



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

**“CARTAS DE CONTROL DE CALIDAD,
CONSTRUCCION APLICACION Y VENTAJAS
DENTRO DE UN SISTEMA DE PRODUCCION”**

T E S I S

**Que para obtener el Título Profesional de:
ING. MECANICO ELECTRICISTA**

p r e s e n t a

Carlos Eduardo Flores Salgado

Asesor: Dr. Dennis Hurley Phee



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

<u>T I T U L O</u> :	<u>P A G I N A</u>
<u>PROLOGO</u>	3
<u>AGRADECIMIENTO</u>	5
<u>CAPITULO 1</u> CONCEPTOS BASICOS	7
<u>CAPITULO 2</u> INTRODUCCION A LAS CAR- TAS DE CONTROL .	23
<u>CAPITULO 3</u> CONSTRUCCION DE LAS CAR- TAS DE CONTROL .	35
<u>CAPITULO 4</u> INTERPRETACION DE LAS CAR- TAS DE CONTROL.	73
<u>CONCLUSIONES</u>	145
<u>APENDICE A</u> FACTOR PARA ESTIMAR σ^2 EN BASE A \bar{R} .	149
<u>APENDICE B</u> FACTOR C_2 PARA ESTIMAR σ^2 EN BASE A $\bar{\sigma}$.	150
<u>APENDICE C</u> FACTORES PARA DETERMINAR EN BASE A \bar{R} , LOS LIMITES DE CONTROL 3-SIGMA PARA LAS CARTAS \bar{X} y R.	151

T I T U L O

P A G I N A

<u>APENDICE D</u>	FACTORES PARA DETERMINAR EN BASE A $\bar{\sigma}$, LOS LIMITES DE CONTROL 3-SIGMA PARA LAS CARTAS \bar{X} y σ .	152
<u>APENDICE E</u>	FACTORES PARA DETERMINAR EN BASE A σ' , LOS LIMITES 3-SIGMA PARA LA CARTA R .	153
<u>APENDICE F</u>	FACTORES PARA DETERMINAR EN BASE A σ^i , LOS LIMITES 3-SIGMA PARA LA CARTA σ .	154

P R O L O G O .

Con la implantación de nuevos y modernos métodos de producción en masa, ha surgido la necesidad de un control o aseguramiento de la calidad producida. Para tal efecto se han creado y desarrollado métodos estadísticos que permitan establecer estándares de calidad, los cuales servirán de referencia durante el desarrollo de la producción.

Hay una gran variedad de técnicas estadísticas que se emplean en el control de calidad, en el presente texto se analiza una de ellas, que es el control de calidad mediante : " Cartas de Control de Shewart"; las principales razones por las que se escogió éstas son : a) son de fácil construcción, b) no se requieren profundos conocimientos matemáticos, c) la versatilidad que ofrecen las cartas de control, permiten cubrir y resolver la mayor parte de los problemas que se presentan en la industria.

El texto trata de explicar en una forma sencilla y clara la construcción e interpretación de las Cartas de Control.

CA P I T U L O 1

C O N C E P T O S B A S I C O S

INTRODUCCION .

Los importantes éxitos de la industria a consecuencia de la calidad, en los últimos años es una historia bien conocida. El reto más serio que ha resultado de la complejidad de los productos exigidos por el consumidor, consistentes en diversidad de funciones y requisitos de actuación, se está resolviendo en una forma efectiva. El alto grado de confiabilidad requerido por los sistemas complejos de artefactos militares, tales como proyectiles dirigidos, cohetes y vehículos espaciales, es un hecho comprobado.

Este aspecto de la calidad dá motivo a una descripción impresionante. No es el mismo panorama atractivo el que se mira cuando se examinan los esfuerzos que se hacen y permanecen ocultos, a fin de asegurar estos estándares de calidad. Se puede hacer notar que la situación de muchas industrias es tal, que por cada peso invertido en la producción planeada, muchos centavos adicionales se pierden debido a la calidad pobre de los productos, ya durante el proceso de fabricación, ya durante el servicio o en el campo de acción.

Estos datos enseñan que, aunque en general hemos localizado fallas en la factpría y no después del envío, las técnicas empleadas para tal efecto han resultado a menudó excesivamente costosas (p.e. inspección 100%) y causantes de desperdicio.

