre los consumidores consiste en comprender las necesidades y deseos de los mismos, y así diseñar el producto y/o servicio que le proporcione una vida mejor en el futuro.

Deming afirma que la calidad se tiene que medir por la interacción entre tres componentes: 1) el producto; 2) el usuario y cómo usa el producto, cómo lo instala, cómo lo cuida; 3) las instrucciones de uso, formación del cliente y formación de la persona encargada de las reparaciones, el servicio suministrado por éste, la disponibilidad de las piezas.

Deming resume su enfoque en una serie de 14 principios, mismos que a continuación se reproducen:

1. Instituir en la empresa el propósito sólido y permanente de mejorar la calidad de productos y servicios.
2. Adoptar una nueva idea, contraria al convencimiento de que los errores y los productos defectuosos son normales en la producción.
3. Eliminar la dependencia de la inspección masiva.
4. Poner fin a la práctica de operar sobre la base de precios

5. Mejorar constantemente los métodos y el nivel de los servicios.
6. Implantar la formación en el trabajo. El entrenamiento debe ser replanteado con base en estándares de calidad, y no de cantidad.
7. Instituir métodos modernos de supervisión.
8. Romper el miedo.
9. Romper las barreras entre áreas.
10. Eliminar "slogans", exhortaciones y metas exclusivamente cuantitativas para la fuerza de trabajo. El fijar metas sin atender a la forma de alcanzarlas, tiene un efecto más negativo que positivo.
11. Eliminar estándares y cuotas de trabajo sobre cantidad. Los estándares sólo toman en cuenta la cantidad y no la calidad, asegurando una producción en defectos y desperdicios que nunca se reducen.
12. Remover las barreras puestas al orgullo y la satisfacción del trabajador.
13. Instituir un vigoroso programa de entrenamiento en control estadístico.
14. Crear la estructura que fomente la aplicación cíclica de los 13 puntos anteriores.

Uno de los impulsores más fuertes del concepto de calidad aplicado a las empresas es el Dr. Joseph M. Juran, 1903-. Es autor de numerosos libros sobre calidad y administración y editor en jefe de uno de los libros más famosos que existen sobre dicho tema: *Quality Control Handbook* ⁽⁴⁾, 1951. Según Juran existen dos clases de calidad: adecuación al uso y conformidad con las especificaciones; un producto puede cumplir las especificaciones y no ser adecuado para el uso.

Para Juran el término 'adecuación para el uso' significa en este caso el mecanismo a través del cual el producto y/o servicio exitosamente sirve a los propósitos del usuario, durante su uso. Según este autor el término

'adecuación para el uso' es sinónimo de calidad. Otro concepto que se aplica en este caso es el que se deriva de la palabra griega "ophelimos", el cual significa literalmente 'poder para dar satisfacción'. Para Juran un cliente es aquél que compra de otro; él establece que si la compra es para el uso, a éste se le denomina usuario, entendiendo por usuario como aquél que recibe el beneficio proyectado del producto; el usuario puede consumir el producto o puede realizar un proceso adicional para crear un producto diferente para la venta; los individuos y familias que consumen los bienes para propósitos personales son comúnmente llamados consumidores.

Según Juran cualquier rasgo (propiedad, atributo, parámetro, etcétera) de los productos, materiales o procesos, que sea necesario para alcanzar la adecuación al uso, es una característica de calidad. Estas características las clasifica en las siguientes categorías:

- Tecnológicas; por ejemplo: dureza, inductancia, acidez, etcétera.
- Psicológicas; por ejemplo: sabor, belleza, status, etcétera.
- Orientadas al Tiempo; por ejemplo: disponibilidad, confiabilidad, mantenibilidad, etcétera.
- Contractuales; por ejemplo estipulaciones de garantía.
- Éticas; por ejemplo: cortesía del personal de ventas, honestidad, prontitud, etcétera.

Los principales parámetros de adecuación para el uso, según Juran, son:

- A. **Calidad de Diseño;** el cual puede ser considerado como un término técnico, compuesto de tres pasos separados en una progresión común de actividades:
 - 1. **Calidad en la Investigación de Mercado:** identificación de que constituye adecuación para el uso desde el punto de vista del usuario.

2. Calidad del Concepto de Producto: elección de un concepto de producto y/o servicio que responda a las necesidades identificadas del usuario.
 3. Calidad de Especificación: Traducción del concepto de producto y/o servicio en un conjunto detallado de especificaciones, las cuales, al ser completamente ejecutadas, cubren las necesidades de los usuarios.
- B. Calidad de Conformidad; también conocido como calidad de manufactura o calidad del producto; es el proceso a través del cual se asegura que el producto se realice conforme a las especificaciones.
- C. Habilidades del producto y/o servicio; algunos factores orientados al tiempo son muy importantes (principalmente para aquellos que tienen un tiempo medio de vida largo): disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad.

- Disponibilidad; se dice que un producto está disponible cuando está en estado operativo; el tiempo total en estado operativo se obtiene de la suma del tiempo en uso activo más el tiempo en que el producto está en espera de su uso; el tiempo total en estado no operativo es la suma del tiempo en reparación más el tiempo en espera de conseguir las refacciones. La disponibilidad se define como un cociente:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{tiempo en estado operativo}}{\text{tiempo en estado operativo} + \text{tiempo en estado no operativo}}$$

de otra forma

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{tiempo medio entre fallas}}{\text{tiempo medio entre fallas} + \text{tiempo medio de reparación}}$$

- Confiabilidad; la definición clásica es "la probabilidad de que un producto y/o servicio realice sin fallas una función especificada"

bajo condiciones dadas por un periodo específico de tiempo". La confiabilidad inherente al diseño se conoce como confiabilidad intrínseca; a la confiabilidad alcanzada en el proceso de manufactura se le denomina confiabilidad operacional.

- **Mantenibilidad;** el mantenimiento de un producto y/o servicio toma lugar de dos formas diferentes:
 - Preventivo o programado, el cual consiste de pruebas y verificaciones para detectar fallas potenciales, servicio programado y replazo planeado de partes gastadas.
 - Mantenimiento correctivo o no programado, el cual consiste de restablecer el servicio al momento de ocurrir la falla.

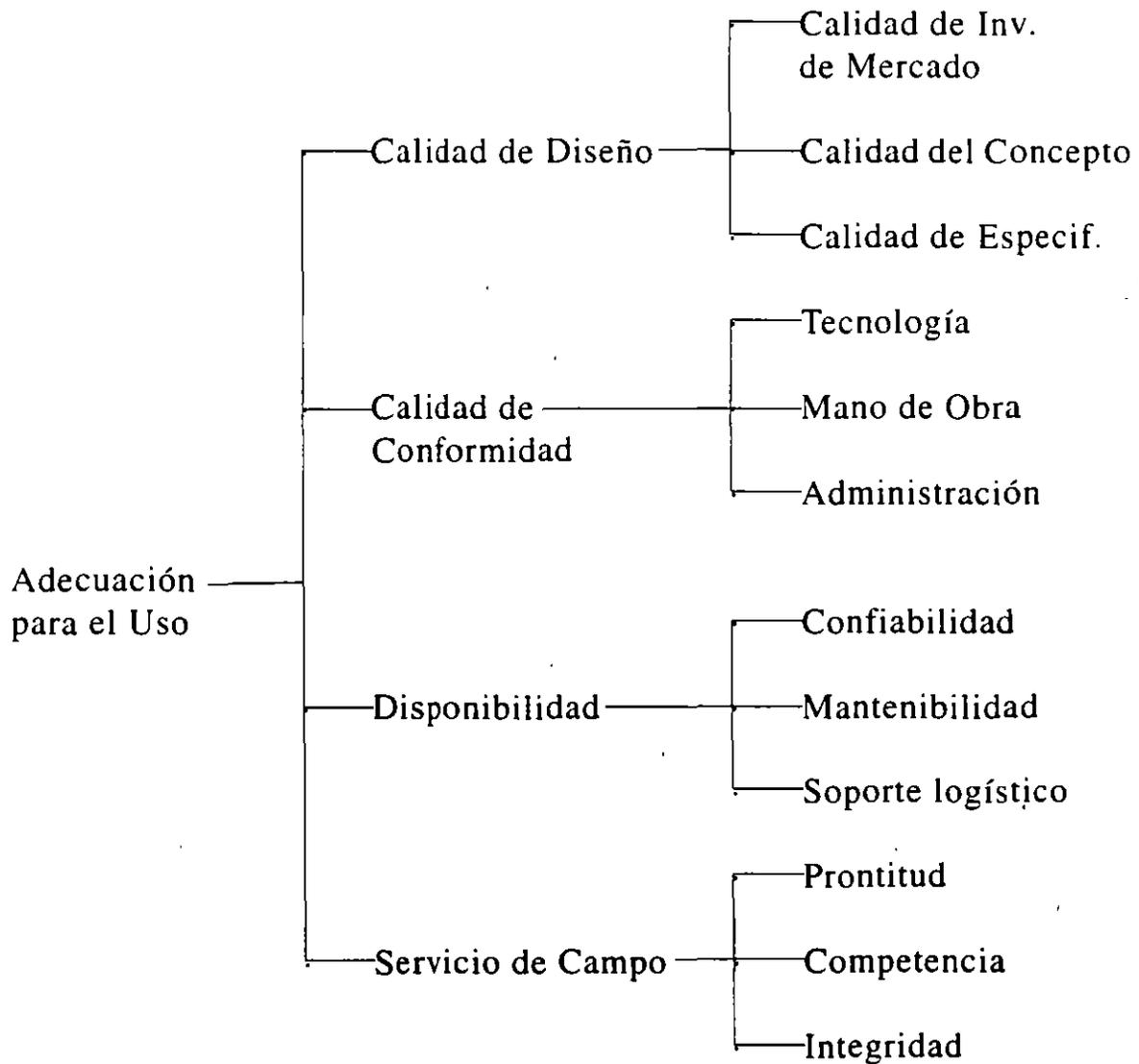
El término mantenibilidad ha sido adoptado como una expresión de la facilidad con que el mantenimiento puede ser conducido. Las medidas de mantenibilidad actualmente en uso incluyen: tiempo medio de reparación; probabilidad de restablecer el servicio en el periodo de tiempo especificado y tiempo medio para efectuar el mantenimiento preventivo (este tiempo a menudo está dividido en tiempo de inspección y tiempo de servicio). La efectividad del mantenimiento está intensamente influida por la tecnología de soporte, por el diseño para fácil acceso y para el reemplazo modular, por instrumentos especiales para hacer diagnósticos de causas de fallas, por herramientas especiales de reparación y por información técnica acerca del producto y su uso.

D. Servicio de Campo; también conocido como servicio al cliente, servicio de ventas o sólo servicio. La habilidad del usuario para asegurar la continuidad en el servicio depende fuertemente de establecer negociaciones con empresas proveedoras que garanticen:

- Proveer contratos de servicio claros e inequívocos.
- Establecer adecuada capacidad en equipo de reparación y proveedores confiables de partes.

- Reclutar y entrenar una fuerza de servicio competente para diagnosticar y corregir fallas.
- Proveer respuesta inmediata a llamadas de servicio.
- Conducir las negociaciones con el cliente con cortesía e integridad.

La interrelación que se tiene entre todos los parámetros de adecuación al uso se muestra a continuación:



Uno de los conceptos más importantes de Juran es el denominado 'Función de Calidad', también conocido como espiral de la calidad, la cual la define como la colección completa de actividades a través de las cuales se alcanza la adecuación para el uso, no importando donde son realizadas estas actividades. En la figura 1 se muestra dicha espiral.

Algunos de los conceptos básicos que define Juran en su Quality Control Handbook son los siguientes: un defecto es cualquier estado de no adecuación para el uso, o de no conformidad con las especificaciones. Un problema es una tarea potencial, resultante de la existencia de defectos. Un proyecto es un problema seleccionado para su solución a través de un enfoque organizado de diagnóstico y acción correctiva. Un síntoma es un fenómeno observable, el cual aparece y acompaña a un defecto. Una teoría es una afirmación no probada como razón para la existencia de defectos y síntomas. Una causa es una razón probada para la existencia de un defecto. Una causa dominante es aquella que contribuye mayormente a la existencia de defectos y que debe ser corregida antes de que pueda obtenerse una solución satisfactoria. Diagnóstico es el proceso de estudiar los síntomas, recopilar y analizar datos, conducir experimentos para probar teorías y establecer relaciones entre causas y efectos. Una acción correctiva es un cambio el cual puede exitosamente eliminar o neutralizar una causa de defectos.

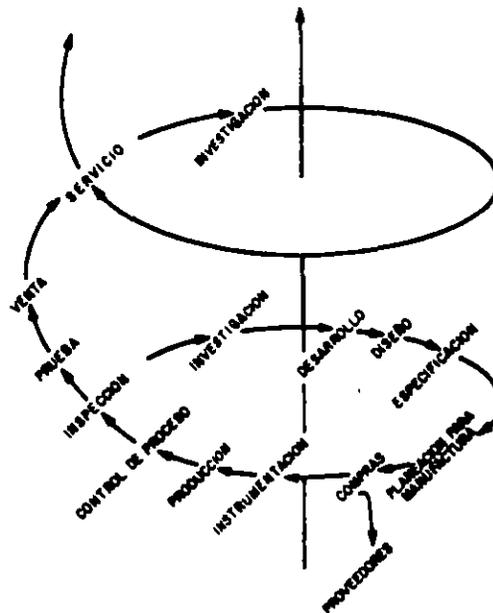


Figura 1 Espiral de Calidad de Juran

Para Juran la administración de la calidad consiste de tres procesos básicos:

- a) Planeación de la Calidad.
- b) Control de la Calidad.
- c) Mejora de la Calidad.

Para Juran el término Planeación de la Calidad se refiere al proceso de preparación para alcanzar las políticas de calidad, las cuales define como el conjunto de principios, credos, creencias, etcétera, que son definidas a partir de una base filosófica y que sirven para guiar en términos generales la conducta gerencial de una empresa. El modelo para planeación de proyectos, consiste de una secuencia universal de actividades, listadas a continuación:

1. Divida la política general de calidad de la compañía en una serie de políticas de calidad de cada área. A menudo estas políticas son agrupadas para constituir un estado o fase de progreso.
2. Definición de los logros a ser alcanzados.
3. Asignación de responsabilidades para alcanzar estos logros.
4. Establecimiento de metas y su programación.
5. Descripción de métodos y procedimientos.
6. Provisión de instalaciones, instrumentos, equipo y espacio.
7. Selección y entrenamiento del personal.
8. Provisión para medición y registro de resultados para control.
9. Provisión para auditoría.

El control, según Juran, es el proceso a través del cual se establecen y se cumplen estándares. Control de Calidad es el proceso regulatorio a través del cual se mide el desempeño actual en calidad, se compara éste con estándares y se actúa sobre la diferencia. Este proceso consiste de una serie universal de pasos, la cual se lista a continuación:

1. Elegir el sujeto a controlar, es decir seleccionar qué será regulado.
2. Elegir una unidad de medida.
3. Fijar un valor estándar, especificando la característica de calidad.
4. Crear un dispositivo sensible que pueda medir la característica en términos de la unidad de medida.
5. Conducir mediciones actuales.
6. Interpretar la diferencia entre la medición actual y el estándar.
7. Tomar decisiones y actuar sobre la diferencia.

Para Juran existen dos tipos de problemas:

- a) Problemas Esporádicos ("troubleshooting"); los cuales representan variaciones significativas con respecto al estándar y demandan que el personal responsable de su control ponga atención en las señales de alarma y establezca los siguientes pasos para regresar al status quo: 1) detectar qué cambios en el proceso crearon los síntomas responsables de la señal de alarma; y, 2) remover las causas de los cambios; la secuencia de pasos para restablecer el status quo se conoce como "troubleshooting" o "firefighting".
- b) Problemas Crónicos ("breakthrough"); en cualquier sistema de control, el nivel estándar de desempeño es también la meta. Un mejoramiento es llamado "breakthrough" si cumple dos criterios esenciales: 1) el nuevo nivel de desempeño nunca ha sido previamente obtenido,

se fija un nuevo record; 2) el cambio es el resultado de la determinación humana para fijar un nuevo record, no es producto de la suerte.

El análisis de la anatomía de los "breakthrough" alcanzados revela que existe una secuencia universal de pasos a ser seguidos:

1. Probar que el mejoramiento es necesario y crear una actitud que sea favorable para emprender un programa que logre dicho mejoramiento.
2. Identificar los proyectos "pocos vitales" que justifican el esfuerzo para mejorar.
3. Organizar para asegurar el nuevo conocimiento necesario para tomar acciones efectivas de mejoramiento, a través de proveer los medios para a) guiar y coordinar el trabajo de los proyectos; b) conducir estudios detallados y análisis.
4. Conducir el análisis y diagnóstico.
5. Liderar con la resistencia cultural a los cambios tecnológicos indicados.
6. Emprender acciones para instituir el mejoramiento.
7. Instituir los controles necesarios para mantener el nuevo nivel de desempeño.

Las actividades conocidas como prevención de defectos, mejoramiento de calidad, reducción de costos de calidad, etcétera, descansan en dos jornadas de trabajo: de diagnóstico y de acción correctiva.

La jornada de diagnóstico consiste de los siguientes pasos:

1. Analizar los síntomas alrededor de los defectos que sirvan como base para teorizar acerca de las causas.
2. Teorizar sobre la causa de estos síntomas.

3. Analizar y experimentar para establecer las causas verdaderas.

La jornada de acción correctiva normalmente se inicia cuando las causas verdaderas (causas raíz) son conocidas; ésta consiste de los siguientes pasos:

4. Propuestas alternativas de acción correctiva.

5. Selección y aplicación de la acción correctiva.

6. Provisión para mantener lo ganado.

Juran fue el creador del Diagrama de Pareto, el cual se utiliza para ordenar los problemas o defectos de acuerdo a su impacto en los costos o de acuerdo a su frecuencia. Este diagrama parte del principio formulado por el economista italiano Vilfredo Pareto, 1848-1923, el cual analizó la distribución de la riqueza y estimó la desigualdad de ésta en una proporción de 80-20 %.

En 1951 es publicado el libro Control Total de Calidad ⁽⁵⁾ de Armand V. Feigenbaum. Este libro hace un gran avance al extender los conceptos de control de calidad a todas las áreas de la empresa, desde el diseño hasta las ventas. Hasta ese momento el control de calidad era enfocado únicamente a actividades correctivas y no a la prevención. El principal mérito del Dr. Feigenbaum fue integrar todas las actividades de calidad, con frecuencia no coordinadas, y crear un marco sistémico que colocara la responsabilidad de los esfuerzos para la calidad orientada hacia el cliente a través de todas las actividades de línea principal de una empresa. Para el Dr. Feigenbaum la calidad es responsabilidad de todos los que laboran en una empresa y expresa que por lo mismo puede convertirse en tarea de nadie, por lo cual es necesario crear una función administrativa bien organizada cuya única labor sea la de llevar a cabo las tareas de control de calidad.

La guerra de Corea crea un nuevo énfasis en la necesidad de la confiabilidad de los productos y en las pruebas de producto terminado. Sin embargo, las pruebas adicionales instauradas no permitieron por si mismas alcanzar los objetivos de calidad y confiabilidad fijados por las empresas, lo que hizo

necesario la creación de programas de mejoramiento y calidad desde las áreas de ingeniería y manufactura, lo que es denominado aseguramiento de calidad (para Juran el aseguramiento de calidad es la actividad de proveer, para todo lo concerniente, la evidencia necesaria para establecer confianza de que la función de calidad está siendo desempeñada adecuadamente). El aseguramiento de calidad comienza también a aplicarse en hoteles, bancos, gobierno y otros sistemas de servicio.

A finales de los 60's la mayoría de las empresas norteamericanas contaban ya con programas de calidad. La industria norteamericana seguía siendo líder en los mercados mundiales, mientras Europa y Japón seguían en la reconstrucción de su propia industria.

En los años 70's, la competencia extranjera empieza a amenazar a las compañías norteamericanas. La calidad de productos japoneses como los automóviles y las televisiones comienza a sobrepasar a la de los norteamericanos. Además, los consumidores se vuelven más sofisticados y empiezan a involucrar en sus decisiones de compra, el precio y la calidad del producto pero a lo largo de toda su vida útil. La combinación de estos dos factores fuerza a la industria norteamericana a interesarse más por las cuestiones de calidad.

Los 80's se distinguen por un esfuerzo para alcanzar la calidad en todos los aspectos dentro de las organizaciones de negocios y servicios en los Estados Unidos, incluyendo las áreas de finanzas, ventas, personal, mantenimiento, administración, manufactura y servicios. La calidad se enfoca ya al sistema como un todo y no exclusivamente a la línea de manufactura.

A raíz del éxito japonés, los norteamericanos comienzan a estudiar y a importar muchas de las técnicas desarrolladas en Japón y hasta el momento ajenas a las empresas occidentales como los círculos de calidad o los métodos Taguchi. Finalmente, en agosto de 1987, se establece un premio anual de calidad en EUA: el Premio Malcolm Baldrige, con el fin de promover una conciencia de calidad, reconocer los logros en materia de calidad de las empresas estadounidenses y hacer del conocimiento público las estrategias exitosas para el logro de la calidad.

I.3 EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO EN JAPÓN

Aunque ya antes de la 2ª Guerra Mundial se intenta la aplicación de algunos de los métodos occidentales de control de calidad, no es hasta el término de ésta con la ocupación norteamericana que se inicia el verdadero despegue del control de calidad. Poco antes de la guerra, el Japón se entera de las primeras normas británicas 600 y las traduce al japonés. Algunos académicos japoneses se dedican al estudio de la estadística moderna, pero su trabajo, expresado en lenguaje matemático difícil de entender, no logra una acogida popular. El control de calidad, cuando se aplicaba, dependía totalmente de la inspección y aunque Japón competía más o menos en costos, su calidad dejaba mucho que desear.

Cuando las fuerzas de ocupación norteamericanas desembarcan en Japón, tienen que afrontar de inmediato los problemas que provocan las deficiencias en la calidad con las fallas frecuentes del sistema telefónico japonés. Al ver estos defectos, las fuerzas norteamericanas le piden a la industria japonesa de comunicaciones empezar a aplicar el control de calidad moderno. Fue entonces, mayo de 1946, cuando se dió el comienzo del control estadístico de calidad en Japón. Las fuerzas de ocupación impartieron sus enseñanzas a la industria japonesa, transfiriendo el método norteamericano sin ninguna modificación apropiada para el Japón, y aunque esto creó algunos problemas, los resultados fueron bastante satisfactorios, por lo que dicho método fue rápidamente difundido más allá de la industria de telecomunicaciones. También, en este período se establece el sistema de normas nacionales.

En 1945 se crea la Asociación Japonesa de Normas, seguida del Comité de Normas Industriales Japonesas en 1946. La ley de Normalización Industrial se promulga en 1949 y la ley de Normas Agrícolas Japonesas (NAJ) en 1950. Al mismo tiempo, se instituye el sistema de la marca NIJ con base en la ley de Normalización Industrial Japonesa. El sistema de la marca NIJ, consistía en que ciertas mercancías podían llevar la marca NIJ siempre y cuando fueran producidas por fábricas que se ciñieran a las normas NIJ de control estadístico y garantía de calidad. Este sistema contribuyó fuertemente a introducir y difundir el control estadístico en las industrias japonesas, y fue de participación estrictamente voluntaria:

cualquier empresa podía optar por que se inspeccionaran sus productos, o bien optar por no inspeccionarlos. Una vez aprobada la verificación, podía colocarse o no la marca NIJ.

En 1946 se crea también la Unión de Científicos e Ingenieros Japoneses (JUSE) y en 1949 se crea dentro de la misma JUSE un grupo de investigación en control de calidad con miembros procedentes de las universidades, la industria y el gobierno. Los objetivos de este grupo eran efectuar investigaciones y difundir información sobre el control de calidad. En septiembre de 1949 se organiza el primer curso básico de control de calidad para los ingenieros de las industrias utilizando como textos las traducciones al japonés de las normas británicas y norteamericanas. Después de este primer curso se vió que en el control de calidad, al involucrar factores humanos y sociales, no pueden importarse, por muy buenos que sean, los métodos norteamericanos y británicos sin antes ser modificados. A partir del segundo curso los miembros del grupo de investigación elaboraron sus propios textos y evitaron las obras traducidas.

En 1950 la JUSE organiza los seminarios impartidos por el Dr. Deming, los que como ya se mencionó marcaron el despegue del control de calidad en el Japón. La consolidación de una conciencia de calidad dentro de la industria japonesa se da con la visita del Dr. Juran en 1954, la cual marca una transición en las actividades del control de calidad en el Japón: si antes se ocupaban principalmente de la tecnología de la planta, después de esto se convirtieron en una inquietud global de toda la gerencia, abriéndose las puertas para el establecimiento de un sistema de control total de calidad.

Las enseñanzas del Dr. Shewhart y del Dr. Deming fueron asimiladas rápidamente por los profesores Ishikawa y Moriguti de la Universidad de Tokio, los cuales impulsaron el desarrollo de la calidad en el Japón. Sus carreras fueron, en algunos casos, paralelas a la historia económica de Japón en esta época. El Dr. Ishikawa fue el director ejecutivo en jefe de la matriz de círculos de control de calidad "QC Circle Koryo" y jugó un papel principal en el espectacular crecimiento de los círculos de control de calidad tanto en Japón como a nivel mundial. Uno de los conceptos más

importantes del Dr. Ishikawa ⁽⁶⁾, 1976, fue el de Control de Calidad a lo Amplio de la Empresa (CWQC por sus siglas en inglés), el cual recalca la importancia de la calidad desde el arranque de la vida del producto hasta el fin de dicho ciclo de vida. El Dr. Ishikawa acumuló premios y distinciones: en 1952 recibió el premio Deming por sus contribuciones en el control de calidad y su aplicación en Japón; asimismo, recibió la medalla Shewhart de la ASQC y el premio Eugen L. Grant de la misma ASQC. Fue el creador de una herramienta muy sencilla y muy útil para identificar las posibles causas que provocan los problemas de calidad en una empresa; dicha herramienta se conoce como el diagrama causa-efecto, diagrama de espinazo de pescado por su forma con la estructura ósea de dicho animal o diagrama de Ishikawa.

El Dr. Ishikawa estableció que es la alta dirección quien debe asumir el liderazgo en la implantación de un sistema de calidad y desarrollar las políticas de calidad de la empresa; asimismo, estipuló que el sistema administrativo de calidad debe estar basado en los círculos de calidad, los cuales deben ser participativos, rotativos y voluntarios. Para él, el factor más importante del éxito japonés fue el cambio cultural. Otra actividad sumamente importante para implantar con éxito un sistema de calidad, según él, es la capacitación, el entrenamiento y el uso de técnicas estadísticas básicas en todas las áreas de la empresa.

En 1960, el Dr. Geinichi Taguchi recibe el premio Deming por sus contribuciones al control de calidad. Los métodos desarrollados por el Dr. Taguchi constituyen actualmente un sistema poderoso y veloz para mejorar la calidad y reducir costos en el diseño de productos y procesos. Para Taguchi ⁽⁷⁾, la calidad de un producto es la pérdida mínima que se concede a la sociedad desde el momento de embarcar el producto, incluyendo costos de producción, costos de mantenimiento, costos de ventas, etcétera. La pérdida a la sociedad se asocia con cualquier producto que llega a las manos del consumidor e incluye: insatisfacción del cliente, costo adicional por garantía del fabricante y pérdida de mercado por mala reputación.

Taguchi establece que la Ingeniería de Calidad lleva a cabo actividades dirigidas a reducir las pérdidas causadas por la variación, las cuales se

deben incorporar a cada paso del desarrollo y manufactura del producto, a fin de prevenir los efectos de los factores de ruido (factores indeseables e incontrolables que causan que las características funcionales de los productos se desvíen de su valor objetivo). La secuencia de elaboración de un producto, desde el desarrollo del prototipo del producto, hasta el servicio al cliente, incluye las siguientes etapas:

- a) Ingeniería de Calidad Fuera de Línea; la cual incluye: 1) diseño del producto (investigación y desarrollo del prototipo del producto); y, 2) diseño del proceso (diseño del proceso de producción para la manufactura del producto).
- b) Ingeniería de Calidad en Línea: la cual incluye: producción actual y servicio al cliente.

Las actividades de ingeniería de calidad fuera de línea tienen lugar en las etapas de diseño del producto y del proceso, utilizando el diseño de experimentos; incluye el diseño del sistema, diseño de parámetros y de tolerancias. Las actividades de la ingeniería de calidad en línea se dan en la etapa de producción; incluyen sistemas de control de procesos y uso de factores de ajuste e inspección.

Taguchi afirma que los productos enfrentan una serie de factores que impactan su funcionamiento produciéndole variabilidad, a estos factores les denomina factores de error o ruido, clasificándolos en tres categorías:

- ruido externo; el cual está relacionado con variables ambientales o de condiciones de uso.
- ruido interno o deterioro; son los cambios internos que sufre el producto a lo largo del tiempo.
- ruido variacional; son las imperfecciones de manufactura.

II. CONCEPTO MODERNO DE CALIDAD

Todas las organizaciones (compañías industriales, escuelas, hospitales, iglesias, organismos gubernamentales, etcétera) están enfocadas a proveer productos y/o servicios para satisfacer las necesidades humanas. Esta relación es benéfica para ambas partes en la medida en que los bienes y servicios responden a todas las necesidades del usuario en precio, fecha de entrega y adecuación para el uso.

Existen muchos enfoques acerca del concepto de calidad y ya se ha visto que este concepto ha tenido una evolución diferente dependiendo del país donde se ubique. Se han tratado de unificar criterios a nivel internacional como se puede apreciar en el desarrollo de las normas de calidad de la ISO (International Standard for Organizations), en particular la norma ISO 8402, 1986, contiene un glosario de términos asociados al concepto de calidad, pero estos intentos no han fructificado tal como se esperaba. Por esta razón, en este subtema se tratará de llegar a un concepto integrado propio⁽⁸⁾ sobre el significado de calidad.

El concepto de calidad ha alcanzado nuevas connotaciones generadas a partir de los enfoques de los distintos teóricos de la calidad, como Shewhart, Deming, Juran, Feigenbaum, Ishikawa, Taguchi, Crosby, y de experiencias de la aplicación de la calidad, como en el caso japonés. Generalmente se entiende por calidad a un juicio que los consumidores o usuarios hacen de un producto o servicio en cuanto a su creencia de si el producto o servicio satisface sus necesidades y expectativas.

Sin embargo, actualmente el término calidad también abarca otro concepto: el mejoramiento constante del proceso ampliado de una empresa. Mejoramiento constante quiere decir que ya no basta con alcanzar normas estáticas preestablecidas sino que es necesario un proceso continuo y sin fin hacia la mejora. Proceso ampliado significa que como parte de la organización se incluye también a los proveedores, distribuidores, clientes, inversionistas, empleados y a la comunidad en general; todos como parte integral del proceso ampliado de la empresa.

La calidad no es ya un término aplicable únicamente al producto y/o al servicio sino a la organización en su totalidad, entendiendo además la satisfacción de los clientes como fin principal de la empresa, es decir todas y cada una de las actividades desarrolladas dentro de una empresa y sobretodo las actividades tradicionales del control de calidad deben estar enfocadas a la satisfacción plena de estos. Este afán totalizador ha provocado que muchos autores llamen a este nuevo enfoque de la calidad como calidad total.

Para aclarar estas ideas se hará uso del enfoque de sistemas, en el cual se entenderá por sistema productivo la forma o manera como un conjunto de elementos humanos, físicos y mecánicos, interrelacionados y estructurados, desempeñan la función de producir bienes y/o servicios para satisfacer las necesidades de la sociedad. En la figura 2 se muestran, como un ejemplo, los elementos que componen a un sistema productivo, según el enfoque del Dr. Ochoa Rosso ⁽⁹⁾. Como se puede apreciar en esta figura, existen muchos actores que se ven afectados o de alguna forma involucrados en dicho sistema. Los actores principales que resaltan son: los consumidores o distribuidores que reciben los productos y/o servicios que elabora el sistema, los accionistas, los empleados internos al sistema (operarios, empleados administrativos, supervisores, ejecutivos, etcétera) y los proveedores. Asimismo, otros actores que aparecen afectados por el sistema son los competidores (entorno de primer orden) y el resto de la sociedad (entorno de 2º orden). En este caso la sociedad en general se ve afectada por los desechos que arroja el sistema como se puede apreciar en la figura 2.

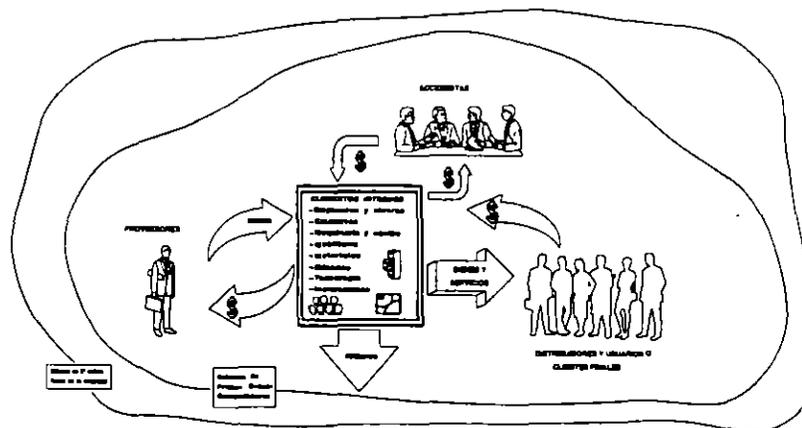


Figura 2. Esquema de un Sistema Productivo

Si se toma el concepto de cliente en su contexto general, como todo aquél receptor real o potencial de un producto y/o servicio, se puede apreciar que tanto los accionistas, como los empleados, los consumidores o distribuidores de la línea de productos y/o servicios de una empresa, así como los proveedores, juegan un doble papel, ya que, por un lado suministran algo (los accionistas el capital, los empleados sus servicios, los distribuidores o consumidores también capital y los proveedores la materia prima), y a su vez, reciben algo a cambio (los accionistas reciben su capital más la ganancia, los empleados sus salarios y prestaciones, los distribuidores o consumidores el producto y/o servicio solicitado y los proveedores el pago por la materia prima). De esta forma se puede decir que la satisfacción del cliente en el contexto ampliado, mencionado anteriormente, incluye a los accionistas, empleados, distribuidores, consumidores y proveedores.

La satisfacción del cliente puede ser definida como el grado de felicidad que un cliente experimenta con respecto al producto y/o servicio que resulta de la interacción e interrelaciones de todas las personas que integran una empresa. Así, el objetivo final de un sistema de calidad debe ser lograr y mejorar permanentemente la satisfacción del cliente en su sentido más amplio.

Podría pensarse que las reflexiones anteriores están dirigidas exclusivamente a empresas de tipo lucrativo, lo cual no es la intención. Para aclarar mejor las ideas, se puede poner como ejemplo a una universidad pública. Los accionistas en este caso serían todos aquellos miembros de la sociedad que forman parte de la población económicamente activa, ya que a través de sus impuestos se otorga el subsidio federal. Los empleados serían todos los profesores, investigadores, técnicos, empleados administrativos y funcionarios que la conforman. Los clientes pueden ser divididos en tres categorías: las organizaciones, tanto públicas como privadas, que a futuro podrían contratar a los egresados de dicha universidad, los mismos alumnos y sus padres, y el resto de la sociedad que recibirá el impacto de las obras y servicios que dichos egresados creen. Los beneficios que obtengan los clientes, en este caso, no necesariamente se deben medir en términos monetarios, puede ser en términos de bienestar social y elevación de su nivel de vida.

Con este nuevo enfoque calidad puede definirse como anticipar, identificar y satisfacer las necesidades de los accionistas, empleados, consumidores o distribuidores, proveedores y el entorno social que rodea a la organización, en forma continua. En la anterior definición la palabra anticipar se refiere a que es necesario prever los cambios que sufrirá el mercado, las demandas de los clientes, la tecnología, los materiales a usar, el impacto en el medio ambiente y en los ecosistemas, etcétera. Todo esto es dinámico y se debe estar preparado para dichos cambios. Asimismo, la palabra identificar se refiere a que no se pueden cumplir las exigencias de los clientes si no se sabe cuales son estas exigencias. El satisfacer significa que para poder sobrevivir, ser rentables y competir con ventaja se requerirá cumplir con las demandas crecientes de los clientes.

Posteriormente se usará la palabra cliente para denotar a todos aquellos consumidores o distribuidores externos a la organización. En el contexto que aquí se maneja, la mayoría de los expertos norteamericanos en el tema utilizan la palabra "stakeholder" para denotar a todos aquellos actores que intervienen en el sistema productivo: accionistas, consumidores, empleados, proveedores y aquella parte de la sociedad que de alguna forma se ve afectada por el sistema productivo.

III VARIABILIDAD DE PROCESOS

En cualquier proceso de fabricación, sin importar su buen diseño o mantenimiento cuidadoso, siempre existirá cierto grado de variabilidad inherente o natural. Esta variabilidad natural o "ruido de fondo" es el efecto acumulativo de muchas pequeñas causas, esencialmente incontrolables. Cuando el ruido de fondo de un proceso es relativamente pequeño, suele considerarse un nivel aceptable del funcionamiento del proceso. En el marco del control estadístico de procesos, esta variabilidad natural se llama a menudo sistema estable de causas fortuitas. Un proceso que funciona con sólo causas fortuitas de variabilidad se considera bajo control.

Otros tipos de variabilidad pueden estar presentes ocasionalmente en el resultado de un proceso. Esta variabilidad en características clave de

calidad surge de muchas fuentes como se puede apreciar en la figura 3. Esta variabilidad en características clave es en general mayor que el ruido de fondo y normalmente representa un nivel inaceptable del funcionamiento del proceso. Estas fuentes de variabilidad que no forman parte del esquema de las causas fortuitas se denominan causas atribuibles o asignables. Un proceso que funciona en presencia de causas atribuibles se considera fuera de control.

Uno de los objetivos más importantes del control estadístico de procesos es detectar rápidamente la ocurrencia de causas atribuibles o cambios en el proceso, a fin de que se pueda investigar la causa raíz y tomar acciones correctivas antes de la producción de muchos productos o servicios no

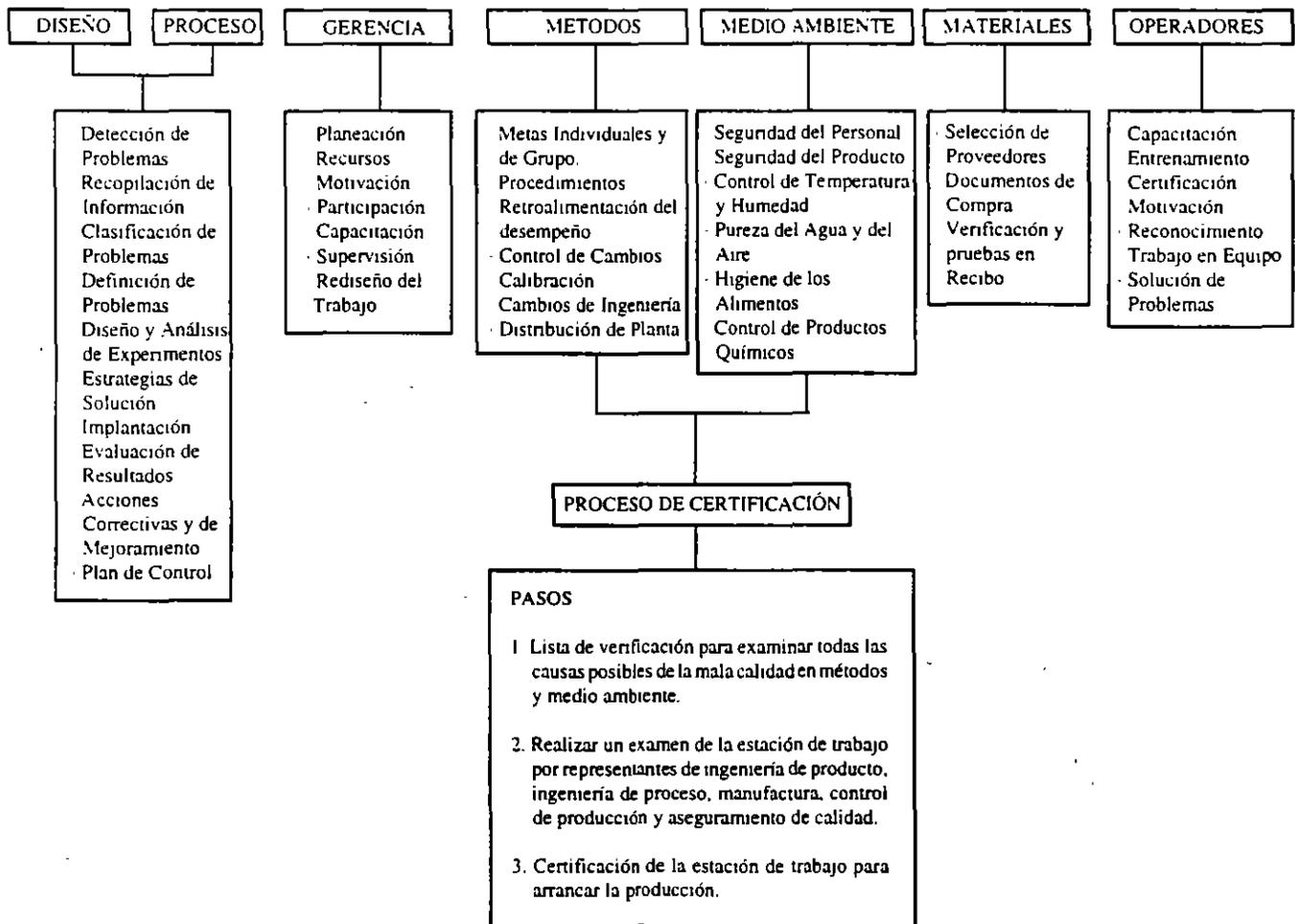


Figura 3. Causas y Control de la Variabilidad de Procesos

conformes. Por ello, a continuación se describirá un proceso estructurado de solución de problemas que puede ser utilizado en los problemas de calidad que se presentan en una organización.

En gran parte de los problemas a los que se enfrenta el ser humano en su vida diaria, se toma una decisión o alternativa de solución rápidamente, sin ponerse a meditar sobre las consecuencias de tal acción. Esta forma de proceder resulta adecuada cuando las decisiones son tomadas por personas con cierto grado de experiencia y conocimiento de causa. En los problemas de mayor envergadura, más complejos y donde intervienen varias personas, tales soluciones no resultan ser las mejores. En estos casos se requiere establecer un proceso estructurado y sistémico que conlleve a una buena estrategia de solución y que elimine de tajo las causas raíz que están ocasionando estos problemas. Cuántas veces no le ha tocado a un innumerable grupo de personas asistir a una consulta con el médico, por alguna dolencia y sale del consultorio con un montón de recetas para paliar el dolor pero no eliminar la causa de la dolencia. En la figura 4 se muestra un esquema de cómo concibió el Dr. Shewhart un Ciclo para resolver los problemas que aparecen en los procesos productivos, el cual fue generalizado por el Dr. Edwards Deming a grado tal que actualmente se le conoce más como ciclo Deming que como ciclo Shewhart.

El ciclo PHVA de Shewhart tiene como finalidad detectar fallas, establecer alternativas de solución y acciones correctivas, y, mantener y mejorar la calidad de los procesos productivos.

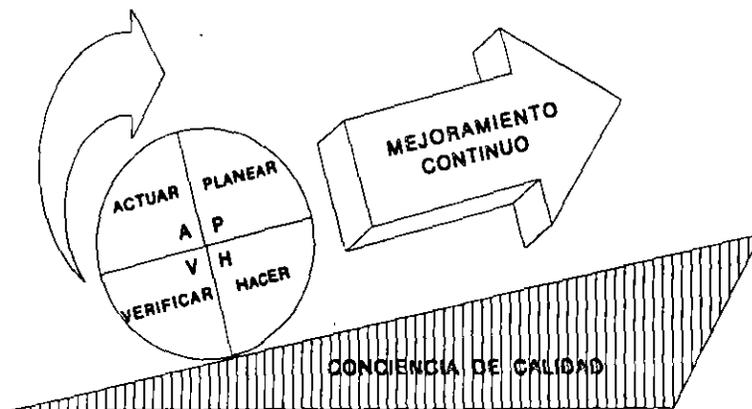


Figura 4. Ciclo de Mejoramiento PHVA de Shewhart

A continuación se plantea un Proceso Estructurado de Solución de Problemas basado en las cuatro fases del Ciclo de Mejoramiento de Shewhart.

A. PLANEAR. Es definir los requerimientos de calidad y determinar los indicadores que permitirán hacer el seguimiento del logro planeado incluyendo el análisis y diseño del mejoramiento continuo. Las etapas de las que consta esta fase son:

1. Detectar el problema a resolver. Los problemas se detectarán a través de alguna o algunas de las herramientas "suaves" más conocidas, como pueden ser: Tormenta de Ideas, Análisis de Campo de Fuerza, Técnica de Grupo Nominal, etcétera. También las técnicas estadísticas básicas pueden servir para detectarlos. En este punto se trata de discutir y documentar los puntos de vista individuales, los hechos comprobados y síntomas relevantes, hasta que todos los implicados acepten que existen problemas. A través del Diagrama de Pareto, que será explicado más adelante, se categorizan estos problemas en orden de importancia para establecer la secuencia en que serán resueltos.
2. Una vez identificados los síntomas y habiendo seleccionado el problema específico que se requiera resolver, se deben definir los métodos de investigación que serán usados, las entrevistas de recolección de datos, las reuniones de intercambio de ideas, etcétera. En esta etapa se requiere definir perfectamente el problema que se va a resolver. Se deben contestar las siguientes preguntas: ¿cuál es el problema?, ¿cuál es el asunto central?, ¿en que difiere la situación existente de la ideal?, ¿qué se quiere corregir o eliminar?, ¿en qué género de problema se está involucrado?
3. Determinar las posibles causas que provocan el problema anteriormente seleccionado, utilizando alguna o una combinación de las siguientes técnicas: Tormenta de Ideas, Análisis del Campo de Fuerza, Tabla de Incógnitas, Análisis Cronológico o Diagrama de Ishikawa, o alguna otra técnica conocida. Se trata de identificar las causas que sean de mayor importancia, utilizando

nuevamente el Diagrama de Pareto o Diagramas de Correlación. En esta etapa puede ser necesario aplicar una técnica más poderosa y cuantitativa para determinar con certeza cuáles son las causas raíz del problema. Generalmente esta técnica es el Diseño de Experimentos en sus diversas modalidades: Diseño Clásico de Experimentos de Fisher, Diseño de Experimentos de Taguchi o los métodos de Shainin.

4. Definir un Plan de Acción para resolver el problema. Se deben plantear varias alternativas de solución y seleccionar la más adecuada para los recursos limitados con los que se cuenta. Se trata de eliminar primero las causas que en el paso anterior fueron seleccionadas como las más importantes. El Plan de Acción debe contestar las siguientes preguntas: ¿qué causa se va a eliminar?, ¿por qué es necesario eliminarla?, ¿quién será responsable de su eliminación?, ¿cuándo se iniciará y terminará su eliminación?, ¿cómo se eliminará?, ¿cuánto de la causa será eliminada a la fecha de terminación prometida?, ¿dónde se va eliminar la causa?
- B. HACER. Es ejecutar lo planeado, estrictamente como se planeó. En esta fase se trata de implantar lo planeado, informando a los involucrados y tratando de minimizar toda desviación de lo que se planeó en los cuatro pasos anteriores.
- C. VERIFICAR. Es obtener mediciones y evaluar los resultados obtenidos sobre las actividades planeadas y ejecutadas. Consiste en comparar los resultados del proceso contra los resultados esperados. Esta etapa, aparentemente sencilla demanda responsabilidad y sentido crítico. Las preguntas que deberán responderse en esta etapa son: ¿qué tanto se alcanzaron los resultados esperados?, ¿cuánto faltó, cuánto se excedió, o estuvo correcto?, ¿qué tanto se apartaron de la orientación original?, ¿fue benéfica, qué tanto?, ¿fue perjudicial, qué tanto?, ¿dónde se tuvieron disfunciones?, ¿cuáles fueron las causas de los desajustes?, ¿hubo nuevos impactos o reacciones y qué tan benéficos o perjudiciales fueron?, ¿siguen siendo válidos los resultados obtenidos?. En cualquiera de las herramientas estadísticas que se

describirán posteriormente, se deberán observar los resultados de la mejora o eliminación de las causas del problema.

- D. **ACTUAR PARA CONTROLAR.** Una vez eliminado el problema, es necesario prevenir la reincidencia del mismo. Se deben establecer los métodos y procedimientos necesarios que controlen la nueva forma de trabajo. Para llevar el control es necesario definir previamente un conjunto de indicadores a través de los cuales sea posible juzgar el estado actual del sistema, el avance logrado y cualquier otro factor que sea considerado clave para el buen funcionamiento del sistema; después de lo cual deberá ser diseñado e implantado un sistema de información para recabar, procesar y analizar los datos requeridos, así como para elaborar los informes pertinentes. Para esta etapa se debe planear e implantar cómo reaccionar ante posibles descontrolés y cómo tomar acciones correctivas de acuerdo a los resultados de la evaluación y acciones preventivas para asegurar la permanencia en calidad y productividad.

Todo el proceso descrito anteriormente depende de la recolección, captura, procesamiento, presentación, análisis, inferencia y toma de decisiones de los datos del proceso productivo en estudio. Sin dichos datos no se podría llevar a cabo un proceso de mejoramiento continuo en ninguna organización. En la figura 5 se muestran las principales técnicas utilizadas en la implantación de un Proceso de Mejoramiento Continuo.

CONCEPTOS BÁSICOS DE ESTADÍSTICA

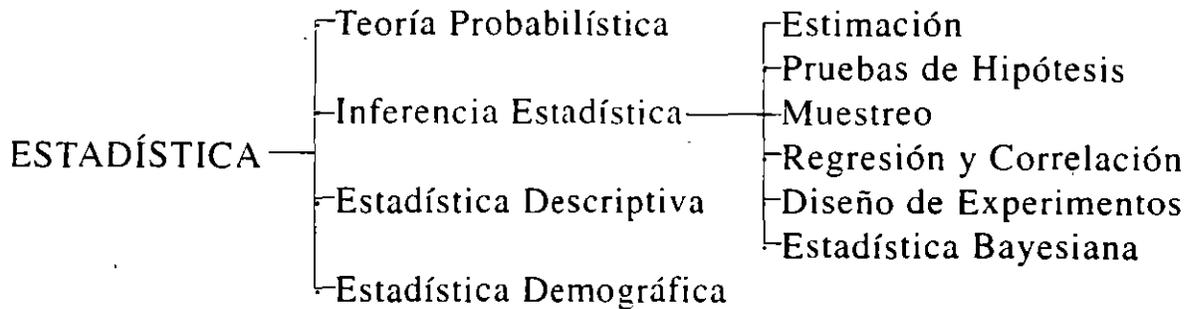
Probabilidad: medida de la certidumbre que se le asocia a la ocurrencia u observación de un fenómeno o variable de interés.

Estadística: rama de la ciencia que estudia las reglas para recolectar, capturar, organizar, presentar, procesar y analizar los datos obtenidos al realizar varios ensayos de un experimento y para inferir conclusiones acerca de este último. Proporciona además, los métodos para el diseño estadístico de experimentos y para tomar decisiones cuando aparecen situaciones de incertidumbre. Algunos autores establecen que la estadística no es ciencia ya que algunas de las reglas que emplea son empíricas.

CONTROL ESTÁTICO DE CALIDAD	INSPECCIÓN POR ATRIBUTOS	TABLAS NOM Z12 (MIL STD 105D) TABLAS DODGE-ROMIG TABLAS PHILLIPS PLANES DE MUESTREO CONTINUO (DODGE-TORREY ETC)
	INSPECCIÓN POR VARIABLES	TABLAS NOM Z14
CONTROL DINÁMICO DE CALIDAD	ANÁLISIS DE DESVIACIONES	HOJAS DE VERIFICACIÓN ESTRATIFICACIÓN DIAGRAMA DE PARETO DIAGRAMA CAUSA-EFECTO DE ISHIKAWA DIAGRAMA DE DISPERSIÓN HISTOGRAMA Y DISTRIBUCIÓN DIAGRAMA DE AFINIDAD DIAGRAMA DE RELACIONES DIAGRAMA SISTEMÁTICO DIAGRAMA DE MATRIZ DIAGRAMA DE FLECHAS DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD
	GRÁFICAS DE CONTROL POR VARIABLES	GRÁFICA DE MEDIAS Y DESVIACIÓN ESTANDAR \bar{x} σ GRÁFICA DE MEDIAS Y RANGOS \bar{x} R GRÁFICA DE RANGOS MÓVILES R_M GRÁFICA POR LECTURAS INDIVIDUALES GRÁFICA DE PRECONTROL GRÁFICA DE SUMAS ACUMULADAS
	GRAFICAS DE CONTROL POR ATRIBUTOS	GRÁFICA DE FRACCIÓN DEFECTUOSA p GRÁFICA DE NÚMERO DE ART DEFECTUOSOS np GRÁFICA DE NÚMERO DE DEFECTOS POR UNIDAD c GRÁFICA DE DEFECTOS POR UNIDAD u GRÁFICA DE DEMÉRITOS POR UNIDAD Du
DISPONIBILIDAD	CONFIABILIDAD MANTENIBILIDAD ANÁLISIS DEL MODO Y EFECTO DE LA FALLA PRUEBAS DE VIDA INFORMES DE FALLA EN CAMPO DISEÑO DE EXPERIMENTOS	

Figura 5. Técnicas usadas en un Proceso de Mejoramiento Continuo

Las partes en las que se descompone la estadística se enumeran a continuación:



Teoría Probabilística: rama de la matemática que proporciona los fundamentos, modelos matemáticos y el lenguaje que se usa en la estadística.

Estadística Descriptiva: rama de la Estadística que se encarga de analizar las reglas para recolectar, presentar y procesar los datos obtenidos al hacer una medición u observación de una característica particular de un objeto, con la finalidad de conocer su comportamiento. Si se conocen con certeza los valores que tomará la característica particular en cuestión, previamente al experimento, a dicha variable se le denomina determinística. En este caso se puede conocer su comportamiento sin necesidad de hacer el experimento; si es el caso, el experimento se realizará con la finalidad de comprobar los resultados esperados. Si los valores que tomará la variable no pueden predecirse con certeza, antes del experimento, a dicha variable se le denomina aleatoria. Por otra parte, dentro del estudio de variables aleatorias, se puede ver que existen dos tipos: a) aquella cuyos resultados pueden ser medidos en forma discreta; por ejemplo: el número de llegadas a una cola, el número de defectos en un lote, el número de ases que se obtienen en un juego de póker, etcétera, a éstas se les denomina variables aleatorias discretas; b) variables aleatorias continuas, son aquellas que tienen unidades de medida continua; por ejemplo: la cantidad de leche que produce una vaca diariamente, el tiempo de vida de un producto, el tiempo de espera en una cola, etcétera.

Una Población se define como la totalidad de valores posibles (mediciones o conteos) de una característica particular de un grupo específico de objetos. Al conjunto total de objetos se le denomina Universo. Por

ejemplo: el conjunto de estudiantes de ingeniería puede ser un universo; dentro de este universo puede haber muchas poblaciones, la población de tipos de sangre, la población de estaturas, la población de mujeres, etcétera. Una Muestra es una parte de la población, seleccionada de acuerdo a una regla o plan. La estadística descriptiva se puede dividir en dos grandes rubros: la descripción tabular y gráfica de los datos de una muestra, y, la definición de algunos parámetros descriptivos de dicha muestra; posteriormente se hará una breve descripción del significado de cada uno de estos rubros.

Inferencia Estadística: rama de la Estadística que proporciona las reglas para estimar ciertos valores de una población, con base en los resultados de una muestra, formular hipótesis sobre la verdad de estas estimaciones y tomar decisiones con base en estos resultados.

El Muestreo es la rama de la Estadística que se encarga de definir las reglas para tomar muestras de una población específica, el tamaño de dichas muestras y los parámetros que indicarán la representatividad de éstas. La primera finalidad del muestreo es obtener muestras representativas de la población en estudio. Una muestra es representativa si es obtenida aleatoriamente. Se dice que el Muestreo es Aleatorio si cumple las siguientes características:

- Todos los posibles resultados del experimento deben tener la misma posibilidad de ocurrir.
- Los resultados deben ser independientes entre sí.

El experimentador controla la cantidad de información contenida en la muestra por medio del número de unidades muestrales que incluye en la muestra y por el método usado para seleccionar los datos muestrales.

¿Cómo se puede determinar cuál procedimiento usar y el número de elementos a elegir de la muestra?. La respuesta depende de dos factores: ¿qué tanta representatividad se desea? y ¿qué tan seguro se requiere estar de esta representatividad?, es decir,

1. Si u es la variable de interés y \hat{u} es un estimador de u entonces se debe especificar un límite para el error de estimación, esto es $|u - \hat{u}| < B$.
2. Se debe fijar la probabilidad de que efectivamente el error de estimación sea menor de B , esto es, la fracción de las veces en que el muestreo tiene como error de estimación un valor menor a B , $P[E.E. < B] = 1 - \alpha$.

Usualmente se selecciona B como dos veces la desviación estándar del estimador de u , es decir, $B = 2\sigma_{\hat{u}}$. Si la distribución de los datos tiene forma de campana esto equivale a tomar $\alpha = 0.05$.

Algunas de las bases para la toma de una muestra son: a) cada lote debe representar la producción durante un intervalo de tiempo, tal que todas las partes o productos en el lote se hayan elaborado esencialmente bajo las mismas condiciones (partes de orígenes diferentes o en condiciones diferentes no deben mezclarse en el mismo lote); b) son preferibles lotes grandes en vez de pequeños. Por esta razón se requieren definir algunos tipos de muestreo para que la muestra obtenida sea representativa de la población bajo estudio:

- ↪ Muestreo Aleatorio Simple. Cuando se selecciona un grupo de n unidades muestrales de tal manera que cada muestra de tamaño n tenga la misma probabilidad de ser seleccionada.
- ↪ Muestreo Aleatorio Estratificado. Consiste en separar los elementos de la población en grupos que no presenten traslapes, llamados estratos, y la selección posterior de una muestra aleatoria simple de cada estrato.
- ↪ Muestreo Sistemático. Se obtiene al seleccionar aleatoriamente un elemento de los primeros k elementos en el marco y después seleccionar cada k -ésimo elemento a partir del primero.
- ↪ Muestreo por Conglomerados. Cuando cada unidad de muestreo aleatorio es a su vez una colección o conglomerado de elementos.

HOJAS DE VERIFICACIÓN

El Control Estadístico de Procesos se basa en datos, los cuales proporcionan evidencia de los hechos y por ello deben ser recolectados en forma cuidadosa. También el propósito para el cual se recolectan debe estar muy claro, si no es así, lo que sucederá es que se obtendrá mucha información, pero no se tomarán acciones debido a que no se sabe para que se quieren los datos. Lo esencial al recolectar datos es que el propósito de hacerlo esté bien claro y que los datos reflejen la verdad. El siguiente paso es hacer que los datos sean fáciles de recolectar y de ser usados. Las hojas de verificación son formatos usados para capturar fácil y rápidamente los datos que se obtienen al realizar un experimento o medir cierta característica de interés de un proceso. En la figura 6 se muestra un ejemplo de hoja de verificación.

DIVISION TERMOMAGNETICOS.

REPORTE DE _____ PRUEBAS ELECTRICAS - MECANICAS
 ELABORO _____ GPO _____ CELULA _____ TURNO _____ FECHA _____

PRUEBAS ELECTRICAS																	
INT. TIPO			TAM. LOTE			INT. TIPO			TAM. LOTE			INT. TIPO			TAM. LOTE		
1	DISPARO MAGNETICO ESP. T. H. T. H. T.			2	DISPARO TERMICO ESP. SEG.			3	CONTINUIDAD			4	CONTINUIDAD				
	POLO DEL	POLO DEL	POLO DEL		POLO DEL	POLO DEL	POLO DEL		POLO DEL	POLO DEL	POLO DEL		POLO DEL	POLO DEL	POLO DEL		
1				2				3				4					
2				3				4				5					
3				4				5				6					
4				5				6				7					
5				6				7				8					
6				7				8				9					
7				8				9				10					
8				9				10									
9				10													
10																	

OBSERVACIONES: _____
 OBSERVACIONES: _____
 OBSERVACIONES: _____

HT = NO TRIP
 DN = DISPARO SIN HECHO
 MS = NO REINT. ABUSO
 SC = SIN CONTINUIDAD

PRUEBAS MECANICAS																			
INT. TIPO			TAM. LOTE			INT. TIPO			TAM. LOTE			INT. TIPO			TAM. LOTE				
1	TORNEILLOS MARCOS DE MECANISMOS ESP.			2	TORNEILLOS TERMINAL DE CARGA ESP.			3	TORNEILLOS TERMINAL DE LINEA ESP.			4	ESPADAS DE CARGA			5	ZAPATAS DE LINEA		
	1	2	3		1	2	3		1	2	3								
1				2				3				4				5			
2				3				4				5				6			
3				4				5				6				7			
4				5				6				7				8			
5				6				7				8				9			
6				7				8				9				10			
7				8				9				10							
8				9				10											
9				10															
10																			

OBSERVACIONES: _____
 OBSERVACIONES: _____
 OBSERVACIONES: _____

Figura 6. Hoja de Verificación para pruebas eléctricas y mecánicas de interruptores termomagnéticos

Algunos de los usos de las hojas de verificación son:

- ↪ Verificar la frecuencia de repetición de actividades, defectos o sucesos.
- ↪ Verificar la localización de actividades, defectos o sucesos.
- ↪ Verificar posibles causas de problemas a resolver para investigar si son las causas raíz.
- ↪ Verificar las acciones a tomar previamente enlistadas.

ESTRATIFICACIÓN

Es la separación de los datos en grupos de la misma especie o que tienen el mismo origen. Se usa el término estratificación por una similitud con la manera en que las capas terrestres o estratos, forman la corteza de la tierra; por lo que cuando un grupo de datos con características importantes comunes se separa del total de datos disponibles, se dice que se estratifica. Algunos ejemplos de estratificación pueden ser: por turno, por proveedor de materia prima, por operario, por máquina, por semana, por método de trabajo, por molde, etcétera. Las herramientas que requieren de la estratificación y de las hojas de verificación se verán a continuación.

DIAGRAMA DE PARETO

Un Diagrama de Pareto es una forma especial de gráfico de barras usado para ilustrar datos ordenados por categorías en forma descendente de derecha a izquierda, de acuerdo a su importancia. La altura de las barras representa la frecuencia o importancia relativa de los puntos que están siendo medidos. Un diagrama de Pareto ilustra visualmente los datos con el propósito de:

- ↪ Ayudar a establecer prioridades.
- ↪ Ilustrar las oportunidades más significativas para mejorar.
- ↪ Mostrar que categorías contribuyen con el mayor porcentaje del total.

Los pasos que se siguen para construir un diagrama de Pareto son los siguientes:

1. Antes de coleccionar los datos se deben seleccionar las categorías de defectos, problemas o causas, etcétera, a ser comparados. Los problemas deben estar definidos lo más objetivamente posible y deben poderse medir de alguna forma.
2. Diseñar una hoja de verificación donde registrar los datos perfectamente y llevar a cabo su recolección.
3. Construir una tabla de frecuencias, como la que se muestra como ejemplo a continuación:

Piezas Defectuosas (Llaves de agua)

Defecto Encontrado	# de Piezas con Defecto	% de Piezas con el Defecto	Porcentaje Acumulado
Rosca Golpeada	216	48.0	48.0
Empaque Roto	31	6.9	54.9
Mariposa Suelta	108	24.0	78.9
Salida Ovalada	14	3.1	82.0
Cuerpo Poroso	81	18.0	100.0
Total	450	100.0	

Cantidad de Piezas Inspeccionadas: 5843, del 1° al 15 de abril

Estos datos se pueden colocar en una gráfica de barras como la que se muestra en la figura 7.

4. En un sistema cartesiano indicar sobre el eje horizontal las categorías, dividiendo dicho eje en segmentos iguales y ordenando dichas categorías en orden descendente de acuerdo a la importancia relativa, la cual será indicada sobre el eje horizontal. El eje vertical de la

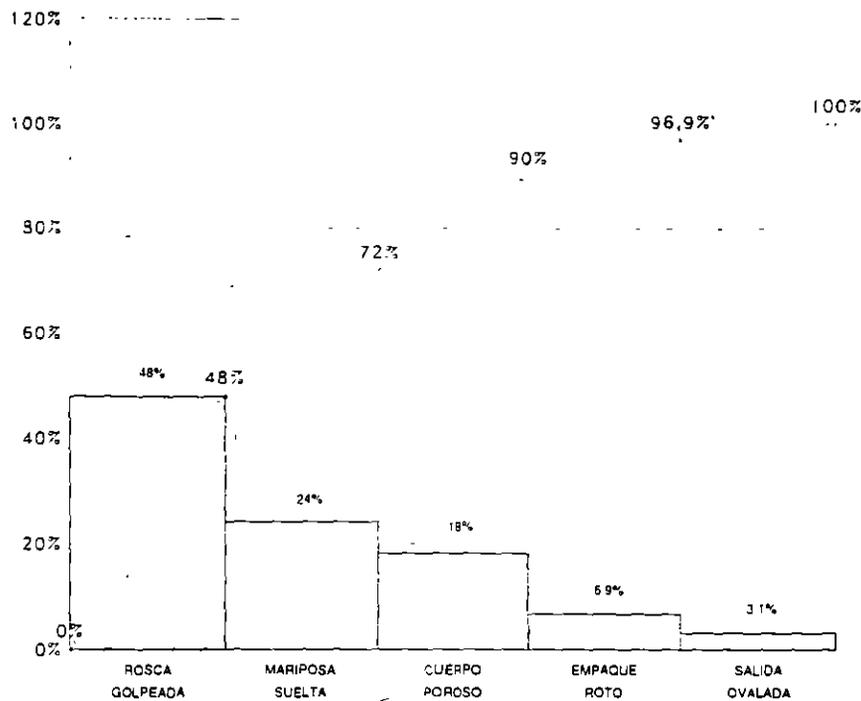


Figura 7. Diagrama de Pareto de defectos encontrados en llaves de agua

gráfica indicará los porcentajes de los valores de la característica que representa la importancia relativa de ésta.

5. Dibujar barras para cada categoría, con una altura igual al valor que tome la característica que representa la importancia relativa. En cada extremo derecho de las barras se dibuja por medio de un gráfico de líneas, la frecuencia relativa acumulada. Cada barra representa un tipo de defecto encontrado, el eje vertical muestra la importancia de cada defecto encontrado en términos de porcentaje, el eje horizontal muestra los tipos de defectos encontrados comenzando con el de mayor importancia en la izquierda, hasta el de menor importancia, que es el último a la derecha y los que quedan en medio se acomodan por orden de magnitud. En este caso el Diagrama de Pareto establece prioridades sobre los problemas que se deben analizar primero para eliminar la mala operación. Para este caso y de acuerdo a la gráfica 7 se debe tratar de resolver el problema de la rosca golpeada en primer

lugar porque es la barra más alta; el segundo problema que se debe tratar de resolver es el de mariposa suelta, porque es la siguiente barra más alta. En esta forma las cosas son más sencillas.

Usar escalas de medida diferentes en el eje vertical de un diagrama de Pareto puede ayudar a identificar los principales problemas y sus prioridades. Los problemas más frecuentes no siempre son los más costosos. De hecho, un problema que ocurre raras veces puede ser la mejor oportunidad para mejorar. Por ello se aconseja tomar diferentes escalas como pueden ser frecuencia de defectos, frecuencia relativa con respecto al total de productos elaborados, costos, etcétera.

DIAGRAMA DE ISHIKAWA

Un Diagrama Causa-Efecto o Diagrama de Ishikawa, también denominado Diagrama de Espinazo de Pescado, es una herramienta analítico-gráfica usada para identificar las causas potenciales de un problema. Esta herramienta representa una forma estructurada posterior a una Tormenta de Ideas, utilizada para:

- ↪ Organizar y desplegar la relación entre posibles causas y efectos.
- ↪ Analizar procesos y los efectos potenciales de acciones propuestas.
- ↪ Identificar causas probables y causas raíz de un problema.
- ↪ Analizar procesos normales mediante la revisión de factores potenciales causantes de problemas.

Los pasos que se siguen para construir un Diagrama Causa-Efecto se explican a continuación:

1. Seleccionar un problema tratando de ser lo más específico y conciso que sea posible. Utilizar para ello alguna de las técnicas ya conocidas como pueden ser: Tormenta de Ideas, Diagrama de Campo de Fuerza, Diagrama de Pareto, etcétera.

2. Sobre líneas paralelas arriba y abajo de la flecha principal, listar las principales categorías de causas potenciales. Trazar líneas de cada categoría mayor a la flecha principal. Como ejemplos de categorías principales de causas potenciales se pueden tomar las seis M's: Maquinaria, Mano de Obra, Métodos, Materiales, Medio Ambiente, Mediciones.
3. Para cada categoría principal usar las preguntas: ¿por qué, ¿qué?, ¿cómo?, ¿cuándo?, ¿dónde?, ¿quién?, ¿cuánto?, con el objeto de detectar la mayor parte de posibles causas.
4. Después de elaborado el diagrama de Ishikawa, se requiere llevar a cabo las siguientes actividades:
 - Analizar el diagrama.
 - Priorizar las causas potenciales a través de un Diagrama, por ejemplo, de Pareto.
 - Usar la información para determinar que áreas requieren más información y cómo coleccionar ésta.

En la figura 8 se muestra un ejemplo de Diagrama de Ishikawa.



Figura 8. Ejemplo de Diagrama Causa-Efecto o Diagrama de Ishikawa

DIAGRAMA DE DISPERSIÓN

Un Diagrama de Dispersión es una representación gráfica de la relación existente entre dos variables y puede ser usado para:

- Explorar una posible relación entre dos variables tales como:
 - Una característica de calidad y una de sus causas; por ejemplo, la resistencia mecánica de una pieza moldeada de plástico y el porcentaje de fibra de vidrio que contiene.
 - Dos características de calidad relacionadas; por ejemplo, la dureza y la maleabilidad de una pieza.
 - Dos causas relacionadas a la misma característica de calidad; por ejemplo, la pigmentación y el matiz de una pintura afectan directamente su color.

- Investigar si una variable afecta a otra de alguna forma.

Los pasos que se siguen para elaborar un Diagrama de Dispersión se describen a continuación:

1. Definir exactamente las variables que se analizarán, diseñar una hoja de verificación para su recopilación y captura, y, llevar a cabo dicho proceso. Se requiere recolectar entre 30 y 100 parejas de datos.
2. Dibujar un sistema cartesiano, etiquetando los ejes con los nombres de las variables a graficar y vaciar las parejas de datos obtenidas en el paso previo. Si se encuentra que algunos valores se repiten, se deben rodear los puntos marcados que se repiten con tantas circunferencias como veces en que se repitan dichos datos. También se requiere rotular el diagrama, colocando la fecha de elaboración y los nombres de los que lo elaboraron.

En la figura 9 se muestran algunos ejemplos de diagramas de dispersión.

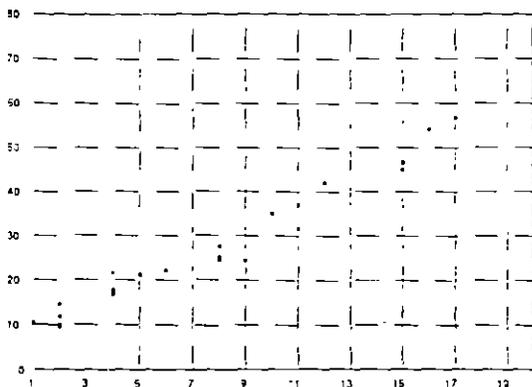


Figura 9.a. Regresión Lineal Positiva

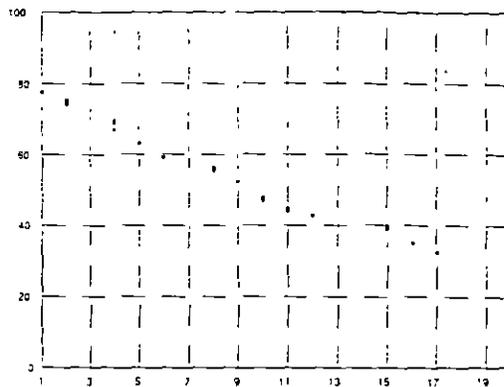


Figura 9.b. Regresión Lineal Negativa

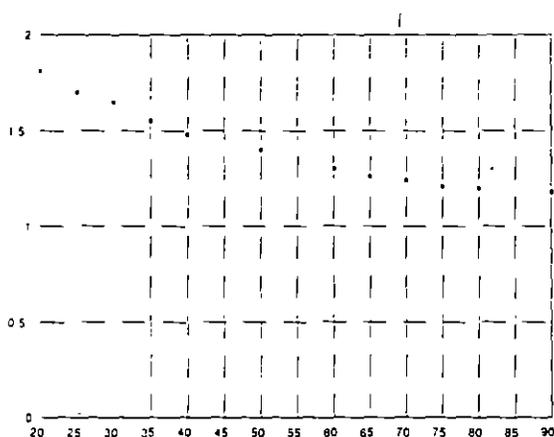


Figura 9.c. Regresión No Lineal (Exponencial)

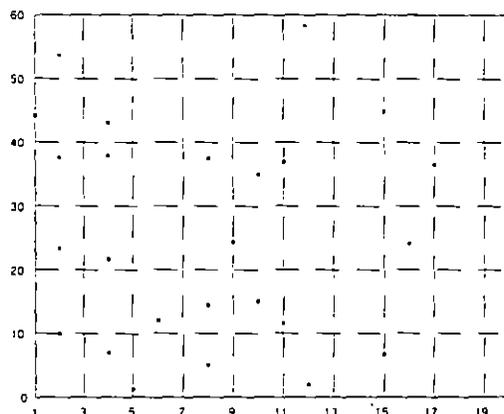


Figura 9.d. No existe relación entre variables

DESCRIPCIÓN TABULAR Y GRÁFICA DE LOS DATOS DE UNA MUESTRA (HISTOGRAMA) Y PARÁMETROS REPRESENTATIVOS DE ÉSTA

Un histograma es una representación gráfica aproximada del número de veces que se presenta una cierta medición de la variable de interés, al realizar n veces dicha medición. En otras palabras, el histograma es un diagrama de barras que representa el comportamiento en frecuencia, y que se obtiene empíricamente, de una variable de interés. Este diagrama se representa colocando sobre un eje vertical la frecuencia con la que ocurren los datos y sobre el eje horizontal los valores de la característica que se mide; estos valores generalmente se representan en pequeños intervalos llamados intervalos de clase. A continuación se enumeran los pasos para graficar el histograma de un conjunto de datos $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ que fueron determinados al obtener una muestra de una población de interés, de tamaño n :

1. Determinar los valores menor y mayor de la muestra dada, es decir, x_{\min} = valor menor de la muestra y x_{\max} = valor mayor de la muestra.
2. Calcular el rango u oscilación de la muestra; esto se obtiene al tomar la diferencia entre el valor mayor y el valor menor de la muestra, es decir,

$$R = x_{\max} - x_{\min}$$

3. Especificar el número de intervalos de clase que se desean. La forma en que se determina cuantos intervalos de clase se van a usar es empírica. Algunos autores, como Douglas C. Montgomery, establecen que el número de intervalos de clase debe ser aproximadamente igual a la raíz cuadrada del total de valores de la muestra, es decir, $k \approx \sqrt{n}$. La mayoría de los autores de libros de estadística coinciden en que el número de intervalos de clase debe ser mayor de 5 y menor a 15.
4. Calcular la amplitud de cada intervalo de clase. Se parte del supuesto que la amplitud de los intervalos de clase es la misma, aunque esto no es forzoso. Para calcularla, se divide el rango entre el número de

intervalos de clase seleccionados y se redondea hasta el dígito menor de los datos, es decir, si los datos tienen dos cifras decimales entonces el cociente anterior debe redondearse a dos cifras decimales.

Amplitud de cada Intervalo de Clase: $\Delta = R/k$.

donde Δ es la amplitud de cada intervalo, R es el rango y k el número de intervalos.

- De cada uno de los intervalos de clase que se determinaron se define la marca de clase como un valor contenido dentro de cada uno de estos intervalos. Generalmente se toma el punto medio de éstos, es decir, si t_i representa a la marca de clase, entonces:

$$t_i = L_{ii} + \Delta / 2$$

donde L_{ii} es el límite inferior del intervalo de clase i -ésimo, $i = 1, 2, 3, \dots, k$

- Con estos valores se forma la tabla de frecuencias (descripción tabular) mostrada en la figura 10.

INTERVALO DE CLASE	MARCA DE CLASE t_i	CONTEO DE FRECUENCIAS	FRECUENCIA f_i	FRECUENCIA RELATIVA f_i^*	FRECUENCIA RELATIVA ACUMULADA F_i
$x_{\min} - x_{\min} + \Delta$	$t_1 = L_{11} + \Delta / 2$		f_1	$f_1^* = f_1 / \Sigma f_i$	f_1^*
$x_{\min} + \Delta - x_{\min} + 2\Delta$	$t_2 = t_1 + \Delta$		f_2	$f_2^* = f_2 / \Sigma f_i$	$f_1^* + f_2^*$
$x_{\min} + 2\Delta - x_{\min} + 3\Delta$	$t_3 = t_2 + \Delta$		f_3	$f_3^* = f_3 / \Sigma f_i$	$f_1^* + f_2^* + f_3^*$
⋮	⋮		⋮	⋮	⋮
$x_{\min} + (n-1)\Delta - x_{\max}$	$t_k = t_{k-1} + \Delta$		f_k	$f_k^* = f_k / \Sigma f_i$	Σf_i^*
			Σf_i	1	1

Figura 10. Tabla de frecuencias utilizada para graficar un histograma

7. Con los datos calculados en la tabla de frecuencias obtenida en el inciso anterior, se grafica el histograma, colocando en el eje vertical las frecuencias f_i y en el eje horizontal los límites de los intervalos de clase; entre los límites de cada intervalo de clase se grafica una barra, de altura igual a la frecuencia relativa de dicho intervalo. A la gráfica obtenida se le llama histograma. Si en vez de colocar en el eje horizontal los límites inferiores de cada intervalo, se colocan las marcas de clase de éstos, y se unen los puntos (t_i, f_i^*) mediante rectas, a la gráfica obtenida se le denomina Polígono de Frecuencias Relativas. Si en el eje vertical se colocan las frecuencias relativas acumuladas y en el eje horizontal se colocan los límites superiores de los intervalos de clase, y se unen los puntos (L_{if}, F_i) mediante rectas, a la gráfica obtenida se le denomina Polígono de Frecuencias Relativas Acumuladas u Ojiva. En la figura 11 se muestra un caso particular de histograma y polígono de frecuencias relativas acumuladas.

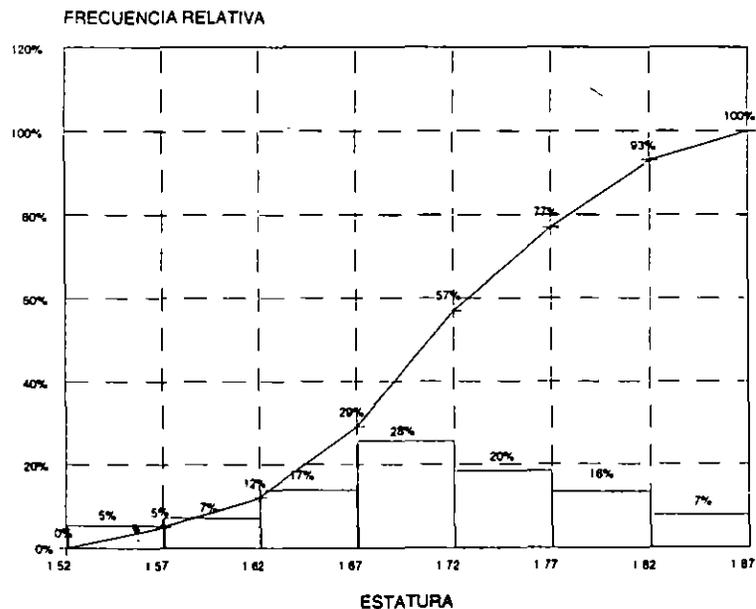


Figura 11. Ejemplo de un histograma y de un polígono de frecuencias relativas acumuladas

Estos gráficos son ampliamente utilizados para conocer el comportamiento empírico en frecuencia de una muestra y con base en ello poder inferir el comportamiento probabilístico de la población de donde se obtuvo dicha muestra. El histograma de cierta característica de interés de un proceso productivo, arroja una idea del valor medio que toma esa característica de interés en el proceso y también del nivel de variabilidad de éste. Los valores que se obtienen empíricamente de la muestra pueden ser comparados con los valores teóricos esperados, con el objeto de medir de alguna forma que tan eficiente es el proceso productivo.

Los parámetros descriptivos de una muestra se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Medidas de Tendencia Central: Media (aritmética, geométrica y armónica), Mediana, Moda y Semirango.
- Medidas de Dispersión: Rango, Varianza, Desviación Estándar y Coeficiente de Variación.
- Medidas de Sesgo: Coeficiente de Pearson y Coeficiente de Sesgo.
- Medidas de Aplanamiento o Curtosis: Coeficiente Momento de Curtosis.

En este módulo sólo se describirán dos medidas descriptivas de una muestra: la media aritmética y la desviación estándar.

La media aritmética es el valor de mayor utilidad y representatividad de la tendencia central de los datos de una muestra; su principal aplicación, bajo ciertas restricciones, es para estimar la media de los datos de la población de donde fue tomada la muestra. Estableciendo un símil con la mecánica de Newton, la media representa el centro de masa de un cuerpo. La formulación matemática de la media aritmética es la siguiente:

$$\text{Media} = (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) / n$$

Se denomina desviación con respecto a la media a la diferencia entre uno de los valores medidos y la media de todos los valores medidos, es decir,

$$\text{Desv. con respecto a la Media} = x_j - \text{Media}$$

donde x_j representa la medición j -ésima de las n realizadas.

La desviación estándar de un conjunto de datos dados representa la desviación promedio con respecto a la media de todos los valores medidos. Su formulación matemática es la siguiente:

$$\text{Desviación Estándar} = \text{raíz cuadrada de } \left\{ \frac{(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2) - n \cdot \text{Media}^2}{(n-1)} \right\}$$

Tanto la media como la desviación estándar de una muestra pueden ser replanteadas para el caso particular de datos agrupados en una tabla de frecuencias, de la siguiente forma:

$$\text{Media} = (f_1 \cdot x_1 + f_2 \cdot x_2 + f_3 \cdot x_3 + \dots + f_k \cdot x_k) / k$$

$$\text{Desv. Est.} = \text{raíz cuadrada de } \left\{ \frac{(f_1 \cdot x_1^2 + f_2 \cdot x_2^2 + f_3 \cdot x_3^2 + \dots + f_k \cdot x_k^2) - n \cdot \text{Media}^2}{(n-1)} \right\}$$

en donde f_j representa la frecuencia del intervalo j -ésimo, x_j la marca de clase de dicho intervalo y k el número de intervalos de clase.

MODELOS PROBABILÍSTICOS

Un modelo probabilístico de una variable aleatoria es una formulación matemática que representa el comportamiento teórico de la distribución de frecuencias que se esperaría observar al experimentar y tomar muestras sobre dicha variable de interés. Algunos de los modelos más conocidos y de mayor utilidad en el Control de Calidad se describen en las tablas 5-1 y 6-1 anexas.

Un caso que vale la pena abordar y que no está considerado en las tablas anteriores es la distribución normal, la cual se analizará a continuación.

TABLA 5-1 Resumen de distribuciones discretas

Distribución	Parámetros	Función probabilística $p(x)$	Media	Varianza	e	Función generatriz de momentos
Bernoulli	$0 \leq p \leq 1$	$p(x) = p^x q^{1-x}$ $x = 0, 1$ = 0 de otra manera	p	pq		$pe^t + q$
Binomial	$n = 1, 2, \dots$ $0 \leq p \leq 1$	$p(x) = \binom{n}{x} p^x q^{n-x}$ $x = 0, 1, 2, \dots, n$ = 0 de otra manera	np	npq		$(pe^t + q)^n$
Geométrica	$0 < p < 1$	$p(x) = pq^{x-1}$ $x = 1, 2, \dots$ = 0 de otra manera	$1/p$	q/p^2		$pe^t / (1 - qe^t)$
Pascal (Binomial Neg.)	$0 < p < 1$ $r = 1, 2, \dots$ ($r > 0$)	$p(x) = \binom{x-1}{r-1} p^r q^{x-r}$ $x = r, r+1, r+2, \dots$ = 0 de otra manera	r/p	rq/p^2		$\left[\frac{pe^t}{1 - qe^t} \right]^r$
Hipergeométrica	$N = 1, 2, \dots$ $n = 1, 2, \dots, N$ $D = 1, 2, \dots, N$	$p(x) = \frac{\binom{D}{x} \binom{N-D}{n-x}}{\binom{N}{n}}$ $x = 0, 1, 2, \dots, \min(n, D)$ = 0 de otra manera	$n \left[\frac{D}{N} \right]$	$n \left[\frac{D}{N} \right] \left[1 - \frac{D}{N} \right] \left[\frac{N-n}{N-1} \right]$		Véase Kendall y Stuart (1963)
Poisson	$\alpha > 0$	$p(x) = e^{-\alpha} (\alpha)^x / x!$ $x = 0, 1, 2, \dots$ = 0 de otra manera	α	α	e	$e^{\alpha(e^t - 1)}$

TABLA 6-1 Resumen de distribuciones continuas

Densidad	Parámetros	Función de densidad: $f(x)$	Media	Varianza	Función generatriz de momentos
Uniforme	α, β $\beta > \alpha$	$f(x) = \frac{1}{\beta - \alpha} \quad \alpha \leq x \leq \beta$ $= 0$ de otra manera	$(\alpha + \beta)/2$	$(\beta - \alpha)^2/12$	$\frac{e^{t\beta} - e^{t\alpha}}{t(\beta - \alpha)}$
Exponencial	$\lambda > 0$	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad x > 0$ $= 0$ de otra manera	$1/\lambda$	$1/\lambda^2$	$(1 - t/\lambda)^{-1}$
Gamma	$r > 0$ $\lambda > 0$	$f(x) = \frac{\lambda}{\Gamma(r)} (\lambda x)^{r-1} e^{-\lambda x} \quad x > 0$ $= 0$ de otra manera	r/λ	r/λ^2	$(1 - t/\lambda)^{-r}$
Weibull	$-x < \gamma < x$ $\delta > 0$ $\beta > 0$	$f(x) = \frac{\beta}{\delta} \left(\frac{x-\gamma}{\delta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\delta}\right)^\beta\right] \quad x \geq \gamma$ $= 0$ de otra manera	$\gamma + \delta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$	$\delta^2 \left\{ \Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \left[\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \right]^2 \right\}$	

TABLA 9-2 Resumen de procedimientos para intervalos de confianza

Tipo de problema	Estimador por puntos	Intervalo de confianza bilateral del 100(1 - α) porcentual
Media μ , varianza σ^2 conocida	\bar{X}	$\bar{X} - Z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n} \leq \mu \leq \bar{X} + Z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n}$
Diferencia entre dos medias μ_1 y μ_2 , varianzas σ_1^2 y σ_2^2 conocidas	$\bar{X}_1 - \bar{X}_2$	$\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - Z_{\alpha/2}\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}} \leq \mu_1 - \mu_2 \leq \bar{X}_1 - \bar{X}_2 + Z_{\alpha/2}\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}$
Media μ de una distribución varianza σ^2 desconocida	\bar{X}	$\bar{X} - t_{\alpha/2, n-1}S/\sqrt{n} \leq \bar{X} + t_{\alpha/2, n-1}S/\sqrt{n}$
Diferencia entre las medias de dos distribuciones normales $\mu_1 - \mu_2$, varianza $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ desconocida	$\bar{X}_1 - \bar{X}_2$	$\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - t_{\alpha/2, n_1+n_2-2}S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \leq \mu_1 - \mu_2 \leq \bar{X}_1 - \bar{X}_2 + t_{\alpha/2, n_1+n_2-2}S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$ <p>en donde $S_p = \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$</p>

<p>Varianza σ^2 de una distribución normal</p>	S^2	$\frac{(n-1)S^2}{\chi^2_{\alpha/2, n-1}} \leq \sigma^2 \leq \frac{(n-1)S^2}{\chi^2_{1-\alpha/2, n-1}}$
<p>Razón de las varianzas σ_1^2/σ_2^2 de dos distribuciones normales</p>	$\frac{S_1^2}{S_2^2}$	$\frac{S_1^2}{S_2^2} F_{1-\alpha/2, n_2-1, n_1-1} \leq \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \leq \frac{S_1^2}{S_2^2} F_{\alpha/2, n_2-1, n_1-1}$
<p>Proporción o parámetro de una distribución binomial p</p>	\hat{p}	$\hat{p} - Z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n}} \leq p \leq \hat{p} + Z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n}}$
<p>Diferencia entre dos proporciones de parámetros binomiales $p_1 - p_2$</p>	$\hat{p}_1 - \hat{p}_2$	$\hat{p}_1 - \hat{p}_2 - Z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{p}_1(1-\hat{p}_1)}{n_1} + \frac{\hat{p}_2(1-\hat{p}_2)}{n_2}} \leq p_1 - p_2 \leq \hat{p}_1 - \hat{p}_2 + Z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{p}_1(1-\hat{p}_1)}{n_1} + \frac{\hat{p}_2(1-\hat{p}_2)}{n_2}}$

Pruebas de hipótesis

TABLA 10-5 Sumario de los procedimientos de prueba de hipótesis para medias y varianzas

Hipótesis nula	Estadístico de prueba	Hipótesis alternativa	Criterios de rechazo	Parámetro de curva CO
$H_0: \mu = \mu_0$ σ^2 conocida	$Z_0 = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}}$	$H_1: \mu \neq \mu_0$ $H_1: \mu > \mu_0$ $H_1: \mu < \mu_0$	$ Z_0 > Z_{\alpha/2}$ $Z_0 > Z_\alpha$ $Z_0 < -Z_\alpha$	$d = \mu - \mu_0 /\sigma$ $d = (\mu - \mu_0)/\sigma$ $d = (\mu_0 - \mu)/\sigma$
$H_0: \mu = \mu_0$ σ^2 desconocida	$t_0 = \frac{\bar{X} - \mu_0}{S/\sqrt{n}}$	$H_1: \mu \neq \mu_0$ $H_1: \mu > \mu_0$ $H_1: \mu < \mu_0$	$ t_0 > t_{\alpha/2, n-1}$ $t_0 > t_{\alpha, n-1}$ $t_0 < -t_{\alpha, n-1}$	$d = \mu - \mu_0 /\sigma$ $d = (\mu - \mu_0)/\sigma$ $d = (\mu_0 - \mu)/\sigma$
$H_0: \mu_1 = \mu_2$ σ_1^2 y σ_2^2 conocida	$Z_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ $H_1: \mu_1 > \mu_2$ $H_1: \mu_1 < \mu_2$	$ Z_0 > Z_{\alpha/2}$ $Z_0 > Z_\alpha$ $Z_0 < -Z_\alpha$	$d = \mu_1 - \mu_2 /\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ $d = (\mu_1 - \mu_2)/\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ $d = (\mu_2 - \mu_1)/\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$
$H_0: \mu_1 = \mu_2$ $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$ desconocida	$t_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ $H_1: \mu_1 > \mu_2$ $H_1: \mu_1 < \mu_2$	$ t_0 > t_{\alpha/2, n_1+n_2-2}$ $t_0 > t_{\alpha, n_1+n_2-2}$ $t_0 < -t_{\alpha, n_1+n_2-2}$	$d = \mu_1 - \mu_2 /2\sigma$ $d = (\mu_1 - \mu_2)/2\sigma$ $d = (\mu_2 - \mu_1)/2\sigma$
$H_0: \mu_1 = \mu_2$ $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ desconocida	$t_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$ $\nu = \frac{(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2})^2}{\frac{(S_1^2/n_1)^2}{n_1+1} + \frac{(S_2^2/n_2)^2}{n_2+1}} - 2$	$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ $H_1: \mu_1 > \mu_2$ $H_1: \mu_1 < \mu_2$	$ t_0 > t_{\alpha/2, \nu}$ $t_0 > t_{\alpha, \nu}$ $t_0 < -t_{\alpha, \nu}$	— — —
$H_0: \sigma^2 = \sigma_0^2$	$\chi^2 = \frac{(n-1)S^2}{\sigma_0^2}$	$H_1: \sigma^2 \neq \sigma_0^2$ $H_1: \sigma^2 > \sigma_0^2$ $H_1: \sigma^2 < \sigma_0^2$	$\chi^2 > \chi_{\alpha/2, n-1}^2$ 0 $\chi^2 < \chi_{1-\alpha/2, n-1}^2$ $\chi^2 > \chi_{\alpha, n-1}^2$ $\chi^2 < \chi_{1-\alpha, n-1}^2$	$\lambda = \sigma/\sigma_0$ $\lambda = \sigma/\sigma_0$ $\lambda = \sigma/\sigma_0$
$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$	$F_0 = S_1^2/S_2^2$	$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ $H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$	$F_0 > F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$ 0 $F_0 < F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$ $F_0 > F_{\alpha, n_1-1, n_2-1}$	$\lambda = \sigma_1/\sigma_2$ $\lambda = \sigma_1/\sigma_2$

Distribución Normal

La esencia del control estadístico de proceso es que permite determinar, medir, analizar y controlar las características de operación de un proceso dado, a través del uso de modelos matemáticos. Un proceso trabajando bajo condiciones normales de operación está bajo control y es capaz de producir repetidamente partes que cumplen las especificaciones dadas. Los procesos que están bajo control estadístico presentan una cantidad de variación estable y predecible debido a causas comunes o naturales de variación. Las causas comunes de variación ocurren naturalmente en cualquier proceso y en muchos casos la cantidad de variación que provocan puede ser simulada a través de una distribución normal. A continuación se establecerán las principales características de una distribución normal.

La Distribución Normal fue estudiada por primera vez en el siglo XVIII, cuando se observó que los patrones de errores de medición seguían una distribución simétrica, en forma del perfil de una campana. Fue presentada en forma matemática en 1733 por DeMoivre, quién la obtuvo como una forma límite de la distribución binomial. La distribución también fue conocida por Laplace en fecha no posterior a 1775. Debido a un error histórico ha sido atribuida a Gauss, cuya primera referencia impresa relativa a esta distribución apareció en 1809 y por lo mismo con frecuencia se utiliza el término Distribución de Gauss (o gaussiana). Durante los siglos XVIII y XIX se realizaron varios intentos de establecer a esta distribución como la ley probabilística base de todas las variables continuas; debido a esto, se llegó a utilizar el término de Normal, lo cual se debe también a que en muchos aspectos resulta ser la piedra angular de la estadística.

Se dice que una variable aleatoria x tiene una Distribución Normal con media μ ($-\infty < \mu < \infty$) y varianza $\sigma^2 > 0$, si tiene función de probabilidad

$$f(x) = (2\pi\sigma^2)^{-1/2} \exp\{-(x-\mu)^2/2\sigma^2\} \quad -\infty < x < \infty$$

En la figura 12 se muestra un ejemplo de gráfica para este tipo de distribución. Se usa tanto que para representarla ha menudo se emplea la

notación abreviada $x \sim N(\mu, \sigma^2)$ para indicar que la variable aleatoria X se distribuye normalmente con media μ y varianza σ^2 .

Existe una interpretación sencilla de la desviación estándar σ de una distribución normal. De la definición de la distribución normal acumulada, se puede demostrar fácilmente que 68.27 % de los valores poblacionales se hallan en el intervalo $\mu - \sigma < x < \mu + \sigma$; 95.45 % se hallan en el intervalo $\mu - 2\sigma < x < \mu + 2\sigma$; 99.74 % se hallan en el intervalo $\mu - 3\sigma < x < \mu + 3\sigma$; 99.9937 % se hallan en el intervalo $\mu - 4\sigma < x < \mu + 4\sigma$; 99.999943 % se hallan en el intervalo $\mu - 5\sigma < x < \mu + 5\sigma$; y, 99.9999998 % se hallan en el intervalo $\mu - 6\sigma < x < \mu + 6\sigma$. Así, la desviación estándar mide la distancia en la escala horizontal, asociada a los límites de contención de los porcentajes dados anteriormente.

La distribución normal acumulada se define como la probabilidad de que la variable normal X sea menor que o igual a algún valor x , es decir,

$$P(x \leq a) = \int_{-\infty}^a (2\pi\sigma^2)^{-1/2} \exp\{-(x-\mu)^2/2\sigma^2\} dx$$

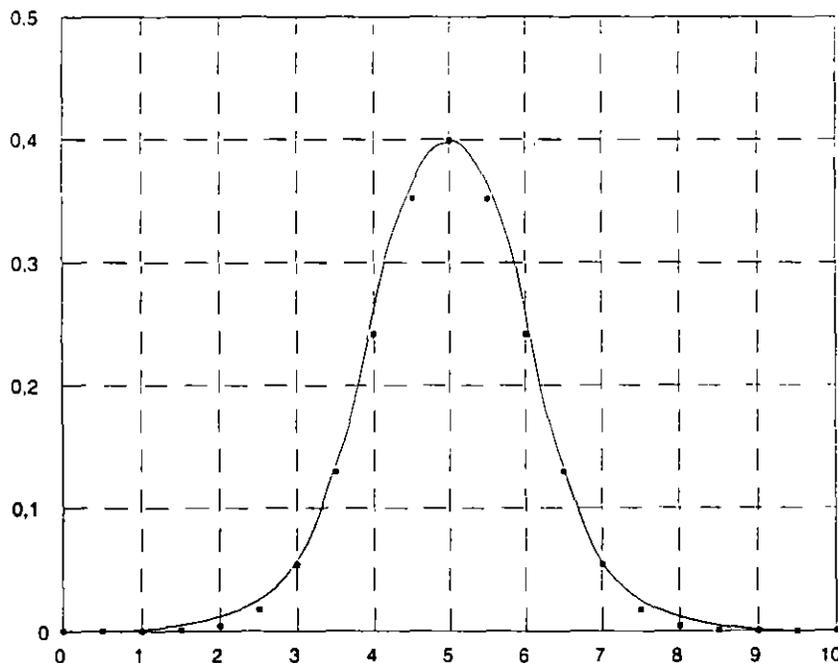


Figura 12. Gráfica de la Distribución Normal de media $\mu = 5$ y desviación estándar $\sigma = 1$

No es posible evaluar esta integral en forma cerrada. Sin embargo, utilizando el cambio de variable $z = (x - \mu) / \sigma$ la evaluación puede hacerse independientemente de los valores que tomen μ y σ^2 . A este cambio de variable se le denomina estandarización, y a la función normal que se obtiene, $N(0,1)$, se le denomina función normal estándar.

Teorema del Límite Central. Sean $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, n variables aleatorias independientes, con medias $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n$, y varianzas $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \dots, \sigma_n^2$. Se puede demostrar que bajo estas condiciones, la variable

$$y = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n$$

tiene como media, μ_y , a la suma de las medias, es decir,

$$\mu_y = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \dots + \mu_n$$

y como varianza, σ_y^2 , la suma de las varianzas, o sea,

$$\sigma_y^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots + \sigma_n^2$$

El Teorema del Límite Central establece que a medida que n se acerca a infinito, la distribución de la variable aleatoria $z_y = (y - \mu_y) / \sigma_y$ tiende a una distribución normal estándar. El hecho de que y se distribuya casi de manera normal cuando los términos x_i pueden tener fundamentalmente cualquier distribución, discreta o continua, es la razón básica de la importancia que tiene la distribución normal. Esto tiene consecuencias tremendas en las aplicaciones de la probabilidad y la estadística. De alguna forma, se puede buscar un procedimiento de trabajo de tal manera que permita aplicar el teorema del límite central y con ello partir del supuesto de que la distribución de los datos en estudio tiene un comportamiento aproximadamente normal. Un caso particular se presenta cuando las variables x_i tienen la misma distribución. En este caso la variable y tiene media $\mu_y = n\mu_x$ y desviación estándar $\sigma_y = \sqrt{n} \sigma_x$. De esta forma, la variable $z_y = (y - \mu_y) / \sqrt{n} \sigma_x$ tiene distribución normal estándar.

Por otra parte, surge la siguiente pregunta: ¿Qué tan grande debe ser n , para

obtener resultados razonables utilizando la distribución normal para aproximar la distribución de y ?. Desde un punto de vista práctico pueden proporcionarse algunas reglas de "dedo", cuando la distribución de los términos x_i cae en alguno de los tres grupos arbitrarios siguientes:

1. "Bien Comportada". La distribución de x_i no se aparta radicalmente de la distribución normal. En este caso, los empíricos en Control de Calidad y en otras áreas de aplicación han encontrado que n debe ser al menos 4, es decir, $n \geq 4$.
2. "Comportada Aceptablemente". La distribución de x_i no tiene modo protuberante y se parece mucho a una densidad uniforme. En este caso, la regla comúnmente aceptada es $n \geq 12$.
3. "Mal Comportada". La distribución tiene forma completamente contraria al perfil de una campana (campana invertida). Para muchas aplicaciones prácticas, $n \geq 100$ debería ser satisfactoria.

Hipótesis Estadística

Una hipótesis estadística es un enunciado respecto a una población estadística y usualmente respecto a uno o más parámetros de dicha población. Frecuentemente es deseable probar la validez de tales hipótesis; a fin de hacer esto, se lleva a cabo un experimento y la hipótesis es desechada si los resultados obtenidos del experimento son improbables bajo dicha hipótesis; si los resultados no son improbables, la hipótesis es aceptada. En todo ensayo de hipótesis existen dos tipos de error que pueden cometerse:

- Error tipo I: Rechazar la hipótesis cuando ésta es verdadera; la probabilidad del error tipo I se indica con α , a esta probabilidad también se le denomina nivel de significancia.
- Error tipo II: Aceptar la hipótesis cuando ésta es falsa; a la probabilidad del error tipo II se le denomina β . Algunas veces es más conveniente trabajar con la Potencia de la Prueba, la cual se define como el complemento de la probabilidad del error tipo II, es decir $1-\beta$.

Para ilustrar la aplicación de estos conceptos se usará el siguiente ejemplo: Supóngase que un "merengero" pretende jugar volados con uno de ustedes y saca una moneda con la cual pretenden llevar a cabo el torneo. De entrada, ustedes desconfían de la "honradez" de la moneda; por ello deciden someterla a una prueba de hipótesis. En este caso, la hipótesis nula es suponer que el porcentaje de "aguilas" con respecto al de "soles" es $H_0: p=0.5$ contra la hipótesis alternativa de que esto no es cierto $H_1: p \neq 0.5$. Se trata de probar la validez de la hipótesis nula. La prueba que deciden hacer es lanzar 100 volados, si el número de "aguilas" está situado entre 45 y 55 entonces aceptan la moneda, si no ocurre esto rechazan la moneda. Surgen dos preguntas:

- 1) ¿Cuál es la probabilidad de rechazar la moneda cuando en realidad debió aceptarse?, es decir, ¿cuál es el valor de α ?

$$\alpha = 1 - p(45 \leq x \leq 55)$$

La distribución teórica que mejor se adecua a este conjunto de datos es la binomial, debido a que la probabilidad de que caiga aguila en cada ensayo es un número fijo $H_0: p=0.5$ y además el número de ensayos que pueden ser realizados es infinito; sin embargo, como $np \geq 5$ para $p \leq 0.5$ se aproximará por medio de la distribución normal; en este caso $\mu = np = 100(0.5) = 50 \geq 5$ y $\sigma^2 = np(1-p) = 100(0.5)(0.5) = 25 \Rightarrow \sigma = 5$; así:

$$\begin{aligned} \alpha = 1 - p(45 \leq x \leq 55) &= 1 - p\left[\frac{(45-50-1/2)}{5} \leq z \leq \frac{(55-50+1/2)}{5}\right] = \\ &= 1 - p(-1.1 \leq z \leq 1.1) = 1 - 2P(0 \leq z \leq 1.1) = \\ &= 1 - 2[p(z \leq 1.1) - 1] = 2[1 - p(z \leq 1.1)] = \\ &= 2(1 - 0.86433) = 0.27134 \Rightarrow 27.13\% \end{aligned}$$

2. ¿Cuál es la probabilidad de aceptar la moneda cuando en realidad debió haberse rechazado?, es decir, ¿cuál es el valor de β ?

La probabilidad del error tipo II no es constante sino que depende del valor real de probabilidad de que caiga aguila; si p representa la verdadera probabilidad de que caiga aguila entonces $\beta(p)$ denota la

probabilidad del error tipo II. La función $\beta(p)$ se evalúa encontrando la probabilidad de que la estadística de prueba $x = np$ caiga en la región característica de aceptación $45 \leq x \leq 55$ dado un valor particular de p . En este aspecto a la gráfica de $\beta(p)$ contra p se le denomina Curva Característica de Operación; de esta forma se puede considerar a la función $\beta(p)$ como una medida de la capacidad de un procedimiento para detectar una desviación particular respecto de la hipótesis nula. Por ejemplo, si $p=0.45$ entonces:

$$\begin{aligned}\beta = P(45 \leq x \leq 55) &= \sum_{x=45}^{x=55} \binom{100}{x} (0.45)^x (0.55)^{100-x} = \\ &= \binom{100}{45} (0.45)^{45} (0.55)^{55} + \binom{100}{46} (0.45)^{46} (0.55)^{54} + \\ &\quad + \dots + \binom{100}{55} (0.45)^{55} (0.55)^{45} = \\ &= 0.521031 \Rightarrow 52.10\%\end{aligned}$$

De la misma forma se pueden obtener las probabilidades al hacer variar el valor de p desde $p=0.05$ hasta $p=0.95$ en intervalos de 0.05.

En la gráfica 13.a se muestra el significado geométrico del valor de α , en la gráfica 13.b el significado geométrico de β y en la gráfica 14 se muestra la curva característica de operación correspondiente a esta prueba.