También nos muestran que en algunos casos ciertos productos que fallan al ser puestos en servicio, no siempre han sido cu-

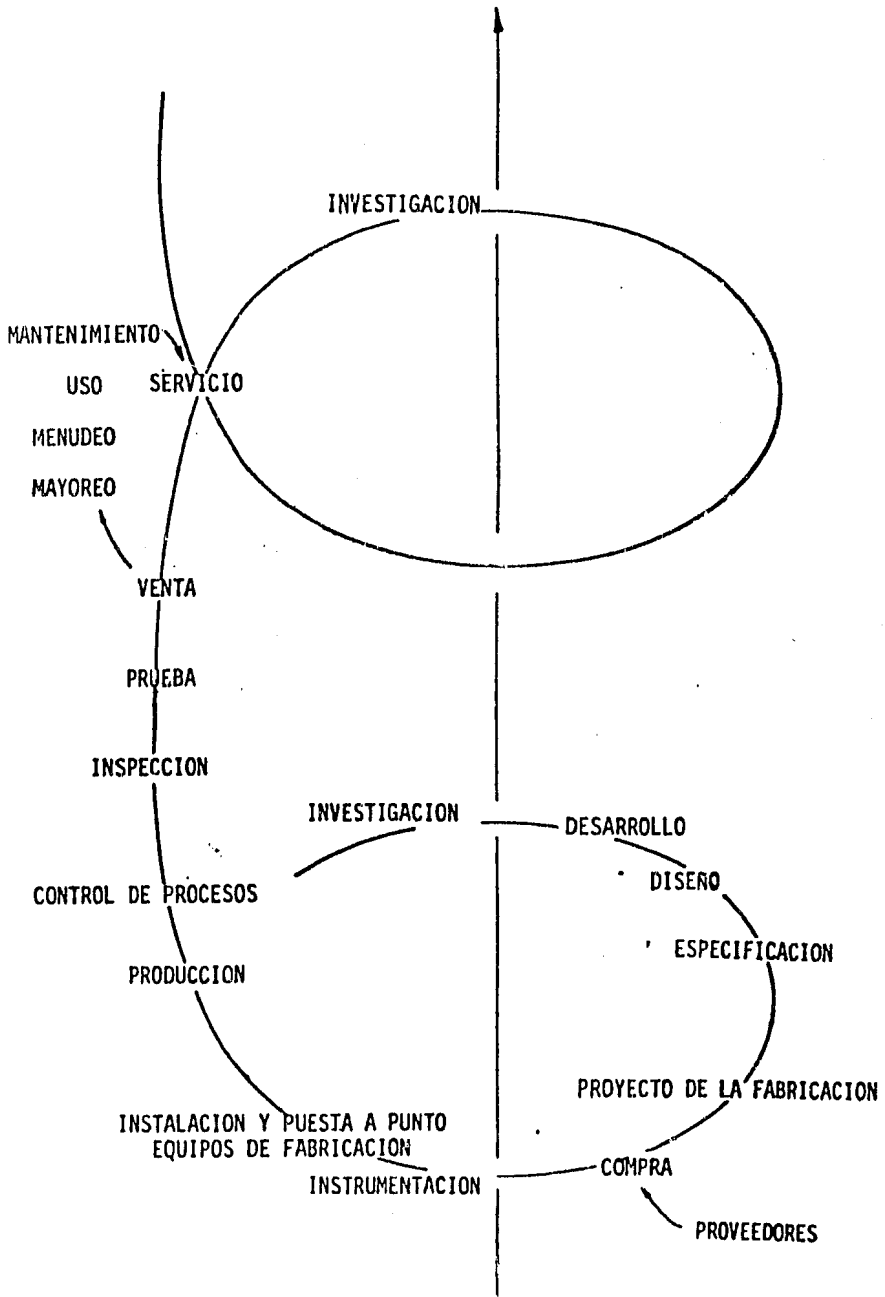
biertos en la fábrica. Esto no puede ser tolerado por una industria que se esfuerza en mantener y consolidar una posición de competencia. Esta es una situación que preocupa a la industria; es una situación que clama por nuevas técnicas que en el argot se designa con el nombre de control de calidad.

¿ QUE ES CONTROL DE CALIDAD Y CUAL ES SU FINALIDAD ?