MUESTREO DE ACEPTACIÓN

Tradicionalmente se ha establecido que los principales factores que influyen en la calidad de un producto en un proceso de manufactura son: Mano de Obra, Maquinaria, Materia Prima, Métodos, Mediciones y Medio Ambiente. No se puede esperar que un producto tenga calidad si cada uno de estos factores no reúne las características adecuadas para el fin a que se destinan. Con respecto a la materia prima, y según uno de los elementos de la norma ISO serie 9000, se requiere que el consumidor o cliente de los suministros que le solicita a sus proveedores establezca un Programa de Control de Adquisiciones. Este programa debe contar con los siguientes elementos:

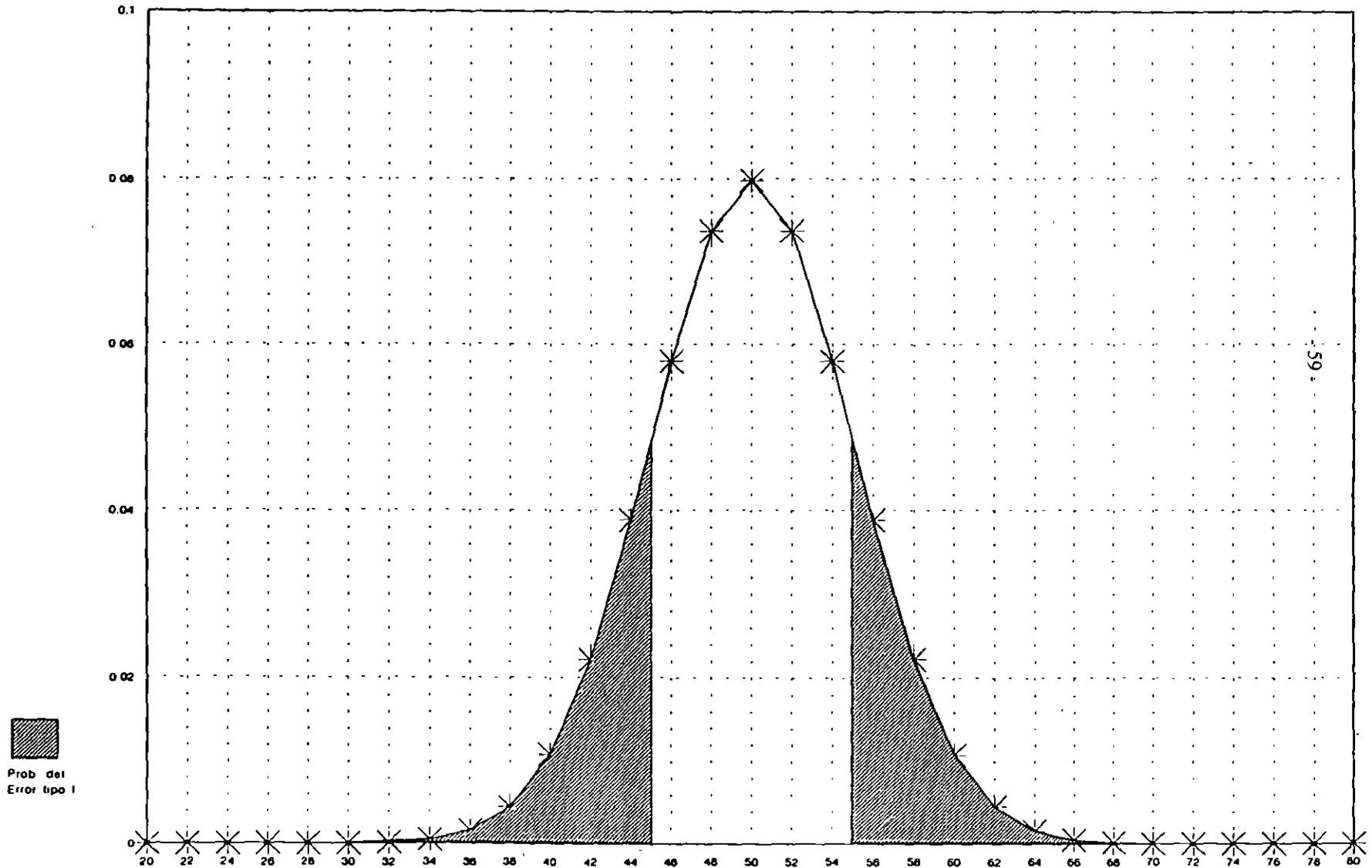
PROBABILIDAD DEL ERROR TIPO I

PRUEBA DE HIPÓTESIS DE HOMOGENEIDAD DE MONEDA

100 LANZAMIENTOS. ACEPTACIÓN 45-55 AGUILAS

Octavio Estrada Castillo, Noviembre, 1996

Curso de Análisis y Control de Calidad

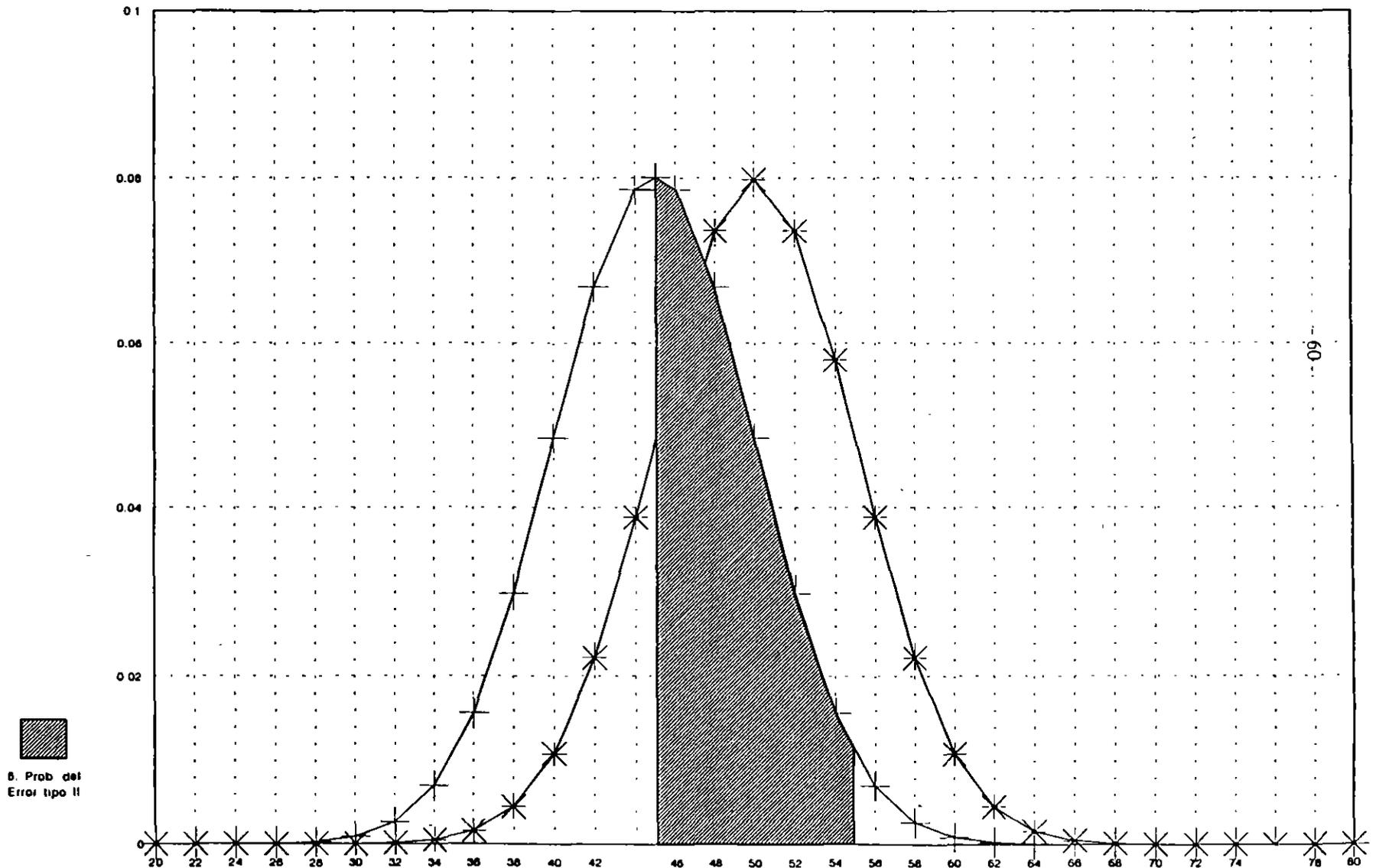


PROBABILIDAD DEL ERROR TIPO II

PRUEBA DE HIPÓTESIS DE HOMOGENEIDAD DE MONEDA 100 LANZAMIENTOS. ACEPTACIÓN 45-55 AGUILAS

Octavio Estrada Castillo. Noviembre, 1996

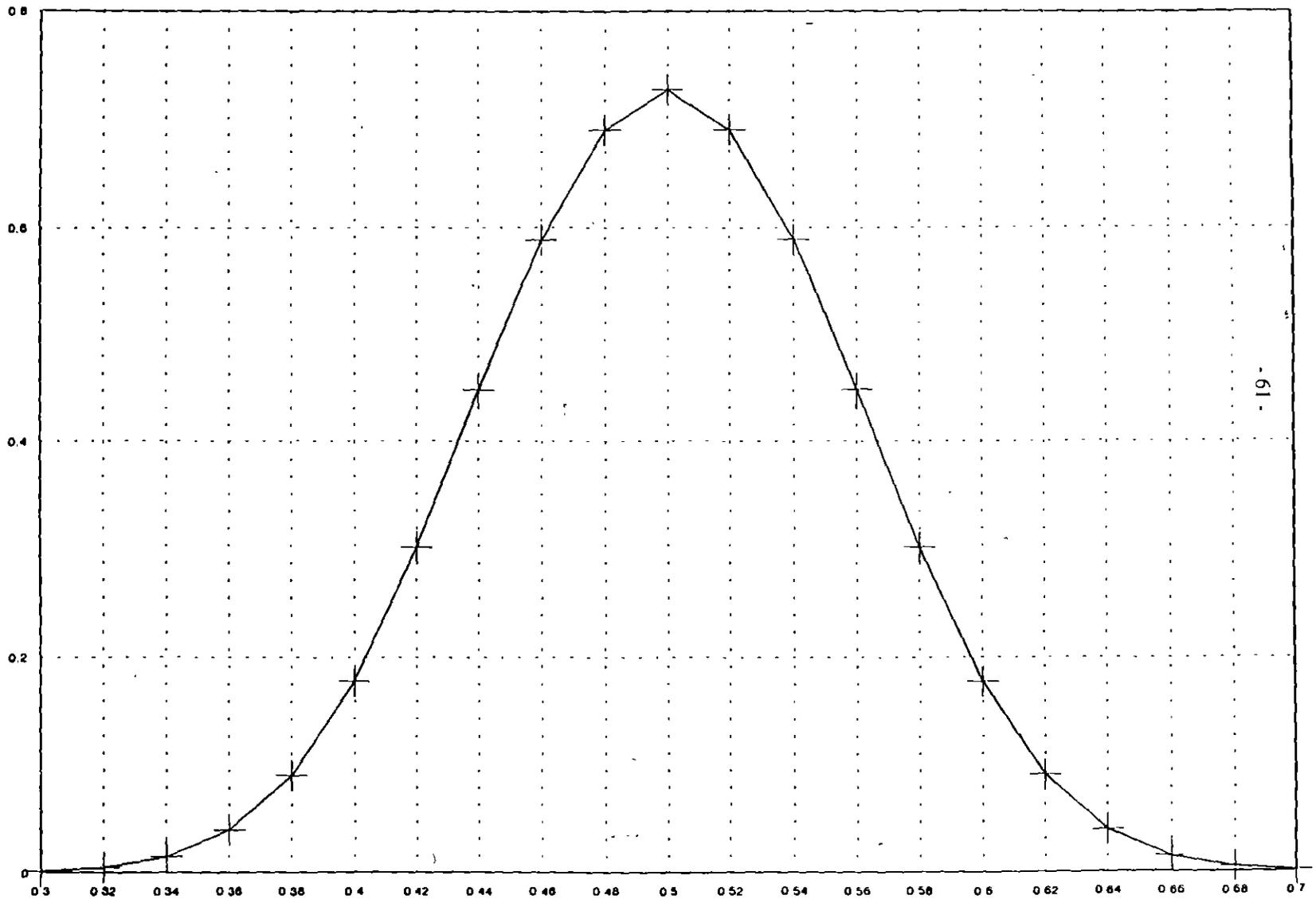
Curso de Análisis y Control de Calidad



CURVA CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN PRUEBA DE HIPÓTESIS DE HOMOGENEIDAD DE MONEDA 100 LANZAMIENTOS. ACEPTACIÓN 45-55 AGUILAS

Octavio Estrada Castillo. Noviembre, 1996

Curso de Análisis y Control de Calidad



1. Selección de Proveedores
 - ↳ Evaluación Preliminar de la planta del proveedor
 - ↳ Aprobación de Primeras Muestras
2. Control de Documentos de Compra
3. Verificación de Productos Adquiridos

Con respecto a la verificación de productos adquiridos, los proveedores pueden ser otras compañías u otras plantas de la misma compañía. Es más, en el caso de empresas de gran capacidad, una división de la planta puede considerar la producción de otra división de la misma planta como un proveedor.

Existen varias maneras de verificar la calidad de los productos adquiridos:

1. Aprobar el proceso productivo de dichos productos a través de una evaluación del sistema de calidad de la empresa proveedora.
2. Solicitar Certificados de Calidad acompañados con Registros de Control de Proceso, Registros de Inspección al 100% o Registros de Inspección por Muestreo de los productos adquiridos.
3. Verificar y registrar la calidad de los productos adquiridos en la planta del proveedor.
4. Verificar y registrar la calidad de los productos adquiridos en el área de recibo del cliente.

Con respecto a la verificación de los productos adquiridos, ya sea en la planta del proveedor o en la del cliente, y entendiendo por verificación una serie de mediciones e inspecciones realizadas a las características críticas de calidad de un producto, con el objeto de vigilar el cumplimiento de las especificaciones, las inspecciones que se requieran pueden llevarse a cabo al 100% de los productos o puede tomarse una muestra representativa de

la población y decidir su aceptación o rechazo con base en los resultados obtenidos de la muestra.

El Muestreo de Aceptación establece el método a seguir para llevar a cabo la inspección por muestreo de los productos que entran a un proceso productivo y los criterios de aceptación o rechazo en que descansa la decisión de aceptar o no un producto o servicio. Un plan de muestreo de aceptación es un planteamiento del tamaño muestral que hay que utilizar y de los criterios de aceptación o de rechazo correspondientes para juzgar lotes individuales. Hay tres aspectos importantes en el muestreo de aceptación:

1. El propósito del muestreo de aceptación es juzgar los lotes, no estimar su calidad.
2. Los planes de muestreo de aceptación no proporcionan alguna forma directa de control de calidad. Los procesos de control se usan para vigilar y mejorar sistemáticamente la calidad, pero ello no sucede con el muestreo de aceptación.
3. El uso más eficiente del muestreo de aceptación no es "inyectar calidad al producto mediante la inspección", sino más bien como una herramienta de verificación con el fin de asegurar que la producción o salida de un proceso esté conforme con los requisitos.

El muestreo de aceptación es muy útil en las situaciones siguientes:

1. Cuando la prueba es destructiva.
2. Cuando es muy alto el costo de una inspección al 100%.
3. Cuando una inspección al 100% no es tecnológicamente factible, o cuando se necesitaría tanto tiempo que la planeación de la producción se vería afectada seriamente.
4. Cuando hay que inspeccionar muchos artículos, y la tasa de errores de inspección es suficientemente alta para que una inspección al 100%

pudiera dejar pasar un mayor porcentaje de artículos defectuosos que en el caso de un plan de muestreo.

5. Cuando el proveedor tiene un excelente historial de calidad y se desea alguna reducción en la inspección al 100%, pero, la relación de capacidad del proceso de aquél es lo bastante baja para que la no inspección sea una alternativa insatisfactoria.
6. Cuando existen riesgos potencialmente serios respecto a la responsabilidad legal por el producto, y aunque es satisfactorio el proceso del abastecedor, se necesita disponer de un programa de vigilancia continua.

Ventajas y Desventajas del Muestreo

Cuando se compara el muestreo de aceptación con una inspección al 100%, el primero tiene las ventajas siguientes:

1. Por lo general es menos costoso, pues requiere menos inspección.
2. Hay un menor manejo del producto y por tanto se reducen los daños.
3. Puede aplicarse en el caso de pruebas destructivas.
4. Hay menos personal implicado en las actividades de inspección.
5. A menudo reduce notablemente la cantidad de errores de inspección.
6. El rechazo de lotes completos, en vez de la simple devolución de artículos defectuosos, constituye una motivación más fuerte para que el proveedor mejore la calidad.

El muestreo de aceptación, sin embargo, tiene también varias desventajas; entre ellas están las siguientes:

1. Existe el riesgo de aceptar lotes "malos" y rechazar lotes "buenos".

2. Se genera normalmente menos información sobre el producto o el proceso de fabricación del producto.
3. El muestreo de aceptación necesita planeación y documentación del procedimiento de muestreo, mientras que una inspección al 100% no lo requiere.

Hay varias maneras de clasificar los planes de muestreo de aceptación. Por ejemplo, los lotes deben adecuarse a los sistemas de manejo de materiales que se utilizan en las instalaciones del proveedor y el consumidor, por ello, una clasificación importante es de acuerdo a la forma del lote, el medio de transporte y el método de toma de decisiones:

- ↪ Muestreo sobre la cinta transportadora.
- ↪ Muestreo por escotillas.
- ↪ Muestreo sobre el vehículo transportador.
- ↪ Muestreo en el recipiente.

Otra clasificación es la siguiente:

- ↪ Inspección por Muestreo Lote por Lote; cuando los artículos se agrupan por lotes y se toma una muestra de cada lote para posteriormente tomar la decisión de si se acepta o rechaza éste.
- ↪ Inspección por Muestreo Continuo; cuando se utilizan los resultados reales de la inspección para determinar si para los próximos artículos a inspeccionar se usará inspección parcial o total.

Tipos de Planes de Muestreo

- ↪ Inspección por variables; cuando las características de calidad de los productos inspeccionados se miden y expresan en números.

- Inspección por Atributos; cuando las características de calidad se clasifican sólo como defectuosas o no defectuosas.

En contraste con la falta de confianza y la ambigüedad del muestreo arbitrario, los procedimientos estadísticos de muestreo, son específicos y aseguran confianza. Están basados en los principios bien definidos del cálculo de probabilidades, los cuales se han traducido a gráficas y fórmulas, disponibles para poderse emplear en el trazado de planes de muestreo individuales a fin de llenar necesidades de las condiciones particulares de cada empresa que los requiera.

Un Plan de Muestreo Simple es un procedimiento en el que se toma una muestra aleatoria de n unidades del lote para su apreciación y se determina el destino del lote con base en la información contenida en la muestra. Por ejemplo, un plan de muestreo simple por atributos consistiría en una muestra de tamaño n y un número de aceptación c . El método funcionaría de la manera siguiente:

1. Seleccionar una muestra representativa del lote, de tamaño n , escogiendo n artículos del lote, aleatoriamente.
2. Llevar a cabo las mediciones e inspecciones de las características críticas de cada artículo de la muestra y registrar sus resultados.
3. Si existen c o menos artículos defectuosos en la muestra, se acepta el lote. Si existen más de c artículos defectuosos en la muestra, se rechaza el lote.

Los planes de muestreo doble son un poco más complicados. Después de una muestra inicial se toma una decisión basada en la información de esta muestra para 1) aceptar el lote; 2) rechazarlo; ó, 3) tomar una segunda muestra. Si se toma esta última, se combina la información de ambas muestras para decidir sobre la aceptación o el rechazo del lote. Un plan de muestreo doble se define mediante cuatro parámetros:

n_1 = tamaño muestral de la primera muestra

c_1 = número de aceptación de la primera muestra

n_2 = tamaño muestral de la segunda muestra

c_2 = número de aceptación para ambas muestras combinadas

Como ejemplo, supóngase que $n_1 = 50$, $c_1 = 1$, $n_2 = 100$ y $c_2 = 3$. De esta manera, se selecciona una muestra aleatoria de $n_1 = 50$ artículos del lote, y se observa el número de artículos defectuosos, d_1 , en ella. Si $d_1 \leq c_1 = 1$ se aceptará el lote en la primera muestra. Si $d_1 > c_2 = 3$, se rechazará el lote en la primera muestra. Si $c_1 < d_1 \leq c_2$, se tomará una segunda muestra aleatoria de tamaño $n_2 = 100$ del lote y, se observará el número de artículos defectuosos, d_2 , en esta segunda muestra. Ahora se utiliza el número combinado de artículos defectuosos observados en ambas muestras, $d_1 + d_2$, para determinar la suerte del lote. Si $d_1 + d_2 \leq c_2 = 3$, se aceptará el lote. Sin embargo, si $d_1 + d_2 > c_2 = 3$, se le rechazará.

La ventaja principal de un plan de muestreo doble con respecto al muestreo simple es que puede reducir la cantidad total de inspección requerida. Por consiguiente, para todos los casos en los que se acepta o se rechaza un lote en la primera muestra, los costos de inspección serán menores en el muestreo doble que en el simple. También es posible rechazar un lote sin una inspección completa de la segunda muestra (esto se llama reducción de la segunda muestra). Esto implica que el uso de muestreo doble puede generar a menudo costos totales de inspección más bajos. Además, en algunos casos un plan de muestreo doble tiene la ventaja psicológica de dar una segunda oportunidad al lote, aunque no sea cierto.

El muestreo doble tiene dos desventajas potenciales; primero, en ciertas circunstancias puede requerir más inspección total que un muestreo simple que ofrezca la misma protección, a menos que se use una reducción para la segunda muestra; la segunda desventaja del muestreo doble es que es más complicado operativamente, lo que puede incrementar la posibilidad de cometer errores de inspección.

Un plan de muestreo múltiple es una extensión del concepto de muestreo doble, en el que pueden necesitarse más de dos muestras para llegar a una decisión acerca de la suerte del lote. Los tamaños muestrales suelen ser menores que en un muestreo simple o doble.

Otra clase de muestreo que se puede usar es el muestreo secuencial, en el que se seleccionan artículos (uno a la vez) del lote y, según la inspección de cada unidad, se toma una decisión para aceptar o rechazar el lote, o seleccionar otro artículo.

Con respecto a la disposición que se dé sobre los lotes rechazados, pueden tamizarse (inspeccionar el 100%) éstos, ya sea remplazando todos los elementos defectuosos con elementos correctos, o simplemente quitándolos. A esta alternativa se le conoce como Inspección de Rectificación. La calidad promedio que entra al proceso de producción es superior a la calidad promedio que entrega el fabricante. Por tanto, para una inspección de rectificación se considera la calidad promedio de salida proveniente del proceso de inspección. La calidad promedio de salida tiene un límite inferior, denominado Límite de Calidad Promedio de Salida (LCPS); esto implica que sin importar que tan mala se vuelva la calidad de entrada, la calidad promedio de salida nunca será peor que el LCPS.

Cualquier plan de muestreo de aceptación puede describirse en términos de su Curva Característica de Operación (CCO). Esta curva relaciona la verdadera fracción de defectuosos para el lote con la probabilidad de que dicho lote sea aceptado.

El nivel de calidad que se considera "bueno" y que se desea aceptar la mayor parte de las veces se denomina Nivel de Calidad Aceptable (NCA). El nivel que se considera "malo" y que debería rechazarse, la mayoría de las veces se denomina Porcentaje de Defectos de Tolerancia del Lote (PDTL). La probabilidad de que un plan de muestreo rechace lotes dentro del NCA se denomina riesgo del productor, α , y la probabilidad de que un plan acepte lotes dentro del PDTL se denomina riesgo del consumidor, β . Cualquier CCO puede definirse seleccionando los puntos (NCA, $1-\alpha$) y (PDTL/100, β). La CCO proporciona fundamentalmente las probabilidades de errores tipo I (α) y tipo II (β) asociadas con el plan de muestreo.

Un método común para el diseño de un plan de muestreo simple consiste en exigir que la CCO pase por dos puntos designados. Supóngase que se quiere elaborar un plan de muestreo simple por atributos tal que la probabilidad de aceptación sea $1-\alpha$ para lotes con una fracción defectuosa p_1 , y β para lotes con una fracción defectuosa p_2 . Suponiendo que el muestreo binomial (CCO tipo B) es el adecuado, el tamaño muestral n y el número de aceptación c son la solución de:

$$1-\alpha = \sum_{x=0}^c \binom{n}{x} p_1^x (1-p_1)^{n-x}$$

$$\beta = \sum_{x=0}^c \binom{n}{x} p_2^x (1-p_2)^{n-x}$$

Estas dos ecuaciones no son lineales y no hay una solución directa sencilla. Sin embargo, puede usarse el nomograma anexo para obtener el plan de muestreo requerido.

El efecto de n y c , en la curva característica de operación de un plan de muestreo único, es el siguiente:

- Para N y n constantes se ve que aumentar c recorre a la curva característica de operación hacia la derecha, esto es, el plan se vuelve menos selectivo.
- Para N y c constantes, el aumentar a n hace que la curva característica de operación se vuelva más empinada. Si el tamaño del lote N es grande en relación con el tamaño de la muestra n , la curva característica de operación es independiente del tamaño del lote.

Tablas y Planes de Muestreo Publicados

Entre las diferentes tablas estadísticas de muestreo y los planes que se han desarrollado, algunas se han publicado en una forma que las hace accesibles para su empleo general. Los planes de muestreo más interesantes que se han publicado son:

Ejemplo

Se desea: un plan de muestreo con

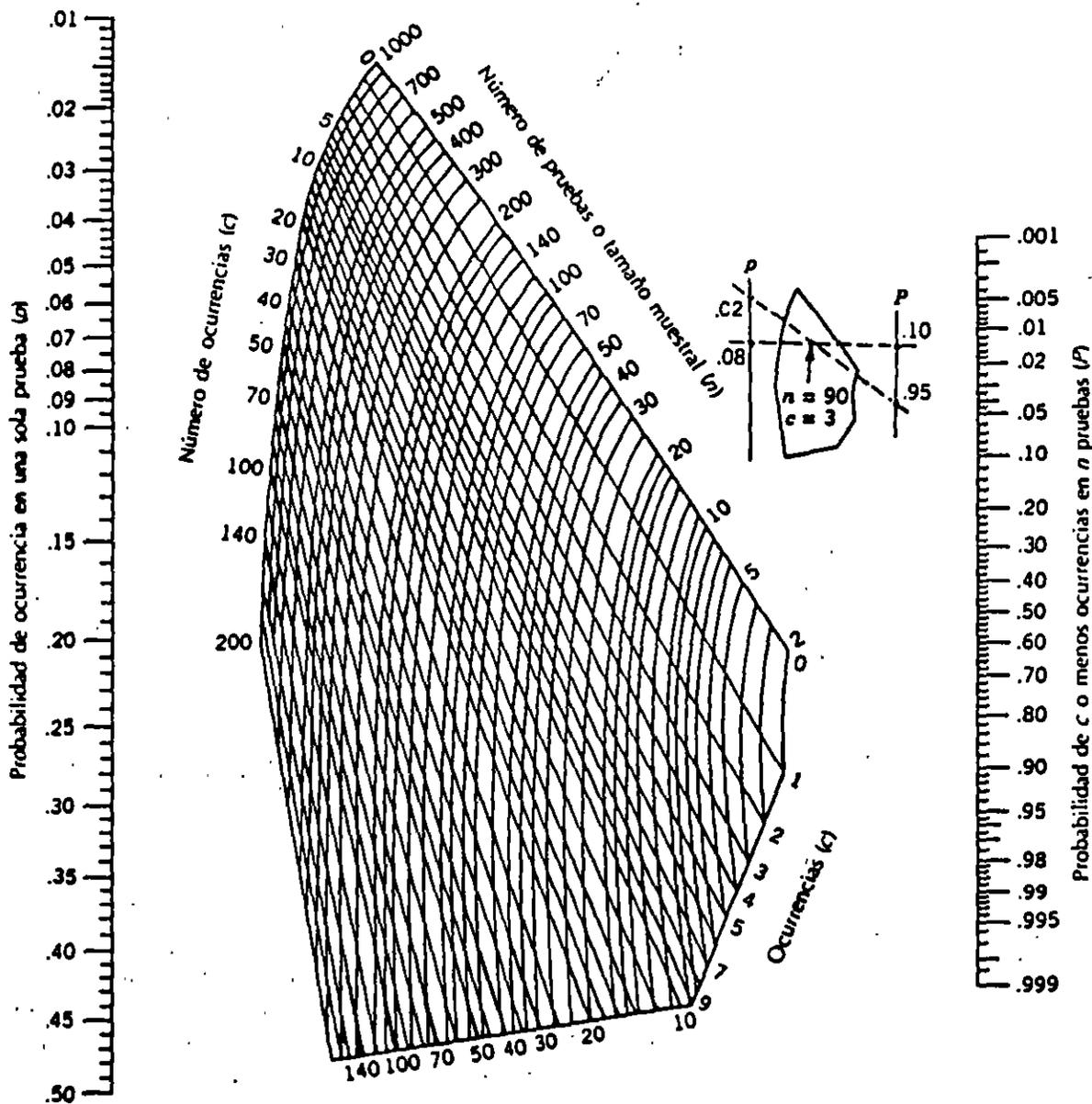
$$P = 0.95 \text{ en } p = 0.02$$

$$P = 0.10 \text{ en } p = 0.08$$

- Solución: se trazan rectas de alineación y se obtienen el tamaño muestral (n) y el número de aceptación como aparece en el diagrama siguiente:

$$P\{m \leq c\} = \sum_{m=0}^c \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m (1-p)^{n-m}$$

$$\frac{n}{N} < 0.1$$



Nota:

Si p es menor que 0.01, se ubica $k \times p$ en la escala p , y se multiplican por k los valores de la escala n , donde $k = 0.01/p$ (redondeando k hasta el siguiente entero).

Figura 10-9. Nomograma binomial

1. Tablas de Dodge-Romig
2. Tablas Militar Estándar MIL-STD-105D; ANSI/ASQC Z1.4; ISO 2859; esencialmente similares.
3. Planes de Secuencia Regular
4. Planes de Muestreo Continuo
5. Muestreo en Cadena y Planes Salte-un-Lote
6. Tablas de Muestreo Columbia

En este curso se describirán dos tipos de sistemas de muestreo de aceptación: MIL-STD-105D y MIL-STD-414.

Principales tópicos de la MIL-STD-105D.

Nivel de Calidad Aceptable (NCA o AQL por sus siglas en inglés). El NCA se define como el máximo porcentaje defectuoso (o el número máximo de defectos por cien unidades), que para propósitos de inspección por muestreo puede considerarse satisfactorio como un promedio del proceso. En la MIL-STD-105D, Los valores de AQL de 10 o menos se expresan como porcentaje defectuoso o como defectos por cien unidades; aquellos por encima de 10, se expresan solamente por cien unidades.

Forma de Inspección. Las formas de inspección que se presentan en la MIL-STD son: normal, reducida y ajustada. Si no se indica lo contrario, el muestreo se inicia con inspección normal.

Se establece inspección ajustada cuando se han rechazado 2 de 5 lotes consecutivos. Se restablece la inspección normal cuando se han aceptado 5 lotes consecutivos. Si 10 lotes consecutivos permanecen bajo inspección ajustada, la inspección bajo MIL-STD-105D ha de suspenderse, mientras se toma acción para mejorar la calidad sometida.

Bajo la inspección ajustada, se aumenta el riesgo del productor, mientras se disminuye el riesgo del consumidor; en otras palabras, la probabilidad de aceptar lotes malos (y también buenos) disminuye; en la MIL-STD-105D, esto se logra generalmente manteniendo fijo el tamaño de la muestra (igual al de inspección normal) mientras se disminuye el número de aceptación; esto se hace frecuentemente desplazando el plan de muestreo un paso hacia el plan ADL próximo inferior (izquierda).

Se emplea inspección reducida cuando 10 lotes consecutivos se han aceptado bajo inspección normal, la producción es a una tasa constante y su implantación es deseable por la autoridad responsable. Bajo la inspección reducida se disminuye el tamaño muestral aproximadamente 40% de la inspección normal. La inspección normal se reinicia cuando se rechaza un lote.

Planes de muestreo. Los tamaños de muestra se designan por letras de código de la A a la R (omitiendo I y O). La letra de código del tamaño muestral depende del nivel de inspección y el tamaño del lote. Hay tres niveles de inspección I, II y III para uso general. Si no se especifica de otra manera, se usa el nivel de inspección II. Cuatro niveles adicionales, S-1, S-2, S-3 y S-4, también se dan para tamaños muestrales relativamente pequeños y se puede o debe tolerar grandes riesgos.

Pasos a seguir para emplear la MIL-STD-105D

1. Con el tamaño del lote y el nivel de inspección seleccionado consultar la tabla 3 (tabla I de MIL-STD-105D) y determinar la letra de código del tamaño muestral.
2. Con la letra de código del tamaño muestral, remitirse a la tabla 4 (tabla II-A de la MIL-STD-105D) y obtener el tamaño muestral del lote a inspeccionar.
3. Intersecar el valor del tamaño muestral con el valor de AQL, para obtener tanto el número de elementos muestrales inspeccionados que permitirán aceptar el lote, así como el número de elementos muestrales que originarán su rechazo.

Tabla K Letras código del tamaño de la muestra MIL-STD-105D (Norma ABC)

Tamaño del lote	Niveles de inspección especiales				Niveles de inspección generales		
	S-1	S-2	S-3	S-4	I	II	III
2-8	A	A	A	A	A	A	B
9-15	A	A	A	A	A	B	C
16-25	A	A	B	B	B	C	D
26-50	A	B	B	C	C	D	E
51-90	B	B	C	C	C	E	F
91-150	B	B	C	D	D	F	G
151-280	B	C	D	E	E	G	H
281-500	B	C	D	E	F	H	J
501-1,200	C	C	E	F	G	J	K
1 201-3 200	C	D	E	G	H	K	L
3 201-10 000	C	D	F	G	J	L	M
10 001-35 000	C	D	F	H	K	M	N
35 001-150 000	D	E	G	J	L	N	P
150 001-500 000	D	E	G	J	M	P	Q
500 001 y superior	D	E	H	K	N	Q	R

Tabla 4 (tabla II-A de la MIL-STD-105D) -MIL-STD-105D (ABC Standard)

Sample size code letter	Sample size	Acceptable quality levels (normal inspection)																											
		0.010	0.015	0.025	0.040	0.065	0.10	0.15	0.25	0.40	0.65	1.0	1.5	2.5	4.0	6.5	10	15	25	40	65	100	150	250	400	650	1,000		
		Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	
A	2	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
B	3	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
C	5	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
D	8	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
E	13	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
F	20	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
G	32	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
H	50	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
J	80	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
K	125	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
L	200	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
M	315	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
N	500	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
P	800	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
Q	1,250	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
R	2,000	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑		

↓ = use first sampling plan below arrow. If sample size equals, or exceeds, lot or batch size, do 100% inspection.
 ↑ = use first sampling plan above arrow.
 Ac = acceptance number.
 Re = rejection number.

4. Efectuar el muestreo de las piezas representativas del lote a inspeccionar.
5. Al término del muestreo, si el valor de elementos muestrales defectuosos no rebasa el valor de aceptación, el lote deberá ser aceptado, en caso contrario el lote deberá ser rechazado.

MIL-STD-414

La ventaja principal de los planes de muestreo por variables es que se puede obtener la misma CCO con un tamaño muestral menor que lo requerido por un plan de muestreo por atributos. Una segunda ventaja es que los datos de mediciones proporcionan normalmente más información sobre el proceso de manufactura o el lote que los datos de atributos; en general, las mediciones numéricas de las características de calidad son más útiles que la simple clasificación de un artículo como defectuoso o no. Los planes de este tipo de muestreo tienen varias desventajas; quizá la principal es que se debe conocer la distribución de la característica de calidad; la segunda desventaja del muestreo por variables es que se debe usar un plan de muestreo por cada característica de calidad que haya que inspeccionar; finalmente, es posible que el uso de un plan de muestreo por variables lleve al rechazo de un lote aunque la muestra que se inspecciona realmente no tenga ningún artículo defectuoso.

Existen dos tipos generales de procedimientos de muestreo por variables; planes que controlan la fracción defectuosa (o no conforme) del lote o el proceso, y planes que controlan un parámetro (normalmente la media) del lote o proceso. De la misma forma que para el muestreo por atributos, un método común para el diseño de un plan de muestreo simple consiste en exigir que la CCO pase por dos puntos designados. Supóngase que se quiere elaborar un plan de muestreo simple por variables tal que la probabilidad de aceptación sea $1-\alpha$ para lotes con una fracción defectuosa p_1 , y β para lotes con una fracción defectuosa p_2 , puede usarse el nomograma anexo para obtener el plan de muestreo requerido.

El estándar por variables tiene muchas características que son similares al estándar por atributos. Como el estándar por atributos, los planes de

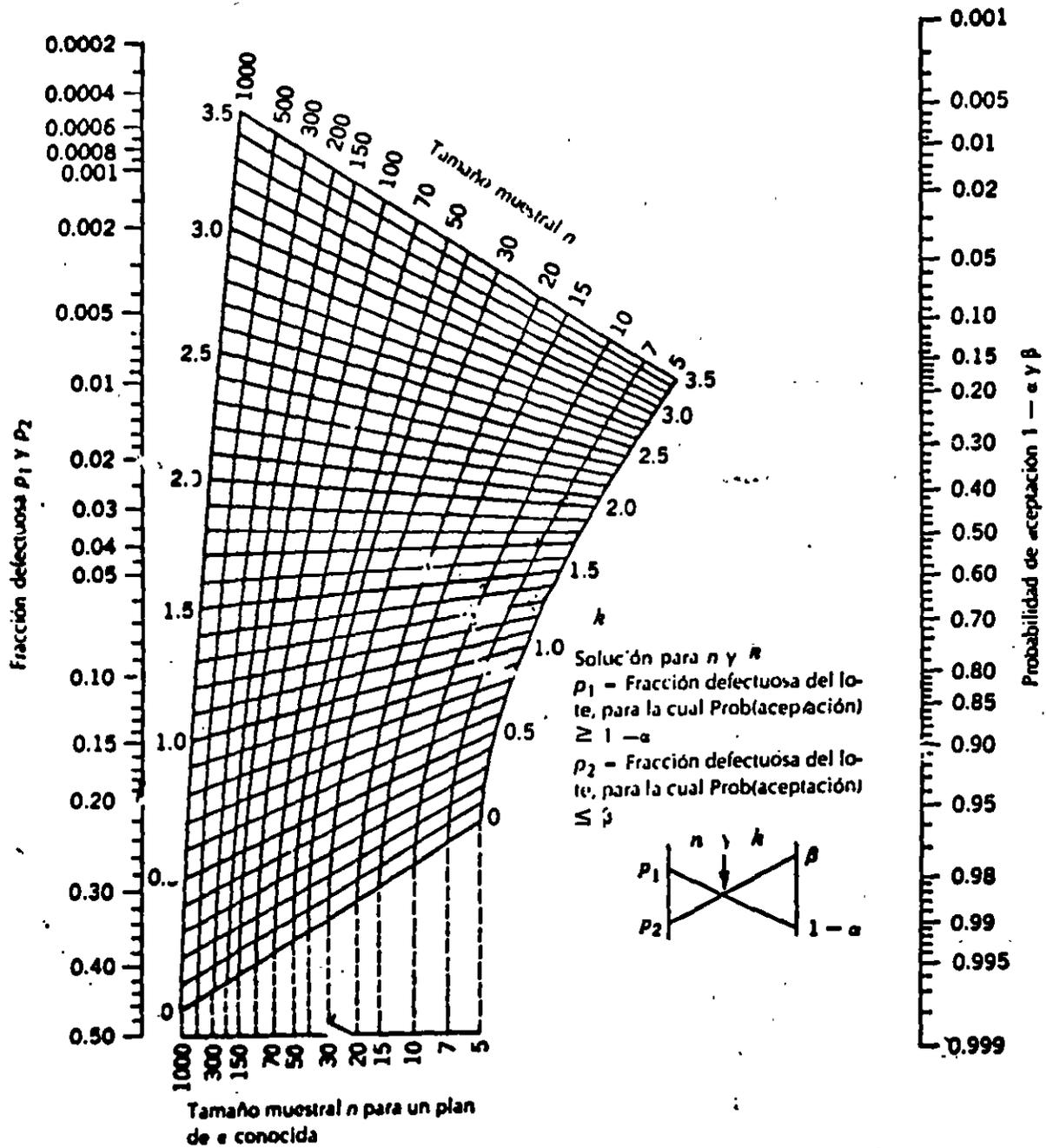


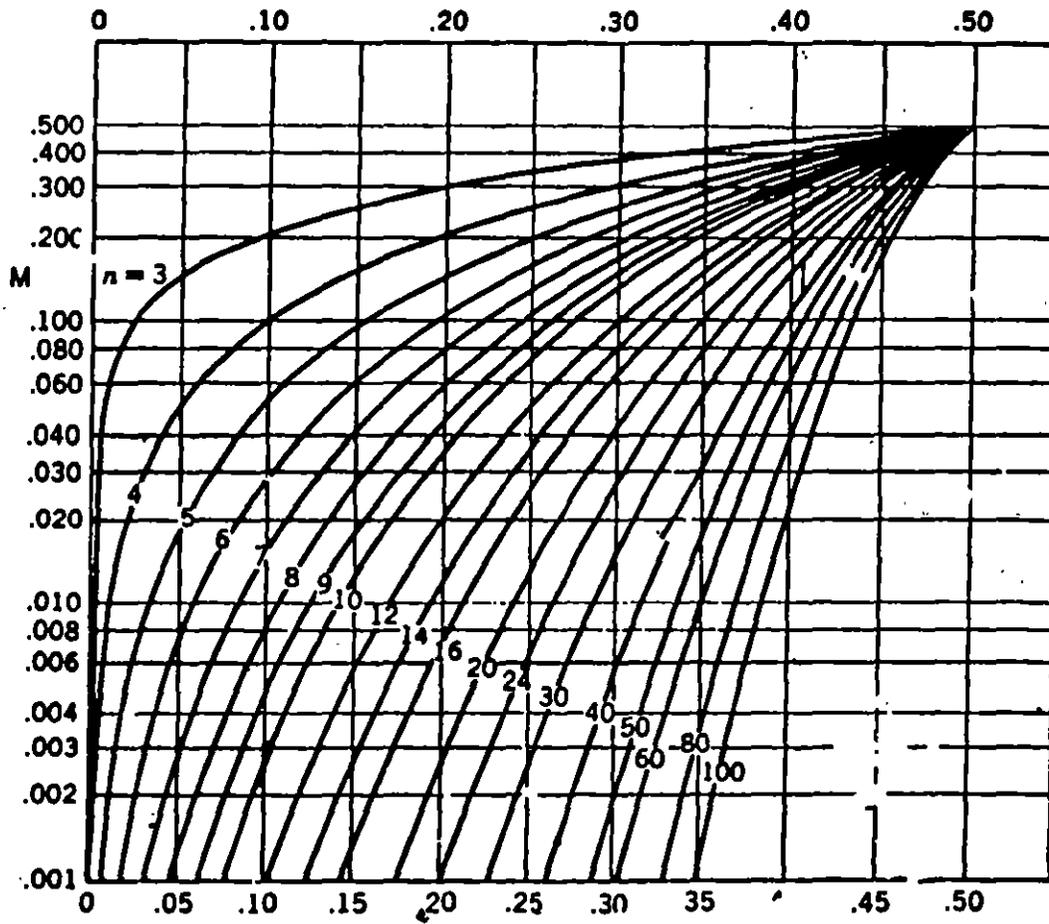
Figura 11-3. Nomograma para diseñar planes de muestreo por variables.

muestreo se catalogan por AQL, nivel de inspección y tamaño de lote. La definición del AQL es diferente de aquella encontrada en la MIL-STD-105D. En MIL-STD-414 el nivel de calidad aceptable, AQL, se define como valor nominal expresado en términos de porcentaje defectuoso especificado para una sola característica de calidad. Se indican tamaños de muestra por letras de código B a Q. La letra de código del tamaño muestral depende del nivel de inspección y del tamaño del lote. Existen cinco niveles de inspección: I, II, III, IV y V. A menos que se especifique lo contrario, se inicia con el nivel IV. Todos los planes y procedimientos de muestreo en la norma, suponen que la característica de calidad de interés tiene distribución normal.

En la figura anexa se presenta la organización de la norma. Cuando se desconoce la variabilidad del lote o del proceso se podrán usar la desviación estándar o la amplitud de la muestra para el plan de muestreo. El método de la amplitud necesita un tamaño muestral más grande y por lo general no se recomienda su uso.

Pasos a seguir para emplear la MIL-STD-414 (Procedimiento 2, Método de M)

1. Con el tamaño del lote y el nivel de inspección seleccionado consultar la tabla 4.0 (tabla A-2 de MIL-STD-414) y determinar la letra de código del tamaño muestral.
2. Con la letra de código del tamaño muestral, remitirse a la tabla 4.1 (tabla B-3 de la MIL-STD-414), obtener el tamaño muestral del lote a inspeccionar y seleccionar aleatoriamente las unidades muestrales.
3. Intersecar el valor del tamaño muestral con el valor de AQL para obtener el porcentaje máximo defectuoso permisible (M).
4. Medir la característica considerada en el estudio, para las unidades muestrales seleccionadas.
5. Calcular la media y la desviación estándar de las mediciones obtenidas.



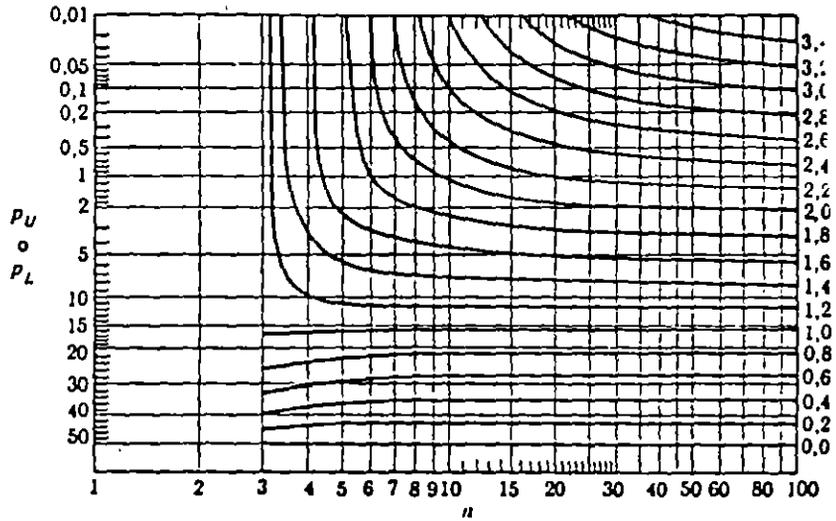
Para planes de la desviación estándar, tómese la $h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n}{n-1}}$.

Figura 11-4. Gráfica para determinar la máxima f_a con defectuosa aceptable M . (De A. J. Duncan, *Quality Control and Industrial Statistics*, 4a. ed., Richard D. Irwin, Inc.: Homewood, Ill., 1974. Con permiso del editor.)

(Tabla A-2 de MIL-STD-414)

Tamaño de lote	Niveles de inspección				
	I	II	III	IV	V
3 a 8	B	B	B	B	C
9 a 15	B	B	B	B	D
16 a 25	B	B	B	C	E
26 a 40	B	B	B	D	F
41 a 65	B	B	C	E	G
66 a 110	B	B	D	F	H
111 a 180	B	C	E	G	I
181 a 300	B	D	F	H	J
301 a 500	C	E	G	I	K
501 a 800	D	F	H	J	L
801 a 1.300	E	G	I	K	L
1.301 a 3.200	F	H	J	L	M
3.201 a 8.000	G	I	L	M	N
8.001 a 22.000	H	J	M	N	O
22.001 a 110.000	I	K	N	O	P
110.001 a 550.000	I	K	O	P	Q
550.001 y mayor	I	K	P	Q	Q

Tabla 4.2 Estimado del porcentaje defectuoso en el lote



Gráfica para estimar el porcentaje defectuoso en el lote, usando estimadores basados en la desviación estándar muestral. (Reproducido con permiso de A. Duncan Quality Control and Industrial Statistics, edición revisada, Richard D. Irwin, Inc., Homewood, Ill., pág. 220.)

Tabla 4.1 tabla maestra para inspección normal y ajustada basados en el método de desviación estándar de variabilidad desconocida.

Letra de código del tamaño muestral	Tamaño muestral	Niveles de calidad aceptable (inspección normal)													
		0,04	0,065	0,10	0,15	0,25	0,40	0,65	1,00	1,50	2,50	4,00	6,50	10,00	15,00
		M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
B	3														
C	4								1,53	5,50	10,92	16,45	22,86	29,45	36,90
D	5														
E	7								1,33	3,32	5,83	9,80	14,39	20,19	26,56
F	10				0,349	0,716	1,30	2,17	3,26	4,77	7,29	10,54	15,17	20,74	27,57
G	15	0,099	0,186	0,312	0,503	0,818	1,31	2,11	3,05	4,31	6,56	9,46	13,71	18,94	25,61
H	20	0,135	0,228	0,365	0,544	0,846	1,29	2,05	2,95	4,09	6,17	8,92	12,99	18,03	24,53
I	25	0,155	0,250	0,380	0,551	0,877	1,29	2,00	2,86	3,97	5,97	8,63	12,57	17,51	23,97
J	30	0,179	0,280	0,413	0,581	0,879	1,29	1,98	2,83	3,91	5,86	8,47	12,36	17,24	23,58
K	38	0,170	0,264	0,388	0,535	0,847	1,23	1,87	2,68	3,70	5,57	8,10	11,87	16,65	22,91
L	40	0,178	0,275	0,401	0,566	0,873	1,26	1,88	2,71	3,72	5,58	8,09	11,85	16,61	22,86
M	50	0,183	0,250	0,363	0,503	0,789	1,17	1,71	2,49	3,45	5,20	7,61	11,23	15,87	22,00
N	75	0,147	0,228	0,330	0,467	0,720	1,07	1,60	2,29	3,20	4,87	7,15	10,63	15,13	21,11
O	100	0,145	0,220	0,317	0,447	0,689	1,02	1,53	2,20	3,07	4,69	6,91	10,32	14,75	20,66
P	150	0,134	0,203	0,293	0,413	0,636	0,949	1,43	2,05	2,89	4,43	6,57	9,88	14,20	20,02
Q	200	0,135	0,204	0,294	0,414	0,637	0,945	1,42	2,04	2,87	4,40	6,53	9,81	14,12	19,92
		0,065	0,10	0,15	0,25	0,40	0,65	1,00	1,50	2,50	4,00	6,50	10,00	15,00	
Niveles de calidad aceptable (inspección ajustada)															

Todos los valores de AQL están en porcentaje defectuoso. Use el primer plan de muestreo por debajo de la flecha, es decir, tanto el tamaño muestral como el valor k. Cuando el tamaño muestral iguala o excede el tamaño del lote, hay que inspeccionar todos los artículos en el lote.

6. Proporcionar los límites de especificación superior LSE e inferior LIE.

7. Calcular el índice de calidad superior q_u :

$$q_u = (LSE - MEDIA) / DESV. STD:$$

8. Calcular el índice de calidad inferior q_l

$$q_l = (MEDIA - LIE) / DESV. STD.$$

9. Calcular el % estimado de defectuosos del lote por encima del LSE (p_u). Con el valor de q_u y n remitirse a la tabla 4.2 para obtener el valor de p_u .

10. Calcular el % estimado de defectuosos del lote por debajo del LIE (p_l). Con el valor de q_l y n remitirse a la tabla 4.2 para obtener el valor de p_l .

11. Calcular el total estimado de porcentaje defectuoso en el lote $p = p_u + p_l$

12. Criterio de aceptación: compare p con M . Si $p > M$ rechazar el lote. Si $p < M$ aceptar el lote.

HABILIDAD DE PROCESO

Se define el análisis de la capacidad de un proceso como un estudio de ingeniería orientado a estimar la aptitud del proceso. El análisis de la capacidad de proceso es parte decisiva de un programa general de mejoramiento de la calidad. Entre los usos más importantes de los datos de un análisis de aptitud de proceso pueden mencionarse los siguientes:

- a) Predecir que tan bien cumple el proceso las tolerancias.
- b) Ayudar a los diseñadores o realizadores del producto o servicio a seleccionar o modificar un proceso.

Cp : UNA MEDIDA DE LA VARIACION DE UN PROCESO

- 81 -

$$Cp = \frac{\text{Intervalo de especificación}}{\text{Intervalo de proceso}}$$

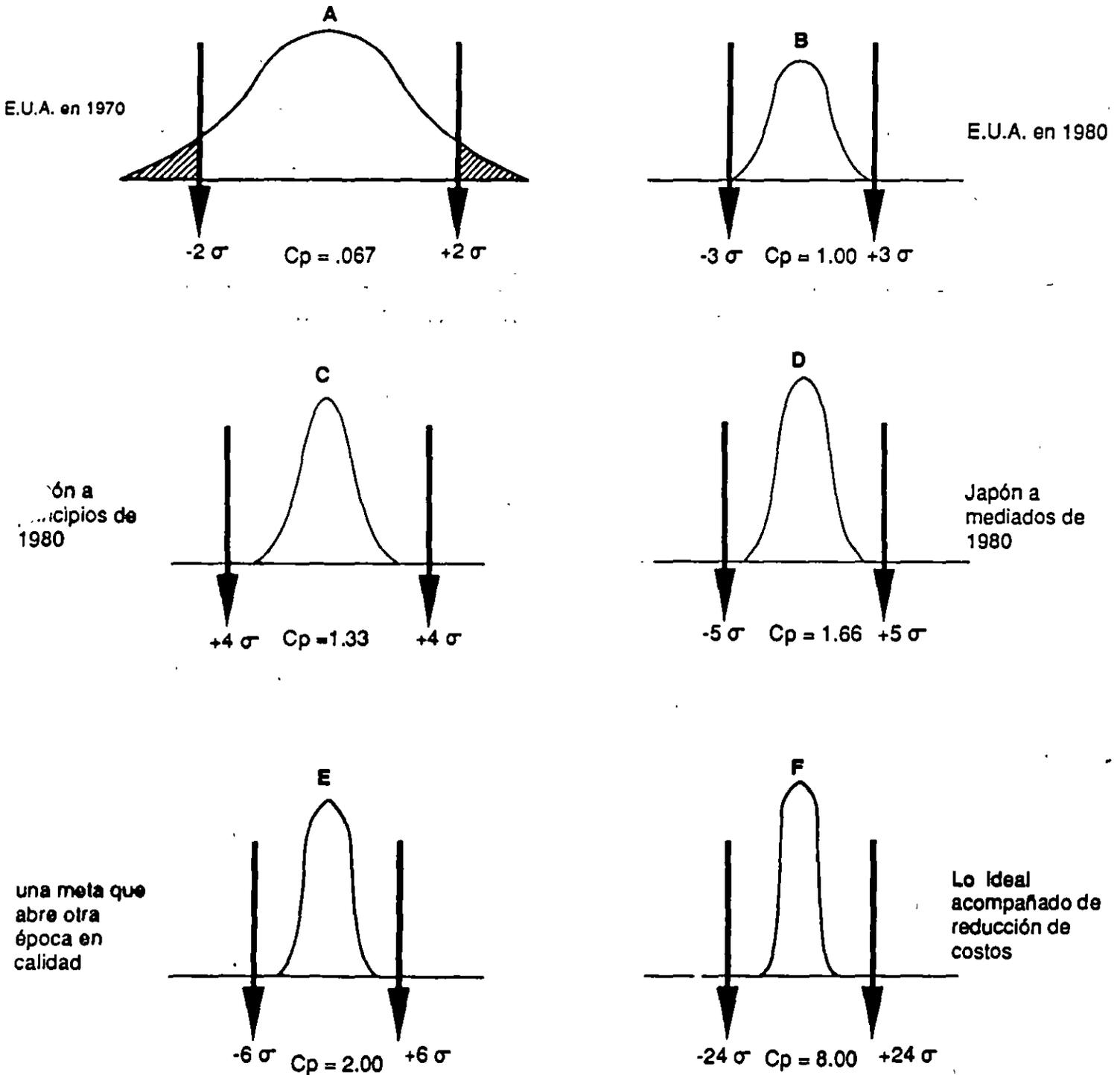


FIGURA 4

Octavio Estrada Castillo. Noviembre, 1996

Curso de Análisis y Control de Calidad

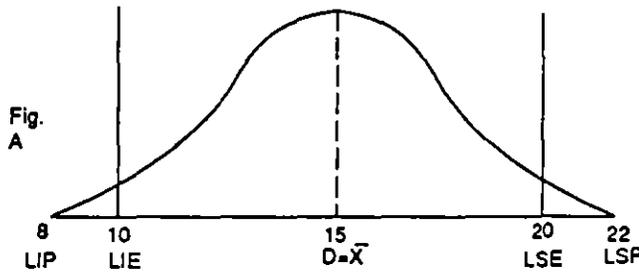
Cpk : Una medida de la habilidad de un proceso

$$Cpk = (1 - k) Cp$$

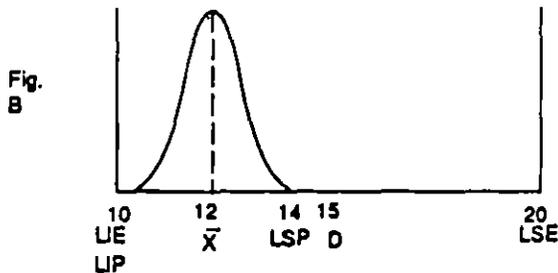
$$Cp = \frac{LSE - LIE}{LSP - LIP}$$

$$K = \text{mínimo} \left\{ \frac{D - \bar{X}}{\frac{S}{2}} \quad \delta \quad \frac{\bar{X} - D}{\frac{S}{2}} \right\}$$

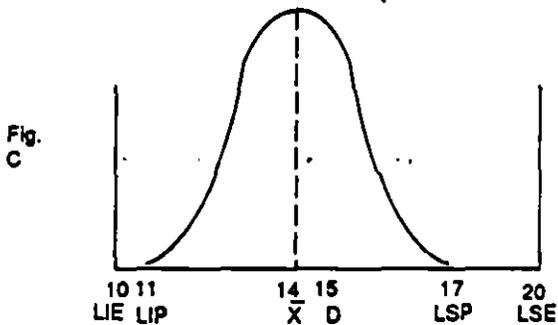
D es el centro de especificación



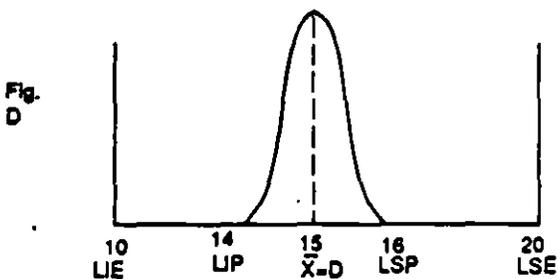
$Cp = Cpk = 0.071$
Habilidad de proceso típica a comienzos de 1980's.



$Cp = 2.5$; $Cpk = 1.0$
Poca variación pero \bar{X} esta muy alejado de D.



$Cp = 1.67$; $Cpk = 1.33$
El proceso es aceptable



$Cp = Cpk = 5$
Proceso Ideal

Parámetros críticos : Mínimo $Cpk = 1.33$
Deseable $Cpk = 2.00$
Ideal $Cpk \geq 5.00$

- c) Ayudar a establecer un vínculo entre muestreo y controles de proceso.
- d) Especificar los requisitos para el funcionamiento de nuevos equipos.
- e) Elegir entre diferentes proveedores.
- f) Planear la sucesión de procesos de producción cuando existe un efecto interactivo de los procesos sobre las tolerancias.
- g) Reducir la variabilidad en un proceso de manufactura.

Existen tres métodos fundamentales que se utilizan en el análisis de la capacidad de proceso: los histogramas, los diagramas de control y el diseño de experimentos.

El término Habilidad de Proceso se refiere a la habilidad natural o inherente de un proceso para producir partes sobre un periodo de tiempo, cuando éste está trabajando "bajo control", es decir, cuando dicho proceso está operando en una forma estable y predecible, donde únicamente aparecen causas comunes de variación. Se supondrá que el modelo matemático que representa la variación en el proceso está dado por una distribución normal, donde la variación del proceso está dada por seis veces la desviación estándar de dicha distribución, es decir, Variación de Proceso = 6σ , esto implica que el proceso está variando en un intervalo $\mu - 3\sigma \leq x \leq \mu + 3\sigma$, donde x es la característica de control del proceso; en estos casos, cuando la variación del proceso es menor que la variación permitida por las especificaciones, se dice que el proceso está bajo control. Si la variación inherente de dicho proceso cae dentro de las especificaciones establecidas, se puede concluir que el proceso es "capaz" de producir partes repetidamente de acuerdo a dichas especificaciones. No todos los procesos operando bajo control son capaces de producir partes dentro de especificaciones. Existen cuatro posibles resultados:

1. El proceso puede estar operando bajo control y también ser capaz de producir partes dentro de especificación.

2. El proceso puede estar operando bajo control, pero no ser capaz de producir partes dentro de especificación.
3. El proceso puede estar operando fuera de control pero estar produciendo partes de acuerdo a la especificación.
4. El proceso puede estar fuera de control y produciendo partes fuera de especificación.

El índice utilizado para medir la capacidad de proceso, C_p , recibe precisamente este nombre, y se define como:

$$C_p = \text{Variación Especificada} / \text{Variación de Proceso} = (LSE - LIE) / 6\sigma$$

En donde LSE es el límite superior de especificación y LIE es el límite inferior de especificación. Como ya se mencionó antes, un proceso puede ser capaz pero no estar bajo control, por ello se define un índice más potente que el anterior, el cual permite determinar si el proceso es capaz y está bajo control; dicho índice recibe el nombre de capacidad de proceso con respecto a la media de proceso, C_{p_k} , y se define como

$$C_{p_k} = \text{El mínimo valor de } \{(LSE - \text{Media}) / 3\sigma \text{ ó } (\text{Media} - LIE) / 3\sigma\}$$

Si el valor del C_{p_k} es usado, se dice que el proceso es capaz cuando $C_{p_k} \geq 1.33$ o mayor, esto implica que la variación del proceso representa, cuando más, las 3/4 partes de la variación especificada.

DIAGRAMAS DE CONTROL DE SHEWHART

Un diagrama de control es un tipo de gráfico de líneas que es ampliamente usado en el medio ambiente de manufactura. Dicho gráfico indica el tipo de variación que aparece en el proceso. Mientras un histograma muestra la distribución de frecuencias en un punto del tiempo, un diagrama de control muestra los cambios en la distribución a lo largo del tiempo. Visualmente ilustra si un proceso está bajo control o no. Un diagrama de control es como una autopista, la cual presenta una línea central y dos

líneas límite a los lados. Se considera que la característica que se mide está bajo control estadístico en la medida en que sus valores caen entre los límites de control. Las variaciones que presenta esta característica con respecto a la línea central se deben básicamente a las causas comunes de variación. Cuando un proceso empieza a presentar causas asignables de variación entonces la característica que se está analizando tiende a salirse de los límites de control estadístico.

Un diagrama de control se usa para:

- Determinar si la variación en un proceso es resultado de causas comunes o de causas especiales.
- Identificar y analizar problemas y verificar las soluciones implantadas.
- Verificar la tendencia en el comportamiento del proceso a lo largo del tiempo.

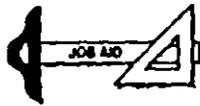
Tal como se mostró en la figura 5, existen dos tipos de diagramas de control, por atributos o por variables. En el manejo de gráficas por variables, la característica a seleccionar deberá ser aquella que permita ser expresada en números, tal como una dimensión, peso, resistencia, etcétera. En atributos la elección de la característica no requiere ser medible, un foco enciende o no, etcétera. En cualquiera de los casos un candidato inmediato será aquella característica de calidad que es objeto de rechazo o retrabajo, lo que implica un aumento en los costos de operación. Por lo tanto, la base real de la selección de la característica de control es buscar la posibilidad real de reducir o impedir erogar dicho costo, a través del uso de la gráfica de control entre otras herramientas estadísticas.

Si los valores medibles de la característica de un producto, indicada por x , se distribuyen normalmente con una media μ y desviación estándar σ , la probabilidad de que x se encuentre dentro del intervalo $[\mu-3\sigma, \mu+3\sigma]$ es 0.9973. Esto implica que tan sólo un promedio de 27 puntos de 10000 caerán fuera del intervalo anterior debido a causas comunes de variación. Si en vez de trazar valores individuales, se obtienen muestras periódicas de tamaño n y se trazan sus medias, entonces se espera que 27 de 10000 de

estas medias caigan fuera del intervalo $[\bar{\chi} - 3\sigma/\sqrt{n}, \bar{\chi} + 3\sigma/\sqrt{n}]$ debido a causas comunes de variación, de acuerdo al Teorema del Límite Central. En este intervalo $\bar{\chi}$ es la media de las medias, $\bar{\chi} = (\chi_1 + \chi_2 + \chi_3 + \dots + \chi_k) / k$ y σ/\sqrt{n} la desviación estándar de las medias, donde σ es la desviación estándar de la población. A la gráfica formada por los límites del intervalo anterior y la línea central dada por $\bar{\chi}$, se le conoce como Gráfica de Control para $\bar{\chi}$. De la misma forma existen muchas gráficas de control, dependiendo de la característica a controlar, del proceso, de las condiciones de operación, del equipo de cómputo existente y sobre todo, del nivel de preparación de la gente. En la tabla anexa se ilustran los tipos de gráficas de control, su descripción y las fórmulas para el cálculo del centro y de los límites de control estadístico. Los parámetros A_2 , B_3 , B_4 , D_3 y D_4 , que aparecen en esta tabla, son valores que dependen del tamaño de los subgrupos y se determinan a través de las tablas correspondientes.

A continuación se mostrarán ejemplos de gráficas de control. La más comúnmente usada es la gráfica $\bar{\chi}$; los pasos que se siguen para graficarla se describirán enseguida. Se considera que ya se conoce el Plan de Muestreo que se va a aplicar, el tipo de datos que se van a recopilar. Asimismo ya se tiene diseñada la hoja de verificación que se requiere para recolectar los datos y el tipo de diagrama de control que se aplicará. Después de vaciar todos estos datos en la hoja de verificación se llevan a efecto los siguientes pasos:

1. En cada columna de datos, que representa un subgrupo muestreado de tamaño n , se calcula la suma de éstos, su media y su rango.
2. Se calcula la media de las medias y el promedio de los rangos de los subgrupos muestreados.
3. De las tablas correspondientes se determina el valor de los coeficientes A_2 , D_3 y D_4 para un tamaño de subgrupo dado.
4. Se calculan los límites de control para la media. En este caso, $LIC = \bar{\chi} - A_2\bar{R}$ y $LSC = \bar{\chi} + A_2\bar{R}$.



CONSTRUCTING CONTROL CHARTS - Formulae

CENTER LINE FORMULAS

CHART	FORMULA	PLAIN ENGLISH
\bar{X}	$\frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \dots + \bar{X}_k}{k}$	$\frac{\text{total of subgroup averages}}{\text{total number of samples}}$
R	$\frac{R_1 + R_2 + \dots + R_k}{k}$	$\frac{\text{total of ranges}}{\text{number of ranges}}$
MR	$\frac{MR_1 + MR_2 + \dots + MR_k}{k}$	$\frac{\text{total of moving ranges}}{\text{number of moving ranges}}$
p	$\frac{\sum d}{\sum n}$	$\frac{\text{total number of defectives}}{\text{total number inspected}}$
np	$\frac{\sum d}{k}$	$\frac{\text{total number of defectives}}{\text{number of samples}}$
u	$\frac{\sum c}{\sum n}$	$\frac{\text{total number of defects}}{\text{total number inspected}}$
c	$\frac{\sum c}{k}$	$\frac{\text{total number of defects}}{\text{number of samples}}$

CONTROL LIMIT LINE FORMULAS

CHART	UCL FORMULA	LCL FORMULA
\bar{X}	$\bar{X} + A_2 \bar{R}$	$\bar{X} - A_2 \bar{R}$
R	$D_4 \bar{R}$	$D_3 \bar{R}$
MR	$D_4 \overline{MR}$	$D_3 \overline{MR}$
p	$\bar{p} + 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$	$\bar{p} - 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$
np	$n\bar{p} + 3 \sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$	$n\bar{p} - 3 \sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$
u	$\bar{u} + 3 \sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$	$\bar{u} - 3 \sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$
c	$\bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}$	$\bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}$

* use E_2 value for \bar{X} when working with MR charts

TABLE VALUES

sample size	\bar{X} factor	R factors		MR factor
		D_3	D_4	
n	A_2			E_2
2	1.880		3.268	2.660
3	1.023	values do not apply when n is less than 7	2.574	1.772
4	0.729		2.282	1.457
5	0.577		2.115	1.290
6	0.483		2.004	1.184
7	0.419	0.076	1.924	1.109



- Be sure to select the appropriate type of control chart for the right type of data.
- Center lines and the upper/lower control limit lines **MUST** be statistically calculated.
- Plot data in the same sequence as it is collected, otherwise it is meaningless.

Tabla VI Factores para construir diagramas de control de variables

Observaciones en la muestra, n	Diagrama para medias			Diagrama para desviaciones estándares						Diagrama para amplitudes						
	Factores para límites de control			Factores para línea central		Factores para límites de control				Factores para línea central		Factores para límites de control				
	A	A ₂	A ₃	c ₄	1/c ₄	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	d ₂	1/d ₂	d ₃	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
2	2.121	1.880	2.659	0.7979	1.2533	0	3.267	0	2.606	1.128	0.8865	0.853	0	3.686	0	3.267
3	1.732	1.023	1.954	0.8862	1.1284	0	2.568	0	2.276	1.693	0.5907	0.888	0	4.358	0	2.574
4	1.500	0.729	1.628	0.9213	1.0854	0	2.266	0	2.088	2.059	0.4857	0.880	0	4.698	0	2.282
5	1.342	0.577	1.427	0.9400	1.0638	0	2.089	0	1.964	2.326	0.4299	0.864	0	4.918	0	2.114
6	1.225	0.483	1.287	0.9515	1.0510	0.030	1.970	0.029	1.874	2.534	0.3946	0.848	0	5.078	0	2.004
7	1.134	0.419	1.182	0.9594	1.04230	0.118	1.882	0.113	1.806	2.704	0.3698	0.833	0.204	5.204	0.076	1.924
8	1.061	0.373	1.099	0.9650	1.0363	0.185	1.815	0.179	1.751	2.847	0.3512	0.820	0.388	5.306	0.136	1.864
9	1.000	0.337	1.032	0.9693	1.0317	0.239	1.761	0.232	1.707	2.970	0.3367	0.808	0.547	5.393	0.184	1.816
10	0.949	0.308	0.975	0.9727	1.0281	0.284	1.716	0.276	1.669	3.078	0.3249	0.797	0.687	5.469	0.223	1.777
11	0.905	0.285	0.927	0.9754	1.0252	0.321	1.679	0.313	1.637	3.173	0.3152	0.787	0.811	5.535	0.256	1.744
12	0.866	0.266	0.886	0.9776	1.0229	0.354	1.646	0.346	1.610	3.258	0.3069	0.778	0.922	5.594	0.283	1.717
13	0.832	0.249	0.850	0.9794	1.0210	0.382	1.618	0.374	1.585	3.336	0.2998	0.770	1.025	5.647	0.307	1.693
14	0.802	0.235	0.817	0.9810	1.0194	0.406	1.594	0.399	1.563	3.407	0.2935	0.763	1.118	5.696	0.328	1.672
15	0.775	0.223	0.789	0.9823	1.0180	0.428	1.572	0.421	1.544	3.472	0.2880	0.756	1.203	5.741	0.347	1.653
16	0.750	0.212	0.763	0.9835	1.0168	0.448	1.552	0.440	1.526	3.532	0.2831	0.750	1.282	5.782	0.363	1.637
17	0.728	0.203	0.739	0.9845	1.0157	0.466	1.534	0.458	1.511	3.588	0.2787	0.744	1.356	5.820	0.378	1.622
18	0.707	0.194	0.718	0.9854	1.0148	0.482	1.518	0.475	1.496	3.640	0.2747	0.739	1.424	5.856	0.391	1.608
19	0.688	0.187	0.698	0.9862	1.0140	0.497	1.503	0.490	1.483	3.689	0.2711	0.734	1.487	5.891	0.403	1.597
20	0.671	0.180	0.680	0.9869	1.0133	0.510	1.490	0.504	1.470	3.735	0.2677	0.729	1.549	5.921	0.415	1.585
21	0.655	0.173	0.663	0.9876	1.0126	0.523	1.477	0.516	1.459	3.778	0.2647	0.724	1.605	5.951	0.425	1.575
22	0.640	0.167	0.647	0.9882	1.0119	0.534	1.466	0.528	1.448	3.819	0.2618	0.720	1.659	5.979	0.434	1.566
23	0.626	0.162	0.633	0.9887	1.0114	0.545	1.455	0.539	1.438	3.858	0.2592	0.716	1.710	6.006	0.443	1.557
24	0.612	0.157	0.619	0.9892	1.0109	0.555	1.445	0.549	1.429	3.895	0.2567	0.712	1.759	6.031	0.451	1.548
25	0.600	0.153	0.606	0.9896	1.0105	0.565	1.435	0.559	1.420	3.931	0.2544	0.708	1.806	6.056	0.459	1.541

Para $n > 25$

$$A = \frac{3}{\sqrt{n}}, A_2 = \frac{3}{c_4 \sqrt{n}}, c_4 = \frac{4(n-1)}{4n-3}$$

$$B_3 = 1 - \frac{3}{c_4 \sqrt{2(n-1)}}, B_4 = 1 + \frac{3}{c_4 \sqrt{2(n-1)}}$$

$$B_5 = c_4 - \frac{3}{\sqrt{2(n-1)}}, B_6 = c_4 + \frac{3}{\sqrt{2(n-1)}}$$

5. Se calculan los límites de control para el rango.
6. Se trazan las líneas centrales para la media y para el rango, según la escala que se adopte.
7. Se trazan los límites de control para la media y para el rango, según la escala que se adopte.
8. Se trazan las medias y los rangos de cada subgrupo muestreado.
9. Se interpretan los resultados.

A continuación se describen algunas interpretaciones de los patrones de variación más frecuentes para las gráficas \bar{x} R

Un proceso está bajo control si todos los puntos de la gráfica caen dentro de los límites de control y los grupos de puntos no muestran una forma predecible en particular, es decir, se distribuyen aleatoriamente dentro de dichos límites de control. Por el contrario, un proceso está fuera de control si algún o algunos de los puntos de la gráfica caen fuera de los límites de control o los grupos de puntos muestran un modelo predecible en particular. Cuando los puntos caen fuera de los límites de control el proceso debe detenerse para investigar las causas que provocan este comportamiento; en este caso la situación es clara; cuando los puntos muestran un comportamiento predecible se tiene que analizar con más detenimiento.

- A. Ciclos Repetitivos o Periodicidad. Cuando los puntos muestran la misma forma de cambio arriba y abajo de la línea central, en iguales períodos de tiempo, el modelo ya no se está comportando aleatoriamente y el proceso debe detenerse. Esto puede deberse a alguno(s) de los siguientes factores:
1. Temperatura u otros cambios que provoca el medio ambiente.
 2. Fátiga del Trabajador
 3. Diferencias en el instrumento o en la prueba que se emplea.

4. Rotación continua de máquinas u operadores.
 5. Ensamble de piezas de otros procesos.
 6. Herramientas desgastadas.
- B. Tendencias. Cuando un grupo de puntos sucesivos presenta un comportamiento de subida o de bajada se dice que existe una tendencia. Si siete o más puntos presentan una tendencia hacia arriba o hacia abajo el proceso debe detenerse para investigar la causa de este comportamiento. Esto puede deberse a alguno(s) de los siguientes factores:
1. Deterioro gradual de equipos o productos.
 2. Fatiga del trabajador.
 3. Pérdida de la habilidad por parte del operario.
 4. Cambio gradual de la calidad del producto.
- C. Corridas. Cuando un grupo de puntos tiende a alinearse de un sólo lado de la línea central a esto se le llama una corrida. El número de puntos de la corrida recibe el nombre de longitud de la corrida. Si la longitud de la corrida es siete o mayor se debe investigar la causa de este comportamiento, el cual sugiere un cambio o reajuste de los límites de control, que deben ser recalculados.
- D. Acercamiento a las líneas de control. Cuando los puntos en la gráfica de control están muy próximos a la línea central o a los límites de control, se dice que existe acercamiento a la línea de control. En este caso un tipo diferente de datos han sido mezclados en los subgrupos y se requiere cambiar la subagrupación y redibujar el diagrama de control. Para evaluar si existe acercamiento a la línea central, se requiere dibujar dos líneas en el diagrama de control, una de ellas entre la línea central y el límite superior de control y la otra entre la

línea central y el límite inferior de control; si la mayoría de los puntos caen entre estas dos líneas, existe una anomalía. El acercamiento a los límites de control puede deberse a alguno(s) de los siguientes factores:

1. Sobrecontrol
2. Diferencias sustanciales en la calidad del material.
3. Diferencias sustanciales en los métodos de prueba y/o equipos.
4. Control de dos o más procesos en la misma carta.
5. Mezcla de materiales de distinta fuente
6. Distintos trabajadores empleando un mismo diagrama.
7. Datos del proceso tomados bajo diferentes condiciones en el mismo diagrama.

E: Saltos en el Proceso. Si el proceso presenta irregularidades fuertes entre grupos de datos (saltos), de la misma forma que el inciso anterior puede deberse a que se mezclaron tipos de datos diferentes y debe detenerse para investigar la causa de estas variaciones anormales.

A continuación se presenta una prueba para detectar modelos de comportamientos no aleatorios de características críticas de procesos en un diagrama de control \bar{x} -R. Esta prueba parte de dividir la banda situada entre los límites de control estadístico en seis partes, tres arriba de la línea central y las otras tres por abajo de dicha línea. En la figura anexa se ilustran dichas zonas. Asimismo, se indican los criterios a seguir para parar el proceso o investigar las causas del comportamiento no aleatorio del proceso.

CONTROL CHART ACTIVITY, cont'd

Tests for Nonrandom Patterns

	One point above UCL	
	-----	UCL
"A" zone $+3 \sigma_{\bar{x}}$	Two out of three successive points here or above	
"B" zone $+2 \sigma_{\bar{x}}$	Four out of five successive points here or above	
"C" zone $+1 \sigma_{\bar{x}}$	Seven out of eight successive points here or above	
	-----	Central Line ($\bar{\bar{X}}$)
"C" zone $-1 \sigma_{\bar{x}}$	Seven out of eight successive points here or below	
"B" zone $-2 \sigma_{\bar{x}}$	Four out of five successive points here or below	
"A" zone $-3 \sigma_{\bar{x}}$	Two out of three successive points here or below	
	-----	LCL
	One point below LCL	

Any 7 successive points which trend up or down (regardless of what zone they start in)

DIAGRAMAS DE PRECONTROL

Otro tipo diferente de gráficas denominadas Gráficas de Precontrol presentan ventajas sobre las gráficas de control de Shewhart y por lo mismo serán analizadas a continuación.

Los diagramas de control convencionales determinan los límites de control a partir de la variación observada del proceso exclusivamente, sin tomar en cuenta los límites de control especificados en los documentos de diseño y/o de proceso. Cuando estos diagramas son usados para propósitos de controlar el proceso, el marcar los límites especificados en estos diagramas, no es lo más adecuado, ya que los límites de control estadístico se calculan a partir de los promedios de los subgrupos muestreados, los cuales, lógicamente presentan menos variación que las mediciones individuales. Por ello no pueden compararse los límites de control con los límites especificados. Por la misma razón, para analizar la aptitud de un proceso a lo largo del tiempo, se requerirá además de un diagrama de control que mide la variabilidad de un proceso, estimar la capacidad de éste, comparándolo con las especificaciones, es decir, calcular el C_p . Por otra parte, para graficar un diagrama de control convencional \bar{x} R , se requieren de 20 a 25 subgrupos de tamaño 4 ó 5, calcular los límites de control, vaciar los datos e interpretar la gráfica.

Un diagrama de Precontrol, también denominado Gráfico Arcoiris, es un tipo de gráfica de control usado para medir la aptitud de un proceso sin necesidad de calcular límites de control y permitiendo al mismo tiempo comparar contra las especificaciones. Su diseño y aplicación es mucho más sencillo que los diagramas de control convencionales y no se requiere interpretarlos debido a su sencillez y analogía con un semáforo. Fueron inventados por un matemático norteamericano, Frank Satherwaite, hace más de 30 años. Estos diagramas, igual que los de control convencionales de Shewhart, están basados en que la distribución de la característica de interés de la población de unidades de un proceso en línea, se distribuye normalmente.

Para graficar y usar un Diagrama de Precontrol se aplican los siguientes pasos:

1. Determinar el intervalo de especificación de la característica de interés del proceso que se pretende controlar y dividirlo entre cuatro. Los puntos que dividen a este intervalo en cuatro partes formarán los límites del diagrama de precontrol como se muestra en la figura 53. Los límites de las dos porciones centrales serán las líneas de precontrol; éstas dos porciones centrales estarán iluminadas en color verde. Las porciones laterales que se encuentran entre las líneas de precontrol y los límites especificados estarán iluminadas de color amarillo. Las zonas que se encuentren externamente a los límites de especificación estarán iluminadas de color rojo.
2. Para arrancar el proceso, cinco mediciones de la característica de interés, consecutivas, al ser marcadas en la gráfica, deben caer en zona verde. Si no ocurre esto, el proceso debe ser revisado y ajustado hasta que ocurra lo dicho anteriormente.
3. Durante el proceso, se obtienen dos mediciones consecutivas periódicamente, si las dos mediciones al ser marcadas en la gráfica:
 - a) Caen en zona verde, el proceso está trabajando satisfactoriamente.
 - b) Una cae en zona verde y la otra en zona amarilla, alerta, el proceso puede empezar a salirse de control.
 - c) Si las dos mediciones caen en zona amarilla o una de las mediciones cae en zona roja, pare, el proceso se ha salido de control. En los casos en que el proceso deba detenerse, para reiniciarlo, cinco mediciones consecutivas al ser marcadas en la gráfica deben caer en zona verde. La frecuencia de muestreo entre cada grupo de dos mediciones será estimada, dividiendo el intervalo de tiempo entre dos paros o cambios de turno entre seis.

REGLAS SIMPLE DEL PRECONTROL

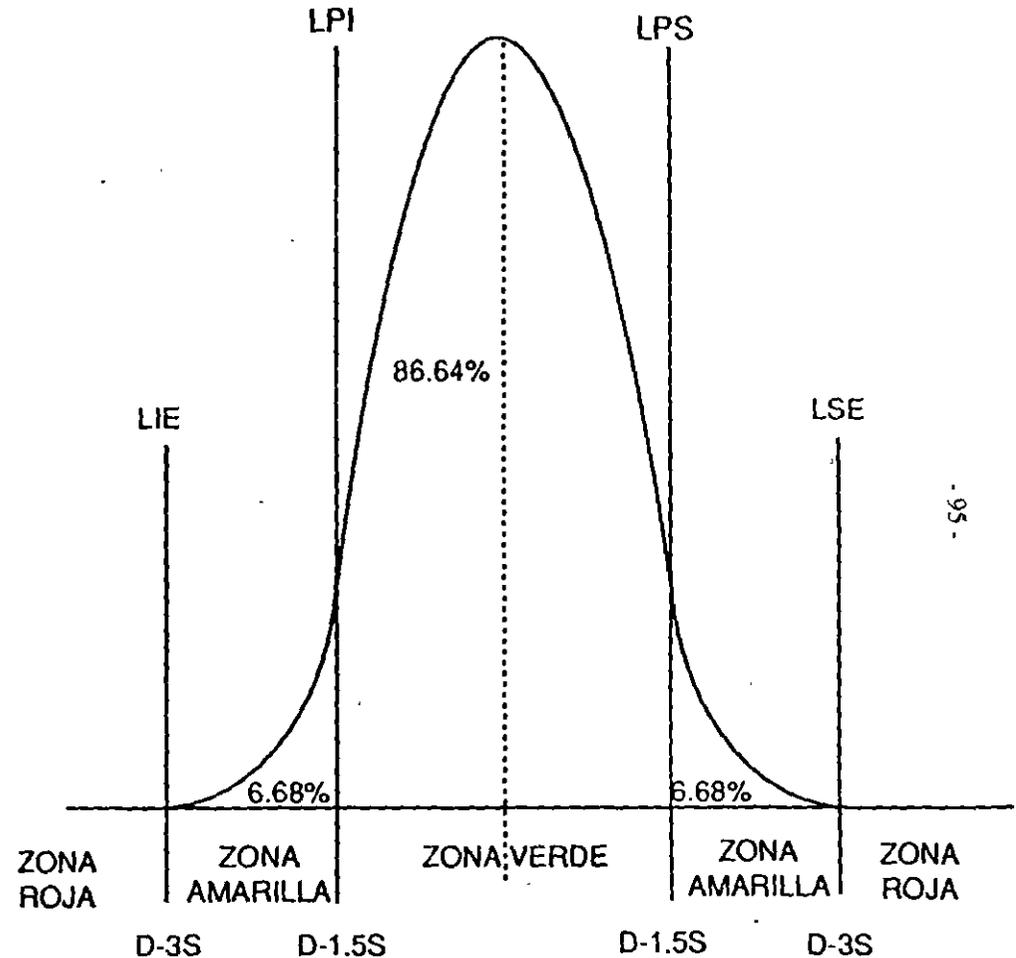
Octavio Estrada Castillo, Noviembre, 1996

- 1.- DIVIDA EL INTERVALO DE ESPECIFICACION ENTRE CUATRO. LOS LIMITES DE LAS DOS PORCIONES CENTRALES SERAN LAS LINEAS DE PRECONTROL.
- 2.- PARA DETERMINAR LA HABILIDAD DE PROCESO CINCO UNIDADES CONSECUTIVAS DEBEN CAER DENTRO DE LA ZONA VERDE. SI NO, USE LAS HERRAMIENTAS DE DIAGNÓSTICO PARA REDUCIR LA VARIACIÓN.
- 3.- EN PRODUCCIÓN, OBTENGASE MUESTRAS DE DOS UNIDADES CONSECUTIVAS PERIODICAMENTE.

CONDICION	ACCION
1.- DOS UNIDADES EN ZONA VERDE.	CONTINUE
2.- UNA UNIDAD EN ZONA VERDE Y LA OTRA EN LA ZONA AMARILLA.	CONTINUE
3.- DOS UNIDADES EN ZONA AMARILLA.	CONTINUE
4.- UNA UNIDAD EN ZONA ROJA	CONTINUE

Curso de Analisis y Control de Calidad

- * PARA REASUMIR LA PRODUCCIÓN CINCO UNIDADES CONSECUTIVAS DEBEN CAER EN ZONA VERDE.
- 4.- FRECUENCIA DE MUESTREO. DIVIDA EL INTERVALO DE TIEMPO ENTRE DOS INTERRUPTIONES ENTRE SEIS.



CARTAS DE CONTROL VS. CARTAS DE PRECONTROL

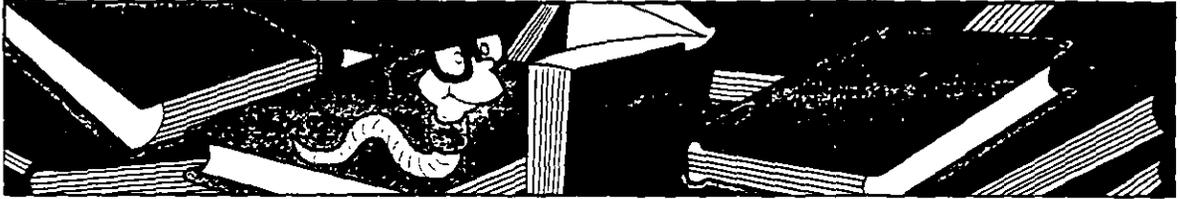
CARACTERISTICA	CARTAS DE CONTROL	CARTAS DE PRECONTROL
DISEÑO	Para diseñarla se requieren de 20 a 25 muestreos. Cada muestreo de tamaño 4 ó 5. Después de estos muestreos se calcula la \bar{X} , \bar{R} , L_{ic} y L_{sc} . Esto implica la medición de 80 a 150 unidades, el cálculo de las medias y rangos de cada muestra y con éstos el cálculo de los límites de control.	Para diseñarlas sólo se requieren conocer las especificaciones, dividir el intervalo de especificación entre cuatro y los límites de precontrol, L_{IA} y L_{SA} , serán los que delimitan a las dos porciones centrales.
DISTRIBUCION DE LA POBLACION	• Lo más cercana a una distribución normal	• Lo más cercana a una distribución normal.
USO	• Mantener bajo control la variabilidad del proceso. • Para analizar la habilidad del proceso se requiere calcular C_{pk} .	• Mantener bajo control la habilidad del proceso. • No requiere calcular C_{pk} ya que siempre que cinco muestras caen en zona verde se garantiza que $C_{pk} \geq 1.33$
PODER DE DISCRIMINACION	ERROR TIPO ALFA (DETENER EL PROCESO CUANDO DEBIO CONTINUAR)	• Cercano al 2%
	ERROR TIPO BETA (SEGUIR EL PROCESO CUANDO DEBIO PARARSE)	• Cercano al 1.5%
SENSIBILIDAD	• Dependiendo de la etapa en la cual se encuentre el proceso, es de regular a alta.	• Alta
INTERPRETACION	• No es sencilla para los operarios.	• Al alcance práctico de todos los operarios por el uso de colores, y por sus reglas de detención.
FRECUENCIA DE MUESTREO	• Arbitraria	• Simple, Seis muestreos entre dos paros o ajustes.
AJUSTES DE LA MAQUINA	• Requiere tomar otras muestras de 80 a 150 unidades en total para recalibrar los límites de control.	• No se requieren recalibrar los límites de precontrol.
REDUCCION DE LA VARIABILIDAD	• Una vez que el proceso ha sido centrado con respecto al centro del diseño, los límites de control que se van recalibrando a través del tiempo, permiten medir que tanto se ha reducido la variabilidad.	• Para medir que tanto se ha reducido la variabilidad del proceso se necesitan modificar los límites de precontrol. Esto puede ser llevado a efecto agregando más zonas de diferente color. En vez de tres zonas (verde, amarilla y roja) podría colocarse más, de tal manera que cada zona de diferente color delimite un valor específico de C_{pk} .
LIMITES UNILATERALES	• Pueden ser establecidos aunque peca de los mismos problemas de las cartas de control usuales.	• También pueden ser establecidos aunque se requiere definir un centro de diseño. En este caso sólo existirán una zona verde, una zona amarilla y una roja.
CARTAS DE ATRIBUTOS	• No distinguen entre los tipos de defectos ni tampoco toman en cuenta su importancia. • Son útiles cuando el porcentaje de defectos es mínimo.	• Pueden convertirse a cartas de precontrol estableciendo un rango de calificaciones en base a la importancia del defecto apartir de la escala "Bo Derek".
COSTO	• Más alto que las cartas de precontrol debido a la gran cantidad de muestras que se tienen que tomar, al número de cálculos que se tienen que hacer y a las recalibraciones periódicas de los límites de control que son necesarias.	• Más abajo que las cartas de control por sus pequeñas muestras y por que no se requiere recalibrar los límites de precontrol a menos que se modifiquen las especificaciones.

Figura 8

CARTAS DE CONTROL VS. CARTAS DE PRECONTROL

CARACTERISTICA		CARTAS DE CONTROL	CARTAS DE PRECONTROL
DISEÑO		Para diseñarla se requieren de 20 a 25 muestreos. Cada muestreo de tamaño 4 ó 5. Después de estos muestreos se calcula la \bar{X} , \bar{R} , L_{ic} y L_{sc} . Esto implica la medición de 80 a 150 unidades, el cálculo de las medias y rangos de cada muestra y con éstos el cálculo de los límites de control.	Para diseñarlas sólo se requieren conocer las especificaciones, dividir el intervalo de especificación entre cuatro y los límites de precontrol, L_{IA} y L_{SA} , serán los que delimitan a las dos porciones centrales.
DISTRIBUCION DE LA POBLACION		• Lo más cercana a una distribución normal	• Lo más cercana a una distribución normal.
USO		• Mantener bajo control la variabilidad del proceso. • Para analizar la habilidad del proceso se requiere calcular C_{pk} .	• Mantener bajo control la habilidad del proceso. • No requiere calcular C_{pk} ya que siempre que cinco muestras caen en zona verde se garantiza que $C_{pk} \geq 1.33$
PODER DE DISCRIMINACION	ERROR TIPO ALFA (DE-TENER EL PROCESO CUANDO DEBIO CONTINUAR)	• Para una carta de control, centrada en el punto de diseño, alfa es aproximadamente de 0.27%. Si no está centrada, alfa es más alto dependiendo de que tan alejado está el centro de la carta del centro de diseño.	• Cercano al 2%
	ERROR TIPO BETA (SEGUIR EL PROCESO CUANDO DEBIO PARARSE)	• Depende del tamaño de las muestras en su diseño. • Depende de la frecuencia de muestreo. • Debido a la escasa relación con las especificaciones es alto.	• Cercano al 1.5%
SENSIBILIDAD		• Dependiendo de la etapa en la cual se encuentre el proceso, es de regular a alta.	• Alta
INTERPRETACION		• No es sencilla para los operarios.	• Al alcance práctico de todos los operarios por el uso de colores, y por sus reglas de detención.
FRECUENCIA DE MUESTREO		• Arbitraria	• Simple, Seis muestreos entre dos paros o ajustes.
AJUSTES DE LA MAQUINA		• Requiere tomar otras muestras de 80 a 150 unidades en total para recalibrar los límites de control.	• No se requieren recalibrar los límites de precontrol.

Figura 8 (Continua)



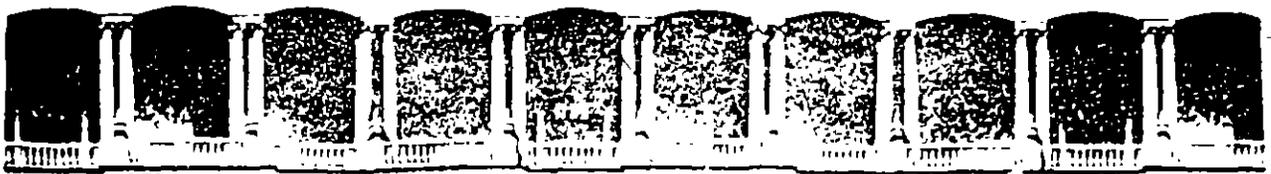
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. J. M. Juran . Juran on Leadership for Quality. Juran Institute Inc. 1989.
2. Shewhart Walter A. The Economic Control of Quality of Manufactured Product. Van Nostrand Company. 1931
3. W. Edwards Deming. Quality, Productivity and Competitive Position. Cambridge: MIT Center for Advanced Engineering Study. 1982.
4. J. M. Juran and F. M. Gryna. Quality Control Handbook. McGraw-Hill . 1951 (4ª edición 1988).
5. Armand V. Feigenbaum. Total Quality Control. McGraw-Hill. 1951 (5ª edición 1988).
6. Kaoru Ishikawa. ¿Qué es el Control Total de Calidad?, La Modalidad Japonesa. Editorial Norma. 1986.
7. Taguchi Genichi. System of Experimental Design. Vol. 1 and 2. UNIPUB-Kraus International Publications. 1987.
8. Estrada Castillo Octavio. Modelo de Sistema de Calidad Total y Metodología para su Implantación. Tesis de Maestría. 1994.
9. Ochoa Rosso Felipe. Metodología de Sistemas. DEPFI-UNAM. 1987.
10. Keki R. Bhote. World Class Quality. AMA. 1990.

11. Montgomery Douglas C. Statistical Quality Control. John Wiley and Sons. 1991.
12. Shigeru Mizuno. Management For Quality Improvement. The 7 New QC Tools. Productivity Pres. 1988 (1977 edición en japonés).
13. Loren Walsh, Ralph Wurster y Raimond J. Kimber. Quality Management Handbook. Marcel Dekker Inc. ASQC. 1986.

Revistas Científicas y Técnicas consultadas:

1. Quality Progress. American Society for Quality Control (ASQC). Publicación mensual.
2. Journal of Quality Technology. American Society for Quality Control (ASQC). Publicación trimestral.
3. Quality Engineering. American Society for Quality Control (ASQC). Publicación trimestral.
4. Quality Management Journal. American Society for Quality Control (ASQC). Publicación mensual.
5. Technometrics. American Society for Quality Control (ASQC). Publicación trimestral.
6. Monografías. FUNDAMECA. Publicación periódica.
7. Proyección. Asociación Mexicana de Calidad. Publicación mensual.
8. Sistemas de Calidad. IMECCA. Publicación mensual.



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

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V: ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA : ANEXO

1996

Eastman Chemical Company

En la Eastman Chemical Company ser de clase mundial no es suficientemente bueno. La empresa ha puesto la mira en ser la empresa química favorita del mundo, meta que exige un nivel de desempeño operativo sobresaliente.

Cuando una encuesta interna reveló que el personal de mantenimiento dedicaba hasta 50% de tiempo a encontrar y ordenar partes de equipo, Eastman supo que había llegado el momento de un cambio radical. Tras un esfuerzo masivo de reingeniería que requirió casi tres años, Eastman ha reducido un 80% el tiempo necesario para encontrar y pedir materiales. En consecuencia, la productividad de mantenimiento se ha elevado enormemente, el tiempo útil del equipo ha aumentado y la empresa está ahorrando más de un millón de dólares al año en costo de inventario duplicado.

Desde la terminación de ese primer proyecto, Eastman ha adoptado la reingeniería de procesos de negocios (BPR) como una estrategia clave para dar a la empresa una importante ventaja competitiva. La empresa ha establecido una estrategia BPR de primer nivel y un programa activo de capacitación interna. Los proyectos específicos de BPR que en la actualidad se encuentran en proceso se dirigen a las áreas, tales como políticas de precios, las interfaces con los clientes, los sistemas de administración de pedidos y los ciclos de desarrollo de productos, que Eastman considera la convertiran en la empresa química preferida del mundo.

Schlage Lock Co.

En 1991, como parte de un esfuerzo en curso para la mejora del desempeño, la Schlage Lock Co. empresa, con sede en San Francisco, California, comenzó un programa de reingeniería de negocios que se había diseñado para hacer a la empresa más capaz de satisfacer las demandas de un mercado cambiante. En particular, Schlage, que forma parte de Ingersoll-Rand Worldwide, deseaba adoptarse a las necesidades de vendedores minoristas "valor" de grandes volúmenes, tales como Kmart, Wal-Mart, Home Depot y Builders Square, que dominan el mercado minorista de los Estados Unidos.

La empresa definió sus metas primarias de reingeniería: incrementar la producción y la productividad, reducir los costos de operación y mejorar las relaciones con los clientes. Antes de tomar la decisión de emprender una reingeniería de procesos, la compañía adoptó un Strategic Business Plan (Plan Estratégico de negocios) que se fundamentaba en los siguientes dos objetivos:

Declaración de la visión. Los procesos de negocios de Schlage definen los sistemas de manufactura y gestión de periodos de cla mundial que proporcionan satisfacción de primera al cliente y apoya la visión de Schlage.

Declaración de la misión. Es Strategic Information Systems Plan (SISP) Team (Equipo de planeación estratégica de sistemas de información conducirá a Schlage al desarrollo e implantación de procesos, sistemas y tecnologías superiores de manufactura y de gestión de periodos que maravillarán al cliente y que apoyarán las metas estratégicas de Schalage.

El plan de negocios implica el logro de lo siguiente:

- * una tasa de crecimiento anual del 40% hasta 1996;
- * 100% de precisión en los pedidos
- * 100% de entregas a tiempo (lo que se traduce en dos días de entrega de las existencias, cinco días de embarque para pedidos clave no maestros y embarque de seis semanas para pedidos especiales y maestros clave); y
- * reducción del 75% en los tiempos de ciclo de desarrollo del producto.

Para poder cumplir con estas metas, el plan contempla un aumento significativo en el uso de la automatización. Lo más importante es que contempla la implantación del SISP, donde la reingeniería de procesos se ha identificado como una empresa central necesaria para hacer que el SISP funcione y finalmente lleve el plan de negocios a su culminación.

Como Schlage lo ha interpretado, la reingeniería de procesos implica definir, comprender, simplificar y documentar los procesos de manufactura y de negocios para poder hacerlos candidatos para la automatización u otros cambios. Se espera que al intentar tales cambios se tenga un impacto importante en la cultura de la empresa, pues implica la alteración de las operaciones cotidianas, la introducción de procesos multifuncionales y el énfasis en el trabajo en equipo. Si bien la filosofía de TQM (Administración con calidad total) de la empresa proporciona un fundamento de actitud para este plan, la implantación del SISP proporciona el fundamento operativo.

Además de la reingeniería de procesos de negocios, Schlage inició varios cambios convencionales. Estos, se supuso, no solamente prepararían el camino para la reingeniería, sino que también proporcionarían beneficios, por sí solos, a las operaciones de la empresa. Estos cambios implicaban concentrar los resultados de mercadotecnia, ventas, operaciones y resultados financieros en cuatro unidades de negocios separadas (comercial, residencial, minorista e internacional); consolidar las cuentas de los clientes, e iniciar esfuerzos básicos para la racionalización del producto.

OSRAM Sylvania

Las tarjetas de tiempo de asuntos comunes que se utilizan en la planta manufacturera de OSRAM Sylvania en Pennsylvania estaban bien, con excepción de que no se ajustaban exactamente al reloj checador de la planta, el cual imprimía sobre el espacio designado al número del seguro social del empleado. Para procesar la nómina, los números debían ser legibles, por supuesto, por lo que un empleado diligente se pasaba unas cuantas horas cada semana volviendo a copiar, cuidadosamente, el número de seguro social del empleado en un espacio distinto de la tarjeta. Cuando este empleado salía de vacaciones, un supervisor tenía que suplirlo y procesar el mismo las tarjetas de tiempo para la nómina. Con cientos de números de seguro social ilegibles y un caso de terribles calambres por escribir, el supervisor de inmediato llamo a su proveedor de productos de oficina para ordenar un tipo más adecuado de tarjetas de tiempo con lo cual liberó al empleado de un tedio terrible y ahorro un poco de tiempo valioso en el proceso de nómina.

Si bien este ejemplo parece modesto, sirve como modelo para una reingeniería de procesos de negocios, e ilustra que un requisito clave para un cambio organizacional exitoso es tener conciencia de que el cambio es posible. El empleado de la nómina pensaba que las tarjetas que no ajustaban eran una molestia inevitable del trabajo, por esto hacía lo que el pensaba estaba correcto: trabajar más duro. Afortunadamente, el supervisor sabía que hacer el mejor trabajo posible no necesariamente implicaba trabajar más, sino con mayor inteligencia.

Para que una empresa transforme sus procesos de negocios (se traten de sencillas prácticas administrativas o complejos sistemas de manufactura) no solamente debe hacer a un lado las nociones alentadoras y la sabiduría convencional. También tiene que desechar las mentalidades indolentes y aceptar las ideas brillantes de sus empleados, lo que hace que se den cuenta de que el cambio no solamente es posible, es algo que se fomenta. Con la esperanza de que tales ideas iluminen su planteamiento de la BPR, el departamento de calidad y productividad de OSRAM Sylvania (antes el departamento de ingeniería industrial) ha desarrollado un marco de referencia para la BPR que también comprende los esfuerzos de mejora continua de la empresa y la participación de los empleados. Denominado Time-Based Continuous Improvement Approach (TBCIA; Enfoque de mejora continua con base en el tiempo), el programa incorpora la reingeniería y la participación del empleado con herramientas y técnicas más tradicionales de ingeniería industrial para crear una protección contra la "calidad autosuficiente" o la transferencia de habilidades de mejora relacionadas con el cambio para los empleados de la planta.

McDonnell Douglas Transport Aircraft

Poco después del vuelo inicial del C-17, los ejecutivos de MDA se reunieron con representantes de las DPRO y SPO para analizar los problemas constantes con los costos y la programación del ensamble de los aviones. Ambas partes estuvieron de acuerdo en que había que prestar atención a los problemas. De acuerdo con un especialista técnico superior de McDonnell Douglas que fue el gerente inicial del programa PVR (Variabilidad de proceso), la empresa se las había arreglado para cumplir las fechas de entrega contratadas entregando aviones que había que regresar para varias miles de horas de retrabajo.

A fines de 1991, McDonnell Douglas Transport Aircraft, unidad de McDonnell Corporation de Long Beach, California, inauguró un programa de reingeniería para el ensamble de un avión militar de carga C-17. Con base en un protocolo denominado reducción de la variabilidad del proceso (PVR, por sus siglas en inglés), el programa pretende hacer mejoras en el proceso de ensamble que acorte el tiempo necesario para armar un avión y reduzca en número de defectos y errores en el producto final. Las metas establecidas son:

- ♣ desarrollar un itinerario y planear un programa;
- ♣ garantizar el desempeño del producto; y
- ♣ mantener el cumplimiento de los costos (contractuales).

En un principio, el programa se dirigía a tres componentes del proceso de ensamble: la porción del ensamble de la envergadura de las alas que implica el uso de máquinas remachadoras; el ensamble de las terminaciones de las torres marcadoras del curso de vuelo; y el ensamble del sistema de combustible, con el objetivo de eliminar fugas de éste. La empresa integró a tres equipos separados para instituir el cambio en cada uno de los procesos objetivo, organizando la introducción del nuevo enfoque a lo largo de la primera mitad de 1992.

Se eligió el equipo de remachadoras para iniciar, para que desarrollara procedimientos y técnicas que subsecuentemente adoptara los otros dos equipos para el verano de 1993 el equipo de remachadoras había progresado hasta terminar un ciclo completo y obtuvo resultados espectaculares: una reducción del 75% en el tiempo de trabajo en el ensamble de la cubierta de las salas para una sola nave de 21, 529 horas en enero de 1992 a 5, 254 horas en julio de 1993. Aún más, la producción de esos totales que representaba el tiempo que se dedicaba a corregir errores experimentó reducciones especialmente espectaculares, bajando de 8, 625 horas en un principio a solamente 611 horas 16 meses más. La empresa calcula ahorros en los costos de un millón de dólares por aeroplano a partir de este procedimiento nada más.

Los equipos de las terminaciones marcadoras de vuelo y del sistema de combustible (que son los otros dos) parecen encaminarse a obtener resultados igualmente impresionantes; y la empresa ha ampliado el alcance de sus esfuerzos PVR para incluir 16 componentes distintos, incluso dos que tratan con el papeleo relacionado con el C-17y no con procesos mecanicos, y tres que conllevan la participación de proveedores externos a quienes se alienta a implantar sus propios programas de PVR con base en los patrones desarrollados por MDA.

The Medical Center

De acuerdo con los costos de operación, The Medical Center (TMC) de Beaver, Pa., es el hospital mas eficiente en la Pennsylvania occidental. También tiene una excelente calidad clinica y departamentos de servicios ganadores de premios. Sin embargo, Bob Gibson, presidente y director general del hospital, considera que existe un defecto básico en la manera en que los hospitales presentan sus servicios y sólo una transformación radical de toda la organización puede corregirlo.

Al utilizar los esfuerzos del sector manufacturero. como orientación, Gibson dirige a The Medical Center en una estrategia de reingeniería de procesos de negocios de via rápida (BPR) que finalmente abarcará todas las áreas del hospital para alcanzar mejoras significativas en la productividad y en la eficiencia general. El resultado será una nueva y muy eficiente organizacion que se construya específicamente en torno a la satisfacción de las necesidades de los pacientes en términos de calidad y servicios.

"Nadie sabe lo que va a suceder con el sistema nacional de salud, pero sea lo que sea se orientara a recompensar la eficiencia y los bajos costos", dice Gibson. "Cualquier cosa que hagamos que nos haga más eficientes y que reduzca nuestros costos nos tiene que colocar en mejor posición. Lo que la industria manufacturera denomina tiempo reducido del ciclo, nosotros lo llamamos duración de la estancia. Es absolutamente critica para nuestro bienestar económico".

"Al mismo tiempo, creo que existe una correlación absolutamente entre la satisfacción de cliente y la eficiencia. Si se puede reducir el tiempo que se requiere para que un paciente obtenga una pastilla contra el dolor de 2.5 horas a 18 minutos, la satisfacción del cliente se incrementa y nosotros nos volvemos más eficientes en costos".

REINGENIERÍA

“El cuestionamiento fundamental y el rediseño radical del sistema organizacional total, incluyendo:

- Procesos de negocios
- Estructura organizacional
- Sistemas administrativos y de medición
 - Cultura empresarial

con objeto de lograr mejoras dramáticas en parámetros críticos de desempeño como lo son el costo, la calidad y servicio.”

Adaptado de Hammer y Champy

PALABRA CLAVE:
RADICAL

“Al hablar de reingeniería, rediseñar radicalmente significa destacar todas las estructuras y los procedimientos existentes e inventar maneras de realizar el trabajo.

Rediseñar es reinventar el negocio, no mejorarlo o modificarlo.”

DEFINICION

LA REINGENIERIA ES EL REDISEÑO RADICAL DE PROCESOS PARA ALCANZAR MEJORAS ESPECTACULARES BAJO NUEVOS PARAMETROS DE EFICIENCIA; TALES COMO: CALIDAD, SERVICIO, COSTO Y TIEMPO.

PRINCIPIO BASICO DE LA REINGENIERIA

ESTIMULAR LAS ACTIVIDADES CON VALOR AGREGADO PARA EL CLIENTE, Y TRANSFORMAR O ELIMINAR LAS QUE NO LO TIENEN.

QUE NO ES REINGENIERIA

- O REALIZAR MEJORAS CONTINUAS
- O REORGANIZAR O REESTRUCTURAR LA COMPAÑIA
- O IMPLEMENTAR UN PROGRAMA DE REDUCCION DE COSTOS
- O OTRA ESTRATEGIA DE CALIDAD
- O ACELERAR EL PROCESO DE AUTOMATIZACION

LA REINGENIERIA IMPLICA UN CAMBIO RADICAL
CON UN ENFOQUE TOTALMENTE INNOVADOR

OBJETIVOS DE LA REINGENIERIA

- O CONducir el rediseño de los procesos centrales y correlacionarlos con las metas estratégicas y los requerimientos del cliente.**
- O IDENTIFICAR LOS PUNTOS CLAVE (CUELLOS DE BOTELLA) PARA ALCANZAR RESULTADOS IMPORTANTES.**
- O ESTABLECER PRIORIDADES PARA CREAR UN AMBIENTE OPTIMO PARA EL REDISEÑO.**

LAS TRES CES.

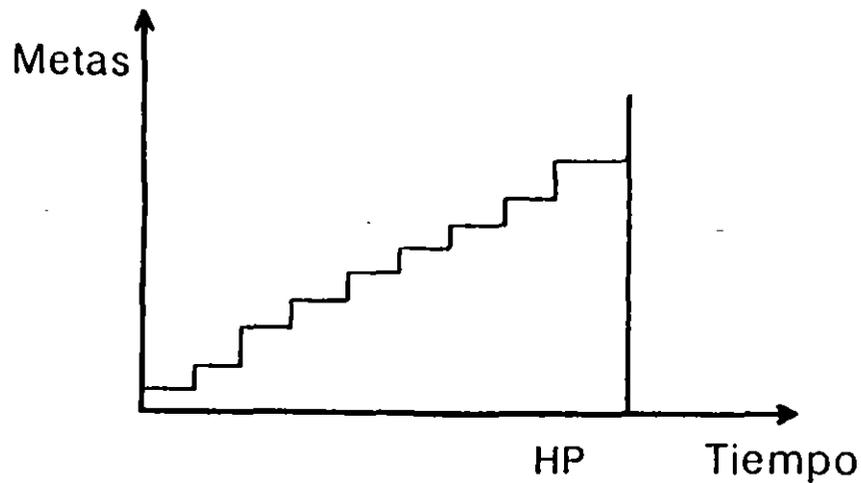
Cientes, Competencia y cambio:

Han creado un nuevo mundo para los negocios y cada día se hace más evidente que organizaciones diseñadas para funcionar en un ambiente no funcionan en otro.