Se define como Control de Calidad, a el conjunto de esfuerzos efectivos, de los diferentes grupos de una organización, para la integración del desarrollo, del mantenimiento y de la superación de la calidad de un producto, con el fin de hacer posibles fabricación y servicio, a satisfacción del consumidor y al nivel más económico.

Para lograr tal efecto es necesario coordinar un amplio conjunto de actividades de la empresa. La figura 1-1 muestra cómo estas actividades se relacionan entre sí.

Fig. 1-1: Espiral de desarrollo de la calidad (Juran [1974])



Por medio de contactos con los usuarios, la empresa determina que calidades se necesitan. Los especialistas en investigación y desarrollo crean entonces una imagen del producto que pueda satisfacer las necesidades de calidad de los usuarios.

Los ingenieros de diseño redactan especificaciones del producto y de los materiales teniendo en cuenta esas calidades necesarias. Otros ingenieros indican procesos é instrumentos capaces de fabricar y medir esas calidades. Los especialistas de compra adquieren materiales y componentes que posean también las calidades apropiadas y, a su vez, introducen en la espiral ascendente las actividades de calidad de los proveedores. Los operarios de los talleres se adiestran en el uso de los procesos o instrumentos para obtener un producto de la calidad señalada. Los inspectores determinan si el producto resultante posee realmente las calidades necesarias. El personal de ventas, a través de las cadenas de distribución, incita a los clientes para que compren los productos que poseen aquellas calidades. Los clientes utilizan las calidades.

La experiencia de su utilización sugiere el ¿cómo podría? mejorarse el producto, incitando así una nueva espira de la espiral ascendente. La espiral ascendente (fig. 1-1) se refiere a actividades no a departamentos de la empresa. En las empresas, todo el conjunto de actividades mostradas es realizado por una sola persona o pocas más, con poca especialización.

Sin embargo, en las grandes empresas, esas actividades se asignan corrientemente a departamentos especializados. Cada uno de estos departamentos especializados es responsable de llevar a cabo las actividades inherentes a su especialidad, incluyendo las de la calidad.

Por ejemplo, un departamento de compras es responsable de que se compren los materiales y componentes a los proveedores idóneos, en el momento oportuno, al precio justo con los plazos adecuados y de la calidad conveniente.

Con tal especialización, ningún departamento es "responsable" aisladamente de la amplia función de la calidad. Todos los departamentos tienen que desempeñar su papel.

(Sin embargo, en algunas empresas, puede asignarse a un departamento especializado la dirección de las actividades que se relacionan con la función de la calidad).

La espiral pone de relieve el gran campo de acción de las funciones implicadas en el logro de una calidad que garantice la "aptitud para el uso", que difieren notablemente del menor alcance de las funciones de inspección o incluso de los "programas de control de calidad" convencionales que, en general, en lo que han hecho hincapié es en el cumplimiento de las especificaciones.

En el presente texto, se comprenderá la "función de calidad", como una forma de designación abreviada para el conjunto de actividades relativas a la calidad.

L A S T E C N I C A S U T I L I Z A D A S P A R A
L A F U N C I O N D E C A L I D A D Y C O M O
R E C O L E C T A R L O S D A T O S .

Una pregunta que surge naturalmente es : ¿Cómo entra la estadística en este contexto de mejora de calidad?

Se puede contestar esta pregunta recurriendo al siguiente argumento (debido a William Hunter, 1984) :

"Mejorar la calidad implica cambio. La base racional para el cambio son los datos. La estadística es la ciencia de ¿Cómo recolectar y analizar los datos ?"

Ahora bien, ¿ Cuáles son las técnicas estadísticas utilizadas para la función de calidad? Una respuesta fácil es que todas, ya que cualquier técnica estadística se podrá emplear alguna vez en la función total de calidad en las empresas. Sin embargo, hay un subgrupo de técnicas las "pocas vitales" que se pueden identificar del conjunto total de las técnicas estadísticas.

A continuación se muestra la tabla 1-1, donde se enlistan 19 técnicas estadísticas más importantes utilizadas para la función de calidad. Estas están colocadas de tal forma que muestran su orden de dificultad y/o su secuencia típica de aprendizaje. El conjunto de técnicas 1 a 8 forman parte básica de conocimientos dentro de la función de calidad; el conjunto de técnicas de 9 a 14 son de nivel intermedio; y el conjunto de técnicas avanzadas 15 a 19 pueden ser estudiadas muy extensivamente.

En esta tabla, en su parte derecha, se muestran ejemplos u otros nombres usados para cada una de las técnicas para facilitar el conocimiento de ellas.

La importancia de estas técnicas radica en las diferentes aplicaciones que han tenido en las diversas industrias, de ahí la gran variedad de nombres para una misma técnica.

TABLA 1-1

LISTA DE TECNICAS ESTADISTICAS UTILIZADAS PARA LA FUNCION DE CALIDAD
ORDENADAS SEGUN SU DIFICULTAD Y SECUENCIA TIPICA DE APRENDIZAJE

TECNICA	EJEMPLOS U OTROS NOMBRES
1. Concepto de variación, muestra y población	Aleatorización, Extracción de datos bajo cond. uniformes
2. Medidas de tendencia central	\bar{X} , Media aritmética, Mediana, Moda.
3. Medidas de variación	s, Desviación estándar, R, rango.
4. Distribución de frecuencias	Histogramas
5. Cartas de Control	Cartas para \bar{X} , R, p, c. Cartas de control de Shewart.
6. Análisis de Pareto	"80:20" "Muchos triviales, pocos vitales".
7. Diagrama de espina de pescado	Diagrama de causa - efecto. Diagrams de Ishikawa.
8. Diagrama de dispersión	r, Correlación.
9. Estudios de habilidad del proceso	Reproductibilidad, Tolerancia del proceso.
10. Conceptos de probabilidad y muestreo	Distribuciones de probabilidad y muestreo.
11. Muestreo de lotes por atributos	Tablas de Dodge-Romig, MIL-STD-105D.
12. Inferencia estadística	Límites de confianza, Intervalos de confianza.
13. Pruebas de significancia	Pruebas de hipótesis.
14. Muestreo de lotes por variables	MIL-STD-414, "Lot - Plot"
15. Cuantificación de vida	Pruebas de vida, Confiabilidad; MIL-STD-690B, MIL-STD-781C.
16. Diseño y análisis de Experimentos	Análisis de regresión, Análisis de varianza, Mínimos Cuadrados.
17. Operación evolutiva	EVOP
18. Series de tiempo	Datos cronológicos, Técnica de Box-Jenkins.
19. Simulación	SIMSCRIPT, CSMP, GASP.

EL PROPOSITO DE LA COLECCION DE DATOS.

En una fábrica se colectan muchos tipos de información -datos- sobre los procesos, el personal, las materias primas, las piezas, los ensambles los productos terminados, la productividad por turno, las reclamaciones contra garantía, etc. Hay un mundo de datos y se podrán generar aún más. Sin embargo, el propósito de la empresa u organización no es generar datos (ni graficarlos ni analizarlos tampoco) sino la producción de algún producto o servicio que cumple con los requisitos de los clientes con respecto, a las tres características básicas: 1) precio, 2) tiempo de entrega, 3) aptitud para el uso. Entonces el propósito último de la colección de datos es cumplir con el compromiso de la empresa de producir un producto o servicio que se supera cada vez más en estas tres características básicas.

Además del propósito último que se acaba de mencionar, es útil también, especificar el objetivo inmediato para el cual se coleccionarán los datos. Sólo con este objetivo en mente, se podrá decidir qué tipo de datos recolectar y qué tipos de métodos estadísticos se deben aplicar a los datos obtenidos. Existen cinco propósitos para los cuales se suelen coleccionar datos:

1) Datos para auxiliar en la comprensión de la situación actual.

Esta información se recolecta, por ejemplo, para checar la dispersión en alguna dimensión de piezas maquinadas o para examinar el porcentaje de piezas defectuosas contenidas en un lote que se recibió. Cuando exis-

ten suficientes datos, conviene procesarlos estadísticamente para una mejor comprensión y para estimar la condición del proceso o del lote a través de una comprobación con especificaciones, cifras normales, metas, etc.

2) Datos para análisis.

Este tipo de información se requiere para esclarecer relaciones de causa-efecto (para un defecto, por ejemplo). Los datos pueden provenir de records anteriores o a través de pruebas nuevas diseñadas explícitamente para obtener cierto tipo de información.