EL CAMBIO SE VUELVE CONSTANTE.

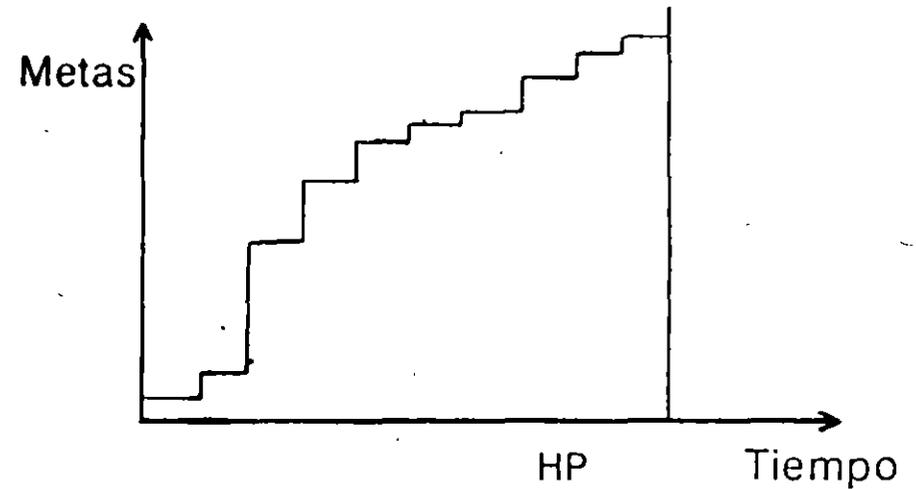
- Con la globalización de la economía las compañías se van ante un número mayor de competidores, cada uno de los cuales puede introducir en el mercado innovaciones de productos y servicios. La rapidez del cambio tecnológico también promueve la innovación. Los ciclos de vida de los productos han pasado de años a meses.

MEJORAMIENTO CONTINUO VS REINGENIERIA



MEJORAMIENTO CONTINUO

ESTABLECIENDO LAS INTERRELACIONES ENTRE LAS VARIABLES CAUSALES, PLANTEANDO EL ESCENARIO DESEADO (BENCHMARKING) Y DEFINIENDO COMO ALCANZAR LOS OBJETIVOS Y METAS ESTABLECIDOS; RESPETANDO LOS PRINCIPIOS OPERATIVOS Y ORGANIZACIONALES VIGENTES.



REDISEÑO DE PROCESOS

POR MEDIO DEL REDISEÑO DE PROCESOS, REALIZANDO CAMBIOS RADICALES EN LA ESTRUCTURA ORGANIZATIVA Y EN LA OPERACION PARA ALCANZAR EL ESCENARIO DESEADO EN EL CORTO PLAZO.

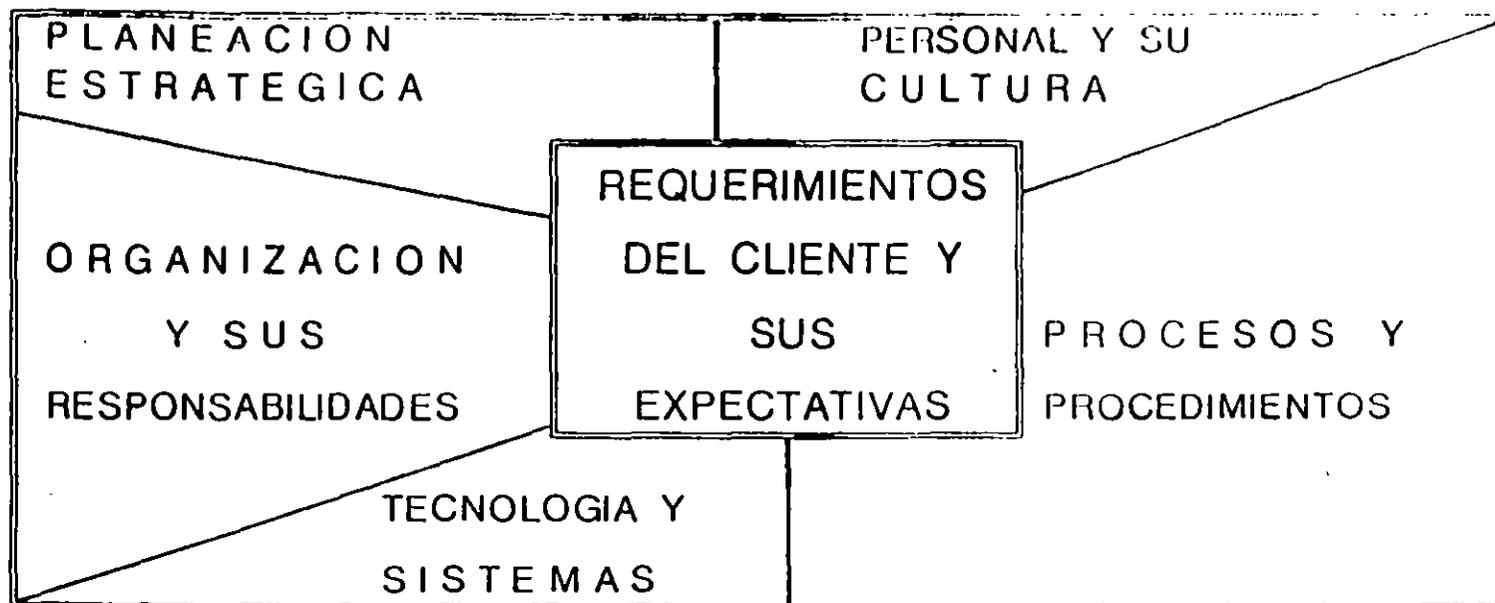
REDISEÑO DE PROCESOS (REINGENIERIA)

DPTO ING IND

ENFOQUE DE LA REINGENIERIA

FI UNAM

LA REINGENIERIA DEBE ENFOCARSE:



EL MUNDO DE LA REVOLUCION INDUSTRIAL, ESTA CEDIENDO EL CAMPO A UNA ECONOMIA GLOBAL, A PODEROSAS TECNOLOGIAS INFORMATICAS Y A UN CAMBIO INEXORABLE. SE INICIA LA EDAD DE LA REINGENIERIA. LOS QUE RESPONDAN A SU LLAMADA ESCRIBIRAN LAS NUEVAS REGLAS DE LOS NEGOCIOS, TODO LO QUE SE NECESITA ES VOLUNTAD DE TRIUNFAR Y VALOR PARA EMPEZAR.

CONSIDERACIONES FUNDAMENTALES**ESTRATEGIA
COMERCIAL****ENTENDER EL MERCADO Y
LA COMPETENCIA****PERSONAS Y
SU CULTURA****ACTITUDES Y APTITUDES,
HABILIDADES, PRETENSIONES****ACTIVIDADES Y
PROCESOS****FLEXIBILIDAD DEL TRABAJO,
FLUJO DE LA INFORMACION****TECNOLOGIA Y
SISTEMAS****CAPACIDAD DE OPERACION Y
MANEJO DE INFORMACION****ORGANIZACION****RELACIONES PERSONALES****CLIENTE****CARACTERISTICAS Y FUN-
CIONES DEL PRODUCTO,
CALIDAD DEL MISMO**

LOS CLIENTES ASUMEN EL MANDO.

- A partir de los primeros de los años 80 en Estados Unidos y en otros países desarrollados, las fuerzas dominantes en la relación vendedor-cliente ha cambiado. Los que mandan ya no son los vendedores, son los clientes. hoy los clientes les dicen a los proveedores qué es lo que quieren, cuando lo quieren y cuanto pagarán.

REDISEÑO DE PROCESOS (REINGENIERIA)	DPTO ING IND
FASE 3: IDENTIFICACION DEL PROCESO (DISA)	FI UNAM

¿ COMO IDENTIFICAR UN PROCESO ?

- 1.- CONOCER LA ENTRADA Y LA SALIDA DE UNA ACTIVIDAD.
- 2.- IDENTIFICAR LOS PUNTOS CLAVE (CUELLOS DE BOTELLA) DE LA ACTIVIDAD.
- 3.- IDENTIFICAR LAS ACTIVIDADES QUE AGREGUEN VALOR AL CLIENTE.
- 4.- IDENTIFICAR LAS ACTIVIDADES SIN VALOR AGREGADO AL CLIENTE, INEVITABLES.
- 5.- IDENTIFICAR LAS ACTIVIDADES SIN VALOR AGREGADO AL CLIENTE, INNECESARIAS.
- 6.- AGRUPAR ACTIVIDADES QUE PERSIGAN UN MISMO OBJETIVO.

CUESTIONAMIENTOS PARA SABER SI UNA ACTIVIDAD AGREGA O NO VALOR

- SI LA TAREA NO PUEDE SER ELIMINADA, CAMBIADA Y/O COMBINADA, ¿ PUEDE SER SIMPLIFICADA ?
- ¿ PUEDE UNA TAREA SER ELIMINADA SIN AFECTAR LA CALIDAD DEL PRODUCTO O SERVICIO ?
- ¿ ES ESTA TAREA NECESARIA PARA EL CLIENTE ?
- ¿ PAGARIA EL CLIENTE POR ELLA ?

¿ COMO SE REDISEÑA UN PROCESO ?

- 1.- SE ELIMINAN O REDUCEN LAS ACTIVIDADES QUE NO AGREGAN VALOR AL CLIENTE.
- 2.- SE CONSTRUYE EL ESCENARIO DESEADO (BENCHMARK).
- 3.- SE HACEN LAS MEJORAS CORRESPONDIENTES A LOS PROCESOS A REDISEÑAR.
- 4.- SE PONE EN MARCHA (IMPLEMENTA) EL PROCESO REDISEÑADO.

¿ PORQUE LA TECNICA DEL BENCHMARK ?

- O DESARROLLAR OBJETIVOS REALISTAS Y ESTRATEGIAS POSIBLES
- O ESTABLECER METAS TECNOLOGICAMENTE FACTIBLES Y OPERATIVAMENTE VIABLES
- O PERCATARSE DE LA URGENCIA DE MEJORAR
- O ESTIMULAR EL ESFUERZO POR LA EXCELENCIA, EL PENSAMIENTO CREATIVO Y LA INNOVACION
- O CREAR UN ENTENDIMIENTO REAL DE LA COMPETENCIA Y DINAMISMO EN LA INDUSTRIA
- O SENSIBILIZARSE DE LA NECESIDAD DE CAMBIAR EL ENFOQUE HACIA LAS NECESIDADES DEL CLIENTE

FASE 4: CONSTRUCCION DE ESCENARIOS

ESCENARIO DESEADO: B E N C H M A R K

ES UNA REFERENCIA O MEDIDA ESTANDAR PARA SER UTILIZADA COMO COMPARACION:

" LO MEJOR EN SU CLASE "

B E N C H M A R K I N G (D E F I N I C I O N)

PROCESO DE COMPARACION CONTINUA EN UNA ORGANIZACION CON LO MEJOR (DE LA COMPETENCIA) QUE EXISTA EN EL MUNDO, PARA MEJORAR LA EJECUCION PROPIA.

ES UN PROCESO DE MEDICION CONTINUO Y SISTEMATICO.

FASE 3: DIAGNOSTICO INTEGRAL DE LA SIT. ACTUAL

O DEL DIAGNOSTICO SE OBTENDRAN LAS VARIABLES CAUSALES DE LA PROBLEMÁTICA EN:

PRODUCCION

Distribución de Planta
 Manejo de Materiales
 Tecnología
 Procesos de Manufactura
 Seguridad Industrial
 Calidad en los Productos
 Aprovechamiento de la Capacidad Instalada

ADMÓN. Y FINANZAS

Ing. Financiera
 Desarrollo Organizacional
 Sistemas Contables

VENTAS

Mercadotecnia
 Comercialización
 Promoción y Difusión

RECURSOS HUMANOS

Relaciones Laborales
 Personal Sindicalizado
 Personal de Confianza

ADQUISICIONES

Insumos
 Materiales

ALMACEN

Nivel de Inventarios de:
 Materia Prima
 Producto Terminado
 Producto en Proceso

SISTEMAS DE INFORMACION

Informática

ENTORNO

Clientes
 Globalización
 Relaciones Gubernamentales

ORDENADAS Y
 SISTEMATIZADAS



IDENTIFICAR LAS
 ACTIVIDADES



ESCENARIOS

TECNOLOGIA DE LA INFORMATICA

LA APLICACION DE LA TECNOLOGIA DE LA INFORMATICA AL REDISEÑO DE PROCESOS, REQUIERE DEL RAZONAMIENTO INDUCTIVO, O SEA DESARROLLAR LA HABILIDAD DE PRIMERO DETECTAR SOLUCIONES PODEROSAS Y DESPUES BUSCAR LOS PROBLEMAS QUE ESTAS PUEDAN RESOLVER. ALGUNOS DE ELLOS PROBABLEMENTE LA EMPRESA NO SABE DE SU EXISTENCIA.

EMPLEANDO LA NUEVA TECNOLOGIA DE LA INFORMATICA, SE TIENDE A ELIMINAR LAS ACTIVIDADES QUE NO AGREGAN VALOR.

FASE 5: REDISEÑO DE PROCESOS

PARA REALIZAR EL REDISEÑO DE PROCESOS SE DEBEN TOMAR EN CUENTA HERRAMIENTAS DE APOYO BASICAS COMO SON:

- O TECNOLOGIA DE LA INFORMATICA**
- O ASEGURAMIENTO DEL " ERROR CERO "**
- O JUSTO A TIEMPO**
- O COSTEO CON BASE EN ACTIVIDADES**

MOVILES TIPIICOS PARA EL
REDISEÑO DE PROCESOS

ACTIVIDADES SUSCEPTIBLES
AL REDISEÑO



- O TIEMPO DE ENTREGA
- O INVENTARIOS
- O MERCADOTECNIA
- O PROGRAMA DE CALIDAD
- O DISTRIBUCION DE AREAS
- O REQUISICIONES
- O ADMINISTRACION Y FINANZAS



- INCREMENTO DEL VALOR AGREGADO
- MAYOR SERVICIO AL CLIENTE
- INCREMENTO EN LA PARTICIPACION EN EL MERCADO
- ELEVAR LA PRODUCTIVIDAD

REDISEÑO DE PROCESOS (REINGENIERIA)	DPTO ING IND
FASE 6: EJECUCION, SEGUIMIENTO Y EVALUACION	FI UNAM

FASE 6: EJECUCION, SEGUIMIENTO Y EVALUACION

INTRODUCIENDO EL REDISEÑO DE PROCESOS AL INTERIOR DEL NEGOCIO

- | | |
|-----------------------------|--|
| O DESARROLLO DEL PRODUCTO | * REDUCCION EN EL TIEMPO DE RESPUESTA DEL MERCADO |
| O ADMINISTRACION Y FINANZAS | * REDUCCION EN EL TIEMPO DE RECOLECCION DE INFORMACION |
| O PROCESAMIENTO DE PEDIDOS | * REDUCCION DEL CICLO VIA TELEINFORMATICA |

SEGUIMIENTO :

PREREQUISITO DE LA EVALUACION.

OBSERVACION SISTEMATICA DEL
COMPORTAMIENTO DE LOS
PROCESOS REDISEÑADOS

EVALUACION :

COMPARACION SISTEMATICA DE
RESULTADOS CONTRA OBJETIVOS.

DETERMINACION DE LAS CAUSAS
DEL NO CUMPLIMIENTO, REMITIENDOSE
A CUALQUIER PUNTO DEL PROCESO.

EL PAPEL DEL LIDER

- O ORGANIZA Y COORDINA AL EQUIPO DE REINGENIERIA
- O MOTIVA Y MANTIENE LOS TRABAJOS DEL EQUIPO
- O PROVEE LOS REQUERIMIENTOS DE ASISTENCIA EXTERNA
- O REMUEVE BARRERAS
- O CONCILIA EN CONFLICTOS
- O PROMUEVE LOS EXITOS DEL EQUIPO

EL PAPEL DEL COORDINADOR

- O AUXILIA AL LIDER A AFRONTAR LO DESCONOCIDO
- O VERIFICA EL CORRECTO USO DE LAS HERRAMIENTAS Y EL EQUIPO
- O ESTABLECE LAS REGLAS DE TRABAJO
- O TOMA DECISIONES CON RESPECTO A LAS ACTIVIDADES
- O RESPONSABLE DEL REDISEÑO DE UN PROCESO

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO DE REINGENIERIA

- O INTERES EN EL PROCESO
- O CONOCIMIENTO SOBRE EL NEGOCIO
(PERSONAL INTERNO)
- O INNOVADORES, VISIONARIOS, (PERSONAL EXTERNO)
- O PARTICIPANTES ACTIVOS EN TODO EL PROCESO
- O RESPONSABLES
- O COMUNICATIVO DE SUS EXITOS

ELEMENTOS QUE ASEGURAN EL EXITO
DEL EQUIPO DE PROCESO

- O CLARA ASIGNACION DE RESPONSABILIDADES
- O COMUNICACION ABIERTA Y OBJETIVA
- O PARTICIPACION MIXTA: PERSONAL INTERNO Y EXTERNO
- O APOYO DE LA DIRECCION
- O USO CORRECTO DE LA TECNOLOGIA Y HERRAMIENTAS
- O COMUNICAR LOS EXITOS ALCANZADOS

ELEMENTOS CON VALOR PARA EL CLIENTE:**CALIDAD:**

- SATISFACER LAS NECESIDADES DEL CLIENTE
- UTILIDAD DE USO
- VARIABILIDAD MINIMA (NORMAS)
- MEJORAS CONTINUAS

COSTO:

- INGENIERIA DE DISEÑO
- GARANTIA DE CALIDAD
- DISTRIBUCION
- ADMINISTRACION
- INVENTARIOS
- MATERIALES
- PRODUCCION

SERVICIO:

- APOYOS AL CLIENTE
- SERVICIOS ASOCIADOS AL PRODUCTO
- APOYOS ADICIONALES AL PRODUCTO
- FLEXIBILIDAD PARA SATISFACER LAS DEMANDAS DEL CLIENTE
- FLEXIBILIDAD PARA SATISFACER LAS NECESIDADES DEL MERCADO

TIEMPO:

- TIEMPO DE ENTREGA
- RESPUESTA A LA FUERZAS DE MERCADO
- CICLO DEL PROCESAMIENTO DE UNA ORDEN

IMPACTO EN LA ADMINISTRACION

- O EL REDISEÑO DE PROCESOS SE GENERA DE LOS NIVELES ALTOS DE LA EMPRESA, HACIA ABAJO
- O LOS GERENTES DEBEN CONVERTIRSE EN LIDERES
- O LA ADMINISTRACION NO DEBE MANEJARSE SOLO EN BASE A NUMEROS, SINO A LA EFECTIVIDAD DE LOS PROCESOS
- O EL REDISEÑO DE PROCESOS DEMANDA UNA NUEVA ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL
- O REVISION DE LAS ACTIVIDADES CENTRALIZADAS VERSUS LAS DESCENTRALIZADAS

IMPACTO EN LA PRODUCCION

- O DIFERENTE FORMA DE ORGANIZACION DE LA PRODUCCION (LINEAS DE PRODUCCION – LAY OUT)
- O INTEGRACION DE LA EXCESIVA DIVISION DEL TRABAJO
- O EVITAR LA MONOTONIA Y EL TRABAJO REPETITIVO
- O FACULTAR A LOS TRABAJADORES PARA LA TOMA DE DECISIONES
- O REDUCCION AL MINIMO DE LOS PUNTOS DE CONTROL Y SUPERVISION

OBJETIVO DE UN PROYECTO DE REINGENIERIA

LOGRAR COMPAÑIAS EXPEDITAS, AGILES, FLEXIBLES, DILIGENTES, COMPETITIVAS, INNOVADORAS, EFICIENTES, ENFOCADAS AL CLIENTE Y RENTABLES.

HORIZONTE DE PLANEACION

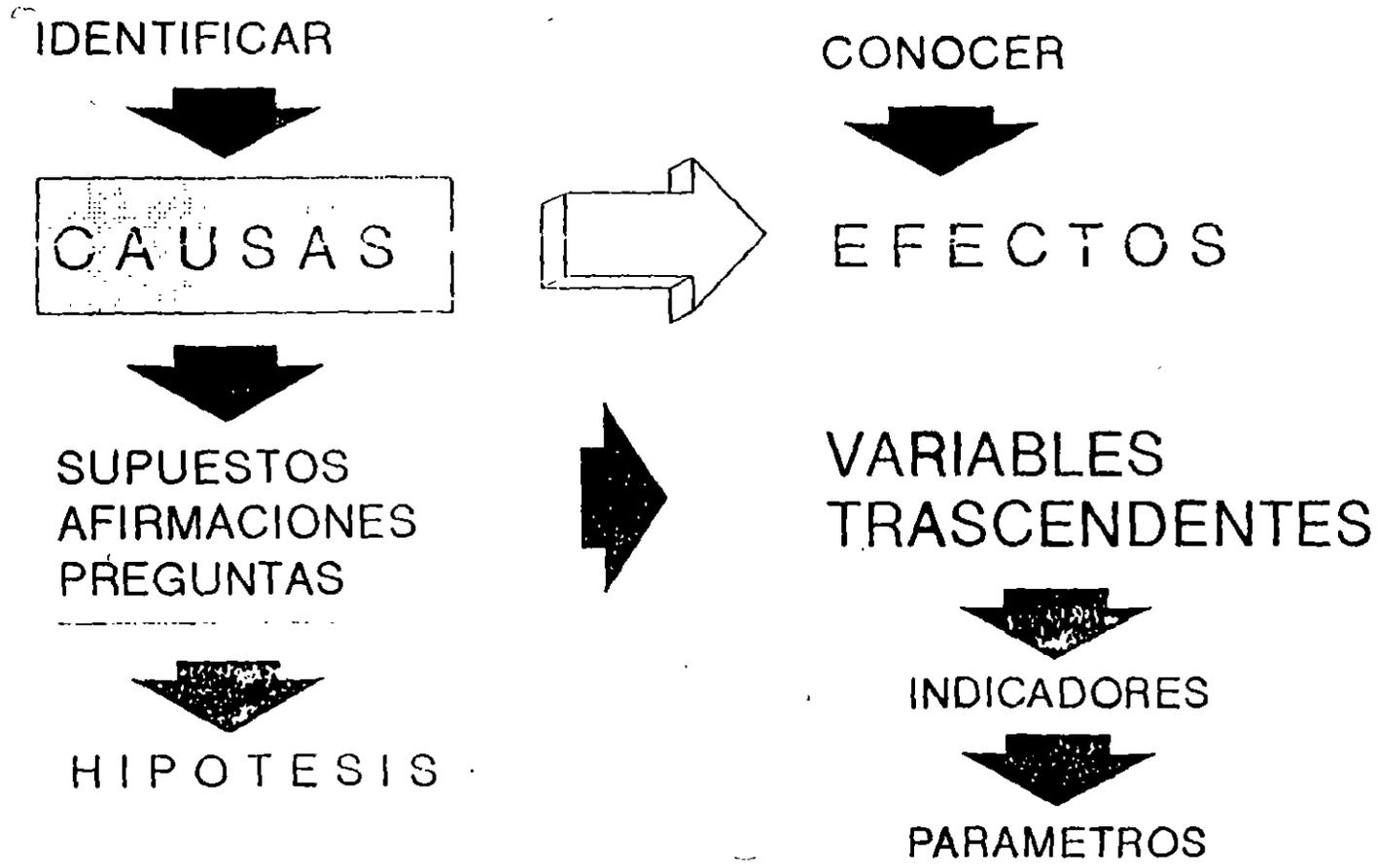
FECHA PRELIMINAR PARA LA CONSECUION DEL OBJETIVO FOCAL.

RESTRICCIONES INICIALES

VISUALIZACION DE POSIBLES RESTRICCIONES, GENERALMENTE DE TIPO LEGAL.

FASE 2: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

EL PROBLEMA



EL CAMBIO DE LA CULTURA EN LA ORGANIZACIÓN DE MANDO POR LA REINGENIERÍA.

- Evitar riesgos
- Miedo al error
- Enfoque endógeno
-
- Atención al procedimiento
- Decisiones verticales
- Análisis excesivo
- Enfoque en el corto plazo
- Enfocado a las funciones
- Metas en términos financieros.
- Tomar riesgos
- Aprender de la experiencia.
- Enfoque hacia los clientes, la experiencia y los proveedores
- Atención a resultados
- Estimular decisiones grupales
- Actitud hacia la acción
- Visión a largo plazo
- Enfocado a los procesos
- Metas en términos de valor agregado y servicio al cliente

LA MAYOR PARTE DE LOS ERRORES QUE LLEVAN A LAS EMPRESAS AL FRACASO EN REINGENIERIA, SON:

- O TRATAR DE CORREGIR UN PROCESO EN VEZ DE CAMBIARLO:
NECESIDAD RADICAL DE CAMBIO**

- O CONFUNDIR PROCESOS CON FUNCIONES DEPARTAMENTALES
Y/O DIVISIONALES:
CONCENTRARSE EN LOS PROCESOS**

- O NO OLVIDARSE DE LOS MOVIMIENTOS TRADICIONALES DE
MEJORA CONTINUA:
LA REINGENIERIA PROVOCA: REDISEÑO PARA CALIFICAR OFICIOS;
NUEVAS E INNOVADORAS POLITICAS DE REMUNERACION Y
PROMOCION; PROGRAMAS DE CAPACITACION CON ENFOQUES
CREATIVOS E INNOVADORES; CRITERIOS DE CONTRATACION
DE PERSONAL**



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

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V: ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA : INTRODUCCION

**EXPOSITOR: ING. PERLA FERNANDEZ REYNA
1996**

ANALISIS Y CONTROL DE LA CALIDAD

DR. ALEJANDRO TERAN C.
INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM
APDO. POSTAL 70-472
CD. UNIVERSITARIA
04510 MEXICO, D.F.
TELS: 622-8132,....,622-8137
FAX: 622-8091
e-mail: atc@pumas.iingen.unam.mx

ING. PERLA FERNANDEZ R.
DEPTO. DE INGENIERIA INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM
CD. UNIVERSITARIA
04510 MEXICO, D.F.
TELS: 622-3104, 622-3123
FAX: 622-3102
e-mail: perlaj@servidor.unam.mx

NOVIEMBRE, 1995

CONTENIDO

- 1. INTRODUCCION**
- 2. ANALISIS DE DATOS**
- 3. VARIABILIDAD DE UN PROCESO Y ESTIMACION**
- 4. DIAGRAMAS DE CONTROL PARA VARIABLES**
- 5. ANALISIS DE ERRORES**
- 6. DETECCION DE INESTABILIDAD DE UN PROCESO MEDIANTE ANALISIS DE CORRIDAS**
- 7. SUBAGRUPAMIENTO RACIONAL: PROBLEMAS DE ESTRATIFICACION Y DE MEZCLA DE POBLACIONES**
- 8. IMPLANTACION Y AUDITORIA DE DIAGRAMAS DE CONTROL**
- 9. ANALISIS DE LA CAPACIDAD DE UN PROCESO**
- 10. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD PARA VARIABLES DISCRETAS**
- 11. DIAGRAMAS DE CONTROL PARA ATRIBUTOS**
- 12. ESTUDIO DE CASO**

BIBLIOGRAFIA

APENDICE: TABLAS PARA VARIABLES

TEMA 1:

INTRODUCCION

1. CONCEPTOS BASICOS

Fitness for use

Para satisfacer las necesidades humanas, los individuos requieren de *productos* (satisfactores materiales o intangibles). Por productos se entienden *bienes y servicios*.

Calidad se define como la propiedad inherente de un producto de ser adecuado para su uso (*fitness for use*).

El término *fitness for use* es relativo a un cierto individuo (o grupo de individuos).

Características de calidad

Un producto posee múltiples elementos que definen la adecuación de su uso. Cada uno de estos elementos representa una característica de calidad. El concepto de característica de calidad es el *building block* a partir del cual se define la calidad.

La característica de calidad representa el medio a través del cual el concepto de *fitness for use* puede ser interpretado por el ingeniero.

Las características de calidad se pueden agrupar en diferentes especies, como:

Estructural: longitud, peso, voltaje, frecuencia, viscosidad.

Sensorial: sabor, presentación, color, olor.

Dependientes del tiempo: confiabilidad, mantenimiento.

Comerciales: garantía.

Éticas: cortesía, honestidad.

Facetas de la calidad

La calidad de un producto presenta dos facetas:

1. **Calidad del diseño**: indica el nivel de las diferentes características de calidad que se desea "imprimir" sobre el producto. Generalmente se traduce en especificaciones y tolerancias.
2. **Calidad de conformidad**: indica qué tan bien cumple el producto las especificaciones y tolerancias requeridas por el diseño.

Control y control de calidad

Control es el proceso empleado para satisfacer estándares o normas. Consiste en: (1) observar el comportamiento real de un sistema, (2) comparar dicho comportamiento con

algún estándar, y (3) efectuar alguna acción si el comportamiento observado difiere del estándar.

Control de calidad: proceso mediante el cual se mide el comportamiento real de un producto en términos de calidad, se compara con algún estándar, y se actúa sobre la diferencia.

La función de calidad

Para alcanzar un determinado nivel de calidad, se requiere de una amplia gama de actividades identificables, o *tareas* de calidad (*quality tasks*). Por ejemplo, mercadotecnia, producción, servicio, etc.

La *función de calidad* es el conjunto de actividades a través de las cuales se alcanza el *fitness for use*, sin importar dónde se efectúen dichas actividades.

La función de calidad involucra a *toda* la organización e incluye a proveedores.

Métodos de aseguramiento de la calidad

Las tecnologías para el aseguramiento de la calidad se centran principalmente en tres grandes áreas: (1) diseño de experimentos, (2) control estadístico del proceso, y (3) muestreo para aceptación.

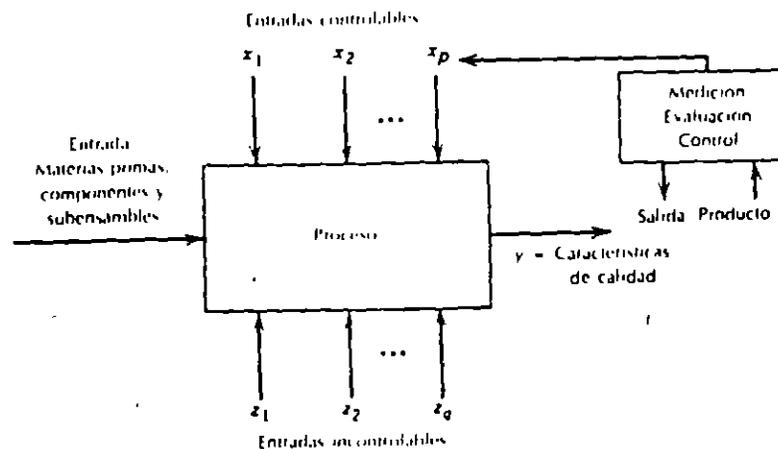


Figura 1-1. Entradas y salidas de un proceso de producción

Experimentos diseñados

Experimento diseñado: procedimiento en el que se varían sistemáticamente los factores controlables de entrada, y se estudia el efecto que tienen dichos factores en los parámetros de salida del producto. Los experimentos diseñados estadísticamente son esenciales para:

1. Reducir la variabilidad en las características de la calidad, y
2. Determinar los niveles de las variables controlables que optimizan el rendimiento del proceso.

Los experimentos diseñados son herramientas de calidad "fuera de línea" (*off line*). Se usan a menudo durante las actividades de desarrollo y en las primeras etapas de fabricación, en vez de un procedimiento de control rutinario *en línea* o *en proceso*.

Control estadístico del proceso

El control estadístico del proceso incluye una serie de técnicas *on-line* cuyo objetivo es la *reducción sistemática de la variabilidad* en las características de calidad clave del producto.

Muestreo para la aceptación

Conjunto de técnicas de inspección (basadas en la estadística) para evitar que productos que no están conforme a las especificaciones lleguen al usuario.

Evolución típica de industrias en la aplicación de tecnologías de AC

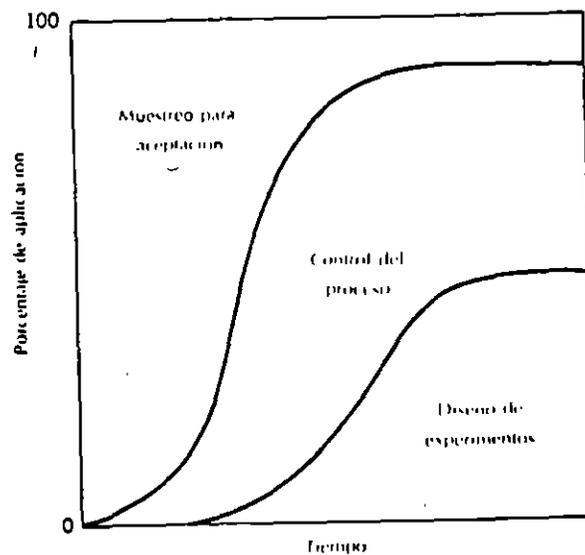


Figura 1-2. Diagrama de fases del uso de los métodos de aseguramiento de la calidad.

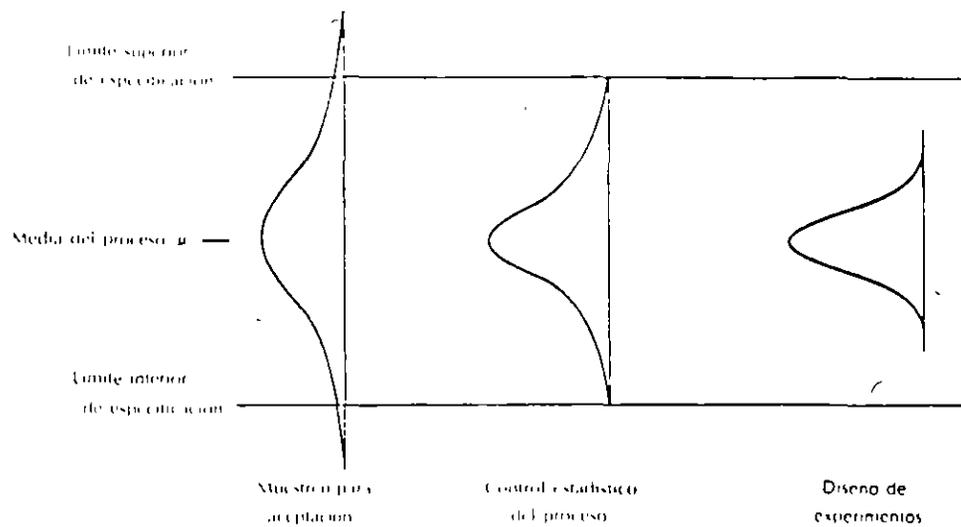


Figura 1-3. Aplicación de las técnicas de aseguramiento de calidad y la reducción sistemática de la variabilidad del proceso

Bibliografía

Juran, J.M., and F. M. Gryna, Jr., *Quality Planning and Analysis*, 2/e, McGraw-Hill, New York, 1980.

Montgomery, D.C., *Introducción al control estadístico de la calidad*, Grupo Editorial Iberoamérica, México, 1991.



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

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V: ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA : ANALISIS DE DATOS

**EXPOSITOR: M. EN I. OCTAVIO ESTRADA CASTILLO
1996**

TEMA 2:
ANALISIS DE DATOS

ESTADISTICA

CONJUNTO DE METODOS Y TECNICAS DE GENERACION Y ANALISIS DE DATOS, ASI COMO DE OBTENCION DE *INFERENCIAS* (AFIRMACIONES RIGUROSAS E INTELIGENTES), ACERCA DE UN FENOMENO DEL CUAL SE SELECCIONARON LOS DATOS.

POBLACION

CONJUNTO TOTAL DE MEDICIONES DE INTERES PARA DETERMINADO PROBLEMA

MUESTRA

SUBCONJUNTO DE LA POBLACION QUE CONTIENE LAS MEDICIONES OBTENIDAS MEDIANTE UN EXPERIMENTO (PROCEDIMIENTO MEDIANTE EL CUAL SE OBTIENE UN CONJUNTO REPRESENTATIVO DE MEDIDAS DE LA POBLACION)

EJEMPLO

LA CALIDAD DE UNA CIERTA PIEZA DEPENDE DE SU DIAMETRO. LA SIGUIENTE TABLA MUESTRA, PARA UN PERIODO DE 50 DIAS, DATOS DE DIAMETROS (EN cm) DE PIEZAS TORNEADAS FABRICADAS POR 4 DIFERENTES EMPLEADOS

DIA	EMPLEA DO 1	EMPLEA DO 2	EMPLEA DO 3	EMPLEA DO 4
1	20.8	21.8	21.5	21.5
2	20.8	24.8	19.9	19.9
3	21.1	21.2	19.8	24.5
4	20.1	21.0	21.4	20.4
5	20.8	24.0	20.8	20.1
6	20.5	23.5	23.0	23.3
7	23.1	22.0	22.6	21.7
8	21.4	20.9	23.7	20.7
9	16.6	21.7	22.2	21.2
10	22.1	20.4	23.1	19.3
11	24.0	21.4	22.1	22.0
12	21.2	21.6	21.7	19.0
13	22.7	20.2	21.8	21.7
14	20.9	24.5	22.8	22.4
15	20.3	22.1	20.0	21.7
16	21.3	18.8	22.1	20.9
17	20.8	20.4	21.7	20.7
18	22.2	20.4	19.8	21.1
19	19.3	21.0	22.1	18.3
20	20.9	22.8	22.7	21.9
21	21.9	22.7	22.5	19.5
22	21.7	18.9	22.6	24.6
23	20.0	22.8	21.7	23.1
24	19.7	21.7	23.7	20.6
25	18.9	23.2	21.8	20.9
26	22.0	21.1	17.7	24.4
27	21.5	21.7	17.9	19.5
28	18.7	19.7	22.9	23.4
29	21.1	19.8	20.8	21.8
30	26.7	20.6	18.5	20.5
31	21.2	20.3	21.6	19.7
32	19.0	21.0	23.3	20.7
33	20.7	25.1	21.4	20.3
34	22.7	22.7	19.7	21.2
35	22.9	20.1	23.6	18.3
36	21.5	19.4	21.6	23.5
37	23.2	23.1	20.6	21.3
38	21.4	26.3	22.0	21.8
39	19.9	21.0	21.6	19.5
40	21.4	25.1	21.0	20.9
41	22.4	21.3	21.4	19.6
42	20.7	20.0	20.2	22.2
43	21.5	19.9	24.4	21.9
44	18.9	20.3	20.7	18.8
45	22.7	21.0	21.9	21.0
46	20.4	21.0	22.9	22.3
47	18.9	24.2	22.5	22.9
48	21.5	22.3	21.4	22.8
49	20.2	21.4	21.1	22.5
50	21.8	19.2	22.7	20.8

**DIAMETROS OBTENIDOS
DE UNA PIEZA TORNEADA
(cm)**

ANALISIS EXPLORATORIO DE DATOS

ANALISIS QUE SE REALIZA SOBRE UN CONJUNTO DE DATOS PARA OBTENER UNA IDEA CLARA DE LAS CARACTERISTICAS IMPORTANTES DEL MISMO.

UTILIZA TECNICAS GRAFICAS (HOJAS DE CONTEO, DIAGRAMA DE TALLO Y HOJAS, HISTOGRAMAS, GRAFICAS DE FRECUENCIA ACUMULADA, DIAGRAMAS DE CAJA, DIAGRAMAS EN EL TIEMPO) O MEDIDAS DESCRIPTIVAS (LOCALIZACION Y DISPERSION)

HOJAS DE CONTEO (CHECK SHEETS)

FORMATOS QUE PERMITEN CONTAR EL NUMERO DE OBSERVACIONES "SIMILARES"

EJEMPLO

ELABORE UNA HOJA DE CONTEO PARA LOS DIAMETROS DE LAS PIEZAS PRODUCIDAS POR EL EMPLEADO 1

DIAGRAMA DE TALLO Y HOJAS

REPRESENTACION EN FORMA DE LISTA DE UN CONJUNTO DE DATOS ORDENADOS Y CLASIFICADOS.

EJEMPLO

DESARROLLE UN DIAGRAMA TALLO HOJAS PARA EL EMPLEADO 1 DEL EJEMPLO ANTERIOR

EJEMPLO

ELABORE EL DIAGRAMA TALLO HOJAS PARA EL EMPLEADO 2

EJEMPLO
(USO DEL DIAGRAMA PARA COMPARACION)

**SE TIENE LA SOSPECHA DE QUE EL EMPLEADO 2 PRODUCE
PIEZAS DE MEJOR CALIDAD QUE EL EMPLEADO 1. ELABORE
UN DIAGRAMA TALLO HOJAS ESPALDA CON ESPALDA.**

HISTOGRAMA

**REPRESENTACION GRAFICA DEL NUMERO DE
OBSERVACIONES CORRESPONDIENTE A CADA UNA DE LAS
CLASES DEL CONJUNTO DE OBSERVACIONES**

***CONCEPTOS CLAVE:* INTERVALO DE CLASE, MARCA DE CLASE,
LIMITES DE CLASE, FRECUENCIA RELATIVA, FRECUENCIA
ABSOLUTA, FRECUENCIA ACUMULADA**

EJEMPLO

**ELABORE UNA HOJA DE CONTEO PARA EL EMPLEADO 1,
CONSIDERANDO LAS MARCAS DE CLASE 16, 17,....**

EJEMPLO

UNA PIEZA SE CONSIDERA DEFECTUOSA SI TIENE UN DIAMETRO INFERIOR A 17 CM O SUPERIOR A 24 CM. USANDO UN HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS RELATIVAS DETERMINE EL PORCENTAJE DE PIEZAS DEFECTUOSAS PRODUCIDAS POR EL EMPLEADO 1 (CONSIDERE LAS MARCAS DE CLASE 16, 17,...)

EJEMPLO

UNA PIEZA SE PUEDE RETRABAJAR SI SU DIAMETRO ES SUPERIOR A 24 CM. USANDO UN HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS ABSOLUTAS, DETERMINE EL NUMERO DE PIEZAS QUE REQUIRIERON RETRABAJO PARA EL EMPLEADO 1, (CONSIDERE LAS MARCAS DE CLASE 16, 17,...)

**GRAFICAS DE CAJA
(BOX PLOT)**

**REPRESENTACION GRAFICA DE LAS CARACTERISTICAS DE LOCALIZACION Y DISPERSION DE UN CONJUNTO DE DATOS.
CONSIDERA: MEDIANA, RANGO, CUARTILES Y RANGO INTERCUARTIL**

EJEMPLO

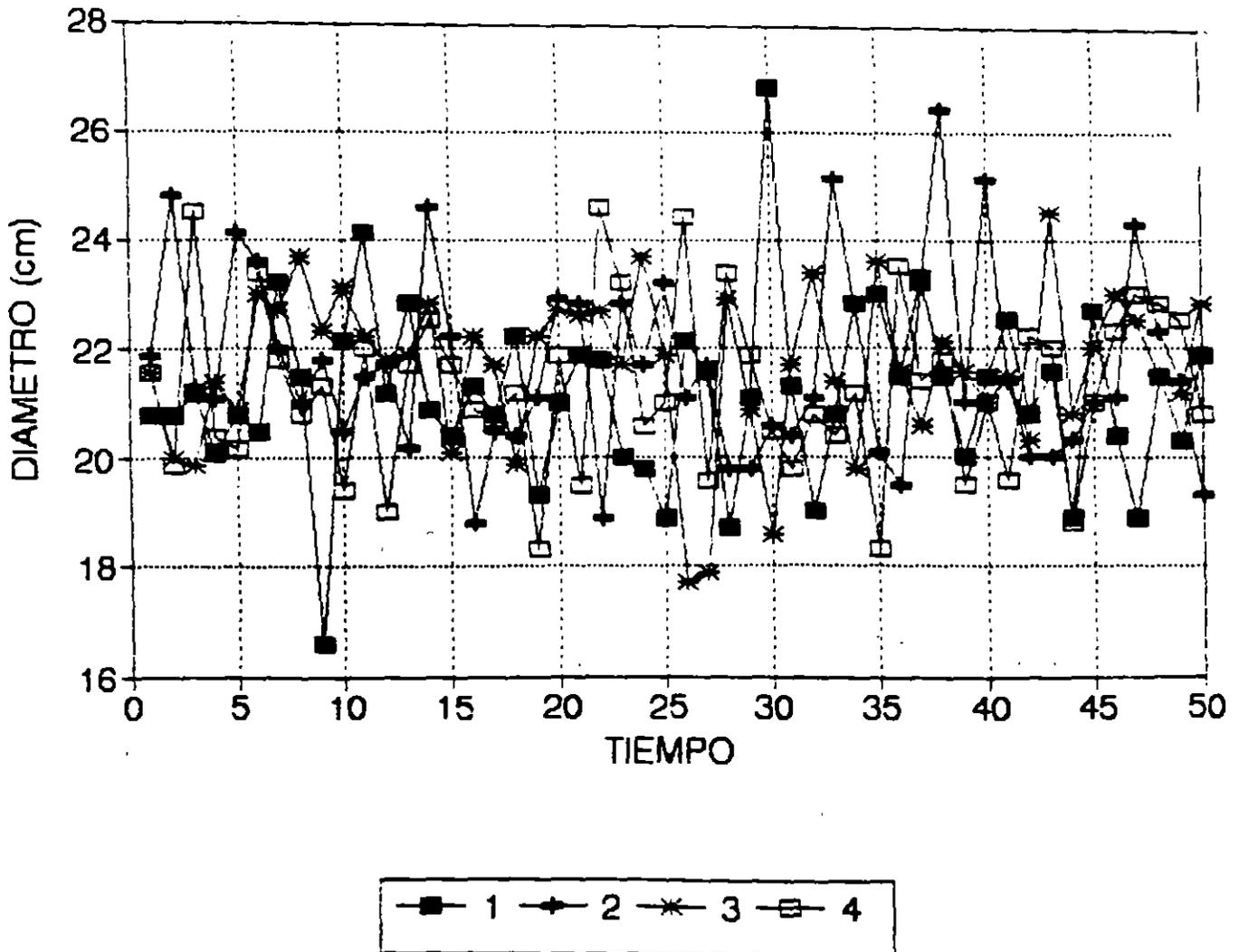
COMPARE LOS DIAMETROS PRODUCIDOS POR LOS EMPLEADOS 1 Y 2 USANDO GRAFICAS DE CAJA

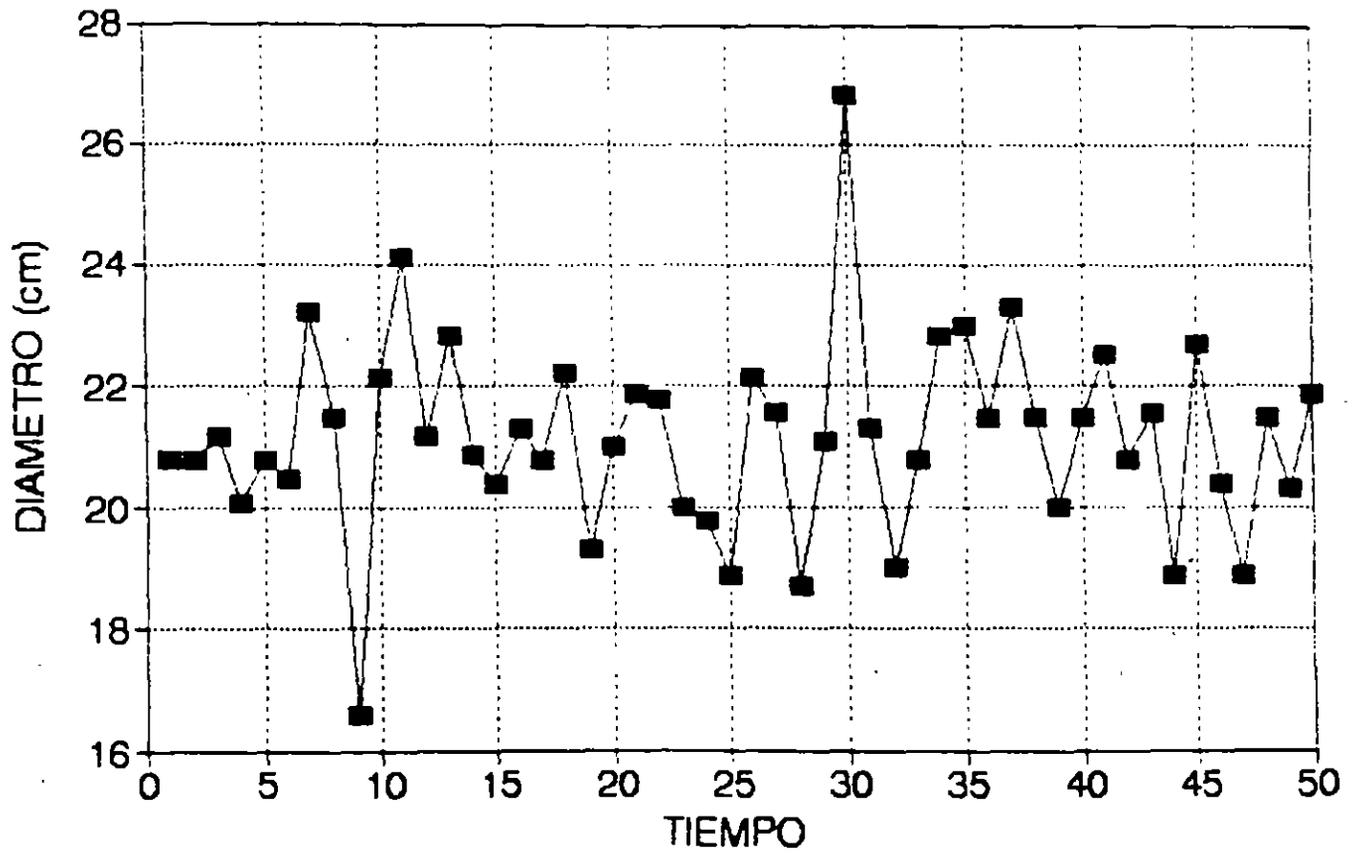
GRAFICAS EN EL TIEMPO

REPRESENTACION GRAFICA DEL CAMBIO OBSERVADO EN UNA VARIABLE A LO LARGO DEL TIEMPO, CON EL FIN DE DETECTAR LA OCURENCIA DE CAMBIOS EN LA VARIABLE O LA PRESENTACION DE TENDENCIAS O PATRONES SISTEMATICOS DE LA MISMA

EJEMPLO

ELABORE UNA GRAFICA EN EL TIEMPO PARA LOS DIAMETROS PRODUCIDOS POR CADA UNO DE LOS EMPLEADOS





—■— 1

MEDIDAS DESCRIPTIVAS

MEDIDAS O INDICES QUE RESUMEN UNA O MAS CARACTERISTICAS DE UN CONJUNTO DE DATOS

MEDIDAS COMUNES: (1) *DE LOCALIZACION* (MEDIANA, MEDIA) Y (2) *DE DISPERSION* (RANGO, VARIANZA, DESVIACION ESTANDAR, COEFICIENTE DE VARIACION).

MEDIA DE LA MUESTRA

CENTRO DE MASA O PROMEDIO DE UN CONJUNTO DE DATOS

MEDIA \bar{X} DE n OBSERVACIONES (DENOTADAS POR X_j , $j=1,2,\dots,n$):

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_j$$

EJEMPLO

DETERMINE LA MEDIA DEL CONJUNTO DE DATOS:

3, 10, 16, 1, 5, 14, 11, 6

$$\sum_{j=1}^n X_j = \underline{\hspace{2cm}} \Rightarrow \bar{X} = \frac{66}{8} = 8.25$$

RANGO DE LA MUESTRA

MEDIDA DE DISPERSION DEFINIDA COMO:

$$R = \text{Valor máximo} - \text{valor mínimo}$$

EJEMPLO

DETERMINE EL RANGO DEL CONJUNTO DE DATOS:

3, 10, 16, 1, 5, 14, 11, 6

$$R = \underline{\quad} - \underline{\quad} = \underline{\quad}$$

El rango se suele usar en aplicaciones que involucran conjuntos pequeños de datos ($n < 10$). Tiene el problema de que no utiliza de manera explícita a los "valores intermedios" de los datos.

VARIANZA

MEDIDA DE DISPERSION QUE EXPRESA EL MOMENTO DE INERCIA DE UN CONJUNTO DE DATOS

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2 = \frac{1}{n-1} \left\{ \sum_{j=1}^n X_j^2 - n\bar{X}^2 \right\}$$

EJEMPLO

DETERMINE LA VARIANZA DEL CONJUNTO DE DATOS:

3, 10, 16, 1, 5, 14, 11, 6

Observe que la primer fórmula implica:

1. Calcular las desviaciones respecto a la media:

3.0	10.0	16.0	1.0	5.0	14.0	11.0	6.0	2.75
<u>-8.25</u>	<u>-2.25</u>							

La suma de las desviaciones es: _____

2. Elevar al cuadrado las desviaciones:

27.5625 3.0625 60.0625 52.625 10.5625 33.0625 7.5625 5.0625

3. Sumar los cuadrados de las desviaciones y el total, dividirlo entre n-1 (para generar un estimador insesgado).

$$\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2 = 199.5$$

$$\Rightarrow s^2 = \frac{199.5}{n-1} = 28.5$$

DESVIACION ESTANDAR

MEDIDA DE DISPERSION DEFINIDA COMO LA RAIZ CUADRADA DE LA VARIANZA. SE EXPRESA EN LAS MISMAS UNIDADES QUE LA VARIABLE BAJO ANALISIS

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_j X_j^2 - n\bar{X}^2}{n-1}}$$

EXPRESION ALTERNATIVA DE LA VARIANZA (ESTIMADOR SESGADO)

$$s_n^2 = \sigma_{\text{RMS}}^2 = \frac{\sum_j X_j^2 - n\bar{X}^2}{n}$$

RMS: Root mean square deviation

$$\Rightarrow s_n = \sigma_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_j X_j^2 - n\bar{X}^2}{n}}$$

Relación entre s^2 y s_n^2

$$s^2 = \frac{n}{n-1} s_n^2$$

CALCULO PARA DATOS AGRUPADOS

Sean m : número de subgrupos (intervalos de clase)

n : número total de observaciones

X_i : marca de la clase i

f_j : frecuencia de la clase l

$$\bar{X} = \frac{\sum_{l=1}^m f_l X_l}{n}$$

$$s^2 = \frac{\sum_{l=1}^m f_l X_l^2 - n\bar{X}^2}{n-1}$$



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

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V: ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA : VARIABILIDAD DE UN PROCESO Y ESTIMACION

EXPOSITOR: M. EN I. OCTAVIO ESTRADA CASTILLO
1996

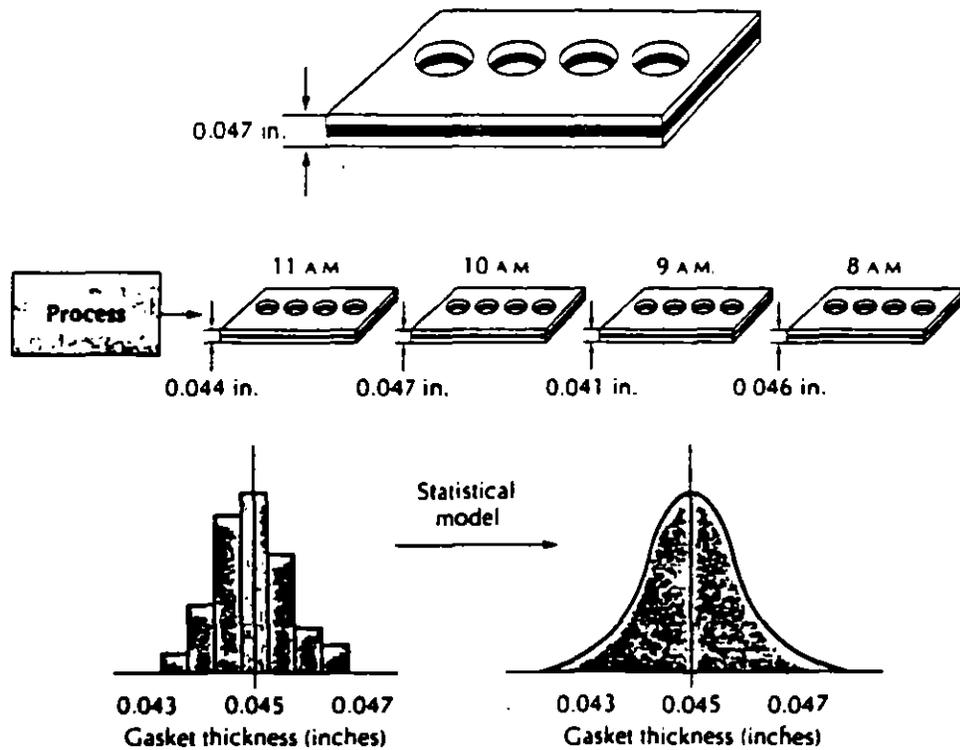
TEMA 3:
**VARIABILIDAD DE UN PROCESO
Y ESTIMACION**

EVOLUCION DE UN PROCESO EN EL TIEMPO

LOS DATOS PARA ANALIZAR Y CONTROLAR UN PROCESO, ASI COMO PREDECIR EL COMPORTAMIENTO DEL MISMO, SE VAN GENERANDO A LO LARGO DEL TIEMPO

EJEMPLO

SE DESEA CONTROLAR ESTADISTICAMENTE EL PROCESO DE PRODUCCION DE UNA PIEZA. LA VARIABLE DE INTERES ES SU ESPESOR. PARA ELLO, SE TOMARAN MEDICIONES CADA HORA



¡EL PROCESO MAS PERFECTO PRESENTA VARIACION!

VARIACION COMUN

VARIACION INHERENTE A UN PROCESO. ES PRECISO CONSIDERARLA PARA ANALIZAR, CONTROLAR Y PREDECIR EL COMPORTAMIENTO DE UN PROCESO

EJEMPLO

SE DESEA CONTROLAR UN PROCESO. SE EFECTUAN MEDICIONES DE LA CARACTERISTICA DE CALIDAD CADA HORA PARA ANALIZAR SU LOCALIZACION Y SU DISPERSION. LOS DATOS DE LAS TRES PRIMERAS HORAS SON:

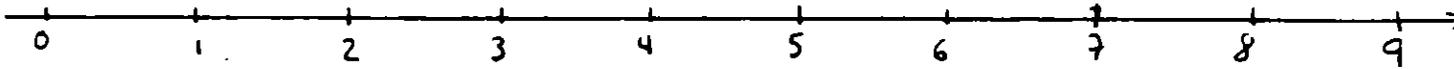
HO RA	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
7:00	4	5	5	4	8	4	3	7
8:00	0	2	1	5	3	2	0	3
9:00	6	9	9	7	8	7	9	9

LA MEDIA DEL PROCESO ES:

LA VARIANZA Y LA DESVIACION ESTANDAR SON:

EJEMPLO

ANALICE EL EJEMPLO ANTERIOR COMPARANDO LOS DIAGRAMAS DE CAJA PARA CADA UNA DE LAS HORAS



LA VARIABILIDAD DE TODO EL CONJUNTO DE DATOS DEPENDE DE:

- VARIACION DENTRO DE LOS SUBGRUPOS (*WITHIN VARIABILITY*):
ATRIBUIBLE A CAUSAS COMUNES
- VARIACION ENTRE LOS SUBGRUPOS (*BETWEEN VARIABILITY*):
ATRIBUIBLE A CAUSAS ESPECIALES

EJEMPLO

DETERMINE Y GRAFIQUE (EN EL TIEMPO) LA MEDIA, EL RANGO Y LA DESVIACION ESTANDAR PARA CADA UNA DE LAS HORAS DEL EJEMPLO ANTERIOR

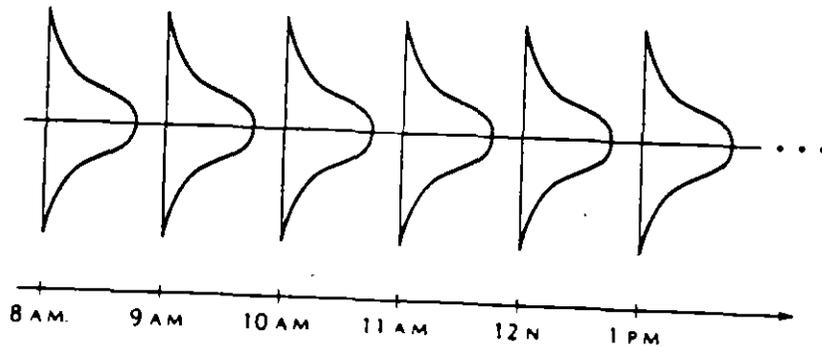
HO RA	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	\bar{X}	R	s
7:00	4	5	5	4	8	4	3	7			
8:00	0	2	1	5	3	2	0	3			
9:00	6	9	9	7	8	7	9	9			

PROCESO ESTABLE (O BAJO CONTROL)

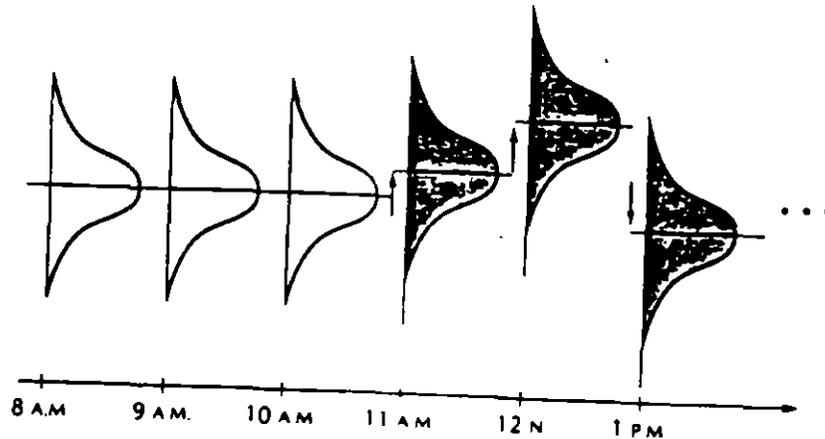
PROCESO SUJETO SOLO A VARIACION COMUN. PERMITE PREDECIR EL COMPORTAMIENTO DE UN PROCESO

PROCESO INESTABLE (O FUERA DE CONTROL)

PROCESO QUE TIENE VARIACION ESPECIAL Y COMUN. NO ES POSIBLE PREDECIR SU COMPORTAMIENTO

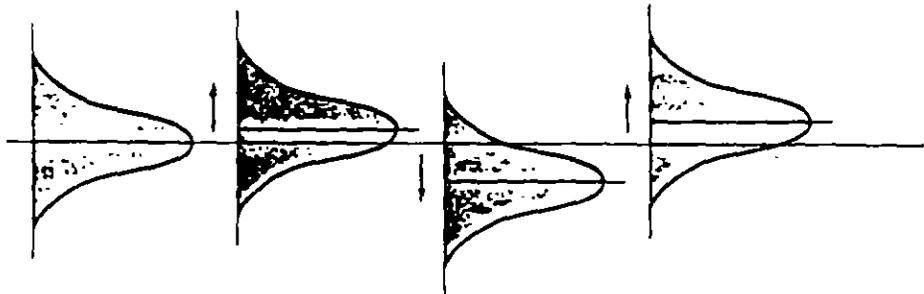


(a)

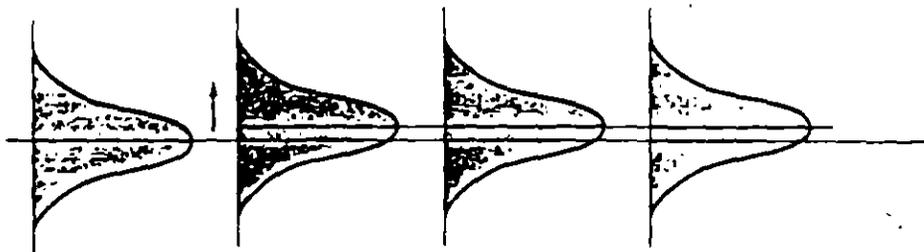


Shifting process mean beginning at 11 AM

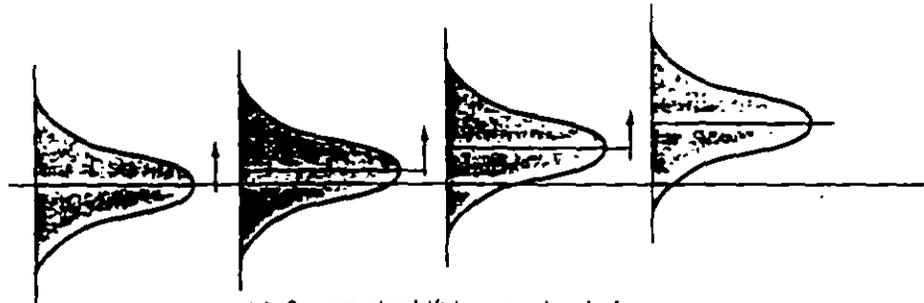
CAMBIOS EN LA LOCALIZACION (CONSIDERANDO LA MEDIA DEL PROCESO)



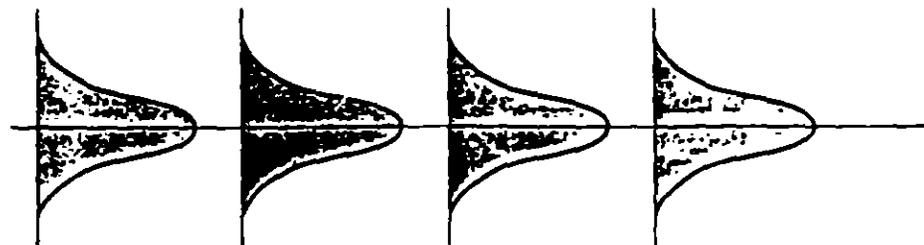
(a) Erratic shifts in mean level of process.



(b) Abrupt and sustained shift in mean level of process.



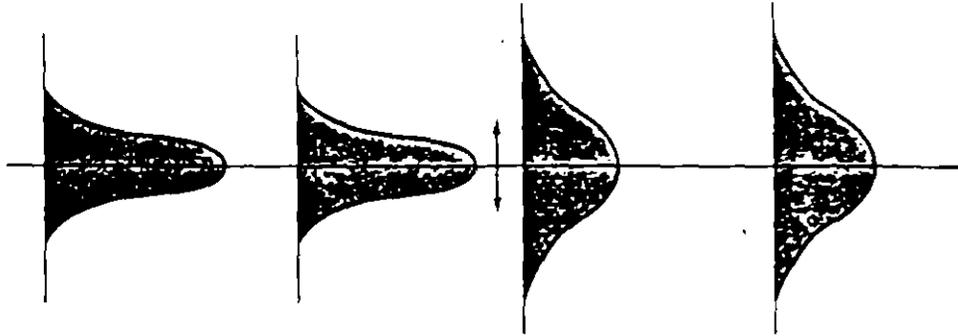
(c) Systematic shift in mean level of process.



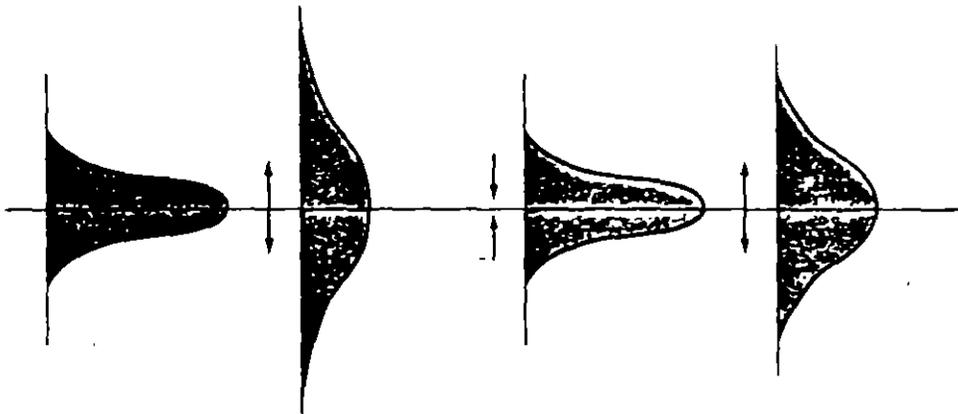
(d) Constant mean level for process: in control.

Time

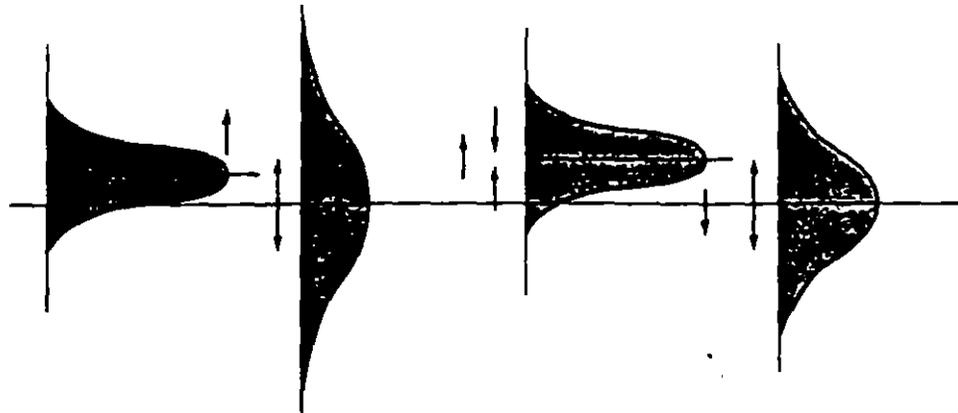
CAMBIOS EN LA DISPERSION DE UN PROCESO



(a) Sustained shift in process variation.



(b) Erratic shifts in process variation.



(c) Erratic shifts in both process mean and process variation.

Time →

EJEMPLO

UN PROCESO DE PRODUCCION ESTABLE GENERA UNA
CARACTERISTICA DE CALIDAD SIGUE UNA DISTRIBUCION NORMAL
CON $\mu=30$ Y $\sigma = 10$.

- a. DETERMINE EL PORCENTAJE DE PIEZAS PARA LAS CUALES $X > 60$
- b. DETERMINE EL PORCENTAJE DE PIEZAS PARA LAS CUALES $X \geq 60$
- c. DETERMINE EL PORCENTAJE DE PIEZAS ENTRE 10 Y 50

EL TAZON DE SHEWHART (SHEWHART'S BOWL)

SHEWHART REALIZO UN EXPERIMENTO DE SIMULACION QUE PERMITIO DESARROLLAR LAS BASES DEL CONTROL ESTADISTICO DE PROCESOS.

EL SIGUIENTE EXPERIMENTO, QUE REPITE EL EXPERIMENTO DE SHEWHART, FUE REALIZADO EN COMPUTADORA:

EJEMPLO (TAZON DE SHEWHART)

CONSIDERE UN PROCESO ESTABLE QUE GENERA UNA CARACTERISTICA DE CALIDAD CON DISTRIBUCION NORMAL ($\mu=30$ Y $\sigma = 10$).

- a. SIMULE 1000 SUBGRUPOS DE TAMAÑO 4 (LA TABLA 1 MUESTRA LOS PRIMEROS 25 SUBGRUPOS)
- b. ELABORE EL HISTOGRAMA DE LAS 4,000 OBSERVACIONES

LOS PARAMETROS DE LA POBLACION SON:

DE **LOCALIZACION**, LA _____ DE LA POBLACION, μ
DE **DISPERSION**, _____ DE LA POBLACION, σ

EN EL EJEMPLO SE CONOCE LA POBLACION, EN LA PRACTICA, ESTO NO SUCEDE, ES NECESARIO ESTIMAR LOS PARAMETROS DE LA POBLACION. PARA ESTIMAR:

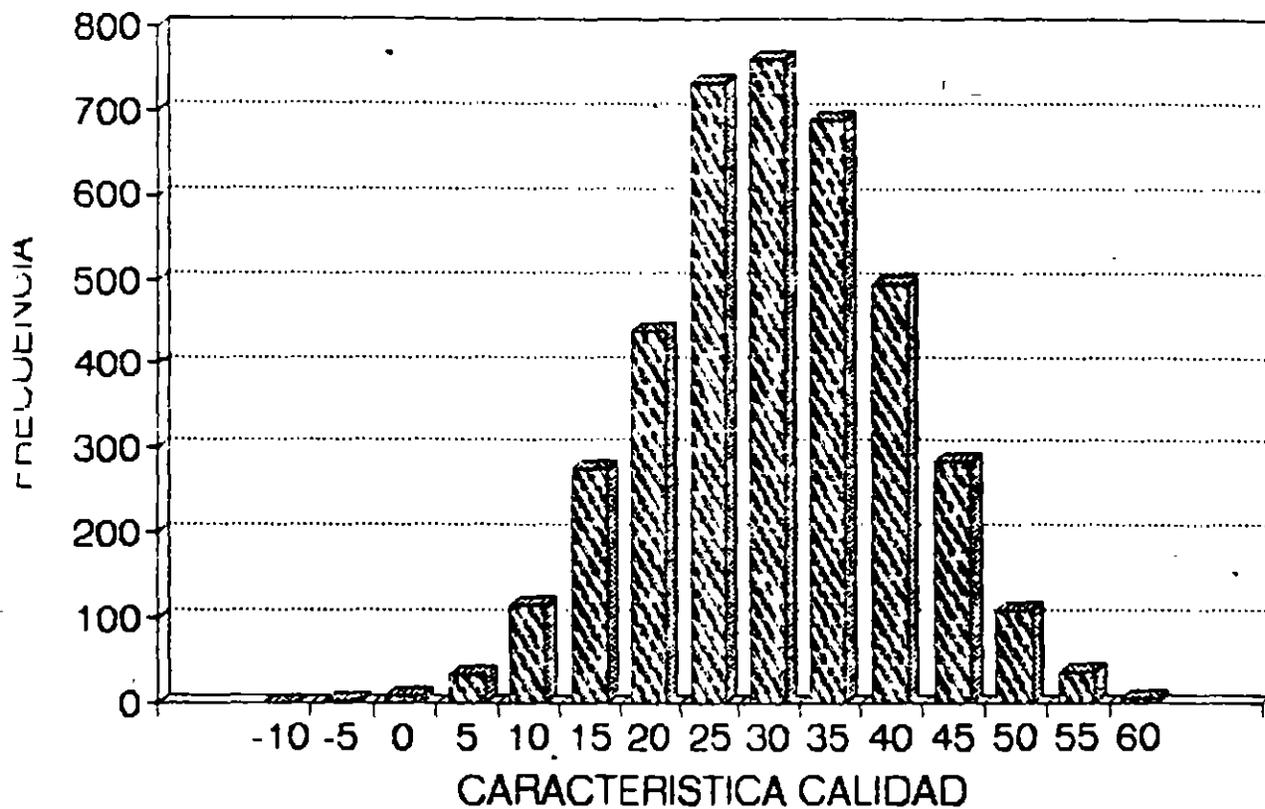
μ SE PUEDE USAR LA _____ DE LA MUESTRA \bar{X}
 σ SE PUEDE USAR EL _____ R DE LA MUESTRA O LA
_____ S DE LA MUESTRA

TABLA 1 TAZON DE SHEWHART: 100 DATOS (25 SUBGRUPOS)

SUB-GRUPO					xbar	R	s
1	48.62	18.51	21.97	23.93	28.2575	30.1100	13.7587
2	29.74	21.92	25.99	28.59	26.5600	7.8200	3.4683
3	30.81	45.12	39.29	36.16	37.8450	14.3100	5.9818
4	32.94	26.22	30.54	52.03	35.4325	25.8100	11.4090
5	24.3	35.89	38.07	47.88	36.5350	23.5800	9.5812
6	34.47	26.82	32.53	29.1	30.7300	7.6500	3.4241
7	48.11	33.1	38.2	26.54	36.5050	21.5700	9.0916
8	32.97	36.48	17.84	24.82	28.0275	18.6400	8.3655
9	24.48	36.95	16.81	26.63	26.2175	20.1400	8.3041
10	21.14	29.5	32.68	27.2	27.6300	11.5400	4.8753
11	16.94	24.64	26.09	7.39	18.7650	18.7000	8.5808
12	22.66	44.19	24.64	24.77	29.0650	21.5300	10.1295
13	19.78	21.59	24.77	23.79	22.4825	4.9900	2.2392
14	12.05	32.83	34.38	23.76	25.7550	22.3300	10.2673
15	29.29	30.2	43.8	24.2	31.8725	19.6000	8.3785
16	37.37	41.24	34.63	30.87	36.0275	10.3700	4.3789
17	25.44	31.31	35.05	20.43	28.0575	14.6200	6.4421
18	33.47	12.27	33.21	24.31	25.8150	21.2000	9.9836
19	35	33.67	41.08	20.53	32.5700	20.5500	8.6506
20	36.89	30.26	36.04	27.38	32.6425	9.5100	4.5809
21	29.74	15.48	22.81	28.39	24.1050	14.2600	6.4854
22	25.79	25.25	28.97	33.39	28.3500	8.1400	3.7394
23	42.63	31.15	22.02	29.41	31.3025	20.6100	8.5261
24	23.54	44.62	32.26	29.02	32.3600	21.0800	8.9306
25	37.81	25.67	42.05	36.54	35.5200	16.3900	6.9780

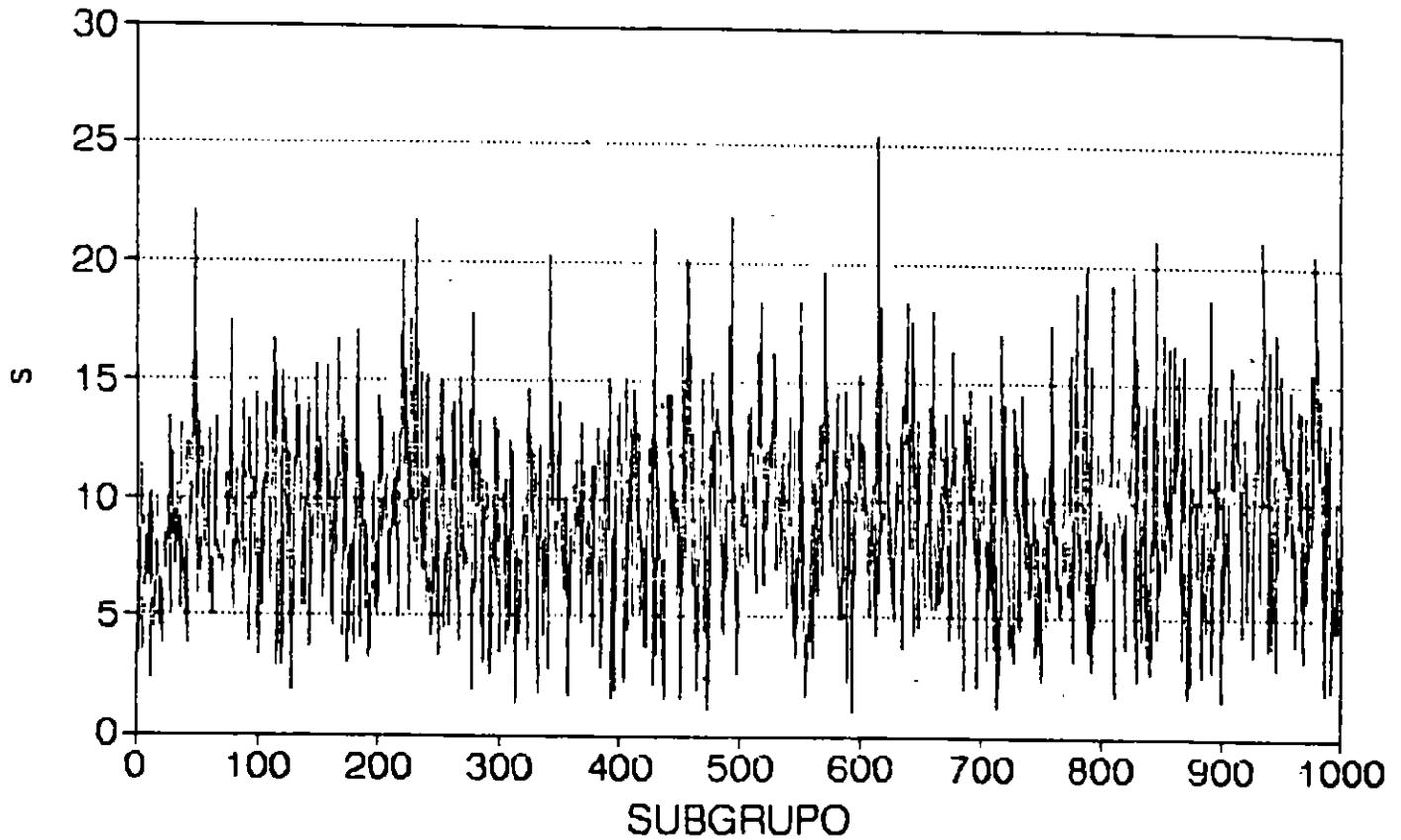
3-10
23

FIG. 1 HISTOGRAMA DE OBSERVACIONES (n=4,000)



3-11

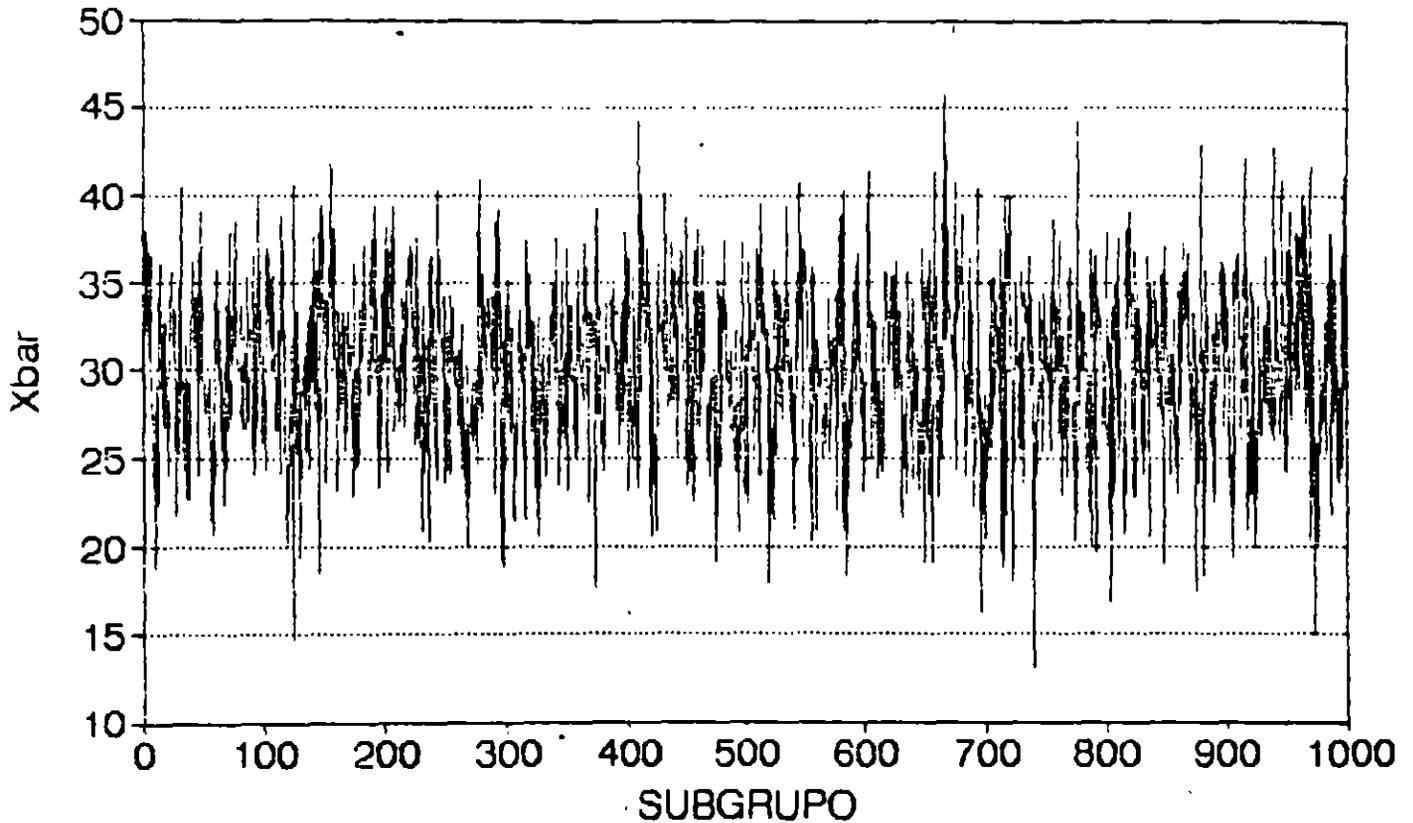
DISPERSION: DESVIACIONES ESTANDAR DEL TAZON DE SHEWHART



LA DESVIACION ESTANDAR DE LAS MUESTRAS ES UNA VARIABLE ALEATORIA:

- CON MEDIA (PROMEDIO) DE 9.160553
- CON DISPERSION (VALOR MAS ALTO: 25.36963, VALOR MAS BAJO: 0.968745)

**LOCALIZACION: MEDIAS DE LAS MUESTRAS DEL
TAZON DE SHEWHART**

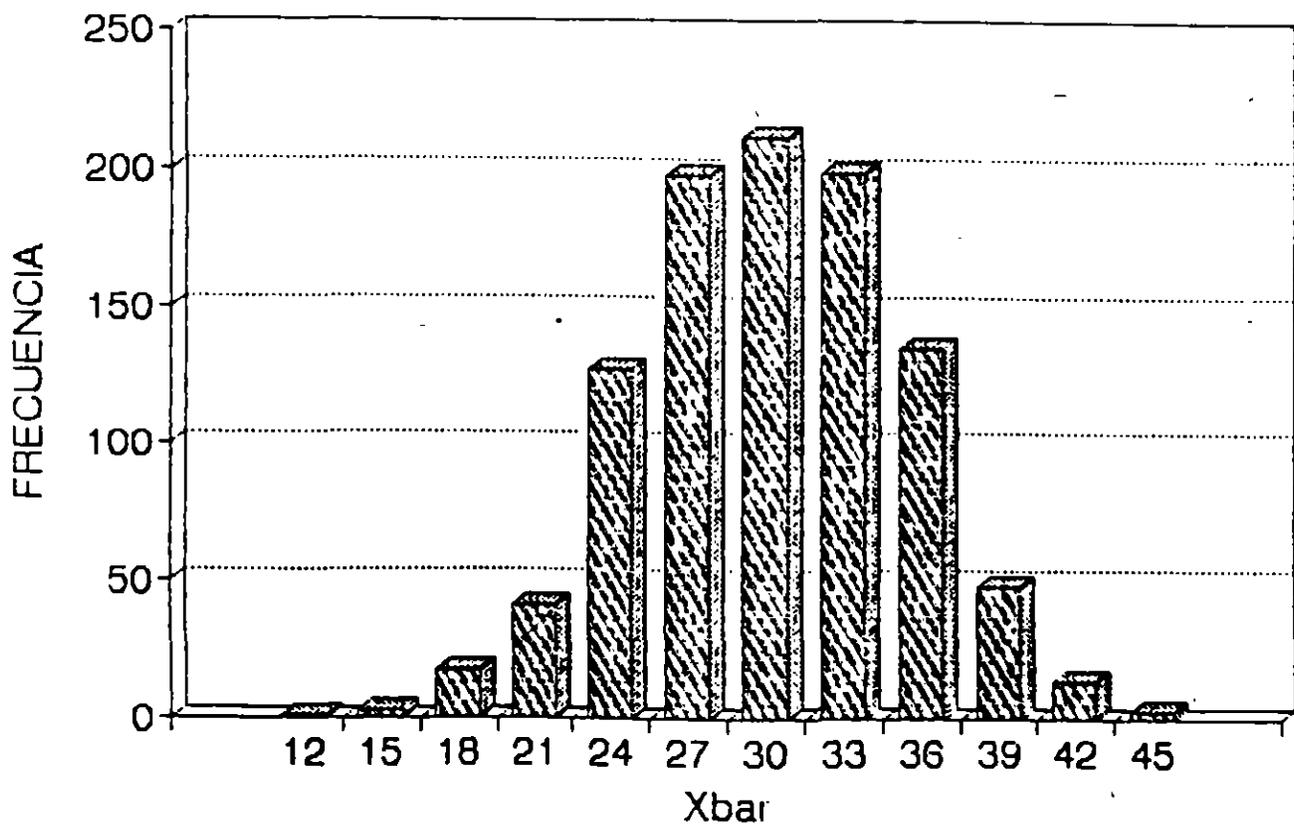


LA MEDIA DE LAS MUESTRAS ES UNA VARIABLE ALEATORIA:

- CON MEDIA (PROMEDIO) DE 30.0754
- CON DISPERSION (VALOR MAS ALTO: 45.6775, VALOR MAS BAJO: 12.97)

HISTOGRAMA Xbar (n=1,000)

TAZON DE SHEWHART.



COMPORTAMIENTO DE LA MEDIA DE LAS MUESTRAS
(TEOREMA DEL LIMITE CENTRAL)

LA MEDIA DE LAS MUESTRAS \bar{X} (INDEPENDIEMENTE DE LA DISTRIBUCION DE LA VARIABLE ORIGINAL) ES ASINTOTICAMENTE NORMAL:

$$\bar{X} \rightarrow \text{NORMAL, CON}$$
$$\mu_{\bar{X}} \approx \mu \quad \text{Y} \quad \sigma_{\bar{X}} \approx \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

EJEMPLO

PARA EL EXPERIMENTO DE SHEWHART, DETERMINE LA PROBABILIDAD DE QUE LA MEDIA DE UN SUBGRUPO:

- a. SEA MAYOR QUE 60 (SI $n = 4$)
- b. SEA MAYOR QUE 60 (SI $n = 9$)
- c. ESTE ENTRE 20 Y 50 (SI $n = 4$)
- d. ESTE ENTRE 20 Y 50 (SI $n = 9$)

RELACION ENTRE σ Y s

SI LA CARACTERISTICA DE CALIDAD SIGUE UNA DISTRIBUCION NORMAL, ENTONCES LA DESVIACION ESTANDAR DE LA MUESTRA s ES UNA VARIABLE ALEATORIA CUYA MEDIA ES:

$$\bar{s} = c_4\sigma$$

c_4 : constante que depende del tamaño de los subgrupos (se presenta en la tabla C del apéndice 3)

EJEMPLO

PARA LOS 1000 SUBGRUPOS OBSERVADOS EN EL EXPERIMENTO DE SIMULACION DEL TAZON DE SHEWHART SE OBTUVO $\bar{s} = 9.160553$.
ESTIME:

- a. LA DESVIACION ESTANDAR DE LA CARACTERISTICA DE CALIDAD
- b. LA DESVIACION ESTANDAR DE LAS MEDIAS DE LAS MUESTRAS

UTILICE LA DESVIACION ESTANDAR DE LA MUESTRA CUANDO EL TAMAÑO DE LOS SUBGRUPOS ES MAYOR QUE 10

RELACIONES ENTRE μ Y \bar{X}

$$\mu = \mu_{\bar{X}}$$

POR LO TANTO:

$$\hat{\mu} = \bar{X}$$

\bar{X} : promedio de valores de \bar{X}

EJEMPLO

PARA LOS 1000 SUBGRUPOS OBSERVADOS EN EL EXPERIMENTO DE SIMULACION DEL TAZON DE SHEWHART SE OBTUVO $\Sigma \bar{X} = 30,075.54$

- a. ESTIME μ
- b. LA PROBABILIDAD DE QUE X SEA MAYOR QUE 60
- c. LA PROBABILIDAD DE QUE X ESTE ENTRE 10 Y 50
- d. LA PROBABILIDAD DE QUE LA MEDIA DE UNA MUESTRA SEA MAYOR QUE 60
- e. LA PROBABILIDAD DE QUE LA MEDIA DE UNA MUESTRA ESTE ENTRE 10 Y 50



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

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V: ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA : DIAGRAMAS DE CONTROL PARA VARIABLES

EXPOSITOR: M. EN I. OCTAVIO ESTRADA CASTILLO

1996

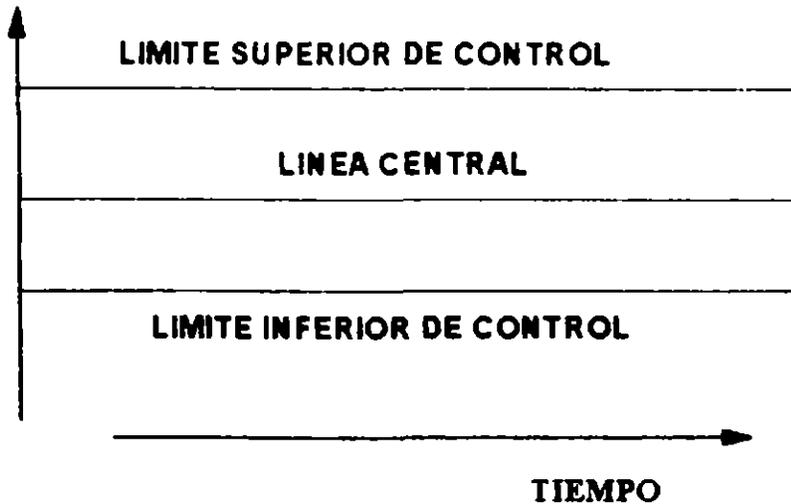
TEMA 4:
DIAGRAMAS DE CONTROL PARA VARIABLES

DIAGRAMA DE CONTROL

HERRAMIENTA GRAFICA QUE AYUDA A DETECTAR LA PRESENCIA DE CAUSAS ESPECIALES O ASIGNABLES DE CAMBIO EN EL PATRON DE VARIACION DE UNA CARACTERISTICA DE CALIDAD

COMPONENTES DE UN DIAGRAMA DE CONTROL

OBSERVACIONES



REGLA DE DECISION

SI UN PUNTO RELACIONADO CON ALGUN SUBGRUPO CAE FUERA DE LOS LIMITES DE CONTROL, SE CONSIDERA QUE EL SUBGRUPO ES "ANORMAL": HAY EVIDENCIA DE UN CAMBIO EN EL PROCESO

EJEMPLO

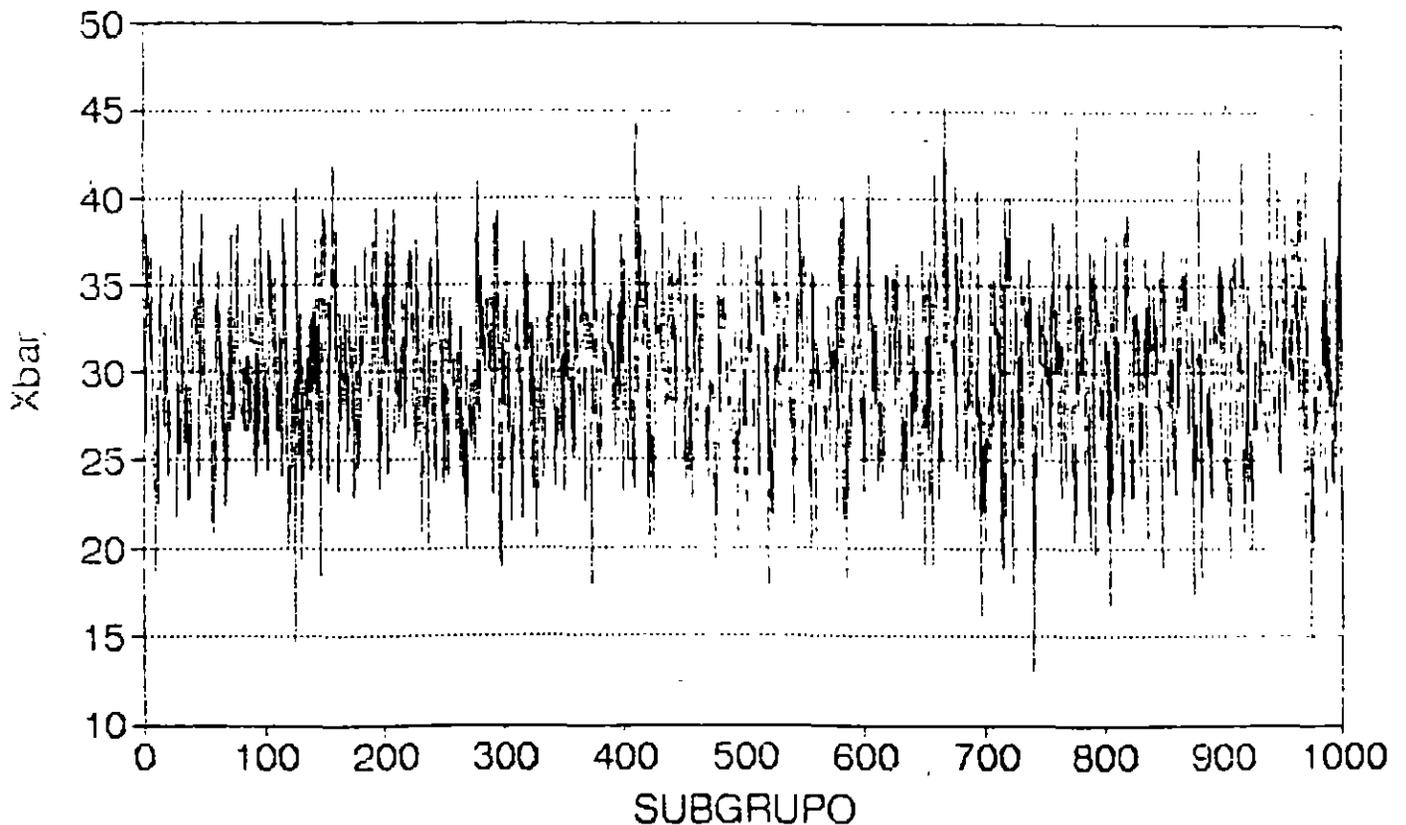
EL DIAGRAMA DE CONTROL (USANDO LA CONVENCION USUAL EN NORTEAMERICA) PARA LAS MEDIAS DE LAS MUESTRAS (\bar{X}) SI LA CARACTERISTICA DE CALIDAD ES NORMAL CON $\mu = 30$, $\sigma = 10$ Y LOS SUBGRUPOS SON DE TAMAÑO $n = 4$ TIENE LAS SIGUIENTES CARACTERISTICAS:

$$LC = 30$$

$$LSC = 45$$

$$LIC = 15$$

EL DIAGRAMA DE CONTROL PARA LAS MEDIAS DE LAS MUESTRAS (\bar{X}) DE LOS 1,000 SUBGRUPOS DEL TAZON DE SHEWHART (VARIABLE ORIGINAL: NORMAL CON $\mu = 30$, $\sigma = 10$) ES:



PUNTOS FUERA DE CONTROL:

1. El punto 127, para el cual $\bar{X} = 14.7375$.
2. El punto 669, para el cual $\bar{X} = 45.6775$, y
3. El punto 744, para el cual $\bar{X} = 12.97$.

SIN EMBARGO. ¡EL PROCESO ES ESTABLE!

AL APLICAR UN DIAGRAMA DE CONTROL ES POSIBLE COMETER "ERRORES"

TIPOS DE ERROR

CONCLUSION (diag. control):	ESTADO REAL DEL PROCESO:	
	Estable	Inestable
Proceso Estable	<i>ERROR TIPO I (Falsa alarma) α</i>	<i>CONCLUSION CORRECTA</i>
Proceso Inestable	<i>CONCLUSION CORRECTA</i>	<i>ERROR TIPO II (Cambio no detectado) β</i>

- LIMITES DE CONTROL MUY AMPLIOS (MUY SEPARADOS DE LA LINEA CENTRAL) REDUCEN EL ERROR TIPO I.
- LIMITES DE CONTROL MUY AMPLIOS AUMENTAN EL ERROR TIPO II.

ES NECESARIO BALANCEAR AMBOS TIPOS DE ERRORES

**CONVENCION NORTEAMERICANA PARA LIMITES DE CONTROL
(LIMITES 3-SIGMA)**

LOS LIMITES DE CONTROL SE UBICAN A UNA DISTANCIA DE ± 3 VECES LA DESVIACION ESTANDAR DE LO QUE SE ESTE CONTROLANDO (\bar{X} , R, s, MR, p, Np, ETC)

**DIAGRAMA DE CONTROL PARA \bar{X}
(μ Y σ CONOCIDOS)**

$$LC = \mu_{\bar{X}} = \mu$$

$$LSC = \mu_{\bar{X}} + 3\sigma_{\bar{X}} = \mu_{\bar{X}} + 3\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$LIC = \mu_{\bar{X}} - 3\sigma_{\bar{X}} = \mu_{\bar{X}} - 3\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

LOS LIMITES DE CONTROL SON SIMETRICOS ALREDEDOR DE LC

E. EMPLO

DETERMINE LC, LSC Y LIC PARA LAS MEDIAS DE LAS MUESTRAS (\bar{X}) PARA EL EXPERIMENTO DEL TAZON DE SHEWHART: LA CARACTERISTICA DE CALIDAD (VARIABLE ORIGINAL) ES NORMAL CON $\mu = 30$, $\sigma = 10$

$$LC = \mu_{\bar{X}} = \underline{\hspace{4cm}}$$

$$LSC = \mu_{\bar{X}} + 3\sigma_{\bar{X}} = \underline{\hspace{4cm}}$$

$$LIC = \mu_{\bar{X}} - 3\sigma_{\bar{X}} = \underline{\hspace{4cm}}$$

PARA FACILITAR CALCULOS DE $3\sigma_{\bar{X}}$, LA TABLA F, APENDICE 3 PRESENTA VALORES DEL FACTOR $A = \frac{3}{\sqrt{n}}$. USANDO ESTE FACTOR:

$$LC = \mu_{\bar{X}} = \mu$$

$$LSC = \mu_{\bar{X}} + 3\sigma_{\bar{X}} = \mu + A\sigma$$

$$LIC = \mu_{\bar{X}} - 3\sigma_{\bar{X}} = \mu - A\sigma$$

La amplitud de las bandas entre la línea central y los límites de control depende de la variabilidad de los datos (medida a través de σ) y del tamaño de los subgrupos n .