3) Datos para el control de calidad del proceso.

Este tipo de datos se usa para determinar si un proceso de manufactura está bajo control estadístico o no. Las cartas de control se emplea para este fin y se tomarán acciones en base a las señales arrojadas por estas cartas.

4) Datos para regular el proceso.

Este tipo de datos se utilizan, por ejemplo, como base para subir o bajar la temperatura de algún aparato para que una viscosidad estandarizada pueda mantenerse en algún líquido. Aquí entran los "controles por retroalimentación" o "controles hacia adelante", como comúnmente se les conoce cuando la regulación se efectúa a través de algún dispositivo (eléctrico, electrónico, mecánico, etc.) de control.

5) Datos para aceptación o rechazo.

Esta forma de datos se usan para aceptar o rechazar partes y productos después de una inspección. Existen dos métodos -inspección 100% e inspección por muestreo. En base a la información obtenida, se puede decidir la acción indicada para las partes o productos.

CINCO PUNTOS CLAVES SOBRE LA RECOLECCION Y ANALISIS DE DATOS.

1) Tomar acciones en base a los datos.

Como se mencionó previamente, el propósito de la colección de datos no es el de expresar todo ordenadamente en cifras, sino el de proporcionar una base para la acción. Dos corolarios de esto son:

- a) No se deben tomar acciones sobre el proceso excepto en base a datos. Por ejemplo para clasificar a los tornos en un departamento según las tolerancias que pueden mantener, se necesitan datos de piezas fabricadas en cada torno.
- b) Si no existe un propósito claro para la recolección de algún tipo de información, se debe considerar seriamente desmantelar el sistema que genera esta información. (Para un enunciado particularmente contundente para este punto ver las páginas 23-4 y 23-5 en Juran (1974)).

2) Los datos serán útiles para tomar decisiones sobre algún proceso o lote, sólo si estos son representativos del mismo. Una manera de garantizar "representatividad" es utilizando algún tipo de muestreo probabilístico (del cual el más sencillo conceptualmente es muestreo aleatorio).

Sin embargo, otros tipos de muestreo como el "sistemático con arranque aleatorio" (tipo de muestreo en el cual las primeras muestras son tomadas al azar, las muestras posteriores se toman ya en forma sistemática), pueden también arrojar muestras representativas bajo ciertas condiciones que ocurren con bastante frecuencia en la práctica.

3) Acompañar los datos con una descripción completa de su procedencia. Si un periodo de tiempo transcurre entre la colección de los datos y su análisis o empleo, tal vez na die podrá recordar exactamente de donde provenían. Hay mucha información en casi cualquier organización, pero gran parte de ella es información "muerta" puesto que su procedencia no fué claramente anotada,

Así que es necesario anotar no sólo el propósito de la medición y sus características, sino también la fecha, el diagnóstico empleado, la persona que tomó los datos, etc.

4) Anotar los datos de una forma que facilite su posterior análisis. Puesto que totales, promedios y rangos se calculan a menudo, será conveniente si los datos están registrados con dicho objetivo en mente. Por ejemplo si se toman 100 datos a la vez, casi cualquier formato de hoja servirá. Pero si se toma de un proceso un sólo dato cinco veces diarias a las 9,11,13,15 y 17 horas durante 20 días entonces sería muy útil que la hoja de datos mostrara la hora horizontalmente y el día verticalmente.

Si se organiza así, entonces se puede calcular fácilmente un promedio diario para cada columna y el promedio por hora para cada línea. Esto permitiría detectar la tendencia ya sea durante el día, o a través de los 20 días.

El secreto de un análisis exitoso, es el uso hábil de datos horizontalmente y verticalmente. Con la disponibilidad de programas tipo "Visi-calc" (hoja electrónica) en micro-computadoras, los usos de una hoja de datos se vuelven aún más sencillos y creativos.

Con el desarrollo de programas especializados (softwares) junto con procesadores de datos más económicos y versátiles, se brinda la oportunidad de efectuar el Control de Calidad en una forma computarizada.

La gran diversidad de programas, son una herramienta importantísima para el Ingeniero en su labor de control, permitiendo realizar cálculos y gráficos con gran rapidez.