DIAGRAMA DE CONTROL PARA \bar{X}
(μ Y σ DESCONOCIDOS)

$$LC = \hat{\mu}_{\bar{X}} = \hat{\mu} = \bar{\bar{X}}$$

$$LSC = \bar{\bar{X}} + 3\hat{\sigma}_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + 3\frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - 3\hat{\sigma}_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - 3\frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}$$

LOS LIMITES DE CONTROL SON SIMETRICOS ALREDEDOR DE LC

ESTIMACION DE $\hat{\sigma}_{\bar{X}}$

A PARTIR DEL RANGO DE LAS MUESTRAS:

$$\hat{\sigma}_{\bar{X}} = \frac{\bar{R}}{d_2\sqrt{n}}$$

A PARTIR DE LAS DESVIACIONES ESTANDAR DE LAS MUESTRAS:

$$\hat{\sigma}_{\bar{X}} = \frac{\bar{s}}{c_4\sqrt{n}}$$

EJEMPLO

LA SIGUIENTE TABLA MUESTRA LOS PRIMEROS 20 SUBGRUPOS DEL EXPERIMENTO DEL TAZON DE SHEWHART. DETERMINE LC, LSC Y LIC DEL DIAGRAMA DE CONTROL \bar{X} A PARTIR DE ESOS DATOS

SUB-GRUPO	X_1	X_2	X_3	X_4	\bar{X}	R	s
1	48.62	18.51	21.97	23.93	28.2575	30.11	13.7587
2	29.74	21.92	25.99	28.59	26.5600	7.82	3.4683
3	30.81	45.12	39.29	36.16	37.8450	14.31	5.9818
4	32.94	26.22	30.54	52.03	35.4325	25.81	11.4090
5	24.3	35.89	38.07	47.88	36.5350	23.58	9.6812
6	34.47	26.82	32.53	29.1	30.7300	7.65	3.4241
7	48.11	33.17	38.2	26.54	36.5050	21.57	9.0916
8	32.97	36.48	17.84	24.82	28.0275	18.64	8.3655
9	24.48	36.95	16.81	26.63	26.2175	20.14	8.3041
10	21.14	29.5	32.68	27.2	27.6300	11.54	4.8753
11	16.94	24.64	26.09	7.39	18.7650	18.70	8.5808
12	22.66	44.19	24.64	24.77	29.0650	21.53	10.1295
13	19.78	21.59	24.77	23.79	22.4825	4.99	2.2392
14	12.05	32.83	34.38	23.76	25.7550	22.33	10.2673
15	29.29	30.2	43.8	24.2	31.8725	19.60	8.3785
16	37.37	41.24	34.63	30.87	36.0275	10.37	4.3789
17	25.44	31.31	35.05	20.43	28.0575	14.62	6.4421
18	33.47	12.27	33.21	24.31	25.8150	21.20	9.9836
19	35	33.67	41.08	20.53	32.5700	20.55	8.6506
20	36.89	30.26	36.04	27.38	32.6425	9.51	4.5809

LOS TOTALES SON:

$$\sum_{j=1}^{20} \bar{X}_j = 596.7926, \quad \sum_{j=1}^{20} R_j = 344.57, \quad \sum_{j=1}^{20} s_j = 151.9911$$

PARA FACILITAR CALCULOS SE PUEDEN USAR LOS FACTORES:

$$A_2 = \frac{3}{d_2 \sqrt{n}}$$

$$A_3 = \frac{3}{c_4 \sqrt{n}}$$

CON LO QUE:

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R} \quad Y \quad LIC = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}$$

○

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_3 \bar{R} \quad Y \quad LIC = \bar{\bar{X}} - A_3 \bar{R}$$

EL FACTOR A_2 SE ENCUENTRA EN LA TABLA D, APENDICE 3

EL FACTOR A_3 SE ENCUENTRA EN LA TABLA E, APENDICE 3

DIAGRAMA DE CONTROL \bar{X}
(A PARTIR DE R)

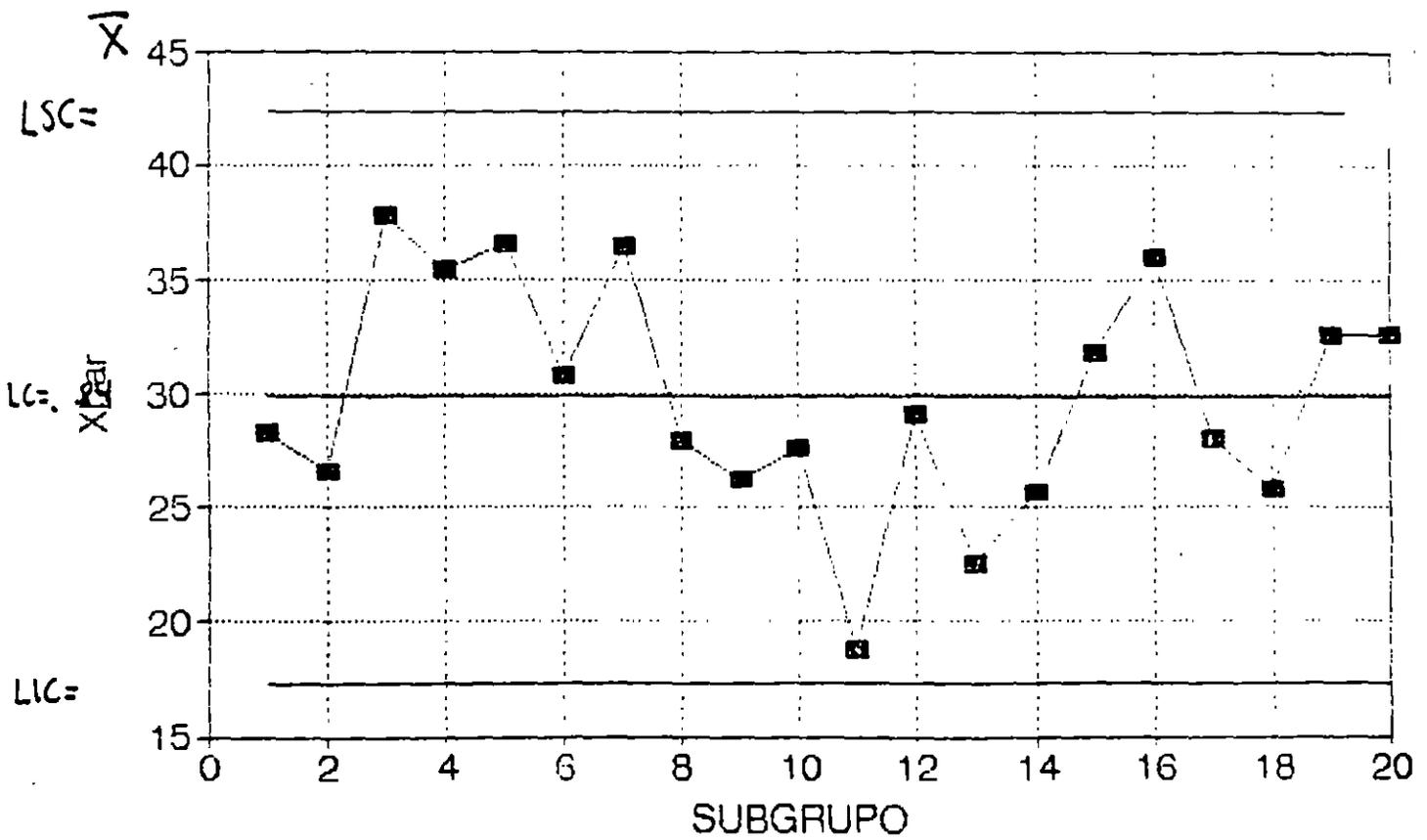


DIAGRAMA DE CONTROL \bar{X}
(A PARTIR DE 3)

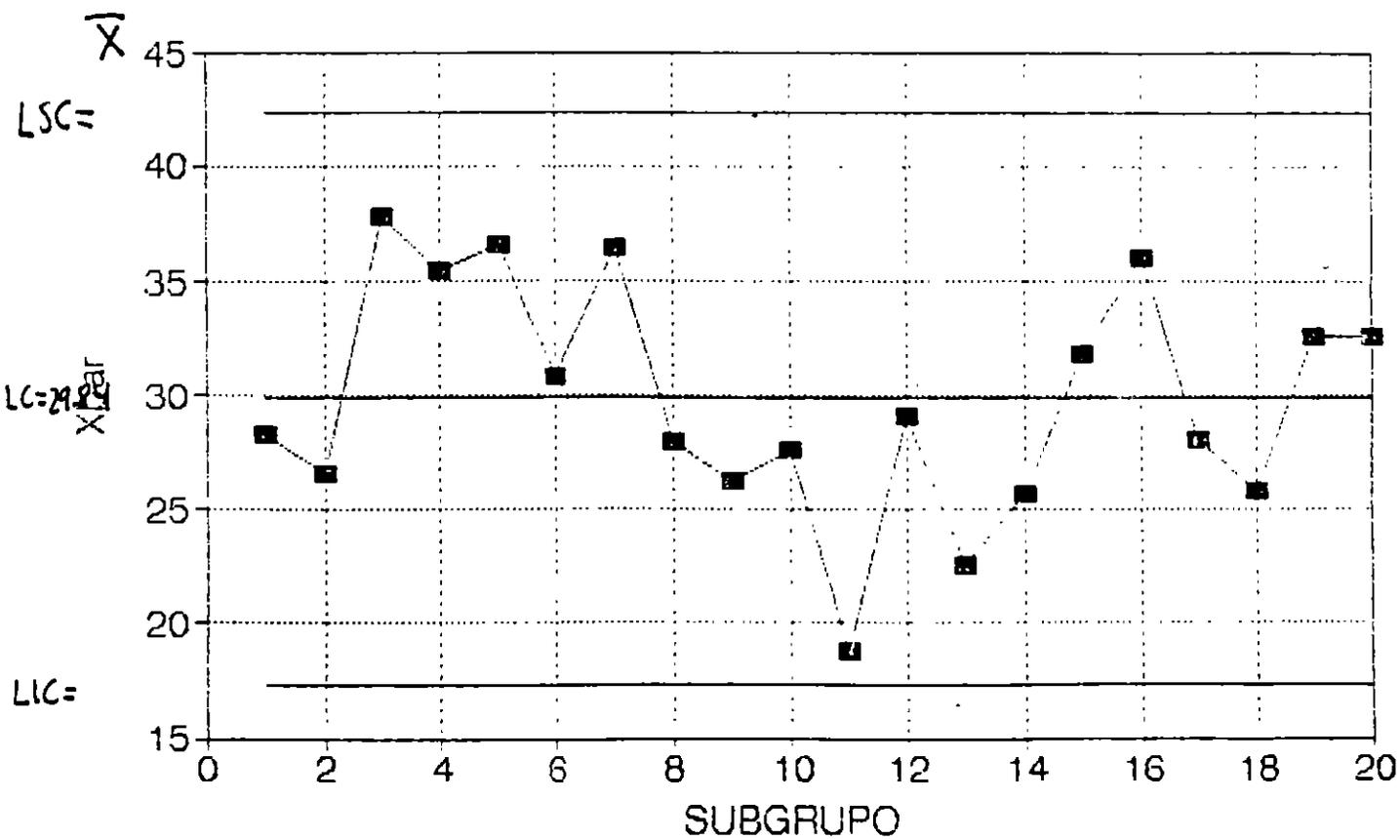


DIAGRAMA DE CONTROL PARA R

(σ CONOCIDO)

SI LA VARIABLE ORIGINAL SIGUE UNA DISTRIBUCION NORMAL.
ENTONCES:

$$LC = d_2\sigma$$

$$LSC = D_2\sigma$$

$$LIC = D_1\sigma$$

EL PARAMETRO d_2 SE ENCUENTRA EN LA TABLA C, APENDICE 3.
LOS PARAMETROS D_1 Y D_2 SE ENCUENTRAN EN LA TABLA F,
APENDICE 3

LOS LIMITES DE CONTROL NO SON SIMETRICOS RESPECTO A LC

EJEMPLO

CONSIDERE LOS PRIMEROS 20 SUBGRUPOS DEL EXPERIMENTO DEL
TAZON DE SHEWHART (VARIABLE ORIGINAL NORMAL, $\sigma = 10$).
DETERMINE LOS PARAMETROS DEL DIAGRAMA R

DIAGRAMA DE CONTROL PARA R
(σ CONOCIDO, $\sigma = 10$)

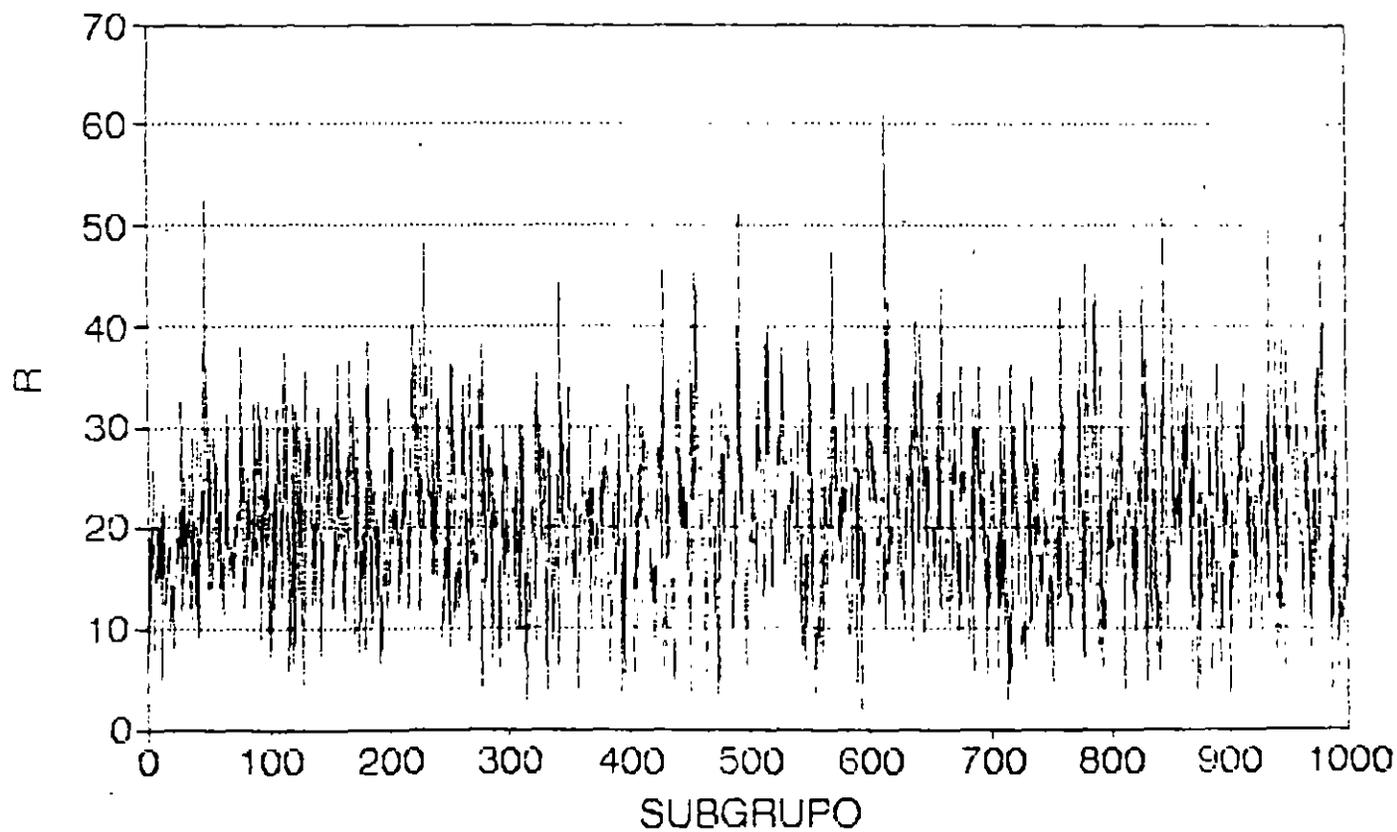


DIAGRAMA DE CONTROL PARA R
(σ DESCONOCIDO)

SI LA VARIABLE ORIGINAL SIGUE UNA DISTRIBUCION NORMAL.
ENTONCES:

$$LC = \hat{\mu}_{\bar{R}} = \bar{R}$$

$$LSC = D_4 \bar{R}$$

$$LIC = D_3 \bar{R}$$

LOS PARAMETROS D_3 Y D_4 SE ENCUENTRAN EN LA TABLA F,
APENDICE 3

LOS LIMITES DE CONTROL NO SON SIMETRICOS RESPECTO A LC

EJEMPLO

CONSIDERE LOS PRIMEROS 20 SUBGRUPOS DEL EXPERIMENTO DEL
TAZON DE SHEWHART (VARIABLE ORIGINAL NORMAL, $\sigma = 10$).
DETERMINE LOS PARAMETROS DEL DIAGRAMA R

$$\sum_{j=1}^{20} R = 344.57$$

DIAGRAMA DE CONTROL PARA R (σ DESCONOCIDO)

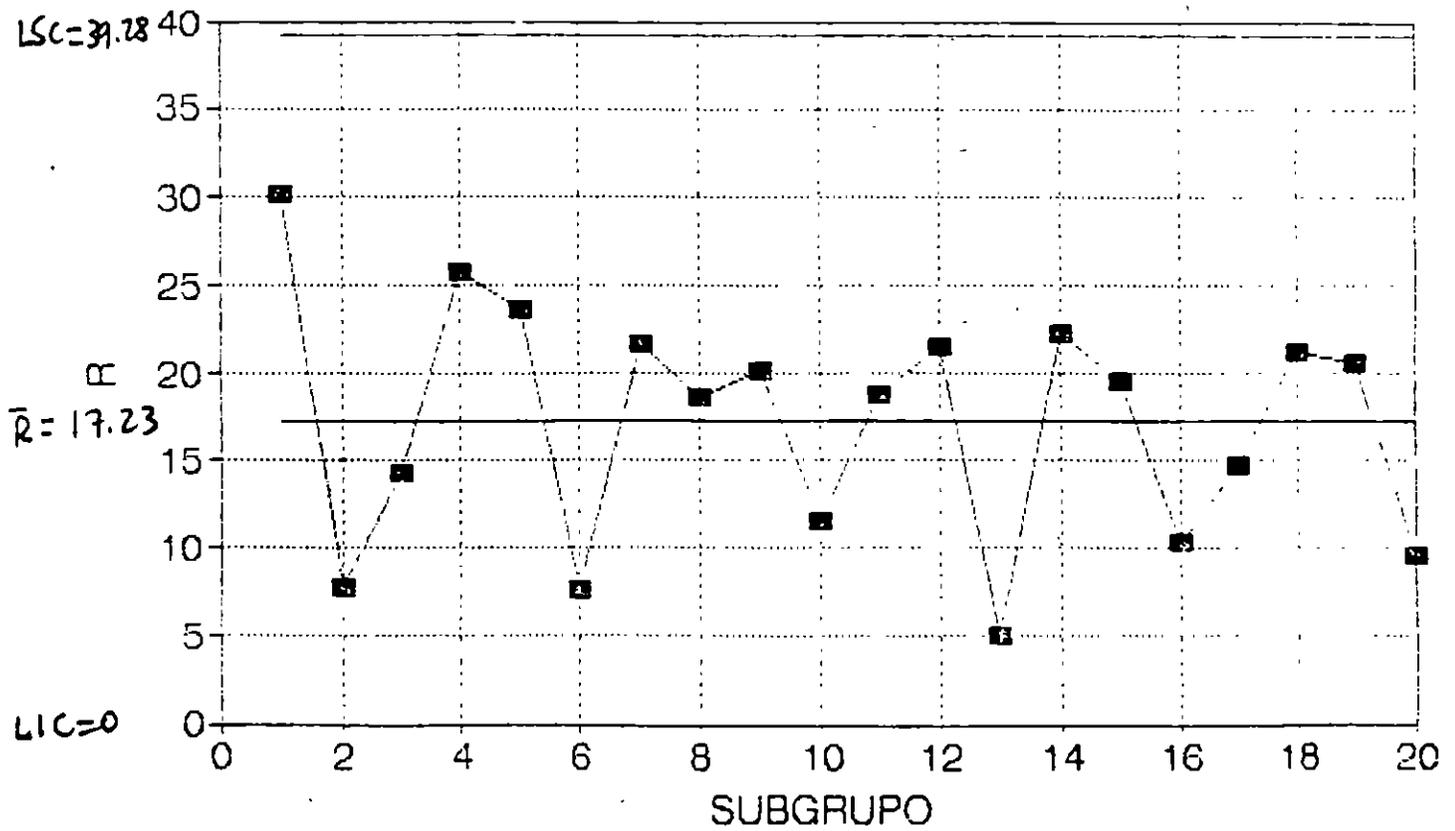


DIAGRAMA DE CONTROL PARA \bar{s}
(σ CONOCIDO)

SI LA VARIABLE ORIGINAL SIGUE UNA DISTRIBUCION NORMAL,
ENTONCES:

$$LC = c_4\sigma$$

$$LSC = B_6\sigma$$

$$LIC = B_5\sigma$$

EL PARAMETRO c_4 SE ENCUENTRA EN LA TABLA C, APENDICE 3.
LOS PARAMETROS B_5 Y B_6 SE ENCUENTRAN EN LA TABLA F,
APENDICE 3

LOS LIMITES DE CONTROL NO SON SIMETRICOS RESPECTO A LC

EJEMPLO

CONSIDERE LOS PRIMEROS 20 SUBGRUPOS DEL EXPERIMENTO DEL
TAZON DE SHEWHART (VARIABLE ORIGINAL NORMAL, $\sigma = 10$).
DETERMINE LOS PARAMETROS DEL DIAGRAMA \bar{s}

DIAGRAMA DE CONTROL PARA s
(σ CONOCIDO, $\sigma = 10$)

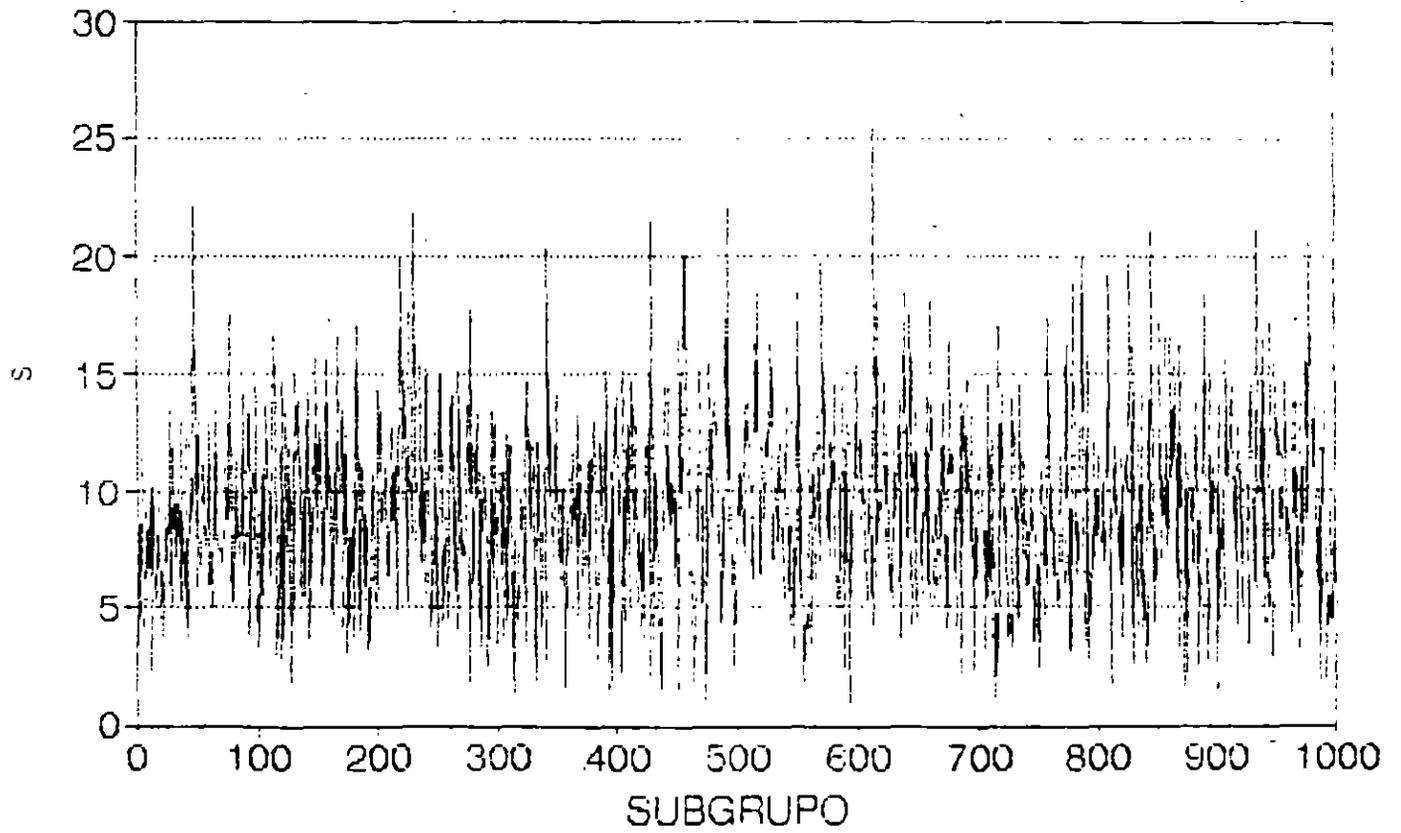


DIAGRAMA DE CONTROL PARA s
(σ DESCONOCIDO)

SI LA VARIABLE ORIGINAL SIGUE UNA DISTRIBUCION NORMAL.
ENTONCES:

$$LC = \bar{s}$$

$$LSC = B_4 \bar{s}$$

$$LIC = B_3 \bar{s}$$

LOS PARAMETROS B_3 Y B_4 SE ENCUENTRAN EN LA TABLA F,
APENDICE 3

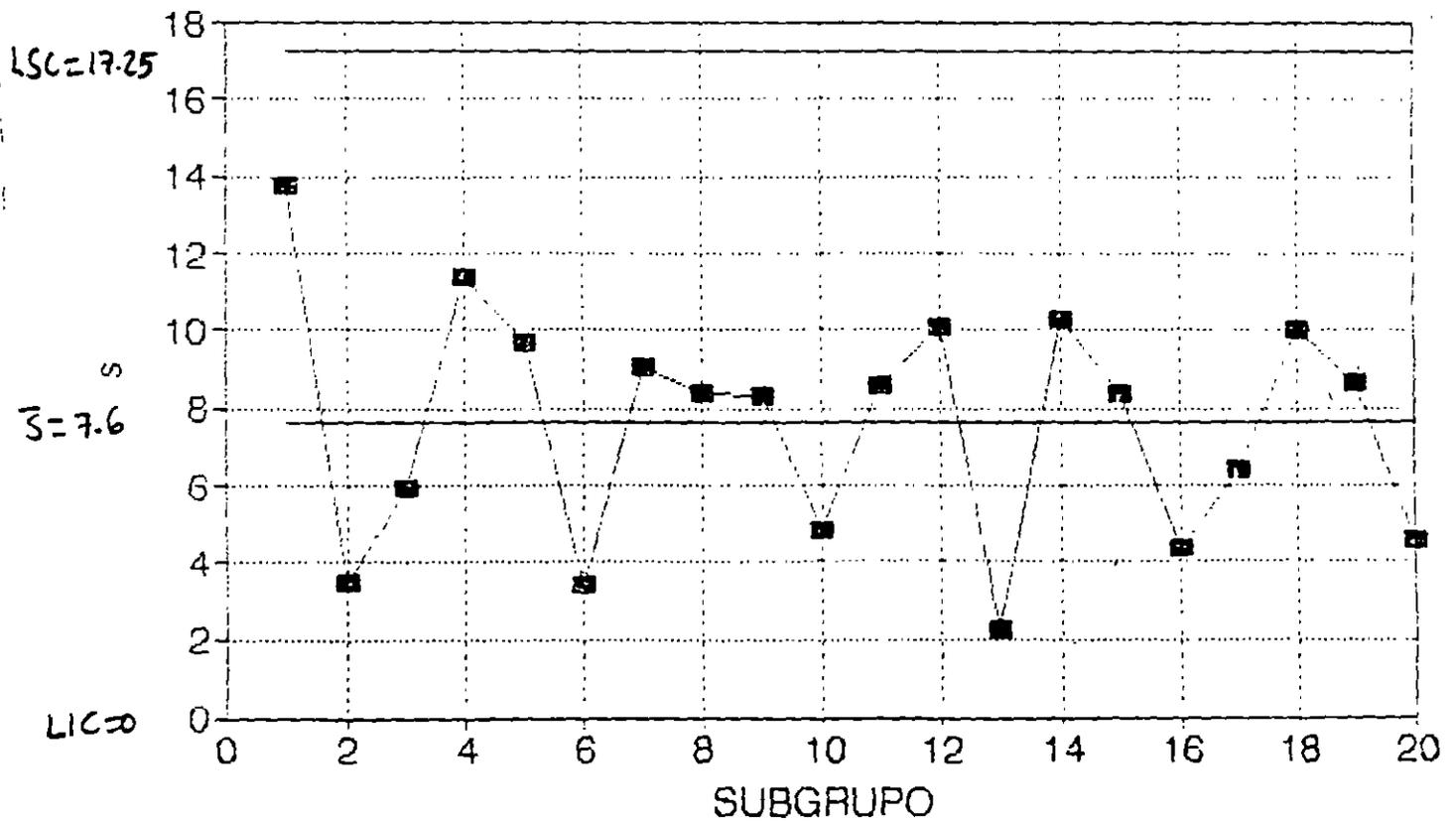
LOS LIMITES DE CONTROL NO SON SIMETRICOS RESPECTO A LC

EJEMPLO

CON BASE EN LOS PRIMEROS 20 SUBGRUPOS DEL EXPERIMENTO
DEL TAZON DE SHEWHART, DETERMINE LOS PARAMETROS DEL
DIAGRAMA s

$$\sum_{i=1}^{20} s = 151.9911$$

DIAGRAMA DE CONTROL PARA s (σ DESCONOCIDO)



ANALISIS DE UN PROCESO

PARA DETERMINAR LA ESTABILIDAD DE UN PROCESO, ES NECESARIO CONSIDERAR CONJUNTAMENTE DIAGRAMAS DE CONTROL PARA LA LOCALIZACION Y PARA LA DISPERSION

EJEMPLO

CON BASE EN LOS PRIMEROS 20 SUBGRUPOS DEL EXPERIMENTO DE SHEWHART, ¿CONSIDERA USTED QUE ES ESTABLE EL PROCESO?



FACULTAD
DE INGENIERIA

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V: ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA : ANALISIS DE ERRORES

1996

TEMA 5: ANALISIS DE ERRORES

ERROR TIPO I

ERROR QUE SE COMETE CUANDO OCURRE UNA "FALSA ALARMA": EL DIAGRAMA DE CONTROL INDICA QUE HUBO UN CAMBIO EN EL PROCESO CUANDO EN REALIDAD NO LO HUBO: EL DATO ASOCIADO A UN CIERTO SUBGRUPO (SU MEDIA, SU RANGO O SU DESVIACION ESTANDAR) CAE FUERA DE LOS LIMITES DE CONTROL, AUN CUANDO EL PARAMETRO QUE SE ESTA MONITOREANDO NO HA CAMBIADO.

EJEMPLO

CONSIDERE EL EXPERIMENTO DEL TAZON DE SHEWHART (VARIABLE ORIGINAL NORMAL, CON $\mu = 30$ Y $\sigma = 10$). PARA CONTROLAR EL PROCESO, SE OBSERVAN SUBGRUPOS DE TAMAÑO 4. SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 3-SIGMA, ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD α DE COMETER UN ERROR TIPO I?

EJEMPLO

CONSIDERE EL EXPERIMENTO DEL TAZON DE SHEWHART (VARIABLE ORIGINAL NORMAL, CON $\mu = 30$ Y $\sigma = 10$). PARA CONTROLAR EL PROCESO, SE OBSERVAN SUBGRUPOS DE TAMAÑO 9. SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 3-SIGMA, ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD α DE COMETER UN ERROR TIPO I?

EJEMPLO

CONSIDERE EL EXPERIMENTO DEL TAZON DE SHEWHART (VARIABLE ORIGINAL NORMAL, CON $\mu = 30$ Y $\sigma = 10$). PARA CONTROLAR EL PROCESO, SE OBSERVAN SUBGRUPOS DE TAMAÑO 4. SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 2-SIGMA, ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD α DE COMETER UN ERROR TIPO I?

CALCULO DEL ERROR TIPO I PARA DIAGRAMA \bar{X}

SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES L-SIGMA Y LA MEDIA DEL PROCESO (QUE NO HA CAMBIADO) ES μ . EL RIESGO α , O PROBABILIDAD DE COMETER UN ERROR TIPO I ES:

$$\alpha = P[(\bar{X} > LSC)(\bar{X} < LIC) | \mu]$$

LA PROBABILIDAD α NO DEPENDE DEL TAMAÑO DE LOS SUBGRUPOS, SINO DE LA DISTANCIA DE LOS LIMITES DE CONTROL RESPECTO A LA LINEA CENTRAL

ERROR TIPO II

ERROR QUE SE COMETE CUANDO SE FALLA EN LA DETECCION DE UN CAMBIO EN EL PROCESO: EL DIAGRAMA DE CONTROL INDICA QUE NO HUBO UN CAMBIO EN EL PROCESO CUANDO EN REALIDAD SI LO HUBO: EL DATO ASOCIADO A UN CIERTO SUBGRUPO (SU MEDIA, SU RANGO O SU DESVIACION ESTANDAR) CAE DENTRO DE LOS LIMITES DE CONTROL, AUN CUANDO EL PARAMETRO QUE SE ESTA MONITOREANDO CAMBIO.

EJEMPLO

CONSIDERE EL EXPERIMENTO DEL TAZON DE SHEWHART (VARIABLE ORIGINAL NORMAL, CON $\mu = 30$ Y $\sigma = 10$). PARA CONTROLAR EL PROCESO, SE OBSERVAN SUBGRUPOS DE TAMAÑO 4. SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 3-SIGMA Y LA MEDIA DEL PROCESO CAMBIA A $\mu_1 = 40$

- a. ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD β DE COMETER UN ERROR TIPO II?
- b. ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD DE DETECTAR EL CAMBIO DOS SUBGRUPOS DESPUES DE QUE ESTE OCURRIO?
- c. ¿CUAL ES EL NUMERO DE SUBGRUPOS QUE SE ESPERA TRANSCURRAN ANTES DE DETECTAR EL CAMBIO?

EJEMPLO

CONSIDERE EL EXPERIMENTO DEL TAZON DE SHEWHART (VARIABLE ORIGINAL NORMAL, CON $\mu = 30$ Y $\sigma = 10$). PARA CONTROLAR EL PROCESO, SE OBSERVAN SUBGRUPOS DE TAMAÑO 9. SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 3-SIGMA Y LA MEDIA DEL PROCESO CAMBIA A $\mu_1 = 40$

- a. ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD β DE COMETER UN ERROR TIPO II?
- b. ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD DE DETECTAR EL CAMBIO DOS SUBGRUPOS DESPUES DE QUE ESTE OCURRIO?
- c. ¿CUAL ES EL NUMERO DE SUBGRUPOS QUE SE ESPERA TRANSCURRAN ANTES DE DETECTAR EL CAMBIO?

EJEMPLO

CONSIDERÉ EL EXPERIMENTO DEL TAZON DE SHEWHART
(VARIABLE ORIGINAL NORMAL, CON $\mu = 30$ Y $\sigma = 10$). PARA
CONTROLAR EL PROCESO, SE OBSERVAN SUBGRUPOS DE TAMAÑO

4. SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 3-SIGMA Y LA
MEDIA DEL PROCESO CAMBIA A $\mu_1 = 50$

- a. ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD β DE COMETER UN ERROR TIPO II?
- b. ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD DE DETECTAR EL CAMBIO DOS
SUBGRUPOS DESPUES DE QUE ESTE OCURRIO?
- c. ¿CUAL ES EL NUMERO DE SUBGRUPOS QUE SE ESPERA
TRANSCURRAN ANTES DE DETECTAR EL CAMBIO?

CALCULO DEL ERROR TIPO II PARA DIAGRAMA \bar{X}

SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 3-SIGMA Y LA MEDIA DEL PROCESO CAMBIA DE μ A $\mu_1 = \mu + k\sigma$, EL RIESGO β , O PROBABILIDAD DE COMETER UN ERROR TIPO II ES:

$$\begin{aligned}\beta &= P\{LIC \leq \bar{X} \leq LSC | \mu_1\} \\ &= \Phi(3 - k\sqrt{n}) - \Phi(-3 - k\sqrt{n})\end{aligned}$$

LA PROBABILIDAD DE QUE EL CAMBIO SE DETECTE (POR PRIMERA VEZ) EN EL SUBGRUPO m ES:

$$\beta^{m-1}(1 - \beta)$$

EL NUMERO ESPERADO DE SUBGRUPOS QUE SE ESPERA TRANSCURRAN ANTES DE DETECTAR EL CAMBIO (*AVERAGE RUN LENGTH*) ES:

$$\sum_{m=1}^{\infty} m\beta^{m-1}(1 - \beta) = \frac{1}{1 - \beta}$$

CURVA CO PARA EL DIAGRAMA \bar{X}

SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 3-SIGMA Y LA MEDIA DEL PROCESO CAMBIA DE μ A $\mu_1 = \mu + k\sigma$, LA SIGUIENTE CCO MUESTRA EL RIESGO β , O PROBABILIDAD DE COMETER UN ERROR TIPO II:

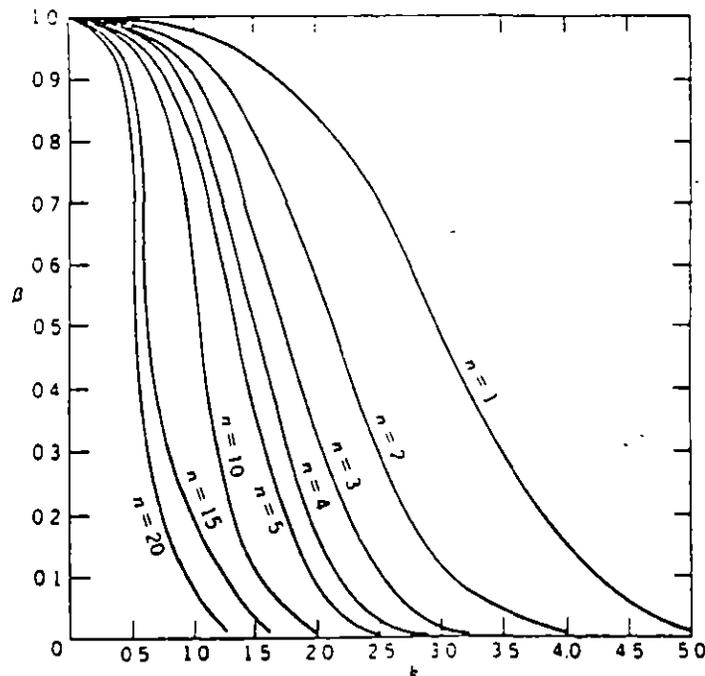


Figura 6-13. Curvas características de operación para el diagrama de \bar{X} con límites de tres sigmas. Se tiene que $\beta = P$ (no detectar un cambio de $k\sigma$ en la media en la primera muestra después del cambio).

CURVA CO PARA EL DIAGRAMA \bar{X}

SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 3-SIGMA Y LA MEDIA DEL PROCESO CAMBIA DE μ A $\mu_1 = \mu + k\sigma$, LA SIGUIENTE CCO MUESTRA EL RIESGO β , O PROBABILIDAD DE COMETER UN ERROR TIPO II:

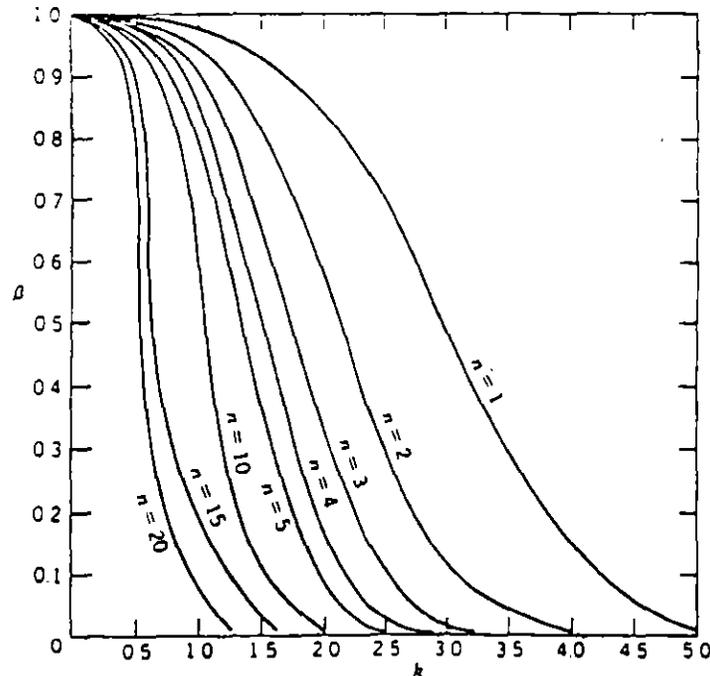


Figura 6-13. Curvas características de operación para el diagrama de \bar{x} con límites de tres sigmas. Se tiene que $\beta = P$ (no detectar un cambio de $k\sigma$ en la media en la primera muestra después del cambio)

CURVA CO PARA EL DIAGRAMA R

SI SE ESTA MONITOREANDO R USANDO LIMITES 3-SIGMA Y LA DESVIACION ESTANDAR σ_0 CAMBIA A UN VALOR σ_1 , TAL QUE $\lambda = \sigma_1/\sigma_0$, LA SIGUIENTE CCO MUESTRA EL RIESGO β , O PROBABILIDAD DE COMETER UN ERROR TIPO II:

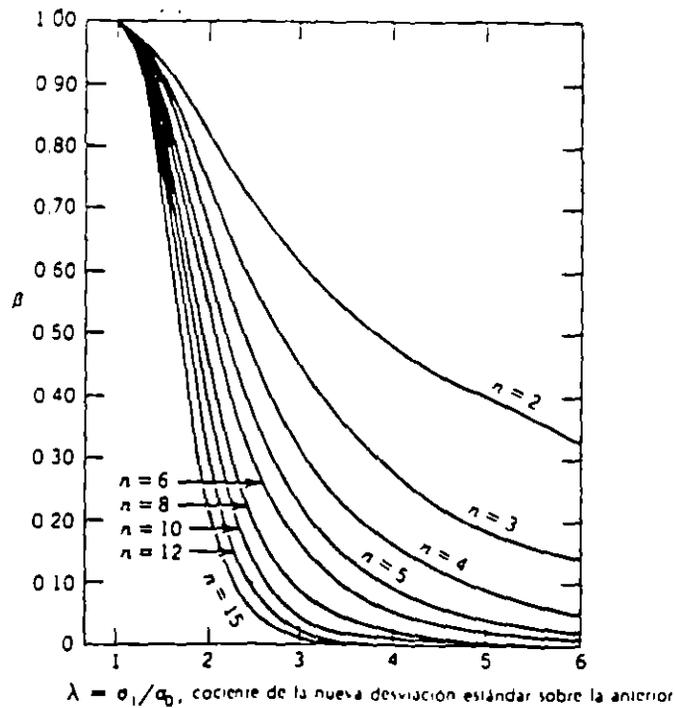


Figura 6-14. Curvas características de operación para el diagrama de R con límites de tres sigmas (Adaptado de A.J. Duncan, "Operating Characteristics of R Charts", *Industrial Quality Control*, vol. 7, no. 5, p. 40-41, 1951, con permiso de American Society for Quality Control, ASQC)





FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE INGENIERIA DE PRODUCCION

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V: ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA : ANALISIS DE ERRORES

1996

TEMA 5: ANALISIS DE ERRORES

ERROR TIPO I

ERROR QUE SE COMETE CUANDO OCURRE UNA "FALSA ALARMA" EL DIAGRAMA DE CONTROL INDICA QUE HUBO UN CAMBIO EN EL PROCESO CUANDO EN REALIDAD NO LO HUBO: EL DATO ASOCIADO A UN CIERTO SUBGRUPO (SU MEDIA, SU RANGO O SU DESVIACION ESTANDAR) CAE FUERA DE LOS LIMITES DE CONTROL, AUN CUANDO EL PARAMETRO QUE SE ESTA MONITOREANDO NO HA CAMBIADO.

EJEMPLO

CONSIDERE EL EXPERIMENTO DEL TAZON DE SHEWHART (VARIABLE ORIGINAL NORMAL, CON $\mu = 30$ Y $\sigma = 10$). PARA CONTROLAR EL PROCESO, SE OBSERVAN SUBGRUPOS DE TAMAÑO 4. SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 3-SIGMA, ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD α DE COMETER UN ERROR TIPO I?

EJEMPLO

CONSIDERE EL EXPERIMENTO DEL TAZON DE SHEWHART (VARIABLE ORIGINAL NORMAL, CON $\mu = 30$ Y $\sigma = 10$). PARA CONTROLAR EL PROCESO, SE OBSERVAN SUBGRUPOS DE TAMAÑO 9. SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 3-SIGMA, ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD α DE COMETER UN ERROR TIPO I?

EJEMPLO

CONSIDERE EL EXPERIMENTO DEL TAZON DE SHEWHART (VARIABLE ORIGINAL NORMAL, CON $\mu = 30$ Y $\sigma = 10$). PARA CONTROLAR EL PROCESO, SE OBSERVAN SUBGRUPOS DE TAMAÑO 4. SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 2-SIGMA, ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD α DE COMETER UN ERROR TIPO I?

CALCULO DEL ERROR TIPO I PARA DIAGRAMA \bar{X}

SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES L-SIGMA Y LA MEDIA DEL PROCESO (QUE NO HA CAMBIADO) ES μ , EL RIESGO α , O PROBABILIDAD DE COMETER UN ERROR TIPO I ES:

$$\alpha = P[(\bar{X} > LSC)(\bar{X} < LIC) | \mu]$$

LA PROBABILIDAD α NO DEPENDE DEL TAMAÑO DE LOS SUBGRUPOS, SINO DE LA DISTANCIA DE LOS LIMITES DE CONTROL RESPECTO A LA LINEA CENTRAL

ERROR TIPO II

ERROR QUE SE COMETE CUANDO SE FALLA EN LA DETECCION DE UN CAMBIO EN EL PROCESO: EL DIAGRAMA DE CONTROL INDICA QUE NO HUBO UN CAMBIO EN EL PROCESO CUANDO EN REALIDAD SI LO HUBO: EL DATO ASOCIADO A UN CIERTO SUBGRUPO (SU MEDIA, SU RANGO O SU DESVIACION ESTANDAR) CAE DENTRO DE LOS LIMITES DE CONTROL, AUN CUANDO EL PARAMETRO QUE SE ESTA MONITOREANDO CAMBIO.

EJEMPLO

CONSIDERE EL EXPERIMENTO DEL TAZON DE SHEWHART (VARIABLE ORIGINAL NORMAL, CON $\mu = 30$ Y $\sigma = 10$). PARA CONTROLAR EL PROCESO, SE OBSERVAN SUBGRUPOS DE TAMAÑO

4. SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 3-SIGMA Y LA MEDIA DEL PROCESO CAMBIA A $\mu_1 = 40$

- a. ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD β DE COMETER UN ERROR TIPO II?
- b. ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD DE DETECTAR EL CAMBIO DOS SUBGRUPOS DESPUES DE QUE ESTE OCURRIO?
- c. ¿CUAL ES EL NUMERO DE SUBGRUPOS QUE SE ESPERA TRANSCURRAN ANTES DE DETECTAR EL CAMBIO?

EJEMPLO

CONSIDERE EL EXPERIMENTO DEL TAZON DE SHEWHART (VARIABLE ORIGINAL NORMAL, CON $\mu = 30$ Y $\sigma = 10$). PARA CONTROLAR EL PROCESO, SE OBSERVAN SUBGRUPOS DE TAMAÑO 9. SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 3-SIGMA Y LA MEDIA DEL PROCESO CAMBIA A $\mu_1 = 40$

- a. ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD β DE COMETER UN ERROR TIPO II?
- b. ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD DE DETECTAR EL CAMBIO DOS SUBGRUPOS DESPUES DE QUE ESTE OCURRIO?
- c. ¿CUAL ES EL NUMERO DE SUBGRUPOS QUE SE ESPERA TRANSCURRAN ANTES DE DETECTAR EL CAMBIO?

EJEMPLO

CONSIDERE EL EXPERIMENTO DEL TAZON DE SHEWHART (VARIABLE ORIGINAL NORMAL, CON $\mu = 30$ Y $\sigma = 10$). PARA CONTROLAR EL PROCESO, SE OBSERVAN SUBGRUPOS DE TAMAÑO 4. SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 3-SIGMA Y LA MEDIA DEL PROCESO CAMBIA A $\mu_1 = 50$

- a. ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD β DE COMETER UN ERROR TIPO II?
- b. ¿CUAL ES LA PROBABILIDAD DE DETECTAR EL CAMBIO DOS SUBGRUPOS DESPUES DE QUE ESTE OCURRIO?
- c. ¿CUAL ES EL NUMERO DE SUBGRUPOS QUE SE ESPERA TRANSCURRAN ANTES DE DETECTAR EL CAMBIO?

CALCULO DEL ERROR TIPO II PARA DIAGRAMA \bar{X}

SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 3-SIGMA Y LA MEDIA DEL PROCESO CAMBIA DE μ A $\mu_1 = \mu + k\sigma$, EL RIESGO β , O PROBABILIDAD DE COMETER UN ERROR TIPO II ES:

$$\begin{aligned}\beta &= P[LIC \leq \bar{X} \leq LSC | \mu_1] \\ &= \Phi(3 - k\sqrt{n}) - \Phi(-3 - k\sqrt{n})\end{aligned}$$

LA PROBABILIDAD DE QUE EL CAMBIO SE DETECTE (POR PRIMERA VEZ) EN EL SUBGRUPO m ES:

$$\beta^{m-1}(1 - \beta)$$

EL NUMERO ESPERADO DE SUBGRUPOS QUE SE ESPERA TRANSCURRAN ANTES DE DETECTAR EL CAMBIO (*AVERAGE RUN LENGTH*) ES:

$$\sum_{m=1}^{\infty} m\beta^{m-1}(1 - \beta) = \frac{1}{1 - \beta}$$

CURVA CO PARA EL DIAGRAMA \bar{X}

SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 3-SIGMA Y LA MEDIA DEL PROCESO CAMBIA DE μ A $\mu_1 = \mu + k\sigma$, LA SIGUIENTE CCO MUESTRA EL RIESGO β , O PROBABILIDAD DE COMETER UN ERROR TIPO II:

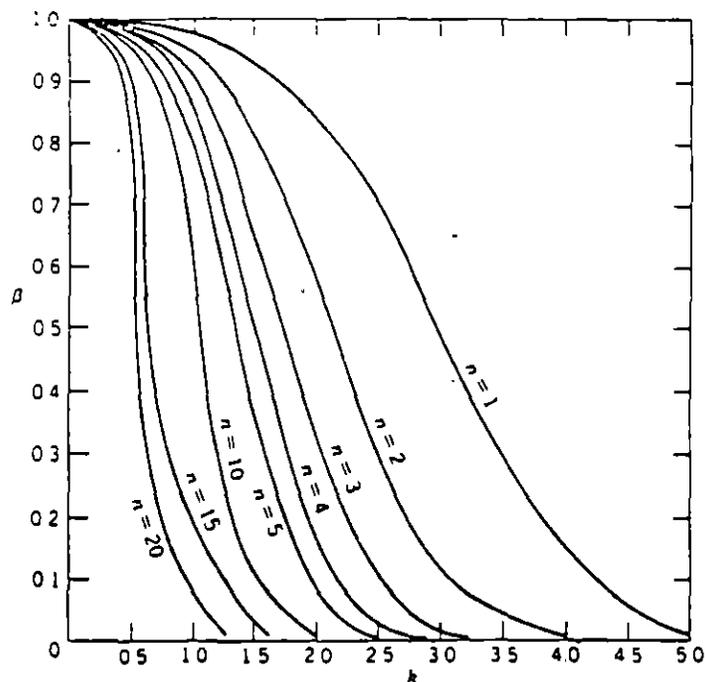


Figura 6-13. Curvas características de operación para el diagrama de \bar{x} con límites de tres sigmas. Se tiene que $\beta = P$ (no detectar un cambio de $k\sigma$ en la media en la primera muestra después del cambio)

CURVA CO PARA EL DIAGRAMA \bar{X}

SI SE ESTA MONITOREANDO \bar{X} USANDO LIMITES 3-SIGMA Y LA MEDIA DEL PROCESO CAMBIA DE μ A $\mu_1 = \mu + k\sigma$, LA SIGUIENTE CCO MUESTRA EL RIESGO β , O PROBABILIDAD DE COMETER UN ERROR TIPO II:

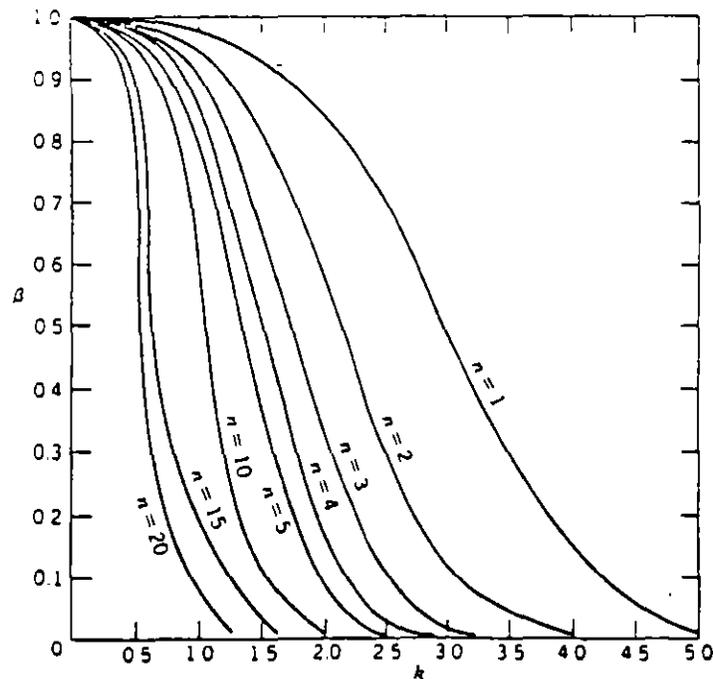


Figura 6-13. Curvas características de operación para el diagrama de \bar{x} con límites de tres sigmas. Se tiene que $\hat{\beta} = P$ (no detectar un cambio de $k\sigma$ en la media en la primera muestra después del cambio).

CURVA CO PARA EL DIAGRAMA R

SI SE ESTA MONITOREANDO R USANDO LIMITES 3-SIGMA Y LA DESVIACION ESTANDAR σ_0 CAMBIA A UN VALOR σ_1 , TAL QUE $\lambda = \sigma_1/\sigma_0$, LA SIGUIENTE CCO MUESTRA EL RIESGO β , O PROBABILIDAD DE COMETER UN ERROR TIPO II:

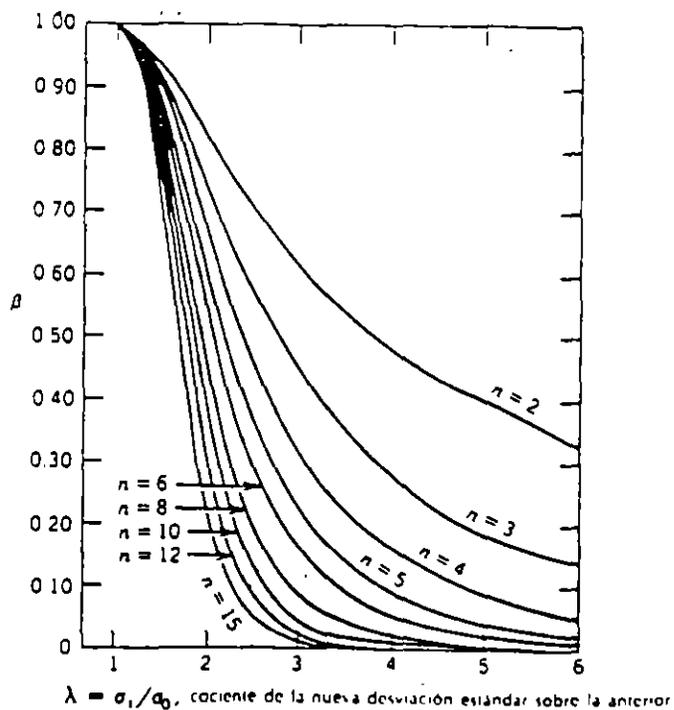


Figura 6-14. Curvas características de operación para el diagrama de R con límites de tres sigmas (Adaptado de A.J. Duncan, "Operating Characteristics of R Charts", *Industrial Quality Control*, vol. 7, no. 5, p. 40-41, 1951, con permiso de American Society for Quality Control, ASQC)



FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DIVISION DE INGENIERIA DE PRODUCCION

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V: ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA : DETECCION DE INESTABILIDAD DE UN PROCESO
MEDIANTE ANALISIS DE CORRIDAS

1996

TEMA 6:

**DETECCION DE INESTABILIDAD DE UN PROCESO
MEDIANTE ANALISIS DE CORRIDAS**

INESTABILIDAD DE UN PROCESO

SE MANIFIESTA COMO UN CAMBIO EN:

1. SOLO LOCALIZACION
2. SOLO DISPERSION
3. TANTO EN LOCALIZACION COMO EN DISPERSION

UN CAMBIO OBSERVADO PUEDE SER:

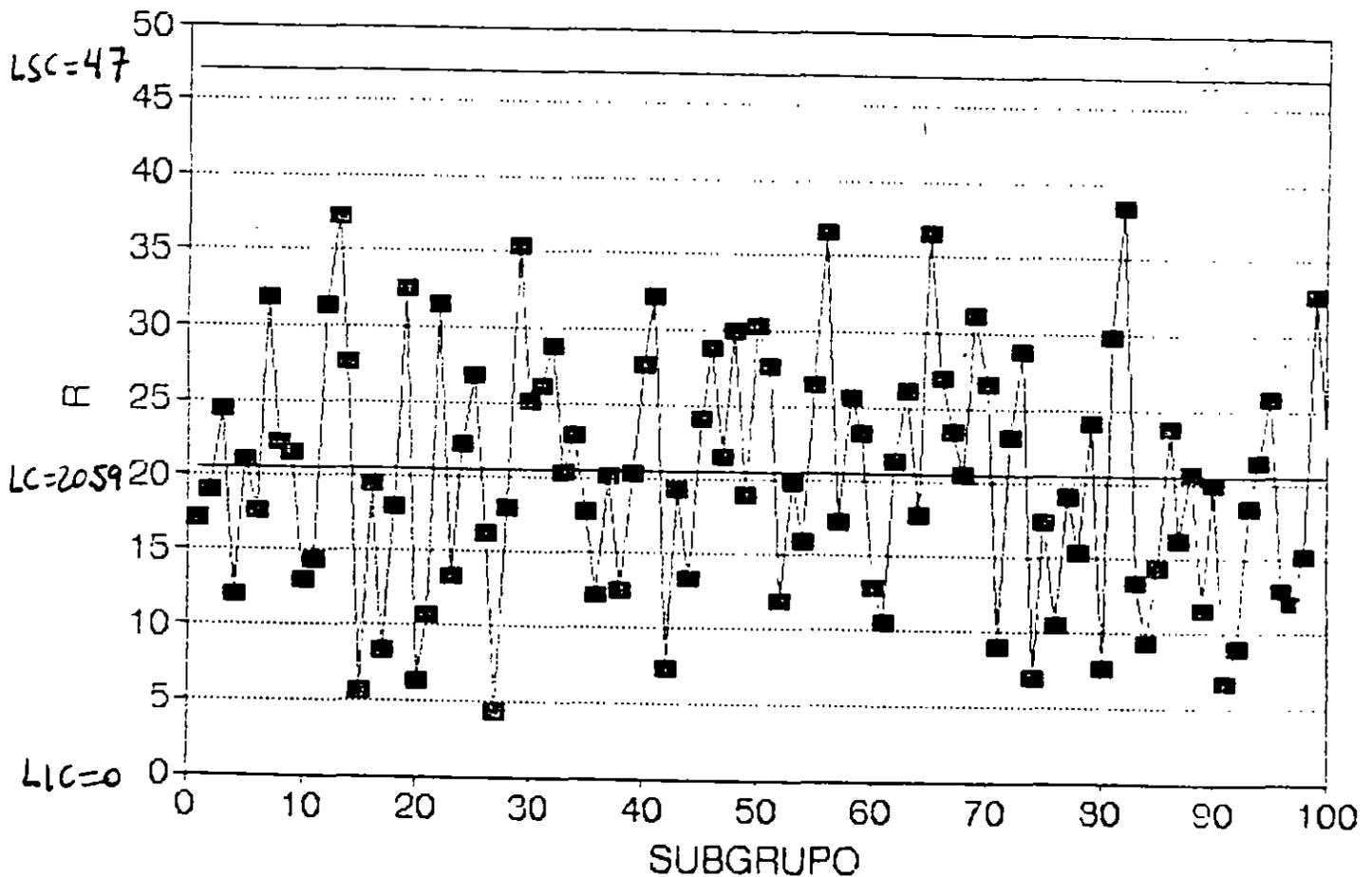
1. SOSTENIDO
2. FRECUENTE E IRREGULAR
3. GRADUAL O SISTEMATICO

CAMBIO SOSTENIDO

CAMBIO SUBITO (EN LOCALIZACION Y/O DISPERSION) QUE SE MANTIENE DURANTE UN CIERTO PERIODO DE TIEMPO

EJEMPLO

LA SIGUIENTES GRAFICAS MUESTRAN LOS DIAGRAMAS DE CONTROL PARA R Y PARA \bar{X} PARA LOS PRIMEROS 100 SUBGRUPOS DEL EXPERIMENTO DE SHEWHART ($\mu = 30, \sigma = 10, N = 4$). OBSERVE QUE EL PROCESO ES ESTABLE



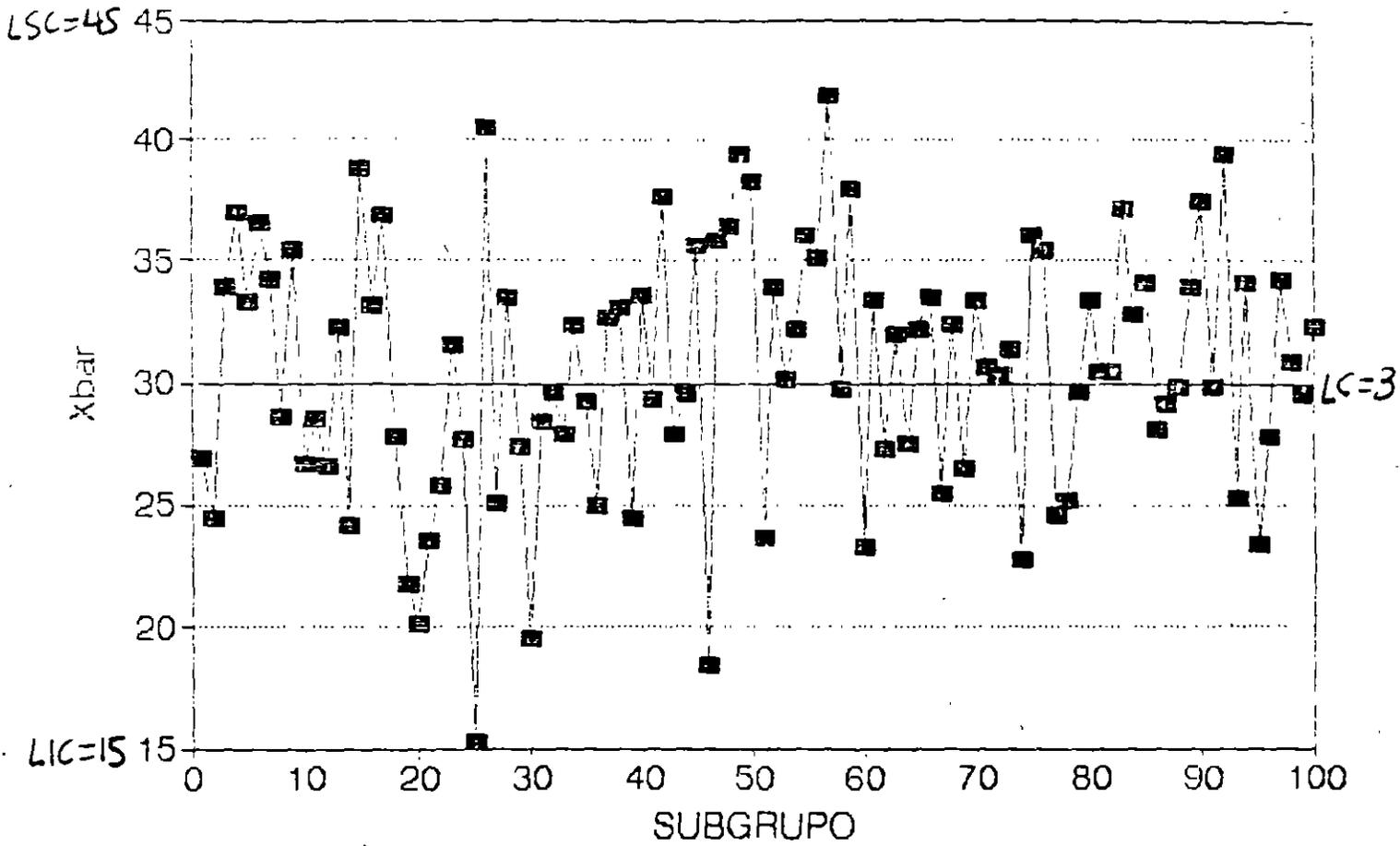


DIAGRAMA DE CONTROL PARA \bar{X}
(DATOS ORIGINALES)

CAMBIO SOSTENIDO EN LOCALIZACION (SIN CAMBIO EN DISPERSION)

EJEMPLO

LAS SIGUIENTES GRAFICAS MUESTRAN, PARA EL EXPERIMENTO DE SHEWHART (USANDO LOS LIMITES DE CONTROL ORIGINALES), EL EFECTO SOBRE LOS DIAGRAMAS R Y \bar{X} SI SE SUMA 10 A CADA UNA DE LAS OBSERVACIONES DE LOS SUBGRUPOS 41-80

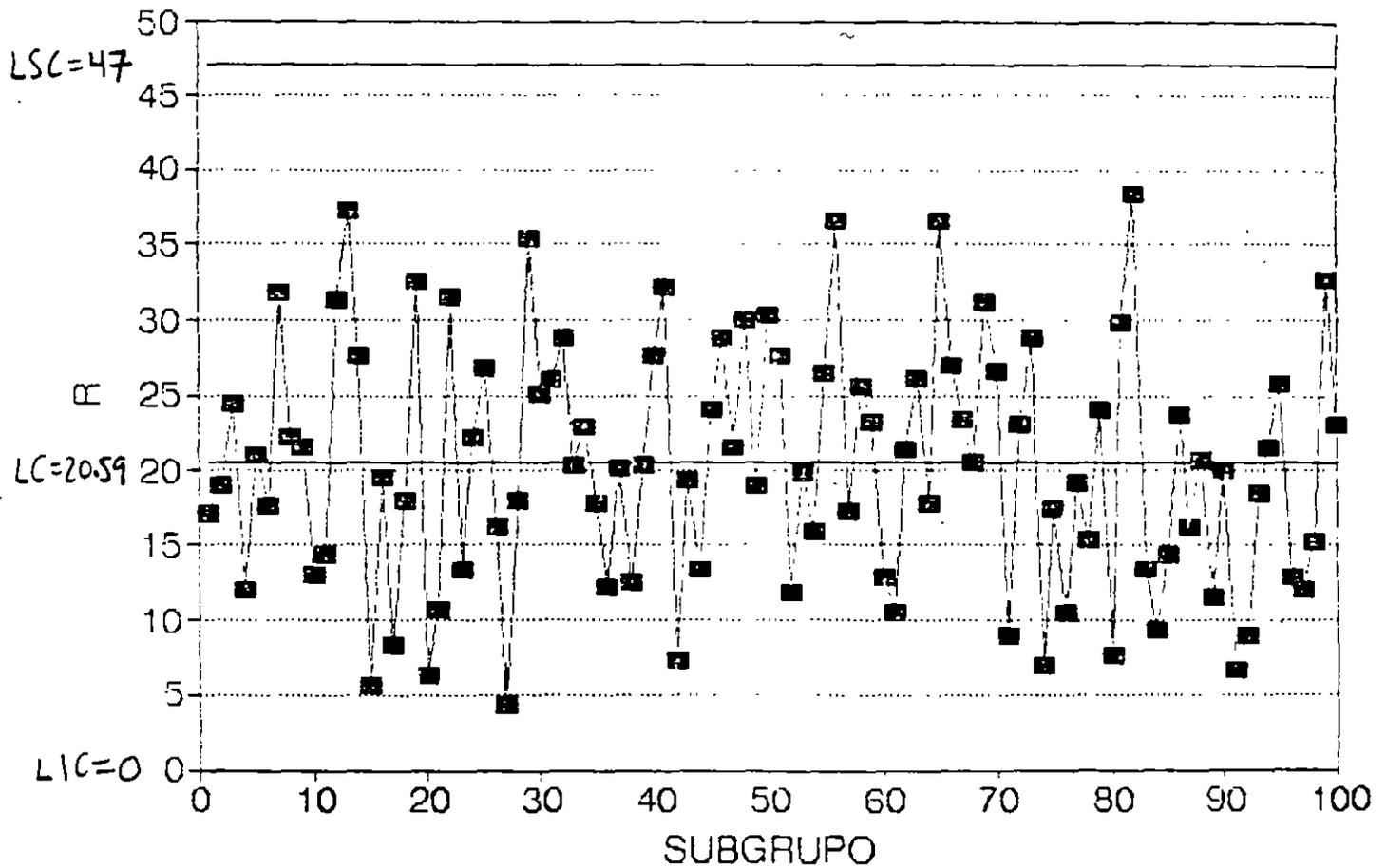


DIAGRAMA DE CONTROL PARA R
(CAMBIO SOSTENIDO EN MEDIA)

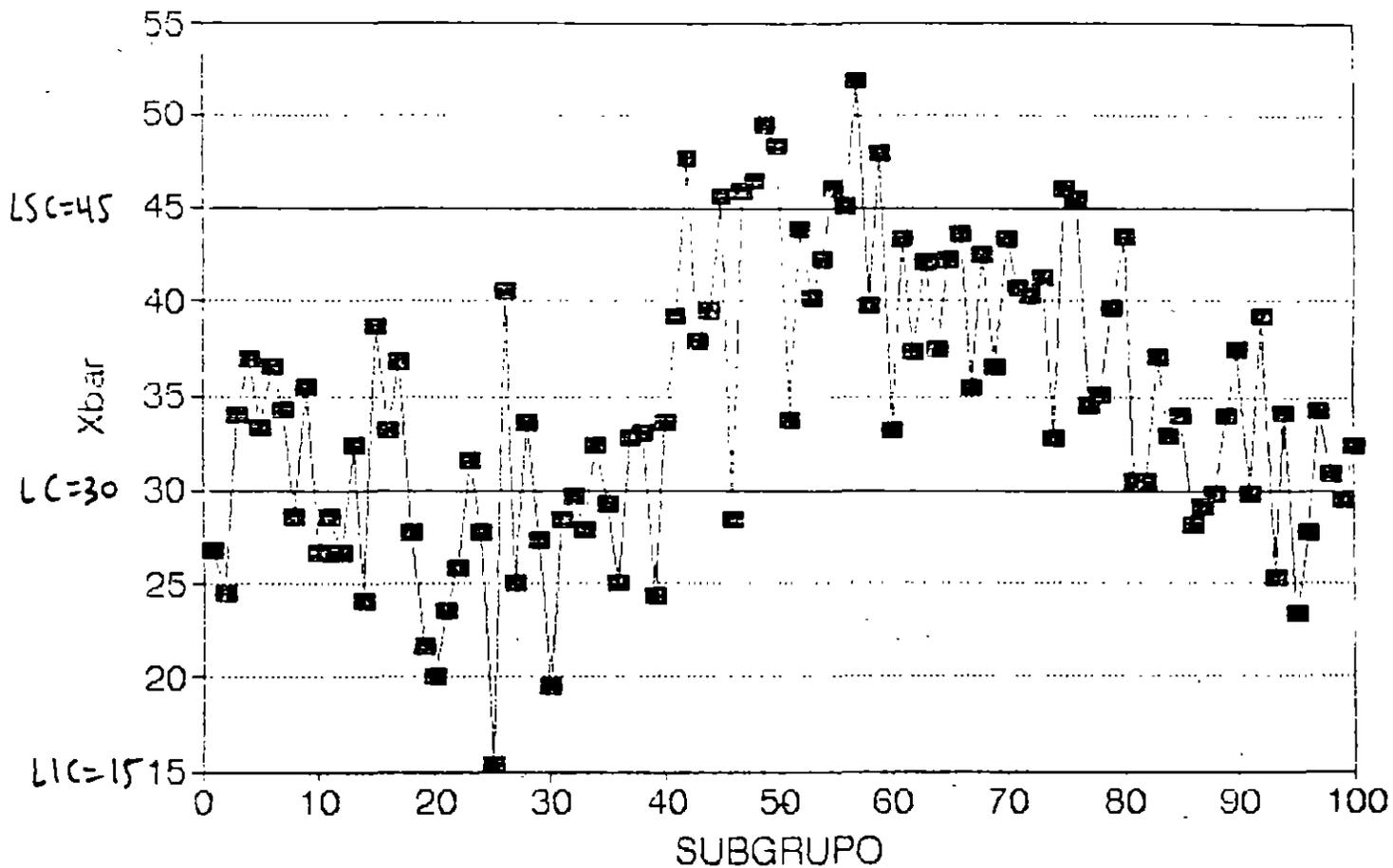


DIAGRAMA DE CONTROL PARA \bar{X}
(CAMBIO SOSTENIDO EN MEDIA)

ESTE TIPO DE CAMBIO SE MANIFIESTA SOLO EN DIAGRAMA \bar{X}

CAMBIOS FRECUENTES EN LOCALIZACION (SIN CAMBIO EN DISPERSION)

EJEMPLO

LAS SIGUIENTES GRAFICAS MUESTRAN, PARA EL EXPERIMENTO DE SHEWHART (USANDO LOS LIMITES DE CONTROL ORIGINALES), EL EFECTO SOBRE LOS DIAGRAMAS R Y \bar{X} SI (1) SE RESTA 10 A DATOS DE SUBGRUPOS 41-50, (2) SE RESTA 20 A DATOS DE SUBGRUPOS 51-60, (3) SE SUMA 20 A DATOS DE SUBGRUPOS 61-70 Y (4) SE SUMA 10 A CADA UNA DE LAS OBSERVACIONES DE LOS SUBGRUPOS 71-80

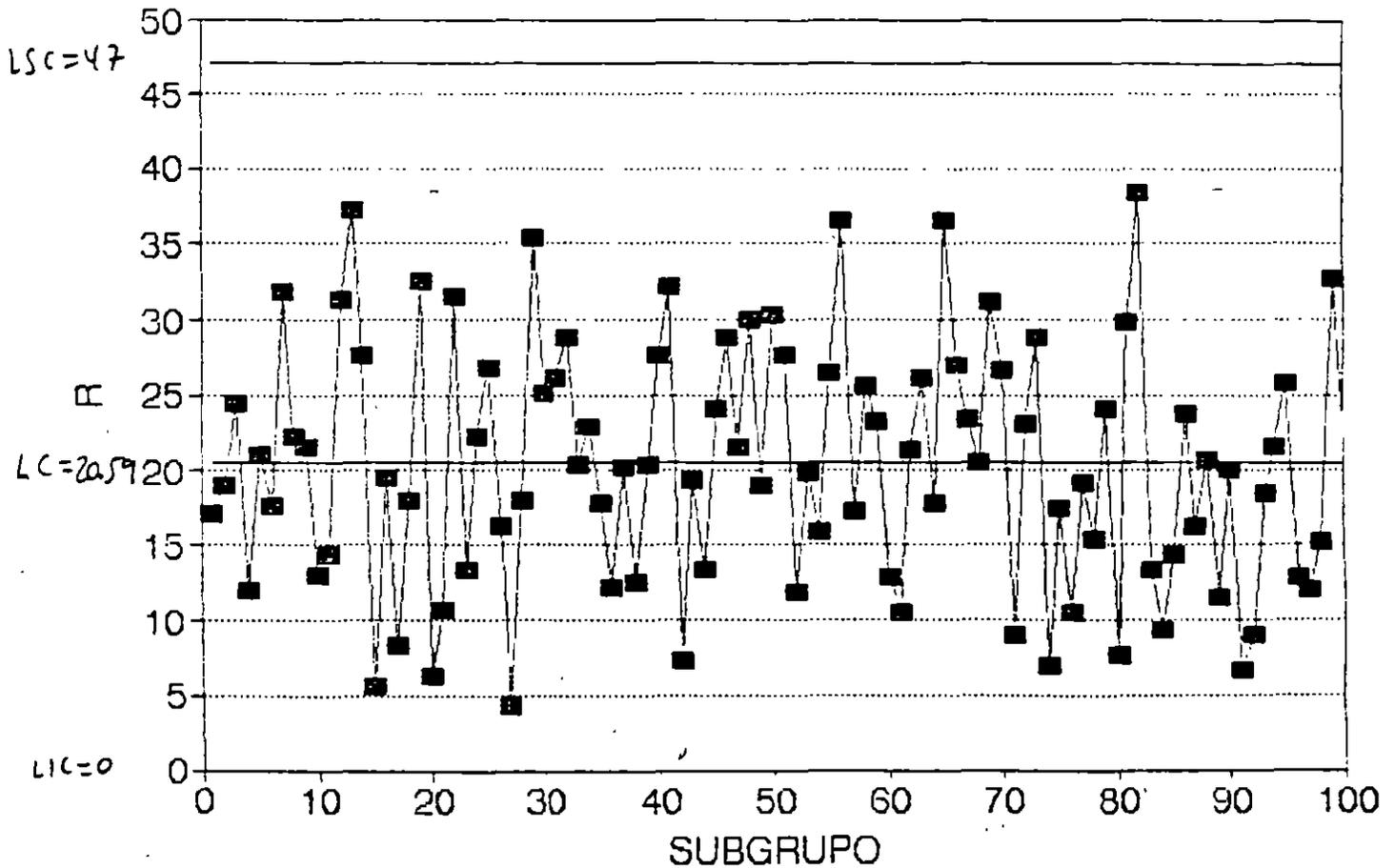


DIAGRAMA PARA R
(Cambios irregulares en localización,
sin cambio en dispersión)

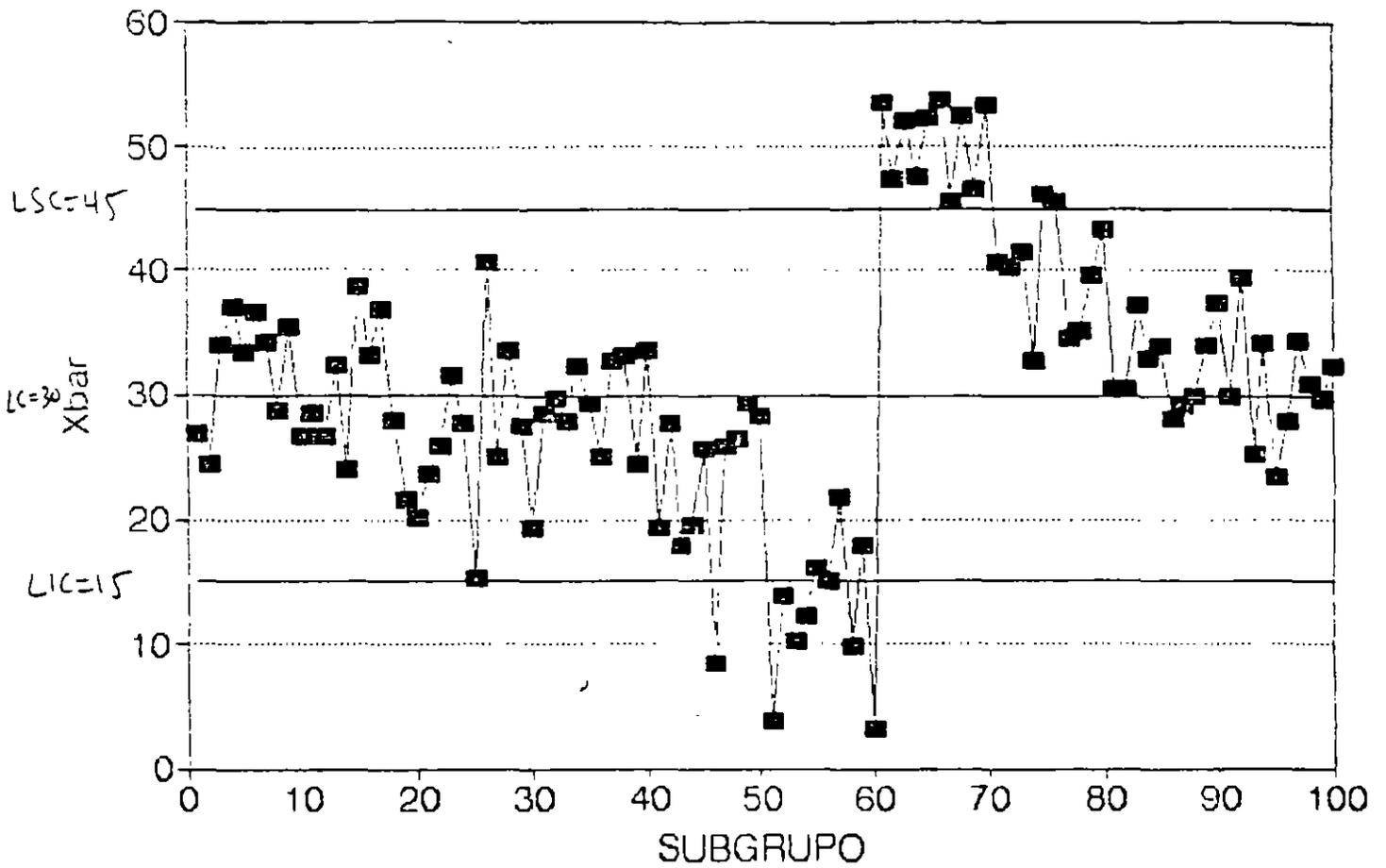


DIAGRAMA PARA \bar{X}
 (Cambios irregulares en localización,
 sin cambio en dispersión)

ESTE TIPO DE CAMBIO SE MANIFIESTA SOLO EN DIAGRAMA \bar{X}

CAMBIO SOSTENIDO EN DISPERSION (SIN CAMBIO EN LOCALIZACION)

EJEMPLO

LAS SIGUIENTES GRAFICAS MUESTRAN, PARA EL EXPERIMENTO DE SHEWHART (USANDO LOS LIMITES DE CONTROL ORIGINALES), EL EFECTO SOBRE LOS DIAGRAMAS R Y \bar{X} DE SIMULAR NUEVOS DATOS PARA LOS SUBGRUPOS 41-80 USANDO $\sigma = 20$

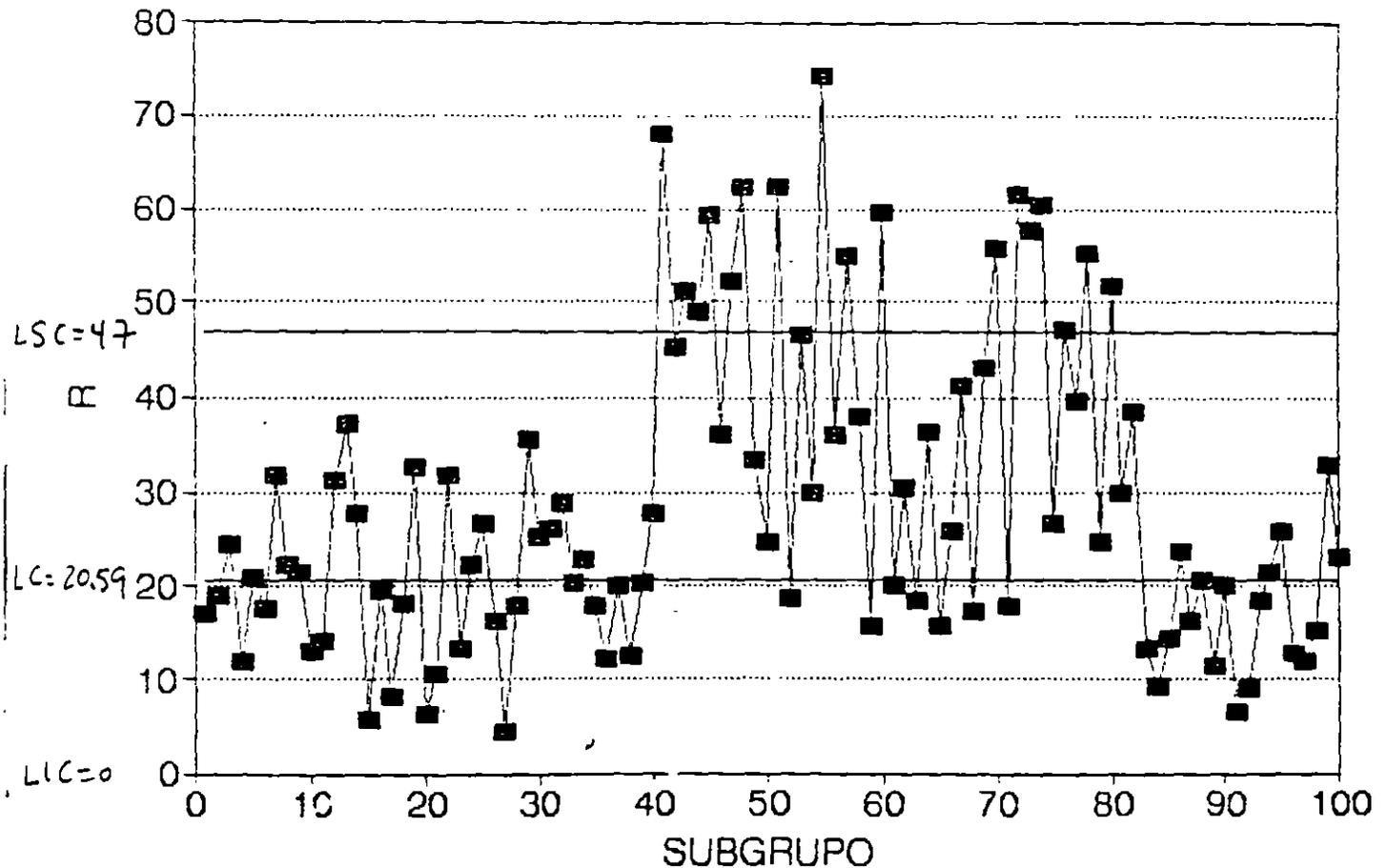


DIAGRAMA PARA R
(Cambio sostenido en dispersión,
sin cambios en localización)

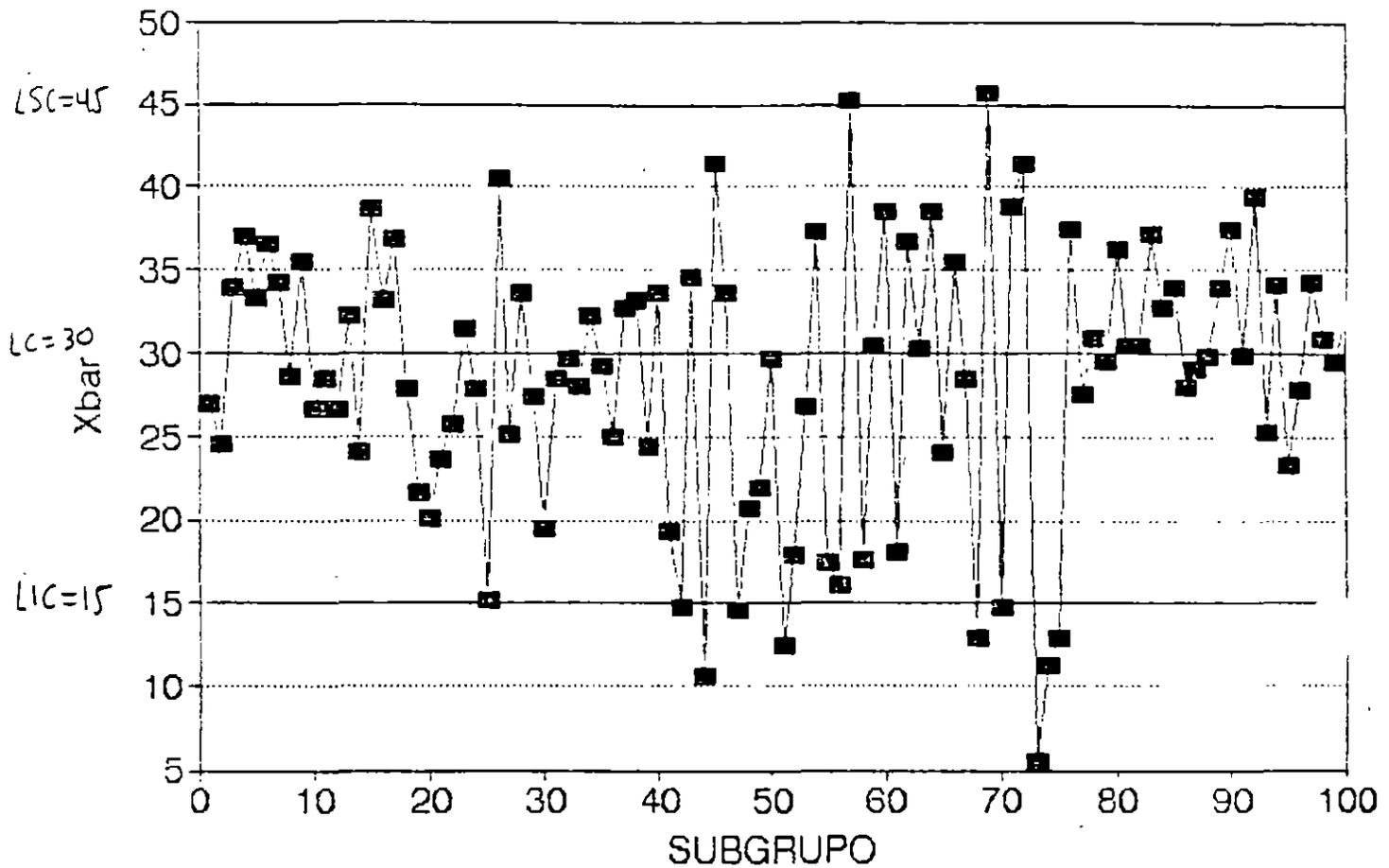


DIAGRAMA PARA \bar{X}
 (Cambio sostenido en dispersión,
 sin cambios en localización)

ESTE TIPO DE CAMBIO SE MANIFIESTA EN AMBOS DIAGRAMAS.
 MAS PUNTOS FUERA DE CONTROL EN DIAGRAMA R QUE EN
 DIAGRAMA \bar{X}

CAMBIO SISTEMATICO

CAMBIO QUE MUESTRA CIERTA REGULARIDAD. SE ASOCIA CON UNA "FALTA DE AJUSTE A UNA DISTRIBUCION NORMAL"

ALGUNOS TIPOS DE CAMBIO SISTEMATICO SE DETECTAN CUANDO LOS DIAGRAMAS DE CONTROL MUESTRAN PATRONES COMO:

1. TENDENCIA
2. CICLO
3. MUCHOS PUNTOS CERCA DE LINEA CENTRAL
4. MUCHOS PUNTOS CERCA DE LIMITES DE CONTROL

CORRIDA

SERIE DE SUBGRUPOS SUCESIVOS QUE MUESTRAN ALGUN TIPO DE PATRON DE CAMBIO SISTEMATICO

EJEMPLO

LAS SIGUIENTES FIGURAS MUESTRAN PATRONES ASOCIADOS A CAMBIOS SISTEMATICOS CON SUS POSIBLES CAUSAS

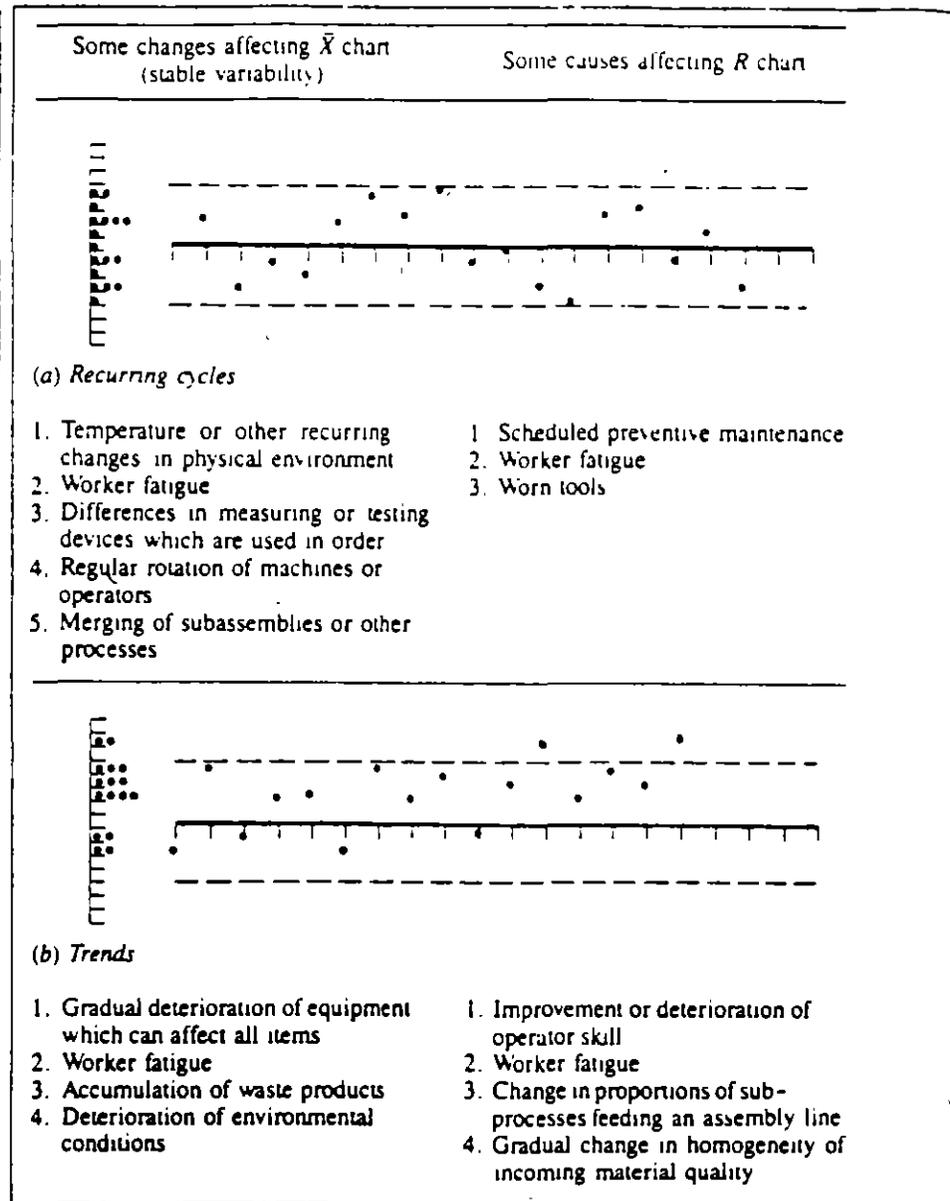
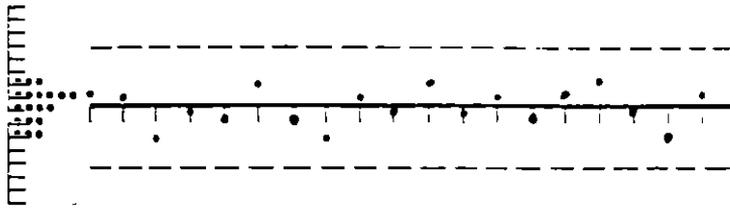


FIG 7-9 CAMBIOS SISTEMATICOS EN PATRONES DE VARIACION Y POSIBLES CAUSAS

Some causes affecting \bar{X} chart
(stable variability)

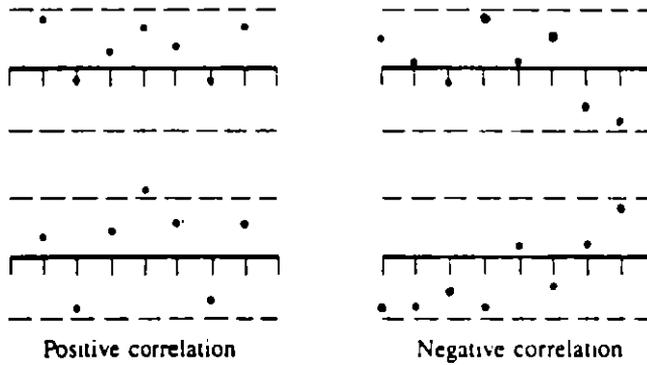
Some causes affecting R chart



(e) Stratification or lack of variability

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Incorrect calculation of control limits 2. Incorrect subgrouping.
R chart captures more variability than \bar{X} chart. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Collecting in each sample a number of measurements from widely differing universes |
|---|---|

Correlation between charts



(f) Correlation between \bar{X} and R charts for same process

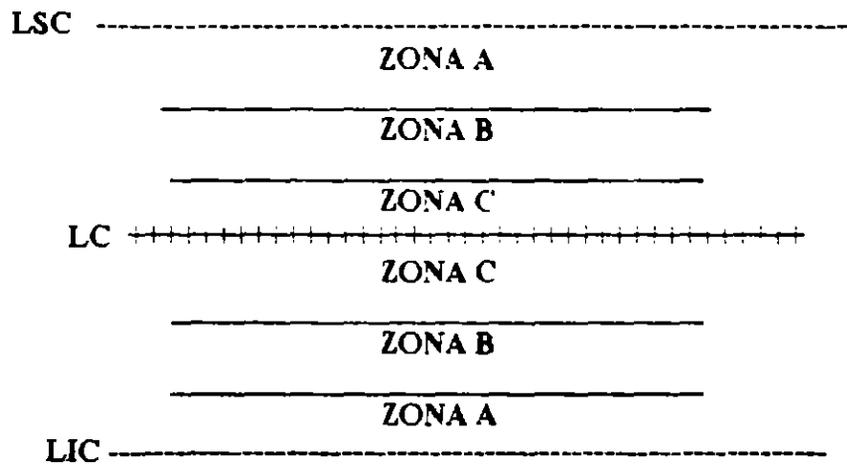
1. Skewness in underlying universe
2. Points generated from the same sample

(g) Correlation between different \bar{X} or R charts

1. Points generated from the same sample
2. Unknown cause-and-effect relationships

**DETECCION DE PRESENCIA DE CORRIDAS:
REGLAS PARA CORRIDAS DE AT&T
(AT&T RUNS RULES)**

REGLAS DESARROLLADAS POR AT&T QUE PERMITEN DETECTAR LA INESTABILIDAD DE UN PROCESO MEDIANTE EL ANALISIS DE CORRIDAS. PARA SU APLICACION ES NECESARIO DIVIDIR EL AREA ENTRE LA LINEA CENTRAL Y CADA UNO DE LOS LIMITES DE CONTROL EN TRES ZONAS:

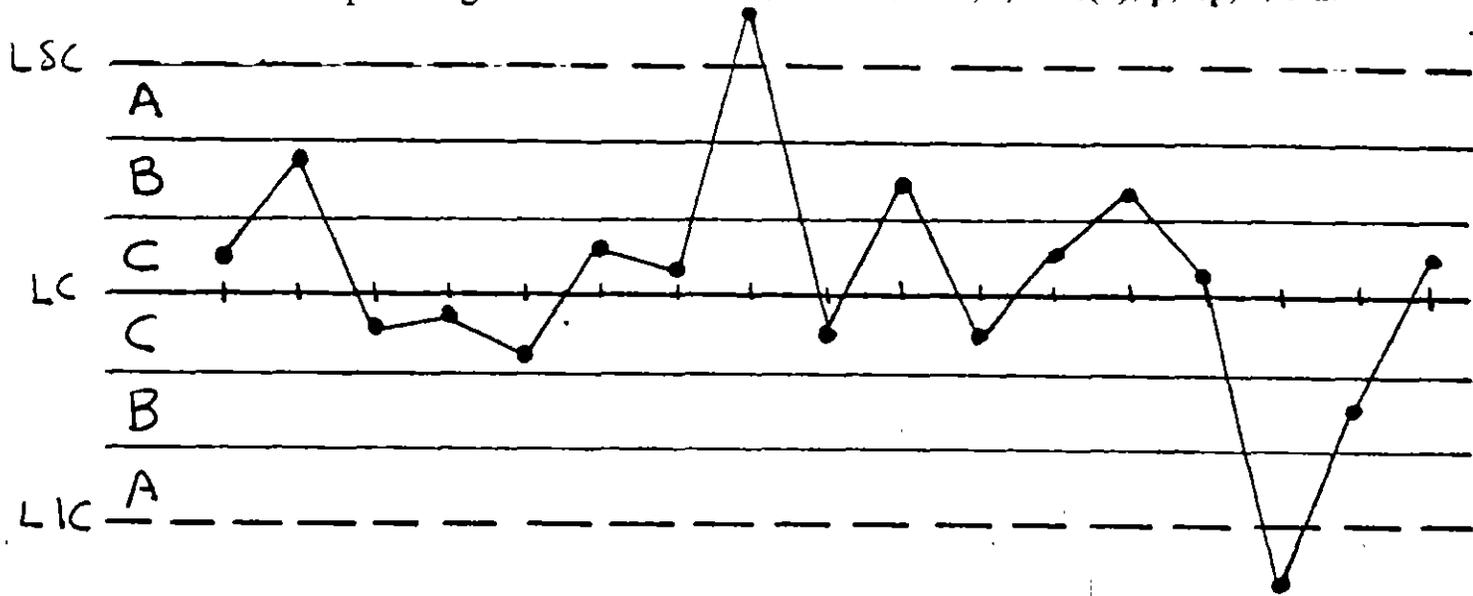


ZONAS PARA REGLAS PARA CORRIDAS DE AT&T

UN PROCESO SE CONSIDERA INESTABLE SI FALLA ANTE UNA DE LAS SIGUIENTES CUATRO REGLAS:

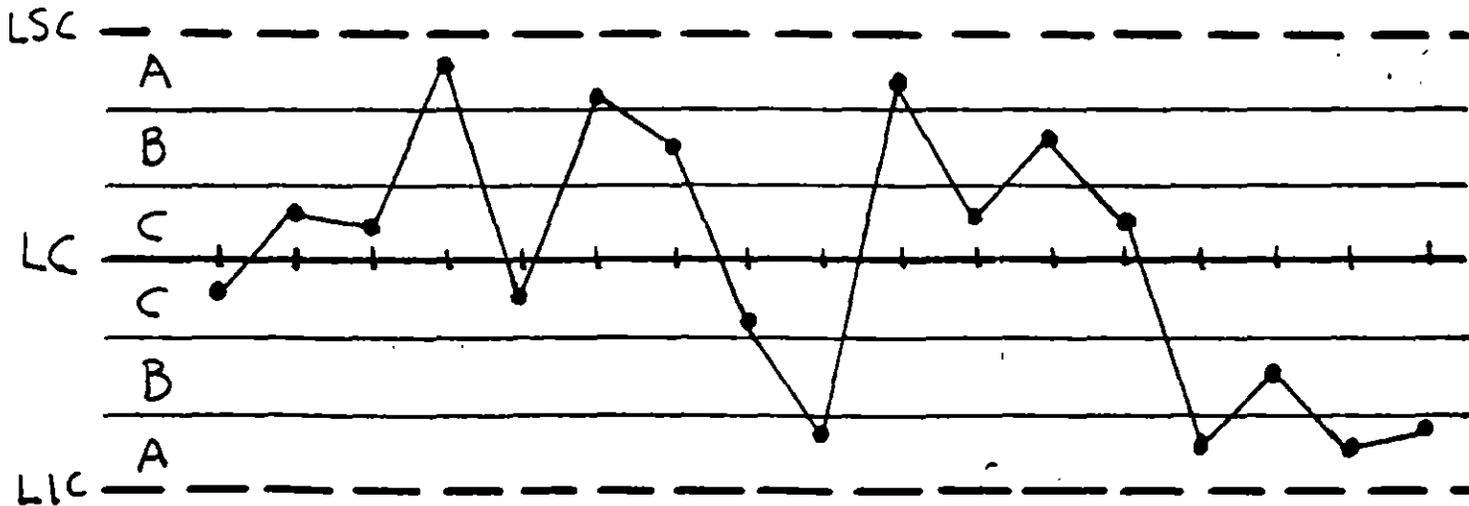
REGLA NUMERO 1:

Un punto fuera de uno de los límites de control (más allá de la zona A). Regla válida para diagramas de control: R , \bar{X} , PM, RM, I, RM(2), p, np, c, o u.



REGLA NUMERO 2:

Dos de tres puntos sucesivos caen en la zona A (del mismo lado) o más lejos. El "otro" punto puede estar donde sea. Regla válida para diagramas de control: R , \bar{X} , I, p, np, c, o u.

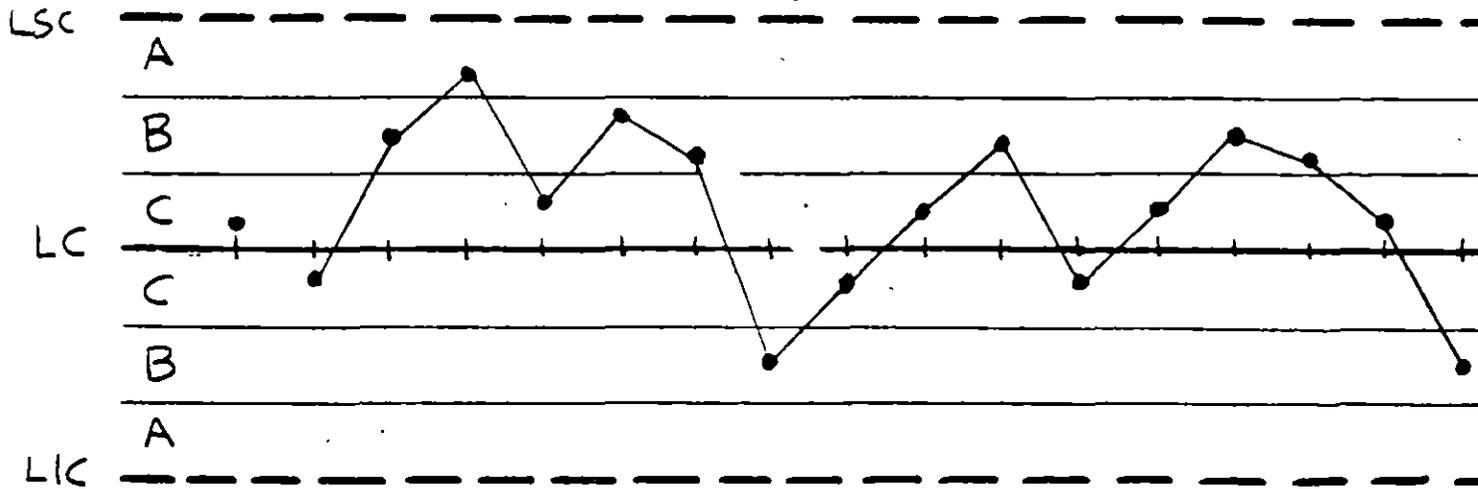


Marque sólo el segundo de los puntos con una X.

REGLA NUMERO 3:

Cuatro de cinco puntos sucesivos caen en la zona B (del mismo lado) o más lejos. El otro punto cae donde sea. Regla válida para diagramas de control R, \bar{X} , I, p, np, c, o u.

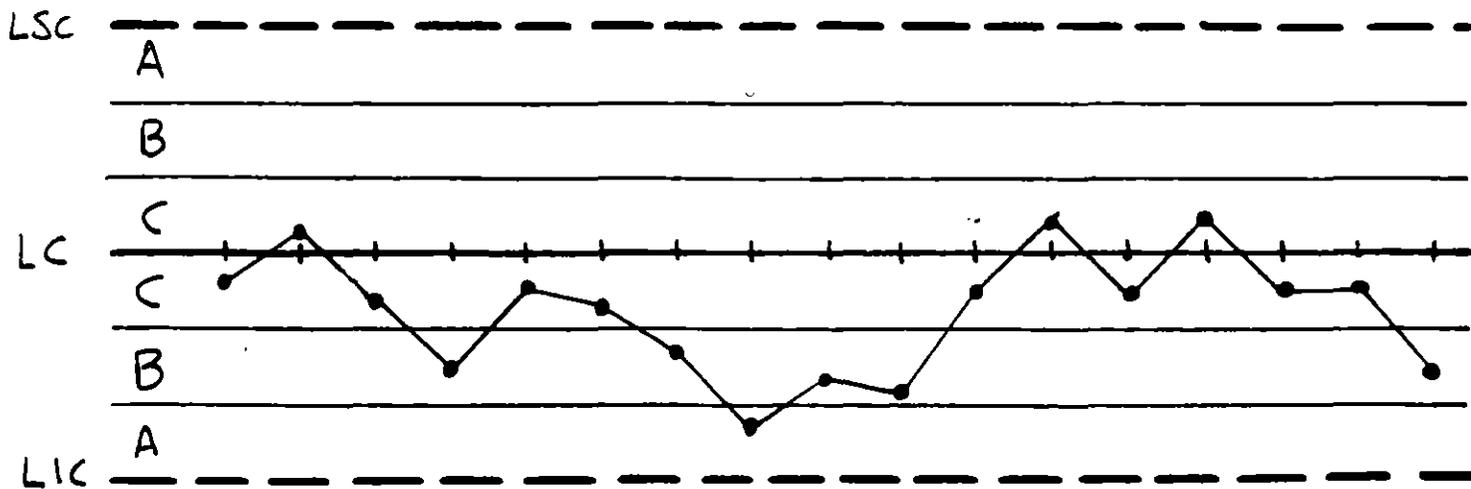
\bar{X} , I, p, np, c, o u.



Marque sólo el cuarto de los cuatro puntos con una X.

REGLA NUMERO 4:

Ocho puntos sucesivos caen en la zona C (del mismo lado) o más lejos. Regla válida para diagramas de control: R, \bar{X} , I, p, np, c, o u.



Marque sólo el octavo punto con una X.

DETECCION DE PRESENCIA DE CORRIDAS: REGLAS PARA CORRIDAS DE NELSON

TECHNICAL AIDS

by
Lloyd S. Nelson

The Shewhart Control Chart—Tests for Special Causes

THREE years ago, for purposes of convenience and uniformity of application, I collected a set of tests for assignable causes (Figure 1) to be applied to Shewhart control charts for means of normally distributed data. Figure 2 is a set of comments on these tests. Deming (1982) refers to assignable causes as "special causes" in order to contrast them with what he calls "common causes". A common cause is one that affects all the points on the chart, as when a centerline is too high. A common cause is fixed by changing the system. A special cause is fixed by removing the perturbing influence that caused the out-of-control signal.

For my use, Figures 1 and 2 were printed back-to-back on 8.5" × 11" yellow card stock and issued to all areas where Shewhart charts are applied. One of the main objectives was to standardize on this schedule of tests so that discussion would be focused on the behavior of the process rather than on what test should be used. Further, control limits are

KEY WORDS: Shewhart Control Charts, Tests for Assignable Causes, Tests for Special Causes, \bar{X} Control Charts

taken to be three sigma away from the mean unless specified otherwise. If it is desirable to use what otherwise might be called "two sigma control limits", test one is simply redefined to be "one point beyond Zone B."

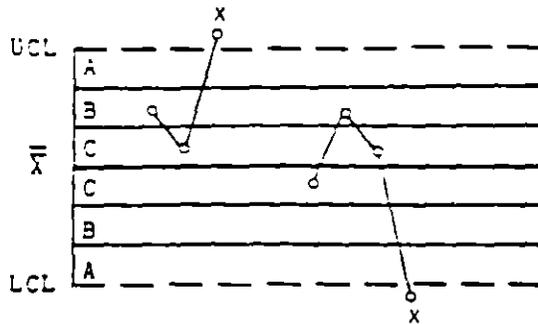
Tests one, three, and four can be used with p , np , c , and u charts. If the distributions are close enough to being symmetrical, test two can also be used with these charts. Use binomial or Poisson tables to check specific situations.

Conditions that can cause each of these tests to give a signal are illustrated in the Western Electric *Statistical Quality Control Handbook* (1956). The serious user should consult this source. I am pleased to be able to say that the Society has given permission for readers to reproduce Figures 1 and 2 without copyright restriction.

References

- DEMING, W. E. (1982). *Quality, Productivity and Competitive Position*. Center for Advanced Engineering Study, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, Chapter 7
- WESTERN ELECTRIC (1956). *Statistical Quality Control Handbook*. American Telephone and Telegraph Company, Chicago, IL.