Otra de las ventajas que ofrecen este tipo de programas es la eliminación del error humano, pues con el uso de aparatos de medición digitales se evita la posibilidad de una mala lectura. Dichos aparatos ofrecen la opción de acoplarse a una terminal del procesador de datos, lo cual sugiere un mayor dinamismo y eficacia en el control de datos y desarrollo de cartas de control.

Dentro de esos mismos programas se puede disponer de funciones estadísticas como : manejo de datos, carta \bar{X} , carta de rangos R, histogramas de frecuencia, gráfico de probabilidad normal, además cálculos registrados para media, mediana, moda, desviación estándar, valor mayor, valor menor, gran media del proceso $\bar{\bar{X}}$, rango medio del proceso, rango total del proceso, cálculo del porcentaje fuera de los límites especificados, cálculos de capacidad.

del proceso.

En los programas más recientes existen características adicionales tales como cálculos para grupos de tamaño variable para cartas de control, celdas con densidad variable para distribución de funciones, colocación automática o manual de los límites de control, selección parcial o total del proceso acumulativo de datos, etc.

De los programas disponibles en el mercado (USA) se encuentran :

PROGRAMA	DISTRIBUIDOR
a) QUALISTAT.	Advanced Technology Inspection Inc.
b) QUALISTAT SMART INDEPENDENT TERMINAL.	839 N. Rochester Road Clawson, MI 48017
c) QUALISTAT ATRIBUTES.	(313) 589-3213

a) Q STATS 1.0	Applied Concepts Company
b) Q STATS 64	5253 S. Des Moines Place Tucson, AZ 85746 (602) 883-0664

MANMAN/QUALITY	ASK Computer Systems , Inc. 730 Distel Drive Los Altos, CA 94022 (415) 969-4442
----------------	--

PROGRAMA

DISTRIBUIDOR

a) MTHP	Bunnel Consulting
b) FAILRT	19340 Box Canyon Road
c) LQA	CORONA, CA 91719
d) BSRMA	(714) 734-0316

Para una mayor y completa información sobre programas de control de calidad, consultar :

"QUALITY PROGRESS" (MARCH 1985) AMERICAN SOCIETY FOR
QUALITY CONTROL, INC.
230 WEST WELLS STREET
MILWAUKEE, WISCONSIN
53203 (414-272-3575)

5) Planear la forma de las tablas, las gráficas y el tipo de análisis estadístico que se requiere para alcanzar los propósitos prefijados, garantiza la recolección de la calidad, cantidad y tipo de datos que se requieren para el estudio. Por ejemplo, para comparar el funcionamiento de tornos automáticos para dos tipos de aceite lubricante, habrá que tomar algunas medidas de funcionamiento o desgaste de herramientas, preferiblemente de varios alterando el uso de los dos tipos de aceite en ellos. Sería necesario también controlar otros factores que podrán afectar los resultados como el operador, el bronce sobre la cual se trabaja, etc. Una vez llevado a cabo, este diseño arrojaría datos para cada tipo de aceite y se calcularán promedios, desviaciones estándar y porcentajes que se podrán mostrar en tablas y gráficas. La significancia estadística de las diferencias encontradas se podrá con-

firmar con pruebas como t de Student, F de Fisher y χ^2 de Pearson. Los resultados de las pruebas estadísticas serán más seguras en la medida que se utilice aleatorización en la asignación del orden de prueba de los aceites a los tornos al hacer el experimento.

CAPITULO 2

INTRODUCCION A LAS CARTAS DE CONTROL DE CALIDAD

¿QUE ES UNA CARTA DE CONTROL?

El objetivo último de todo proceso es fabricar productos que cumplan con las especificaciones. Una vez que el grupo de planeación de manufactura haya proporcionado procesos capaces[†] de cumplir con dichas especificaciones, es el papel de control de procesos obtener lo máximo de estos procesos operándolos de una manera bien dirigida y con niveles uniformes de ejecución. La herramienta principal para lograr esto, es la carta de control.

Una carta de control es una comparación gráfica de datos que reflejan el comportamiento del proceso con los "límites de control" calculados, que se trazan como líneas límites en la carta. Los datos que reflejan el comportamiento del proceso usualmente consisten en grupos de medidas ("subgrupos racionales") extraídos de la secuencia normal de producción conservando su orden.