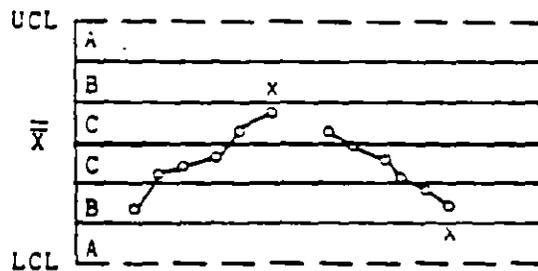
Test 1. One point beyond Zone A



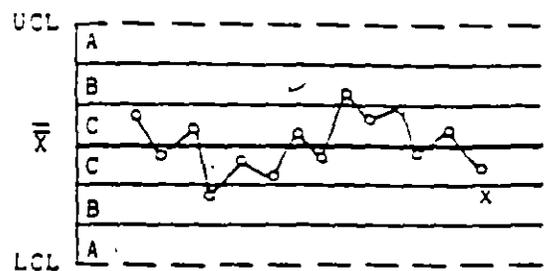
Test 2. Nine points in a row in Zone C or beyond



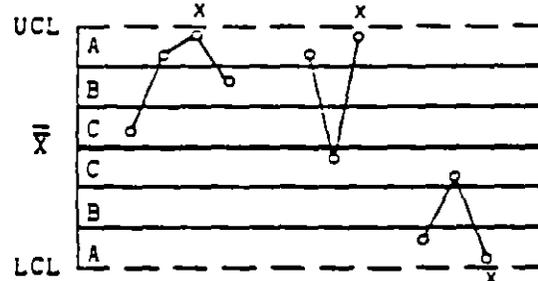
Test 3. Six points in a row steadily increasing or decreasing



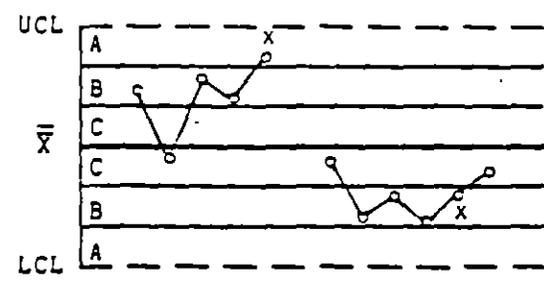
Test 4. Fourteen points in a row alternating up and down



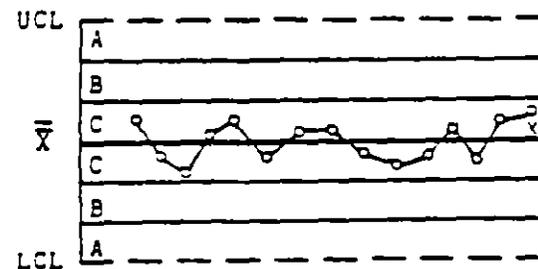
Test 5. Two out of three points in a row in Zone A or beyond



Test 6. Four out of five points in a row in Zone B or beyond



Test 7. Fifteen points in a row in Zone C (above and below centerline)



Test 8. Eight points in a row on both sides of centerline with none in Zones C

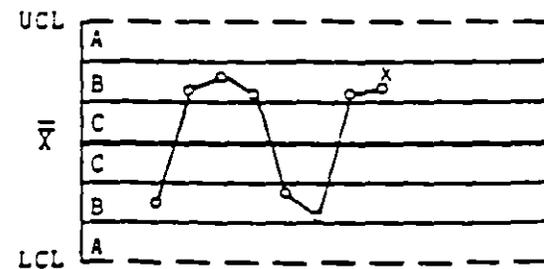


FIGURE 1. Illustrations of Tests for Special Causes Applied to Shewhart Control Charts

SHEWHART CONTROL CHARTS

Notes on Tests for Special Causes

1. These tests are applicable to \bar{x} charts and to individuals (X) charts. A normal distribution is assumed. Tests 1, 2, 5, and 6 are to be applied to the upper and lower halves of the chart separately. Tests 3, 4, 7 and 8 are to be applied to the whole chart.
2. The upper control limit and the lower control limit are set at three sigma above the centerline and three sigma below the centerline. For the purpose of applying the tests, the control chart is equally divided into six zones, each zone being one sigma wide. The upper half of the chart is referred to as A (outer third), B (middle third) and C (inner third). The lower half is taken as the mirror image.
3. When a process is in a state of statistical control, the chance of (incorrectly) getting a signal for the presence of a special cause is less than five in a thousand for each of these tests.
4. It is suggested that Tests 1, 2, 3 and 4 be applied routinely by the person plotting the chart. The overall probability of getting a false signal from one or more of these is about one in a hundred.
5. It is suggested that the first four tests be augmented by Tests 5 and 6 when it becomes economically desirable to have earlier warning. This will raise the probability of a false signal to about two in a hundred.
6. Tests 7 and 8 are diagnostic tests for stratification. They are very useful in setting up a control chart. These tests show when the observations in a subgroup have been taken from two (or more) sources with different means. Test 7 reacts when the observations in the subgroup always come from both sources. Test 8 reacts when the subgroups are taken from one source at a time.
7. Whenever the existence of a special cause is signaled by a test, this should be indicated by placing a cross just above the last point if that point lies above the centerline, or just below it if it lies below the centerline.
8. Points can contribute to more than one test. However, no point is ever marked with more than one cross.
9. The presence of a cross indicates that the process is not in statistical control. It means that the point is the last one of a sequence of points (a single point in Test 1) that is very unlikely to occur if the process is in statistical control.
10. Although this can be taken as a basic set of tests, analysts should be alert to any patterns of points that might indicate the influences of special causes in their process.

FIGURE 2. Comments on Tests for Special Causes



FACULTA
DIVISION

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V: ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA : SUBAGRUPAMIENTO RACIONAL: PROBLEMAS DE
ESTRATIFICACION Y DE MEZCLA DE POBLACIONES

1996

TEMA 7:

**SUBAGRUPAMIENTO RACIONAL: PROBLEMAS DE
ESTRATIFICACION Y DE MEZCLA DE POBLACIONES**

SUBGRUPO (O MUESTRA) RACIONAL

CONJUNTO DE DATOS PROVENIENTES DE MEDICIONES INDIVIDUALES CUYA VARIACION ES ATRIBUIBLE SOLO A UN MISMO PATRON DE VARIACION, O A UN SISTEMA UNICO DE CAUSAS COMUNES

SUBAGRUPAMIENTO RACIONAL

PROCESO DE FORMACION Y OBSERVACION DE SUBGRUPOS EN EL CUAL SE MAXIMIZA LA PROBABILIDAD DE QUE LAS MEDICIONES (DENTRO) DE CADA UNO DE LOS SUBGRUPOS SEAN SIMILARES Y SE MAXIMIZA LA POSIBILIDAD DE QUE LOS SUBGRUPOS DIFIERAN ENTRE SI

SE BUSCA QUE DENTRO DE UN MISMO SUBGRUPO SOLO EXISTA VARIACION COMUN Y QUE LAS CAUSAS ESPECIALES DE VARIACION SE PRESENTEN ENTRE UN SUBGRUPO Y OTRO.

PROBLEMAS INVOLUCRADOS:

TAMAÑO DE LOS SUBGRUPOS, FRECUENCIA DEL MUESTREO, METODOS DE SELECCION DE SUBGRUPOS, ETC.

TAMAÑO DE LOS SUBGRUPOS

LA DETERMINACION DEL TAMAÑO DE LOS SUBGRUPOS DEBE CONSIDERAR

- LAS OBSERVACIONES DENTRO DE CADA SUBGRUPO DEBEN ESTAR SUJETAS SOLO A VARIACION COMUN. ESTO SE LOGRA ESCOGIENDO UN TAMAÑO PEQUEÑO PARA LOS SUBGRUPOS.
- SE DEBE BUSCAR LA PRESENCIA DE UNA DISTRIBUCION NORMAL PARA LAS MEDIAS DE LAS MUESTRAS. ESTO SE LOGRA ESCOGIENDO SUBGRUPOS CON TAMAÑO MAYOR O IGUAL A 4.
- SE DEBE BUSCAR UNA ADECUADA SENSIBILIDAD PARA DETECTAR CAUSAS ESPECIALES/ASIGNABLES. PARA ELLO, CONVIENE UN TAMAÑO GRANDE DE SUBGRUPOS.
- LA MEDICION, CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE DATOS DEBEN REALIZARSE DE MANERA ECONOMICA.

FRECUENCIA DEL MUESTREO

EL INTERVALO DE TIEMPO ENTRE SUBGRUPOS DEBE CONSIDERAR:

- NATURALEZA GENERAL DE LA ESTABILIDAD DEL PROCESO: LA INESTABILIDAD QUE SUELE EXHIBIR UN PROCESO.
- FRECUENCIA DE LOS EVENTOS QUE DETERMINAN AL PROCESO (EJEMPLOS: FLUCTUACIONES EN CONDICIONES AMBIENTALES, CAMBIOS EN MATERIAS PRIMAS, ETC).
- COSTO DE MUESTREO.

METODOS DE SELECCION DE SUBGRUPOS

SUBAGRUPAMIENTO RACIONAL \Rightarrow FORMAR SUBGRUPOS CON OBSERVACIONES QUE SEAN LO MAS HOMOGENEAS POSIBLES
ESTO GENERALMENTE SE LOGRA POR EJEMPLO:

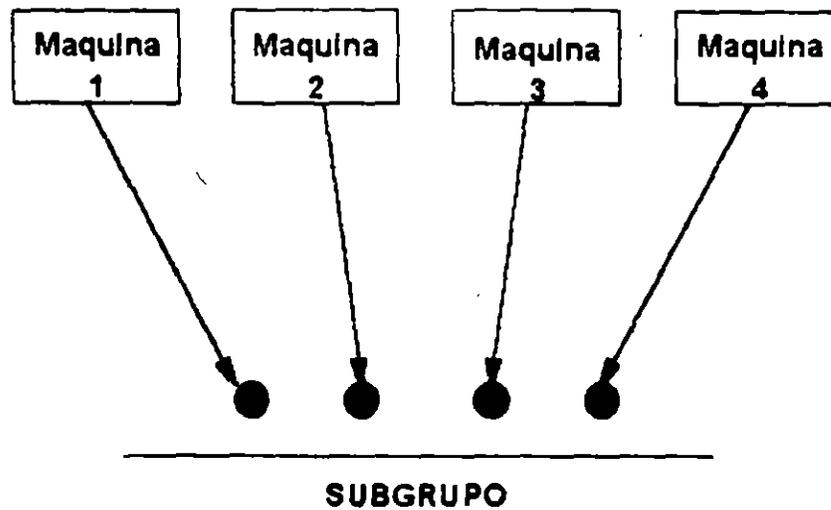
- SELECCIONANDO LOS SUBGRUPOS DE ACUERDO A UN CIERTO ORDEN SECUENCIAL DE PRODUCCION (POR EJEMPLO: 5 MEDICIONES A LAS 9:00, 5 MEDICIONES A LA 9:45...)
- EFECTUANDO LA MEDICIONES DE UN MISMO SUBGRUPO DE MANERA SIMULTANEA.

ERRORES COMUNES EN METODOS DE SELECCION DE SUBGRUPOS:

- ESTRATIFICACION.
- MEZCLA DE POBLACIONES.

ESTRATIFICACION

PROBLEMA ASOCIADO CON SUBGRUPOS FORMADOS (DE MANERA "REPRESENTATIVA") POR MEDICIONES PROVENIENTES DE DIFERENTES PROCESOS.



EJEMPLO

UNA COMPAÑIA HA ENFRENTADO CONSTANTES RECHAZOS DE PRODUCTOS POR PARTE DE UN CLIENTE. YA QUE EL 75% DE LAS PIEZAS QUE ESTE HA RECIBIDO SE ENCUENTRAN FUERA DE ESPECIFICACIONES (100 ± 4). EL INGENIERO DE CALIDAD DEMUESTRA, MEDIANTE LOS DIAGRAMAS DE CONTROL PARA R Y PARA \bar{X} PRESENTADOS A CONTINUACION, QUE "LO QUE DICE EL CLIENTE ES TOTALMENTE FALSO"

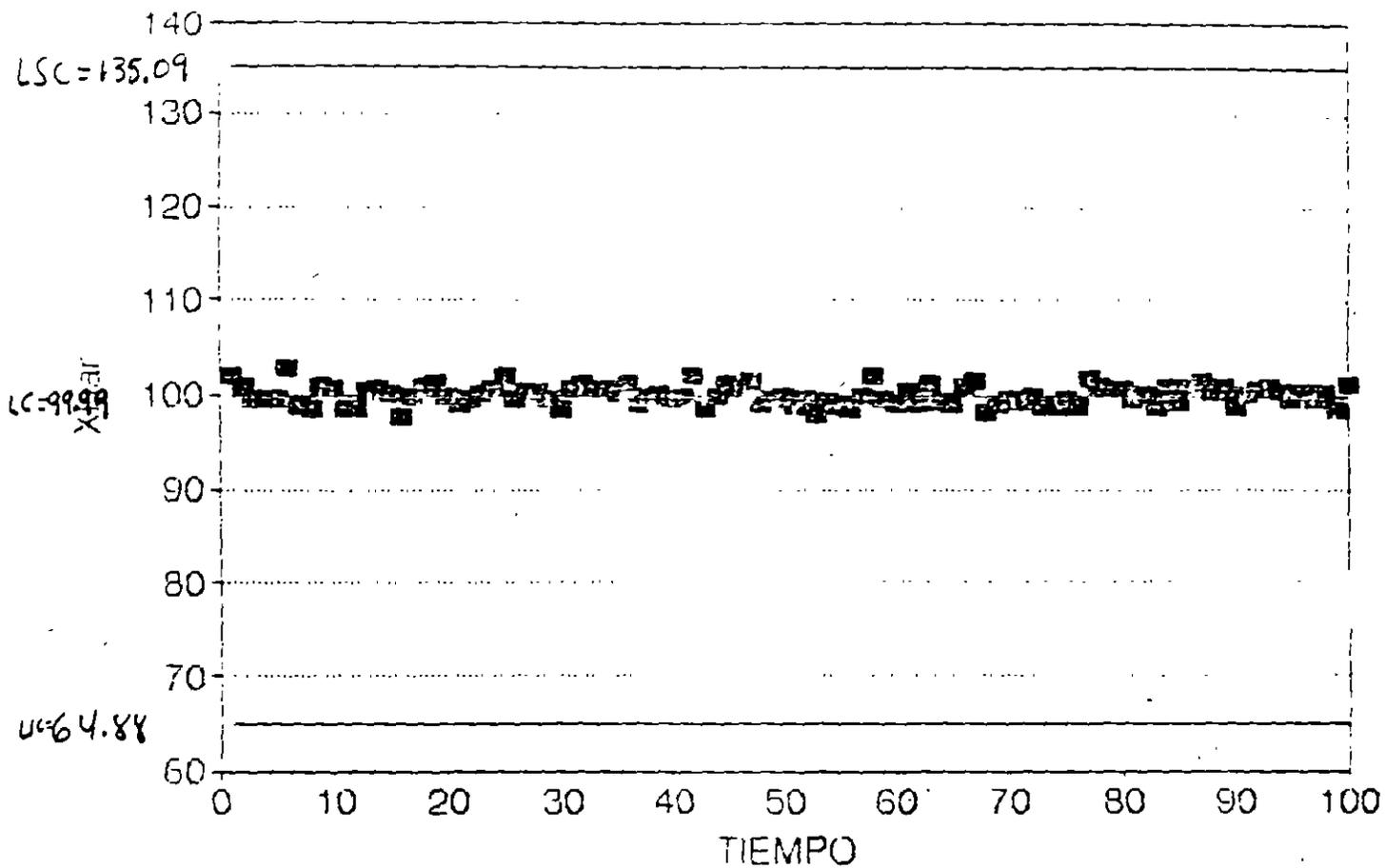


DIAGRAMA DE CONTROL PARA \bar{X}

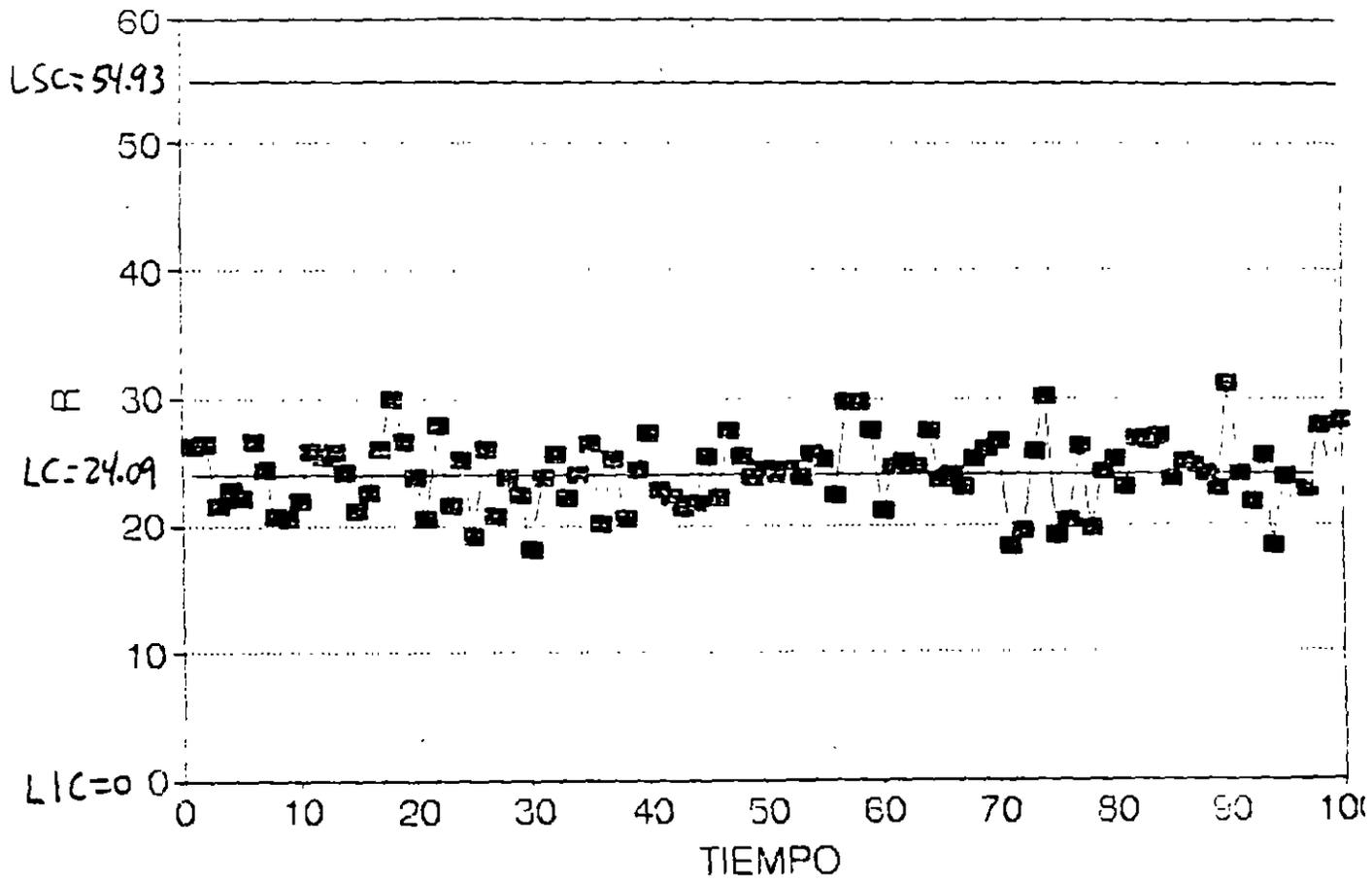
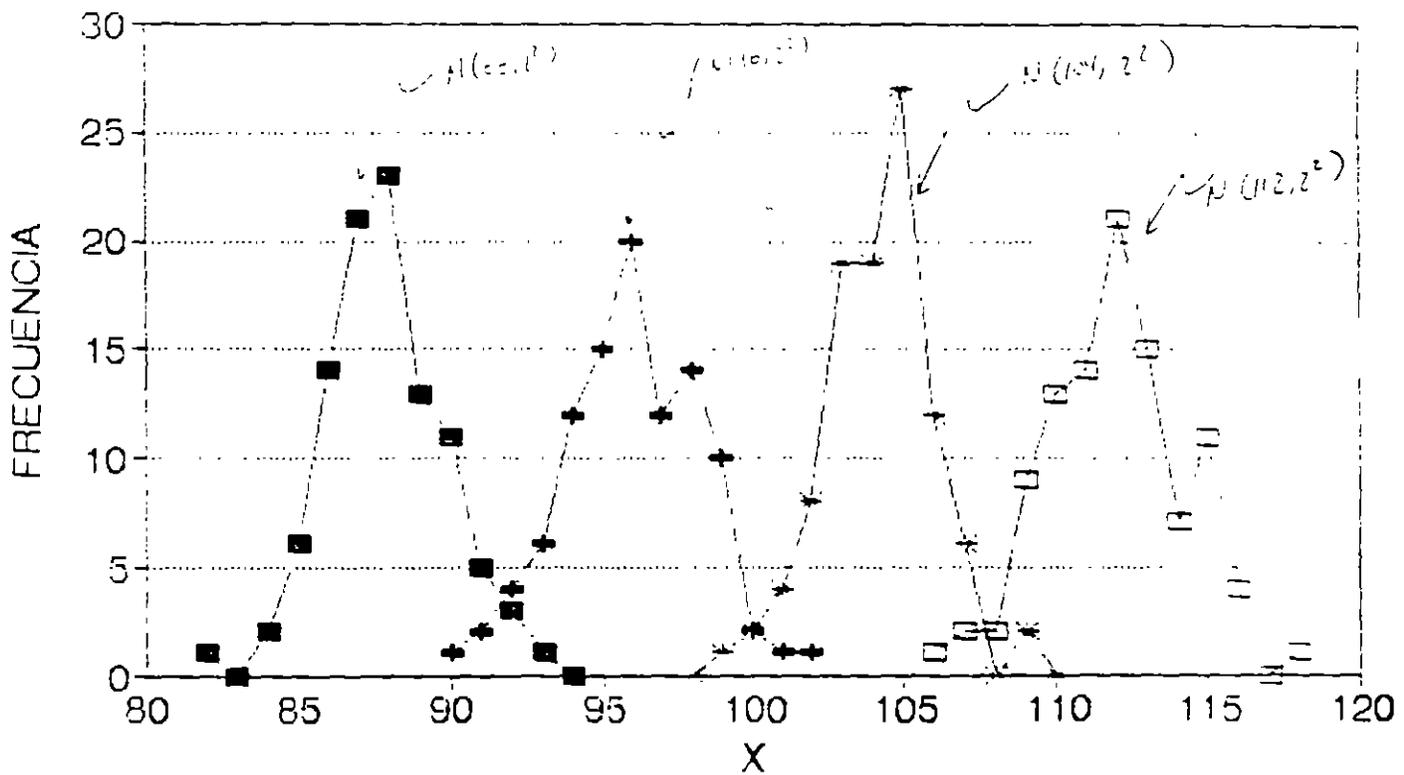


DIAGRAMA DE CONTROL PARA R

DE MANERA SOSPECHOSA AMBOS DIAGRAMAS "ACARICIAN" LAS LINEAS CENTRALES RESPECTIVAS. ELLO SUELE SER INDICATIVO DE ESTRATIFICACION

POSTERIORES INDAGACIONES PERMITIERON CONCLUIR QUE SE ESTAN MUESTREANDO SIMULTANEAMENTE 4 POBLACIONES DISTINTAS. CADA UNA PROVENIENTE DE UN PROCESO (MAQUINA DIFERENTE. TAL COMO SE MUESTRA EN LA SIGUIENTE GRAFICA



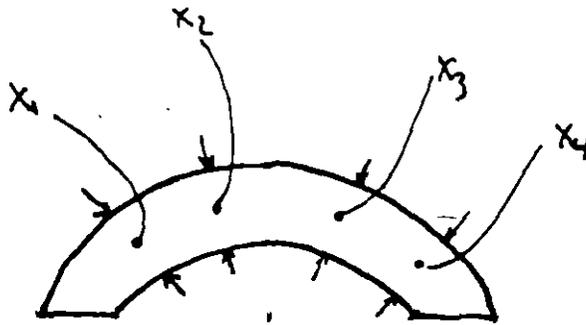
POBLACIONES DEL EJEMPLO

REMEDIO: ELABORAR DIAGRAMAS DE CONTROL PARA CADA UNA DE LAS "FUENTES" DE VARIACION (PROCESOS) DE LOS CUALES SE HACEN LAS OBSERVACIONES.

EJEMPLO

UN CASO FRECUENTE DE ERROR DE ESTRATIFICACION OCURRE CUANDO LOS SUBGRUPOS SE FORMAN A PARTIR DE MULTIPLES MEDICIONES DE UN MISMO ESPECIMEN.

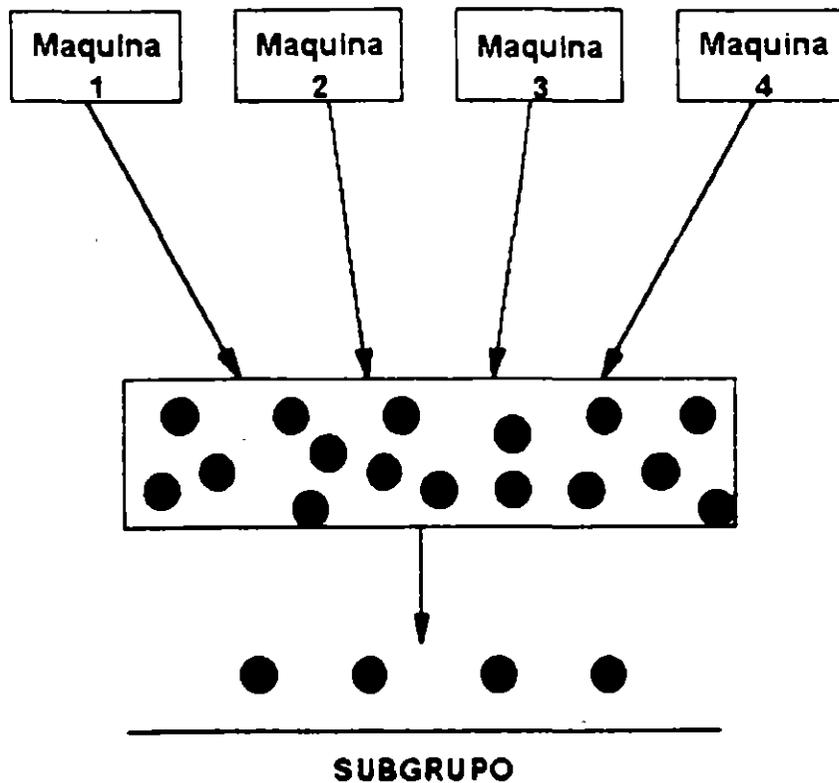
POR EJEMPLO, LA SIGUIENTE FIGURA MUESTRA LOS DIFERENTES PUNTOS (DE UNA MISMA PIEZA) SOBRE LOS CUALES SE REALIZAN MEDICIONES QUE EN SU CONJUNTO, FORMARON UN SUBGRUPO



**MUESTREO ESTRATIFICADO: MEDICIONES
MÚLTIPLES DE UN MISMO ESPECIMEN**

MEZCLA DE POBLACIONES

ERROR QUE SE PRESENTA CUANDO SE "MEZCLAN" EN UN SOLO "RECIPIENTE" POBLACIONES GENERADAS POR DIFERENTES PROCESOS. DENTRO DE UN MISMO SUBGRUPO. LAS OBSERVACIONES QUE LO FORMAN PUEDEN PROVENIR DE UNA MISMA FUENTE DE VARIACION (PROCESO)



DETECCION DE MEZCLA DE POBLACIONES

EN AMBOS DIAGRAMAS DE CONTROL (PARA R Y PARA \bar{X}) SE PRESENTAN PUNTOS QUE "ACARICIAN" A LOS LIMITES DE CONTROL.

REMEDIO

ELABORAR DIAGRAMAS DE CONTROL PARA CADA UNO DE LOS PROCESOS POR SEPARADO





FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS EXACTAS Y FISICAS
DIVISION DE INGENIERIA

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V: ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA : IMPLANTACION Y AUDITORIAS DE DIAGRAMAS DE CONTROL

1996

TEMA 8:

IMPLANTACION Y AUDITORIAS DE DIAGRAMAS DE CONTROL

IMPLANTACION DE DIAGRAMAS DE CONTROL

PROCESO QUE INVOLUCRA TOMA DE DECISIONES, REALIZACION DE CALCULO E IDENTIFICACION DE ACCIONES POR EJECUTAR QUE INCLUYE

1. Decisiones previas a la implantacion de los diagramas de control.
 - Determinación de los objetivos de los diagramas.
 - Selección de la variable.
 - Decisión respecto a las bases para el subagrupamiento.
 - Decisión respecto al tamaño y la frecuencia de los subgrupos.
 - Elaboración de las formas para captura de datos
 - Determinación del método de medición.

2. Implantación de los diagramas de control preliminares.
 - Toma de mediciones.
 - Registro de mediciones y de otros datos relevantes.
 - Cálculo del promedio de cada subgrupo \bar{X}
 - Cálculo del Rango de cada subgrupo R .
 - Vaciado de los datos del Diagrama para \bar{X} .
 - Vaciado de los datos del Diagrama para R .

3. Determinación de los límites de control preliminares.
 - Decisión respecto al número requerido de subgrupos antes de calcular los límites de control.
 - Cálculo de \bar{R} , el promedio de los rangos.
 - Cálculo de \bar{X} , el promedio de las medias.
 - Cálculo de límites superior e inferior de control de cada uno de los diagramas.
 - Graficación de las líneas centrales y de los límites en los diagramas.

4. Obtención de conclusiones preliminares a partir de los diagramas de control.
 - Indicación de control o falta de control.
 - Relación aparente entre lo que el proceso esta haciendo y lo que se quiere que haga.
 - Identificación de las acciones sugeridas por el diagrama de control.

5. Uso continuo de los diagramas de control.
 - Revisión de la línea central y de los límites de control del diagrama para R .
 - Revisión de la línea central y de los límites de control del diagrama para \bar{X} .
 - Uso de los diagramas para definir acciones sobre el proceso.
 - Uso de los diagramas para definir acciones/decisiones sobre la aceptación del producto
 - Uso de los diagramas para definir acciones sobre las especificaciones.

1. DECISIONES PREVIAS A LA IMPLANTACION DE LOS DIAGRAMAS DE CONTROL

Determinar los objetivos

Objetivos comunmente buscados:

1. Analizar el proceso para:
 - Proporcionar información relevante sobre las especificaciones: para establecerlas, para cambiarlas, o para determinar si el proceso puede cumplirlas.
 - Proporcionar información relevante sobre establecimiento o cambio de procedimientos productivos: eliminación de causas especiales de variación, eliminación de causas comunes (cambios fundamentales en métodos o materiales de producción)
 - Proporcionar información relevante sobre procedimientos de inspección o de aceptación (establecimiento o cambio de los mismos).
2. Proporcionar bases para decisiones de producción relacionadas con las causas de variación: cuándo buscar causas de variación y realizar acciones para eliminarlas
3. Proporcionar bases para decisiones respecto a la aceptación o rechazo de productos (comprado o manufacturado).
4. Establecer una de las herramientas para el mejoramiento continuo y/o familiarizar al personal con dicho proceso.

Seleccionar la variable

Razones para seleccionar una cierta variable por controlar:

1. Variable relevante para mejorar la calidad de un producto.
2. Variable crucial para la reducción de los costos de calidad.

Seleccionar las bases para el subagrupamiento

El criterio básico es la formación de subgrupos racionales.

Decidir el tamaño y la frecuencia de los subgrupos

Aspectos por considerar:

1. Criterios económicos.
2. Criterios estadísticos.

Ideas que pueden ayudar:

Generalmente, es deseable tener subgrupos pequeños (por razones económicas). Shewhart recomienda $n=4$. El tamaño más comunmente encontrado en la industria es $n=5$. Subgrupos mas grandes (n entre 10 y 20) ofrecen la ventaja de dar como resultado diagramas de control

sensibles para detectar variaciones pequeñas. En todos los casos, se debe considerar la necesidad de formar subgrupos homogéneos.

Elaborar las formas para la captura de datos

Considere las características del personal que va a capturar los datos

Las formas deben incluir descripción de: (1) el producto por medir, (2) la unidad de medición, (3) cualquier información relevante.

Determinar el método de medición

Aspectos por considerar:

1. Selección de los instrumentos de medición que se usaran para analizar el proceso.
2. Determinación del procedimiento de medición.
3. Documentación sobre el proceso de medición y de la calibración de instrumentos.

2. IMPLANTACION DE LOS DIAGRAMAS DE CONTROL PRELIMINARES

Esto requiere: (1) efectuar y registrar mediciones y consignar cualquier información relevante, (2) calcular promedios y rangos, y (3) elaborar los diagramas de control para \bar{X} y para R.

X-bar and R Control Chart Calculation Form

Name _____ Date _____
 Process _____ Sample description _____
 Number of subgroups (k) _____ Between (dates) _____
 Number of samples or measurements per subgroup (n) _____

$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum \bar{X}}{k} = \underline{\hspace{2cm}}$ $\bar{R} = \frac{\sum R}{k} = \underline{\hspace{2cm}}$

X-bar Chart		R Chart	
UCL = $\bar{\bar{X}} + (A_2 \cdot \bar{R})$		UCL = $D_4 \cdot \bar{R}$	
UCL = _____		UCL = _____	
UCL = _____		UCL = _____	
UCL = _____		UCL = _____	
LCL = $\bar{\bar{X}} - (A_2 \cdot \bar{R})$		LCL = $D_3 \cdot \bar{R}$	
LCL = _____		LCL = _____	
LCL = _____		LCL = _____	
LCL = _____		LCL = _____	

Factors for Control Limits					Process Capability	
n	A ₂	D ₃	D ₄	d ₂		
*1	2.66	—	3.27	1.128	If the process is in statistical control, the standard deviation is	
2	1.88	—	3.27	1.128	$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}$	
3	1.02	—	2.57	1.693	$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2}$	
4	0.73	—	2.28	2.059	$\hat{\sigma} = \underline{\hspace{2cm}}$	
5	0.58	—	2.11	2.326	The process capability is	
6	0.48	—	2.00	2.534	$\bar{X} - 3\hat{\sigma}$ to $\bar{X} + 3\hat{\sigma}$	
7	0.42	0.08	1.92	2.704	— to —	
8	0.37	0.14	1.86	2.847	— to —	
9	0.34	0.18	1.82	2.970	— to —	
10	0.31	0.22	1.78	3.087	— to —	

*Use moving range of 2 for determining R

EJEMPLO DE FORMA PARA CALCULOS

3. DETERMINACION DE LOS LIMITES DE CONTROL PRELIMINARES

1. Determine el número de subgrupos requeridos para poder calcular límites de control lo cual requiere un compromiso entre la urgencia por obtener resultados y la confiabilidad esperada de los mismos (sin embargo, es deseable utilizar por lo menos 25 subgrupos).
2. Calcule los límites de control preliminares.
3. Dibuje las líneas centrales y los límites de control de los diagramas

4. OBTENCION DE CONCLUSIONES PRELIMINARES DE LOS DIAGRAMAS

Indicación de control o falta de control

1. Vacíe los datos de cada uno de los subgrupos observados.
2. Analice la estabilidad del proceso (detección de puntos fuera de control y de presencia de patrones sistemáticos o cambios en el proceso, a través del uso de reglas para análisis de corridas).

En caso de inestabilidad del proceso:

3. Identifique causas especiales de variación.
4. Elimine, en ambos diagramas, los datos de subgrupos que estuvieron fuera de control (en cualquiera de los diagramas).
5. Recalcule líneas centrales y límites de control en ambos diagramas.
6. Regrese a 1, hasta que los diagramas muestren estabilidad del proceso.

Get Control of Your Control Charts

THE NEED FOR QUALITY IN TODAY'S BUSINESS world has stimulated a great desire to use control chart techniques. But all too often during quality systems audits, improperly executed or ineffective charts are found. If employees are to take the time to chart their processes, they must chart them correctly. Conducting a control chart audit will help identify specific areas of concern for your organization.

Control charts are intended to signal the need to look for assignable causes of variation. To get the best information from your charts, you should use a chart-development methodology from a statistical quality control textbook or training manual. Supplementing the written material with a training course is beneficial. Questions or concerns must be resolved during the development stages, not after implementation of the chart. Organizations that are using statistical process control (SPC) techniques should have a resident expert available to field questions and provide support.

This is fine in theory, but what can you do if you find problems with charts that are already in use? During a quality systems audit, you might find charts that are not providing information that contributes to process quality. For example, as shown in Figure 1, charts might have limits that need revision (all of the points are hugging the centerline) or extended runs that are high or low. Should you always assume that an assignable cause hasn't been identified? Probably not. It might not always be a process problem. It might be that the control chart was not developed correctly. Performing a systematic control chart audit will help you identify the areas in the chart-development methodology that are presenting difficulties.

Figure 2 shows an outline of an auditing process that was developed using Eugene L. Grant and Richard S. Leavenworth's *Statistical Quality Control* as a reference.¹ In fact, the outline follows Chapter 4 of the book closely. Several peripheral items were added, and some topics in the sections were resequenced. From this outline, you can develop an auditing checklist that will help you

break down your existing charting system into the logical steps that should have been followed in its development process. Since most of the charts used in the workplace are variables (X-bar and R) charts, the auditing-process outline is geared toward those types of charts. The outline, however, is readily adaptable to s charts or attributes applications (such as n, p, c, or u).

A key matter to consider is who should conduct the audit. The auditor should be a qualified quality professional, independent of the activity being audited. It might be desirable to have a second auditor participate. The auditee should be the person responsible for the development and use of the charts.

If desired, your checklist can be scored using a scale of one to five, with one being lowest and five being the highest. The low end of the scale indicates the absence of an item; the top end of the scale indicates a well-executed and well-documented item. In situations in which a particular item does not apply, mark the item "not applicable" and adjust the score accordingly. Final scores can be calculated on the basis of total points or percent, whichever is most appropriate.

To help you develop your checklist, here is an expanded version of the auditing process outline shown in Figure 2:

I. Preliminaries

This section deals with topics that should be considered prior to implementing SPC.

A. Responsibilities. All personnel—including operations, technical, professional, and management staffs—must be given specific responsibilities. This is one of the most important factors in an SPC program.

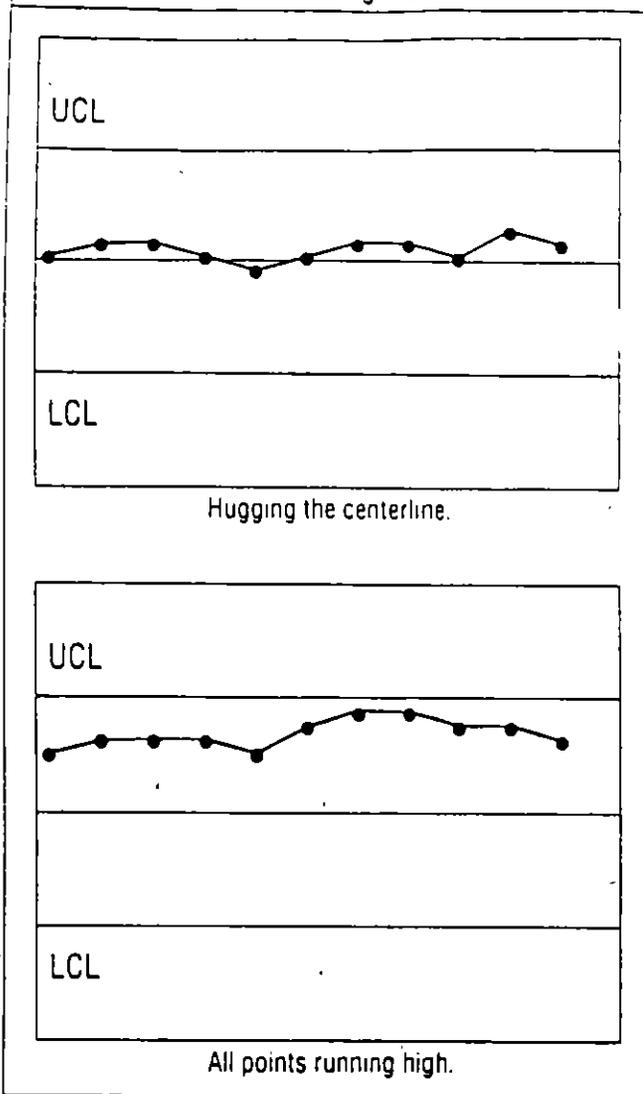
1. Management

a. Provide support. Management support must be visible, constant, involved, and active. Without it, you might as well go home. If the employees don't perceive SPC as being important to the boss, it won't be implemented. Support must come from all management levels, from senior managers to

Determine whether your control charts are providing information that contributes to process quality.

by
Michael J.
Boccacino

Figure 1. Outline of the Auditing Process



group leaders to foremen. Ask the employees whether they believe they are getting support from management in implementing SPC.

b. Define the overall SPC program for the organization. The process of implementing SPC is easier when a document exists stating management's goals and objectives for the organization. For large companies, this should be documented at both the corporate level and the division or unit level. A timeline for implementation can be a valuable tool. Check to see whether such documentation is available to all personnel in the organization.

c. Provide training. Each group of employees has different SPC training needs. Management should outline and document the different "need" groups for each function (e.g., operations, technical, engineering, and administration). Courses and resources should be identified and made available to meet those needs.

2. Personnel

a. Understand responsibilities in the SPC program. In keeping with point 1b, employees must know what is expected of them and when it is expected. It's wise to have employees at all levels participate in defining the SPC program. This will ensure

that they understand and buy into the program. Check to see whether employees understand their responsibilities.

b. Understand roles in the overall process. Employees must know how their roles fit into the overall process and how their jobs affect the product downstream. If employees understand that correcting an error early in the process costs \$100 and correcting the same problem at the end of the process costs \$10,000, they will better appreciate the importance of each individual's operation. Question employees for knowledge of the needs of the people both upstream and downstream in the process.

B. Training received

1. Management. In contrast to point 1c in section A, which discusses the availability of courses, this point deals with actual participation in SPC training. Managers need training if they are to implement SPC. Document the training that each manager receives.

2. Personnel. SPC training should be targeted mainly at the people who will be using SPC daily, such as operators, technicians, and engineers. Short, intensive training programs are fine, but it will be of enormous benefit to provide refresher courses periodically. Document the training that each employee receives.

C. Procedures

1. Overall SPC program. Just having a documented SPC program is not enough. Find out whether the documents are readily available to employees; they must be aware of the SPC program to implement it. They also must have access to the timeline so that they have a framework for achieving the goals and objectives. In addition, definite guidelines concerning the "when" will provide the impetus to stay on track.

2. Nonconforming samples. A step-by-step procedure must be available to tell operators what to do when a sample or measurement is nonconforming. Flowcharts are an excellent tool for this task. If needed, flowcharts can contain simple instructions, such as "run the sample again" or "notify the supervisor."

II. Preparation for control charts

Section II discusses the items that should be considered in preparing a control chart.

A. Review the control chart objectives. An important purpose of control charts is to understand process variability so that you can control and reduce it, which ultimately leads to the production of high-quality materials, data, or services. Control charts should never be used just for the sake of satisfying the boss. It's too time consuming and expensive an exercise to conduct without good objectives. Assess the need for control charts.

B. Choose the variable to be charted. If there is more than one variable implicated in the process, evaluate which one(s) would provide the greatest contribution to process knowledge. Review the justification for charting the variable.

C. Determine the subgroup size and frequency. There are many reasons for choosing subgroup sizes and frequencies. It would be foolish to think that cost is not one of them. Cost, however, should not be the overriding factor. Homogeneity of the sample is the issue. The subgroup must be chosen so that variability within the subgroup is due only to random causes and that variability between subgroups is influenced only by nonrandom causes. Check for the reasons why the subgroup size and frequency were chosen to see whether there is an understanding of how to choose subgroups.

Figure 2. Outline of the Auditing Process

- I. Preliminaries
 - A. Responsibilities
 1. Management
 - a. Provide support
 - b. Define the overall statistical process control (SPC) program for the organization
 - c. Provide training
 2. Personnel
 - a. Understand responsibilities in the SPC program
 - b. Understand roles in the overall process
 - B. Training received
 1. Management
 2. Personnel
 - C. Procedures
 1. Overall SPC program
 2. Nonconforming samples
- II. Preparation for control charts
 - A. Review the control chart objectives
 - B. Choose the variable to be charted
 - C. Determine the subgroup size and frequency
 - D. Develop the data-gathering process
 - E. Select the measurement system
 1. Calibration and standardization
 2. Traceability
- III. Construction of the control charts
 - A. Take measurements
 - B. Record data
 - C. Calculate and plot X-bar and R
- IV. Determination of trial limits
 - A. Select the number of subgroups before limit calculation
 - B. Calculate control chart limits
 - C. Plot central lines and limits
- V. Initial conclusions
 - A. Is the chart indicating an in- or out-of-control situation?
 - B. Is the process demonstrating statistical control or lack of control?
 - C. Are out-of-control situations being investigated?
 - D. Is the process doing what it is supposed to do?
 - E. Are there specifications?
 - F. What is the capability of the process being charted?
 - G. If the process is not in control, what is being done to determine the cause?
 - H. Have enough data been plotted to be able to draw conclusions about the process from the control charts? If there is an adequate amount of data, is it being fully utilized?
- VI. Continued use
 - A. Determine the status of the control chart system
 - B. Review control limits
 - C. Review specifications
 - D. Review process actions
 - E. Determine the worthiness of the control chart system

D. Develop the data-gathering process. The data-gathering process should be simple and efficient; avoid too much data transcription. There are preprinted forms available that give good representations of blank control charts and contain space for recording the raw data as well. If possible, ink should be used to record the data to maintain integrity.

E. Select the measurement system. In the event that there is more than one method available for taking a measurement, investigate to determine which method best serves the purpose.

1. *Calibration and standardization.* Even for fairly simple processes, it is usually necessary to perform some type of calibration or standardization. A procedure should be in place, and historical records should be available to demonstrate that the system was calibrated or standardized at any given time it was in use.

2. *Traceability.* Different types of reference materials and standards have different traceabilities associated with them. The primary reference might be the National Institute of Standards and Technology. In lieu of that reference, many manufacturers and suppliers provide certificates of analysis or other documentation for traceability purposes.

III. Construction of the control charts

The topic of this section is the three tasks needed to acquire the information for a control chart: obtaining the data, calculating the subgroup statistics, and plotting the initial data.

A. *Take measurements.* To minimize the amount of operator variability introduced into the measurement process, there should be a standardized procedure for taking measurements. Even for a one-person operation, a procedure is needed; if that person leaves, there might be no one left who knows how to run the process correctly.

B. *Record data.* To keep good records of the data for the control charts, there should be a data sheet. Data sheets should be neat and orderly. Current data should be kept with the control charts.

C. *Calculate and plot X-bar and R.* Calculating subgroup averages and ranges is straightforward, but errors can occur. Thus, randomly sampling some points and checking calculations is recommended. The plotting of the points on the charts should also be checked. Errors in plotting seem to be fairly common, especially when the scales on the charts are oddly spaced or not easily discernible.

IV. Determination of trial limits

When enough data are collected, control limits must be calculated. Section IV discusses the matter of limits.

A. *Select the number of subgroups before limit calculation.* Find out how many subgroups are used to calculate control limits. The recommended number of subgroups required to calculate initial limits is 20 to 25. When possible, use more—more is better. If you use a small number of subgroups, be prepared to reevaluate the limits after acquiring more data.

B. *Calculate control chart limits.* Calculating control chart limits is fairly simple. The individual responsible for the chart should be able to demonstrate which data were used and the method of calculation for the limits. It is beneficial to write down the calculations and the references for those calculations at the bottom of the chart. Even if an off-the-shelf computer package is used, the operator should still understand and be able to explain the methodology used.

Control Charts cont.

C. Plot central lines and limits. Once the limits are calculated, they should be entered on the current chart and transferred to each subsequent chart. They should be legible, and the scales should be appropriate for the data being charted.

V. Initial conclusions

After the control chart has been in place for some time, it should be communicating usable information about the process. The following series of questions will help assess whether information is being communicated and whether the information is appropriate.

A. Is the chart indicating an in- or out-of-control situation? Documented criteria that provide operators with guidelines for determining what constitutes an in- or out-of-control situation should be available. When such documentation is not present, comments such as "the process is only out of control when a point falls outside the limits" are often heard.

B. Is the process demonstrating statistical control or lack of control? The documented criteria that are in place should also be used to determine whether the process is in or out of control. If no documentation is available, operators will not be able to clearly explain why the process is or is not demonstrating statistical control.

C. Are out-of-control situations being investigated? Not all processes are perfect; many charts will contain points that indicate out-of-control situations. Operators should document, preferably on the chart itself, what action is being taken in response to these out-of-control points. The documentation should contain a record of the investigation pursued to determine the nature of the problem, its assignable cause, and if applicable, how the problem was resolved.

D. Is the process doing what it is supposed to do? When a well-designed control chart is being used, it provides operators with the information they need to manufacture high-quality products (or take good measurements, etc.). If the chart is tracking an insignificant variable, it won't contribute to process quality. If it won't help control your process, don't chart it; find a variable that will help and chart that one instead. Ask operators how they are using the control charts they are producing.

E. Are there specifications? Many processes will have specs that must be met. Operators need to know about all specs, whether they be manufacturing specs, release specs, or customer specs. Check to see that specs are current and documented. Ask the operators whether there are relationships between the specs and the control chart limits.

F. What is the capability of the process being charted? If the process is operating in a state of control, the capability is the variation inherent in the process. The many types of measures and indexes used today provide a relationship between specifications and control limits. How well do you understand what the process is capable of?

G. If the process is not in control, what is being done to determine the cause? A flowchart or other type of guideline should be available to operators. It should provide them with a series of steps to follow in the event of a problem.

H. Have enough data been plotted to be able to draw conclusions about the process from the control charts? If there is an adequate amount of data, is it being fully utilized? The data from the charts can be analyzed, and other information can be extracted, such as day-to-day variability statistics, lab-to-lab comparisons, and correlations between factors relating to the process.

VI. Continued use

This final section takes aim at ongoing use of the control chart system.

A. Determine the status of the control chart system. A control chart should be a dynamic part of a process. Look for extended runs and other signs that indicate that operators are just going through the motions.

B. Review control limits. Intelligent use of control charts translates into periodic review and revision (if necessary) of the limits. The review and revision should be done by the individuals responsible for the design, implementation, and use of the chart. Maintain records showing the data and calculations used.

C. Review specifications. Specifications also need periodic review and revision. There should be documentation to show that specs have been reviewed. Only modify specs when necessary.

D. Review process actions. One goal of maintaining a control chart is to provide information about the process to those responsible for it. As a result of that information, action on the process should be taken when it is indicated by the charts. Examples might be tightening limits after the charts have demonstrated reduced variability, changing suppliers, or reducing the number of suppliers. Find out whether any significant changes have been made to the process as a result of anomalies from a chart.

E. Determine the worthiness of the control chart system. Ask those involved with the process whether the control chart system is worthwhile. Although this question is usually answered indirectly during the audit, their answers to this question can be fascinating.

An Important approach

To some, developing a checklist might seem to be an intuitively obvious approach to monitoring control charts. But keep in mind that, for the inexperienced control chart user, not all of the items presented will be straightforward. Indeed, some items can be rather complicated. By using a structured audit process, an auditor will be able to test the development sequence that was used and identify weak spots for further training. Questions raised during the audit can then be pursued using other resources.

Reference

1. Eugene L. Grant and Richard S. Leavenworth, *Statistical Quality Control*, fifth edition (New York, NY: McGraw-Hill Book Company, 1980).

Michael J. Boccacino is a quality assurance engineer at Eastman Kodak Company in Rochester, NY. He received a master's degree in applied and mathematical statistics from the Rochester Institute of Technology in Rochester, NY. Boccacino is an ASQC senior member, certified quality auditor, and certified quality engineer.

What did you think about this article?

Quality Progress needs your feedback. On the postage-paid reader service card inserted toward the back of this magazine, please circle the number that corresponds with your opinion of the preceding article.	Excellent	Circle #357
	Good	Circle #358
	Fair	Circle #359
	Poor	Circle #360

ANALISIS DE ESTABILIDAD DEL PROCESO
(¿ PROCESO ESTABLE?)

n =

m =

LOCALIZACION

$$\sum_{j=1}^m \bar{x}_j =$$

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum \bar{x}_j}{m} =$$

$$\hat{\mu} = \bar{\bar{x}}$$

DISPERSION

$$\sum_{j=1}^m R_j =$$

$$\bar{R} = \frac{\sum R_j}{m} =$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} =$$

DIAGRAMAS DE CONTROL PRELIMINARES

DIAGRAMA \bar{x}

$$\hat{\mu}_{\bar{x}} = \hat{\mu} = \bar{\bar{x}} =$$

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} =$$

$$LC = \hat{\mu}_{\bar{x}} =$$

$$LSC = \hat{\mu}_{\bar{x}} + 3\hat{\sigma}_{\bar{x}} =$$

$$LIC = \hat{\mu}_{\bar{x}} - 3\hat{\sigma}_{\bar{x}} =$$

DIAGRAMA R

$$LC = \bar{R} =$$

$$LSC = D_4 \bar{R} =$$

$$LIC = D_3 \bar{R} =$$

USO DE REGLAS DE AT&T
(Verificación de estabilidad)

DIAGRAMA \bar{X}

REGLA	SUBGRUPOS QUE LA VIOLAN
R1 (4/1, FL)	-
R2 (2/3, A)	-
R3 (4/5, B)	-
R4 (8/0, C)	-

DIAGRAMA R

REGLA	SUBGRUPOS QUE LA VIOLAN
R1 (4/1, FL)	-
R2 (2/3, A)	-
R3 (4/5, B)	-
R4 (8/0, C)	-

SI SE VIOLA 1 O MAS REGLAS,
EN CUALQUIERA DE LOS DIAGRAMAS,
EL PROCESO ES INESTABLE

EL PROCESO ES _____

SI EL PROCESO ES INESTABLE,
ANALICE LAS CAUSAS ASIGNABLES.
SI SE IDENTIFICAN LAS CAUSAS,
ELIMINE EN AMBOS DIAGRAMAS:
LOS SUBGRUPOS CORRESPONDIENTES Y RECALCULE

SI EL PROCESO ES ESTABLE

- USE LOS DIAGRAMAS DE CONTROL
- EFECTIVAMENTE, $\hat{\mu}_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}}$ Y $\hat{\sigma} = \frac{R}{d_2}$
- PUEDE EVALUARSE LA CAPACIDAD DEL PROCESO



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

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V: ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA : ANALISIS DE LA CAPACIDAD DE UN PROCESO

1996

TEMA 9:

ANALISIS DE LA CAPACIDAD DE UN PROCESO

ANALISIS DE LA CAPACIDAD DE UN PROCESO
(PROCESS CAPABILITY ANALYSIS)

ESTUDIO QUE SE REALIZA SOBRE UN PROCESO CON EL OBJETIVO DE EVALUAR LA MANERA EN LA QUE EL PRODUCTO QUE GENERA SATISFACE LAS EXPECTATIVAS DEL USUARIO DEL PRODUCTO.

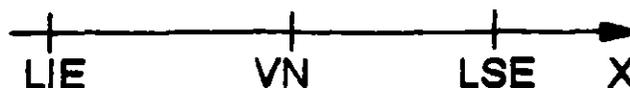
ESPECIFICACIONES

CONJUNTO DE REQUERIMIENTOS A LOS QUE UN PRODUCTO O SERVICIO SE DEBE CONFORMAR.

- DEBEN REFLEJAR LAS EXPECTATIVAS DE LOS USUARIO RESPECTO A LAS CARACTERISTICA DE CALIDAD DEL PRODUCTO.
- SE DEBEN PLASMAR EN UN DOCUMENTO.

UNA ESPECIFICACION (REQUERIMIENTO IMPUESTO SOBRE UNA CARACTERISTICA DE CALIDAD) SE EXPRESA EN TERMINOS DE:

- VALOR NOMINAL.
- LIMITES DE LA ESPECIFICACION.



Dispersion permisible

EVALUACION DE LA CAPACIDAD DE UN PROCESO

PUEDE HACERSE A TRAVES DE:

- PORCENTAJE DE PIEZAS CONFORMANTES.
- INDICES DE LA CAPACIDAD DEL PROCESO.

EVALUACION DE LA CAPACIDAD DE UN PROCESO: USO DE FRECUENCIAS OBSERVADAS

CONSISTE EN DETERMINAR EL PORCENTAJE DE PIEZAS CONFORMANTES A PARTIR DEL PORCENTAJE OBSERVADO DE UNIDADES DE PRODUCTO QUE SATISFACEN LAS ESPECIFICACIONES:

CAPACIDAD = % OBSERVADO DE PIEZAS DENTRO DE ESPECS

EJEMPLO

SE DESEA EVALUAR LA CAPACIDAD DE UN PROCESO QUE GENERA UN CIERTO PRODUCTO. LAS ESPECIFICACIONES DE LA CARACTERISTICA DE CALIDAD X SON 30 ± 4 .

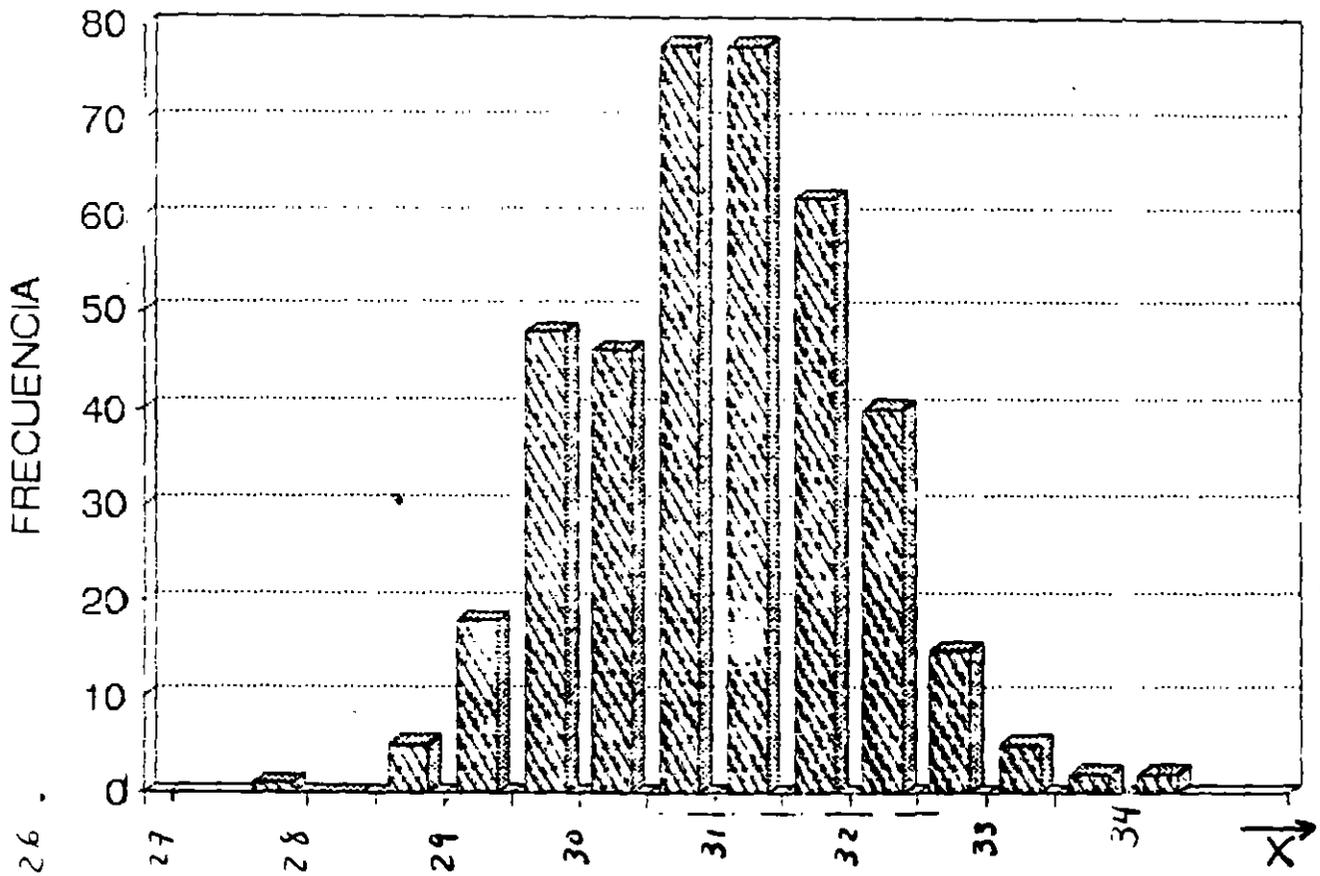
SE HAN OBSERVADO 100 SUBGRUPOS DE TAMAÑO 4. SE TIENE QUE

$\sum_{j=1}^m \bar{X}_j = 12,409.56$ Y $\sum_{j=1}^m R_j = 807.56$. LOS DIAGRAMAS DE CONTROL

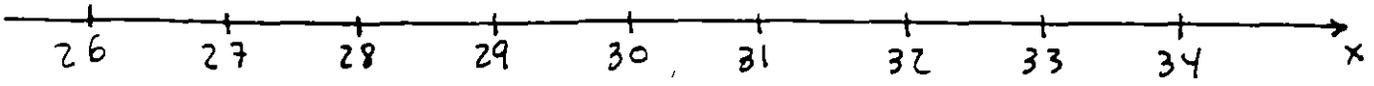
CORRESPONDIENTES INDICAN QUE *EL PROCESO ES ESTABLE*.

SE PRODUJERON 398 PIEZAS FUERA DE ESPECIFICACIONES.

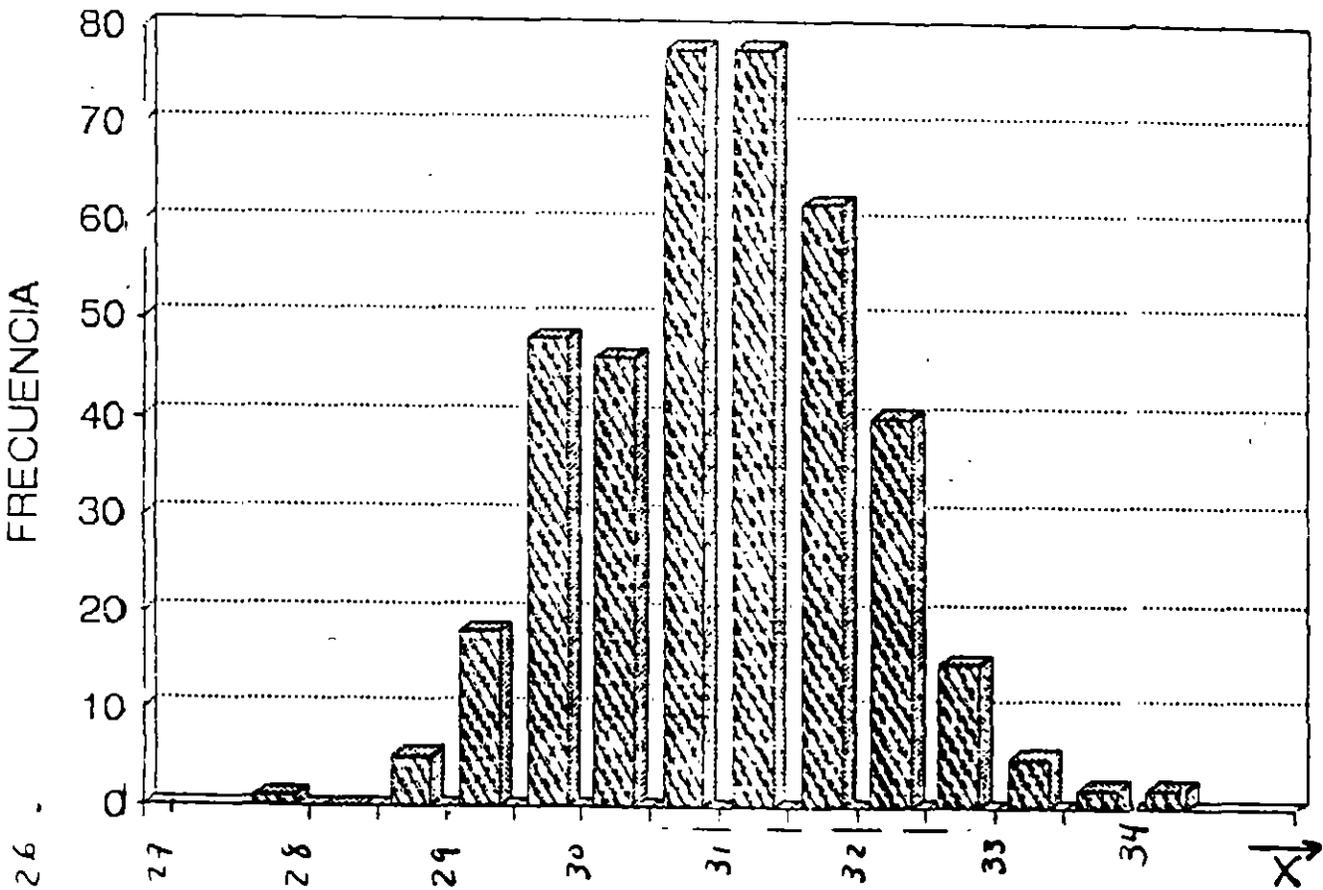
EL HISTOGRAMA PARA LOS 400 DATOS SE MUESTRA EN LA SIGUIENTE FIGURA.



ESPECIFICACIONES



PROCESO



EVALUACION DE LA CAPACIDAD DE UN PROCESO: USO DE DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

CONSISTE EN DETERMINAR EL PORCENTAJE DE PIEZAS CONFORMANTES A PARTIR DEL AJUSTE DE UNA DETERMINADA DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD.

$$\text{CAPACIDAD} = \% \text{ ESTIMADO DE PIEZAS DENTRO DE ESPECS} \\ = P[LIE \leq X \leq LSE] \times 100\%$$

EJEMPLO

CONSIDERE EL PROCESO DEL EJEMPLO ANTERIOR:

- ESPECIFICACIONES DE X: 30 ± 4 .
- PROCESO ESTABLE (100 SUBGRUPOS DE TAMAÑO 4, $\sum_{j=1}^m \bar{X}_j = 12,409.56$ Y $\sum_{j=1}^m R_j = 807.56$).
- EL HISTOGRAMA PARA LOS 400 DATOS MUESTRA QUE LA DISTRIBUCION NORMAL PUEDE MODELAR LA VARIABILIDAD DE X.

INDICE DE LA CAPACIDAD DE UN PROCESO
(PROCESS CAPABILITY INDEX)

INDICADOR QUE COMPARA LA LOCALIZACION Y LA DISPERSION DE LA DISTRIBUCION DE LA CARACTERISTICA DE CALIDAD CON SUS ESPECIFICACIONES.

INDICES COMUNES: C_p , C_{pk} Y C_{pm} (SE HAN CONVERTIDO EN MEDIO DE COMUNICACION USADO EN LAS RELACIONES PROVEEDOR-CLIENTE). SE CARACTERIZAN POR:

- SER APLICABLES A CARACTERISTICAS DE CALIDAD CON *DISTRIBUCION NORMAL* (SU APLICACION REQUIERE *PROCESO ESTABLE*).
- SER MEDIDAS ADIMENSIONALES.
- SER MEDIDAS QUE, A MAYOR CAPACIDAD DEL PROESO, MAYOR VALOR DEL INDICE CORRESPONDIENTE.

EL INDICE C_p

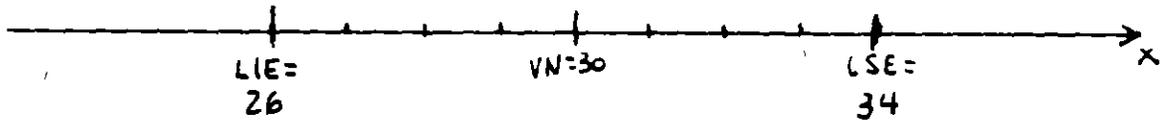
$$C_p = \frac{\text{DISPERSION PERMISIBLE (ESPECS)}}{\text{DISPERSION NATURAL DEL PROCESO}} = \frac{LSE - LIE}{6\sigma}$$

SE LE CONOCE TAMBIEN COMO *INDICE DEL POTENCIAL DEL PROCESO* (INDICA EL MEJOR NIVEL DE CALIDAD QUE SE PUEDE ALCANZAR SIN REALIZAR CAMBIOS FUNDAMENTALES EN EL PROCESO)

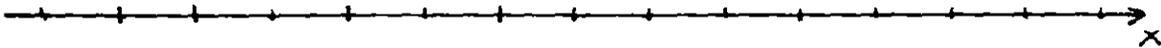
EJEMPLO

CONSIDERE UNA CARACTERISTICA DE CALIDAD CUYAS ESPECES SON 30 ± 4 . EL PRODUCTO PROVIENE DE UN PROCESO ESTABLE, NORMAL, CON $\sigma = 1$. EVALUE LA CAPACIDAD DEL PROCESO USANDO EL INDICE C_p .

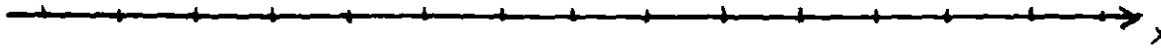
ESPECIFICACIONES



PROCESO

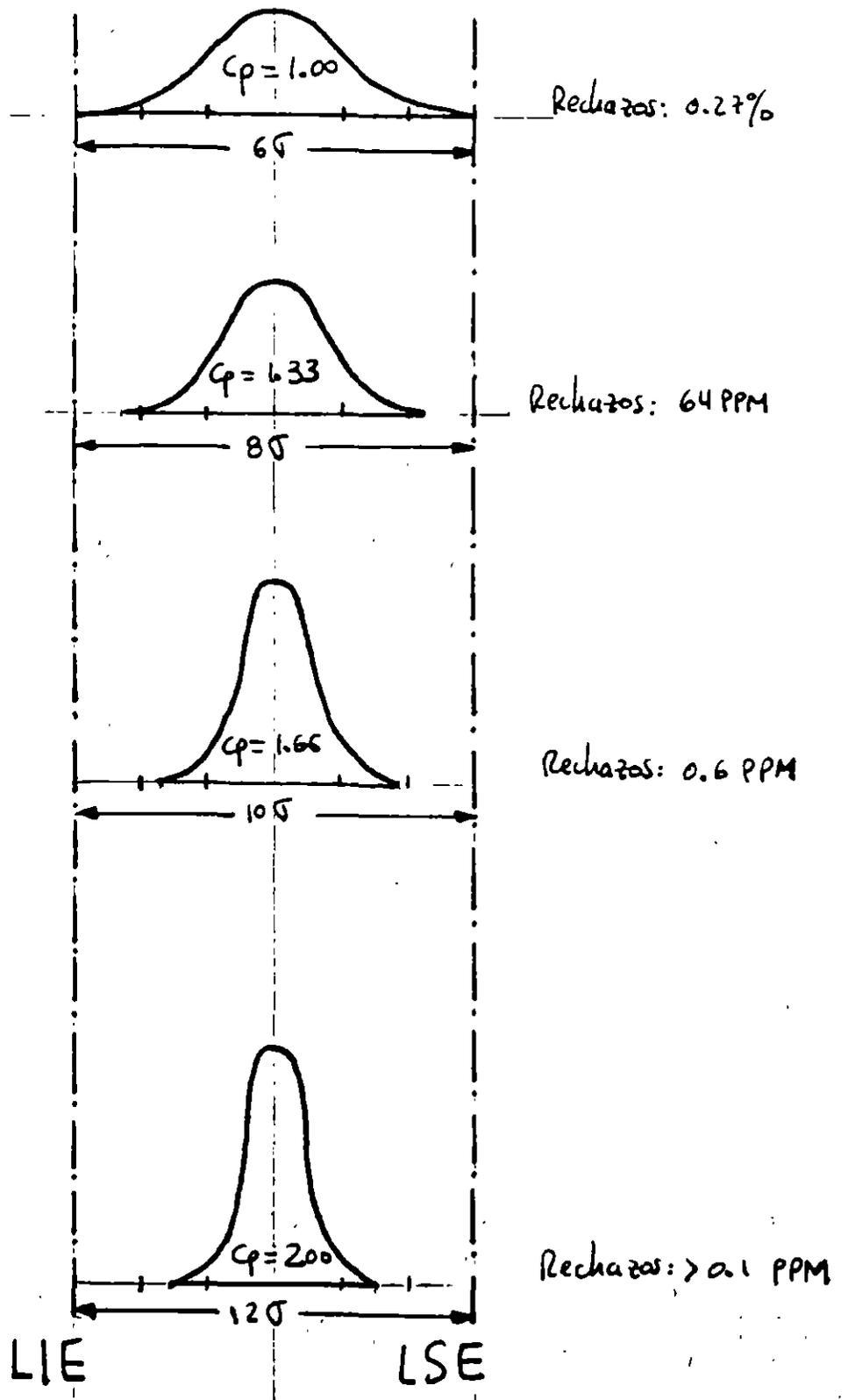


PROCESO



PROCESO





VALORES DE C_p PARA DIFERENTES DISPERSIONES

EJEMPLO

EVALUE LA CAPACIDAD DEL SIGUIENTE PROCESO USANDO EL INDICE C_p :

- ESPECIFICACIONES DE X: 30 ± 4 .
- PROCESO ESTABLE (100 SUBGRUPOS DE TAMAÑO 4, $\sum_{j=1}^m \bar{X}_j = 12,409.56$ Y $\sum_{j=1}^m R_j = 807.56$).
- EL HISTOGRAMA PARA LOS 400 DATOS MUESTRA QUE LA DISTRIBUCION NORMAL PUEDE MODELAR LA VARIABILIDAD DE X.

DEBIDO AL POSIBLE ERROR MUESTRAL, CON EL FIN DE TENER UN "COLCHON DE SEGURIDAD" Y PARA ASEGURAR UNA ADECUADA CALIDAD COMPETITIVA, SE SUELE CONSIDERAR QUE UN PROCESO ES CAPAZ SI $\hat{C}_p \geq 1.33$

EL INDICE C_{PK}

$$C_{PK} = \min \left\{ \frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right\}$$

CONSIDERA TANTO LA LOCALIZACION COMO LA DISPERSION DEL PROCESO. NOTE QUE:

- EL VALOR DE C_{PK} DISMINUYE CONFORME μ SE ACERCA A UNO DE LOS LIMITES DE ESPECIFICACION.
- EL VALOR DE C_{PK} AUMENTA CONFORME σ SE REDUCE.
- PARA UNA CIERTA σ , EL MAXIMO VALOR DE C_{PK} SE ENCUENTRA CUANDO μ ESTA EN MEDIO DE LOS LIMITES DE ESPECIFICACION.

EJEMPLO

CONSIDERE UNA CARACTERISTICA DE CALIDAD CUYAS ESPECES SON $30 \begin{smallmatrix} +4 \\ -3 \end{smallmatrix}$. EL PRODUCTO PROVIENE DE UN PROCESO ESTABLE, NORMAL, CON $\mu = 30$ Y $\sigma = 1$. EVALUE LA CAPACIDAD DEL PROCESO USANDO EL INDICE C_{PK} .

EJEMPLO

EVALUE LA CAPACIDAD DEL SIGUIENTE PROCESO USANDO EL INDICE C_{PK} :

- ESPECIFICACIONES DE X: 30 ± 4 .
- PROCESO ESTABLE (100 SUBGRUPOS DE TAMAÑO 4, $\sum_{j=1}^m \bar{X}_j = 12,409.56$ Y $\sum_{j=1}^m R_j = 807.56$).
- EL HISTOGRAMA PARA LOS 400 DATOS MUESTRA QUE LA DISTRIBUCION NORMAL PUEDE MODELAR LA VARIABILIDAD DE X.

EL INDICE C_{PM}

$$C_{PM} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{(\mu - T)^2 + \sigma^2}}$$

donde T: VALOR OBJETIVO (*TARGET*) DE LA CARACTERISTICA DE CALIDAD

CONSIDERA TANTO LA DISPERSION DEL PROCESO COMO LA LOCALIZACION DE ESTE RESPECTO A T. NOTE QUE:

- EL VALOR DE C_{PM} DISMINUYE CONFORME μ SE "SEPARA" RESPECTO A T.
- EL VALOR DE C_{PM} AUMENTA CONFORME σ SE REDUCE.
- EL VALOR DE C_{PM} AUMENTA CONFORME LA COMBINACION (μ, σ) SE APROXIMA A $(T, 0)$.

EJEMPLO

CONSIDERE UNA CARACTERISTICA DE CALIDAD CUYAS ESPECS SON 30^{+4}_{-3} . EL PRODUCTO PROVIENE DE UN PROCESO ESTABLE, NORMAL, CON $\mu = 30$ Y $\sigma = 1$. EVALUE LA CAPACIDAD DEL PROCESO USANDO EL INDICE C_{PM} .

EJEMPLO

EVALUE LA CAPACIDAD DEL SIGUIENTE PROCESO USANDO EL INDICE C_{PM}:

- ESPECIFICACIONES DE X: 30 ± 4 (T = 30).
- PROCESO ESTABLE (100 SUBGRUPOS DE TAMAÑO 4, $\sum_{j=1}^m \bar{X}_j = 12,409.56$ Y $\sum_{j=1}^m R_j = 807.56$).
- EL HISTOGRAMA PARA LOS 400 DATOS MUESTRA QUE LA DISTRIBUCION NORMAL PUEDE MODELAR LA VARIABILIDAD DE X.



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

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V: ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

**TEMA : DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD PARA VARIABLES
DISCRETAS**

1996

TEMA 10:

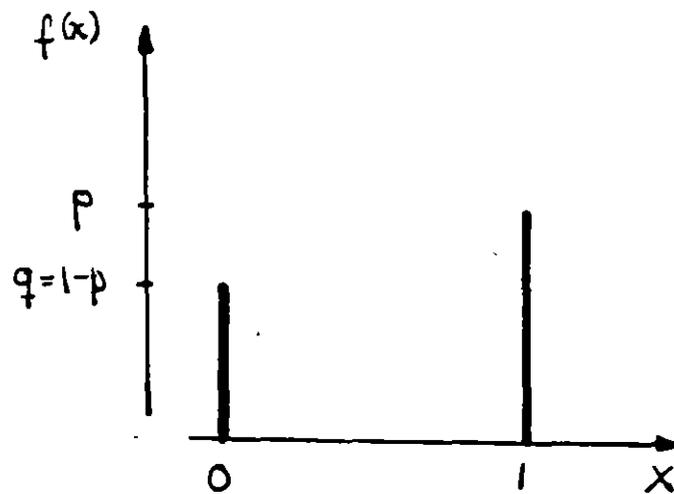
**DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD
PARA VARIABLES DISCRETAS**

DISTRIBUCION DE BERNOULLI (parámetro p)

Es un experimento aleatorio en el cual se pueden observar dos diferentes valores
(0 o 1, "éxito" o "fracaso")

$$f(x) = \begin{cases} p & \text{si } x = 1 \\ (1-p) = q & \text{si } x = 0 \end{cases}$$

$$\mu = p \quad \sigma^2 = p(1-p) = pq$$



DISTRIBUCION BINOMIAL (parámetros p y n)

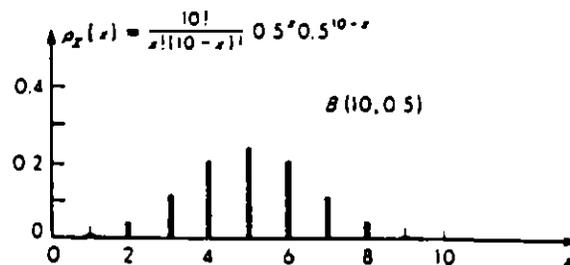
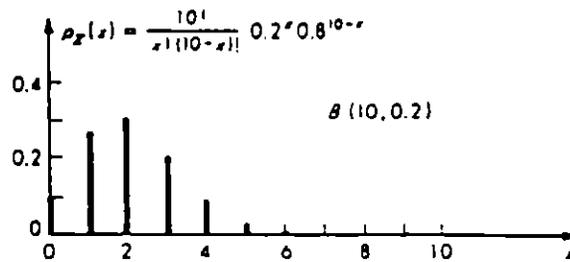
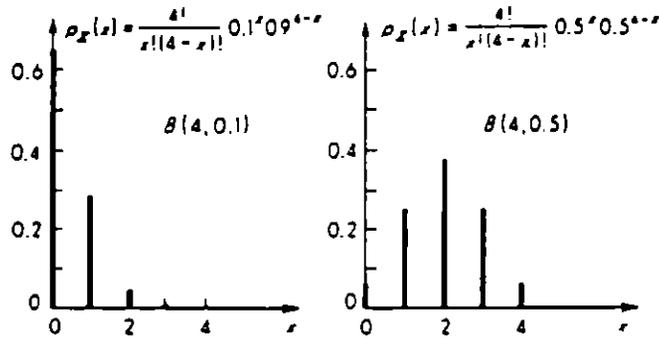
¿Cuál es la probabilidad de observar k éxitos en n intentos?

1. Cada intento es un experimento de Bernoulli
2. La probabilidad de éxito p es constante para todos los intentos
3. Los intentos son independientes

$$f(k) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k q^{(n-k)} \quad k=0, 1, \dots, n$$

$$\mu = np$$

$$\sigma^2 = npq$$



DISTRIBUCION BINOMIAL NEGATIVA
(parámetro p)

¿Cuál es la probabilidad de que el k-ésimo éxito
ocurra en el n-ésimo intento?

Supuestos: los mismos que para la distribución binomial

$$f(n) = \binom{n-1}{k-1} p^{k-1} q^{n-k} p$$
$$= \binom{n-1}{k-1} p^k q^{n-k} \quad n = k, k+1, \dots$$

$$\mu = \frac{k}{p} \quad \sigma^2 = k \frac{q}{p}$$

Ejemplo: Determine los valores de $f(n)$ para $p = 0.06$

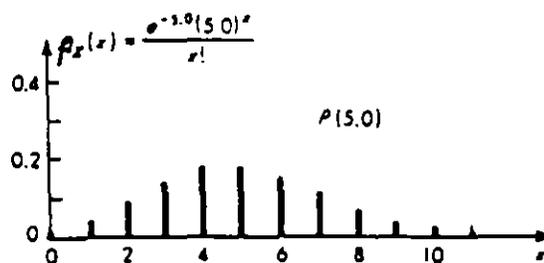
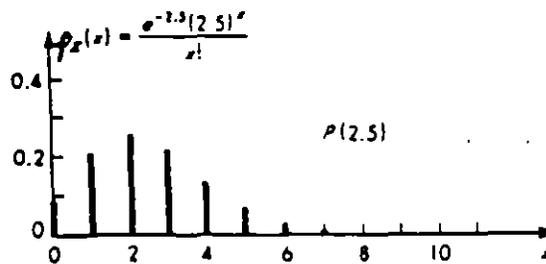
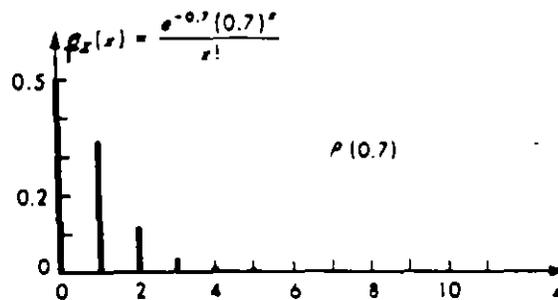
DISTRIBUCION DE POISSON (parámetro λ)

Permite determinar la probabilidad de que se presenten k ocurrencias en un cierto continuo

$$f(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad k=0, 1, 2, \dots$$

$$\mu = \lambda \quad \sigma^2 = \lambda$$

λ : parámetro de "intensidad" (ocurrencias/unidad del continuo)



Ejemplo: Se ha estimado que una cierta máquina produce 3 piezas defectuosas/hora. Determine las probabilidades de que en una hora se produzcan 0, 1, 2, 3 y 4 piezas defectuosas.

Propiedad recursiva: $f(k) = \frac{\lambda}{k} f(k-1)$

PROCESO DE POISSON (parámetro λ)

Es la generalización de la distribución de Poisson

$$f(k) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} \quad k=0, 1, 2, \dots$$

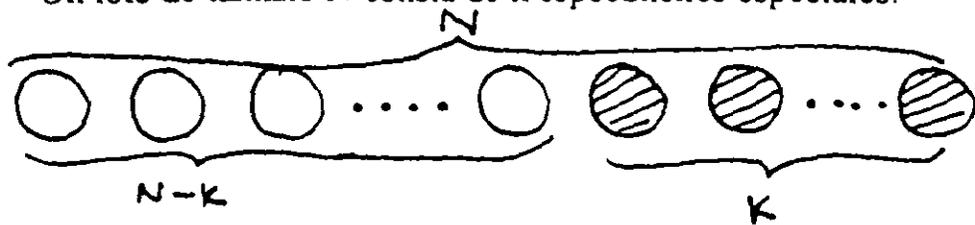
$$\mu = \lambda t \quad \sigma^2 = \lambda t$$

λ : parámetro de "intensidad" (ocurrencias/unidad del continuo)

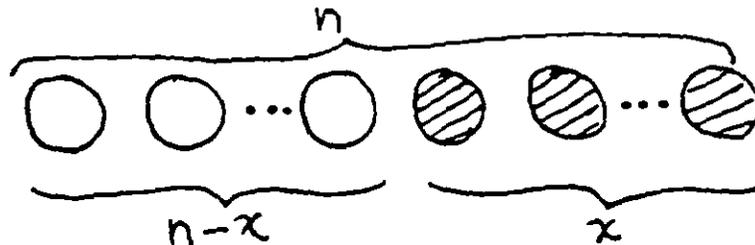
Ejemplo: Se ha estimado que una cierta máquina produce 3 piezas defectuosas/hora. Determine las probabilidades de que en un turno de 8 horas se produzcan 0, 1, 2, 3 y 4 piezas defectuosas.

DISTRIBUCION HIPERGEOMETRICA

Un lote de tamaño N consta de k especímenes especiales:



De dicho lote se extrae una muestra de tamaño n

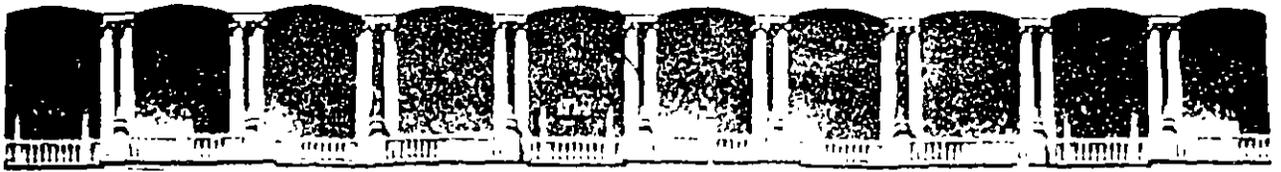


¿Cuál es la probabilidad de que en la muestra se encuentren x especímenes especiales (obtenidos sin remplazo)

$$f(x) = \frac{\binom{k}{x} \binom{N-k}{n-x}}{\binom{N}{n}}$$

$$\mu = n \left(\frac{k}{N} \right) \quad \sigma^2 = n \left(\frac{k}{N} \right) \left(1 - \frac{k}{N} \right) \left(\frac{N-n}{N-1} \right)$$

Ejemplo: Un proceso de fabricación de focos produce 12.5% de focos defectuosos. Si los focos se embalan en cajas de 24 unidades. ¿Cuál es la probabilidad de que, en una muestra de 6 focos de una misma caja, x de ellos sean defectuosos?



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

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V: ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA: DIAGRAMA DE CONTROL PARA ATRIBUTOS

1996

TEMA 11:

DIAGRAMAS DE CONTROL PARA ATRIBUTOS

DIAGRAMAS DE CONTROL PARA ATRIBUTOS

Diagramas para variables: diagramas de control que se utilizan para productos cuya calidad se refleja en características de calidad que se pueden "medir". Por ejemplo, diagramas para \bar{X} , R, I, PM, etc.

Diagramas para atributos: diagramas de control para productos cuya calidad se basa en una clasificación del producto en *conformante* (*conforming*) según las especificaciones, o *no conformante* (*non-conforming*).

USO DE DIAGRAMAS PARA ATRIBUTOS

- Clasificación de piezas "defectuosas".
- Procedimientos de inspección "pasa-no pasa".
- Productos con múltiples características de calidad medibles.

DEFINICIONES

Defecto o no conformidad: (*defective, non-conformity*) falla o no-conformidad que hace que el producto no cumpla con las especificaciones (una misma unidad de un producto puede tener varios defectos a la vez).

Defectuoso o no conformante: (*defective, non-conforming*) una unidad de producto o artículo con uno o más defectos.

Número de defectuosos: (*number of defectives*) en una muestra con n especímenes, el número d de especímenes defectuosos.

Número de defectos: (*number of defects*) número total c de defectos encontrados en todos los especímenes de una muestra de tamaño n .

Fracción o proporción defectuosa: (*fraction, proportion defective*) proporción p entre el número de especímenes defectuosos y el número total de especímenes en la muestra

$$p = \frac{d}{n}$$

DEFINICIONES OPERACIONALES

Definiciones precisas que responden a la pregunta *¿qué constituye un defecto?*

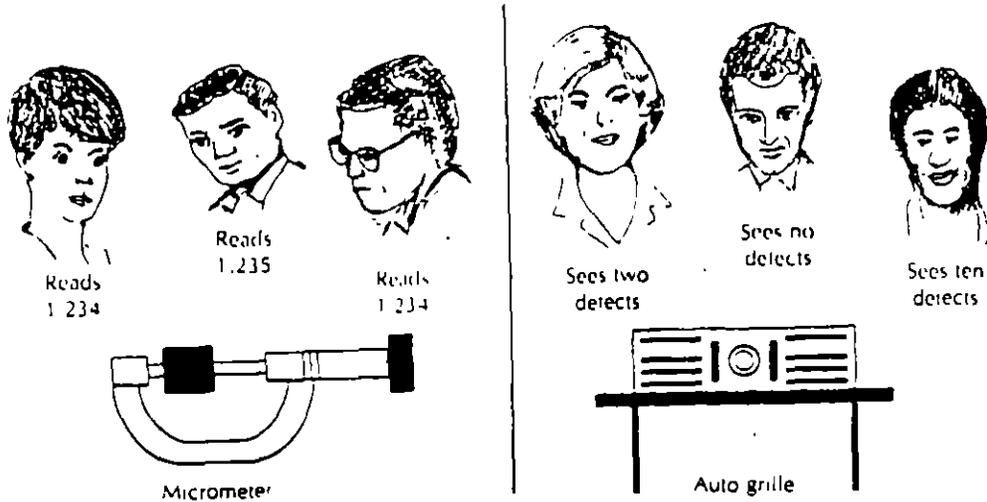


Figure 13.1 Human Variability in Attribute Quality Characterization

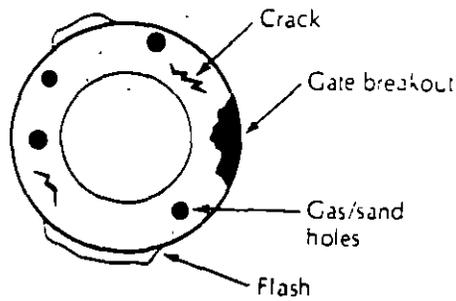
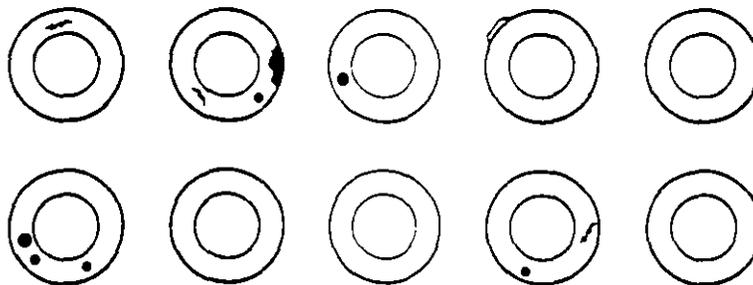


Figure 13.2 Example of Defect Identification in an Attribute Quality Characterization Situation (Engine Valve Seat Blank)



Cracks	Number of defects =
Holes	Number of defectives =
Flash	Fraction defective =
Gate breakout	Number of defects/unit =

Figure 13.3 Example of Sample Result for Attribute Quality Characterization

DIAGRAMA DE CONTROL PARA PROPORCION DEFECTUOSA: DIAGRAMA p

Diagrama para el control de la *fracción o proporción defectuosa*.

CONSTRUCCION DEL DIAGRAMA 3-SIGMA:

$$\begin{aligned}LC &= \mu_p \\LSC &= \mu_p + 3\sigma_p \\LIC &= \mu_p - 3\sigma_p\end{aligned}$$

DETERMINACION DE μ_p Y σ_p

Si d : número de artículos no conformantes es $b(n,p)$

$$\Rightarrow E[d] = np \quad \sigma_d^2 = npq \quad \sigma_d = \sqrt{npq}$$

Puesto que $p = \frac{d}{n}$:

$$\mu_p =$$

$$\sigma_p^2 = \text{VAR} \left[\frac{d}{n} \right] =$$

$$\sigma_p =$$

$$LC =$$

$$LSC = +3$$

$$LIC = -3$$

IMPLANTACION DEL DIAGRAMA

1. Estime \bar{p}

$$\hat{p} = \bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^m d_i}{\sum_{i=1}^m n_i}$$

m : número de subgrupos observados.

d_i : número de artículos no conformantes en subgrupo i .

n_i : tamaño del subgrupo i .

2. Determine la línea central y los límites de control

$$LC = \hat{p}$$

$$LSC = \hat{p} + 3 \sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n_i}}$$

$$LIC = \hat{p} - 3 \sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n_i}}$$

3. Para el subgrupo i , grafique la proporción defectuosa correspondiente:

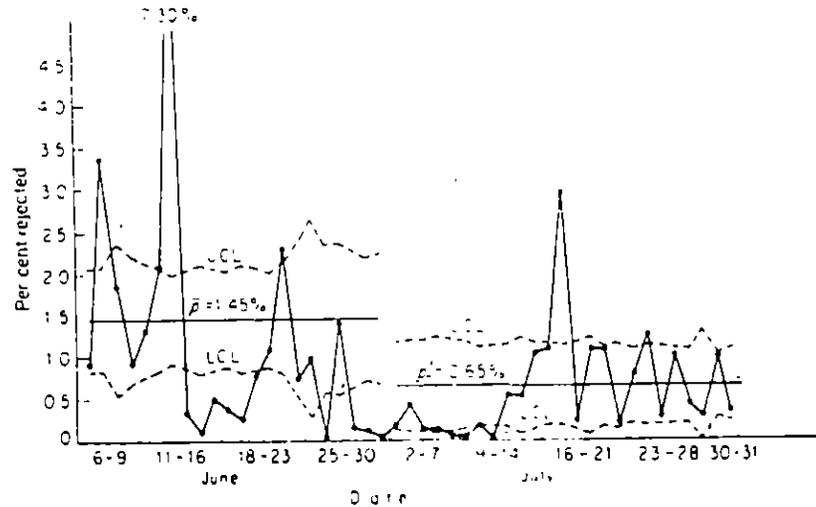
$$p_i = \frac{d_i}{n_i}$$

4. Identifique los puntos fuera de control.

TAMAÑO DE LOS SUBGRUPOS

SOLUCIONES COMUNES:

1. Calcular límites de control *para cada subgrupo*, mostrando dichos límites (cambiantes) en el diagrama.



2. Calcular límites de control con base en *tamaño promedio* de los subgrupos:

- Revise periódicamente el tamaño promedio
- Si el tamaño de un subgrupo difiere sensiblemente del tamaño promedio, calcule límites para ese subgrupo.
- Calcule límites de un subgrupo fuera de control y con tamaño pequeño.

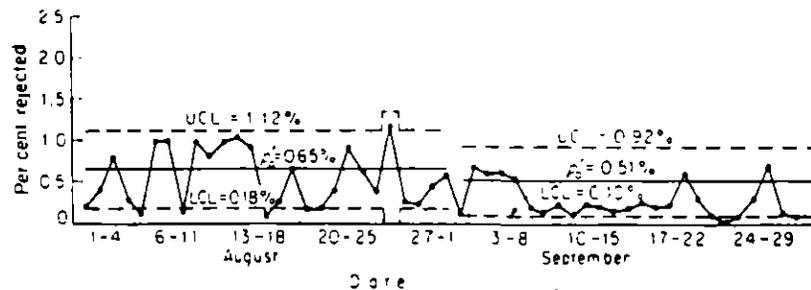


Figure 7-2 Control chart for per cent rejected—4 months' production of an electrical device.

EJEMPLO

UNA COMPAÑIA FABRICA DIFERENTES TIPOS DE TUBOS DE RAYOS CATODICOS A ESCALA MASIVA. EL MES PASADO, EL TUBO TIPO A DIO MUCHOS PROBLEMAS. LA SIGUIENTE TABLA MUESTRA LOS DATOS OBTENIDOS DE LAS INSPECCIONES REALIZADAS 21 DIAS DEL MES PASADO. DIARIAMENTE SE INSPECCIONAN 100 UNIDADES. DETERMINE EL DIAGRAMA DE CONTROL PARA EL PROCESO.

DIA	FRACCION RECHAZADA	DIA	FRACCION RECHAZADA
1	0.22	12	0.46
2	0.33	13	0.31
3	0.24	14	0.24
4	0.20	15	0.22
5	0.18	16	0.22
6	0.24	17	0.29
7	0.24	18	0.31
8	0.29	19	0.21
9	0.18	20	0.26
10	0.27	21	0.24
11	0.31		

1. Estime \bar{p}

$$\hat{p} = \bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^m d_i}{\sum_{i=1}^m n_i} = \frac{\sum_{i=1}^m p_i}{m} = \frac{5.46}{21} =$$

2. Determine la línea central y los límites de control

$$LC = \hat{p} = 0.39159$$

Para calcular los límites de control se requiere $\hat{\sigma}_p$:

$$\hat{\sigma}_p = \sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n_i}} =$$

$$LSC = \hat{p} + 3\hat{\sigma}_p =$$

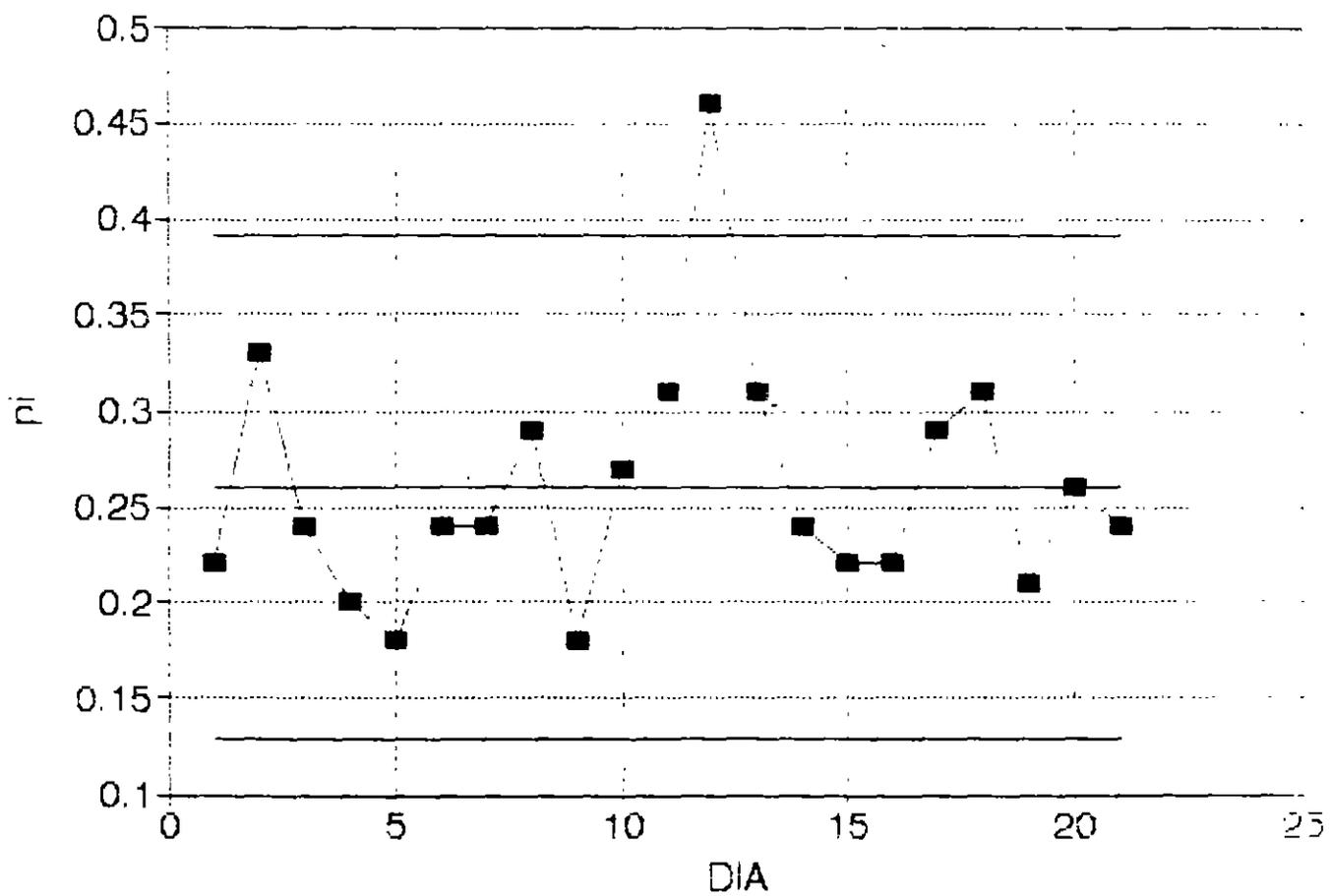
$$LIC = \hat{p} - 3\hat{\sigma}_p =$$

3. Para el subgrupo i , grafique la proporción defectuosa correspondiente:

$$p_i = \frac{d_i}{n_i}$$

4. Identifique los puntos fuera de control.

DIAGRAMA p



EJEMPLO

UN PRODUCTO SE ESTA INSPECCIONANDO CADA HORA AL 100%. LA SIGUIENTE TABLA MUESTRA LOS REGISTROS DE 16 HORAS DE INSPECCION.

HORA	UNIDADES INSPECCIONADAS	UNIDADES FUERA DE ESPECIFICACION
1	48	5
2	36	5
3	50	0
4	47	5
5	48	0
6	54	3
7	50	0
8	42	1
9	32	5
10	40	2
11	47	2
12	47	4
13	46	1
14	46	0
15	48	3
16	39	0

$$\sum_{i=1}^m d_i = 36 \qquad \sum_{i=1}^m n_i = 720$$

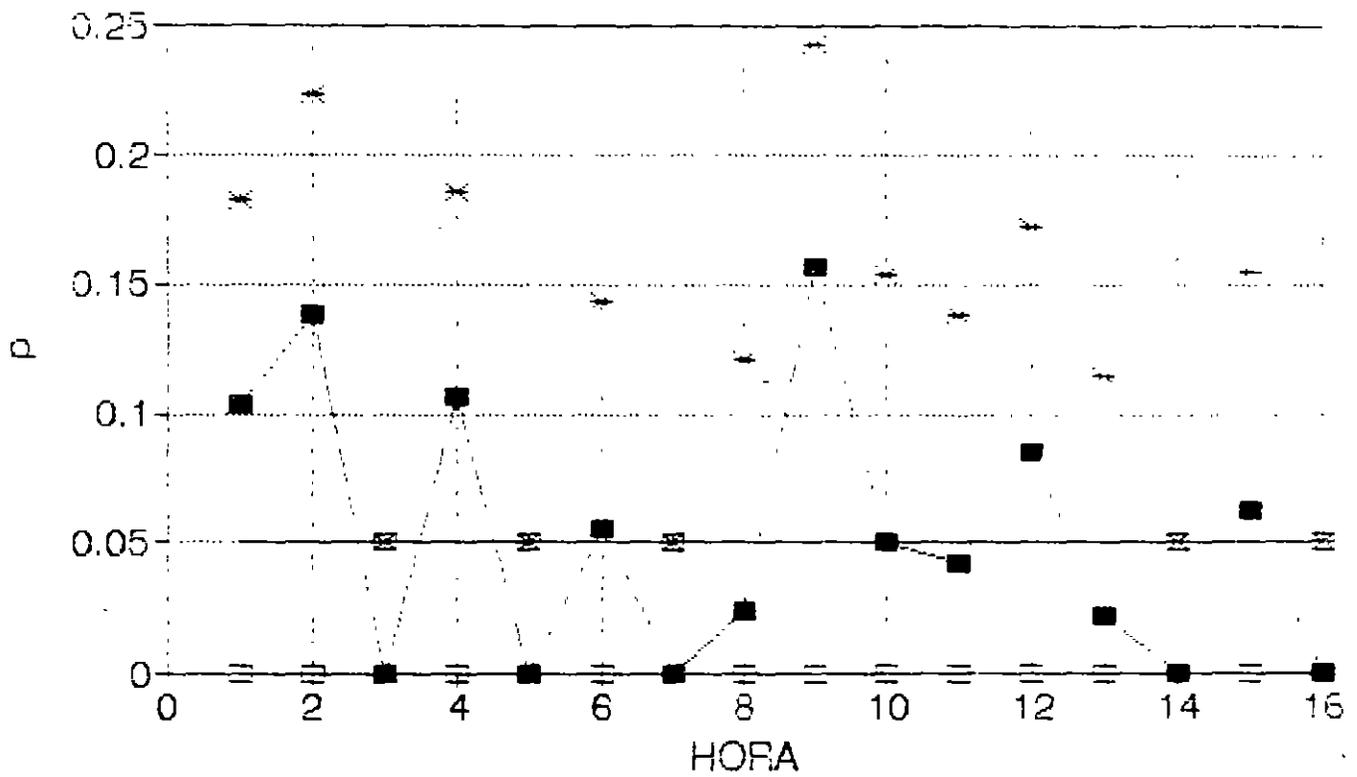
$$\hat{p} =$$

$$\hat{\sigma}_p = \sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n_i}} =$$

$$LSC = \hat{p} + 3\hat{\sigma}_p =$$

$$LIC = \hat{p} - 3\hat{\sigma}_p =$$

DIAGRAMA p



≡ LSC = LIC

DIAGRAMA PARA NUMERO DE NO CONFORMANTES: DIAGRAMA np

Controla el *número d de artículos no conformantes* o defectuosos

CONSTRUCCION DEL DIAGRAMA 3-SIGMA:

$$LC = \mu_d$$

$$LSC = \mu_d + 3\sigma_d$$

$$LIC = \mu_d - 3\sigma_d$$

DETERMINACION DE μ_d Y σ_d

Si d es $b(n,p)$, entonces:

$$\mu_d =$$

$$\sigma_d^2 =$$

$$\sigma_d =$$

DIAGRAMA DE CONTROL

$$LC =$$

$$LSC = +3$$

$$LIC = -3$$

IMPLANTACION DEL DIAGRAMA

1. Estime p

$$\hat{p} = \bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^m d_i}{\sum_{i=1}^m n_i}$$

m : número de subgrupos observados.

d_i : número de artículos no conformantes en subgrupo i .

n_i : tamaño del subgrupo i .

2. Determine la línea central y los límites de control

$$LC = n\hat{p}$$

$$LSC = n\hat{p} + 3\sqrt{n\hat{p}(1 - \hat{p})}$$

$$LIC = n\hat{p} - 3\sqrt{n\hat{p}(1 - \hat{p})}$$

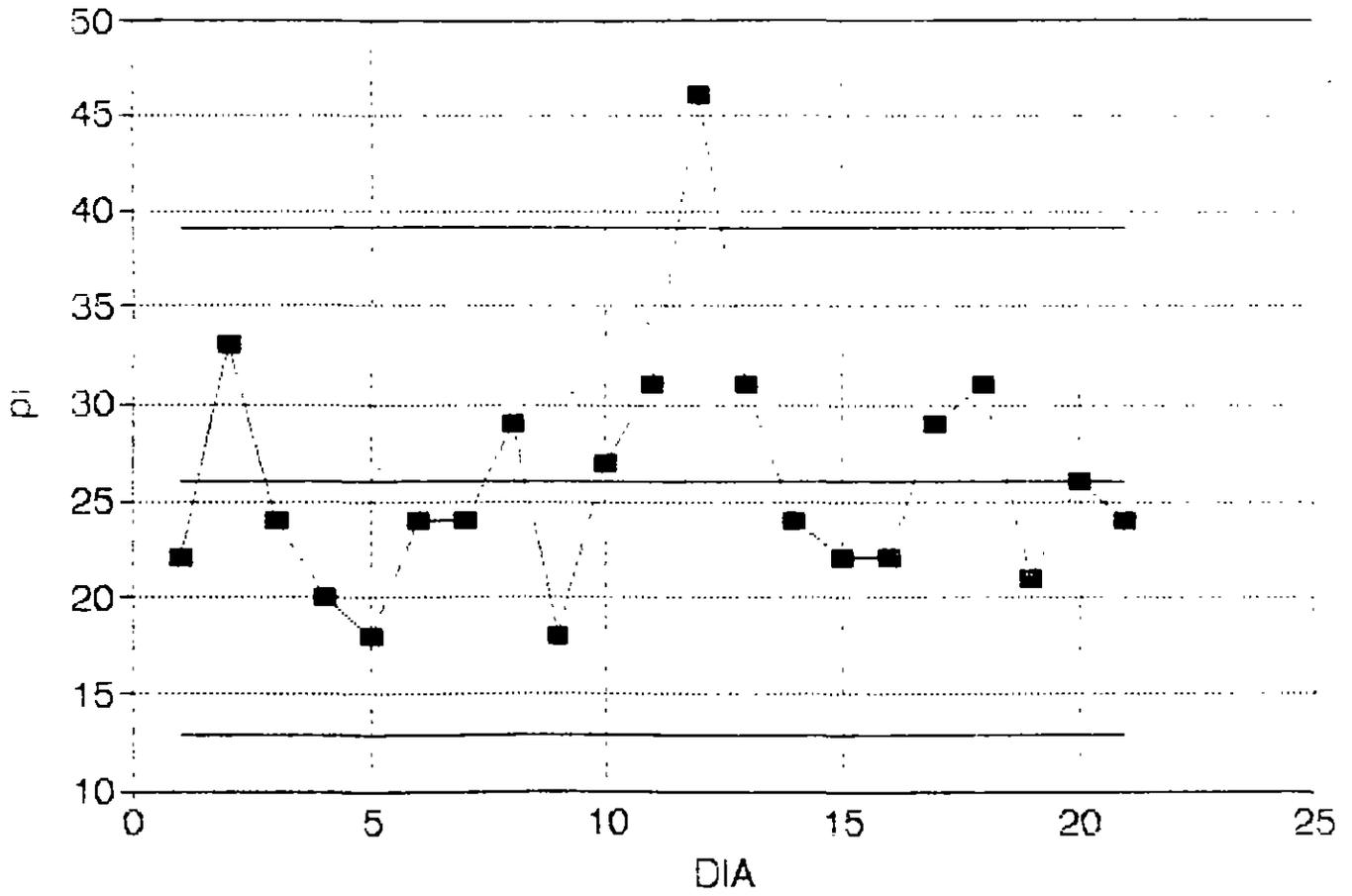
3. Para el subgrupo i , grafique el número de artículos defectuosos correspondiente:

$$np_i$$

4. Identifique los puntos fuera de control.

(EJEMPLO ANTERIOR)

DIAGRAMA np



SELECCION ENTRE DIAGRAMA p Y DIAGRAMA np

SIMILITUDES

1. Tanto el diagrama p como el np suponen una distribución binomial.
2. Ambos diagramas son similares, excepto por una escala diferente en el eje de la y ($1/n$).

CRITERIOS DE SELECCION

- Si los subgrupos tienen tamaños diferentes, use el diagrama p .
- Si los subgrupos tienen tamaños idénticos, use cualquiera de los diagramas.

VENTAJAS DE USAR EL DIAGRAMA np

1. Ahorro de un cálculo por cada uno de los subgrupos (división de d_i entre n para obtener p).
2. Mejor comprensión por parte del personal usando los diagramas.

DIAGRAMA DE CONTROL PARA NUMERO DE DEFECTOS: DIAGRAMA c

Diagrama para controlar el número c de defectos o no conformidades en subgrupos de *tamaño constante*, para los cuales c es poissoniana.

$$c = \frac{\text{defectos}}{\text{subgrupo}}$$

Si el subgrupo tiene dos o más artículos, cada subgrupo debe tener:

1. El mismo tamaño.
2. La misma "área de oportunidad" (misma posibilidad de ocurrencia de defectos).

CONSTRUCCION DEL DIAGRAMA 3-SIGMA

$$LC = \mu_c$$

$$LSC = \mu_c + 3\sigma_c = \mu_c + 3\sqrt{\mu_c}$$

$$LIC = \mu_c - 3\sigma_c = \mu_c - 3\sqrt{\mu_c}$$

ESTIMACION DE c

$$\hat{c} = \bar{c} = \text{número promedio de defectos/subgrupo}$$

DIAGRAMA DE CONTROL

$$LC = \bar{c}$$

$$LSC = \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}$$

$$LIC = \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}$$

EJEMPLO

LA SIGUIENTE TABLA MUESTRA EL NUMERO DE REMACHES FALTANTES EN AVIONES REPORTADOS POR EL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO DE UN AEROPUERTO

AVION	REMA CHES	AVION	REMA CHES	AVION	REMA CHES
201	8	210	12	218	14
202	16	211	23	219	11
203	14	212	16	220	9
204	19	213	9	221	10
205	11	214	25	222	22
206	15	215	15	223	7
207	8	216	9	224	28
208	11	217	9	225	9
209	21				

ANALICE EL PROCESO

ESTIMACION DE c

$\hat{c} = \bar{c}$ = número promedio de defectos/subgrupo

$$\hat{c} = \bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^m d_i}{m} =$$

DIAGRAMA DE CONTROL

$$\begin{aligned} LC &= \bar{c} = \\ LSC &= \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}} \\ LIC &= \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}} \end{aligned}$$

DIAGRAMA C

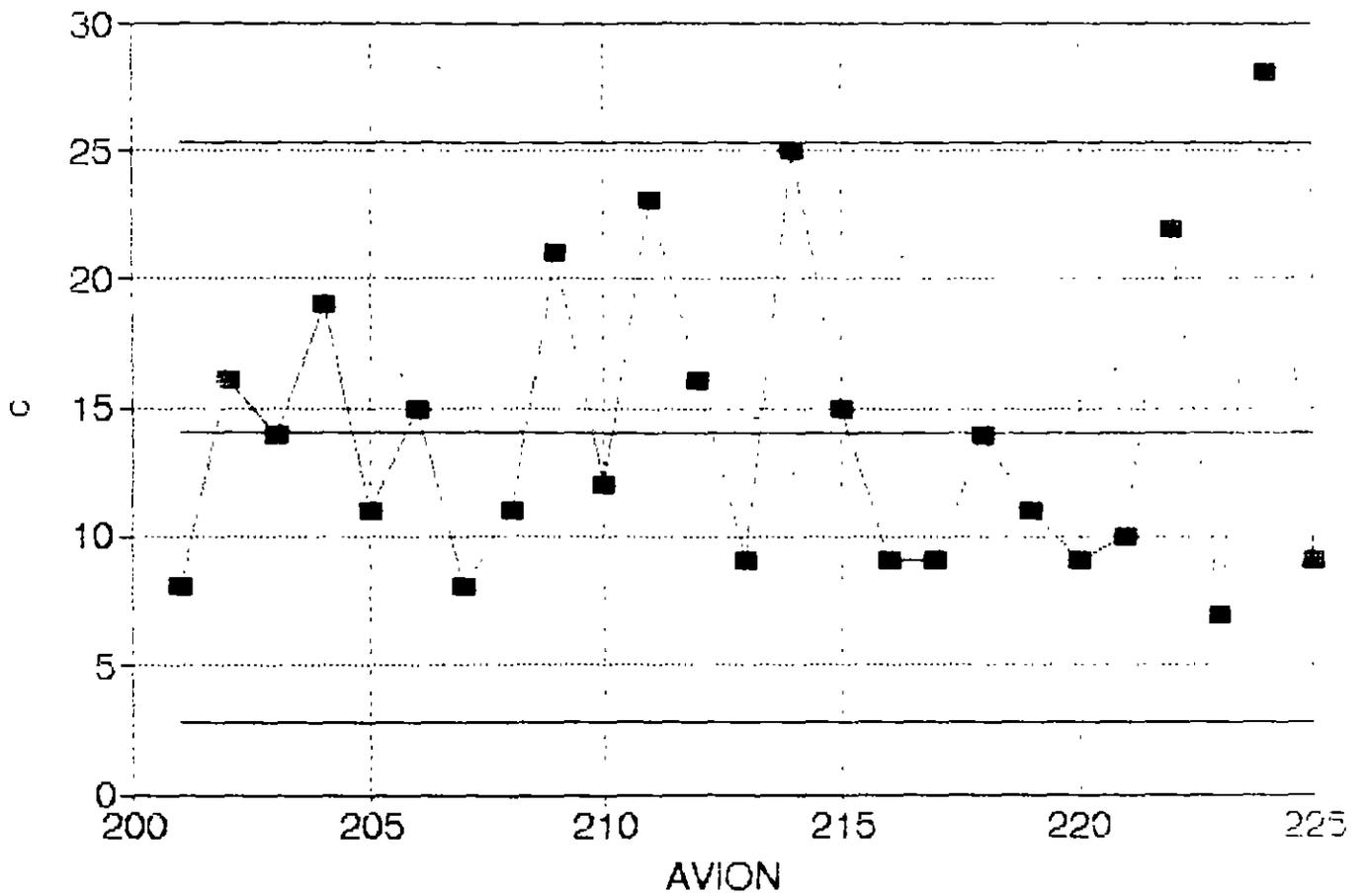


DIAGRAMA DE CONTROL PARA NUMERO DE DEFECTOS POR UNIDAD: EL DIAGRAMA u

Se usa para controlar el número de defectos por unidad, cuando hay cambio evidente en el área de oportunidad. Requiere definir una medida estándar u del área de oportunidad:

$$u = \frac{c}{n}$$

c : número de defectos en un subgrupo.
 n : "tamaño" del subgrupo.

CONSTRUCCION DEL DIAGRAMA 3-SIGMA

$$LC = \mu_u$$

$$LSC = \mu_u + 3\sigma_u = \mu_u + 3\frac{\sqrt{\mu_u}}{\sqrt{n_i}}$$

$$LIC = \mu_u - 3\sigma_u = \mu_u - 3\frac{\sqrt{\mu_u}}{\sqrt{n_i}}$$

ESTIMACION DE μ_u

$$\hat{\mu}_u = \bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^m c_i}{\sum_{i=1}^m n_i} = \frac{\text{no. total de defectos}}{\text{no. total de unidades}}$$

DIAGRAMA DE CONTROL

$$LC = \bar{u}$$

$$LSC = \bar{u} + 3 \frac{\sqrt{\bar{u}}}{\sqrt{n_i}}$$

$$LIC = \bar{u} - 3 \frac{\sqrt{\bar{u}}}{\sqrt{n_i}}$$

EJEMPLO

LA SIGUIENTE TABLA MUESTRA EL NUMERO DE DEFECTOS ENCONTRADOS EN DIFERENTES DIAS EN UNA EMPRESA TEXTIL. OBSERVE QUE LA PRODUCCION DIARIA (EN ROLLOS DE TELA) VARIA. DETERMINE EL DIAGRAMA DE CONTROL CORRESPONDIENTE

DIA	ROLLOS	DEFEC-TOS	DIA	ROLLOS	DEFEC-TOS
1	20	27	6	22	31
2	20	23	7	23	37
3	20	30	8	33	29
4	21	28	9	23	36
5	22	29	10	21	27

ESTIMACION DE μ_u

$$\hat{\mu}_u = \bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^m c_i}{\sum_{i=1}^m n_i} = \frac{\text{no. total de defectos}}{\text{no. total de unidades}} =$$

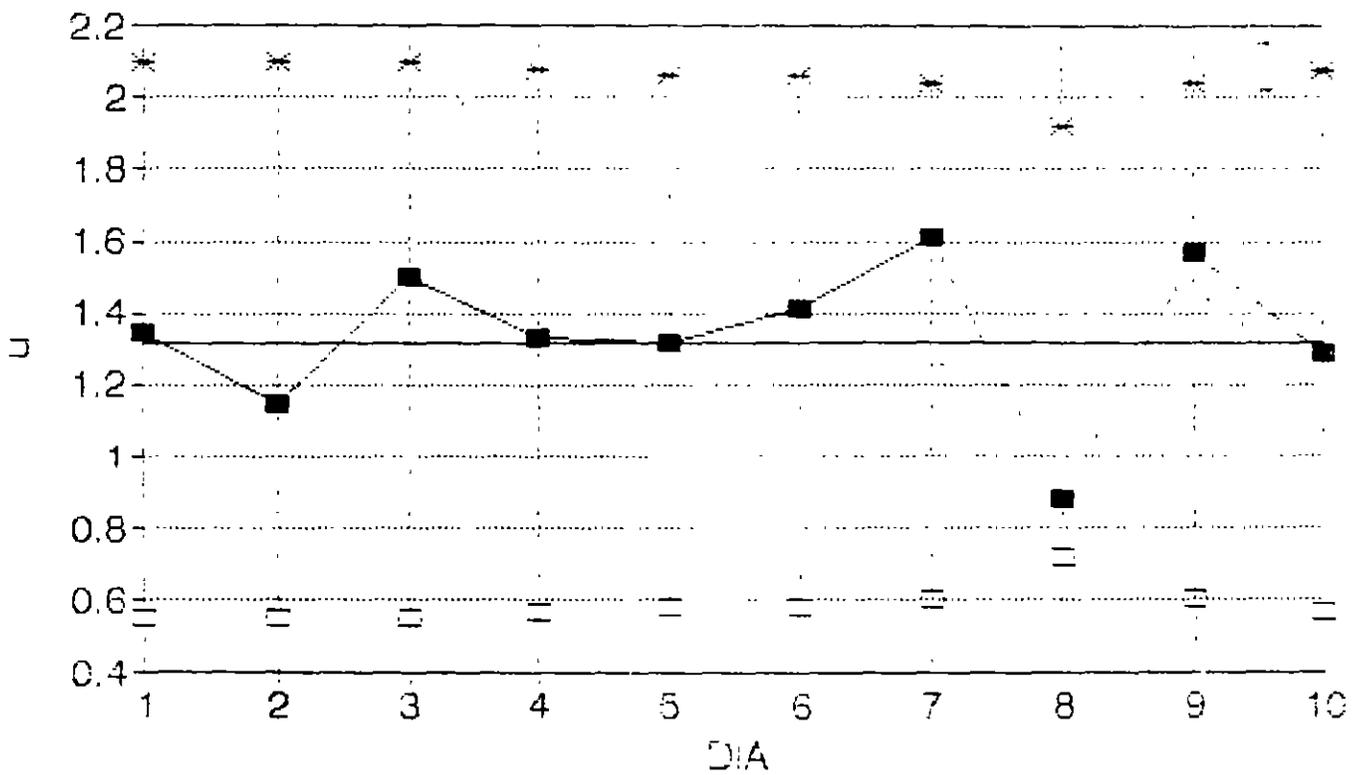
DIAGRAMA DE CONTROL

$$LC = \bar{u} =$$

$$LSC = \bar{u} + 3 \frac{\sqrt{\bar{u}}}{\sqrt{n_i}} =$$

$$LIC = \bar{u} - 3 \frac{\sqrt{\bar{u}}}{\sqrt{n_i}}$$

DIAGRAMA u



* LSC = LIC

Flowchart Simplifies Decision About Which Control Chart to Use

by Jill A. Swift

With the increased awareness of quality in the workplace, more and more people are being introduced to control charts. Many people want to use them but are uncertain about which one to use. In the past, the decision about which control chart to use was made by those experienced in such matters, now, however, those inexperienced in selecting control charts can make this decision themselves by using the flowchart in Figure 1.

Several different types of flowcharts currently exist to help people decide which control chart is appropriate for a particular situation, but the flowchart in Figure 1 has several distinguishing features:

- It is simple and easy to use.
- Only a basic understanding of statistics is required.
- All levels of personnel can use and, more important, understand it.

The flowchart in action

Here are three examples of how to use the flowchart:

Example 1 A manufacturer of crystal stemware wants to set up a control chart at

the intermediate inspection station. Defects in workmanship and visible quality features are checked at this inspection station before the stemware is sent to the buffer station. The manufacturer works on items prepared daily. The amount of stemware produced by the glassblowers per day varies.

Solution: Counted data → defects → sample size varies → p chart

Example 2 An independent contractor wants to track the number of bad and unusable products received from a particular supplier. Various sized shipments are received once a week.

Solution: Counted data → unusable (defective) → sample size varies → p chart

Example 3 A tire foreman needs to keep track of the shaft lengths being cut to ensure that the customer's specifications are met. There are 250 shaft lengths cut per hour. Since one of the foreworkers will be responsible for collecting and measuring the hourly sample, the sample size needs to be kept below 8.

Solution: Measured data → sample size > 1 → sample size < 10 → \bar{x} bar and R charts

An effective tool

As the examples show, the flowchart is simple to use and understand. Many people have already successfully used it to integrate control charts into their work environments.

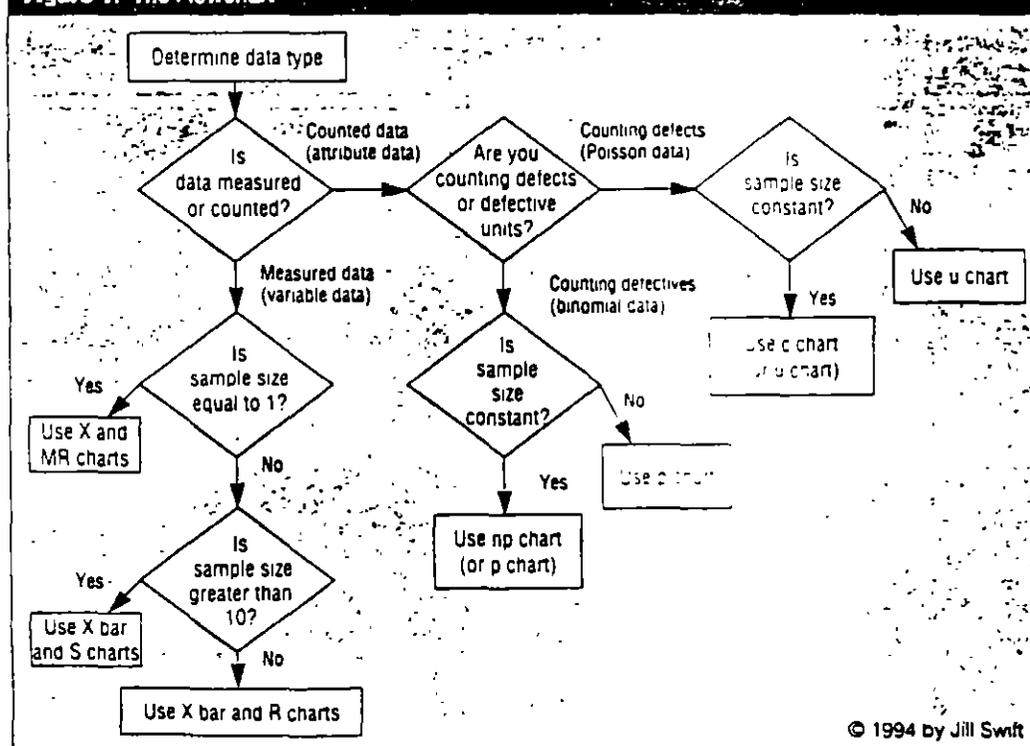
Jill A. Swift is an assistant professor in the Industrial Engineering Department at the University of Miami in Florida. She received a doctorate in industrial engineering from Oklahoma State University in Stillwater. Swift is an ASQC member and certified quality engineer.

Share Your Good Idea

Quality Progress readers need good ideas. If you have developed a new quality tool or technique or a unique slant to an existing one, submit a paper on how it works. Please include measurable results that prove the tool or technique is indeed a good one. Submissions should be typewritten, double-spaced, and no more than three pages long. Be sure to provide your name, address, and telephone number. Any questions about the column should be directed to:

Karen Bemowski
ASQC/Quality Progress
P.O. Box 3005
Milwaukee, WI 53201-3005
800-248-1946 or
(414) 272-8575

Figure 1. The Flowchart



What did you think about this article?

Quality Progress needs your feedback. On the postage-paid reader service card inserted toward the back of this magazine, please circle the number that corresponds with your opinion of the preceding article.

- | | |
|-----------|-------------|
| Excellent | Circle #377 |
| Good | Circle #378 |
| Fair | Circle #379 |
| Poor | Circle #380 |

Coming in
November:

■ Annual Salary Survey of ASQC Members

Anyone can answer the question, "How much am I paid?" but only with the help of *Quality Progress'* detailed salary survey can you accurately compare your answer with those of other ASQC professionals.



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

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V: ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA : ESTUDIOS DE CASO

1996

TEMA 12:
ESTUDIOS DE CASO

ESTUDIO DE CASO: IMPLANTACION DE DIAGRAMAS DE CONTROL

Usted forma parte de un equipo de trabajo que desea mejorar el proceso de llenado de bolsas de 20 kg de comida para perros. El objetivo final del proyecto es que el llenado de las bolsas sea lo más cercano posible a 20 kg.

El primer paso del estudio consiste en examinar el proceso de llenado desde un punto de vista de control estadístico de procesos. La tabla 1 muestra los pesos netos en kg (por arriba de 20 kg) observados. Los subgrupos de tamaño $n = 5$ representan los pesos de cinco bolsas consecutivas llenadas usando la cabeza número 2 de una máquina llenadora de cuatro cabezas. Los subgrupos se obtuvieron a intervalos de 30 minutos.

- a) Utilice los datos de la tabla 1 para determinar los diagramas de control preliminares para \bar{X} y R del proceso de llenado.
- b) Interprete los diagramas. Si detecta señales de que el proceso está fuera de control, suponga que se encontró la causa física. Elimine los subgrupos fuera de control y recalcule líneas centrales y límites de control.
- c) Continúe hasta que los diagramas muestren estabilidad del proceso. Haga comentarios breves.

Una vez realizado lo anterior, el equipo de trabajo del proyecto estudió el proceso con más detalle, con el fin de reducir la variación del proceso. Una de los primeros pasos dio como resultado el diagrama causa-efecto mostrado en la figura 1.

Con base en el análisis del diagrama causa-efecto, se ha determinado que la causa más probable de variación consiste en que los ajustes hechos a la máquina llenadora se realizan suponiendo un tamaño de partícula más pequeña de la que se usa en la realidad para elaborar la comida para perros.

Una vez que se atendió este problema crónico (que da lugar a causas comunes de variación), se prosiguió con la aplicación de los diagramas de control con

las líneas centrales y límites de control preliminares (obtenidos en el inciso c). Las mediciones realizadas el día 4 se muestran en la tabla 2.

- d. Utilice los diagramas de control preliminares (inciso c) para continuar con el monitoreo del proceso durante el día 4. Grafique los resultados de los subgrupos del día 4 en dichos diagramas. Comente y presente sus conclusiones sobre el proceso.

TABLA 1: PESOS NETOS OBSERVADOS (en kg) LOS PRIMEROS TRES DIAS DEL PROYECTO

Sample	Day	Time	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	\bar{X}	Range
1	1	7:30	0.92	1.01	0.95	1.04	0.90	0.964	0.14
2	1	8:00	1.15	1.02	0.98	0.94	0.99	1.016	0.21
3	1	8:30	0.94	0.91	1.00	1.05	0.95	0.970	0.14
4	1	9:00	1.11	0.94	0.89	1.11	1.00	1.010	0.22
5	1	9:30	0.95	0.97	0.97	0.98	0.86	0.946	0.12
6	1	10:00	1.02	0.89	0.97	0.95	0.97	0.960	0.13
7	1	10:30	1.18	0.84	0.95	1.39	1.03	1.078	0.55
8	1	11:30	0.94	1.15	1.07	0.99	1.03	1.036	0.21
9	1	12:00	1.03	1.20	1.00	1.10	1.09	1.084	0.20
10	1	12:30	0.98	0.82	0.98	1.02	1.13	0.986	0.31
11	1	1:00	0.98	0.95	0.97	1.04	0.89	0.966	0.15
12	1	1:30	1.10	1.12	1.01	1.12	1.04	1.078	0.11
13	1	2:00	1.10	0.94	0.88	0.92	0.91	0.950	0.22
14	1	2:30	1.01	0.99	1.11	0.96	1.05	1.024	0.15
15	1	3:00	1.17	1.30	1.21	0.69	0.82	1.038	0.61
16	2	7:30	0.97	1.03	1.09	1.04	0.94	1.014	0.15
17	2	8:00	0.92	0.88	0.83	0.94	0.87	0.888	0.11
18	2	8:30	0.99	1.00	0.95	1.00	0.90	0.968	0.10
19	2	9:00	0.88	1.09	1.05	1.05	1.01	1.016	0.21
20	2	9:30	0.87	1.08	0.99	0.97	1.04	0.990	0.21
21	2	10:00	1.08	0.99	1.18	1.02	1.07	1.068	0.19
22	2	10:30	0.60	1.28	0.97	0.84	1.01	0.940	0.68
23	2	11:30	0.89	0.99	1.02	0.95	0.99	0.968	0.13
24	2	12:00	1.01	0.90	0.97	1.09	1.13	1.020	0.23
25	2	12:30	0.95	1.01	1.09	1.10	1.10	1.050	0.15
26	2	1:00	1.10	0.96	1.02	1.03	1.01	1.024	0.14
27	2	1:30	0.92	1.05	1.03	0.99	1.08	1.014	0.16
28	2	2:00	1.00	0.87	1.00	1.05	0.97	0.978	0.18
29	2	2:30	0.96	1.03	1.03	1.11	1.05	1.036	0.15
30	2	3:00	1.15	0.84	1.02	1.18	1.05	1.048	0.34
31	3	7:30	0.91	0.85	0.89	0.82	0.95	0.884	0.13
32	3	8:00	0.95	0.92	0.95	0.84	0.92	0.916	0.11
33	3	8:30	0.98	0.98	1.01	1.12	1.19	1.056	0.21
34	3	9:00	0.89	0.90	1.05	1.05	0.87	0.952	0.18
35	3	9:30	1.16	0.96	0.96	1.06	1.00	1.028	0.20
36	3	10:00	1.10	0.87	0.95	1.05	1.14	1.022	0.27
37	3	10:30	0.83	0.75	1.04	1.25	0.77	0.928	0.50
38	3	11:30	0.98	1.02	1.06	0.87	1.00	0.986	0.19
39	3	12:00	0.95	0.88	0.97	1.01	0.85	0.932	0.16
40	3	12:30	1.04	0.95	1.00	1.14	1.06	1.038	0.19
41	3	1:00	0.98	0.96	1.04	1.09	1.05	1.024	0.13
42	3	1:30	0.80	0.99	0.98	1.03	0.89	0.938	0.23
43	3	2:00	1.04	1.00	0.87	1.02	0.91	0.968	0.17
44	3	2:30	0.94	1.02	0.92	1.00	1.01	0.978	0.10
45	3	3:00	0.71	1.36	1.10	1.24	0.81	1.044	0.65

FIGURA 1: DIAGRAMA CAUSA-EFECTO

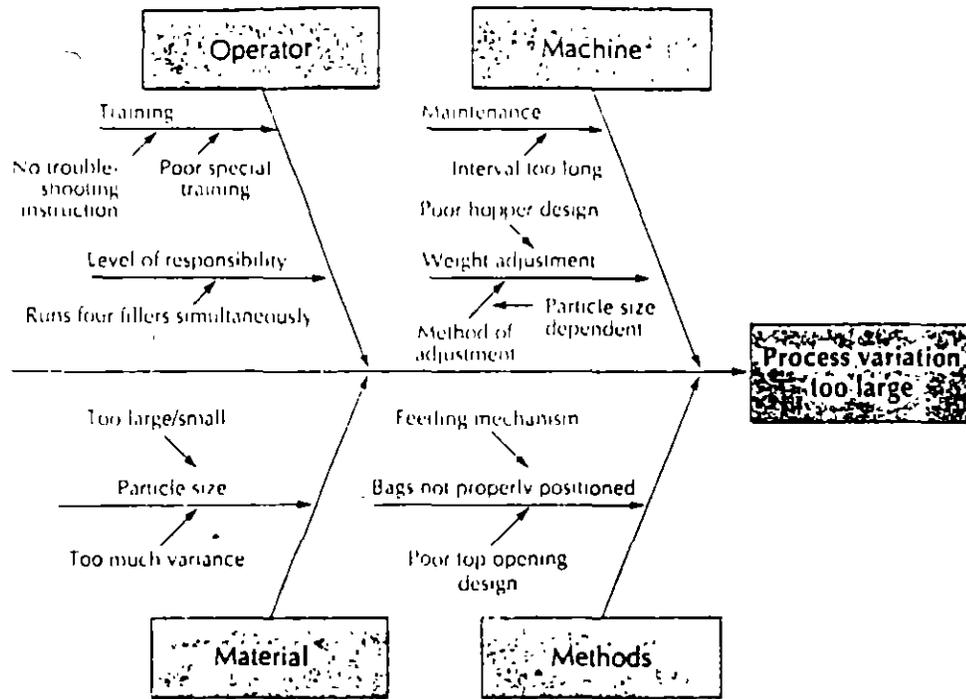


TABLA 2: PESOS NETOS OBSERVADOS (en kg) DESPUES DE TRATAR DE REDUCIR VARIACION

Sample	Day	Time	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	\bar{X}	Range
46	4	7:30	0.97	0.99	1.05	0.98	0.96	0.990	0.09
47	4	8:00	1.02	0.99	1.00	1.00	1.00	1.002	0.03
48	4	8:30	0.96	1.05	0.96	1.02	0.97	0.992	0.09
49	4	9:00	1.05	1.00	1.00	0.98	0.99	1.004	0.07
50	4	9:30	0.98	1.00	0.95	0.97	0.97	0.974	0.05
51	4	10:00	0.98	0.97	0.98	1.04	0.99	0.992	0.07
52	4	10:30	0.99	1.05	1.03	0.99	0.99	1.010	0.06
53	4	11:30	0.95	0.94	0.99	1.03	1.00	0.982	0.09
54	4	12:00	0.97	1.01	1.01	1.01	1.02	1.004	0.05
55	4	12:30	1.02	0.99	0.97	0.99	1.02	0.998	0.05
56	4	1:00	0.99	1.00	1.01	1.05	1.02	1.014	0.06
57	4	1:30	0.99	0.99	1.00	0.98	1.01	0.994	0.03
58	4	2:00	1.02	1.00	1.01	0.99	0.97	0.998	0.05
59	4	2:30	0.99	0.94	0.98	0.99	0.95	0.970	0.05
60	4	3:00	1.04	1.00	1.01	0.98	0.98	1.002	0.06

ESTUDIO DE CASO: ANALISIS DE LA CAPACIDAD DE UN PROCESO

Un ingeniero presumidón (IP) le presenta a Usted los datos mostrados en la tabla 1 y en la figura 1.

El IP desea apantallararlo aduciendo que él ha logrado mejorar un proceso de troquelado de metal. Los datos se basan en muestras de tamaño $n = 5$. Las especificaciones para la característica de calidad de interés son 3.50 ± 0.10 mm.

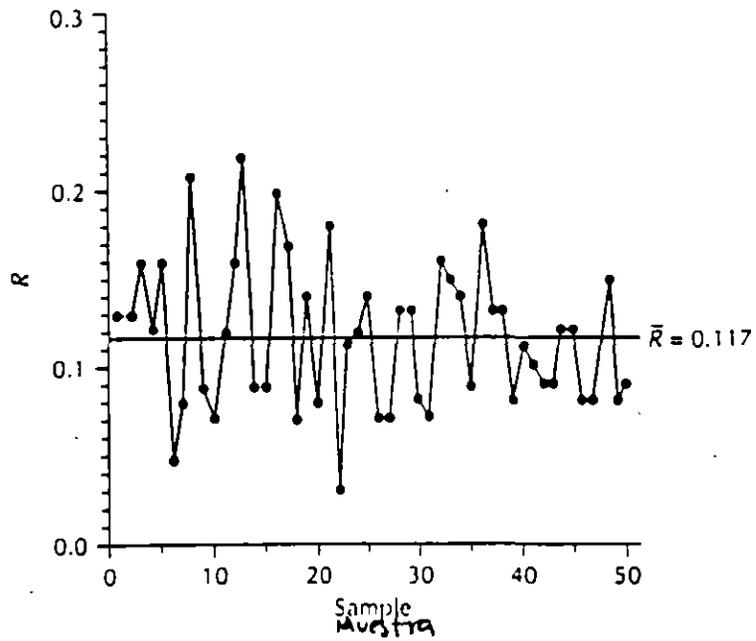
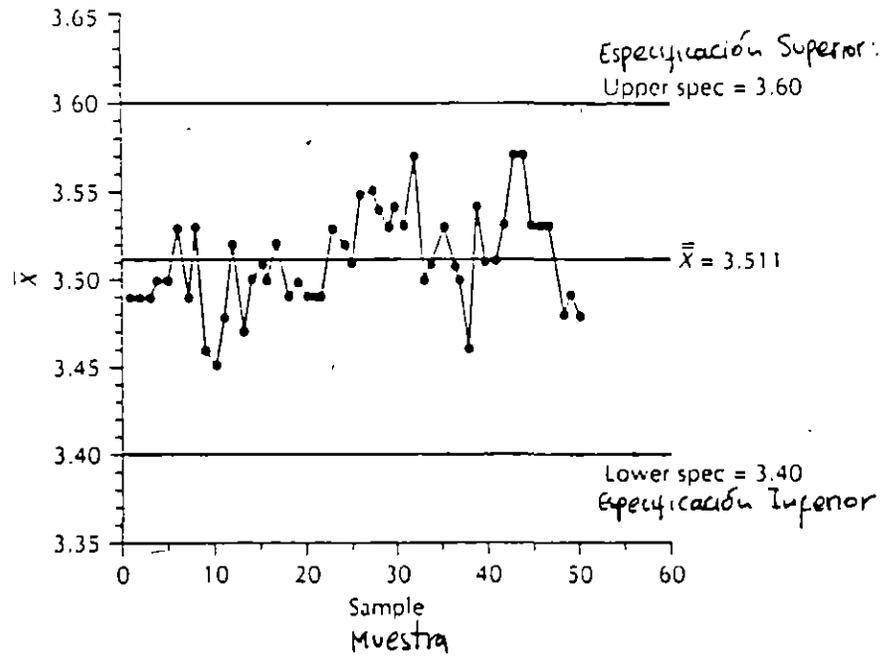
Con base en los diagramas de control, el IP dice que ahora (gracias a él, por supuesto), el proceso es capaz y que ya no se requiere seguir haciendo esfuerzos por mejorarlo.

- a) Después de haber asistido a este curso, ¿qué opina sobre (1) el proceso, (2) el enfoque que utilizó el IP para estudiar el proceso, y (3) la conclusión a la que llegó el IP?
- b) Si usted estuviera a cargo del estudio de evaluación de la capacidad del proceso, ¿qué hubiera hecho? Utilice los datos para desarrollar su presentación y sus conclusiones.

TABLA 1: DATOS PRESENTADOS POR EL IP

Muestra Sample	\bar{X}	Rango Range	Muestra Sample	\bar{X}	Rango Range
1	3.49	0.13	26	3.55	0.07
2	3.49	0.13	27	3.55	0.07
3	3.49	0.16	28	3.54	0.13
4	3.50	0.12	29	3.53	0.13
5	3.50	0.16	30	3.54	0.08
6	3.53	0.05	31	3.53	0.07
7	3.49	0.08	32	3.57	0.16
8	3.53	0.21	33	3.50	0.15
9	3.46	0.09	34	3.51	0.14
10	3.45	0.07	35	3.53	0.09
11	3.48	0.12	36	3.51	0.18
12	3.52	0.16	37	3.50	0.13
13	3.47	0.22	38	3.46	0.13
14	3.50	0.09	39	3.54	0.08
15	3.51	0.09	40	3.51	0.11
16	3.50	0.20	41	3.51	0.10
17	3.52	0.17	42	3.53	0.09
18	3.49	0.07	43	3.57	0.09
19	3.50	0.14	44	3.57	0.12
20	3.49	0.08	45	3.53	0.12
21	3.49	0.18	46	3.53	0.08
22	3.49	0.03	47	3.53	0.08
23	3.53	0.11	48	3.48	0.15
24	3.52	0.12	49	3.49	0.08
25	3.51	0.14	50	3.48	0.09

FIGURA 1: GRAFICAS PRESENTADAS POR EL IP



BIBLIOGRAFIA

DeVor, R.E., Ch. Tsong-how y J. W. Sutherland, *Statistical Quality Design and Control*, MacMillan, New York, 1992.

Grant, E.L., y R.S. Leavenworth, *Statistical Quality Control*, 6/e, McGraw-Hill, New York, 1988.

Juran, J.M. y F.M. Gryna, *Análisis y Planeación de la calidad*, 3/e, McGraw-Hill, México, 1995.

Montgomery, D.C., *Introduction to Statistical Quality Control*, 2/e, Wiley, New York, 1991.

Scheaffer, R.L., y J.T. McClave, *Probabilidad y estadística para ingeniería*, Grupo Editorial Iberoamérica, México, 1993.

Wheeler, D.J., y D.S. Chambers, *Understanding Statistical Process Control*, 2/e, SPC Press, Knoxville, 1992.



FACULTAD
DE INGENIERIA

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V: ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA : APENDICE
TABLA DE VARIABLES

1996

APENDICE:
TABLAS PARA VARIABLES

Table 3-1 Equations for computing 3-sigma limits on Shewhart control charts for variables
 Table references for required factors pertain to App. 3. CL = central line.

Method	\bar{X} chart	R chart	s chart
μ and σ known or assumed (X_0, σ_0)	$CL = \bar{X}_0 = \mu$ $UCL_i = \mu + A\sigma$ $LCL_i = \mu - A\sigma$ Table F	$CL = R_0 = d_2\sigma$ $UCL_R = D_2\sigma$ $LCL_R = D_1\sigma$ Tables C and F	$CL = s_0 = c_4\sigma$ $UCL_s = B_4\sigma$ $LCL_s = B_3\sigma$ Tables C and F
μ and σ estimated from \bar{X} and \bar{R}	$CL = \bar{X}$ $UCL_i = \bar{X} + A_1\bar{R}$ $LCL_i = \bar{X} - A_1\bar{R}$ Table D	$CL = \bar{R}$ $UCL_R = D_4\bar{R}$ $LCL_R = D_3\bar{R}$ Table D	
μ and σ estimated from \bar{X} and \bar{s}	$CL = \bar{X}$ $UCL_i = \bar{X} + A_1\bar{s}$ $LCL_i = \bar{X} - A_1\bar{s}$ Table E		$CL = \bar{s}$ $UCL_s = B_4\bar{s}$ $LCL_s = B_3\bar{s}$ Table E

TABLA 3-3 Relación d_2^* entre \bar{R} y σ promediando rangos para diferentes números de subgrupos de tamaño 5 a partir de una población normal

NUMERO DE SUBGRUPOS DE TAMAÑO 5	d_2^*	NUMERO DE SUBGRUPOS DE TAMAÑO 5	d_2^*
1	2.474	8	2.346
2	2.405	10	2.342
3	2.379	12	2.339
5	2.358	20	2.334
6	2.353	∞	2.326

Table A Area under the normal curve
 Proportion of the total area of the standard normal curve from $-\infty$ to z (z represents a normalized statistic)

z	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00
-3.5	0.00017	0.00017	0.00018	0.00019	0.00019	0.00020	0.00021	0.00022	0.00022	0.00023
-3.4	0.00024	0.00025	0.00026	0.00027	0.00028	0.00029	0.00030	0.00031	0.00031	0.00032
-3.3	0.00035	0.00036	0.00038	0.00039	0.00040	0.00042	0.00043	0.00045	0.00047	0.00048
-3.2	0.00050	0.00052	0.00054	0.00056	0.00058	0.00060	0.00062	0.00064	0.00066	0.00068
-3.1	0.00071	0.00074	0.00076	0.00079	0.00082	0.00085	0.00087	0.00090	0.00094	0.00097
-3.0	0.00100	0.00104	0.00107	0.00111	0.00114	0.00118	0.00122	0.00126	0.00131	0.00135
-2.9	0.0014	0.0014	0.0015	0.0015	0.0016	0.0016	0.0017	0.0017	0.0018	0.0019
-2.8	0.0019	0.0020	0.0021	0.0021	0.0022	0.0023	0.0023	0.0024	0.0025	0.0026
-2.7	0.0026	0.0027	0.0028	0.0029	0.0030	0.0031	0.0032	0.0033	0.0034	0.0035
-2.6	0.0036	0.0037	0.0038	0.0039	0.0040	0.0041	0.0043	0.0044	0.0045	0.0047
-2.5	0.0048	0.0049	0.0051	0.0052	0.0054	0.0055	0.0057	0.0059	0.0060	0.0062
-2.4	0.0064	0.0066	0.0068	0.0069	0.0071	0.0073	0.0075	0.0078	0.0080	0.0082
-2.3	0.0084	0.0087	0.0089	0.0091	0.0094	0.0096	0.0099	0.0102	0.0104	0.0107
-2.2	0.0110	0.0113	0.0116	0.0119	0.0122	0.0125	0.0129	0.0132	0.0136	0.0139
-2.1	0.0143	0.0146	0.0150	0.0154	0.0158	0.0162	0.0166	0.0170	0.0174	0.0179
-2.0	0.0183	0.0188	0.0192	0.0197	0.0202	0.0207	0.0212	0.0217	0.0222	0.0228
-1.9	0.0233	0.0239	0.0244	0.0250	0.0256	0.0262	0.0268	0.0274	0.0281	0.0287
-1.8	0.0294	0.0301	0.0307	0.0314	0.0322	0.0329	0.0336	0.0344	0.0351	0.0359
-1.7	0.0367	0.0375	0.0384	0.0392	0.0401	0.0409	0.0418	0.0427	0.0436	0.0446
-1.6	0.0455	0.0465	0.0475	0.0485	0.0495	0.0505	0.0516	0.0526	0.0537	0.0548
-1.5	0.0559	0.0571	0.0582	0.0594	0.0606	0.0618	0.0630	0.0643	0.0655	0.0668
-1.4	0.0681	0.0694	0.0708	0.0721	0.0735	0.0749	0.0764	0.0778	0.0793	0.0808
-1.3	0.0823	0.0838	0.0853	0.0869	0.0885	0.0901	0.0918	0.0934	0.0951	0.0968
-1.2	0.0985	0.1003	0.1020	0.1038	0.1057	0.1075	0.1093	0.1112	0.1131	0.1151
-1.1	0.1170	0.1190	0.1210	0.1230	0.1251	0.1271	0.1292	0.1314	0.1335	0.1357
-1.0	0.1379	0.1401	0.1423	0.1446	0.1469	0.1492	0.1515	0.1539	0.1562	0.1587
-0.9	0.1611	0.1635	0.1660	0.1685	0.1711	0.1736	0.1762	0.1788	0.1814	0.1841
-0.8	0.1867	0.1894	0.1922	0.1949	0.1977	0.2005	0.2033	0.2061	0.2090	0.2119
-0.7	0.2148	0.2177	0.2207	0.2236	0.2266	0.2297	0.2327	0.2358	0.2389	0.2420
-0.6	0.2451	0.2483	0.2514	0.2546	0.2578	0.2611	0.2643	0.2676	0.2709	0.2743
-0.5	0.2776	0.2810	0.2843	0.2877	0.2912	0.2946	0.2981	0.3015	0.3050	0.3085
-0.4	0.3121	0.3156	0.3192	0.3228	0.3264	0.3300	0.3336	0.3372	0.3409	0.3446
-0.3	0.3483	0.3520	0.3557	0.3594	0.3632	0.3669	0.3707	0.3745	0.3783	0.3821
-0.2	0.3859	0.3897	0.3936	0.3974	0.4013	0.4052	0.4090	0.4129	0.4168	0.4207
-0.1	0.4247	0.4286	0.4325	0.4364	0.4404	0.4443	0.4483	0.4522	0.4562	0.4602
-0.0	0.4641	0.4681	0.4721	0.4761	0.4801	0.4840	0.4880	0.4920	0.4960	0.5000

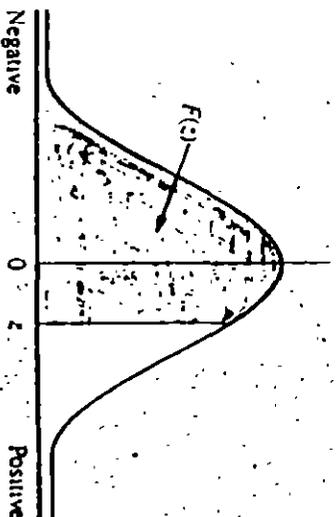


Table A (continued)

z	0 00	0 01	0 02	0 03	0 04	0 05	0 06	0 07	0 08	0 09
+0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
+0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
+0.2	0.5791	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
+0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
+0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
+0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
+0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
+0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
+0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8079	0.8106	0.8133
+0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
+1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
+1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
+1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
+1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
+1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
+1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
+1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
+1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
+1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
+1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
+2.0	0.9773	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
+2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
+2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
+2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
+2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
+2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
+2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
+2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
+2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
+2.9	0.9981	0.9982	0.9983	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
+3.0	0.99865	0.99869	0.99874	0.99878	0.99882	0.99886	0.99889	0.99893	0.99896	0.99900
+3.1	0.99903	0.99906	0.99910	0.99913	0.99915	0.99918	0.99921	0.99924	0.99926	0.99929
+3.2	0.99931	0.99934	0.99936	0.99938	0.99940	0.99942	0.99944	0.99946	0.99948	0.99950
+3.3	0.99952	0.99953	0.99955	0.99957	0.99958	0.99960	0.99961	0.99962	0.99964	0.99965
+3.4	0.99966	0.99967	0.99969	0.99970	0.99971	0.99972	0.99973	0.99974	0.99975	0.99976
+3.5	0.99977	0.99978	0.99978	0.99979	0.99980	0.99981	0.99981	0.99982	0.99983	0.99983

Characteristic	Statistic	Normalized statistic z
Measurement	X	$\frac{X - \mu_x}{\sigma}$
Subgroup average	\bar{X}	$\frac{\bar{X} - \mu_i}{\sigma/\sqrt{n}}$
Binomial count	$np = c$	$\frac{c + 0.5 - n\mu_p}{\sqrt{n\mu_p(1 - \mu_p)}}$
Binomial fraction	$p = \frac{c}{n}$	$\frac{(c + 0.5)/n - \mu_p}{\sqrt{\mu_p(1 - \mu_p)/n}}$
Poisson count	c	$\frac{c + 0.5 - \mu_r}{\sqrt{\mu_r}}$

Table E Factors for determining from \bar{x} and $\bar{\sigma}_{RMS}$ the 3-sigma control limits for \bar{x} and s or σ_{RMS} charts

Number of observations in subgroup. n	Factor for \bar{x} chart using $\bar{\sigma}_{RMS}$. A_1	Factor for \bar{x} chart using s . A_1	Factors for s or σ_{RMS} charts	
			Lower control limit B_1	Upper control limit B_2
2	3.76	2.66	0	3.27
3	2.39	1.95	0	2.57
4	1.88	1.63	0	2.27
5	1.60	1.43	0	2.09
6	1.41	1.29	0.03	1.97
7	1.28	1.18	0.12	1.88
8	1.17	1.10	0.19	1.81
9	1.09	1.03	0.24	1.76
10	1.03	0.98	0.28	1.72
11	0.97	0.93	0.32	1.68
12	0.93	0.89	0.35	1.65
13	0.88	0.85	0.38	1.62
14	0.85	0.82	0.41	1.59
15	0.82	0.79	0.43	1.57
16	0.79	0.76	0.45	1.55
17	0.76	0.74	0.47	1.53
18	0.74	0.72	0.48	1.52
19	0.72	0.70	0.50	1.50
20	0.70	0.68	0.51	1.49
21	0.68	0.66	0.52	1.48
22	0.66	0.65	0.53	1.47
23	0.65	0.63	0.54	1.46
24	0.63	0.62	0.55	1.45
25	0.62	0.61	0.56	1.44
30	0.56	0.55	0.60	1.40
35	0.52	0.51	0.63	1.37
40	0.48	0.48	0.66	1.34
45	0.45	0.45	0.68	1.32
50	0.43	0.43	0.70	1.30
55	0.41	0.41	0.71	1.29
60	0.39	0.39	0.72	1.28
65	0.38	0.37	0.73	1.27
70	0.36	0.36	0.74	1.26
75	0.35	0.35	0.75	1.25
80	0.34	0.34	0.76	1.24
85	0.33	0.33	0.77	1.23
90	0.32	0.32	0.77	1.23
95	0.31	0.31	0.78	1.22
100	0.30	0.30	0.79	1.21

Upper control limit for \bar{x} = $UCL_{\bar{x}} = \bar{x} + A_1\bar{s} = \bar{x} + A_1\bar{\sigma}_{RMS}$

Lower control limit for \bar{x} = $LCL_{\bar{x}} = \bar{x} - A_1\bar{s} = \bar{x} - A_1\bar{\sigma}_{RMS}$

(If aimed-at or standard value \bar{x}_0 is used rather than \bar{x} as the central line on the control chart, \bar{x}_0 should be substituted for \bar{x} in the preceding formulas.)

Upper control limit for s or σ_{RMS} = $UCL = B_2\bar{s} = B_2\bar{\sigma}_{RMS}$

Lower control limit for s or σ_{RMS} = $LCL = B_1\bar{s} = B_1\bar{\sigma}_{RMS}$

All factors in Table E are based on the normal distribution.

Table C Factors for estimating σ from \bar{R} , \bar{s} or $\bar{\sigma}_{RMS}$ and σ_R from \bar{R}

Number of observations in subgroup. n	Factor d_2 , $d_2 = \frac{\bar{R}}{\sigma}$	Factor d_3 , $d_3 = \frac{\bar{s}}{\sigma}$	Factor c_2 , $c_2 = \frac{\bar{\sigma}_{RMS}}{\sigma}$	Factor c_4 , $c_4 = \frac{\bar{\sigma}_R}{\sigma}$
2	1.128	0.8525	0.5642	0.7979
3	1.693	0.8884	0.7236	0.8862
4	2.059	0.8798	0.7979	0.9213
5	2.326	0.8641	0.8407	0.9400
6	2.534	0.8480	0.8686	0.9515
7	2.704	0.8332	0.8882	0.9594
8	2.847	0.8198	0.9027	0.9650
9	2.970	0.8078	0.9139	0.9693
10	3.078	0.7971	0.9227	0.9727
11	3.173	0.7873	0.9300	0.9754
12	3.258	0.7785	0.9359	0.9776
13	3.336	0.7704	0.9410	0.9794
14	3.407	0.7630	0.9453	0.9810
15	3.472	0.7562	0.9490	0.9823
16	3.532	0.7499	0.9523	0.9835
17	3.588	0.7441	0.9551	0.9845
18	3.640	0.7386	0.9576	0.9854
19	3.689	0.7335	0.9599	0.9862
20	3.735	0.7287	0.9619	0.9869
21	3.778	0.7242	0.9638	0.9876
22	3.819	0.7199	0.9655	0.9882
23	3.858	0.7159	0.9670	0.9887
24	3.895	0.7121	0.9684	0.9892
25	3.931	0.7084	0.9696	0.9896
30	4.086	0.6926	0.9748	0.9914
35	4.213	0.6799	0.9784	0.9927
40	4.322	0.6692	0.9811	0.9936
45	4.415	0.6601	0.9832	0.9943
50	4.498	0.6521	0.9849	0.9949
55	4.572	0.6452	0.9863	0.9954
60	4.639	0.6389	0.9874	0.9958
65	4.699	0.6337	0.9884	0.9961
70	4.755	0.6283	0.9892	0.9964
75	4.806	0.6236	0.9900	0.9966
80	4.854	0.6194	0.9906	0.9968
85	4.898	0.6154	0.9912	0.9970
90	4.939	0.6118	0.9916	0.9972
95	4.978	0.6084	0.9921	0.9973
100	5.015	0.6052	0.9925	0.9975

Estimate of $\sigma = \bar{R}d_2$ or $\bar{s}d_3$ or $\bar{\sigma}_{RMS}c_2$; $\sigma_R = \bar{R}c_4$. These factors assume sampling from a normal universe.

Table F Factors for determining from σ the 3-sigma control limits for \bar{X} , R, and s or σ_{RMS} charts

Number of observations in subgroup, n	Factors for \bar{X} chart, A	Factors for R chart		Factors for σ_{RMS} chart		Factors for s chart	
		Lower control limit D_1	Upper control limit D_2	Lower control limit B_1	Upper control limit B_2	Lower control limit B_3	Upper control limit B_4
2	2.12	0	3.69	0	1.84	0	2.61
3	1.73	0	4.36	0	1.86	0	2.28
4	1.50	0	4.70	0	1.81	0	2.09
5	1.34	0	4.92	0	1.76	0	1.96
6	1.22	0	5.08	0.03	1.71	0.03	1.87
7	1.13	0.20	5.20	0.10	1.67	0.11	1.81
8	1.06	0.39	5.31	0.17	1.64	0.18	1.75
9	1.00	0.55	5.39	0.22	1.61	0.23	1.71
10	0.95	0.69	5.47	0.26	1.58	0.28	1.67
11	0.90	0.81	5.53	0.30	1.56	0.31	1.64
12	0.87	0.92	5.59	0.33	1.54	0.35	1.61
13	0.83	1.03	5.65	0.36	1.52	0.37	1.59
14	0.80	1.12	5.69	0.38	1.51	0.40	1.56
15	0.77	1.21	5.74	0.41	1.49	0.42	1.54
16	0.75	1.28	5.78	0.43	1.48	0.44	1.53
17	0.73	1.36	5.82	0.44	1.47	0.46	1.51
18	0.71	1.43	5.85	0.46	1.45	0.48	1.50
19	0.69	1.49	5.89	0.48	1.44	0.49	1.48
20	0.67	1.55	5.92	0.49	1.43	0.50	1.47
21	0.65			0.50	1.42	0.52	1.46
22	0.64			0.52	1.41	0.53	1.45
23	0.63			0.53	1.41	0.54	1.44
24	0.61			0.54	1.40	0.55	1.43
25	0.60			0.55	1.39	0.56	1.42
30	0.55			0.59	1.36	0.60	1.38
35	0.51			0.62	1.33	0.63	1.36
40	0.47			0.65	1.31	0.66	1.33
45	0.45			0.67	1.30	0.68	1.31
50	0.42			0.68	1.28	0.69	1.30
55	0.40			0.70	1.27	0.71	1.28
60	0.39			0.71	1.26	0.72	1.27
65	0.37			0.72	1.25	0.73	1.26
70	0.36			0.74	1.24	0.74	1.25
75	0.35			0.75	1.23	0.75	1.24
80	0.34			0.75	1.23	0.76	1.24
85	0.33			0.76	1.22	0.77	1.23
90	0.32			0.77	1.22	0.77	1.22
95	0.31			0.77	1.21	0.78	1.22
100	0.30			0.78	1.20	0.78	1.21

$$UCL_{\bar{x}} = \mu + A\sigma \quad LCL_{\bar{x}} = \mu - A\sigma$$

(If actual average is to be used rather than standard or aimed-at average, \bar{X} should be substituted for μ in the preceding formulas.)

$$\begin{array}{lll}
 UCL_R = D_2\sigma & UCL_s = B_2\sigma & UCL_{\sigma_{RMS}} = B_2\sigma_{RMS} \\
 \text{Central line}_R = d_2\sigma & \text{Central line}_s = c_2\sigma & \text{Central line}_{\sigma_{RMS}} = c_2\sigma_{RMS} \\
 LCL_R = D_1\sigma & LCL_s = B_1\sigma & LCL_{\sigma_{RMS}} = B_1\sigma_{RMS}
 \end{array}$$

Table D Factors for determining from \bar{R} the 3-sigma control limits for \bar{X} and R charts

Number of observations in subgroup, n	Factor for \bar{X} chart, A_2	Factors for R chart	
		Lower control limit D_3	Upper control limit D_4
2	1.88	0	3.27
3	1.02	0	2.57
4	0.73	0	2.28
5	0.58	0	2.11
6	0.48	0	2.00
7	0.42	0.08	1.92
8	0.37	0.14	1.86
9	0.34	0.18	1.82
10	0.31	0.22	1.78
11	0.29	0.26	1.74
12	0.27	0.28	1.72
13	0.25	0.31	1.69
14	0.24	0.33	1.67
15	0.22	0.35	1.65
16	0.21	0.36	1.64
17	0.20	0.38	1.62
18	0.19	0.39	1.61
19	0.19	0.40	1.60
20	0.18	0.41	1.59

Upper control limit for $\bar{X} = UCL_{\bar{X}} = \bar{X} + A_2\bar{R}$

Lower control limit for $\bar{X} = LCL_{\bar{X}} = \bar{X} - A_2\bar{R}$

(If aimed-at or standard value \bar{X}_0 is used rather than \bar{X} as the central line on the control chart, \bar{X}_0 should be substituted for \bar{X} in the preceding formulas.)

Upper control limit for $R = UCL_R = D_4\bar{R}$

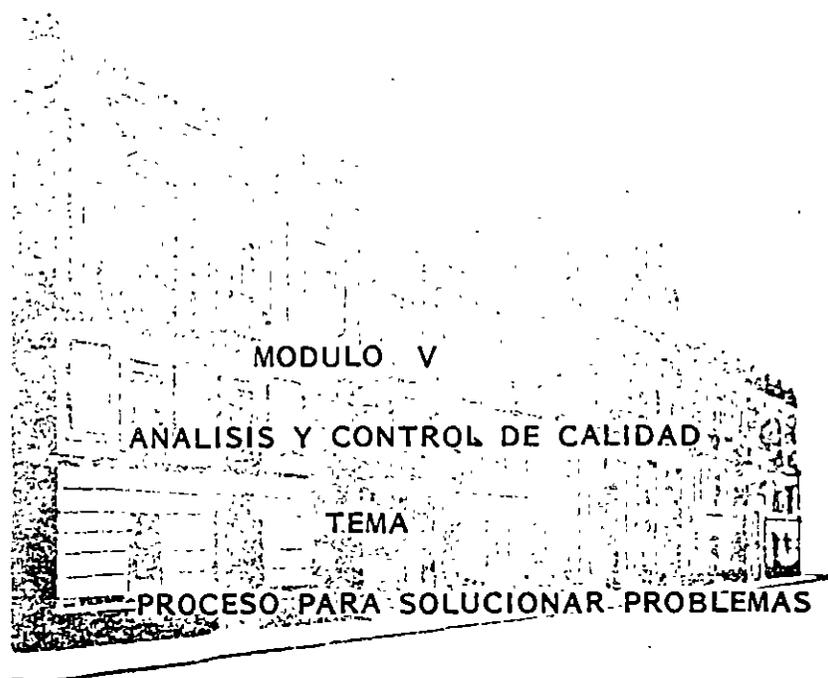
Lower control limit for $R = LCL_R = D_3\bar{R}$

All factors in Table D are based on the normal distribution.



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

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION



MODULO V

ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA

PROCESO PARA SOLUCIONAR PROBLEMAS

EXPOSITOR :

**ING: PERLA FERNANDEZ
REYNA**

Proceso para solucionar Problemas (PSP)

El PSP apoya el Proceso de Mejoramiento de Calidad, proporcionando un enfoque estructurado para tomar un problema desde su identificación hasta la resolución y la ejecución de la solución.

La identificación de los problemas e inhibidores en el Proceso de Mejoramiento de Calidad puede partir de una de muchas actividades, incluyendo:

- Actividades de grupo
 - Equipos de calidad
 - Sesiones de planeación
- Procesos de análisis
 - Análisis de la Actividad del Departamento (DAA)
 - Análisis del proceso

Actividades habituales

Independientemente del método en el que se identifica el problema, es importante reconocer que también hay muchas maneras de resolver los problemas de "Calidad". Estas incluyen:

- Acción de Dirección
- Acción Individual
- Acción colectiva por medio de un equipo de trabajo.
- Task Force
- Equipo de calidad
- Decisión de la función
- País/LAD/A/E

Cualquiera que sea el método de identificación del problema o el enfoque que se tome para la solución, se puede usar el Proceso para Solucionar Problemas, de cinco pasos, para encontrar el camino hacia la solución del mismo, usando las "Herramientas y Técnicas" apropiadas para resolverlo.

Donde el PSP es Adecuado

- Identificación**
- Equipos de calidad
 - Sesiones de planeación
 - Análisis de actividad del departamento
 - Análisis de proceso
 - Actividades habituales

- Enfoque**
- Decisión de la dirección
 - Acción individual
 - Acción colectiva por un equipo de trabajo
 - Task Force
 - Equipo de Calidad

- Proceso**
- Identificar y Definir
 - Analizar las causas
 - Establecer los objetivos
 - Resolver y ejecutar
 - Medición, seguimiento y control

- Herramientas y Técnicas**
- Tormenta de ideas
 - Grupo nominal
 - Causa y Efecto
 - Análisis del campo de fuerza
 - Hojas de control
 - Gráficas
 - Histogramas
 - Diagramas de Pareto
 - Gráficas de ejecución
 - Gráficas de control
 - Estadísticas

Paso I

Identificar y Definir el Problema

Pregunta clave: — ¿Cuál es el problema?

- Herramientas y Técnicas:**
- Tormenta de ideas
 - Grupo nominal
 - Hojas de control
 - Histogramas
 - Diagramas de Pareto

Resultado clave: — Aclarar el alcance real del problema
— Establecer Futuro deseado

Identificar el Problema

- 1 Tormenta de ideas para identificar los problemas
- 2 Aclarar - Exponerlos de nuevo según sea necesario
- 3 Llegar a un acuerdo en lo que respecta a los criterios de selección
- 4 Priorizar los problemas principales
- 5 Listar los problemas individuales
- 6 Reducir la lista a un tamaño razonable
- 7 Aplicar criterio común a la lista reducida
- 8 Usar los datos y el consenso para llegar a un acuerdo sobre un problema en el que se trabajará el día de hoy

Definir el problema

- 9 Considerar el estado actual:
 - A. ¿Qué Sabemos?
 - B. ¿Qué más deberíamos saber?Hacer un plan de recolección de datos
- 10 Concordar en la exposición específica y clara del problema
- 11 Considerar la descripción cuantitativa y cualitativa del estado futuro que se desea de los resultados deseados

Paso II

Analizar las Causas

Pregunta clave: — ¿Cuál es su causa?

- Herramientas y Técnicas:**
- Tormenta de ideas
 - Grupo nominal
 - Causa y Efecto
 - Análisis del campo de fuerza
 - Hojas de control
 - Histogramas
 - Diagramas de Pareto

Salidas clave: — Causa(s) básica(s) significativa(s)

- 1 Tormenta de ideas sobre las causas posibles en un diagrama de Causa-Efecto
- 2 Discutir, volver a agrupar y/o suprimir lo que se convino que no son causas
- 3 Convenir en un criterio de selección de causa
- 4 Listar por prioridades
- 5 Indicar las causas básicas en el diagrama
- 6 Reducir las causas posibles a una cantidad manejable
- 7 Aplicar criterio a esas causas
- 8 Usar datos y consensos para identificar la(s) causa(s) más significativa(s)

Paso III

Establecer Objetivos

Pregunta clave: — ¿Qué es lo que se quiere lograr?

Salidas clave: — Metas mensurables o medibles
— Establecer requerimientos
— Plan de medición

- 1 Describir las características cualitativas para las condiciones deseadas después de eliminar la causa, por ejemplo: utilidad, tiempo de respuesta al cliente
- 2 Definir las metas cuantitativas que servirán para confirmar que la causa básica ha sido eliminada
Cantidad y fechas (ahorros, tiempo de respuesta, datos de encuesta, etc.)
- 3 Describir el plan de medición en términos generales

Paso IV

Resolver y Ejecutar

Pregunta clave: — ¿Cómo se alcanza el objetivo?

Herramientas y Técnicas: — Tormenta de ideas
— Grupo nominal
— Causa y Efecto
— Análisis del campo de fuerza
— Hojas de control
— Gráficas
— Histogramas
— Diagramas de Pareto

Salidas clave: — Solución propuesta
— Plan de acción
— Plan de medición detallado

Fase de Solución

- 1 Tormenta de ideas sobre las soluciones posibles
- 2 Agregue o modifique creativamente la lista de soluciones
- 3 Usando criterio, reducir la lista
- 4 Hacer una selección tentativa (matriz de decisión)
- 5 Probar o verificar esa solución (análisis de solución)
- 6 Evaluar la solución en función de los objetivos futuros

Fase de Ejecución

- 7 Presentación y Aprobación final a la Dirección
- 8 Detallar los pasos de un plan de ejecución
 - A. Plan de actividades, secuencia, fechas
 - B. Compromisos necesarios, cómo lograrlos
 - C. Fechas, responsabilidades, recursos
- 9 Proyectar un Plan de Medición
 - A. ¿Qué - medir, qué entradas?

- B. ¿Cómo - reunir y mostrar los datos?
¿Qué estadísticas se usan?
- C. ¿Cuándo - empezar, terminar?
¿con qué frecuencia?
- D. ¿Dónde - se usará, a la mejor fuente o ubicación?
- E. ¿Quién - lo hará, será informado acerca de esto, lo evaluará?

Paso V

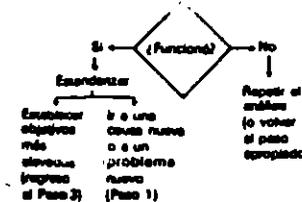
Medición, Seguimiento y Control

Preguntas clave: — ¿Cómo se sabrá que hemos mejorado?
— ¿Cómo se puede prevenir la repetición?

Herramientas y Técnicas: — Hojas de control
— Gráficas
— Histogramas
— Diagramas de Pareto
— Gráficas de ejecución
— Gráficas de control Estadísticas

Salidas clave: — Datos de seguimiento
— Reporte de progreso
— Análisis de impacto
— Procesos normalizados

- 1 Implementar un Plan de Medición
Comparar la encuesta antes y después, para observar los resultados esperados (y los inesperados)
- 2 Comunicar los resultados
Retro-información a los usuarios de los clientes
- 3 Decidir la siguiente fase



La Calidad en IBM



El Proceso
para
Solucionar
Problemas

IBM
MEXICO

Council for Continuous Improvement

**MANUAL
SIMPLIFICADO DE
DISEÑO DE
EXPERIMENTOS**



PANORAMA EDITORIAL
POR LA SUPERACIÓN DEL SER HUMANO Y SUS INSTITUCIONES

Indice

El Consejo para la Mejora Continua (CCI)	5
El Sistema de Implantación de la Mejora Continua (CIIS)	6
Relación con Otros Productos CIIS	8
Acerca de los Autores	9
Acerca del Equipo de Desarrollo de Producto	10
Introducción	11
Propósito y Alcance	11
Objetivos	11
Definición y Beneficios	12
Diseño de Experimentos - Definición	12
Propósitos y Beneficios en el Desarrollo del Producto	13
Diseño de Experimentos en el Desarrollo del Producto	15
El Proceso de Diseño de Experimentos	16
El Flujoograma	16
Algunas Otras Estrategias	39
¿Cómo saber si existe una Aplicación de Diseño de Experimentos?	41
Resumen	42

MANUAL SIMPLIFICADO DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Título original en inglés
DESIGN OF EXPERIMENTS OVERVIEW
HANDBOOK

Copyright © 1994 by Council for Continuous Improvement.

Originally published in English by Quality Resources and
Council for Continuous Improvement. Spanish translation
rights arranged through Quality Resources,
A Division of the Kraus Organization Limited, One
Water Street, White Plains, New York 10601.

Traducción al español por:
Juan Carlos Jolly

Primera edición en español 1996
© Panorama Editorial, S.A. de C.V.
Manuel Ma. Contreras 45-B, Col. San Rafael
06470 - México, D.F.

Printed in México
Impreso en México
ISBN 968-38-0543-4

Sobre CCI

El Consejo para la Mejora Continua (CCI)

El Consejo para la Mejora Continua (CCI) es un consorcio no lucrativo, a nivel nacional, de más de 160 empresas y organizaciones. Fue formado en 1989 para servir a las empresas manufactureras y de servicios, al gobierno y al mundo académico, por medio de un enfoque en la mejora del desempeño de sus miembros mediante la difusión de prácticas exitosas en producción, calidad y mejora continua.

Sobre CCI

continuación

El Sistema de Implantación de la Mejora Continua (CIIS)

Uno de los resultados continuos de los esfuerzos y recursos conjuntos de los miembros de CCI es el Sistema de Implantación de la Mejora Continua (CIIS), una guía que, a largo plazo, cubrirá todos los aspectos de la mejora continua.

El CIIS se diseñó para proporcionar a una organización el conocimiento necesario para establecer un entorno en el que la mejora continua se convierta en el método de hacer las cosas. Cada componente de CIIS proporciona al usuario las tareas, resultados esperados, mediciones recomendados y productos de apoyo para ayudar a la organización a alcanzar la calidad y la mejora continua como bases de funcionamiento

Debido a que cada organización (y aun las distintas operaciones dentro de la misma empresa) se encuentra en un nivel distinto de madurez respecto a la mejora continua, el CIIS fue diseñado con la flexibilidad necesaria para acomodarse a las cambiantes necesidades de los usuarios,

El desarrollo de los materiales CIIS se origina en las discusiones de grupo de los miembros de CCI durante las sesiones plenarias y regionales de éste, así como los resultados de las encuestas periódicas de necesidades de los miembros. Con objeto de desarrollar los productos de apoyo necesarios para el CIIS, los miembros establecieron los Equipos de Desarrollo de Productos (PDT), para diseñar los materiales apropiados. En el desarrollo de éstos, los miembros del PDT trabajan con base en su conocimiento y experiencia colectiva, como la pericia de los expertos en el tema, redacción,

Sobre CCI

continuación

técnicos y diseñadores de instrucciones. Cada producto queda sujeto a revisión de expertos y a pruebas piloto, entre otros requerimientos estrictos. La carta de desarrollo de Productos de CCI se enfoca en la creación de productos esbeltos y de fácil personalización.

Relación con otros productos CIIS

Relación con Otros Productos CIIS

El plan de estudios de CIIS incluye otros materiales de taller y guías, cuyo contenido complementa al *Manual de Herramientas de Mejora Continua*. El contenido relativo en dichos materiales CIIS será reforzado, pero no repetido, en los materiales de este taller. Los materiales complementarios incluyen:

- *Taller de Mejora de Procesos de Empresas*
- *Taller de Facilitadores de Equipos*
- *Taller de Líderes de Equipos*
- *Taller de Miembros de Equipos*

Acerca de los autores

Pete Nelson es facilitador externo *senior* de mejora continua en Siliconix, Inc., en Santa Clara, California. Se especializa en el trabajo en equipo y en la aplicación de métodos estadísticos a los procesos industriales y de manufactura.

Antes de incorporarse a Siliconix, el Sr. Nelson trabajó para la División Fort Worth de General Dynamics. Cuenta con amplia experiencia en la aplicación de muchas herramientas de calidad y de mejora continua, incluyendo el Despliegue de Funciones de Calidad, Diseño de Experimentos y Control Estadístico del Proceso.

El Sr. Nelson es licenciado en psicología por la Universidad de Texas en Austin, tiene una maestría en psicología (con concentración en estadística) de la Universidad de Oklahoma y realizó cursos para graduados en estadística en Oklahoma State University.

Anne Terhoeve es especialista en recursos humanos y desarrollo organizacional en la División Fort Worth de General Dynamics. Es responsable de la capacitación en diseño e implantación del desarrollo integral de productos e ingeniería concurrente de la división.

Antes de incorporarse a General Dynamics, la Sra. Terhoeve trabajó como consultora en calidad para The Cumberland Group, en Cincinnati, Ohio. Asimismo trabajó ocho años para la División Louisiana de Dow Chemical. Como analista *senior* en calidad, proporcionó consultoría en herramientas de calidad, medición de la productividad y desarrollo organizacional a personas y equipos.

La Sra. Terhoeve es licenciada en ciencias computacionales y análisis cuantitativo empresarial por Louisiana State University.

Acerca del equipo de Desarrollo de Producto

Acerca del Equipo de Desarrollo de Producto

Los siguientes participantes y sus empresas participaron en el curso piloto de *Descripción de las Herramientas de Mejora Continua*, en el Taller CCI en el que se basa este manual.

Líder del Equipo

Karie Willyerd General Dynamics

Autores principales

Pete Nelson General Dynamics

Anne Terhoeve General Dynamics

Instructor

Jerry Coover General Dynamics

Participantes

Bob Bartleson National Semiconductor

Dave Bodensedt Rockwell International

Bob Bulander Motorola

Jeff Day Allergan

Ken Gong Teledyne Microwave

Jim Harkins ASM America

Ken Kingsbury Nortrop

JoAnn Letsinger Siliconix

Kit Miller Rockwell International

Delton Robinson Rockwell International

Robb Rough Rockwell International

John Waite National Semiconductor

Bob Watanabe Atmel

Introducción

Introducción

Propósito y Alcance

El propósito de este libro es familiarizar al lector con los propósitos, beneficios y actividades del Diseño de Experimentos. La descripción incluye un ejemplo sencillo que revela la forma en que el Diseño de Experimentos puede mejorar de manera eficaz la calidad de productos, procesos y servicios. Asimismo, la discusión busca ejemplos en los que una aplicación puede beneficiarse del Diseño de Experimentos. Además se cubrirán las fuentes de información adicional sobre Diseño de Experimentos.

Objetivos

Los objetivos de aprendizaje de este manual son:

- Describir los propósitos y beneficios del Diseño de Experimentos
- Describir el proceso genérico para dirigir el experimento diseñado
- Describir la existencia de una situación en la que aplica el Diseño de Experimentos
- Describir en dónde es posible obtener información adicional sobre el Diseño de Experimentos

Definición y Beneficios

Definición y Beneficios

Diseño de Experimentos - Definición

Diseño de Experimentos - Definición

El Diseño de Experimentos es un enfoque sistemático para resolver problemas y mejorar los procesos por medio de principios estadísticos y métodos de experimentación científica.

Técnica sistemática para resolver problemas

El Diseño de Experimentos es un enfoque sistemático para resolver problemas y mejorar los procesos por medio de principios estadísticos y métodos de experimentación científica. El Diseño de Experimentos es una forma de obtener la máxima información respecto a un proceso o problema con objeto de tomar buenas decisiones. Esto último se logra con una erogación mínima de recursos

Definición y Beneficios

continuación

Propósitos y Beneficios en el desarrollo del producto

Propósitos y Beneficios

Propósitos

- Identificar y confirmar los factores de insumo que influyen en los procesos y productos
- Determinar escenarios de procesos para lograr los resultados óptimos
- Permitir el desarrollo de procesos y productos sólidos

Beneficios

- Mayor eficiencia
- Escenarios óptimos de productos y procesos
- Conceptos básicos relativamente sencillos de aprender
- Eficaz en diversas etapas del proceso de desarrollo en donde sea posible reducir los costos en forma drástica

Definición y Beneficios

continuación

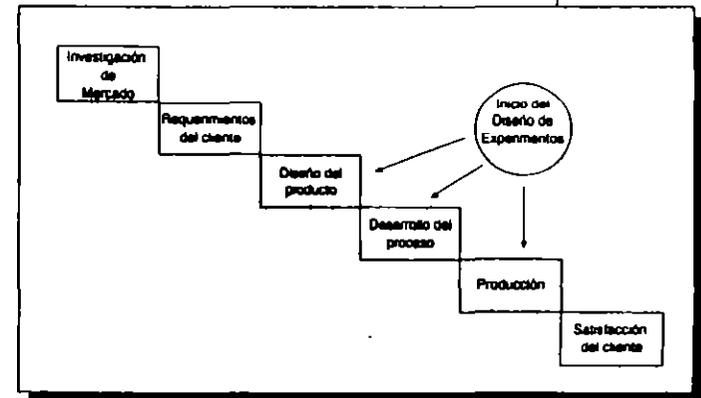
En el mundo empresarial, se podría mejorar la calidad sin elevar los costos de producción y desarrollo. Por medio del Diseño de Experimentos es posible identificar y confirmar los factores de insumo que influyen en las características de los procesos y productos. Es posible descubrir en qué condiciones lograrán mejores resultados dichos insumos. Asimismo se puede examinar el efecto de los factores de "ruido" (diferencias en uso, entorno de manufactura y materiales) sobre los productos y procesos. Entonces es posible ver la forma de hacer a éstos insensibles o "robustos" a la presencia de ruido.

Algunos beneficios importantes del Diseño de Experimentos incluyen la reducción de tiempos de entrega, de cambios en ingeniería y de costos de desarrollo. El Diseño de Experimentos logra esto en una forma eficaz respecto a los costos; descubre formas eficaces de responder a las preguntas de las empresas.

Definición y Beneficios

continuación

Diseño de Experimentos en el Desarrollo del Producto



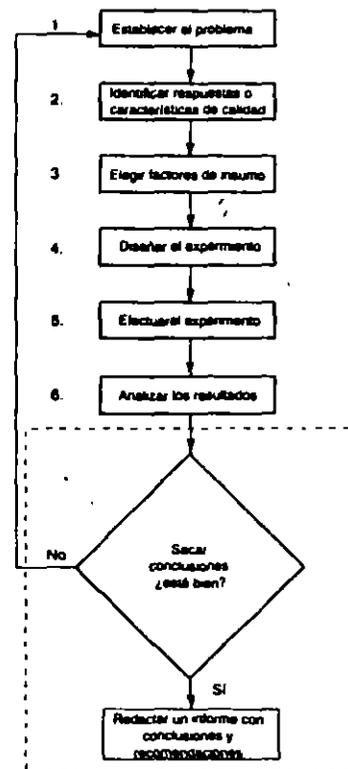
El Despliegue de Funciones de Calidad (DFC) se utiliza en las primeras etapas del desarrollo del producto. Proporciona un diagrama de las actividades. Es posible utilizar el Diseño de Experimentos para afinar dichas actividades. Es eficaz en la fase de diseño, en la que permite establecer los parámetros óptimos del producto (por ejemplo, los materiales que se deben utilizar para producir equipo de esquí, el espesor de éstos, etc.). El Diseño de Experimentos asimismo ayuda a determinar los parámetros óptimos para producir tales artículos (por ejemplo, qué combinación de tiempo de proceso y voltaje producirá el mejor rendimiento. Por último, si bien es posible identificar las causas básicas del problema con el Control Estadístico del Proceso, el Diseño de Experimentos ayuda a validar las causas y señala la forma de solucionar las soluciones a los problemas y las mejoras al proceso. Y después se podrá emplear el Control Estadístico del Proceso para vigilar el proceso.

El diseño de experimentos resuelve problemas

El proceso de diseño de experimentos

El Proceso de Diseño de Experimentos

El Flujoograma



El proceso de diseño de experimentos

Los experimentos diseñados son muy eficaces como apoyo para producir mejores bienes y servicios y resolver problemas empresariales. Una guía que ayudará al lector a obtener lo más posible de un experimento diseñado es:

1. **Establecer el problema.** Se identifica el problema y determina los objetivos de estudio.
2. **Identificar respuestas o características de calidad.** Se identifican las respuestas o características de calidad que interesan. Muchas veces es útil definir los valores-objetivo de las respuestas y considerar que alcanzar tales valores-objetivo resolverá el problema de la empresa.
3. **Elegir factores de insumo.** Se dividen los factores de insumo en tres categorías: control, bloqueo y ruido. Asegurarse de incluir factores que pudieran afectar la respuesta y que los niveles de factor cubran de manera adecuada la región de operación.
4. **Diseñar el experimento.** Es preciso abarcar varios aspectos. ¿Qué estrategia de prueba (por ejemplo, factores absolutos, etc) se empleará? ¿Qué niveles de factores se utilizarán? ¿Se deberán incluir las interacciones? ¿Son los recursos y presupuesto compatibles con el plan propuesto de pruebas?
5. **Efectuar el experimento.**
6. **Analizar los resultados.** Por lo general, las pruebas bien planeadas y ejecutadas son fáciles de analizar, en particular con el software de cómputo disponible hoy en día. Se deberán confirmar los resultados.
7. **Redactar un informe con recomendaciones.**

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Paso 1. Establecer el problema

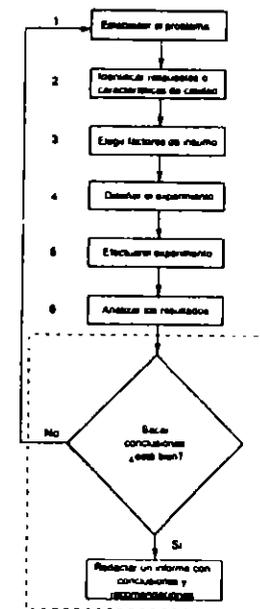
Comenzar describiendo el problema que se desea resolver o el proceso que se quiere mejorar. Describir el problema o proceso en el lenguaje del cliente. Los flujogramas y los diagramas de causa y efecto son herramientas muy útiles para describir los problemas y procesos. Un vez que esto se hace bien es posible establecer los objetivos del estudio. En esta etapa, algunas de las preguntas por hacer son:

- ¿Por qué se está trabajando en este problema o proceso?
- ¿Qué se espera ganar (cuánto vale) al resolver este problema o mejorar el proceso? Asegurarse que se incluyan todos los costos importantes.
- ¿Qué decisiones se tomarán con base en los resultados?
- ¿Cuánto tiempo tomará la realización del experimento diseñado?
- ¿Qué recursos se necesitan para dirigir el experimento?
- ¿Qué se sabe sobre el problema en este momento?

Hacer el trabajo
de campo

El proceso de diseño de experimentos

continuación



El proceso de diseño de experimentos

continuación

Ejemplo: Un problema en un proceso de pintura en aerosol

El problema del ejemplo supone superficies defectuosas en un proceso de pintura en aerosol. El objetivo del experimento diseñado es detectar una forma de reducir los defectos al mínimo. Esto se logra encontrando alguna combinación de factores de insumo que lleven al menor número de defectos en el proceso.

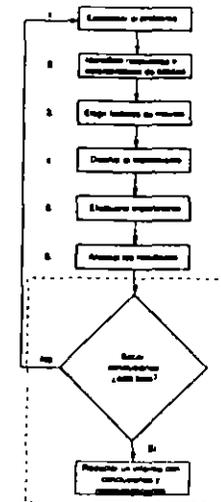
Problema en un proceso de pintura en aerosol

¿Cómo es posible reducir al mínimo el número de defectos en las superficies en un proceso de pintura en aerosol?

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Paso 2. Identificar las características de respuesta o calidad



En el paso 2 se determinan las características de respuesta o calidad. Es posible elegir más de una respuesta. Es de hacer notar que en este último caso, quizá sean distintos los parámetros de los factores de insumo. Así, se deberán elegir objetivos para cada respuesta.

En algunos casos, tal vez el objetivo del experimento sea sencillamente ver la influencia de los cambios en los factores de insumo sobre las respuestas. Al desarrollar valores-objetivo, se deberá preguntar si el alcanzar estos objetivos ayudará a resolver el problema.

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Ejemplo: Conteo de defectos por superficie estándar

Conteo de defectos por superficie estándar

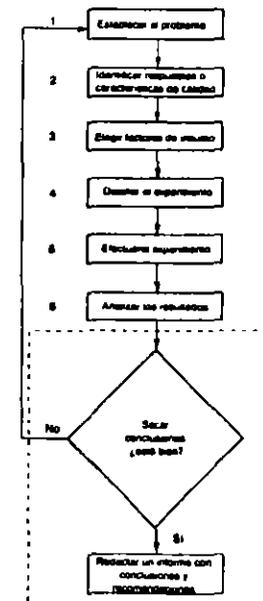
El número de defectos por superficie estándar es la respuesta

El número de defectos por superficie estándar es la respuesta o característica de calidad a estudiar. Se observará sólo una respuesta.

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Paso 3. Elegir factores de insumo



El proceso de diseño de experimentos

continuación

Usar el trabajo de
equipo

Es posible emplear un diagrama de causa y efecto para elegir las distintas causas que pudieran afectar la respuesta. Se podrían separar los factores en las siguientes categorías:

- **Control:** Estos factores de insumo afectan la respuesta y se desea cuantificar el efecto. Se manipularán los niveles de factores de control. Dos ejemplos son la temperatura de reacción y el tiempo del proceso.
- **Bloqueo:** Estos factores de insumo afectan la respuesta pero por lo general no se cuantifican los efectos. Sería deseable eliminar los efectos de estos factores a partir del análisis. Los efectos de factores de bloqueo son la máquina o el operario.
- **Ruido:** Estos factores de insumo afectan la respuesta y se desea encontrar los niveles de funcionamiento que funcionan mejor sobre las combinaciones de todos estos factores. Los ejemplos de factores de ruido incluyen las condiciones de manufactura (por ejemplo, humedad) y de uso (entorno terrestre contra marítimo).

Se desearía verificar si se incluyen los factores que pudieran afectar la respuesta y que los parámetros de las variables no poseen un espacio que no es ni muy estrecho ni muy amplio.

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Tres factores de insumo

Tres factores de insumo para el proceso de pintura en aerosol

1. Temperatura del gas transportador
2. Tamaño de la boquilla
3. Presión del flujo de aire

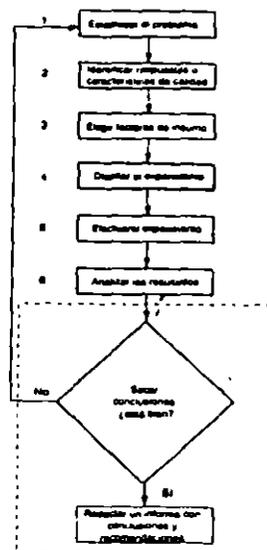
Para mantener sencillas las cosas en el ejemplo, se emplean sólo factores de control. No se proporcionan parámetros numéricos. Los métodos que se sugieren son apropiados para factores numéricos y no numéricos. El equipo eligió los factores siguientes:

- Temperatura del gas transportador
- Tamaño de la boquilla
- Presión del flujo de aire

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Paso 4. Diseñar el experimento



Es preciso abarcar diversos aspectos en el diseño del experimento. Si se presta atención a estos detalles, se ayudará a asegurar que es posible extraer conclusiones válidas y útiles a partir de los resultados. Entre los aspectos más importantes son:

- *¿Qué estrategia o combinación de estrategias de pruebas se deberá considerar?* Las estrategias comunes incluyen diseños de factores completos, fracciones de factores, superficie de respuesta, métodos Taguchi y diseños bloqueados.

El proceso de diseño de experimentos

continuación

- *¿Qué niveles de factor se deberán emplear?* Deberán cubrir la región de operación en forma apropiada. Los niveles mínimos de números ayudan a mantener reducido el tamaño del experimento. Es posible emplear los casos mejor y peor.
- *¿Qué interacciones se deberán considerar?* Las interacciones ocurren cuando el efecto de un factor de insumo depende del nivel de otro. Muchas veces, las interacciones son importantes y no es posible detectarlas con estrategias de "una variable cada vez", que muchas veces se emplean.
- *¿Son compatibles los recursos y el problema?* Algunos autores recomiendan que los estudios iniciales no deberán consumir más del 25% de los recursos disponibles. A veces, los experimentos requieren iteraciones para caracterizar por completo el problema o proceso.

Beneficio muy importante

Al enfrentar estos aspectos, se desarrolla una guía detallada de actividades. Esta guía requiere instrucciones y capacitación para el personal que llevará a cabo el experimento. A veces se realiza un análisis "en seco" para verificar la factibilidad del enfoque y para garantizar que el experimento satisface los objetivos.

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Matriz de pruebas: Factorial completo

PRUEBA	TEMP. DEL GAS	TAMANO DE	PRESIÓN DEL
	TRANSPORTE	BOQUILLA	GAS
	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

En este ejemplo, se utilizará un diseño factorial completo. Para simplificar las cosas. Se emplearán sólo los factores de control. Un factorial completo posee una "prueba" para cada combinación de los factores del experimento. Cuando existen dos niveles de cada factor y existen tres factores, como en este experimento, existen $2 \times 2 \times 2 = 8$ pruebas diferentes.

Se enumeran las ocho pruebas. En la primera, los niveles de todos los factores son "bajos". El código de "bajo" es "-". La prueba 2 tiene el factor A (temperatura del gas transportador) en el nivel "alto"; en tanto que los otros dos factores permanecen "bajos". Se codifica "alto" como "+". Otros autores emplean códigos diferentes: por ejemplo, bajo es "-1" y alto es "+1", o bien bajo es "1" y alto es "2".

El proceso de diseño de experimentos

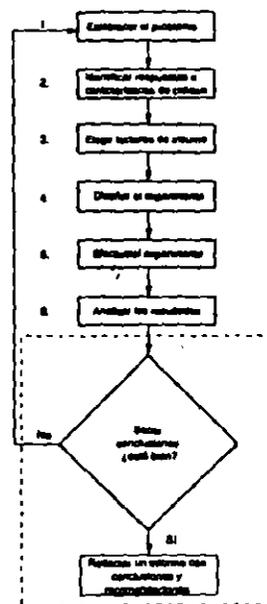
continuación

Al elevarse el número del factor, el tamaño de la matriz factorial completa es mayor. En un estudio de exposición se tratarán de estudiar muchos factores; se desea encontrar cuáles estudiar más a fondo. Por ejemplo, cuando se desean analizar 10 factores, el tamaño de la matriz de factores completos es 2 a la décima potencia: en otras palabras, 1,024. En estos casos se utiliza mejor la matriz fraccional. Los diseños fraccionales son fracciones de $1/2$ de los diseños factoriales completos; son más económicos en proporcionar información útil de los factores de interés.

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Paso 5. Efectuar el experimento



Hacer aleatorio el orden de pruebas

El diagrama experimental es una forma concisa de presentar los distintos factores y combinaciones experimentales que se manejarán en el experimento. Por lo general, es mejor preparar el orden real de pruebas en forma aleatoria. Esto ayuda a asegurar que los factores que se emplean no se favorecen o perjudican en forma continua por las demás fuentes de variación sobre las que no se tiene control.

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Algunas posibles preguntas son las siguientes:

- ¿El personal que efectuará la prueba conoce bien los procedimientos y objetivos de la prueba o experimento?
- ¿Está disponible el equipo a ser empleado en el experimento?
- ¿El tiempo que se asigna al experimento es compatible con el programa de mantenimiento preventivo u otros períodos de inestabilidad similares?
- Después de concluir el experimento, funcionó éste en la forma planeada? De no ser así, ¿cómo afectó los resultados el haberlo efectuado en forma diferente?

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Datos recabados

PRUEBA	TEMP. DEL GAS	TAMAÑO DE	PRESIÓN DEL	DATOS
	TRANSPORTE	BOQUILLA	GAS	
	A	B	C	
1	-	-	-	100
2	+	-	-	119
3	-	+	-	20
4	+	+	-	41
5	-	-	+	119
6	+	-	+	217
7	-	+	+	42
8	+	+	+	113

Presentar el en
orden normal

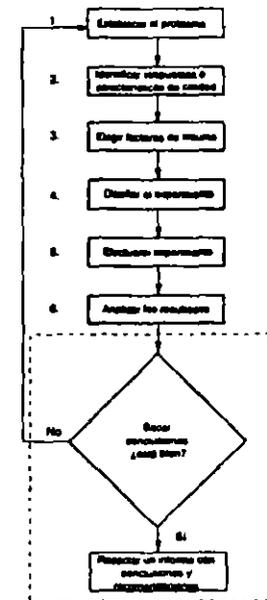
Los datos del experimento se presentan en el orden normal. Cada número representa la cantidad total de defectos en cinco superficies distintas. Por ejemplo, en la prueba 1, cuando todos los factores se encontraban en los niveles bajos, el número total de defectos en las cinco superficies diferentes es 100. En la prueba 8, cuando los tres factores estaban en el nivel "alto", el número total de defectos que se encontró fue 113.

La variabilidad es un hecho de la vida es cualquier entorno de Diseño de Experimentos. En este caso, y en la situación de Diseño de Experimentos en general, se modifican las condiciones en forma deliberada esperando inducir la variabilidad en los resultados del experimento. Luego se analizan los resultados y se aísla la contribución de cada factor a la variabilidad del experimento.

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Paso 6. Analizar los resultados

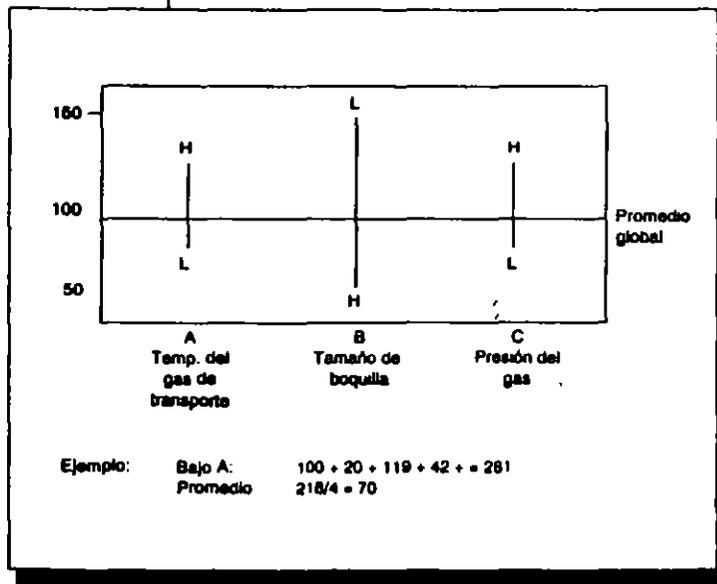


Es posible analizar los datos a niveles distintos. Se observará el análisis por medio de promedios sencillos. Indicar cualquier cosa más allá de los análisis más sencillos está más allá del alcance de esta descripción global.

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Análisis



Es posible hacer un análisis sencillo aunque informativo de los datos con sólo los promedios. Por ejemplo, las pruebas 1, 3, 5 y 7 tienen el factor A (temperatura del gas transportador) en el nivel bajo. Las pruebas 2, 4, 6 y 8 lo tienen en el nivel alto. Es de hacer notar que los demás factores están equilibrados, de modo que la comparación es válida.

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Los datos son:

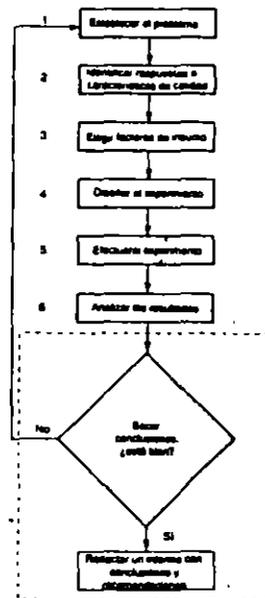
	Alto	Bajo
1	100	2 119
3	20	4 41
5	119	6 217
7	42	8 113
Suma	281	490
Promedio	70	123

Este sencillo análisis sugiere que utilizar el nivel bajo de temperatura del gas transportador supondrá menos defectos. Se deberán verificar los promedios para los dos niveles del factor B (tamaño de la boquilla) del factor C (presión). El promedio para el nivel bajo del factor B usa las pruebas 1, 2, 5 y 6; los promedios para el nivel alto utilizan las pruebas 3, 4, 7 y 8. Se emplean las pruebas 1, 2, 3 y 4 para obtener el promedio de nivel bajo del factor C, y las pruebas 5, 6, 7 y 8 para el promedio de nivel alto. Un diagrama de estos promedios es muy sencillo e informativo.

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Paso 7. Sacar conclusiones y hacer recomendaciones



El proceso de diseño de experimentos

continuación

Algunas preguntas que se desearán hacer después de diseñar, efectuar y analizar los datos de un experimento diseñado son:

- *¿Ayudó el experimento a alcanzar los objetivos? De no ser así, ¿qué se hizo mal? ¿Se requieren más datos, un mejor control de los factores externos, etc.?*
- *¿Es preciso hacer las cosas de otro modo? ¿Se debieron haber usado distintos factores, rangos más amplios para éstos, etc.?*
- *¿Se requieren más experimentos? En algunos casos, el primer experimento tal vez señalen hacia el área donde están los mejores parámetros para el experimento.*
- *Con base en los resultados de los experimentos, ¿qué decisiones se tomarán?*
- *¿Cuáles son los mejores parámetros para el proceso? ¿Cuál fue la mejor prueba del experimento? Es de hacer notar que se determinan los mejores parámetros del proceso a partir de varios puntos de datos; esto proporciona un cálculo más estable que el de una sola prueba.*
- *¿Las pruebas de confirmación (que emplean los parámetros óptimos y se efectúan en forma independiente al experimento original) concuerdan con los resultados del experimento?*

El trabajo en equipo es importante durante todo el experimento

Este es un paso muy importante, que muchas veces se olvida (la teoría contra el mundo real)

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Recomendaciones para el proceso de pintura en aerosol

Recomendaciones para el proceso de pintura en aerosol

Para la producción, emplear:

- ✓ Temperatura del gas: Baja
- ✓ Tamaño de boquilla: Grande
- ✓ Presión: Baja

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Algunas Otras Estrategias

Algunas otras estrategias de diseño de experimentos

- Factorial completo
- Factorial fraccional
- Métodos de superficie de respuesta
- Métodos Taguchi
- Diseños en bloque
- Factorial completo

Factorial completo

Los diseños factoriales completos utilizan todas las combinaciones de los niveles de factores de insumos. Por ejemplo, si existen dos niveles en cada factor y hay dos factores, es preciso realizar $2 \times 2 = 4$ pruebas. Los diseños factoriales completos permiten evaluar las interacciones, usar los recursos en forma eficiente y adaptarse a la naturaleza iterativa de los experimentos. Una importante desventaja de los diseños factoriales completos es que pueden llegar a ser muy grandes a medida que se eleva el número de factores y niveles.

Puede ser muy grande

El proceso de diseño de experimentos

continuación

Elevar el riesgo

Factorial fraccional

Los diseños factoriales fraccionales utilizan fracciones construidas en forma especial de una matriz factorial completa. Sacrifican parte de la información (el cálculo de interacciones de nivel más elevado que por lo general carecen de interés) a cambio de reducir la cantidad de pruebas.

Métodos de superficie de respuesta

Los métodos de superficie de respuesta son de particular importancia en situaciones en las que los factores de insumo son numéricos (por ejemplo, la temperatura y la presión). Combinan los diseños factoriales fraccionales y de otro tipo con las técnicas de investigación para permitir la determinación de parámetros óptimos de las variables de insumos.

Métodos Taguchi

Los métodos Taguchi promueven el uso del Diseño de Experimentos en la fase de desarrollo de producción. Se enfocan en la proximidad al objetivo en vez de sólo cumplir las especificaciones, promoviendo la idea de un diseño más robusto, de modo que el producto sea insensible a las variaciones.

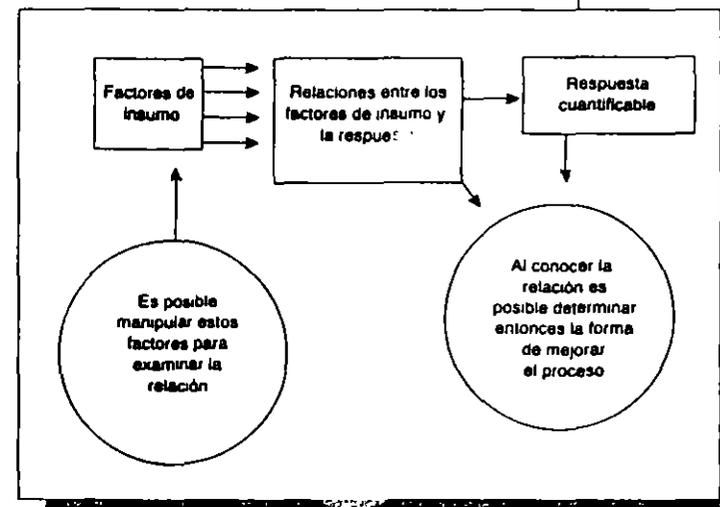
Diseños en bloque

Los diseños en bloque buscan las pruebas experimentales en grupos, o bloques, en los que las variables no controladas son tan similares como sea posible.

El proceso de diseño de experimentos

continuación

¿Cómo saber si existe una aplicación de Diseño de Experimentos?



Es posible utilizar el Diseño de Experimentos cuando:

- El interés reside en encontrar una respuesta o característica de calidad cuantificable para un producto o proceso.
- Es preciso conocer la influencia de los factores de insumo en la característica de calidad.
- Es posible manipular o modificar los factores de insumos de modo que sea posible observar las características de calidad.

Para reducir:

- Tiempos de entrega
- Cambios de Ingeniería
- Costos de desarrollo
- Optimización de procesos

Resumen

Resumen

Resumen

El Diseño de Experimentos consta de siete pasos:

1. Establecer el problema.
2. Identificar respuestas o características de calidad.
3. Elegir factores de insumo.
4. Diseñar el experimento.?
5. Efectuar el experimento.
6. Analizar los resultados.
7. Redactar un informe con conclusiones y recomendaciones.

Existen muchas estrategias de Diseño de Experimentos para elegir:

1. Factorial completo
2. Factorial fraccional
3. Métodos de superficie de respuesta
4. Métodos Taguchi
5. Diseños en bloque
6. Otros

Council for Continuous Improvement

**MANUAL
SIMPLIFICADO DE
DESPLIEGUE DE
LA FUNCION
DE CALIDAD**



PANORAMA EDITORIAL
POR LA SUPERACIÓN DEL SER HUMANO Y SUS INSTITUCIONES

Indice

- El Consejo para la Mejora Continua (CCI) 5
- El Sistema de Implantación de la Mejora Continua (CIIS) 6
- Relación con Otros Productos CIIS 8
- Acerca de los Autores 9
- Acerca del Equipo de Desarrollo de Producto 10
- Introducción 11
 - Propósito y Alcance 11
 - Objetivos 11
- Definición y Beneficios 12
 - Los Negocios en la Forma Usual 12
 - Despliegue de Funciones de Calidad - Definición 14
 - DFC - Propósitos y Beneficios 15
 - DFC en el Desarrollo de Producto 17
- Clientes 19
- La Casa de la Calidad 21
- Extensiones de la Casa de la Calidad 35
 - El Enfoque de Cuatro Pasos 35
 - El Enfoque de Matrices Múltiples 38
 - ¿Qué se Requiere para DFC? 39
 - ¿Qué se Posee al Concluir? 40
- Resumen 41

**MANUAL SIMPLIFICADO DE DESPLIEGUE
DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD**

Título original en inglés:
QFD OVERVIEW HANDBOOK

Copyright © 1994 by Council for Continuous Improvement.

Originally published in English by Quality Resources and Council for Continuous Improvement. Spanish translation rights arranged through Quality Resources, A Division of the Kraus Organization Limited, One Water Street, White Plains, New York 10601.

Traducción al español por:
Juan Carlos Jolly

Primera edición en español: 1996
© Panorama Editorial, S.A. de C.V.
Manuel Ma. Contreras 45-B, Col. San Rafael
06470 - México, D.F.

Printed in México
Impreso en México
ISBN 968-38-0548-9

Sobre CCI

El Consejo para la Mejora Continua (CCI)

El Consejo para la Mejora Continua (CCI) es un consorcio no lucrativo, a nivel nacional, de más de 160 empresas y organizaciones. Fue formado en 1989 para servir a las empresas manufactureras y de servicios, al gobierno y al mundo académico, por medio de un enfoque en la mejora del desempeño de sus miembros mediante la difusión de prácticas exitosas en producción, calidad y mejora continua.

Sobre CCI

continuación

El Sistema de Implantación de la Mejora Continua (CIIS)

Uno de los resultados continuos de los esfuerzos y recursos conjuntos de los miembros de CCI es el Sistema de Implantación de la Mejora Continua (CIIS), una guía que, a largo plazo, cubrirá todos los aspectos de la mejora continua.

El CIIS se diseñó para proporcionar a una organización el conocimiento necesario para establecer un entorno en el que la mejora continua se convierta en el método de hacer las cosas. Cada componente de CIIS proporciona al usuario las tareas, resultados esperados, mediciones recomendados y productos de apoyo para ayudar a la organización a alcanzar la calidad y la mejora continua como bases de funcionamiento.

Debido a que cada organización (y aun las distintas operaciones dentro de la misma empresa) se encuentra en un nivel distinto de madurez respecto a la mejora continua, el CIIS fue diseñado con la flexibilidad necesaria para acomodarse a las cambiantes necesidades de los usuarios.

El desarrollo de los materiales CIIS se origina en las discusiones de grupo de los miembros de CCI durante las sesiones plenarias y regionales de éste, así como los resultados de las encuestas periódicas de necesidades de los miembros. Con objeto de desarrollar los productos de apoyo necesarios para el CIIS, los miembros establecieron los Equipos de Desarrollo de Productos (PDT), para diseñar los materiales apropiados. En el desarrollo de éstos, los miembros del PDT trabajaron base en su conocimiento y experiencia colectiva, como la pericia de los expertos en el tema, redactores

Sobre CCI

continuación

técnicos y diseñadores de instrucciones. Cada producto queda sujeto a revisión de expertos y a pruebas piloto, entre otros requerimientos estrictos. La carta de desarrollo de Productos de CCI se enfoca en la creación de productos esbeltos y de fácil personalización.

Relación con otros productos CIIS

Relación con Otros Productos CIIS

El plan de estudios de CIIS incluye otros materiales de taller y guías, cuyo contenido complementa al *Manual de Herramientas de Mejora Continua*. El contenido relativo en dichos materiales CIIS será reforzado, pero no repetido, en los materiales de este taller. Los materiales complementarios incluyen:

- *Taller de Mejora de Procesos de Empresas*
- *Taller de Facilitadores de Equipos*
- *Taller de Líderes de Equipos*
- *Taller de Miembros de Equipos*

Acerca de los autores

Pete Nelson es facilitador externo *senior* de mejora continua en Siliconix, Inc., en Santa Clara, California. Se especializa en el trabajo en equipo y en la aplicación de métodos estadísticos a los procesos industriales y de manufactura.

Antes de incorporarse a Siliconix, el Sr. Nelson trabajó para la División Fort Worth de General Dynamics. Cuenta con amplia experiencia en la aplicación de muchas herramientas de calidad y de mejora continua, incluyendo el Despliegue de Funciones de Calidad, Diseño de Experimentos y Control Estadístico del Proceso.

El Sr. Nelson es licenciado en psicología por la Universidad de Texas en Austin, tiene una maestría en psicología (con concentración en estadística) de la Universidad de Oklahoma y realizó cursos para graduados en estadística en Oklahoma State University.

Anne Terhoeve es especialista en recursos humanos y desarrollo organizacional en la División Fort Worth de General Dynamics. Es responsable de la capacitación en diseño e implantación del desarrollo integral de productos e ingeniería concurrente de la división.

Antes de incorporarse a General Dynamics, la Sra. Terhoeve trabajó como consultora en calidad para The Cumberland Group, en Cincinnati, Ohio. Asimismo trabajó ocho años para la División Louisiana de Dow Chemical. Como analista *senior* en calidad, proporcionó consultoría en herramientas de calidad, medición de la productividad y desarrollo organizacional a personas y equipos.

La Sra. Terhoeve es licenciada en ciencias computacionales y análisis cuantitativo empresarial por Louisiana State University.

Acerca del equipo de desarrollo de producto

Acerca del Equipo de Desarrollo de Producto

Los siguientes participantes y sus empresas participaron en el curso piloto de *Descripción de las Herramientas de Mejora Continua*, en el Taller CCI en el que se basa este manual.

Líder del Equipo

Karie Willyerd General Dynamics

Autores principales

Pete Nelson General Dynamics

Anne Terhoeve General Dynamics

Instructor

Jerry Coover General Dynamics

Participantes

Bob Bartleson National Semiconductor

Dave Bodenstedt Rockwell International

Bob Bolander Motorola

Jeff Day Allergan

Ken Gong Teledyne Microwave

Jim Harkins ASM America

Ken Kingsbury Nortrop

JoAnn Letsinger Siliconix

Kit Miller Rockwell International

Delton Robinson Rockwell International

Robb Rough Rockwell International

John Waite National Semiconductor

Bob Watanabe Atmel

Introducción

Introducción

Propósito y Alcance

El propósito de este manual es hacer que el lector se familiarice con los propósitos, beneficios y actividades del Despliegue de Funciones de Calidad (DFC). Se presenta una versión simplificada del proceso para ayudar al lector a comprender la forma en que DFC puede mejorar en forma eficaz la calidad de los productos, procesos y servicios. La discusión explora la pregunta: ¿Cuándo se tiene una situación que puede beneficiarse del enfoque de DFC? Asimismo se cubren las fuentes de información adicional sobre DFC.

Objetivos

Los objetivos de aprendizaje de este libro son:

- Describir los propósitos y beneficios de DFC
- Describir una versión simplificada de la Casa de la Calidad.
- Describir cuando se está frente a una situación que puede beneficiarse del enfoque DFC.
- Describir en dónde es posible encontrar información adicional sobre DFC.

Definición y Beneficios

Definición y Beneficios

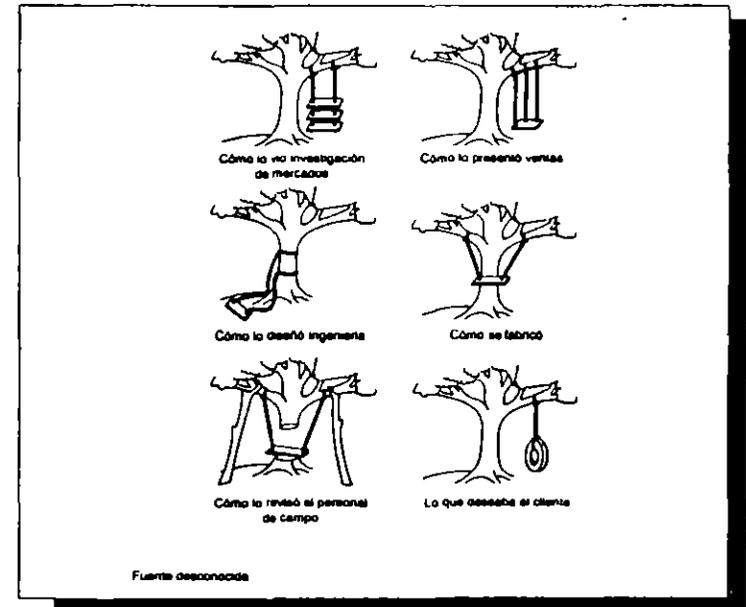
Los Negocios en la Forma Usual

Muchas veces, la tarea de desarrollar un producto o proceso sigue una secuencia similar al proceso que se describe en la figura siguiente.

- El cliente lo solicita (*no aparece*)
- Investigación de Mercados interpreta la solicitud y la envía a...
- Ventas, que interpreta la solicitud y la pasa a...
- Ingeniería, que diseña el producto y lo envía a...
- Producción, que lo construye y por último...
- El personal de campo lo recibe de nuevo y hace lo mejor que puede para hacerlo funcionar.

Definición y Beneficios

continuación



Es de hacer notar que estas actividades muestran lo que el cliente quería en un principio. Existe espacio para la interpretación en cada fase, en la que asimismo se hablan distintos idiomas. Es posible perder la voz del cliente durante todas estas actividades y traducciones.

Una forma de ayudar a asegurar que el cliente recibe el producto deseado a un precio que pueda pagar es el Despliegue de Funciones de Calidad (DFC).

DFC apoya la satisfacción del cliente al escuchar

Definición y Beneficios

continuación

Despliegue de Funciones de Calidad - Definición

DFC - Definición

El DFC es un enfoque sistemático para el diseño y desarrollo de productos y servicios. Se logra por medio de equipos interdisciplinarios que traducen los requerimientos del cliente en acciones relevantes de la empresa en cada etapa del proceso de desarrollo.