La Figura 2-1 muestra las ideas esenciales de una carta de control tal como se aplican a medias muestrales. Se grafican las medias muestrales, \bar{X}_s , en orden cronológico, y si todos caen dentro de los límites de control, se dice que el proceso está en un estado de control estadístico. Muchas veces se abrevia esto diciendo solamente que el proceso está "bajo control". Sin embargo, si un punto (como el punto 8 en este caso) cae fuera de los límites

[†] Para más información sobre Capacidad de procesos, ver el Capítulo 4

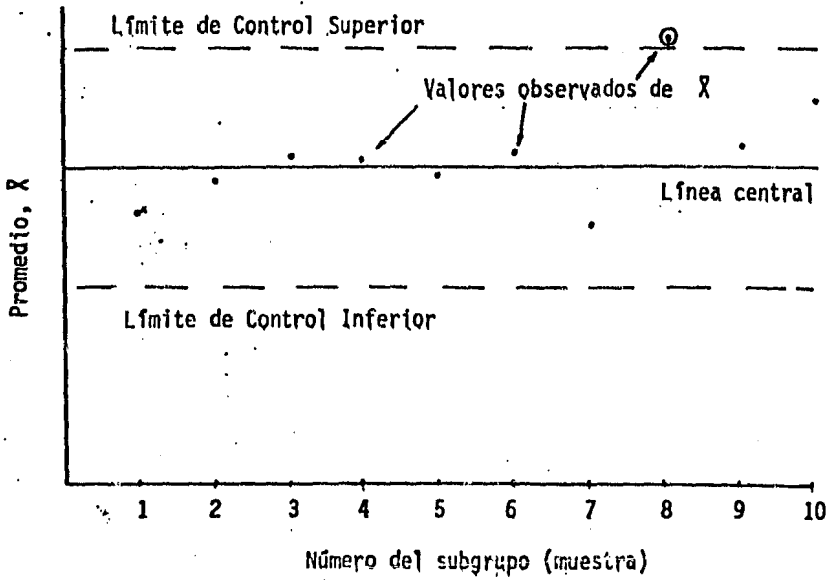


Fig. 2-1: Ejemplo general de la carta de control para promedios \bar{X}

entonces se acepta que existen "causas atribuibles" operando en el sistema, El término causa atribuible tiene un significado especial y es esencial entender este significado para entender el concepto de carta de control.

Variaciones en el proceso se pueden clasificar en dos tipos según sus causas:

- 1) aleatorias, es decir, debidas sólo al azar.
- 2) atribuibles; es decir, debido a causas específicas que se pueden "hallar".

Ver la Tabla 2-1.

Idealmente, sólo causas aleatorias deben estar presentes en un proceso, ya que esta representa la mínima cantidad de variación. Se dice que un proceso que opera sin causas atribuibles de variación está en un estado de control estadístico o simplemente "bajo control". Un proceso que está bajo control no solamente está funcionando lo mejor que puede; también el estado de control permite la situación ventajosa de poder realizar estudios adicionales de mejora del tipo mencionado en la Tabla 2-1. Alcanzar todos estos beneficios es lo que hace tan útil identificar y eliminar causas atribuibles de variación, y éste es el propósito primario de una carta de control.

La carta de control distingue entre causas aleatorias y causas atribuibles de variación a través de su selección de los límites de control. Estos se calculan, basándose en las leyes de probabilidad, de tal manera que variaciones aleatorias tan grandes que resultan altamente improbables se