Existen varias definiciones de DFC. La mayor parte de ellos usan palabras como *sistemático, matriz, cliente, empresa, requerimientos técnicos*, así como otras traducciones de los caracteres japoneses.

Una definición funcional, para su uso en este manual es:

El DFC es un enfoque sistemático para el diseño y desarrollo de productos y servicios. Se logra por medio de equipos interdisciplinarios que traducen los requerimientos del cliente en acciones relevantes de la empresa en cada etapa del proceso de desarrollo.

Equipos
interdisciplinarios
La Voz del Cliente

Definición y Beneficios

continuación

DFC - Propósitos y Beneficios

DFC - Propósitos y Beneficios

Propósitos

- Traducir al cliente en requerimientos de la empresa
- Mejorar la comunicación entre las distintas áreas
- Asignar prioridades a las mejoras de productos
- Asignar objetivos para la reducción de costos
- Asignar objetivos para cambios trascendentales

Beneficios

- Mejora de la satisfacción del cliente
- Mejora de ciclos de desarrollo de producto
- Transferencia interna de conocimiento

Definición y Beneficios

continuación

Cliente externo

Cliente interno

Se emplea DFC para:

- Traducir las exigencias del cliente en requerimientos técnicos de la empresa y características eventuales de producto.
- Mejorar la comunicación horizontal al proporcionar un método que permita que se comuniquen entre sí las distintas funciones de un producto.
- Asignar prioridades observando los requerimientos técnicos que se relacionan con los requerimientos más importantes para el cliente.
- Asignar objetivos para la reducción de costos: por ejemplo, reducción del tiempo de ciclo.
- Asignar objetivos de cambios trascendentales: por ejemplo, áreas en las que las demandas de los clientes son elevadas, pero el desempeño de la industria es bajo.
- Compararse contra la competencia.

DFC supone asimismo varios beneficios:

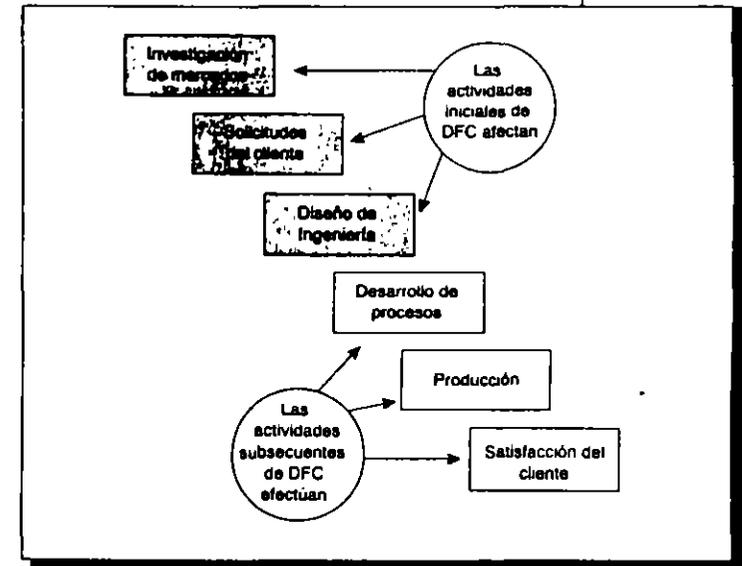
Tangible o intangible

- Aumento en la satisfacción del cliente, porque los productos tendrán un aumento de la calidad, serán menos costosos, estarán a tiempo y más cerca de lo que el cliente quería, en primer lugar.
- Mejora en los ciclos de desarrollo, porque los productos tendrán tiempos más breves de desarrollo, resoluciones de cambios en el diseño más breves y se reducirán al mínimo las dificultades de comienzo.
- Mayor transferencia interna de conocimiento por medio de desarrollo de equipos interdisciplinarios, el uso de un idioma común, pensamiento visual y la conservación del conocimiento en un formato compacto.

Definición y Beneficios

continuación

DFC en el Desarrollo de Producto



DFC se inicia al comienzo del ciclo de desarrollo de un producto; sus efectos se sentirán durante todo el ciclo de desarrollo. Se organiza el conocimiento de planeación del producto con la Casa inicial de la Calidad y utilizar de otras matrices para desplegar la calidad durante las etapas posteriores del proceso.

El DFC es una herramienta para identificar los requerimientos de los clientes, las exigencias técnicas y demás características del proceso de desarrollo. Un estudio bien ejecutado de DFC identificará asimismo y ayudará a

La Voz del Cliente desde el inicio de un proyecto

Definición y Beneficios

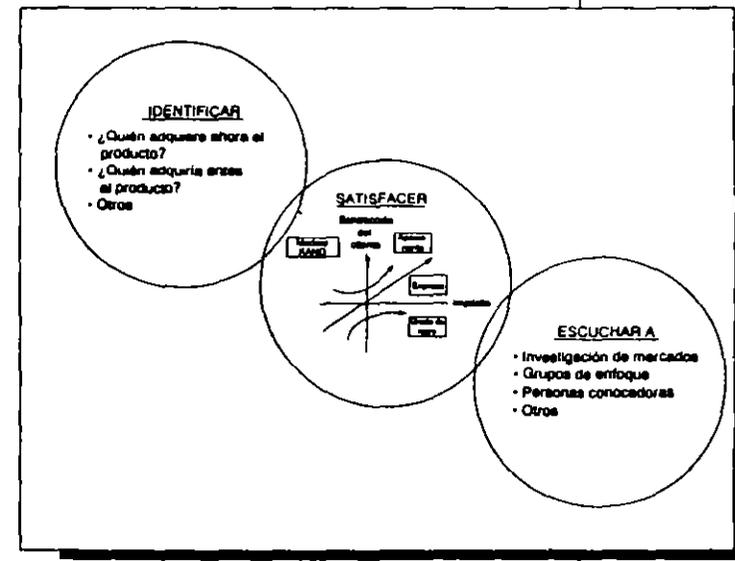
continuación

evitar problemas potenciales. Al utilizar el DFC, es posible identificar las áreas en las que es posible hacer mejoras eficaces desde el punto de vista de los costos.

Un fabricante refiere que corregir de un problema que se descubre en el campo cuesta \$590,000. Si el problema se hubiera descubierto en la fase de diseño, la empresa habría gastado \$35. DFC puede ayudar a encontrar los problemas en la fase de diseño.

Cientes

Cientes



El cliente es el participante clave en DFC. Al hablar de clientes, es posible centrarse en tres aspectos diferentes.

El primero de ellos es la identificación de los clientes: éstos pueden ser internos o externos, distribuidores y compradores, y personal de mantenimiento y usuarios finales. Se podrán hacer preguntas como:

- ¿Quién adquiere ahora el producto?
- ¿Quién adquiriría antes el producto?
- ¿Hacia qué mercado se desea orientarse?

Mercado objetivo

Cientes

continuación

Implícitos
Expresos
Apasionantes

El segundo aspecto de los clientes trata las demandas o requerimientos de éstos. La satisfacción del cliente supone características no expresadas, pero inherentes (por ejemplo, de seguridad o de salud), expresas (cantidad de memoria en una computadora) y apasionantes (mejora en las características de control del piloto automático de un automóvil). El modelo Kano describe estas dimensiones de satisfacción del cliente y las características de un producto.

El tercer aspecto es la voz del cliente. Los clientes proporcionan información en muchas formas distintas. Algunas de ellas son investigación de mercados, grupos de enfoque y personas conocedoras. Existen limitaciones para escuchar la voz del cliente:

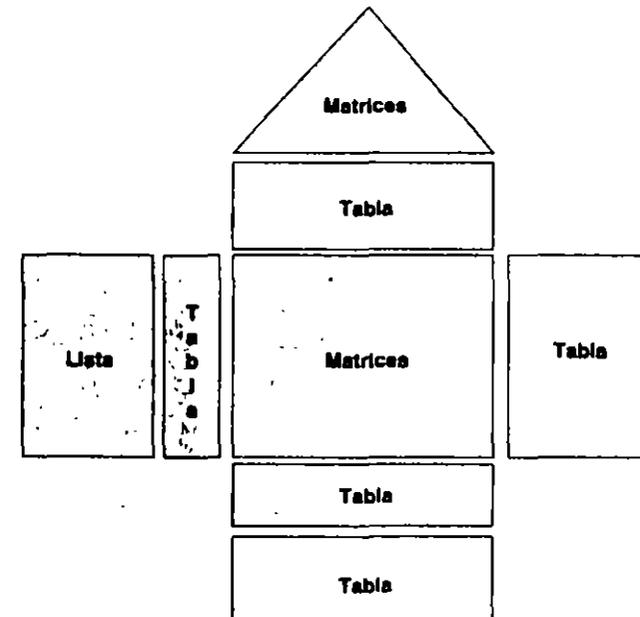
- No es posible escucharlos a todos
- No lo dicen todo
- No saben y desorientan a quien los escucha
- Cambian de opinión

El equipo
interdisciplinario
es muy importante

En este momento, es posible ver que "la forma usual de hacer negocios" puede soportar algunas mejoras. Existe un método -la principal herramienta de DFC, la Casa de la Calidad- que puede mejorar el procedimiento estándar de operación. Se le emplea en las etapas iniciales; el cliente es una parte muy importante del procedimiento. La siguiente discusión observa la Casa de la Calidad: cómo alcanza el objetivo de DFC, la satisfacción de los clientes por medio de un equipo interdisciplinario que traduzca las exigencias de los clientes en acciones relevantes de la empresa.

La casa de la calidad

La Casa de la Calidad



La Casa de la Calidad es un grupo de tablas, listas y matrices. Se le emplea para organizar el conocimiento de una empresa respecto a las exigencias de los clientes y características del producto. El resultado es una representación concisa y práctica. Este arreglo recuerda una casa y contiene diversas habitaciones que se describen con mayor detalle.

Puede asumir muchas formas, hacerlo ajustarse a las necesidades

La casa de la calidad

continuación

La Casa de la Calidad se desarrolla aplicando los siguientes pasos y por lo general según el orden siguiente:

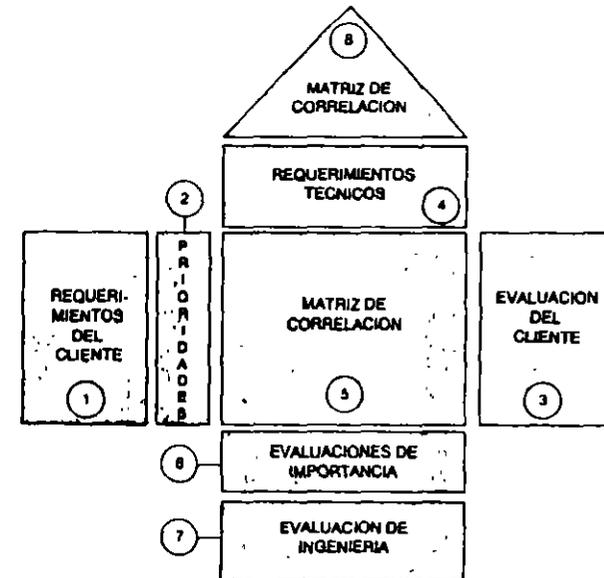
1. Requerimientos del cliente
2. Prioridades del cliente
3. Evaluación del cliente
4. Requerimientos técnicos
5. Matriz de relaciones
6. Evaluaciones de importancia
7. Evaluación de ingeniería
8. Matriz de correlación
9. Análisis

La casa de la calidad

continuación

En una Casa de la Calidad "sin adornos", a veces se omiten los pasos 3 y 7. Cuando se dispone de las evaluaciones, se deberán incluir. Más adelante en el curso se discutirán otras posibilidades.

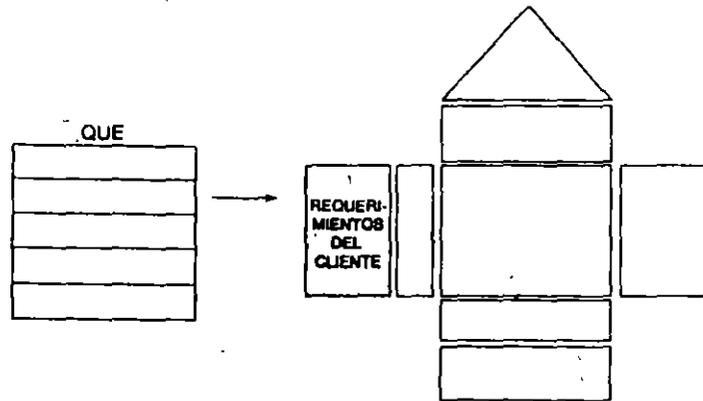
Hacer que la casa se ajuste a las necesidades



La casa de la calidad

continuación

Paso 1: Requerimientos del cliente



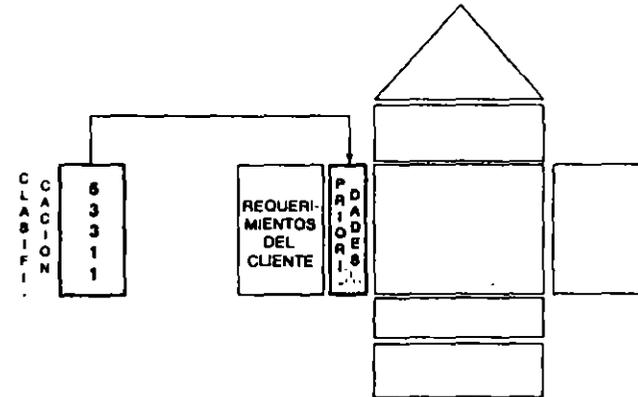
Acaso se requiera organizarlos

Los requerimientos de los clientes, a los que a veces se hace referencia como *QUÉ*, son el punto de partida para una actividad de DFC. Los requerimientos de los clientes y el mercado proceden de muchas fuentes distintas y emplean diferentes palabras. Será preciso organizarlos. Es posible emplear herramientas como el diagrama de afinidad (que se describe en el *Manual de las Nuevas Herramientas de Mejora Continua*) ayuda a organizar los requerimientos de los clientes.

La casa de la calidad

continuación

Paso 2: Prioridades de los Requerimientos de los Clientes



El paso 2 representa la determinación de prioridades de los clientes; algunos de ellos por lo general son más importantes que los otros. Es necesario identificar cuáles son los más importantes. Las mismas fuentes que proporcionaron los requerimientos de los clientes pueden ser de utilidad al determinar las prioridades.

Por lo general, se emplean escalas de 1 a 5 o de 1 a 10 para indicar las prioridades de los clientes; mientras mayor sea el número, lo será también la prioridad. La razón de ello se tornará evidente cuando se calculen las evaluaciones de importancia en el paso 6.

Mientras mayor, es mejor

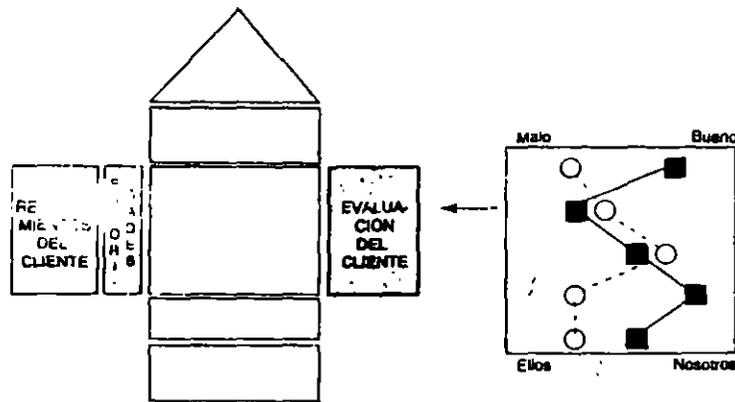
No se logra con facilidad pero es preciso hacerlo

El equipo interdisciplinario es muy importante en este punto

La casa de la calidad

continuación

Paso 3: Evaluaciones de los clientes



Benchmark

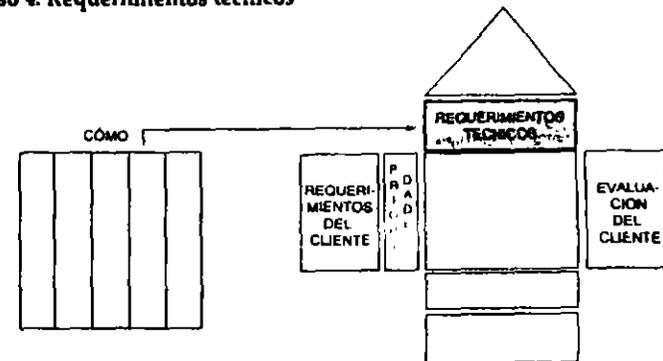
Opcional, pero importante

En el paso 3 se registran las evaluaciones de los clientes. Éstas permiten ver cómo consideran los clientes el desempeño respecto a los demás requerimientos. Es posible comparar más de un competidor u opción de diseño. La mejor situación se presenta cuando se es mejor que la competencia en los requerimientos más importantes para los clientes. Los lugares donde los clientes no están contentos con los esfuerzos de la empresa son blancos para actividades de mejoras trascendentales. Entre esta información se incluyen el benchmarking y las encuestas de mercado.

La casa de la calidad

continuación

Paso 4: Requerimientos técnicos



Los requerimientos técnicos, o *cómo*, se determinan en el paso 4. Los *cómo* indican la forma en que la empresa deberá satisfacer las exigencias de los clientes. Asimismo, los *cómo* se refieren a los requerimientos de diseño o de la empresa.

Siempre que sea posible, los *cómo* deberán describirse como cantidades medibles. En la gráfica se especifican unidades de medición y valores objetivo, además de establecer la dirección que significa la mejora (lo más pequeño es mejor, lo más grande lo es, o un valor nominal que es el objetivo). Por lo general se colocan estas direcciones bajo el título de requerimientos técnicos. Tal vez sea necesario refinar aquellos que no se han medido.

A veces es posible obtener los *cómo* por medio de un diagrama de causa y efecto para cada uno de los requerimientos del cliente. Comenzar con los más importantes. Al desarrollar los diagramas de causa y efecto, se encontrarán traslapes entre ellos. Éstos se convierten en la base de los requerimientos técnicos.

Unidades de medición

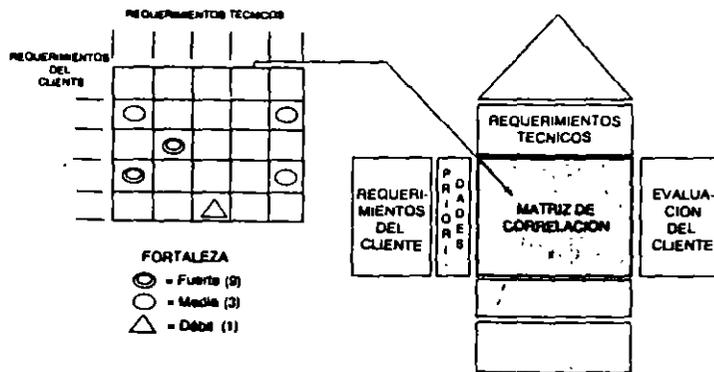
Figura 14.39
página de Taguchi

Muchas veces en lenguaje de ingeniería

La casa de la calidad

continuación

Paso 5: Matriz de relaciones



Muchas veces las decisiones difíciles se toman en los subequipos

En el paso 5, se registran las relaciones entre los requerimientos de los clientes y las exigencias de diseño en la matriz (o habitación central) de la Casa de la Calidad. En algunos casos, también se registra allí otro tipo de información. Las relaciones entre los *qué* y los *cómo* se describen por medio de símbolos. Algunos de los de uso más generalizado son:

- = Fuerte (9)
- = Media (3)
- △ = Débil (1)

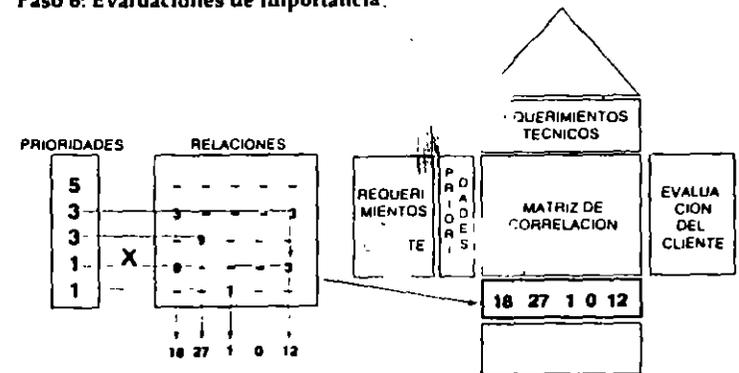
No se llenan todas las celdas; se requiere consenso

Por lo general, se llenan todas las celdas de una matriz. En particular, es preciso revisar las relaciones más fuertes. Asegurarse que el equipo está de acuerdo en ellas.

La casa de la calidad

continuación

Paso 6: Evaluaciones de importancia.



En el paso 6 se calculan las evaluaciones de importancia. Por ejemplo, es posible calcular las evaluaciones de importancia:

$$\text{EVALUACIÓN DE IMPORTANCIA} = \text{SUMA (Prioridades} \times \text{Relaciones)}$$

Las evaluaciones de importancia son 18, 27, 1, 0 y 12.

Se asignan altos valores a los requerimientos del cliente, de modo que las tecnologías que se asocian a ellos reciban puntuaciones elevadas. Cada requerimiento técnico recibe una evaluación de importancia.

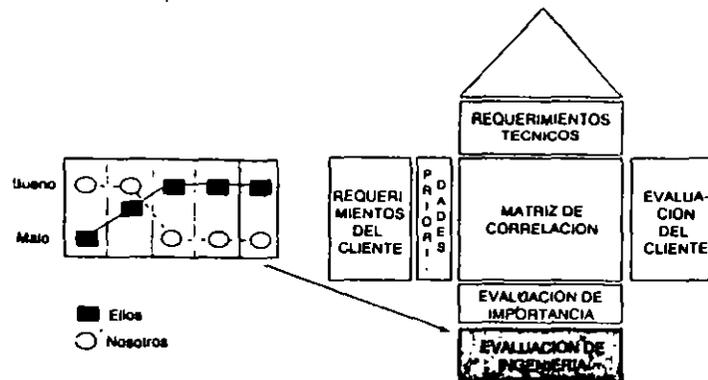
Las evaluaciones de mayor importancia muestran que la relación entre los requerimientos técnicos y la satisfacción del cliente es importante en un sentido global. En particular, se desearía optimizar este requerimiento técnico. Por otra parte, una evaluación baja de importancia indica que es preciso gastar los recursos en otros requerimientos técnicos de mayor importancia.

Dónde gastar el dinero de investigación y desarrollo

La casa de la calidad

continuación

Paso 7: Evaluación de ingeniería



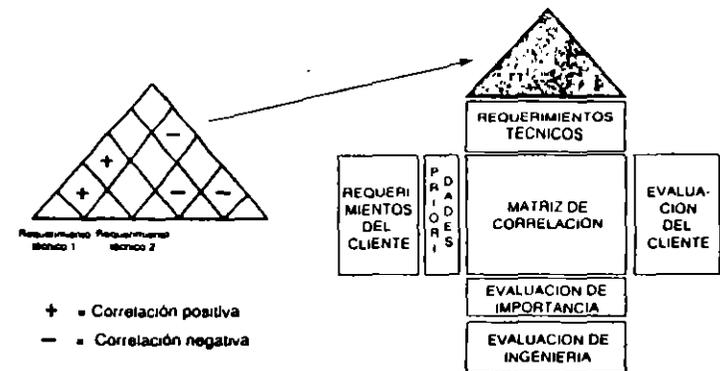
La evaluación de ingeniería es opcional, pero importante

El paso 7 es la evaluación de ingeniería. Aquí se escucha la voz del ingeniero. La evaluación es una comparación de los distintos competidores u opciones de diseño y de su capacidad para alcanzar los valores objetivo de los requerimientos técnicos. Tales valores objetivo y unidades de medición se determinaron en el paso 4 y se agregan directamente por encima de la gráfica de evaluación.

La casa de la calidad

continuación

Paso 8: Matriz de correlación



El paso 8 es la matriz de correlación. Ésta muestra las relaciones entre los distintos *cómo*. La matriz de esta sección es triangular y se parece al tejado de una casa. Es el agregar esta matriz lo que lleva al nombre de la Casa de la Calidad. Muchas veces se asignan categorías a las correlaciones: muy positivas, positivas, negativas y muy negativas.

Las correlaciones positivas se encuentran en las tecnologías que se refuerzan o respaldan entre sí. Un ejemplo podría ser una calculadora de mano. Mientras más grande sea, mayor será la pantalla.

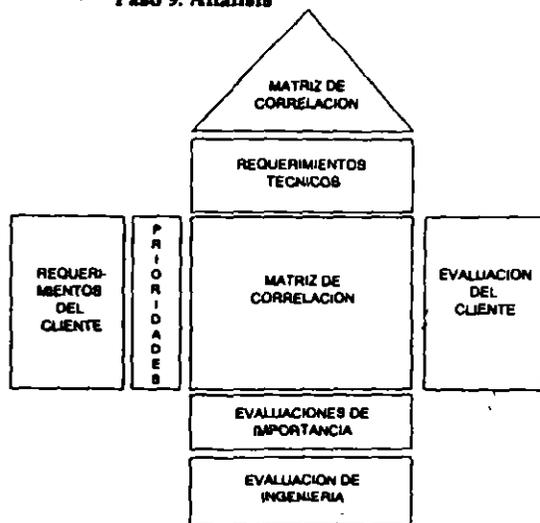
Las correlaciones negativas se encuentran en los requerimientos técnicos que están en conflicto entre sí. Una vez más, el ejemplo podría ser la calculadora de mano. Se desean muchas funciones, pero se desea leerlas en la carátula de la calculadora.

Consenso equipo interdisciplinario

La casa de la calidad

continuación

Paso 9: Análisis



Se utiliza la Casa de la Calidad para organizar la información y el conocimiento respecto a un proyecto: un bien o servicio. La Casa organiza la información en forma semi-gráfica. Las principales preguntas que responde son:

- ¿Qué desean los clientes y qué es lo que más valoran? (Pasos 1 y 2)
- ¿Cómo perciben los clientes las respuestas propias y de los competidores a los bienes y servicios? (Paso 3)
- ¿Cómo se diseñará a la larga el bien o servicio? (Pasos 4, 6, 7 y 8)
- ¿Cómo se enlazan los requerimientos técnicos con los deseos de los clientes? (paso 5)

La casa de la calidad

continuación

Cuando se conoce esta información, se posee la clave para la planeación y producción del bien o servicio. Se deberá verificar si este importante documento tiene sentido. Algunas cosas a buscar o preguntas a realizar son:

- ¿Se omitió alguna información importante?

Algunos ejemplos incluyen los riesgos, dificultades, tiempo, programa y costo de desarrollo de los requerimientos técnicos. Otras posibilidades incluyen la identificación de puntos de ventas, así como la de requerimientos implícitos, expresos o apasionantes.

- ¿Existe alguna hilera vacía (o casi)?

Si no se maneja un deseo importante del cliente por medio de requerimientos técnicos, entonces el cliente no quedará satisfecho. Se deberá tener especial cuidado con las características implícitas.

- ¿Existe alguna columna vacía (o casi)?

Si se cuenta con requerimientos técnicos que no se relacionan con algún deseo del cliente, es posible eliminarlo. Tal vez se desee continuar financiando el desarrollo de tales capacidades por medio de otras fuentes.

- ¿Son sensibles los valores calculados de importancia?

El cálculo de los valores de importancia es directo y mecánico. Los valores deberán validar la comprensión del equipo de los requerimientos técnicos importantes. Si un valor parece ser grande o pequeño, entonces se deberán mirar más de cerca los registros para asegurar que se garantiza la relación.

El equipo debe revisar la gráfica en su totalidad

Sugerencia:
Instalar observadores en la revisión y que no hayan participado para detectar si el equipo pasó por alto algo de lo obvio

La casa de la calidad

continuación

Hacer pronto

- *¿Se resolvieron las correlaciones negativas del tejado de la Casa de la Calidad?*

Si se requieren intercambios, entonces se deberán realizar en las primeras etapas del proyecto. Cuando se hacen más tarde, pueden provocar problemas serios.

- *¿Existen conflictos entre las evaluaciones de ingeniería y del cliente?*

Resolver pronto

Ocurre un conflicto cuando el cliente piensa que un competidor es mejor que el lector en un requerimiento importante, y el lector piensa que es mejor en un requerimiento técnico que se relaciona en forma muy estrecha con dicha exigencia. ¿Cómo resolver el conflicto? Tal vez se sea peor en muchos otros requerimientos técnicos en relación con la exigencia del cliente. Tal vez la información correspondiente sea defectuosa u obsoleta. Se trata de resolver el conflicto desde las primeras etapas.

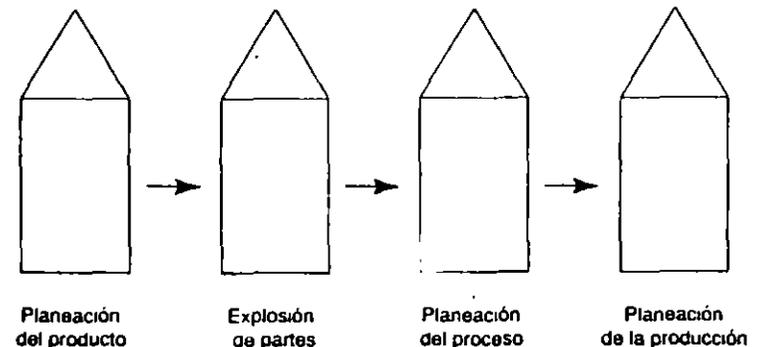
Extensiones a la casa de la calidad

Extensiones a la Casa de la Calidad

Dos posibles extensiones a la Casa de la Calidad son:

- *El enfoque de las cuatro fases*
 - Los *cómo* de la primera matriz se convierten en los *qué* de la segunda, etc.
- *El enfoque de matrices múltiples*
 - En cada matriz se emplean distintos enfoques, y es posible limitarla a un tipo de producto.

El Enfoque de las Cuatro Fases



En el enfoque de las cuatro fases, la Casa de la Calidad es la primera matriz de una serie que va de los requerimientos del cliente a la eventual producción. Muchas aplicaciones emplean sólo la Casa de la Calidad. Sin embargo, ésta proporciona sólo la planeación inicial del producto.

Extensiones a la casa de la calidad

continuación

En la primera fase, PLANEACIÓN DE PRODUCTO, se determinan las exigencias del cliente (*qué*) y los requerimientos técnicos (*cómo*) y se establecen las relaciones entre ambos. Asimismo se coloca otro tipo de información en la Casa de la Calidad: la gráfica de la fase de planeación de producto.

En la segunda fase, DESPLIEGUE DE PARTES, los requerimientos técnicos críticos de la Casa de la Calidad se convierten en los *qué* de una nueva matriz. Luego las características de parte que se requieren para alcanzar los requerimientos técnicos se convierten en los *cómo*. Se relacionan los *qué* y los *cómo* igual que antes. La matriz responde la pregunta ¿qué partes se requieren para satisfacer los requerimientos técnicos?

En la tercera fase, PLANEACIÓN DEL PROCESO, las características críticas de parte se convierten en los *qué* y las del proceso en los *cómo*. Se relacionan ambos entre sí en la misma forma que antes. La matriz responde a la pregunta, ¿qué procesos se requieren para producir las partes críticas? En particular, cuáles son los parámetros de los procesos que producen las partes críticas?

En la cuarta y última fase, PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN, se traducen los resultados de las primeras tres gráficas en acciones para la operación de producción.

Extensiones a la casa de la calidad

continuación

El enfoque de las cuatro fases proporciona una ruta estructurada desde el diseño inicial del producto hasta la eventual producción. Existe una continuidad inherente en el hecho de que los *cómo* de una fase se convierten en los *qué* de la siguiente. Muchas funciones participan en las fases de desarrollo del producto y el enfoque de cuatro fases de DFC proporciona oportunidades para que las operaciones subsiguientes participen en el proceso de desarrollo de producto.

Es de hacer notar que se sigue a los aspectos más críticos durante todo el proceso.

Sólo crítico

Extensiones a la casa de la calidad

continuación

El Enfoque de Matrices Múltiples

El enfoque de matrices múltiples es otra metodología de DFC. Carece de la estructura del enfoque de las cuatro fases, pero ofrece una mayor flexibilidad. Es posible elegir de 30 matrices o tablas diferentes y emplearlas en varias combinaciones. En la mayoría de los proyectos, se emplean sólo algunas gráficas.

GOAL/QPC agrupa las 30 matrices en varios conjuntos que reflejan diversos aspectos del proceso de desarrollo. Estos conjuntos son:

- Características de Calidad contra exigencias de los clientes, funciones del producto, etc.
- Funciones contra exigencias de los clientes, tabla de costos, etc.
- Mecanismos contra la nueva tecnología y funciones, etc.
- Modo de falla contra exigencias, funciones, etc. de los clientes
- Nuevos conceptos contra exigencias, funciones, etc. de los clientes
- Aspectos trascendentales de costos, gráficas diversas
- Gráficas de métodos de producción

La primera gráfica del grupo 1 (A-1) proporciona, en esencia, la misma información que la Casa de la Calidad. Se le emplea, así como a otras gráficas, para analizar las exigencias de los clientes. Es posible identificar partes críticas u objetivos de costo de los conjuntos con otras combinaciones de matrices y tablas.

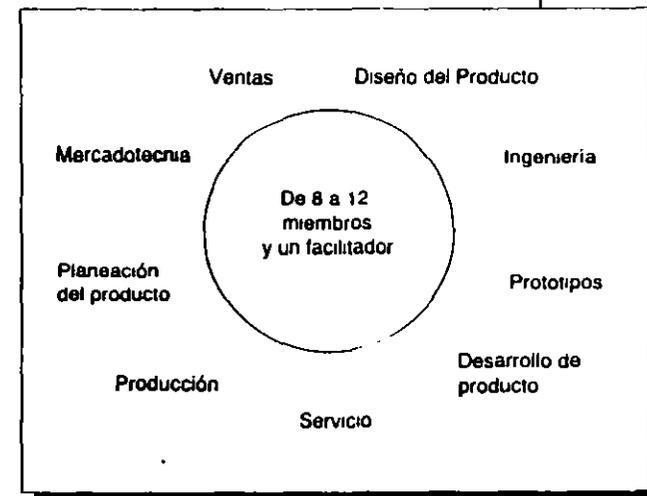
El enfoque de matrices múltiples posee la ventaja de que es posible emplear diversos métodos para distintos tipos de bienes o servicios. El enfoque de cuatro fases parece ser un poco más limitado en los productos y servicios que podría tener éxito.

Diversos enfoques disponibles

Extensiones a la casa de la calidad

continuación

¿Qué se Requiere para DFC?



Como miembros de equipo, se requiere al menos a una persona que conozca el proceso DFC. Ésta, o éstas, deberá haber asistido a un curso a profundidad y concluido al menos un proyecto exitoso de DFC. Podrá guiar al equipo a través de los puntos difíciles.

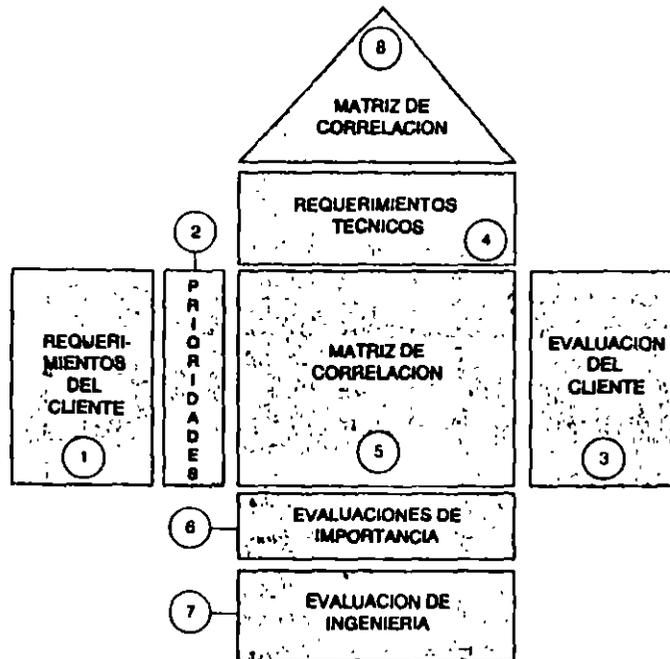
Otros miembros del equipo requieren sólo un conocimiento superficial del funcionamiento de DFC, como el taller *Descripción del Despliegue de Funciones de Calidad* de CCI. Estos miembros deberán proceder de las áreas importantes del proyecto para que el equipo sea completamente interdisciplinario.

Se recomienda en forma particular la capacitación en trabajo en equipo, porque DFC es una actividad de equipo.

Extensiones a la casa de la calidad

continuación

¿Qué se Posee al Concluir?



Se crea la Casa completa, en su forma gráfica, con una tremenda cantidad de información, relaciones y evaluaciones, con base en un equipo interdisciplinario en el que la Voz del Cliente se encuentre bien incorporada. Compartir esta información: puede ser de utilidad en otro proyecto

Resumen

Resumen

Resumen

DFC es un enfoque sistemático para el diseño y desarrollo de productos

- Interdisciplinario
- Requerimientos del cliente
- Acciones de la empresa
- Satisfacción del cliente

La Casa de la Calidad es una importante herramienta

- Enfoque matricial
- Los *qué*, requerimientos de los clientes
- Los *cómo*, acciones de la empresa
- Es desarrollado por un equipo interdisciplinario

Resumen

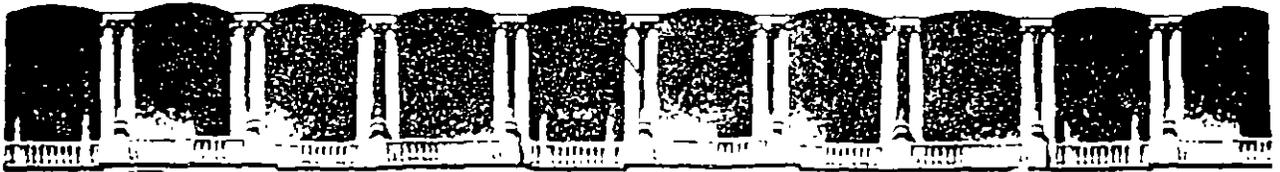
continuación

DFC es una herramienta que proporciona un enfoque sistemático al diseño y desarrollo de productos.

Para efectuar el DFC, es preciso un equipo interdisciplinario que provenga de todas las áreas importantes. Los miembros del mismo deben comprender los requerimientos de los clientes y llevar a cabo acciones que garanticen la satisfacción del cliente.

La Casa de la Calidad es la herramienta que transforma un requerimiento del cliente (*qué*) en acciones de la empresa (*cómo*). Esto se logra en un formato de matriz desarrollado por un equipo interdisciplinario, que represente a todas las áreas afectadas por los requerimientos del cliente o acciones de la empresa.

Para mayor información sobre este tema puede consultar el libro: "DFC Despliegue de la Función de Calidad" de William E. Eureka y Nancy E. Ryan. Publicado por Panorama Editorial. México, D.F.



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

DIPLOMADO EN INGENIERIA DE PRODUCCION

MODULO V

ANALISIS Y CONTROL DE CALIDAD

TEMA

**ESTRATEGIAS EXPERIMENTALES Y DISEÑOS
FACTORIALES**

**EXPOSITOR : DRA. TERESA LOPEZ
ALVAREZ**

Estrategias experimentales y diseños factoriales

2

2.1 Experimentos comparativos

En la parte final del Capítulo 1 se indicó que, aunque no es posible garantizar que la señal ($Y-\mu$) sea insesgada, haciendo uso del principio de aleatorización en experimentos comparativos es posible eliminar dicho sesgo.

A manera de ilustración, considere el siguiente problema. Un fabricante de cortadoras de césped (podadoras) tiene problemas con la velocidad de la transmisión de las mismas. El rendimiento disminuye cuando se tiene mucha carga, por lo que, el ingeniero de producción decidió hacer algunas pruebas de la banda principal para investigar si la forma de la sección transversal de ella tiene algún efecto en la relación velocidad-carga. Se probaron dos tipos de banda, A y B. Las mediciones se realizaron con un dinamómetro, tomándose cuatro muestras de cada una de las bandas.

Las cargas máximas obtenidas en las ocho pruebas que produjeron incrementos en los rendimientos fueron las siguientes:

<u>A</u>	<u>B</u>
547	583
563	548
495	591
<u>537</u>	<u>567</u>
$\bar{Y}_A = 535.5$	$\bar{Y}_B = 572.25$
$S_A = 29.0$	$S_B = 19.0$

Corte transversal de la banda y tipo

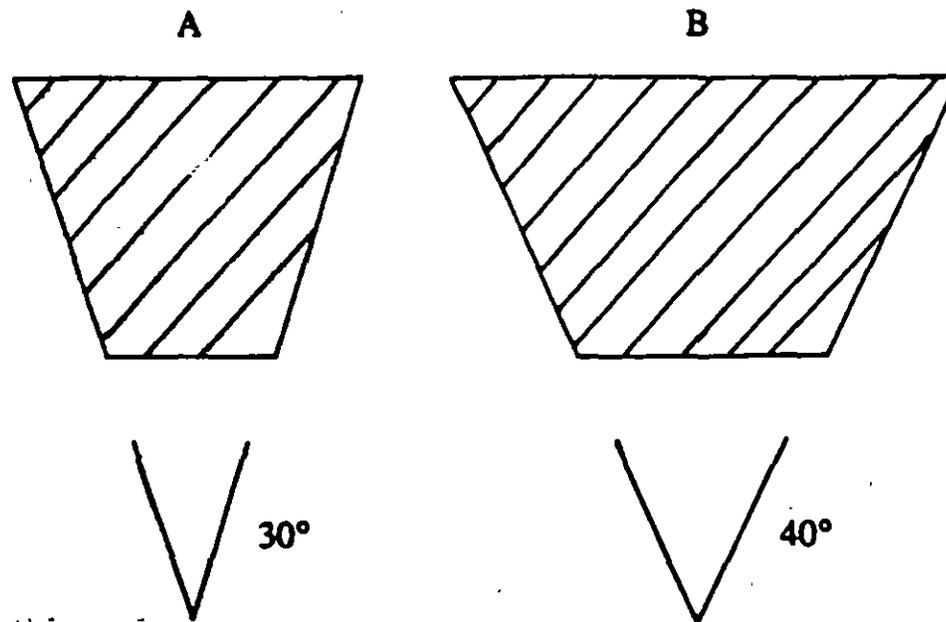


Figura 2.1-1: Forma de la sección transversal de las bandas, tipo A y B

Con toda seguridad el ingeniero tendrá interés en determinar la diferencia entre las cargas máximas promedio al usar bandas tipo A y tipo B.

Si durante el periodo de prueba, los dos tipos de banda fueran asignadas aleatoriamente a las ocho podadoras y las mediciones con el dinamómetro fueran tomadas al azar (esto es evitando medir todas las bandas de tipo A primero o viceversa), la diferencia entre ambas muestras $\bar{Y}_A - \bar{Y}_B$ será un estimador insesgado de la diferencia en sus medias poblacionales $\mu_A - \mu_B$. Esto es válido, aun en el caso de que los estimadores individuales \bar{Y}_A e \bar{Y}_B estén sesgados por el tipo de podadora y el tipo de banda usada. Además, a medida que la podadora y el dinamómetro se calientan y el operador se familiariza con el procedimiento, es posible que se obtengan diferencias en las cargas máximas registradas. Pero el uso de la aleatorización permitirá que el efecto de estas diferencias se compense, evitando, de esta manera, sesgos en el estimador $\bar{Y}_A - \bar{Y}_B$.

2.1.1 Aleatorización

En la Sección 1.5.1 se explicó el procedimiento para seleccionar números aleatorios. Asimismo, se indicó que se deben usar tablas (ver tabla A-1). En el ejemplo anterior se escogerían números entre 1 y 8, los primeros cuatro de estos valores representarían las podadoras a las que se les instalarán bandas del tipo A, los restantes utilizarán el otro tipo.

De esta manera, se evitarán sesgos provocados por calentamiento o el aprendizaje del operador, etcétera.

2.1.2 Razón señal/ruido (*Signal-to-noise-ratio*)

Después de haber recopilado los datos (usando el principio de aleatorización), el estadístico t nos permitirá determinar si la diferencia entre las dos poblaciones es significativa. En este caso, el numerador (la señal) es la diferencia entre las medias muestrales, $\bar{Y}_A - \bar{Y}_B$. Observe que en el denominador es necesario estimar dos varianzas. La varianza se calcula como un promedio ponderado de las varianzas estimadas de cada población (ver fórmula 2.1.2-1).

$$s_p^2 = \frac{(n_A - 1)s_A^2 + (n_B - 1)s_B^2}{n_A + n_B - 2} \quad (2.1.2-1)$$

Aquí

n_A es el número de observaciones en la muestra A,

n_B es el número de observaciones en la muestra B,

s_A^2 es la varianza muestral de A,

s_B^2 es la varianza muestral de B,

s_p^2 es la varianza muestral combinada.

El denominador de t es

$$s_d = \sqrt{s_p^2 \left(\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B} \right)} \quad (2.1.2-2)$$

donde s_d identifica el error estándar de la diferencia $\bar{Y}_A - \bar{Y}_B$. Por lo tanto, el valor de t es

$$t_{n_A + n_B - 2} = \frac{\bar{Y}_A - \bar{Y}_B}{s_d} \quad (2.1.2-3)$$

el cual se compara a los valores críticos de $t(t^*)$ en la tabla A-5, con $n_A + n_B - 2$ grados de libertad. Trabajando con los datos de la tabla 2.1-1,

$$s_p^2 = \frac{3(29)^2 + 3(19)^2}{6} = 601$$

y

$$t = \frac{535.5 - 572.25}{\sqrt{601\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4}\right)}} = \frac{-36.75}{17.335} = -2.12$$

Este valor es mayor que el valor de tablas con 90 por ciento de confianza y 6 grados de libertad (1.943), pero menor a los valores correspondientes al 95 por ciento o 99 por ciento de confianza (2.447, 3.707). Con base en estos resultados se puede concluir con un 90 por ciento de confiabilidad, que el rendimiento de las podadoras con bandas tipo A es diferente de las que utilizan el tipo B. Por otra parte, no se tiene suficiente evidencia para concluir lo mismo al 95 por ciento o 99 por ciento de confiabilidad.

En la vida real es difícil encontrar dos cosas que sean idénticas. Si en un experimento del tipo descrito en esta sección, la razón señal/ruido (el valor de t) no es suficientemente grande para detectar diferencias entre las medias al 90 por ciento de confiabilidad, aun así es seguro que existirán diferencias entre ellas. Por lo tanto, si el valor de t es menor, en términos absolutos, al valor de t^* , la conclusión debe expresarse como: *No existe suficiente evidencia para probar que las medias son diferentes*, en lugar de *No existe diferencia entre las medias*.

2.1.3 Significancia estadística contra significancia práctica

Estos dos términos tienen significados diferentes. En general, decimos que la diferencia entre las medias muestrales $\bar{Y}_A - \bar{Y}_B$ es *estadísticamente significativa* si su valor es muy grande con respecto a la desviación estándar combinada s_d . Por otra parte, la señal es *prácticamente significativa* cuando el valor $\bar{Y}_A - \bar{Y}_B$ es suficientemente grande para producir beneficios económicos o en la operación del proceso a largo plazo. En algunos casos, se pueden tener diferencias, cuyas magnitudes no tienen ninguna importancia práctica o económica. También puede ocurrir que en dos poblaciones existan diferencias de tipo práctico, que no sea factible distinguir estadísticamente, debido a que el número de observaciones analizadas es pequeño. Finalmente, se encontrarán estudios en los que se detectará significancia estadística pero no práctica. En la Sección 2.9 se recomendará el tamaño de muestra a usar (número de observaciones) o cuántos experimentos realizar, para lograr que ambos tipos de significancia coincidan.

2.1.4 Comparación de varianza entre dos poblaciones

Existen experimentos en los que el interés principal es comparar varianzas en lugar de medias. En el ejemplo de la Sección 1.6.1.2, el ingeniero deseaba reducir la variabilidad

en el ensamblado; en dicho caso se conocía el valor de σ . Cuando se presenta la situación opuesta, los datos se pueden recopilar de dos maneras: a) usando el algoritmo que propuso el ingeniero, y b) no usándolo. El robot se programaría de tal manera que el algoritmo se pueda utilizar como uno quiera, además se decidirá en forma aleatoria (por ejemplo, con el lanzamiento de una moneda) cuándo usarlo. Esto evitará sesgos en la comparación provocados por causas diferentes a la supuesta (repetibilidad del robot), como la orientación del motor del cohete.

Los resultados de este experimento se presentan en la tabla 2.1.4-1. Las varianzas muestrales se calculan para cada grupo. La señal (o información) en este caso es la razón de dos varianzas muestrales $s_1^2/s_2^2 = 6.584/1.473 = 4.47$. Este valor se compara a la razón entre las varianzas hipotéticas, en este caso 1 (como en la mayoría de los casos).

Experimentos comparativos	
Errores en la instalación	
Sin Compensación	Con Compensación
-2.714	.948
-.632	.971
3.245	-.002
1.643	-1.516
-2.741	-2.237
.342	-1.342
1.213	-.178
-4.472	.587
<u>1.783</u>	<u>.919</u>

Tabla 2.1.4-1: Resultados del experimento de ensamble

$$S_1^2 = 6.584$$

$$S_2^2 = 1.473$$

$$F_{.05} = 6.584/1.473 = 4.47$$

El cociente de las varianzas muestrales s_1^2/s_2^2 es mayor que 1, lo cual significa que el algoritmo está funcionando adecuadamente. Con el fin de investigar si esta relación es significativa, su valor se debe comparar con la distribución de F (ver tabla A-6). Ésta es sesgada, al igual que la distribución Ji-cuadrada. Dicha distribución está indexada por dos parámetros, los grados de libertad del numerador $\nu_1 = n_1 - 1$ y los grados de libertad del denominador $\nu_2 = n_2 - 1$. Los valores de la tabla A-6 representan el .05 del área bajo la cola superior. En el ejemplo mencionado, $\nu_1 = 9 - 1 = 8$, $\nu_2 = 9 - 1 = 8$ y el valor tabulado de F es 3.44. Puesto que $s_1^2/s_2^2 = 4.47 > 3.44$ podemos concluir que el algoritmo ayuda a disminuir la variabilidad, con una confiabilidad superior al 95 por ciento.

Cuando se estén comparando cocientes de varianzas, se recomienda que la varianza más grande se coloque en el numerador, debido a la forma en que se construyó la tabla (esto es únicamente contiene el 95 por ciento de la cola superior).

2.1.5 Investigación industrial

En el capítulo anterior se explicó la interacción de la estadística con el método científico. También en la Sección 1.6 se demostró que el uso de técnicas estadísticas es útil para investigar si los resultados muestrales apoyan o contradicen una determinada teoría o hipótesis. Hasta este momento, las hipótesis que se han probado involucran medias o varianzas (Secciones 1.5, 1.6, 2.1). Asimismo, se ha indicado que los métodos estadísticos permiten decidir qué datos recopilar y cómo hacerlo. Una de las aplicaciones de este tipo de herramientas consiste en encontrar soluciones empíricas en investigación industrial o problemas del mismo tipo.

En las investigaciones industriales, normalmente, el objetivo o el resultado depende de varios factores interrelacionados, esto no es tan simple como se explicó en la Sección 2.1. Las soluciones a este tipo de problemas pueden clasificarse de la siguiente manera: a) soluciones obtenidas usando teorías o datos conocidos; b) soluciones por experiencia con problemas similares, o c) uso de ensayo y error, o experimentación. En este último caso, la aplicación de métodos estadísticos y diseños experimentales es más efectivo y eficiente que las formas tradicionales que se usan en la industria.

Las estrategias de experimentación que se usan en investigaciones industriales no son muy eficientes. Una de estas técnicas, es lo que se conoce como *uno-a-la-vez* que consiste en tratar de encontrar soluciones variando un factor manteniendo los otros constantes, repitiendo el proceso para cada uno de ellos. La aplicación de esta estrategia requiere mucho tiempo y las soluciones que se obtienen no son óptimas; aun así es mejor que la otra estrategia usada comúnmente en investigación industrial (*sheer guesswork*: adivinando). En este caso, el investigador supone que conoce cuál es la solución del problema y con base en ello lleva a cabo un número pequeño de experimentos para validarla. Si los resultados obtenidos difieren de lo que supuso, hace otras adivinanzas (suposiciones), ejecuta otros experimentos confirmatorios y así sucesivamente. De manera general, el tipo de estrategias que tradicionalmente se emplean en investigaciones industriales al comparar varios factores simultáneamente acaba con el presupuesto asignado, antes de encontrar soluciones satisfactorias. Esto provoca procesos de producción ineficientes, diseños no-óptimos del producto y el abandono de ideas brillantes.

Las técnicas de diseños experimentales industriales presentadas en este libro, tienen como objetivo estudiar el efecto de varios factores simultáneamente de manera eficiente, asegurándose de que las conclusiones sean correctas. El resto del capítulo se dedicará al estudio de los diseños factoriales con dos niveles.

2.2 Estrategias de experimentación con varios factores

Los resultados de un experimento están influenciados por diversos factores; el efecto que uno de ellos tiene, varía en función de los valores de los otros. Este tipo de situaciones da lugar a resultados confusos en el experimento. Debido a esta situación es necesario disponer de planes de estudio que permitan controlar este tipo de situaciones, asegurándose que los datos se pueden analizar estadísticamente. En esta sección se explican los antecedentes y filosofía de los diseños experimentales, así como el método para llevar a cabo arreglos factoriales de experimentos.

2.2.1 Definiciones

Antes de presentar la estrategia de experimentación factorial es importante estar seguros de que empleamos los mismos términos, por lo que daremos las definiciones que más comúnmente se utilizarán.

1. **Experimento (corrida).** En el sentido en que se trabajará en este libro, un experimento es una acción en la que el experimentador cambia *al menos uno* de los factores que está estudiando, observando el efecto del cambio. A manera de comentario se debe señalar que la recopilación pasiva de datos históricos no es experimentación.
2. **Unidad experimental.** Es el elemento que se está estudiando. En un experimento químico pudieran ser los lotes de material que se obtienen bajo diferentes condiciones. En un experimento mecánico, pueden ser los prototipos.
3. **Variable independiente (Factor, X).** Un factor es una de las variables bajo estudio, la cual se mantiene, deliberadamente, bajo control durante el experimento y se modifica de manera sistemática para investigar su efecto en los resultados.
4. **Variables no controlables (o latentes).** En ocasiones existen variables que el experimentador desconoce o que no se pueden controlar, las cuales pueden influenciar los resultados del experimento. Dichas variables se denominan no-controlables o latentes. Sus efectos se pueden "neutralizar" al usar aleatorización y/o bloques en el diseño experimental.
5. **Variable dependiente (Resultado, Y).** En el desarrollo de cada experimento se miden las características de las unidades experimentales, las cuales constituyen los resultados (o respuestas) y sus valores dependen de la variable independiente.

6. *Diseño experimental* (Arreglo experimental). Es el conjunto de experimentos que se va a ejecutar y también se le puede llamar estrategia experimental.
7. *Error experimental*. La diferencia entre el valor observado y el valor verdadero de la variable dependiente Y, para valores específicos de X, es lo que se conoce como error experimental. Debido a la variabilidad en los experimentos, este tipo de error siempre está presente. Sin embargo, debe enfatizarse que esto no significa que haya sido producido por el investigador. El error experimental puede clasificarse como: sesgo y error aleatorio. El sesgo tiende a permanecer constante a lo largo del experimento, mientras que el error aleatorio cambia de experimento a experimento y su valor promedio es cero. La forma de evitar errores de sesgo es *aleatorizando* el orden de los experimentos y usando bloques; en el otro caso (errores aleatorios) el problema se resuelve con *repeticiones* del experimento.

2.2.1.1 Ejemplo

FACTORES		VARIABLE DEPENDIENTE
Tiempo Minutos	Temperatura en grados C	Rendimiento, %
75	220	61.3
150	220	75.4
300	220	81.3
60	230	71.6
120	230	79.6
240	230	86.4
45	240	77.2
90	240	85.3
180	240	87.4

DISEÑO

EXPERIMENTO

En este ejemplo se trata de determinar el efecto de dos factores (tiempo y temperatura) en el *rendimiento* de una reacción química ($A + B \rightarrow P$), para lo cual se tienen nueve observaciones. Un *experimento* consiste en dejar que la reacción se lleve a cabo durante un periodo de tiempo determinado, a una temperatura fija y medir el rendimiento del mismo. En este caso, el *diseño* es el conjunto de todos los experimentos que se llevaron a cabo.

2.2.2 Requisitos de un buen diseño

Antes de proceder a explicar el diseño anterior (el cual se puede considerar un buen diseño y es uno de los que más frecuentemente se aplican) es necesario aclarar el significado de un *buen diseño*, en otras palabras, qué esperamos de un diseño experimental ideal. A continuación se indican algunas de las características que debe tener un buen diseño.

1. **Objetivos definidos.** Es responsabilidad del investigador definir claramente sus objetivos antes de proceder con el experimento y escoger el diseño que va a utilizar. Asimismo, debe indicar qué información se obtendrá, así como la magnitud en la diferencia de medias que debe considerarse (con respecto al error experimental σ).
2. **Efectos no confundidos.** Los efectos de cada factor involucrado en el experimento no deben estar confundidos con otras variables. Este problema se puede controlar utilizando un diseño apropiado.
3. **Insesgado.** Los resultados no deben tener ningún sesgo (provocado de manera consciente o inconsciente). Esto se puede regular revisando cuidadosamente el lugar en que se planea ejecutar el experimento, así como el procedimiento que se intenta emplear. Adicionalmente, existen algunas técnicas estadísticas útiles para enfrentar este tipo de situaciones:
 - a) El uso de *bloques* de experimentos permitirá considerar algunas variables latentes.
 - b) La *aleatorización* dentro de cada bloque minimizará la confusión de los factores con las variables latentes.
 - c) El uso de aleatorización será más efectivo si se emplean *repeticiones*.
4. **Precisión estimada.** El diseño debe permitir estimar la precisión de los resultados, de tal manera que se pueda determinar si los efectos de los factores son reales o producidos por "errores" en los datos. Este requerimiento no es necesario cuando se tienen datos históricos del proceso, con estimaciones de la desviación estándar σ obtenidos en estudios de capacidad del proceso. El uso de repeticiones permite estimar la precisión y su validez es apoyada por el empleo de aleatorización.
5. **Precisión del diseño.** La precisión del programa experimental debe ser suficiente para satisfacer los objetivos del mismo. En otras palabras, se deben recopilar un número adecuado de datos, de tal manera que si se detecta significancia práctica de efectos esto se reflejará en su significancia estadística. Conviene mencionar que al utilizar bloques y/o un diseño más refinado es posible incrementar la precisión. Sin embargo, el uso de repeticiones es más efectivo.

2.2.3 Diagnóstico de las condiciones experimentales

No existe un diseño experimental que se pueda considerar "el mejor" en todas las circunstancias. El mejor diseño dependerá de las condiciones en que se desarrolle el experimento.¹ En la figura 2.2.3-1 se muestran los diferentes tipos de condiciones que dan origen a los diseños de experimentos que se presentan en este libro.

		Estado actual	-----		Meta
		X			X
		0%	Conocimiento		100%
Objetivo	=	Diagnóstico	Superficie de respuesta restringido	Superficie de respuestas	Modelos mecanísticos
Número de factores	=	6-26 (continuos y/o discretos)	2-6 (continuos y/o discretos)	2-6 (continuo)	1-5
Información	=	Identifica variables relevantes	Efectos lineales e interacciones: usado para interpolación	Efectos lineales, interacciones y curvatura: usado para interpolación	Estima parámetros en el modelo teórico; bueno para extrapolación e interpretación
Diseños	=	Factorial fraccional con 2 niveles (o Placket-Burman)	Factorial con 2 niveles (+ puntos centrales)	Central compuesto (o Box-Behnken)	Único (diseñado por computadora)

Figura 2.2.3-1: El objetivo de la experimentación es incrementar nuestro conocimiento

Las características más importantes que influyen en la determinación de las condiciones experimentales son:

1. **¿Cuántos factores?** Ésta es la más importante ya que nos permitirá conocer cuántas variables independientes se estudiarán. La selección del mejor diseño no es complicado si el número de variables independientes es pequeño (tres o menos). Cuando se tienen más de tres de estas variables, es conveniente proceder por etapas, identificando las variables que más influyen en los resultados.
2. **Costo de un experimento.** La magnitud del programa experimental se basa en la relación costo de un experimento contra beneficios esperados. A manera de comentario, entre más barato es el experimento, el estudio integral de los efectos de variables independientes podrá lograrse a un costo razonable.
3. **Precisión.** Uno de los objetivos de la experimentación es predecir el comportamiento de la variable dependiente bajo similares condiciones. Por ejemplo, cuando se estudia el efecto del pH en una reacción química, lo que se pretende es poder afirmar que el rendimiento será 4 por ciento superior con un pH de 9 que con uno de

7. Por otra parte, conviene señalar que si se desea incrementar la precisión y los datos individuales no son muy exactos, se debe aumentar el número de experimentos.
4. *Información a priori (preliminar)*. La información preliminar de que se disponga influirá en el programa experimental a desarrollar, ya que si el área a estudiar es nueva con seguridad existirán un gran número de posibles variables influenciando en los resultados. Sin embargo, si el área ya ha sido estudiada previamente es más fácil decidir las variables a analizar. Si se conoce su comportamiento teórico es recomendable emplear un modelo mecanístico y llevar a cabo experimentos que permitan estimar los parámetros del mismo. Generalmente, los mejores experimentos son válidos en un modelo particular, pero a menudo los diseños utilizados en modelos empíricos representan soluciones iniciales aceptables de un problema.
5. *Iteraciones*. Cuando la duración del experimento es corta, se sugiere que se ejecute en partes, asegurándose que se acerque a la meta propuesta. En experimentos de larga duración (por ejemplo, en pruebas de estabilidad) es necesario emplear diversos tipos de diseños. Cuando es factible iterar, la *etapa inicial* del programa experimental, ésta debe consistir de experimentos de diagnóstico (*screening experiments*). Aquí se analizarán todos los factores que se consideren importantes. Puesto que el costo de estudiar cinco o diez variables adicionales es, en este tipo de diseño, reducido, se recomienda examinar algunas variables extras en esta etapa, para no descubrir posteriormente que se han ignorado variables que son relevantes. En la *siguiente etapa* se utilizan diseños de superficie de respuesta restringidos en los que se investigan las interacciones entre las variables más significativas y se obtienen las mejores estimaciones de sus efectos lineales. Al concluir la primera etapa se eliminan las variables menos influyentes. Finalmente, en caso de ser necesario, la existencia de efectos no-lineales (curvatura) se puede estudiar mediante el uso de un diseño completo de superficies de respuesta.

Generalmente, los diseños de superficie de respuesta restringidos se basan en los resultados de los diseños de diagnóstico y el diseño completo de superficie de respuesta se apoya en la información obtenida en el primero de ellos, esto es, la manera en que se interrelacionan estas etapas garantizan que no se "pierdan" datos al pasar de una etapa a la siguiente.

Si se requiere mejorar lo alcanzado hasta esta etapa y usar modelos teóricos, el resultado de la última etapa se puede utilizar como punto de partida en la estimación de los parámetros del modelo. Este tipo de experimentos debe diseñarse por computadora. Este tópico no se discutirá nuevamente en el libro.

2.3 Experimentación tradicional contra experimentación estadística

Antes de proceder a explicar detalladamente los diferentes tipos de diseños experimentales, se hará una comparación entre las suposiciones de este tipo de diseño y el diseño

“uno-a-la-vez”, el cual es uno de los típicamente usados en experimentación no-estadística o tradicional.

2.3.1 Método de experimentación tradicional

La experimentación tradicional o “uno-a-la-vez” consiste en mantener constantes los valores de todos los factores excepto uno de ellos, siendo éste el que se analiza. Este método es sencillo y permite representar sus resultados gráficamente. La utilización del mismo es una buena alternativa cuando se presentan circunstancias fuera de lo común, como las siguientes:

- a) El resultado es una función compleja del factor X (quizá multi-modal) lo cual hace necesario emplear varios niveles del mismo para poder interpretar su efecto.
- b) Los efectos son aditivos y no existen interacciones, esto es, el efecto de un factor no está influenciado por los niveles de los otros factores.

2.3.2 Método de experimentación estadística

En este caso se supone lo siguiente:

- a) En la región experimental la variable dependiente posiblemente tenga un poco de curvatura pero no puntos de inflexión.
- b) El efecto de uno de los factores puede depender del nivel de alguno de los otros.

Si estas suposiciones se satisfacen, los resultados que se obtienen al usar el método tradicional son imprecisos. El mejor resultado que se puede obtener con el primer método, es la misma precisión que el otro método (estadístico) cuando se incrementa el número de experimentos. Por otro lado, lo peor que puede ocurrir al aplicar este método (tradicional) es que las conclusiones sean erróneas. Para ilustrar esto, nos referiremos al ejemplo 2.2.1.7. Al analizar el efecto de tiempo y temperatura en el rendimiento a través del método tradicional (uno-a-la-vez) se observa que el mejor rendimiento es 86 por ciento (ver figura 2.3-1), el cual está muy por debajo del verdadero valor óptimo. Conviene enfatizar que los diseños factoriales no producirán resultados erróneos. Por otra parte, al aplicar la estrategia uno-a-la-vez para resolver problemas reales, es más factible que sus soluciones sean equivocadas, lo cual se complica aún más debido a errores experimentales.

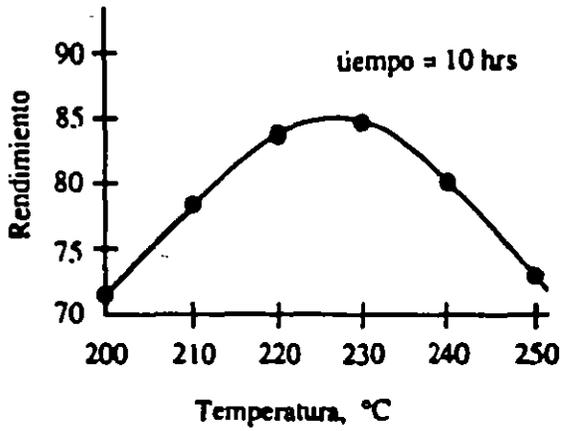


Figura 2.3-1 (a): Efecto de temperatura en el rendimiento usando experimentación tradicional

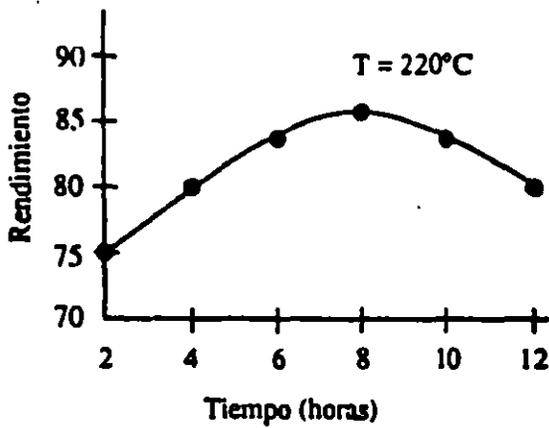


Figura 2.3-1 (b): Efecto de tiempo en el rendimiento

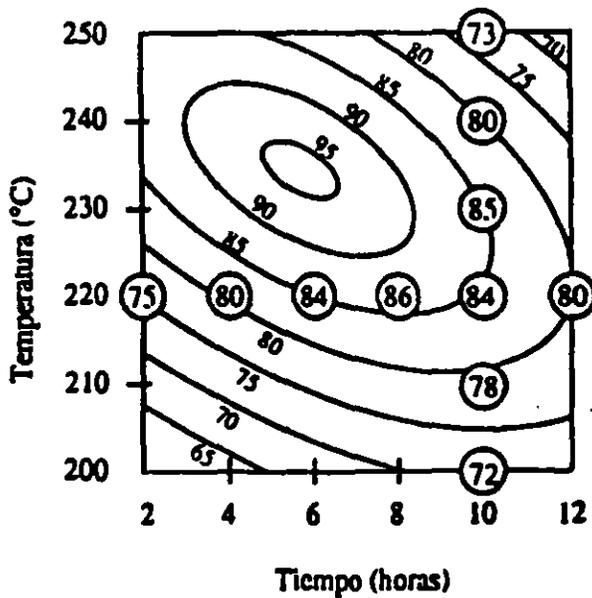


Figura 2.3-1 (c): Efecto combinado de tiempo y temperatura

2.4 Geometría de un diseño factorial con dos niveles

El diseño estadístico denominado *diseño factorial con dos niveles* constituye la parte medular de todas las estrategias experimentales que se presentarán en este libro. En general, un diseño factorial (el cual es un diseño o arreglo de tratamientos) consiste de todas las combinaciones de los niveles de dos o más factores. Un factorial con *dos niveles*, como su nombre lo indica, tiene dos niveles para cada una de las variables que se están estudiando y los experimentos se obtienen de todas las combinaciones posibles de esos niveles para cada factor. La representación geométrica de un diseño con dos factores, el cual se designa como 2^2 , se observa en la figura 2.4-1. El diseño con tres factores (2^3) se presenta en la figura 2.4-2.

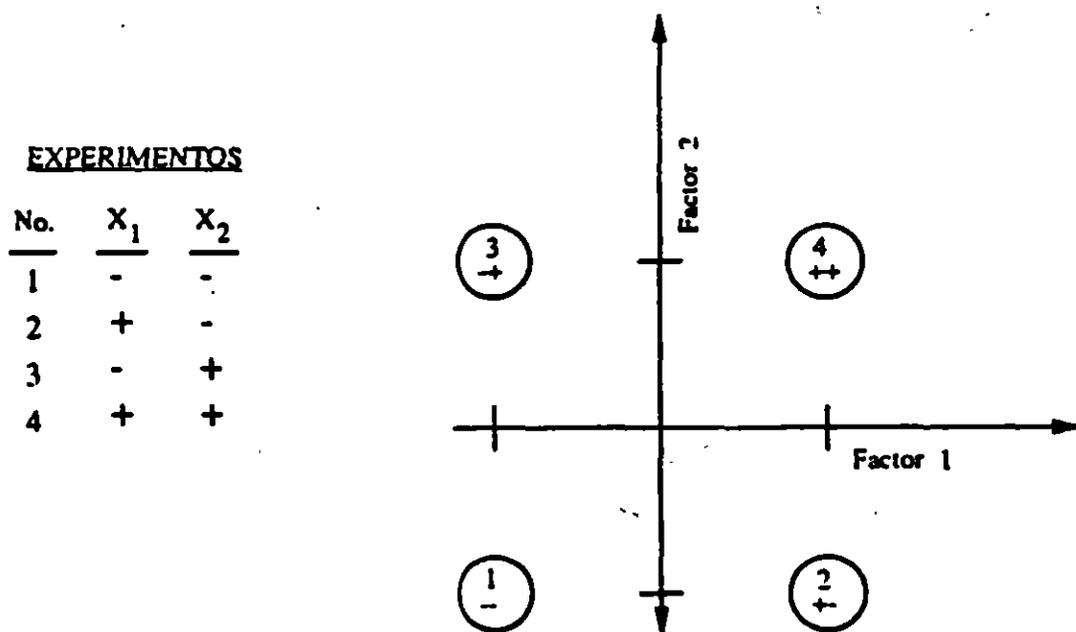


Figura 2.4-1: Diseño factorial 2^2

Los dos niveles de cada factor se denotan por + y -, lo cual identifica el nivel alto y bajo en cada uno de los factores. El significado es obvio cuando los factores son cuantitativos. Por ejemplo, si uno de los factores es agitación y se está analizando a 100 y 200 rpm (revoluciones por minuto), el signo + se asocia a 200 rpm y el - a 100 rpm. Si alguno de los factores es discreto, como en el tipo de catálisis (o máquinas, operadores, materia prima, lotes, etcétera) la asignación de los signos es arbitraria.

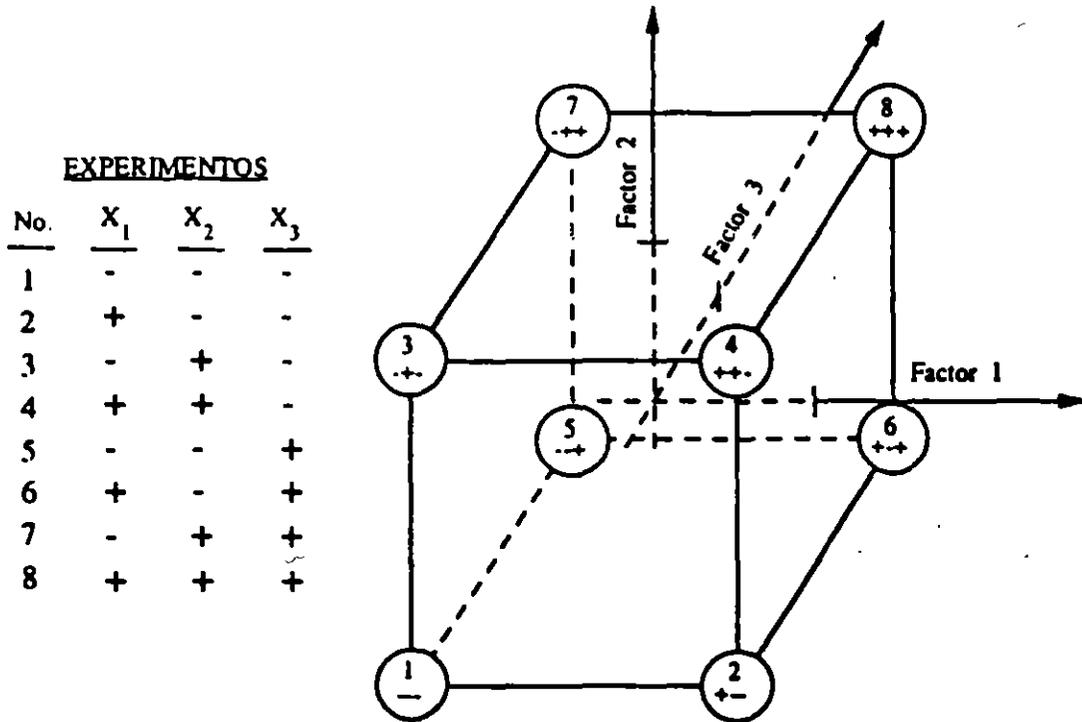


Figura 2.4-2: Diseño factorial 2^3

Debido a que uno de los objetivos de un buen diseño experimental es cubrir la región estudiada de la mejor manera posible, la representación gráfica del mismo nos permite evaluar dicho objetivo, por lo que es recomendable elaborar gráficas de los mismos. En el caso de los diseños factoriales, sus puntos extremos satisfacen este objetivo adecuadamente. Excepto los puntos que caen en el interior de la región. En la práctica, se hacen repeticiones con puntos de la parte central, este tópico se discutirá más adelante. Por lo pronto se trabajará con los puntos factoriales (esquinas o extremos).

2.5 Estimación de efectos principales

Después de haber ejecutado los experimentos bajo las condiciones indicadas, se procede a analizar los datos obtenidos con el fin de determinar el efecto de cada uno de los factores. Para ilustrarlo, observe el diseño factorial 2^2 en la figura 2.5-1. Con base en ello, se puede pensar que este tipo de diseño es equivalente a dos experimentos del tipo "uno-a-la-vez", en X_1 : el primero con el nivel inferior de X_2 (combinaciones 1 y 2), el otro al nivel superior de X_2 (combinaciones 3 y 4). El efecto de X_1 se calcula en cada combinación, el

valor total del mismo se denomina "efecto principal" de X_1 y se determina como el promedio de las dos combinaciones.

$$\text{Efecto de } X_1 \text{ (al nivel inferior de } X_2) = Y_2 - Y_1$$

$$\text{Efecto de } X_1 \text{ (al nivel superior de } X_2) = Y_4 - Y_3$$

$$\text{Efecto promedio de } X_1 = [(Y_2 - Y_1) + (Y_4 - Y_3)]/2$$

Una forma alternativa para determinar este efecto es promediar usando el nivel superior de X_1 y restarle el promedio resultante con el nivel inferior de dicho factor (X_1).

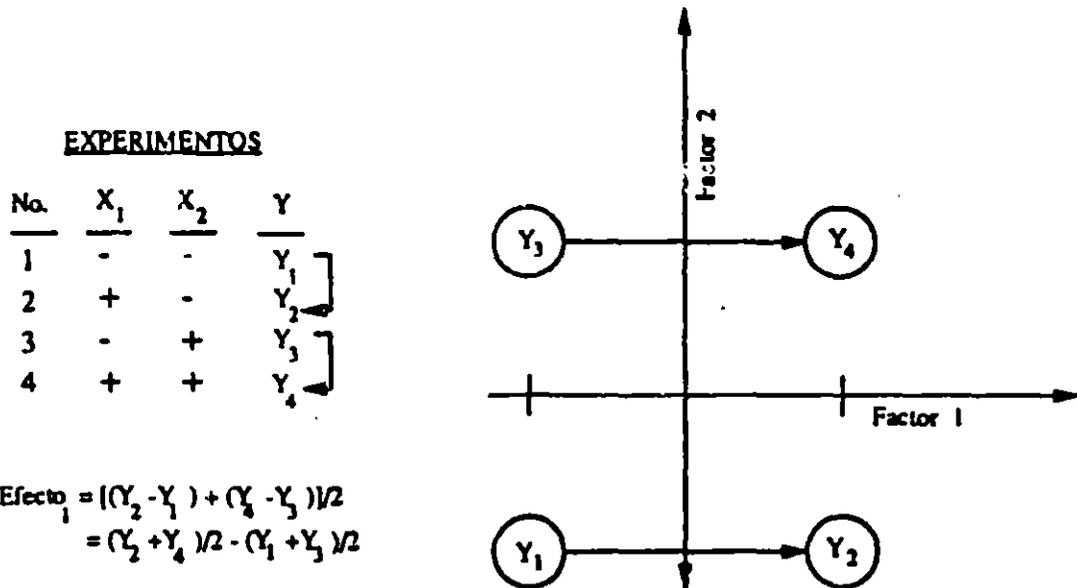


Figura 2.5-1: Efecto principal del factor 1 en un factorial 2^2

La superioridad, en eficiencia, de este diseño con respecto a los diseños del tipo "uno-a-la-vez" se debe a la factibilidad de calcular el efecto de X_2 usando los mismos cuatro experimentos. En dicha situación, se comparan Y_3 a Y_1 y Y_4 a Y_2 (ver figura 2.5-2). El efecto se determina de manera similar al caso anterior.

$$\text{Efecto de } X_2 \text{ (al nivel inferior de } X_1) = Y_3 - Y_1$$

$$\text{Efecto de } X_2 \text{ (al nivel superior de } X_1) = Y_4 - Y_2$$

$$\text{Efecto Promedio de } X_2 = [(Y_3 - Y_1) + (Y_4 - Y_2)]/2$$

La forma alternativa para calcular este efecto es semejante a la indicada para el otro factor.

La generalización de estos conceptos a más de dos factores es inmediata. En la figura 2.5-3 se indica cómo estimar el efecto principal de X_1 en un factorial 2^3 . En este caso el efecto es estimado con cuatro pares de comparaciones; el efecto principal, al igual que en

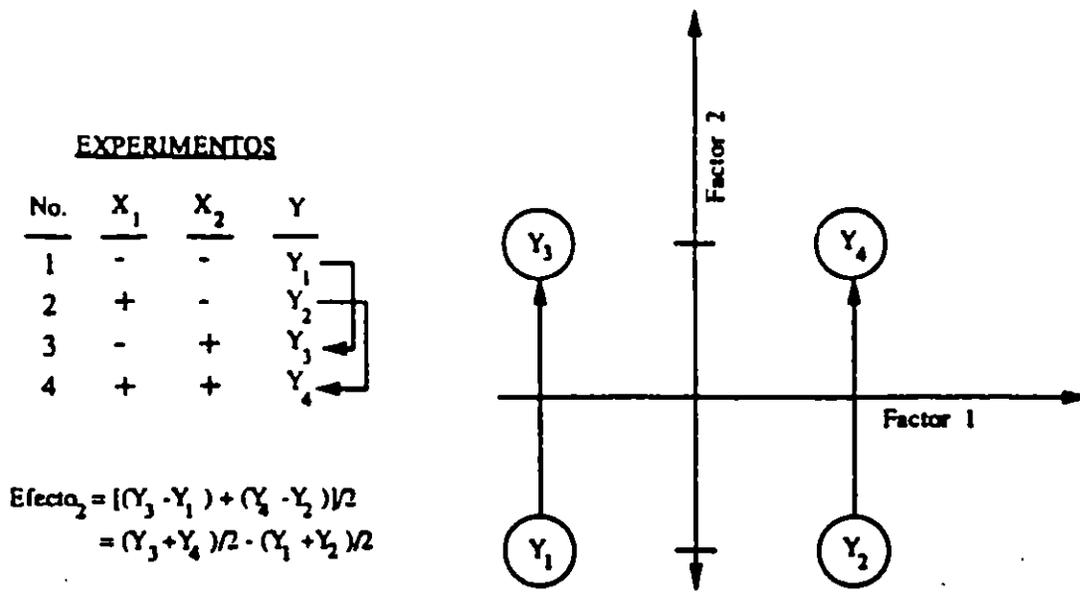


Figura 2.5-2: Efecto principal del factor 2 en un factorial 2²

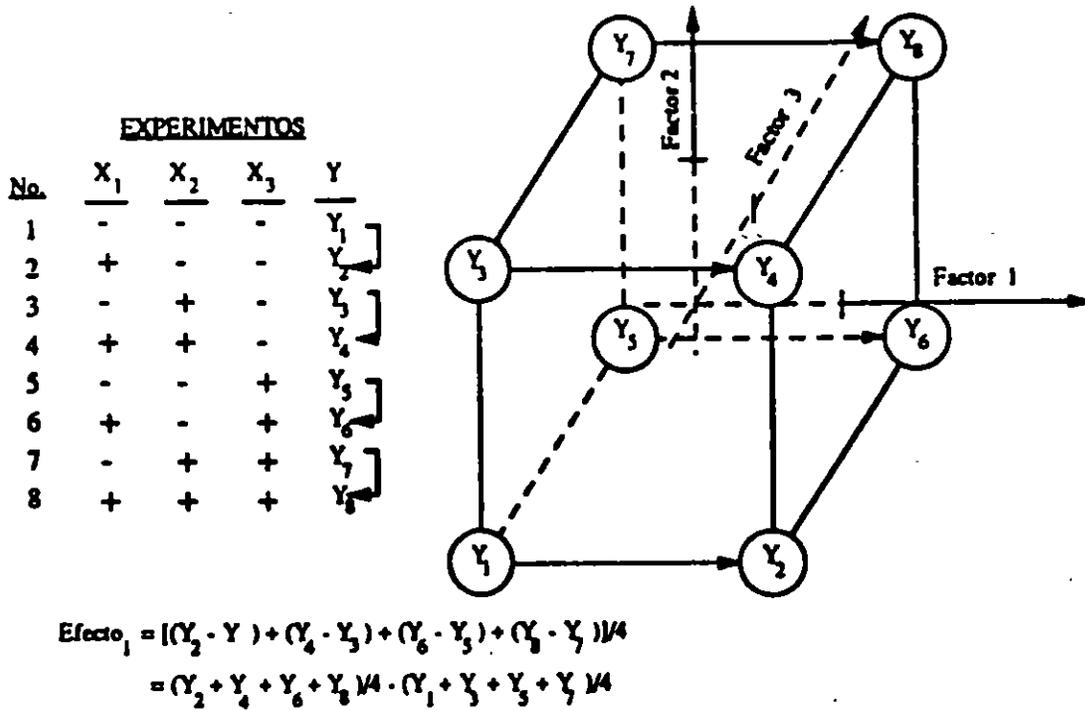


Figura 2.5-3: Efecto principal del factor 1 en un factorial 2³

las situaciones anteriores, es igual al promedio de ellas. De manera equivalente, este efecto se determina como el promedio de las cuatro Y obtenidas usando el nivel superior de X_1 menos el promedio correspondiente para el otro nivel de X_1 . Los efectos principales de X_2 y X_3 se calculan de la misma manera.

En un diseño tradicional para determinar los efectos de dos factores, se obtiene de tres puntos: el punto $(--)$, el punto en que X_1 cambia $(+-)$ y el punto en que X_2 cambia $(-+)$. Con ellos se estima el efecto de X_1 al nivel inferior de X_2 y el efecto de X_2 al nivel inferior de X_1 . Al añadir el punto $(++)$ se obtiene un diseño factorial 2^2 (ver figura 2.4-1), con lo que se logran dos ventajas adicionales de estos últimos (factoriales) sobre los primeros (tradicionales): a) mayor seguridad, y b) más información para derivar las conclusiones. La primera de ellas, se debe a que el efecto de cada factor se estudia a dos niveles, lo que da lugar a lo que se considera como "repeticiones escondidas", esto a pesar de que ninguna condición se repite de manera específica con el fin de incrementar la precisión en la estimación del efecto principal. Es obvio que el promedio de las dos estimaciones será más preciso que el de una sola. Asimismo, conviene señalar que en un diseño tradicional es necesario realizar dos experimentos por cada una de las condiciones (lo que da lugar a seis experimentos), para obtener la misma precisión que un diseño factorial con cuatro experimentos. La diferencia en eficiencia entre estos diseños se incrementa a medida que el número de factores es mayor. Finalmente, las conclusiones sobre el efecto de X_1 y X_2 sobre la variable dependiente Y es más confiable, ya que el efecto de un factor se mide a los dos niveles del otro (o a todas las posibles combinaciones de los otros factores, cuando se tienen más de dos factores). Por lo tanto, dichas conclusiones se basan en mayor información.

2.6 Interacciones

Una de las ventajas más importantes de los diseños factoriales es que permite estimar las interacciones entre los factores. Una *interacción* se presenta cuando el efecto de un factor depende del comportamiento de alguno de los otros factores. El tipo de interacción más simple, es la que se denomina interacción entre dos factores o doble. Un ejemplo de la misma, bajo diferentes condiciones se muestra en la figura 2.6-1(a)-(f). Note que si X_1 y X_2 interactúan, la pendiente de Y contra X_1 depende del valor de X_2 . Cuando no existe interacción la pendiente no dependerá de dicha variable.

La magnitud de la interacción en un factorial 2^2 , es igual a $1/2$ de la diferencia entre el efecto de X_1 (la pendiente) al nivel "superior" de X_2 y el efecto de X_1 al nivel "inferior" de X_2 [ver figura 2.6-2(a)]. Esta interacción X_1X_2 , también se puede determinar como $1/2$ de la diferencia entre el efecto de X_2 al nivel "superior" de X_1 y el efecto de X_2 al nivel "inferior" de X_1 [ver figura 2.6-2(b)]. La generalización de esta definición para factoriales mayores es inmediata. Cuando se tienen más de tres factores el cálculo de las mismas es fácil, aunque su visualización es difícil. Afortunadamente, este tipo de interacciones no se presenta a menudo. Por ejemplo, la interacción $X_1X_2X_3$ es igual a $1/2$ de la diferencia entre la interacción (promedio) X_1X_2 al nivel "superior" de X_3 y la interacción (promedio) X_1X_2 al nivel "inferior" de X_3 .

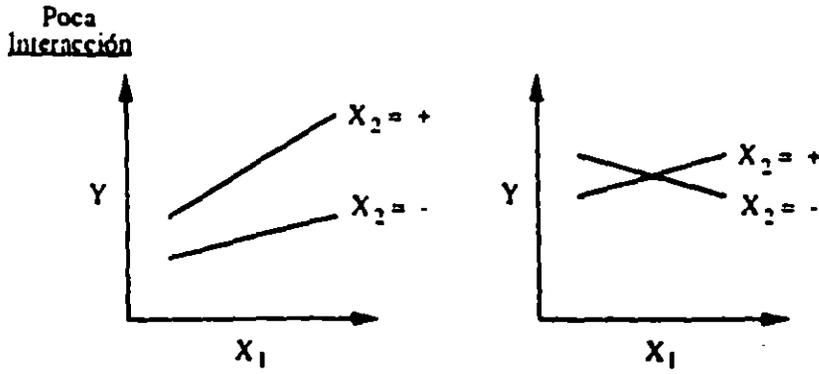


Figura 2.6-1 (a),(b): No interacción entre X_1 y X_2

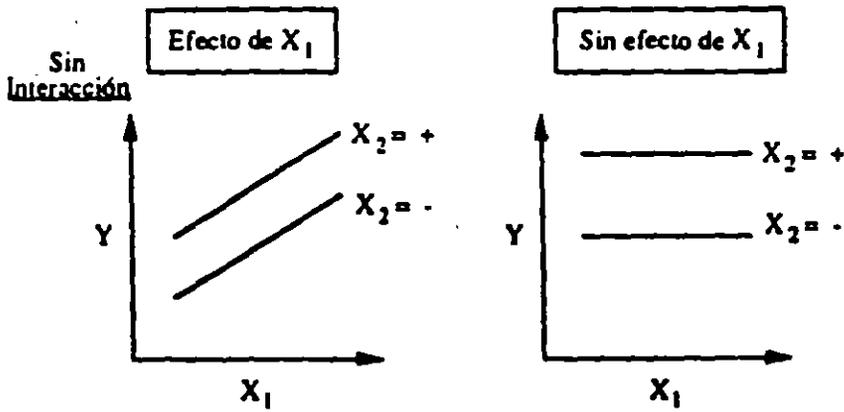


Figura 2.6-1 (c),(d): Bajo grado de interacción entre X_1 y X_2

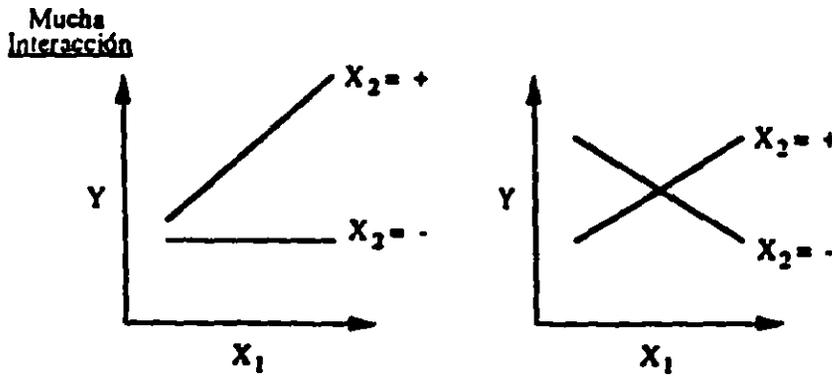


Figura 2.6-1 (e),(f): Alto grado de interacción entre los factores 1 y 2

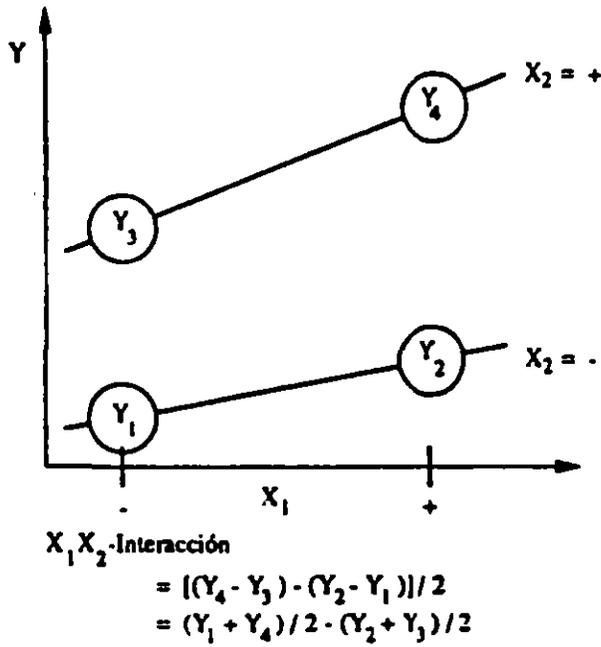


Figura 2.6-2(a): Cálculo de la interacción $X_1 X_2$, usando los niveles de X_2

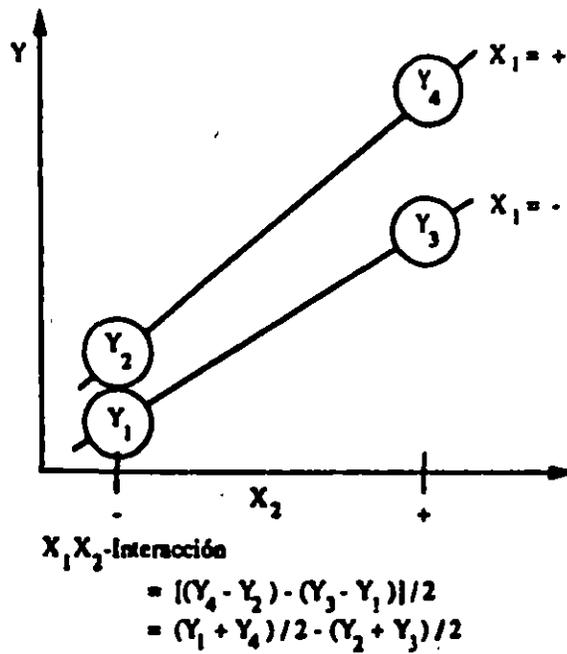


Figura 2.6-2(b): Cálculo de la interacción $X_1 X_2$, usando los niveles de X_1

2.7 Diseños factoriales 2^k

El arreglo de experimentos en un diseño con k factores, se puede generar fácilmente. En general, el número total de experimentos cuando se tienen k factores es igual a 2^k . En problemas que tengan hasta cinco factores, la estructuración de todas las combinaciones posibles se puede elaborar empleando la tabla 2.7-1 como referencia. Una forma de recordar estos arreglos es observando que la primera columna alterna signos - y +, la se-

	<u>No.</u>	<u>X₁</u>	<u>X₂</u>	<u>X₃</u>	<u>X₄</u>	<u>X₅</u>
k = 1	1	-	-	-	-	-
	2	+	-	-	-	-
k = 2	3	-	+	-	-	-
	4	+	+	-	-	-
	5	-	-	+	-	-
	6	+	-	+	-	-
k = 3	7	-	+	+	-	-
	8	+	+	+	-	-
	9	-	-	-	+	-
	10	+	-	-	+	-
	11	-	+	-	+	-
	12	+	+	-	+	-
	13	-	-	+	+	-
	14	+	-	+	+	-
k = 4	15	-	+	+	+	-
	16	+	+	+	+	-
	17	-	-	-	-	+
	18	+	-	-	-	+
	19	-	+	-	-	+
	20	+	+	-	-	+
	21	-	-	+	-	+
	22	+	-	+	-	+
	23	-	+	+	-	+
	24	+	+	+	-	+
	25	-	-	-	+	+
	26	+	-	-	+	+
	27	-	+	-	+	+
	28	+	+	-	+	+
	29	-	-	+	+	+
	30	+	-	+	+	+
k = 5	31	-	+	+	+	+
	32	+	+	+	+	+

Tabla 2.7-1: Arreglos de experimentos factoriales

gunda alterna pares de signos - y +, la tercera alterna cuartetos etcétera. Observe que el tamaño de los grupos de signos es una potencia de 2. Esto es, el tamaño en la primera columna equivale a 2^0 , en la segunda a 2^1 , en la siguiente a 2^2 , y así sucesivamente. Por otra parte, recuerde que el signo + identifica uno de los niveles del factor (el nivel superior si el valor del factor es cuantitativo) y el signo -, el otro nivel. Cada hilera representa el conjunto de condiciones a que estará sujeto dicho experimento. Conviene señalar que en cada experimento se pueden medir diversas variables dependientes, las cuales se analizan individualmente.

En el Apéndice B, se listan diseños factoriales de dos a cinco niveles (tablas B.2-2 a B.2-5), que, además de las columnas de signos, contienen una columna extra con las interacciones. Dicha columna se obtiene multiplicando los signos correspondientes en las columnas (factores) involucradas en la interacción; esta operación se realiza por hileras. Por ejemplo, en la primera hilera de la tabla B.2-2 el signo - del factor X_1 se multiplica por el signo + bajo la columna de X_2 . Esta operación se debe repetir en todas las hileras de la tabla. Los efectos de las interacciones se definen con base en los resultados de la mencionada columna.

En la sección anterior (ver figura 2.6-2), se explicó la manera en que se calculó la interacción X_1X_2 en un factorial 2^2 [esto es $(Y_1 + Y_4)/2 - (Y_2 + Y_3)/2$]. Revisando la tabla B.2-2 se observa que los signos + y - en la columna X_1X_2 de la misma definen tal efecto, al tener signos + en los experimentos 1 y 4 y signos negativos en 2 y 3. Debido a esto, el uso de esta tabla elimina la necesidad de utilizar figuras como la 2.6-2. Además, el empleo de la misma es muy simple, ya que únicamente debemos sumar los valores de Y usando los signos indicados, y promediando los efectos calculados. Este tipo de tablas (B.2-2 a B.2-5) se denominan tablas computacionales. El uso de las mismas se ilustrará en las Secciones 2.9 y 2.12.

2.8 Aleatorización

El orden en que se presentaron los experimentos en la tabla 2.7-1 se conoce como orden estándar u orden de Yates. Ésta representa una forma conveniente de mostrar los resultados, pero a pesar de ello no es recomendable que los experimentos se ejecuten en ese orden, ya que se pueden producir sesgos. Para ilustrar esto, considere un factorial 2^4 (16 experimentos), en el cual los resultados obtenidos disminuyen durante el proyecto (por ejemplo, debido al uso de la catálisis) o se desvían en la etapa intermedia del programa (por ejemplo, debido a cambios en la materia prima); el riesgo en este tipo de situaciones es que dichos efectos pueden ser erróneamente interpretados como efecto de X_1 [vea la figura 2.8-1 (a)]. Ahora bien, en caso de que ninguno de los cuatro factores influya determinantemente en el estudio, tomando en cuenta que los primeros ocho experimentos se llevaron a cabo con el nivel inferior de X_1 (nivel -) y los siguientes con el nivel superior, el efecto principal de este factor se calculará como la diferencia entre los resultados promedios de los últimos experimentos \bar{Y}_+ y los promedios correspondientes de los prime-

ros ocho, \bar{Y} . Dicha diferencia será grande debido a la tendencia del proceso, y aunque X_4 no tenga ningún efecto, se puede cometer el error de pensar que es importante. Este tipo de problemas se minimiza si los experimentos se realizan de manera aleatoria. La tabla A-1 se puede utilizar para aleatorizarlos.

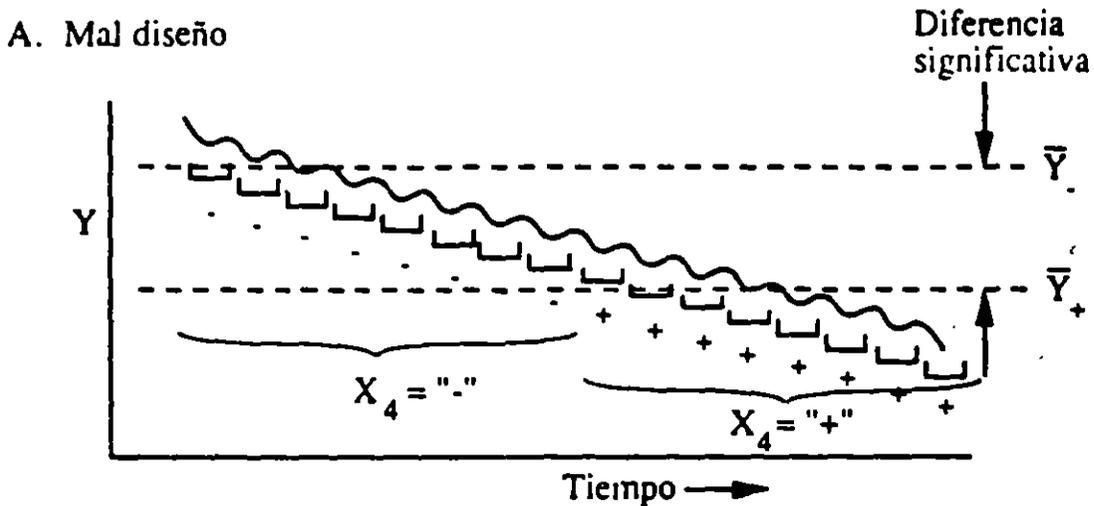


Figura 2.8-1 (a): Ejemplo de un diseño no-aleatorizado

De manera adicional, en la tabla 2.8-1 se especifica la forma en que se debe estructurar el arreglo cuando se tienen 8, 16 o 32 experimentos. El impacto del problema de aleatorización se observa más adecuadamente en la figura 2.8-1(b). Si se procede de la manera indicada la magnitud del efecto principal de X_4 (u otro factor no significativo), normalmente será pequeño, aun cuando exista alguna tendencia en el proceso (u otras causas que provoquen sesgos).

B. Buen diseño (aleatorizado)

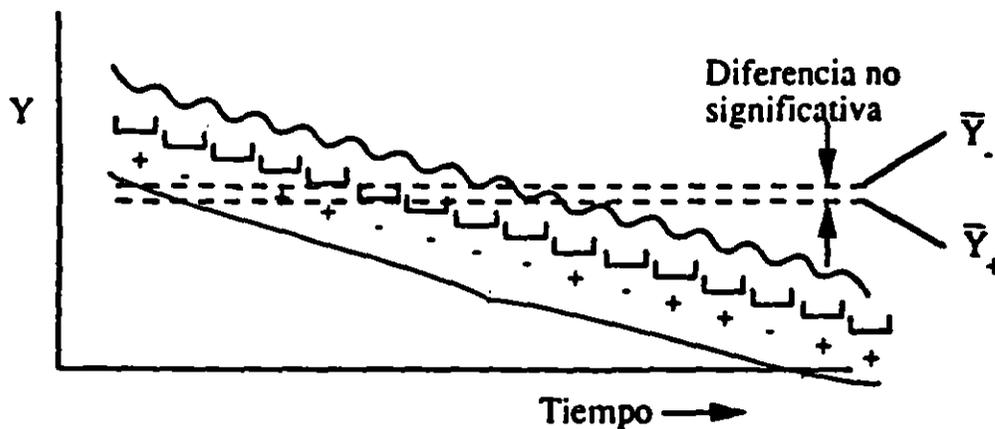


Figura 2.8-1 (b): Ejemplo de un diseño aleatorizado

8 experimentos					16 experimentos					32 experimentos				
1	5	8	6	5	10	1	11	14	5	29	19	15	3	30
6	7	4	4	3	2	5	9	13	4	32	16	8	6	20
4	4	6	2	4	4	2	4	4	14	18	30	13	24	4
8	1	3	7	1	16	6	16	1	7	2	10	10	9	7
5	6	5	5	2	9	11	13	10	15	17	13	3	28	3
3	3	7	1	7	5	3	12	16	2	15	25	25	26	14
7	2	1	3	8	8	8	14	2	1	13	28	1	2	10
2	8	2	8	6	3	12	6	5	3	20	15	6	29	16
					7	7	10	12	8	14	4	9	31	27
					11	13	5	9	11	6	22	20	1	2
					1	4	2	6	12	22	32	16	15	32
					12	15	15	8	16	16	21	28	12	12
					14	10	8	15	10	1	24	19	23	24
					15	14	7	3	6	25	12	27	17	23
					6	9	1	7	9	12	17	17	18	5
					13	16	3	11	13	30	9	30	27	25
										5	20	2	30	8
										23	2	26	32	28
										19	8	11	25	1
										28	11	5	20	21
										31	5	29	22	26
										8	6	31	7	6
										11	1	4	14	22
										7	31	7	5	17
										24	23	12	11	18
										9	27	22	10	29
										27	3	18	19	11
										4	26	24	8	15
										21	7	32	13	31
										3	29	14	4	19
										26	18	21	16	9
										10	14	23	21	13

Tabla 2.8-1: Arreglo aleatorio para 8, 16 o 32 experimentos

2.9 Ejemplo de un factorial 2^3

2.9.1 Planteamiento y propuesta del diseño

Los estudiantes que acostumbran realizar sus prácticas en uno de los laboratorios de electrónica de la Universidad se han quejado con el instructor, ya que cuando tienen necesidad de repetir mediciones los valores que obtienen son diferentes. Debido a ello el instructor, Ken Walker, decidió hacer un estudio usando un diseño factorial 2^3 , con el fin de identificar las causas que están provocando la variación. Para evaluar los efectos de los

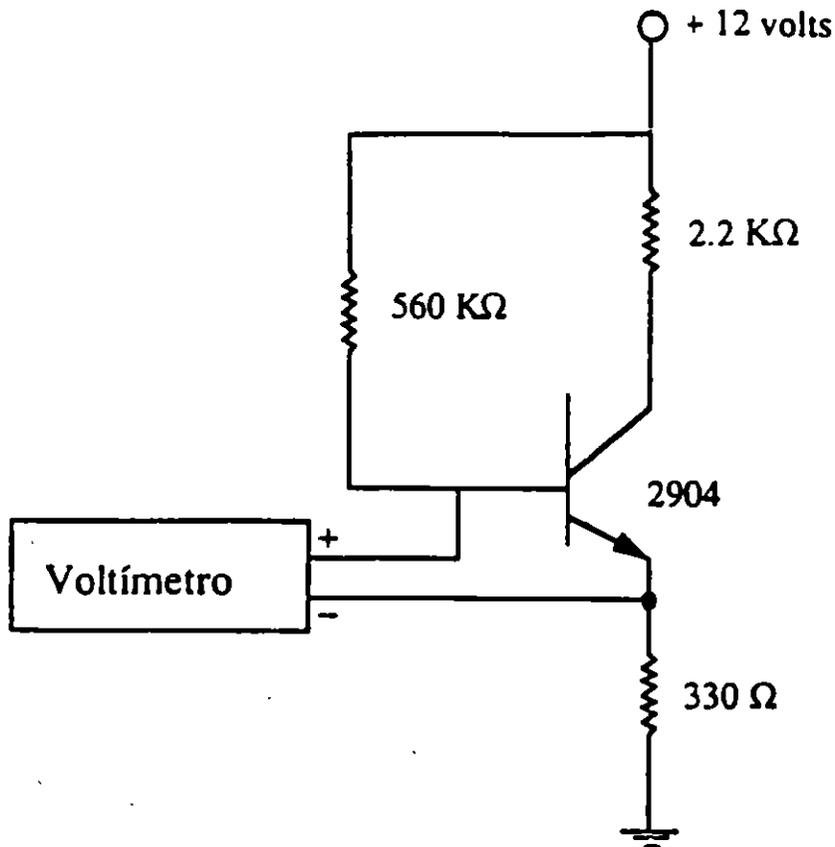


Figura 2.9.1-1: Circuito usado para medir el voltaje

tres factores que se cree están influyendo en los resultados de las lecturas obtenidas en un voltímetro Keithley 169 DMM, se construyó un circuito (ver figura 2.9.1-1) en el cual se mide el voltaje de la base al emisor de un transistor.

Los factores escogidos para análisis fueron:

1. *Temperatura ambiente* (o la temperatura alrededor del circuito). Se consideraron dos niveles: 22°C (temperatura del laboratorio) y 32°C (temperatura aproximada en una planta industrial). Además, se utilizó un horno Tenney y se dejó que el circuito se estabilizara durante cinco minutos, antes de tomar mediciones.
2. *Tiempo de calentamiento del voltímetro*. Se permitió que estos aparatos se calentaran durante cinco minutos, o menos de 30 segundos. En este último caso, el voltímetro se mantuvo apagado por lo menos durante cinco minutos, antes de volverlo a encender para tomar mediciones. Se escogieron estos niveles ya que los estudiantes quieren terminar sus prácticas lo más pronto posible, y normalmente no esperan a que el equipo se caliente y estabilice.
3. *Tiempo de calentamiento del circuito*. Los niveles utilizados para medir el efecto de este factor son similares a los mencionados para el segundo factor (esto es, más de cinco minutos y menos de 30 segundos). En ambos casos se permitió que el circuito se enfriara durante cinco minutos, antes de hacer más mediciones.

En la tabla 2.9.1-1 se presenta la forma en que se estructuró el experimento. Se hicieron dos repeticiones de cada combinación y se aleatorizó el orden de los experimentos, para lo cual se utilizaron los valores de la última columna del grupo de 16 experimentos (ver tabla 2.8-1). Dichos valores se presentan en la columna que identifica el orden, en la tabla 2.9.1-1. De esta manera, la primera lectura que se tomó, se obtuvo con la primera repetición del experimento 4, bajo las siguientes condiciones: temperatura a 32°C dejando que el voltímetro se caliente durante cinco minutos, después de lo cual se encendió el circuito y se midió el voltaje. La siguiente fue la primera repetición del experimento 3 y así sucesivamente hasta completar las 16 mediciones; los resultados se presentan en la última columna de la tabla referida.

Los promedios y varianzas de las lecturas para cada una de las condiciones indicadas se presentan en la tabla 2.9.1-2. Estas últimas se calcularon usando las siguientes fórmulas:

$$s^2 = \sum_{i=1}^r (Y_i - \bar{Y})^2 / (r-1) \quad (2.9.1-1)$$

el cual se reduce a (si $r=2$)

$$s^2 = (Y_1 - Y_2)^2 / 2 \quad (2.9.1-2)$$

Finalmente, se obtuvo que la varianza promedio [ponderada por sus grados de libertad ($r-1$)] es igual a 3.4106×10^{-4} , por lo que el estimador de la desviación estándar es .01847.

FACTORES Y NIVELES

Factores	Niveles	
	-	+
X_1 = Temperatura del laboratorio	22°C	32°C
X_2 = Tiempo de calentamiento del voltímetro	<30 seg.	>5 min.
X_3 = Tiempo de calentamiento del circuito	<30 seg.	>5 min.
Y = Voltaje medido		

ESTRUCTURA DEL DISEÑO Y DATOS

No.	Valores codificados			Valores actuales			Orden	Y
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3		
1	-	-	-	22° < 30 seg.	< 30 seg.	< 30 seg.	5,4	.692, .693
2	+	-	-	32° < 30 seg.	< 30 seg.	< 30 seg.	14,7	.636, .635
3	-	+	-	22° > 5 min.	< 30 seg.	< 30 seg.	15,2	.691, .694
4	+	+	-	32° > 5 min.	< 30 seg.	< 30 seg.	1,3	.631, .633
5	-	-	+	22° < 30 seg.	> 5 min.	> 5 min.	8,11	.691, .635
6	+	-	+	32° < 30 seg.	> 5 min.	> 5 min.	12,16	.680, .679
7	-	+	+	22° > 5 min.	> 5 min.	> 5 min.	10,6	.694, .693
8	+	+	+	32° > 5 min.	> 5 min.	> 5 min.	9,13	.684, .636

Tabla 2.9.1-1: Factorial 2³ para medir la precisión de un voltímetro marca Kiethley 169 DMM

Experimento No.	X ₁	X ₂	X ₃	Y	Y	Varianza	DF
1	-	-	-	.692, .693	.6925	5 x 10 ⁻⁷	1
2	+	-	-	.636, .635	.6355	5 x 10 ⁻⁷	1
3	-	+	-	.691, .694	.6925	4.5 x 10 ⁻⁶	1
4	+	+	-	.631, .633	.6320	2 x 10 ⁻⁶	1
5	-	-	+	.691, .635	.6630	1.568 x 10 ⁻³	1
6	+	-	+	.680, .679	.6795	5 x 10 ⁻⁷	1
7	-	+	+	.694, .693	.6935	5 x 10 ⁻⁷	1
8	+	+	+	.684, .636	.6600	1.152 x 10 ⁻³	1
							<u>8</u>

Varianza combinada:

$$S_p^2 = [5 \times 10^{-7} + 5 \times 10^{-7} + \dots + 1.152 \times 10^{-3}] / 8$$

$$S_p^2 = (2.7285 \times 10^{-3}) / 8 = 3.4106 \times 10^{-4}$$

Desviación estándar combinada:

$$s_p = \sqrt{S_p^2} = \sqrt{3.4106 \times 10^{-4}}$$

$$s_p = .01847 \text{ con 8 grados de libertad}$$

Tabla 2.9.1-2: Cálculo de la varianza y desviación estándar

2.9.2 Análisis de resultados

En general, los resultados de un factorial 2³ se pueden mostrar gráficamente en un cubo, el cual identifica su región experimental, como en la figura 2.4-2. En la figura 2.9.2-1 se observa que X₁ (temperatura del laboratorio) muestra un efecto positivo (en tres de los cuatro casos) y X₂ muestra un efecto negativo (en tres de los cuatro casos).

El cálculo de los promedios de efectos principales e interacciones en la forma indicada en las Secciones 2.5 y 2.6, se realizó usando la tabla B.2-3. Ésta se incluye en la tabla 2.9.2-1, en la que el voltaje promedio se presenta en la parte derecha. A partir de esto, para calcular los efectos, los valores de las Y se suman (con los signos indicados) y promedian dividiendo por el número de signos + en dicho efecto. Por ejemplo, si se desea determinar la interacción X₁X₃ su valor es igual a:

$$\begin{aligned} X_1X_3 &= (+Y_1 - Y_2 + Y_3 - Y_4 - Y_5 + Y_6 - Y_7 + Y_8) / 4 \\ &= (.6925 - .6355 + .6925 - .6320 - .6630 + .6795 - .6935 + .6600) / 4 \\ &= .0251 \end{aligned}$$

Los cálculos se pueden simplificar sumando los valores de las Y con signo +, [Σ(+)], en primer lugar, y luego se resta el resultado obtenido con las Y con signo -, [Σ(-)]. Al proceder de esta forma se puede verificar que no existan errores aritméticos.

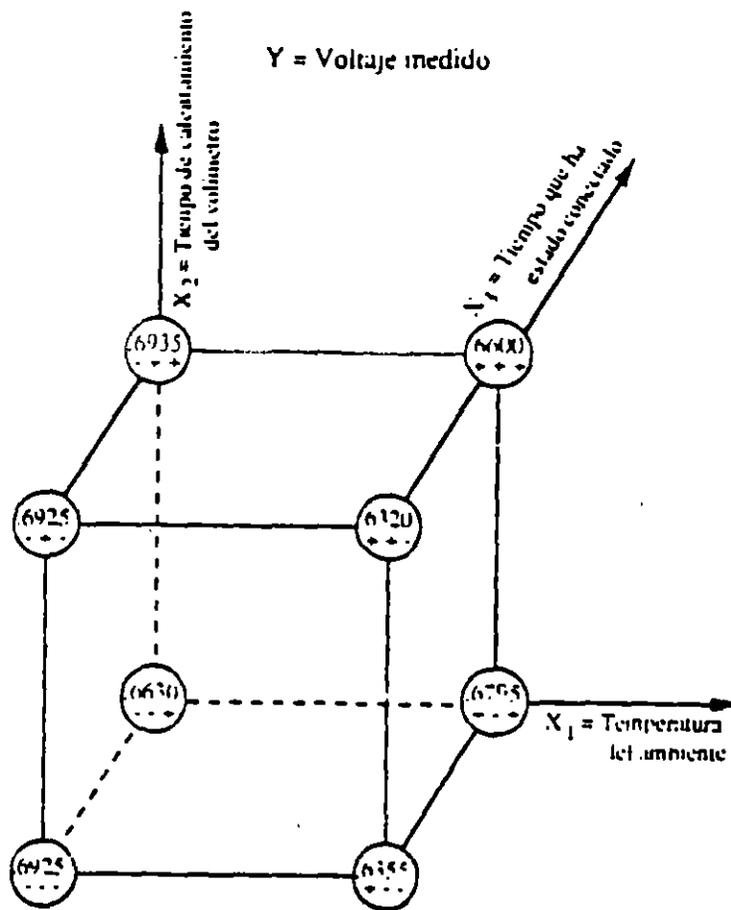


Figura 2.9.2-1: Representación gráfica de un factorial 2³

Experimento	Media	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	Y
1	+	-	-	-	+	+	+	-	.6925
2	+	+	-	-	-	-	+	+	.6355
3	+	-	+	-	-	+	-	+	.6925
4	+	+	+	-	+	-	-	-	.6320
5	+	-	-	+	+	-	-	+	.6630
6	+	+	-	+	-	+	-	-	.6795
7	+	-	+	+	-	-	+	-	.6935
8	+	+	+	+	+	+	+	+	.6600
Σ(+)	5.3485	2.607	2.678	2.696	2.6475	2.7245	2.6815	2.651	
Σ(-)	0	2.7415	2.6705	2.6525	2.701	2.624	2.667	2.6975	
Σ(+)-Σ(-)	5.3485	5.3485	5.3485	5.3485	5.3485	5.3485	5.3485	5.3485	
Σ(+)-Σ(-)	5.3485	-1.345	.0075	.0435	-.0535	.1005	.0145	-.0465	
Efectos	6686	-.0336	.0019	.0109	-.0134	.0251	.0036	-.0116	
t _E		-3.637	0.203	1.180	-1.4504	2.717	.390	-1.256	

Nota:
 Desviaciones estándar:
 Una sola observación $s_p = .01847$
 (de réplicas) con 8 grados de libertad
 Efecto $t_E = s_p \sqrt{2/pi}$
 $= .01847 \sqrt{2/(4)(2)}$
 $= .009239$
 Valor crítico
 $t^* = 2.306$ (95% de confiabilidad y 8 grados de libertad)

Tabla 2.9.2-1: Cálculo de los efectos en un factorial 2³

Debido a que los promedios de los efectos (principales e interacciones) son diferencias entre promedios (esto es $\bar{Y}_+ - \bar{Y}_-$), la significancia estadística de los mismos se puede probar empleando la distribución t (ecuación 2.1.2-3, Sección 2.1.2). Recuerde que el denominador de dicha ecuación es s_d [$s_d = \sqrt{s_p^2 (1/n_1 + 1/n_2)}$], donde s_p representa el estimador combinado de la desviación estándar y n_1 y n_2 son los tamaños de las muestras. En este caso, el numerador de dicha ecuación ($\bar{Y}_+ - \bar{Y}_-$) representa el efecto y el denominador s_E , el error estándar del mismo. Esto se calcula con la fórmula

$$s_E = s_p \sqrt{1/pr + 1/pr}$$

donde,

s_p es el estimador de la desviación estándar de una observación; en el ejemplo del voltímetro, su valor se indica en la última línea de la tabla 2.9.1-2.

p identifica el número de signos positivos en la columna que se determinará el efecto.

r denota el número de repeticiones de cada experimento.

Consecuentemente, los valores de t se denotan como t_E , el cual es igual a

$$t_E = \text{Efecto} / s_E = \text{Efecto} / s_p \sqrt{2/pr}$$

Estos valores se muestran en la tabla 2.9.2-1. Conviene señalar que los cálculos de la hoja de trabajo de dicha tabla y la siguiente, se pueden realizar usando programas como Lotus 123.² Asimismo, la significancia estadística de los efectos, se determina comparando los valores de los t_E al valor crítico de $t(t^*)$ de la tabla A-5. En el ejemplo que estamos analizando se tienen 8 grados de libertad para estimar α (esto es uno por cada par de repeticiones). Con base en estos resultados podemos concluir, con un 95 por ciento de confiabilidad ($t^* = 2.306$) que X_1 (temperatura del laboratorio) y la interacción X_1X_3 (temperatura del laboratorio por el tiempo de calentamiento del circuito) son estadísticamente significativos. Además, X_3 por sí mismo no fue significativo.

2.9.3 Interpretación de resultados

Con base en el análisis estadístico realizado, se observó que el tiempo de calentamiento del voltímetro (X_2) y todas las interacciones que lo involucran (esto es X_1X_2 , X_2X_3 y $X_1X_2X_3$) no son significativos. Por lo tanto no existe suficiente evidencia para afirmar que el tiempo de calentamiento del voltímetro afecta la lectura del voltaje. En conse-

cuencia, los estudiantes que necesiten repetir mediciones, no deben preocuparse si el tiempo de calentamiento del voltímetro es diferente al utilizado en la primera lectura.

También se detectó (con un 95 por ciento de confianza) que la temperatura del laboratorio afecta la lectura; de hecho cuando la temperatura es 32°C, la lectura obtenida fue .034 voltios menor a la registrada con 22°C. La significancia encontrada en la interacción de X_1 y X_3 indica que el efecto de X_1 debe interpretarse cuidadosamente. Además, implica que el efecto de la temperatura (X_1) cambiará en función del tiempo de calentamiento del circuito (X_3). Esto se puede examinar más detenidamente en la tabla 2.9.3-1, la cual contiene los promedios de las lecturas obtenidas con las diferentes combinaciones de X_1 y X_3 , o si se prefiere en la figura 2.9.3-1. Con base en estos resultados, es obvio que el efecto de X_1 es menor (esto es $.6698 - .6783 = -.0085$) si el tiempo de calentamiento del circuito es mayor de cinco minutos. Por lo tanto, si se desea reducir la variabilidad en las lecturas, se debe recomendar a los estudiantes que conecten el circuito al menos durante cinco minutos, antes de hacer las mediciones y, de ser posible, procurar mantener la temperatura constante.

$X_1 =$ Temperatura del ambiente

		- = 22°C	+ = 32°C
X_3	- = < 30 seg.	.6925	.6338
	+ = > 5 min.	.6783	.6698

Tabla 2.9.3-1: Lecturas promedio de voltajes

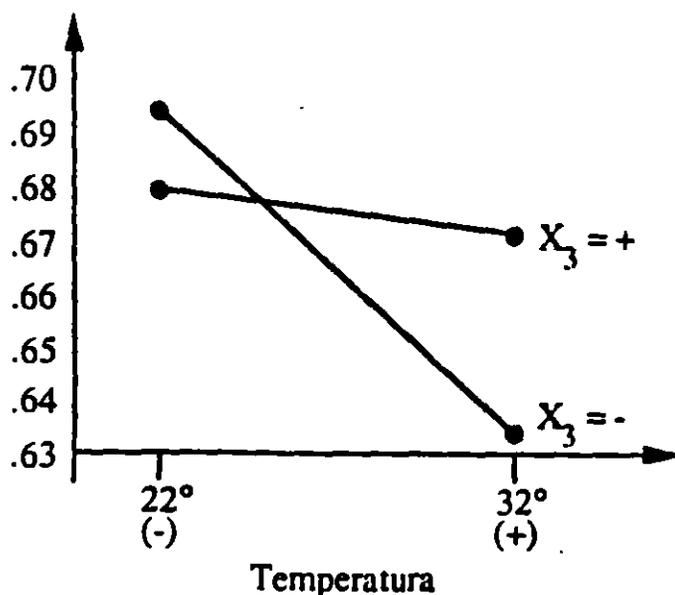


Figura 2.9.3-1: Relación entre temperatura y tiempo de calentamiento del circuito

La variabilidad en las repeticiones esto es las mediciones realizadas en condiciones similares se estimó con s_p , y su valor fue .018. Por lo tanto, si la lectura de un voltaje no varía más de $\pm 2(018)$, se considerará dentro de la capacidad del tipo de voltímetro que se está analizando (Kiethley 169 DMM).

En conclusión, los resultados de experimentos factoriales se deben interpretar en la forma que se ha ilustrado, donde los efectos no significativos se pueden ignorar y la significancia de efectos principales se interpreta como la diferencia promedio de la variable dependiente (Y) al cambiar el nivel de dicho factor de - a +. La explicación de interacciones significativas es posible presentarlas por medio de tablas o gráficas, como las indicadas en la tabla 2.9.3-1 o la figura 2.9.3-1.

2.10 Repeticiones

A pesar que los diseños factoriales nos permiten determinar estimadores más precisos que los métodos de experimentación tradicionales (esto es, experimentos "uno-a-la-vez"), en ocasiones es necesario realizar repeticiones del diseño con el fin de obtener la precisión que se desea.

Ahora bien, si δ identifica la magnitud máxima que estamos dispuestos a aceptar (la diferencia práctica descrita en la Sección 2.1.3) y σ es la desviación estándar, el número de experimentos necesarios¹ para lograr la precisión deseada se calcula con la siguiente fórmula:

$$N = (8\sigma/\delta)^2 \quad (2.10-1)$$

El valor de N debe aproximarse al múltiplo más cercano a 2^k ($N=r2^k$, r identifica el número de repeticiones). Esto garantizará que el error máximo sea menor al 10 por ciento y permitirá probar con un 95 por ciento de confianza, la significancia de los efectos. Note que a medida que el valor de δ disminuye (esto es si se desea mayor precisión), el número de experimentos que satisfarán dicho valor, será mayor. Cuando el valor de δ es aproximadamente igual a σ , se necesitan 64 experimentos. En general, no es recomendable que la precisión sea mayor que la desviación estándar (a menos que los experimentos sean muy baratos).

Es importante enfatizar que la precisión será la misma, independientemente del tamaño del factorial. Esto quiere decir que si se requieren 32 experimentos para alcanzar una determinada precisión y el número de factores a estudiar es $k=4$, entonces las 16 combinaciones ($=2^4$) de dicho factorial deben repetirse. Alternativamente, si se añade otro factor al estudio, se necesitarán 32 ($=2^5$) experimentos. En ambos diseños, la precisión será similar ya que depende, exclusivamente, del número total de combinaciones ejecutadas y no del número de factores estudiados.

Al iniciar un programa experimental es recomendable que se emplee la ecuación 2.10-1, ya que es útil para determinar el costo del programa (con base en el valor de N) con la precisión (δ) deseada. En la práctica se utiliza la ecuación

$$\delta = 8\sigma / \sqrt{N} \quad (2.10-2)$$

Expresada de esta manera, la ecuación indica la precisión que se puede alcanzar ("comprar") con el tamaño N (el presupuesto disponible para el estudio). Si la precisión obtenida no es adecuada, se debe decidir entre incrementar el presupuesto (N) o no ejecutar el programa (o tratar de disminuir la desviación estándar σ). La decisión de no llevar a cabo el programa experimental es algo no deseable. Sin embargo, es preferible tomar dicha decisión a gastar el dinero y no poder hacer conclusiones debido a la gran variabilidad de los datos.

Antes de pasar a otro tópico, trataremos de explicar cómo se derivó la ecuación 2.10-1. Para comprenderlo es necesario estar conscientes de que los efectos que se calcularon, *siempre* se probarán para investigar su significancia estadística.

Ahora bien, si existe un valor crítico E^* , el cual produce el mayor efecto en el experimento (provocado posiblemente de manera aleatoria). Dicho valor depende de la variabilidad de los efectos σ_E , por lo que si cualquier efecto es mayor que E^* se considerará que su efecto es real. En otras palabras, afirmaremos que los factores son *significativos* (estrictamente hablando, se debería decir que los factores son *estadísticamente significativos*). Conviene indicar que existe la posibilidad de que nuestra conclusión esté equivocada, ya que es posible que el efecto de dicho factor sea cero, y que *errores de tipo aleatorio* estén produciendo ese efecto *aparente*. La probabilidad de este error se conoce (en términos estadísticos) como el riesgo o error tipo α . Dicho valor de α está bajo el control del investigador, ya que uno decide el valor de E^* a utilizar. Es obvio que entre más grande sea el valor de E^* seleccionado menor será el riesgo α [ver figura 2.10-1(a)].

¿Qué tan grande debe ser δ con respecto al valor de E^* ? La respuesta lógica es que ambos valores deberían ser iguales, ya que δ mide el máximo error que se está dispuesto a aceptar; por otra parte, cuando se tiene un efecto de tamaño E^* se dice que el efecto es real. El problema es que no es posible determinar el valor verdadero del efecto, ya que es afectado por el error experimental (ver figura 1.1.1-1). Debido a esto, en algunos casos el valor que se mide es menor que δ y, en otros, mayor [ver figura 2.10-1(b)].

La probabilidad de que sea menor que E^* (en este caso menor que δ) es el riesgo que se tiene de concluir que el efecto no es importante, en otras palabras, "el efecto no es estadísticamente diferente de cero". Este riesgo se denomina riesgo o error tipo β . Esto es, dicho riesgo identifica el error de concluir que un efecto no es importante, cuando en realidad sí lo es. (Esto es similar a la situación en que un doctor le indica a su paciente que está sano, cuando de hecho se encuentra enfermo.) Cuando $\delta = E^*$, el valor de $\beta = 50\%$, el cual se considera muy grande. Para disminuir este valor, δ debe ser mayor que E^* ; la decisión de qué tan grande, dependerá del valor de β que se considere aceptable, con lo que se determinará la relación entre los valores de δ y E^* [ver figura 2.10-1 (c)].

Suponiendo que los efectos se distribuyen en forma normal y se selecciona un valor de $\alpha = .05$ (5%), el valor de E^* será igual a $1.96\sigma_E$. Además, si $\beta = .05$, $\delta = E^* + 1.64\sigma_E$ (note que este valor es diferente de la distancia del riesgo α , debido a que solamente una parte de la distribución es relevante en el problema). La combinación de estas dos relaciones produce el valor de $\delta = 1.96\sigma_E + 1.64\sigma_E = 3.60\sigma_E$.

C. Valores de δ/σ_E mayores al punto crítico producen valores aceptables de β

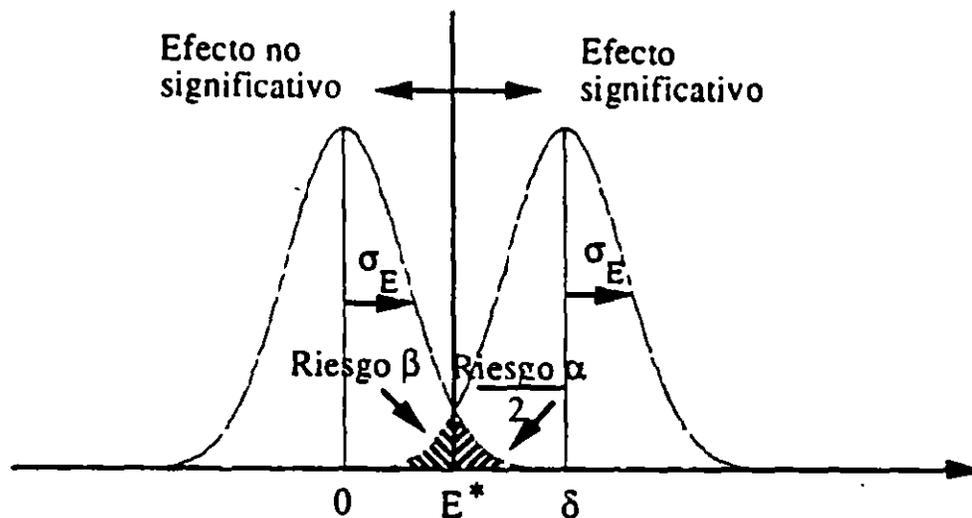


Figura 2.10-1(c): Relación de δ/σ_E que produce valores aceptables de β

Recordando que un efecto se calcula como la diferencia entre dos promedios (el promedio al nivel + del factor \bar{Y}_+ , menos el promedio al nivel - del factor \bar{Y}_-), con la mitad de los datos en cada promedio, es posible determinar σ_E , usando la ecuación 2.1.2-2

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma^2 \left[\frac{1}{(N/2)} + \frac{1}{(N/2)} \right]} = 2\sigma / \sqrt{N}$$

donde σ representa la variabilidad experimental de Y . Por lo tanto, el valor de N se puede expresar como función de δ , de la siguiente manera:

$$\delta = (3.60)\sigma_E = (3.60)(2\sigma / \sqrt{N}) = 7.2\sigma / \sqrt{N},$$

o

$$N = (7.2\sigma / \delta)^2$$

Conviene señalar que, generalmente, la distribución no es normal (ya que no se conoce el valor de σ), por lo que se usa una distribución t y esto origina que el valor de 7.2 se incremente. Para poder establecer, de manera correcta, la magnitud de dicho incremento, es necesario saber la precisión del estimador s_p (esto es cuántos "grados de libertad" se tienen). Con base en lo anterior, Wheeler (*op. cit.*) recomienda que se emplea el valor de 8 en lugar de 7.2.

A. Control de α seleccionando E^*

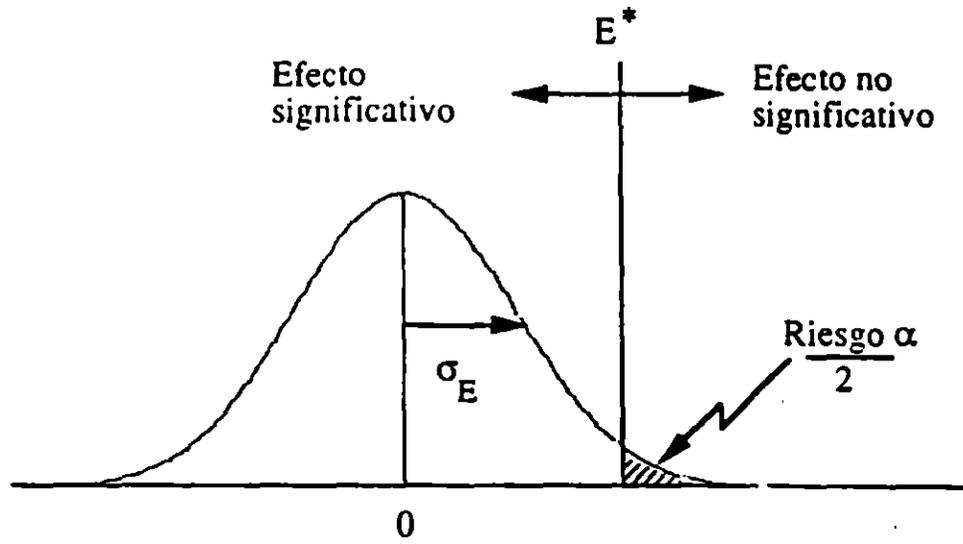


Figura 2.10-1(a): Selección de E^* controlando el valor de α

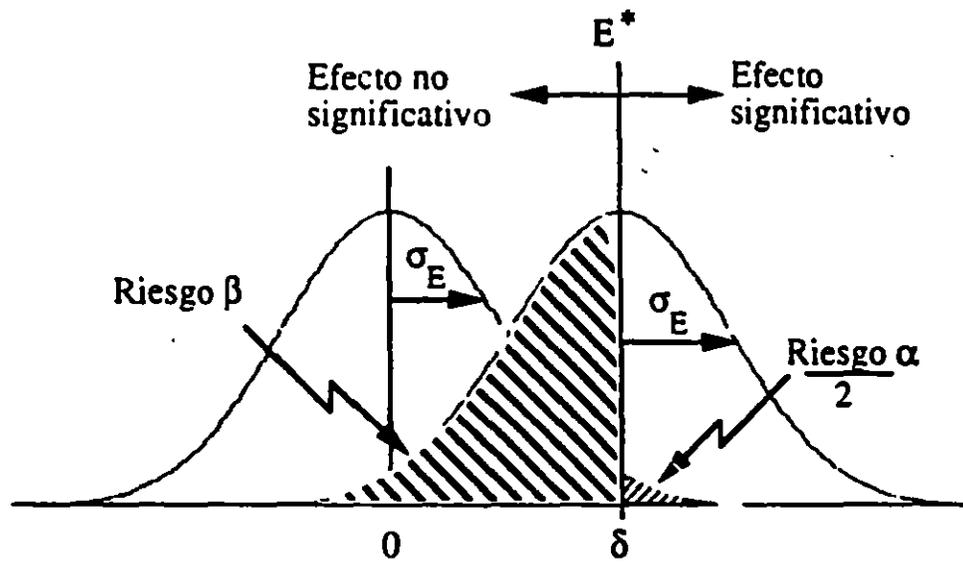


Figura 2.10-1(b): $\beta = 50\%$ en el punto de decisión δ/σ_E

2.11 Puntos centrales

La repetición del experimento en los puntos centrales [ver figura 2.11-1(a)-(c), para uno, dos y tres factores] es importante en factoriales con dos niveles, debido a dos razones: a) proporcionan un estimador del error, con base en el cual se medirán los efectos, y b) produce una prueba para el modelo. Si estos puntos no existiesen, la única manera en que se podría estimar el error es bajo la suposición de que algunas interacciones de orden superior son iguales a cero. Si el valor de ellas es diferente de cero, el error estará sobreestimado. Además, estos puntos permiten determinar un estimador "puro" del error ya que son puntos repetidos. También, un factorial se basa en la suposición de que los cambios en la variable dependiente, se pueden representar adecuadamente con un modelo lineal. La validez de dicha hipótesis no se puede verificar, ya que solamente se tienen dos niveles por cada factor (lo más que se puede ajustar son líneas rectas a través de dos puntos). En caso de existir efectos no-lineales (curvatura), las predicciones que se obtienen al aplicar este diseño, en general no son buenas, excepto en los puntos cercanos a los puntos factoriales (esquinas del cubo).

A. Un factor

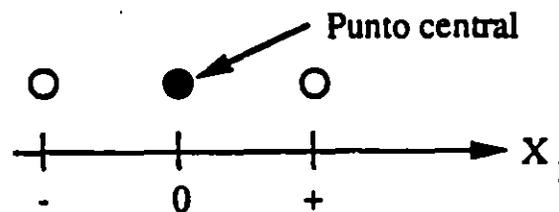


Figura 2.11-1(a): Punto central de un factorial con dos niveles y un factor

Los puntos centrales nos permiten verificar la no-linearidad analizando la magnitud en la diferencia entre los promedios del punto central y los puntos factoriales (ver figura 2.11-2 y 2.11-3).

El efecto de curvatura C , se define como:

$$C = \bar{Y}_{\text{Factorial}} - \bar{Y}_{\text{Central}} \quad (2.11-1)$$

Al igual que cuando se determinaron los efectos de los factores, el valor de C nunca será exactamente igual a cero. Por lo que antes de hacer inferencias sobre la existencia de C , se debe probar la significancia estadística de dicho efecto. Para esto es necesario determinar su variabilidad, o sea s_c . Puesto que C , es la diferencia entre dos promedios, su desviación estándar se puede calcular usando la ecuación 2.11-2.

$$s_c = \sqrt{(s^2 / n_F) + (s^2 / n_C)} = s \sqrt{(1 / n_F) + (1 / n_C)} \quad (2.11-2)$$

B. Dos factores

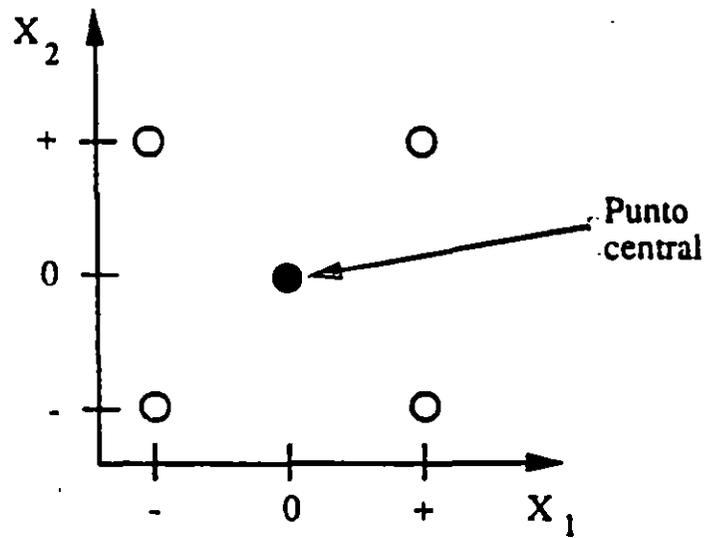


Figura 2.11-1(b): Punto central de un factorial con dos niveles y dos factores

C. Tres factores :

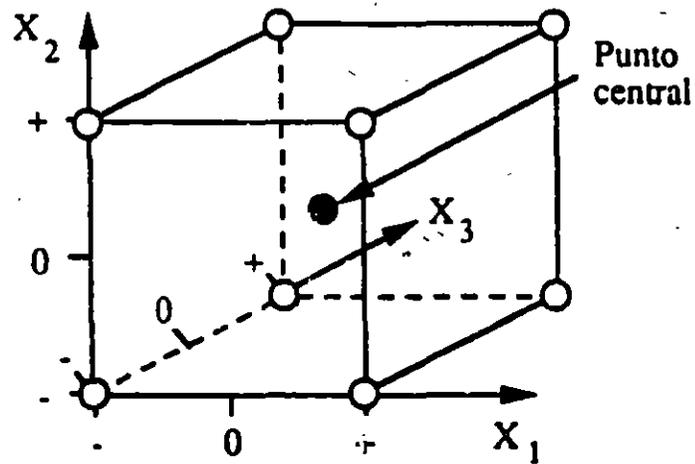


Figura 2.11-1(c): Punto central de un factorial con tres factores

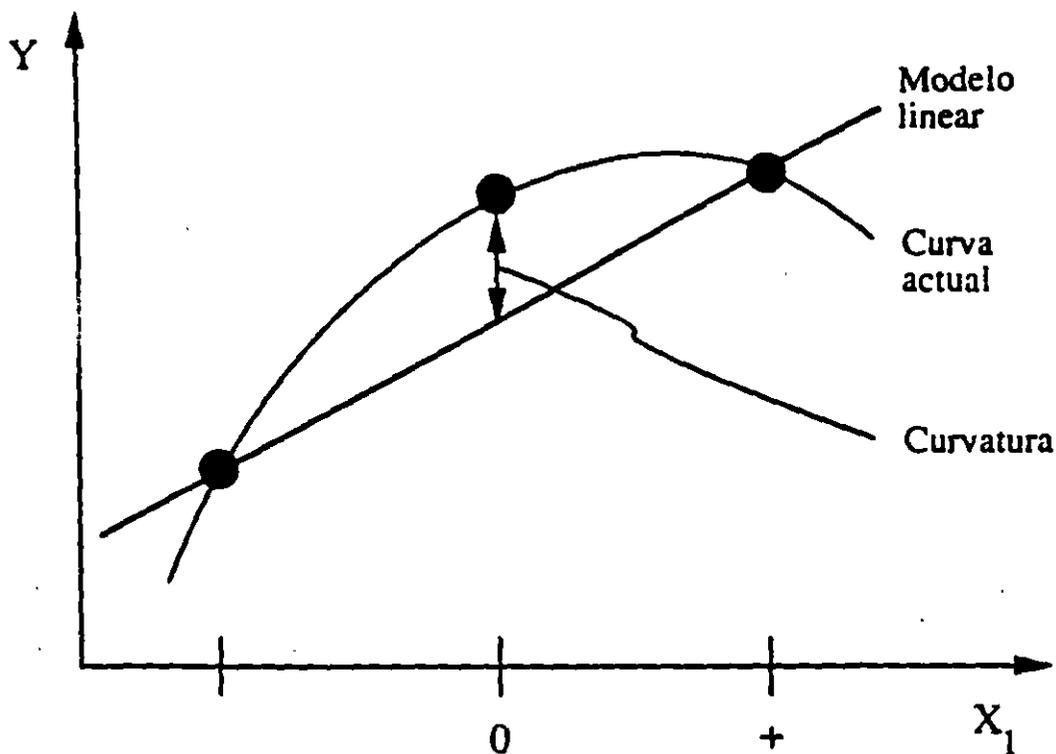


Figura 2.11-2: Curvatura en un factorial con dos niveles y un factor

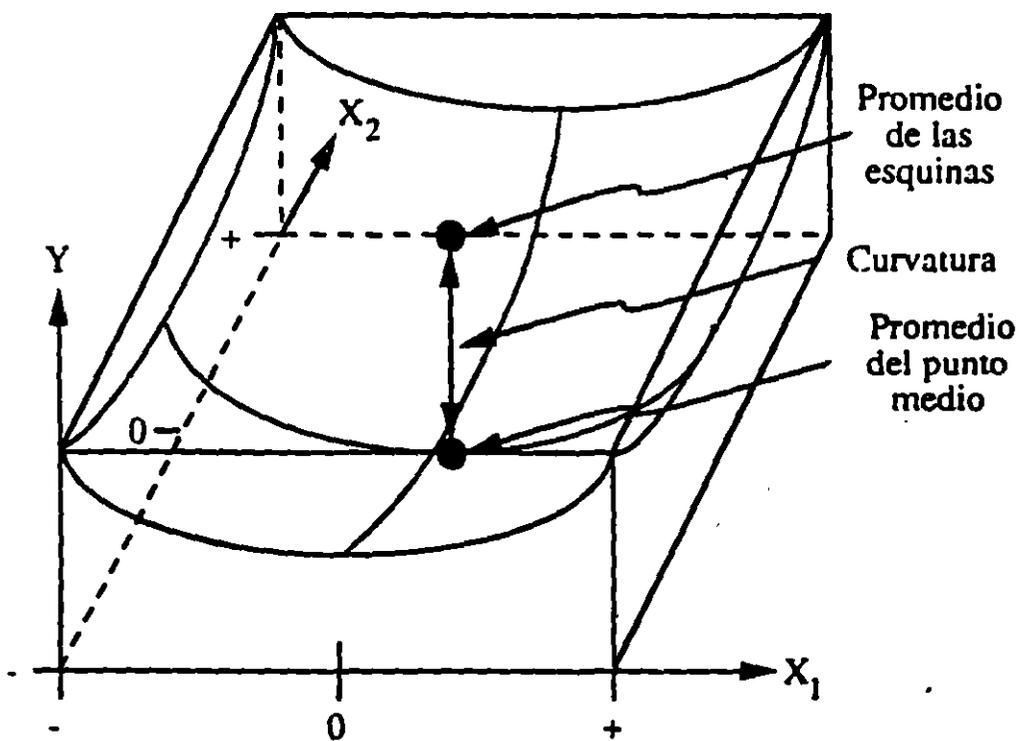


Figura 2.11-3: Curvatura en un factorial con dos niveles y dos factores

donde,

- n_F = número total de puntos factoriales = Nr ,
- n_C = número total de puntos centrales,
- N = número de esquinas en el factorial,
= 2^k (el valor de N no considera los puntos centrales),
- r = número de repeticiones en cada esquina,
- s = estimador de la desviación estándar de Y .

Para probar la significancia de C se calcula el estadístico t_c , ($t_c = C/S_c$) el cual se compara a los valores críticos de t' de la tabla A-5.

2.12 Ejemplo de un factorial 2^4 con puntos centrales

2.12.1 Planteamiento y propuesta del diseño

Este ejemplo es tomado de un estudio realizado en el Centro de Investigación de Energía y Minerales de la Universidad de Dakota del Norte, E.U.A.⁴ El objetivo general del proyecto era controlar las emisiones de SO_2 durante la combustión del carbón en plantas eléctricas por medio de la inyección de carbonato de sodio seco en la parte superior de la caldera (usada para controlar su emisión). Dicho método funcionó adecuadamente en el laboratorio, pero cuando se implementó en la planta, ocasionalmente se formó NO_2 , provocando un humo color café. Con el fin de investigar las condiciones bajo las cuales se produce NO_2 , se diseñó un experimento factorial para desarrollarse en el laboratorio.

La variable dependiente a estudiar fue NO_2 , con los factores⁴ siguientes: concentración de SO_2 (X_1), concentración de oxígeno (X_2), humedad (X_3) y temperatura (X_4). Sus niveles se presentan en la tabla 2.12.1-1.

En el diseño se incluyeron cuatro puntos centrales para tratar de detectar la presencia de curvatura (no-linearidad). El diseño con los valores de X en forma codificada y no codificada se muestra en la tabla 2.12.1-2.

Para determinar si los 16 experimentos proporcionan la precisión deseada se usó la ecuación 2.10-1

$$N = (8.0 \sigma/\delta)^2$$

La utilización de esta fórmula requiere que todos los datos tengan la misma variabilidad. En este ejemplo, se sabe que la concentración de NO_2 tiene un porcentaje constante de error de 25 por ciento, no un error constante, por lo que es necesario transformarlos. En este caso,

A. Factores y niveles:

Factor	Niveles	
	-	+
X ₁ = Concentración de SO ₂ , ppm	0	3000
X ₂ = Temperatura, °F	150	350
X ₃ = Concentración de O ₂ , %	0	6
X ₄ = Humedad, %	0	20

B. Variable dependiente: Concentración de NO₂ producida, ppb

$$Y = \log(\text{NO}_2)$$

C. Variabilidad: La variabilidad experimental (en la determinación de NO₂) tiene un error estándar de 25%.

Y tiene una desviación estándar de $\log(1.25)$, $\sigma_Y = 0.10$

$$N = [(8.0)(0.10)/(0.18)]^2 = 19.75$$

Tabla 2.12.1-1: Factores y niveles del ejemplo del diseño factorial 2⁴.

No.	Valores codificados de X				Valores actuales de X				Orden	NO ₂ (ppb)	Y=log(NO ₂)
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄			
1	-	-	-	-	0	150	0	0	4	130	2.11
2	+	-	-	-	3000	150	0	0	16	150	2.18
3	-	+	-	-	0	350	0	0	13	210	2.32
4	+	+	-	-	3000	350	0	0	19	200	2.30
5	-	-	+	-	0	150	6	0	5	110	2.04
6	+	-	+	-	3000	150	6	0	18	18000	4.26
7	-	+	+	-	0	350	6	0	2	110	2.04
8	+	+	+	-	3000	350	6	0	10	150000	5.18
9	-	-	-	+	0	150	0	20	6	130	2.11
10	+	-	-	+	3000	150	0	20	9	150	2.18
11	-	+	-	+	0	350	0	20	3	250	2.40
12	+	+	-	+	3000	350	0	20	12	140	2.15
13	-	-	+	+	0	150	6	20	8	140	2.15
14	+	-	+	+	3000	150	6	20	17	22000	4.34
15	-	+	+	+	0	350	6	20	11	150	2.18
16	+	+	+	+	3000	350	6	20	15	170000	5.23
17	0	0	0	0	1500	250	3	10	1	470	2.67
18	0	0	0	0	1500	250	3	10	7	740	2.87
19	0	0	0	0	1500	250	3	10	14	830	2.92
20	0	0	0	0	1500	250	3	10	20	730	2.86

$$\bar{y}_0 = 2.83$$

$$s_0 = 0.11$$

Tabla 2.12.1-2: Datos para el diseño factorial 2⁴

la aplicación de la transformación logarítmica es apropiada, ya que los porcentajes constantes se convierten en cantidades constantes en dicha escala. O sea, $Y = \log(\text{NO}_2)$ es la variable que será analizada.

La desviación estándar es 25 por ciento o $\sigma = \log(1.25) = 0.10$. Además, se decidió que cualquier factor que afectara la concentración de NO_2 en más de un 50 por ciento, se consideraría importante, esto es, $\delta = \log(1.5) = 0.18$. El número de puntos factoriales para obtener dicha precisión es 19.75 (ver tabla 2.12.1-1). En lugar de redondear al siguiente múltiplo de 16, esto es 32, se decidió realizar 16 experimentos sujetos a menor precisión. El valor de δ esperado es,

$$\delta = 8.0\sigma / \sqrt{N} = 8.0(.10) / \sqrt{16} = 0.20$$

lo cual quiere decir que hubo un error en la concentración de NO_2 de $10^{0.20} = 1.59$. Esto corresponde a un incremento en la mencionada concentración de 59 por ciento. Dicho valor es muy cercano al de la especificación original.

Después de haber determinado el número de experimentos, se definió el orden de los mismos. Los puntos centrales se espaciaron uniformemente (en tiempo), para asegurar que el valor de σ^2 se estimará de manera adecuada. Los puntos factoriales se ejecutaron en forma aleatoria (usando el generador de números aleatorios de una calculadora para obtener la secuencia). A continuación, se recopilaron los 20 puntos muestrales (esto es, cada experimento se llevó a cabo, midiéndose la concentración de NO_2) en el orden indicado (ver tabla 2.12.1-2). El análisis se realizó usando los valores de $\log(\text{NO}_2)$, ya que, como se mencionó anteriormente, todos los datos tienen la misma precisión en la escala logarítmica (esto es, $\sigma = 0.10$ para todos los experimentos). Con el fin de verificar la desviación estándar "conocida", ésta se calculó de los puntos centrales:

$$s_o = \sqrt{[(2.67 - 2.83)^2 + (2.87 - 2.83)^2 + (2.92 - 2.83)^2 + (2.86 - 2.83)^2] / (4 - 1)}$$

$$s_o = \sqrt{[(-0.16)^2 + (0.04)^2 + (0.09)^2 + (0.03)^2] / 3}$$

$$s_o = \sqrt{(0.362) / 3}$$

$$s_o = 0.11$$

Este valor es aproximado al valor esperado (0.10) y con base en ello se decidió utilizarlo en los análisis subsecuentes.

2.12.2 Análisis gráfico

Antes de iniciar el análisis numérico de un diseño factorial, es adecuado obtener la mayor información posible. Un primer paso es graficar los datos en el cubo que representa la región experimental. En el ejemplo que se está analizando, esto se puede ver en la figura 2.12.2-1 (a) y (b).

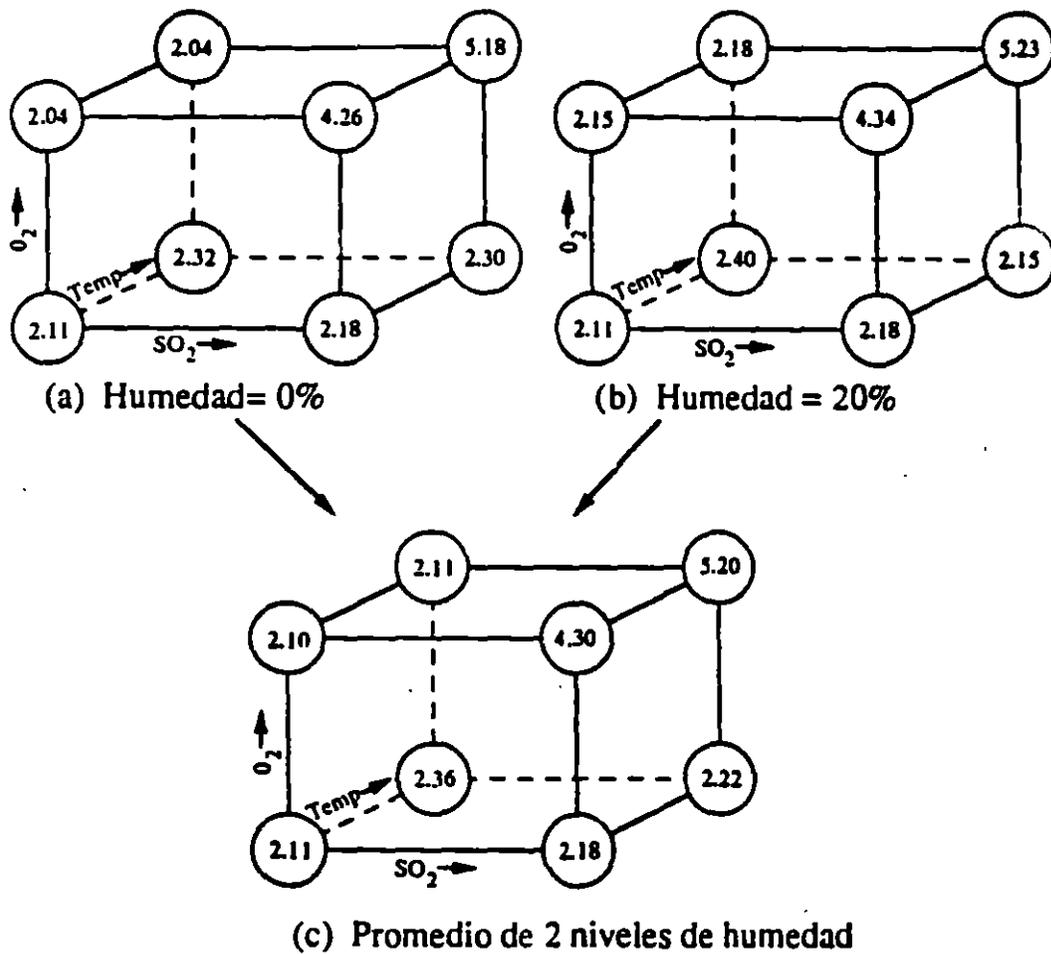


Figura 2.12.2-1: Representación gráfica de los datos del ejemplo de emisión de NO_2

Al comparar los cubos, nivel inferior contra nivel superior de humedad, es factible concluir que el impacto de este factor es mínimo. Apoyado en esto, se promediaron los dos niveles de dicho factor [ver figura 2.12.2-1(c)]. Esta figura muestra, que las tres variables restantes tienen efectos positivos. También parece ser que existe interacción entre $X_1X_2X_3$, ya que la interacción X_1X_3 al nivel inferior de X_2 (parte inferior del cubo) es menor que la interacción X_1X_3 al nivel superior de X_2 (parte superior del cubo).

Para investigar la existencia de interacciones dobles, se elaboraron tres gráficas bidimensionales de las variables X_1 , X_2 y X_3 (X_4 se ignoró ya que su efecto no es importante), las cuales se muestran en la figura 2.12.2-2. Nuevamente, se observa que todos los factores tienen efectos individuales y las interacciones dobles parecen ser significativas.

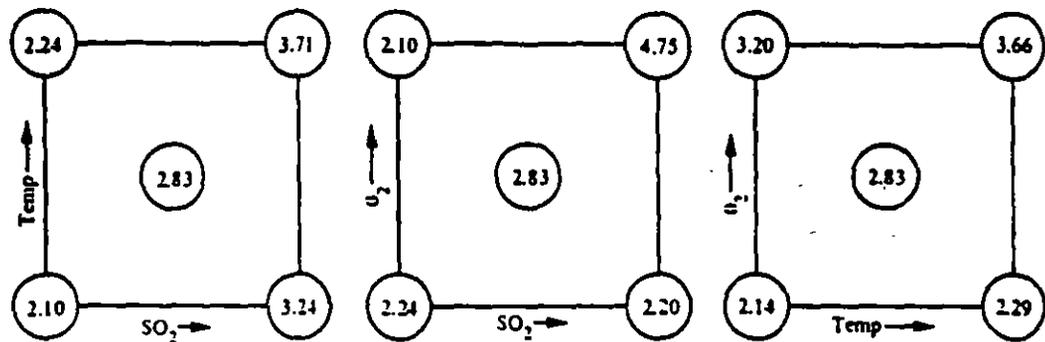


Figura 2.12.2-2: Gráficas bidimensionales para X_1, X_2 y X_3

2.12.3 Análisis numérico

La determinación exacta de los efectos e interacciones, así como su significancia estadística, requiere de un análisis numérico. Dichos cálculos se realizan usando la tabla correspondiente para un factorial 2^4 (ver tabla B.2-4). Ésta se incluye en la tabla 2.12.3-1, la cual contiene el valor de $Y = \log(\text{NO}_2)$. Cada efecto se calcula en la forma indicada en la Sección 2.9; esto es, sumando los valores de Y con los signos apropiados y dividiendo por el número de observaciones al nivel superior (o inferior) de cada variable (o interacción). Por ejemplo, la interacción X_1X_2 es:

$$\begin{aligned} X_1X_2 &= [Y_1 - Y_2 - Y_3 + Y_4 + Y_5 - Y_6 - Y_7 + Y_8 + Y_9 - Y_{10} - Y_{11} + Y_{12} + Y_{13} - Y_{14} \\ &\quad - Y_{15} + Y_{16}] / 8 \\ &= (2.11 - 2.18 - 2.32 + \dots - 2.18 + 5.23) / 8 \\ &= 1.37 / 8 = 0.171 \end{aligned}$$

Los resultados de todas las operaciones se presentan en la tabla mencionada. Asimismo, el efecto de curvatura se calcula como la diferencia entre la media de los puntos factoriales y la media de los puntos centrales. En este ejemplo, el valor determinado fue -1.007 y los efectos de los factores e interacciones varía de -0.04 a 1.34 (ver tabla 2.12.3-1).

La siguiente parte del análisis conduce a la pregunta: ¿Los efectos detectados son reales o provocados por variaciones aleatorias de los datos? Para contestarla es necesario calcular los valores de t_E o t_c (esto es, dividiendo los efectos y la curvatura por su desviación estándar). Estos valores se comparan a t' .

$$t_E = \text{Efecto} / s_E = \text{Efecto} / s\sqrt{(2/pr)} = \text{Efecto} / ((.10\sqrt{2/(8)*1}) = \text{Efecto} / 0.05$$

$$\begin{aligned} t_c &= \text{Curvatura} / s_c = \text{Curvatura} / s\sqrt{(1/p'r)} = 1/n_c \\ &= \text{Curvatura} / (.10\sqrt{1/(16)(1) + 1/(4)}) = \text{Curvatura} / 0.056 \end{aligned}$$

donde t^* = valor de t (de la tabla A-5)

s = estimador de la desviación estándar

= 0.10 en este ejemplo

p = número de signos positivos en las columnas usadas, para calcular los efectos o interacciones (= $2^t/2$)

p' = número total de signos positivos en la columna de la media (= 2^t)

r = número total de repeticiones (= 1 en este ejemplo)

nc = número total de puntos centrales (= 4 en este caso)

Los valores correspondientes de t_E y t_c se indican en la tabla mencionada. Al comparar estos valores en la forma establecida, se observa que los efectos y todas las interacciones

No.	Medida	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1X_2	X_1X_3	X_1X_4	X_2X_3	X_2X_4	X_3X_4	$X_1X_2X_3$	$X_1X_2X_4$	$X_1X_3X_4$	$X_2X_3X_4$	$X_1X_2X_3X_4$	$Y = \log(N_2)$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2.11
2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2.18
3	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2.32
4	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2.30
5	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2.04
6	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	4.26
7	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2.04
8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	5.18
9	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2.11
10	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2.18
11	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2.40
12	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2.15
13	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2.15
14	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	4.24
15	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2.18
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	5.23
$\Sigma (+)$	45.17	27.82	23.80	27.42	22.74	23.27	27.95	22.41	23.21	22.55	22.81	23.68	22.44	22.64	22.62	22.67	
$\Sigma (-)$	0	17.35	21.37	17.75	22.43	21.90	17.22	22.76	21.96	22.62	22.36	21.49	22.73	22.53	22.55	22.50	
$\Sigma (+) + \Sigma (-)$	45.17	45.17	45.17	45.17	45.17	45.17	45.17	45.17	45.17	45.17	45.17	45.17	45.17	45.17	45.17	45.17	
$\Sigma (+) - \Sigma (-)$	45.17	10.47	2.43	9.67	0.31	1.37	10.73	-0.35	1.25	-0.07	0.45	2.19	-0.29	0.11	0.07	0.17	
Efectos	2.823	1.309	0.304	1.209	0.039	0.171	1.341	-0.44	0.156	-0.09	0.056	0.274	-0.036	0.014	0.009	0.021	
t_E	-	26.18	6.08	24.18	0.78	3.42	26.82	-8.8	3.12	-1.8	1.12	5.48	-7.2	0.28	0.18	0.42	

Curvatura = Promedio de puntos factoriales - Promedio de puntos centrales = 2.823 - 2.830 = -.007

$$t_c = -.007 / .056 = -0.12$$

Valor crítico de t , $t^* = 1.96$ (95% de confiabilidad, grados de libertad = ∞)

Tabla 2.12.3-1. Cálculo de los efectos e interacciones

de X_1 , X_2 y X_3 son significativas, mientras que la humedad (X_4) y la curvatura no lo son. Asimismo, la triple interacción (X_1, X_2, X_3) tiene un efecto conjunto en la formación de NO_2 . Esto se presenta en la figura 2.12.2-1(c), la cual refleja que el $\log(\text{NO}_2)$ es constante, excepto al nivel superior de SO_2 y O_2 . Además, incrementos en la temperatura aumentan la producción de NO_2 .

Al presentar los resultados, el hecho de que las interacciones sean significativas complica las cosas, ya que indica que el fenómeno que está ocurriendo no podrá describirse, de manera adecuada, con el efecto promedio de cada variable. Por lo tanto, la conclusión final se resumirá en una ecuación que se graficará.

2.12.4 Interpretación de resultados

Los resultados del experimento demuestran que no existe suficiente evidencia de que la humedad afecta la producción de NO_2 . Éste fue un resultado inesperado. Las otras tres variables [concentración de SO_2 (X_1), temperatura (X_2) y concentración de O_2 (X_3)] influyen en la cantidad de NO_2 generada (Y). A pesar de ello, la significancia detectada en la triple interacción $X_1X_2X_3$ toma precedencia en la interpretación. Esta interacción implica que en la formación de NO_2 existe una triple dependencia entre dichos factores, por lo que ni los efectos principales ni las interacciones dobles deben interpretarse separadamente. La figura 2.12.2-1(c) muestra que los niveles de NO_2 se incrementan cuando SO_2 y O_2 aumentan. El mayor incremento de NO_2 ocurre cuando las tres variables crecen simultáneamente. Probablemente el humo café se produce bajo esas circunstancias. Es importante señalar que este resultado nunca se hubiera descubierto con métodos de experimentación tradicional, ya que cada variable se tendría que separar y analizar a su nivel superior e inferior, manteniendo las otras variables constantes a sus niveles inferiores.

En la mayoría de los casos será difícil detectar interacciones significativas, del orden mayor que dos. Pero cuando suceda, como en este ejemplo, la elaboración de cubos (como en la figura 2.12.2-1) ayudará en la interpretación.

2.12.5 Resultados expresados en forma matemática

Cuando se quiere predecir los resultados es necesario expresar el comportamiento de la variable dependiente por medio de una ecuación matemática. En un factorial 2^k , este modelo es:

$$\begin{aligned}
 Y = & b_0 && \text{- término constante} \\
 & + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k && \text{- términos lineales} \\
 & + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + \dots + b_{k-1,k}X_{k-1}X_k && \text{- interacciones dobles} \\
 & + b_{123}X_1X_2X_3 + \dots && \text{- interacciones del orden superior a 2}
 \end{aligned}$$

donde,

\hat{Y} = valor estimado (predecido) de Y

X_i = valor codificado del factor i

= [valor del factor - valor del centro] / [valor superior - valor del centro]

Centro = (nivel superior del factor - nivel inferior del factor) / 2

Las incógnitas de la ecuación se obtienen fácilmente a partir de los efectos ya calculados.

$$b_0 = \bar{Y}$$

$$b_i = 1/2[\text{efecto del factor } i]$$

$$b_{ij} = 1/2[\text{interacción } X_i X_j]$$

$$b_{ijk} = 1/2[\text{interacción triple } X_i X_j X_k]$$

etcétera

Estos coeficientes son igual a la mitad del valor de los efectos, ya que representan el cambio de Y por una unidad de cambio en X (por ejemplo de X=0 a X=1), mientras que los efectos identifican el cambio en Y por 2 unidades de cambio en X (de -1 a 1).

En el ejemplo que se ha estado trabajando, la ecuación (excluyendo los términos no significativos) es

$$\begin{aligned} \hat{Y} = & 2.823 + 0.654X_1 + 0.152X_2 + 0.604X_3 \\ & + 0.086 X_1X_2 + 0.670 X_1X_3 + 0.078 X_2X_3 \\ & + 0.137 X_1X_2X_3 \end{aligned}$$

donde,

$$X_1 = (\text{Concentración de SO}_2 - 1500) / 1500$$

$$X_2 = (\text{Temperatura} - 250) / 100$$

$$X_3 = (\text{Concentración de O}_2 - 3\%) / 3\%$$

Los valores estimados con base en esta ecuación son:

	X_1	X_2	X_3	\hat{Y}	NO_2
1)	-1	-1	-1	2.110	129
2)	1	-1	-1	2.180	151
3)	-1	1	-1	2.360	229
4)	1	1	-1	2.226	168
5)	-1	-1	1	2.096	125
6)	1	-1	1	4.298	19,900
7)	-1	1	1	2.110	129
8)	1	1	1	5.204	160,000
9)	0	0	0	2.823	665

Puesto que la ecuación incluye todos los términos de X_1 , X_2 y X_3 , las predicciones son idénticas (excepto por errores de redondeo) a los promedios mostrados en la figura

2.12.2-1(c). En caso de que alguno de los términos no hubiera sido significativo (y por lo tanto eliminado de la ecuación), las estimaciones hubieran sido diferentes y *mejores* que los datos originales debido al ajuste. En esta situación es recomendable que se presenten gráficamente (en el cubo), de tal manera que se puedan emplear en las conclusiones.

Cuando los únicos términos significativos son los efectos principales, la forma más sencilla de representar los resultados experimentales es mediante una ecuación matemática. Por otra parte, si se tienen interacciones importantes, se deben emplear gráficas (como las figuras 2.9.3-1, 2.12.2-1, 2.12.2-2) que servirán para clarificar la interpretación.

2.12.6 Interpretación de efectos sin repeticiones

Cuando se carece de repeticiones en los experimentos, no es factible calcular el valor de t , ni tampoco se puede utilizar para decidir la significancia de los efectos. Bajo estas circunstancias, la alternativa es usar un procedimiento de tipo gráfico, el cual es el siguiente:

Si ninguno de los factores es significativo, todas las observaciones se considerarán repeticiones aleatorias. Además, los efectos principales e interacciones serán diferencias de dos promedios de los datos, y por el Teorema de límite central (discutido en la Sección 1.4.1) se sabe que su distribución es normal con media cero. En consecuencia, la gráfica de probabilidad normal de los efectos, tendrá la forma de una línea recta (como la descrita en la Sección 1.5.3.1.1). Cualquier efecto significativo aparecerá en la gráfica como una observación aberrante. Este método funciona adecuadamente, si la mayoría de los efectos son no significativos y se pueden representar en una recta.

Para ilustrarlo, se usarán los datos del ejemplo anterior y se supondrá que no se tienen repeticiones de los puntos centrales. En la tabla 2.12.6-1 se presentan los efectos ordenados (en orden ascendente) y sus valores normalizados (en forma similar a la tabla 1.5.3.1-1). La gráfica de probabilidad normal de sus efectos se muestra en la figura 2.12.6-1. Con base en ella, se observa que los efectos que se comportan como observaciones aberrantes (esto es, X_1X_2 , X_1 , X_2 , X_3 , $X_1X_2X_3$, X_1X_2 y X_2X_3) son los mismos que se identificaron como significativos usando el estadístico t (ver tabla 2.12.3-1). Al trazar una recta a través de los primeros ocho pares ($E_{(i),z}$) en la figura 2.12.6-1, la interpretación se facilita. Observe que el inverso de la pendiente es un estimador del error estándar de un efecto $\hat{\sigma}_E = 1/17.269 = .0579$, cuyo valor es aproximado al error estándar del efecto calculado con los puntos centrales [esto es, $s_E = .11 / (2/8) = 0.055$].

Dichos efectos se presentan en la figura 2.12.6-2, en forma de una gráfica de control con límites $2\hat{\sigma}_E$ y $3\hat{\sigma}_E$. (Para una estimación más precisa del valor de σ_E y los límites de la gráfica de control, basado en el estadístico t , vea el artículo de Lenth.)⁵

En este caso, el análisis gráfico de los datos nos conduce a la misma interpretación que se obtendría usando el estadístico t , suponiendo que existen repeticiones. En general, esto será válido siempre y cuando: a) existan al menos 16 experimentos (esto es, 15 efectos), y b) más del 66 por ciento de los efectos sean no significativos, de tal manera que se pueda obtener una recta en una gráfica de probabilidad normal. Esta última suposición ha sido denominada como *hipótesis de la esparcidad del efecto* por Box.⁶ Finalmente, las figuras 2.12.6-3 a 2.12.6-5 son formatos de gráficas de probabilidad normal, que se pueden emplear para graficar los efectos de factores con 8, 16 y 32 experimentos.

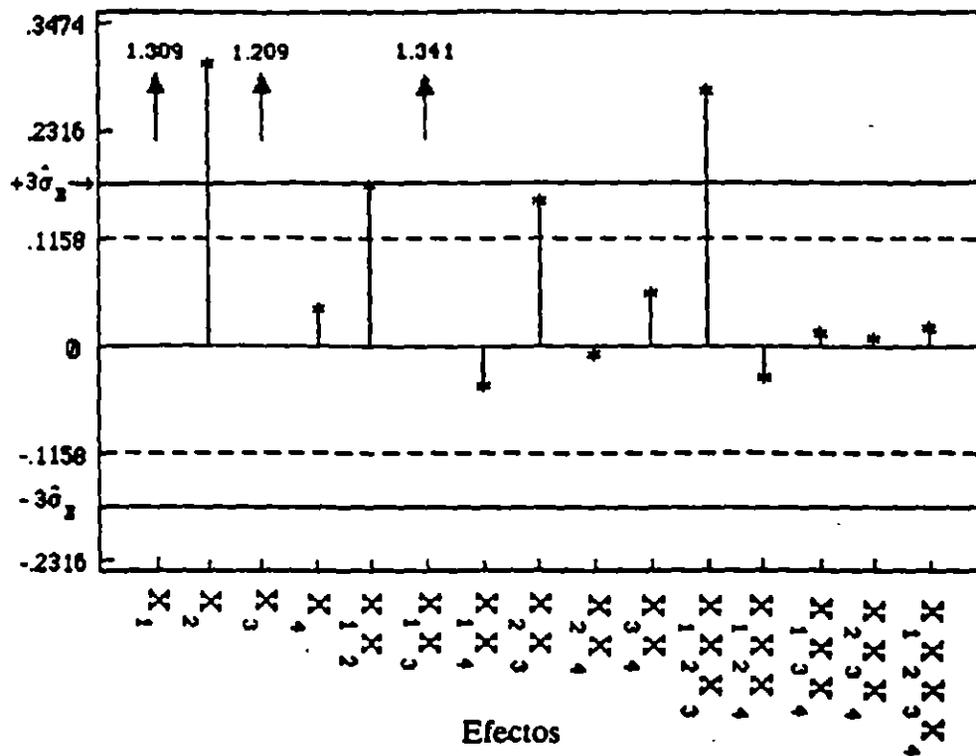


Figura 2.12.6-2: Gráfica de control de los efectos

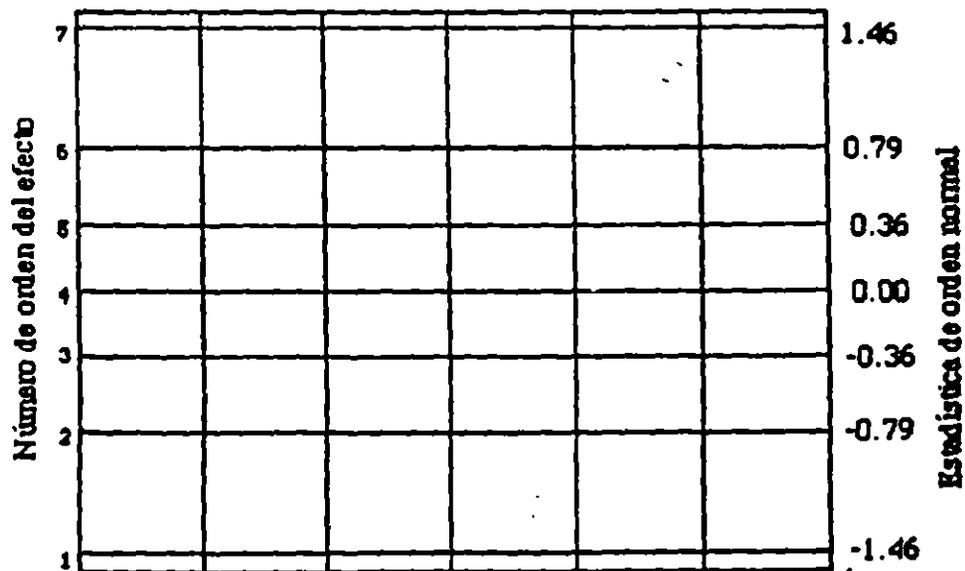


Figura 2.12.6-3: Formato de una gráfica de probabilidad normal para 8 experimentos

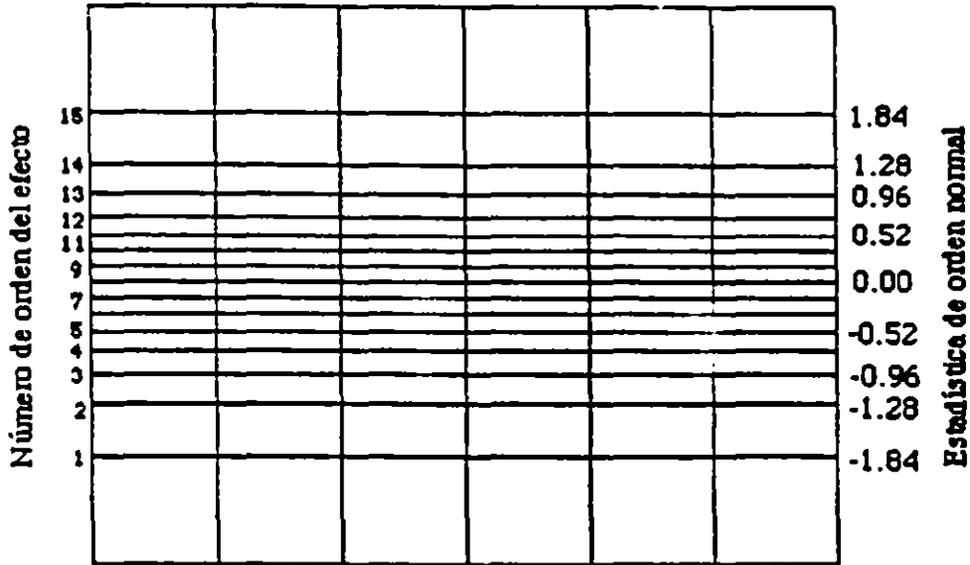


Figura 2.12.6-4: Formato de una gráfica de probabilidad normal para 16 experimentos

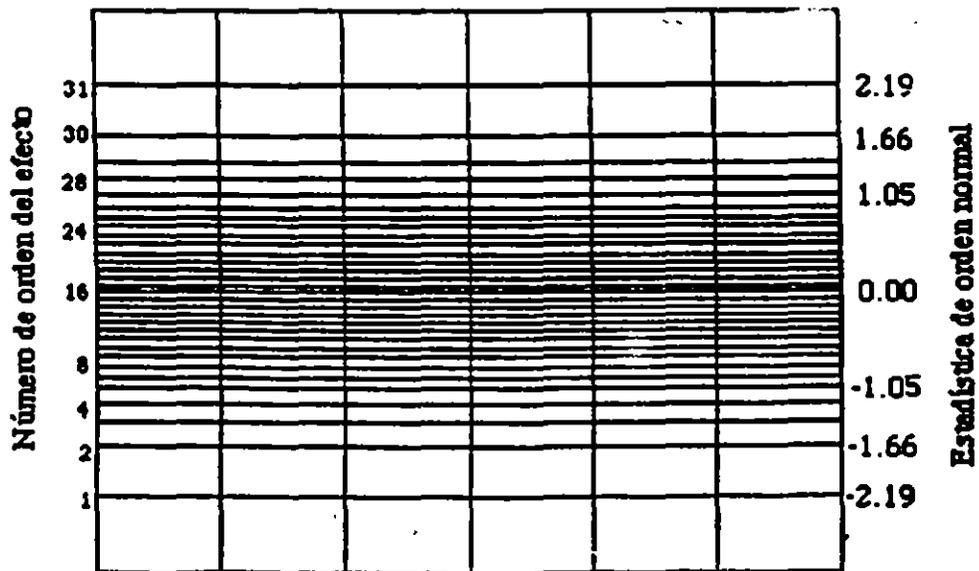


Figura 2.12.6-5: Formato de una gráfica de probabilidad normal para 32 experimentos

2.13 Experimentos factoriales en bloques

Antes de iniciar, es importante indicar que cuando los experimentos de un diseño factorial se realizan en grupos, a dichos grupos se les denomina bloques. Por ejemplo, en un estudio cuyo objetivo es investigar el efecto de temperatura y tiempo en el rendimiento de una reacción química, se estructuró un factorial 2^2 con dos repeticiones (ver tabla 2.13.1), el cual se ejecutó de dos formas: en grupos (bloques) y sin agrupar (sin bloques).

Diseño sin bloques				Diseño en bloques							
Tiempo		Orden	Yield Y	Tiempo		Orden	Yield Y				
Temp. X_1	X_2			Temp. X_1	X_2						
-	-	5	Y_1	-	-	1	Y_1				
-	-	7	Y_2	+	-	3	Y_2				
+	-	4	Y_3	-	+	2	Y_3				
+	-	1	Y_4	+	+	4	Y_4				
Día 1				-----							
				-	+	6	Y_5	-	-	2	Y_5
				-	+	3	Y_6	+	-	3	Y_6
				+	+	2	Y_7	-	+	1	Y_7
+	+	8	Y_8	+	+	4	Y_8				
				Día 2							

Tabla 2.13.1: Factorial 2^2 con dos repeticiones

En el diseño que no tiene bloques, el orden de los experimentos es aleatorio y todos se llevan a cabo en un solo día. En el otro caso, una repetición completa del diseño se realiza en cada día (o bloque) y el orden se aleatoriza dentro de cada bloque.

Existen tres razones por las cuales se utilizan bloques, y son las siguientes: a) evitar que las variables latentes confundan los efectos de tratamientos; b) disponer de mayor información para las conclusiones, y c) incrementar la precisión en la estimación y prueba de los efectos de tratamientos. Estos conceptos se ilustrarán con datos del experimento de la reacción química que se mostró en la tabla 2.13-1. Si en un diseño sin bloques se requieren ocho repeticiones, pero sólo se pueden completar cuatro por día, esto provocará que tres de los cuatro experimentos al nivel superior del primer factor (temperatura) se implementen en el primer día y tres de los cuatro al otro nivel. El efecto de este factor puede sesgarse sustancialmente, si existe la posibilidad de que una variable latente cambie en esos días. Una forma de evitar este problema (el sesgo) es estructurar el experimento en bloques, el cual se puede considerar como otro factor. El proceso de aleatorización en este diseño, permite que el factor de bloque sea el único que pueda confundirse o sesgarse debido a cambios entre el día 1 y 2 de alguna variable latente. Note que los efectos promedios de X_1 y X_2 no están confundidos con bloques ni con ninguna variable latente que haya, cuyo valor haya cambiado entre los días 1 y 2.

Ahora bien, si se completa el primer bloque de experimentos (día 1) y la materia prima usada procede de un solo lugar, las conclusiones serán válidas, exclusivamente, para dicho lugar. Sin embargo, si el segundo bloque se lleva a cabo empleando materia prima de otro lugar, las conclusiones podrán expandirse. Por otra parte, si los dos lugares en que se adquiere la materia prima se selecciona aleatoriamente de varias alternativas, en este caso, las conclusiones que se obtengan serán válidas para todos los lugares considerados en el proceso de selección. Al formar los bloques se recomienda que los grupos se integren con unidades experimentales homogéneas y que las características de las unidades entre bloques sean heterogéneas. De esta manera, los efectos de tratamientos se compararán a la variabilidad dentro de los bloques y su precisión aumentará. A manera de comentario diremos que, originalmente, los diseños en bloques se utilizaron en experimentos agrícolas, donde las unidades experimentales eran las parcelas. Al agrupar parcelas adyacentes y similares en bloques, es posible evitar que los efectos de la fertilidad del suelo sesguen los efectos de tratamientos o que inflen el valor del estimador de σ_E . Además, al formar bloques de diferentes áreas y tipos de suelo, las conclusiones de estos experimentos agrícolas se pueden aplicar de manera más general.

Asimismo, conviene señalar que en un diseño de bloques con arreglo factorial (ver tabla 2.13-1), los efectos principales e interacciones de X_1 y X_2 se calculan en la forma indicada en las Secciones 2.5, 2.6 y 2.9. Debido a que en este tipo de diseño, generalmente, no se hacen repeticiones, no es factible calcular la desviación estándar de los efectos con la ecuación 2.1.2-2 (Sección 2.1.2). Esto se puede resolver usando gráficas de probabilidad normal para investigar la significancia de los efectos o determinando los valores de t (método más exacto). Adicionalmente, no deben existir interacciones entre el efecto de bloque y los otros factores. En consecuencia, es factible utilizar como estimador del error estándar del efecto $\hat{\sigma}_E$, la raíz cuadrada del promedio del valor de la interacción del bloque al cuadrado y el estadístico $t = E/\hat{\sigma}_E$ para probar la significancia de los efectos.

2.13.1 Un ejemplo usando dos bloques

En un experimento de laboratorio cuyo objetivo es estudiar la influencia de dos factores en la vida media (duración promedio del efecto) de un pesticida químico aplicado en el suelo (ver figura 2.13.1-1), la unidad experimental es el recipiente que contiene el suelo al cual se aplicó el pesticida.

Cada recipiente se almacenó en una cámara de crecimiento a temperatura y humedad constante. El nivel de humedad en cada uno de ellos, se monitoreó regularmente y para asegurar que dicho nivel se mantuviera constante, se añadió agua cuando fue necesario. La vida media del pesticida se determinó en cada recipiente, tomando muestras de suelo semanalmente, midiendo la concentración del producto en ellas (las muestras). Los resultados produjeron curvas de tipo exponencial negativo (ver figura 2.13.1-2), las cuales se emplearon para estimar la vida media del pesticida.

En este estudio los factores fueron: temperatura y humedad. Las dos cámaras de crecimiento se mantuvieron a diferentes temperaturas, siendo estos los niveles de dicha variable. Por otra parte, la mitad de los recipientes en cada cámara se conservaron a niveles

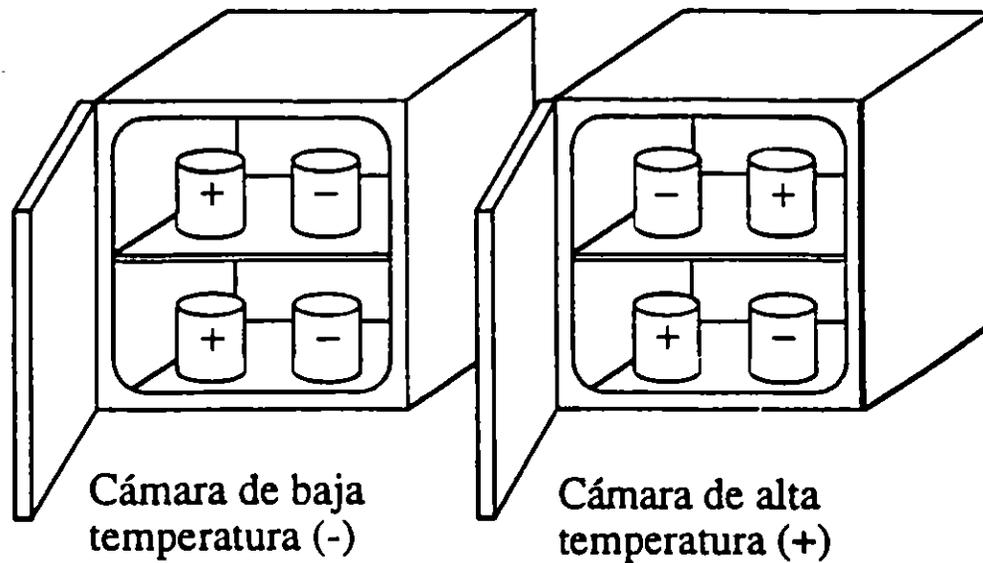


Figura 2.13.1-1: Cámara de crecimiento en el experimento del pesticida

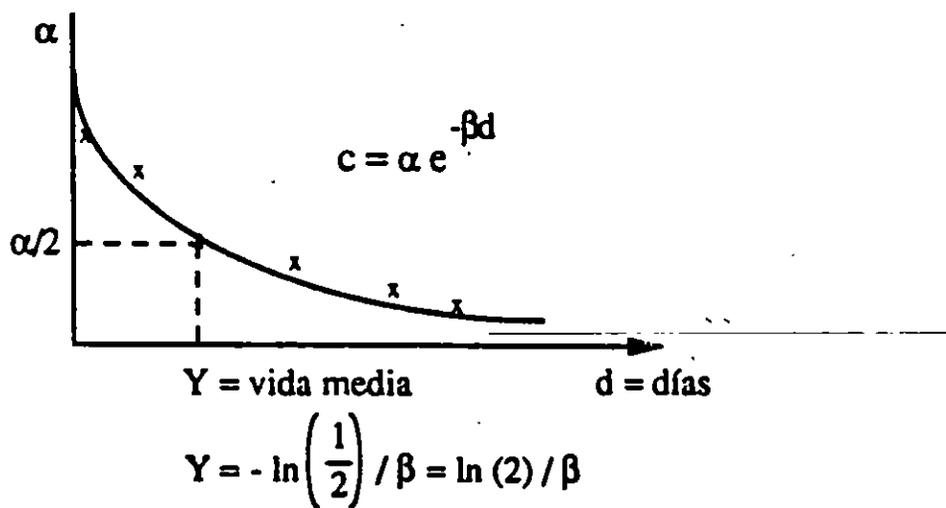


Figura 2.13.1-2: Curva típica de degradación del efecto del pesticida

altos de humedad y el resto, al otro nivel. Además, la posición de los recipientes se asignó en forma aleatoria para evitar sesgos. Los cuatro experimentos se duplicaron simultáneamente, se usaron dos tipos de suelo (1 = arenoso, 2 = arcilloso) con el fin de poder extender las conclusiones a más de un tipo de suelo. De esta forma, se estructuró un diseño de bloques con arreglo factorial.

Los experimentos y resultados se listan en la tabla 2.13.1-1.

No.	Niveles		Bloque	No. codificado		Tipo de suelo	Recipiente aleatorio	Vida media
	X ₁	X ₂		Temp.	%humedad			
1	-	-	1	50°F	15%	1	2	886.3
2	+	-	1	80°F	15%	1	3	187.9
3	-	+	1	50°F	25%	1	1	229.1
4	+	+	1	80°F	25%	1	4	129.8
5	-	-	2	50°F	15%	2	3	167.5
6	+	-	2	80°F	15%	2	4	65.2
7	-	+	2	50°F	25%	2	1	156.3
8	+	+	2	80°F	25%	2	2	31.5

Tabla 2.13.1-1: Resultados del diseño de degradación del pesticida

Los cuatro recipientes con suelo se asignaron aleatoriamente (usando la tabla A-1) sometidos a diferentes combinaciones de temperatura y humedad. Cuando la variable dependiente (vida media, en este ejemplo) tiene un rango muy amplio (esto es, de más de un orden de magnitud, en este caso, 31.5 - 886.3), el análisis se hace usando logaritmos naturales, $\ln(y)$, con el objeto de asegurar que el modelo lineal (ver Sección 2.12.5) del diseño, sea válido. El análisis gráfico de los resultados se presenta en la figura 2.13.1-3, la cual refleja que al incrementar la temperatura y humedad, la vida media del pesticida se reduce (esto es, los efectos son negativos).

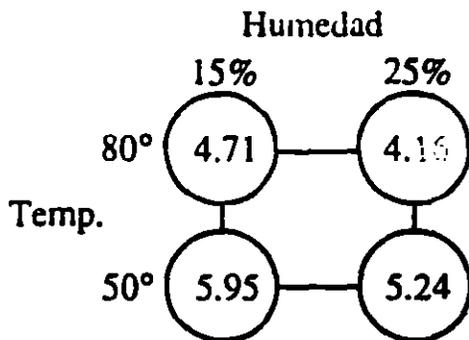


Figura 2.13.1-3: Análisis gráfico del experimento del pesticida

El análisis numérico se presenta en la tabla 2.13.1-2, la cual incluye a la tabla B.2-3. El error estándar de los efectos, se estima sumando y elevando al cuadrado los efectos de la interacción del bloque y dividiendo por el cuadrado del número sumado; a este resultado

se le extrae la raíz cuadrada. En este caso, el número de grados de libertad es 3, el cual identifica el número de efectos del bloque.

No. del experimento	Media	(Bloque)			(Error)			Y ln (vida media)	
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃		X ₁ X ₂ X ₃
1	+	-	-	-	+	+	+	-	6.787
2	+	+	-	-	-	-	+	+	5.236
3	+	-	+	-	-	+	-	+	5.434
4	+	+	+	-	+	-	-	-	4.866
5	+	-	-	+	+	-	-	+	5.121
6	+	+	-	+	-	+	-	-	4.178
7	+	-	+	+	-	-	+	-	5.052
8	+	+	+	+	+	+	+	+	3.451
(Σ +)	40.125	17.731	18.803	17.802	20.225	19.850	20.526	19.242	
(Σ -)	0.000	22.394	21.322	22.323	19.900	20.275	19.599	20.883	
Efecto	5.0156	-1.166	-.630	-1.130	.0813	-.106	.232	-.410	
¹ E	--	-4.179	-2.258	4.05	.291	--	--	--	

$$s_E = \sqrt{\frac{(-.106)^2 + (.232)^2 + (-.410)^2}{3}} = \sqrt{\frac{.2332}{3}} = .279$$

Tabla 2.13.1-2: Tabla computacional para el diseño en bloques con arreglo factorial 2²

La justificación para este estimador es la siguiente: Se sabe que la desviación estándar de observaciones individuales, se puede estimar como:

$$s = \sqrt{\sum (Y_i - \bar{Y})^2 / (N-1)} \quad (2.13.1-1)$$

el cual tiene n-1 grados de libertad. Asimismo, la fórmula para estimar el error estándar de un efecto es:

$$S_E = \sqrt{\sum E_i^2 / m} \quad (2.13.1-2)$$

donde E_i identifica al estimador de la interacción del bloque y m_i es el número de términos de ese tipo de interacciones. Los grados de libertad son igual a m_i, ya que no se utiliza ninguno de ellos en la estimación de E. Se supone que los valores de los términos de las interacciones de bloque son iguales a cero, debido a que los efectos de los factores e interacciones, se consideran iguales en todos los bloques.

También, el estadístico t se calcula para los efectos principales X₁, X₂ y sus interacciones, así como el efecto principal de bloques, dividiendo dichos efectos entre s_E = 0.279. El valor crítico de t' (ver tabla A-5) es 3.182 con 95 por ciento de confianza y 2.353 con 90 por ciento. En consecuencia, se puede concluir, con un 95 por ciento de confiabilidad, que la temperatura y tipo de suelo (bloques) tienen efectos significativos y, con menos del 90 por ciento, que la humedad afecta la vida media del pesticida. A manera de comentario, la mayoría de los programas de computadora existentes para análisis de diseños

factoriales, ofrecen la flexibilidad al usuario para que elija cuáles efectos utilizar en el cálculo del error estándar (ecuación 2.13.1-2).

Los resultados se pueden expresar por medio de la ecuación:

$$\ln(\text{Vida Media}) = Y = 5.156 - 1.166[(\text{Temp} - 65)/15] - 0.63[(\text{Humedad} - 20)/5] \quad (2.13.1-3)$$

El segundo término de esta ecuación se puede eliminar, si se desea una confiabilidad superior al 90 por ciento en la significancia de los efectos. También, observe que en dicha ecuación no se incluyó un término para los bloques, ya que se supone que es válida para todos los tipos de suelo de los cuales se escogieron los que se emplearon en este estudio.

2.13.2 Diseños en bloques con arreglos factoriales

En la tabla 2.13.2-1 se ilustra la forma en que las tablas del Apéndice B-2 se pueden utilizar en la creación y análisis de diversos tipos de diseños en bloques.

Esto se ejemplificará extendiendo el caso anterior a cuatro bloques. De acuerdo con la tabla 2.13.2-1, un factorial 2^2 en cuatro bloques se genera con la tabla B.2-4, donde X_3 y X_4 definirán los bloques. De hecho, la combinación $-,-$ para X_3 y X_4 se asocia al primer bloque; la combinación $-,+$ al segundo; $+,-$ al tercero y $+,+$ al cuarto. Los resultados de este experimento se proporcionan en la tabla 2.13.2-2. Su análisis requerirá el cálculo de los efectos usando la tabla B.2-4 y el error estándar de un efecto cuadrando, y sumando los efectos de X_1X_2 , X_1X_4 , $X_1X_3X_4$, X_2X_3 , X_2X_4 , $X_2X_3X_4$, $X_1X_2X_3$, $X_1X_2X_4$ y $X_1X_2X_3X_4$. Los detalles se dejan como ejercicio.

2.14 Factoriales en bloques parciales (diseños en parcela dividida)

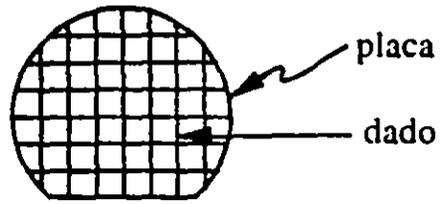
En diversos tipos de experimentos industriales multifactoriales, la unidad experimental para un factor es diferente a la de otro. El hecho de que algunos factores son fáciles de cambiar o manipular en el transcurso del experimento, mientras que en otros es algo difícil de realizar, restringe la práctica de la aleatorización. Esto da lugar a un tipo de experimentos, que se conocen como diseños en parcela dividida, cuyo origen se derivó de aplicaciones agrícolas. Para definir sus elementos, se considera lo siguiente: cuando los niveles de un factor, en el que es difícil hacer cambios, se aleatorizan en los bloques; mientras que los niveles del otro se aleatorizan en los experimentos dentro de bloques. La unidad experimental en el primer factor es el bloque y en el segundo es el experimento. Ahora bien, los factores cuyas unidades experimentales son bloques se llaman *factores de*

Una ventana es un orificio de $3\mu\text{m}$ de diámetro, aproximadamente, la cual está soldada a una capa de óxido de aproximadamente $2\mu\text{m}$. El propósito de estas ventanas es permitir interconexiones al microcircuito, debido a esto, se conocen como ventanas de contacto. Estas ventanas se forman a través de un proceso fotolitográfico (ver figura 2.14.1-1).

No. de experimento	X_1 temp.	X_2 humedad	Bloque	X_3	X_4	Recipiente con Muestra de suelo	Vida media
1	-	-	1	-	-	2	886.3
2	+	-	1	-	-	3	187.9
3	-	+	1	-	-	1	229.1
4	+	+	1	-	-	4	129.8
5	-	-	2	+	-	3	167.5
6	+	-	2	+	-	4	65.2
7	-	+	2	+	-	1	156.5
8	+	+	2	+	-	2	31.5
9	-	-	3	-	+	1	253.9
10	+	-	3	-	+	3	65.83
11	-	+	3	-	+	4	188.3
12	+	+	3	-	+	2	54.7
13	-	-	4	+	+	2	240.7
14	+	-	4	+	+	4	75.5
15	-	+	4	+	+	3	166.2
16	+	+	4	+	+	1	45.2

Tabla 2.13.2-2: Ejemplo del pesticida extendido a cuatro bloques

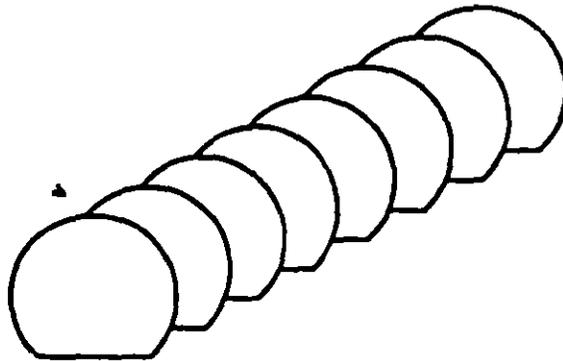
En este proceso la fotorresistencia se aplica a las placas de silicón cubiertas con óxido, que están girando con el objeto de asegurar uniformidad. Después de ello, las placas se hornean para secarlas. El tercer paso es exponerlas a rayos ultravioletas a través de una pantalla o máscara. Los rayos pasan a las áreas de las ventanas y provocan que la fotorresistencia, en dichas áreas se haga soluble. En la siguiente etapa, las placas se remojan en una sustancia que remueve la fotorresistencia de las ventanas y deja al descubierto el óxido. En una cámara de alto vacío se obtiene plasma que se adhiere (solda) al óxido más rápidamente que las capas de fotorresistencia restantes. Al final de este proceso, se dejan las ventanas a través del óxido con el silicón debajo del mismo. Una de las características importantes de estas ventanas, es la uniformidad en su tamaño. Con el fin de estudiar el efecto del tiempo de horneado de la fotorresistencia, tiempo de exposición y el tiempo de revelado en dicha variable, se estructuró un diseño. Para ello se elaboraron máscaras de prueba en la parte superior izquierda de cada placa, en los cuales se imprimieron líneas solubles de fotorresistencia, que se revelaron y soldaron posteriormente. Se debe señalar, que la amplitud de las líneas se puede medir y su uniformidad se identifica con la varianza s^2 de la variable dependiente. Se consideró que esta medida es adecuada para predecir la uniformidad de la ventana de contacto en la placa. Durante la ejecución del experimento, la exposición de la fotorresistencia y las etapas en el desarrollo del proceso, se aplicaron separadamente a cada placa y fue fácil cambiar el tiempo de exposición o revelado entre



1. Aplique pintura al dado
- ↓
2. Horneado
- ↓
3. Exponga la fotorresistencia
- ↓
4. Revelado
- ↓
5. Soldar plasma
- ↓
6. Remover fotorresistencia

Figura 2.14.1-1: Formación de las ventanas de contacto

ellas. Por esto, la unidad experimental en este diseño en parcelas divididas con dos factores es la placa. El horneado de la fotorresistencia se realizó en grupos o lotes de placas (ver figura 2.14.1-2). Hubiera sido tedioso y posiblemente no representativo del proceso, hornear las placas una por una. En otras palabras, la unidad experimental para el factor tiempo de horneado es el grupo de placas, por lo que este factor representa la parcela grande (o total).



Lote de placas para horneado

Figura 2.14.1-2: Lotes de placas, unidad experimental del tiempo de horneado

Los factores y niveles del experimento se indican en la tabla 2.14.1-1. Cada combinación del diseño se condujo de la siguiente manera:

1. Se aplicó fotorresistencia al lote de placas.
2. El tiempo de horneado (20 o 40 minutos) se seleccionó aleatoriamente y todas las placas en el lote se hornearon durante el tiempo especificado.
3. Se seleccionaron al azar cuatro placas del lote, asignándolas a alguna de las cuatro condiciones de tiempo de revelado x tiempo de exposición [esto es (30, -20 por ciento), (60, -20 por ciento), (30, +20 por ciento) o (60, +20 por ciento)].
4. Estas cuatro placas se expusieron y revelaron de acuerdo con las condiciones establecidas, después se soldaron. Cada una de ellas representa una combinación (experimento).
5. Se tomaron cinco mediciones de la amplitud de la línea, en diferentes posiciones de las máscaras de prueba, en cada placa.

<u>Factor</u>	<u>Niveles</u>	
	-	+
X ₁ = Tiempo de revelado (factor de parcela chica)	30 min.	60 min.
X ₂ = Tiempo de exposición	20% menos de lo normal	20% más de lo normal
X ₃ = Tiempo de horneado (factor de la parcela grande)	20 min.	40 min.

Tabla 2.14.1-1: Factores y niveles del ejemplo de las placas

Este proceso se repitió en los cuatro lotes de placas, dos lotes para cada tiempo de horneado (ver tabla 2.14.1-2), el cual se identifica como reps en dicha tabla. El día o rep se considera como un factor de bloque con respecto al tiempo de horneado, y el lote se trata de manera similar con respecto al tiempo de revelado y exposición.

El diseño completo se presenta en la tabla 2.14.1-2. El factor X_i identifica la repetición, todos los experimentos en la primera repetición se llevaron a cabo primero. Observe que en dicha repetición, el lote horneado durante 20 minutos se completó primero, después el que se horneó en 40 minutos.

En esta tabla, la columna que contiene el número al azar de la placa identifica las condiciones (exposición, revelado) bajo las cuales se extrajeron las cuatro placas de cada lote. También el número que indica el orden, en la última columna de dicha tabla, se obtuvo aleatorizando en dos etapas. En la primera, el orden de los tiempos de horneado dentro de cada repetición y en la otra, el orden de exposición y revelado dentro de cada tiempo de horneado y repetición.

En la tabla 2.14.1-3 se muestran los resultados del experimento y la variable $Y = \log_2(s^2)$, la hoja de trabajo y el cálculo de los efectos en la siguiente tabla (2.14.1-4). Debido

No. de experimento	Valores codificados de X $X_1X_2X_3X_4$	X_1 Tiempo de revelado	X_2 Tiempo de exposición	Placas	X_3 Tiempo de horneado	X_4 Rep	Orden
1	- - - -	30 min	-20%	2	20 min	1	2
2	+ - - -	60 min	-20%	4	20 min	1	4
3	- + - -	30 min	+20%	1	20 min	1	1
4	+ + - -	60 min	+20%	3	20 min	1	3
5	- - + -	30 min	-20%	2	40 min	1	6
6	+ - + -	60 min	-20%	3	40 min	1	7
7	- + + -	30 min	+20%	4	40 min	1	8
8	+ + + -	60 min	+20%	1	40 min	1	5
9	- - - +	30 min	-20%	2	20 min	2	14
10	+ - - +	60 min	-20%	3	20 min	2	15
11	- + - +	30 min	+20%	1	20 min	2	13
12	+ + - +	60 min	+20%	4	20 min	2	16
13	- - ++	30 min	-20%	4	40 min	2	12
14	+ - ++	60 min	-20%	1	40 min	2	9
15	- + ++	30 min	+20%	3	40 min	2	11
16	+ + ++	60 min	+20%	2	40 min	2	10

Tabla 2.14.1-2: Estructura del diseño en parcela dividida de las placas

a que el factor de la parcela grande (esto es, tiempo de horneado) X_3 , se aleatorizó en los lotes dentro de cada repetición, la interacción tiempo de horneado y repetición (esto es, X_3X_4) se usa para calcular el error estándar del mismo, $s_w = \sqrt{E_{34}/1} = 0.725$, el cual se empleará al evaluar el efecto de X_1 . Dicho error estándar tiene un grado de libertad. El error estándar de la parcela chica s_E , se utiliza para los otros efectos y se calcula con los efectos X_1X_2 , X_2X_3 , $X_1X_2X_3$, $X_1X_3X_4$, $X_2X_3X_4$ y $X_1X_2X_3X_4$ (ver tabla 2.14.1-4). Este estimador tiene 6 grados de libertad.

Los valores de t_E se calculan dividiendo cada efecto por el error estándar correspondiente, la significancia se decide comparando t_E contra t' con los grados de libertad apropiados (uno para X_3 y seis para los otros). Los resultados del experimento indican que X_1 (tiempo de revelado) tiene un efecto positivo, esto es, al incrementar X_1 se incrementa s^2 o se reduce la uniformidad en el tamaño de las ventanas de contacto. Por lo tanto, se pueden crear ventanas de contacto más uniformes, usando periodos cortos de revelado. Asimismo, X_4 tiene un efecto significativo, lo cual indica que algo está cambiando diariamente; esto provoca incrementos o decrementos en la varianza o uniformidad de la amplitud de la línea. Además, el efecto del tiempo de horneado (X_3) = .922812 es mayor que el efecto de X_1 (.639087). Sin embargo, puesto que la variabilidad en la amplitud de las líneas entre los lotes (las cuales son las unidades experimentales para X_1) es mayor que la variabilidad en las placas dentro del lote (esto es, $S_w = 0.725 > S_E = .1118$), no es posible concluir que el efecto de X_3 es real. Un error frecuente que se comete al analizar este tipo de diseños es dividir todos los efectos por el error dentro de la parcela (S_E) y concluir, equivocadamente, que los factores de la parcela grande son significativos. A manera de recomendación, en experimentos que no sea posible aleatorizar en forma completa, el orden de las combinaciones es un signo de la necesidad de emplear un diseño en parcelas divididas, donde se requieren términos de error separados, lo que permitirá obtener un análisis más apropiado de los datos.

No. de Experimento	Repeticiones de medidas de la amplitud de la línea				s^2	$\log_e(s^2)$					
	X_1	X_2	X_3	X_4							
1	-	-	-	-	2.6320	2.6620	2.6210	2.5605	2.4568	.00662	-5.0180
2	+	-	-	-	2.4450	2.6380	2.4680	2.6760	2.5794	.01040	-4.5660
3	-	+	-	-	2.5760	2.5590	2.5964	2.4475	2.6441	.00530	-5.240
4	+	+	-	-	2.5520	2.5470	2.5114	2.6750	2.6880	.00655	-5.0280
5	-	-	+	-	2.4850	2.4060	2.4735	2.5576	2.6570	.00912	-4.6974
6	+	-	+	-	2.7206	2.4750	2.6070	2.6450	2.6994	.00945	-4.6618
7	-	+	+	-	2.4946	2.5586	2.6330	2.5394	2.6559	.00448	-5.4090
8	+	+	+	-	2.5290	2.6445	2.4032	2.3810	2.3785	.01366	-4.2930
9	-	-	-	+	2.4420	2.4630	2.5490	2.6983	1.8993	.00918	-4.691
10	+	-	-	+	2.4830	2.6290	2.6040	2.7910	2.4863	.01599	-4.136
11	-	+	-	+	2.6600	2.5790	2.6285	2.4915	2.5260	.00486	-5.326
12	+	+	-	+	2.6930	2.6517	2.5960	2.5970	2.3935	.01326	-4.323
13	-	-	+	+	2.5273	2.4960	2.4880	2.3305	2.0803	.03475	-3.3595
14	+	-	+	+	2.7836	2.8280	2.3250	2.8140	2.3592	.06568	-2.723
15	-	+	+	+	2.3820	2.5190	2.3250	2.6705	2.2109	.03167	-3.4522
16	+	+	+	+	2.3000	2.2060	2.5160	2.7600	2.9445	.09541	-2.3496

Tabla 2.14.1-3: Resultados del experimento de las placas

2.14.2 Diseños en parcela dividida

En experimentos con aleatorización restringida, como en el ejemplo anterior, los dos errores estándar pueden ser muy diferentes, como en este caso. Cuando dichos errores no se calculan correctamente, es fácil equivocarse y derivar conclusiones que no son válidas. En la tabla 2.14.2-1 se muestra cómo usar las tablas del Apéndice B.2 para generar diseño de este tipo. Adicionalmente, se incluyen los términos que se emplean para determinar los errores de la parcela grande, la parcela chica y las repeticiones.

2.15 Algoritmo de Yates

Cuando los resultados de un factorial se escriben en forma estándar o de Yates, tal como se muestra en la tabla 2.7-1 y en los ejemplos (tablas 2.9.2-1, 2.12.1-2, 2.13.1-1 y 2.14.1-4), existe un algoritmo que se puede programar fácilmente para calcular los efectos. Este es el llamado algoritmo de Yates y funciona de la siguiente manera:

No. de experimento	Medias	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₁ X ₄	X ₂ X ₃	X ₂ X ₄	X ₃ X ₄	X ₁ X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₄	X ₁ X ₃ X ₄	X ₂ X ₃ X ₄	X ₁ X ₂ X ₃ X ₄	Y = log(S ₂ ²)
1	-.6927	.1204	-.3542	-.4065	-.3036	-.3376	-.4480	-.3390	-.3391	-.4439	-.3174	-.3397	-.4460	-.4479	-.4426	-.3579	-5.0180
2	0.00	-.3719	-.3483	-.4813	-.4891	-.3551	-.4497	-.4538	-.3546	-.4488	-.3754	-.3531	-.4467	-.4448	-.3502	-.3499	-4.5660
3	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-5.2401
4	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-5.0280
5	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-4.6974
6	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-4.6618
7	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-5.4090
8	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-4.6910
9	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-4.1360
10	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-5.3260
11	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-4.3230
12	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-3.3595
13	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-2.7230
14	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-3.4522
15	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-2.3496
16	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-2.3496
S(1)	-.6927	.1204	-.3542	-.4065	-.3036	-.3376	-.4480	-.3390	-.3391	-.4439	-.3174	-.3397	-.4460	-.4479	-.4426	-.3579	
S(2)	0.00	-.3719	-.3483	-.4813	-.4891	-.3551	-.4497	-.4538	-.3546	-.4488	-.3754	-.3531	-.4467	-.4448	-.3502	-.3499	
S(1)+S(2)	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	
S(1)-S(2)	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	-.6927	
Efecto	-4.33	0.44	-0.20	0.92	1.07	0.23	0.08	0.19	0.18	0.06	0.73	0.17	0.01	-0.04	0.01	-0.16	
valores t	-----	3.71	-1.73	1.27	9.36	1.96	0.75	0.61	1.50	

$S_w = \sqrt{.725112^2 / 1} = .725112$ $S_E = \sqrt{(.19)^2 + (.06)^2 + (.01)^2 + (.16)^2} / 6 = .111870$

Valor crítico de t, $t^* = 2.006$ (95% confiabilidad, 6 grados de libertad)
 $t^* = 2.447$ (99% confiabilidad, 6 grados de libertad)

Tabla 2.14.1-4: Cálculo de los efectos e interacciones del ejemplo de las placas

1. Las observaciones en el orden estándar se agrupan en pares sucesivos (ver tabla 2.15-1, la cual usa los datos de la tabla 2.9.2-1).
2. Estos pares se suman constituyendo la primera mitad de la primera columna.
3. Se cambia el signo del primer elemento de cada par y los pares se suman nuevamente, completando la segunda mitad de la primera columna. Esta operación se repite, usando los resultados de dicha columna, como valores iniciales.

En general, k repeticiones de esta operación se completan con una columna que tenga 2^k valores. La k -ésima columna (tercera columna de la tabla 2.15-1) contendrá la suma total de las observaciones en la primera posición y las diferencias de las sumas $[\sum(+)-\sum(-)]$ correspondientes a cada efecto en las otras posiciones. El orden en que se presentan estas diferencias (tabla 2.15-1) se denomina orden estándar u orden de Yates y se puede observar que es el mismo que se obtiene con programas de computadoras.

Este algoritmo se puede programar fácilmente en una calculadora programable, así también existen varios programas en FORTRAN y BASIC que lo usan. En el *Journal of Quality Progress* de fecha enero de 1989, página 31, se publicó una lista de dichos programas.

2.16 Ejercicios

1. Con el objeto de determinar si la posición del ensamblado afecta la resistencia de una lámina soldada, se recopilaron los siguientes datos de diez ensamblados soldados consecutivamente. La posición de la soldadura (A o B) se escogió aleatoriamente.

Resistencia de la lámina (psi)	
<u>Posición A</u>	<u>Posición B</u>
1210	1752
1357	1634
1463	1321
1184	1542
1372	1331

- a) Calcule el valor de F para comparar la varianza de la resistencia de la lámina entre las dos posiciones.
- b) Calcule el valor del estadístico t y determine si existe alguna diferencia entre sus resistencias.
- c) Sumarice sus conclusiones.

- a) Grafique los datos en un cubo.
- b) Calcule los efectos, errores estándar y valores de t .
- c) Represente los resultados en una ecuación (modelo lineal).
4. Para los diseños de abajo, haga una lista de los experimentos y el orden en que se deben llevar a cabo.
- a) Factorial 2^3 .
- b) Factorial 2^3 en dos bloques.
- c) Factorial 2^3 en cuatro bloques.
5. Cuatro diferentes tipos de telas caracterizados por el contenido (en tanto por ciento) de rayón y el estilo de tejido, se compararon empleando un probador *Martindale*. Esto se hizo para evaluar y/o recomendar su uso en asientos de automóviles (como cubreasientos). El probador puede analizar cuatro muestras de tela, simultáneamente (bloque). La disminución en el peso (en mg) de cuatro experimentos fue medida. Los resultados obtenidos fueron:

		%Rayón:			
		-	+	-	+
Estilo de tejido:	Bloque				
	1	36	38	36	30
	2	17	18	26	17
	3	30	39	41	34
	4	30	40	38	33

- a) Investigue si existen efectos del contenido de rayón, estilo de tejido o interacciones.
- b) El uso de bloques en este diseño, ¿fue adecuado? Explique.
6. Los siguientes datos se obtuvieron en un estudio de un sistema solar de calefacción de agua
- Los factores analizados fueron: x_1 total de insolación diaria, x_2 capacidad de almacenamiento del tanque de agua, x_3 el flujo de agua a través del sistema y x_4 la intermitencia en la radiación solar. Las variables dependientes que se estudiaron fueron: y_1 la eficiencia en la colección e y_2 la eficiencia en la distribución de energía. Se desarrolló un modelo en la computadora pero debido a su complejidad no se puede analizar fácilmente. Debido a esto se utilizó para predecir los resultados en las 17 condiciones definidas en la tabla siguiente, con base en un factorial 2^4 con puntos centrales.

No.	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₁	Y ₂
1	+	+	+	+	41.6	100.0
2	+	+	+	-	39.9	68.6
3	+	+	-	+	51.9	89.8
4	+	+	-	-	43.0	82.2
5	+	-	+	+	39.2	100.0
6	+	-	+	-	37.5	66.0
7	+	-	-	+	50.2	86.3
8	+	-	-	-	41.3	82.0
9	-	+	+	+	41.3	100.0
10	-	+	+	-	39.7	67.7
11	-	+	-	+	52.4	84.1
12	-	+	-	-	44.9	82.1
13	-	-	+	+	38.4	100.0
14	-	-	+	-	35.0	61.7
15	-	-	-	+	51.3	83.7

a) Calcule los efectos y construya una gráfica de probabilidad normal de los efectos (especialmente, los más importantes).

b) Suponiendo que el error experimental en el modelo de computadora es cero, investigüe si el efecto de curvatura es significativo.

Referencias bibliográficas

- ¹ Lucas, J. M. (1985), "Discussion of Offline Quality Control by Kacker", *Journal of Quality Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 195-197.
- ² Lawson, J. (1990), "Computation Strategies in Applied Statistics Courses for Engineers", *American Statistical Association Proceedings of the Section on Statistical Education*, American Statistical Association, Washington, D. C.
- ³ Wheeler, R. E. (1974), "Portable Power", *Technometrics*, Vol. 16, p. 193.
- ⁴ Weber, G. F., et al., "Simultaneous SO₂ / NO₂ Control", Final Technical Report for Period 4/1/86 - 3/31/87, prepared for U. S. Dept. of Energy, Office of Fossil Energy, Pittsburgh (Agreement No. DE - FC21 - 86MC10637).
- ⁵ Lenth, R. V. (1989), "Quick and Easy Analysis of Unreplicated Factorials", *Technometrics*, Vol. 31, pp. 469-474.
- ⁶ Box, G. E. P. and Meyer (1986), "An Analysis for Unreplicated Fractional Factorials", *Technometrics*, Vol. 28, pp. 11-18.
- ⁷ Close, D. J. (1967), "A Design Approach for Solar Processes", *Solar Energy*, Vol. 11, p. 112.