Causas Aleatorias	Causas Atribuibles
Descripción	
<ul style="list-style-type: none">• Consiste en muchas causas individuales.• Cualquier causa aleatoria da como resultado una cantidad pequeña de variación (pero muchas causas aleatorias dan como resultado <u>con</u> junto un total sustancial).• Ejemplos son: variación humana en el ajuste de controles, vibraciones ligeras en las máquinas, <u>pequeñas</u> variaciones en la materia prima.	<ul style="list-style-type: none">• Consiste en una o unas pocas causas individuales.• Cualquier causa atribuible da como resultado una cantidad grande de variación.• Ejemplos son: un error craso de un operador, preparación equivocada de una máquina, un lote de materia prima deficiente.
Interpretación	
<ul style="list-style-type: none">• Variación aleatoria no se puede eliminar del proceso <u>económicamente</u>.• Cuando solamente variación aleatoria existe en un proceso, éste está siendo operado lo mejor que se puede, si de todos modos se están produciendo defectuosos, un cambio básico es requerido o <u>modificar</u> las especificaciones para reducir los defectuosos.• Una observación dentro de los límites de control de variación aleatoria indica que ningún ajuste al proceso es necesario.• Con solamente variación aleatoria, el proceso es suficientemente estable para usar técnicas de muestreo para predecir la calidad de la producción total, o para efectuar estudios de capacidad del proceso, o para efectuar estudios de optimización del proceso. (e.g. Operación Evolutiva).	<ul style="list-style-type: none">• Variación atribuible se puede detectar; acciones para eliminar sus causas es usualmente económicamente variable.• Si existe variación atribuible en un proceso, éste no está siendo operado lo mejor que se puede.• Una observación fuera de los límites de control generalmente indica que el proceso debe ser investigado y corregido.• Con variación atribuible presente, el proceso no es lo suficientemente estable como para usar técnicas de muestreo para predicción.

TABLA 2-1. Diferencia entre causas aleatorias y causas atribuibles de variación

imputan no a las causas aleatorias, sino a las causas atribuibles. Cuando algún punto excede a los límites de control, es una señal de que causas atribuibles se han metido al proceso y hay que investigar el proceso. La variación de los puntos dentro de los límites de control indican que sólo causas aleatorias están presentes y se debe abstener de modificar el proceso.

Para la mayor parte de las cartas de control, los límites de control se calculan basándose en el promedio ± 3 veces la desviación estándar de la estadística empleada (\bar{X} , R, p, c, etc.) (se darán fórmulas exactas para estos límites en el Capítulo 3). El empleo de ± 3 veces la desviación estándar resulta en que 99.7% (aproximadamente de los valores graficados caerán dentro de los límites cuando únicamente causas aleatorias están presentes). El 0.3% restante consiste de alarmas falsas, pero esta frecuencia es tan baja que los límites $\pm 3\sigma$ se usan a menudo para distinguir entre causas aleatorias y causas atribuibles de variación.

Aunque los límites $\pm 3\sigma$ son los más comúnmente usados, algunas situaciones requieren de diferentes límites y dan como resultados un porcentaje diferente de alarmas falsas. El empleo de límites $\pm 2\sigma$ resulta en 45% de alarmas falsas si sólo causas aleatorias existen en el sistema. Sin embargo estos límites $\pm 2\sigma$ tienen la ventaja de ser más sensibles que los límites $\pm 3\sigma$ a la presencia de causas atribuibles en el sistema.

¿ CUALES SON LOS DIFERENTES
TIPOS DE CARTAS ?

Como se ha explicado, las cartas de control se utilizan para la vigilancia de operaciones repetitivas en plantas industriales, laboratorios científicos, oficinas administrativas, sistemas de información, y servicios de salud.

Sin embargo, el tipo de carta a utilizar dependerá de las características (variable de respuesta que se desea) controlar siendo los tipos más comunes y sus principales ventajas y desventajas los enlistados en la tabla 2-2 .

Medida estadística que se grafica	Promedio \bar{X} y rango R Promedio \bar{X} y desviación estándar σ	% defectuoso p Número de defectuosos np	Defectos por unidad u Número de defectos c
Tipo de datos requerido	Datos Continuos (valores medidos de una característica)	Atributos (número de unidades defectuosas del producto)	Atributos (número de defectos por unidad del producto)
Campo general de aplicación	Control de características individuales	Control de la fracción defectuosa total de un proceso	Control del número total de defectos por unidad
Ventajas principales	<ol style="list-style-type: none"> 1. Proporciona la máxima utilización de la información contenida en los datos 2. Proporciona información detallada sobre el promedio y la variación del proceso, para controlar dimensiones individuales 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Los datos requeridos muchas veces ya están disponibles de records de inspección 2. Fácilmente comprendido por todo el personal 3. Proveer un panorama general de la calidad 	Las mismas ventajas que la carta para p pero también proporciona una medida del grado de severidad de los defectos
Desventajas principales	<ol style="list-style-type: none"> 1. No se entiende a menos que se proporcione entrenamiento 2. No se puede usar con datos del tipo pasa-no-pasa 	<ol style="list-style-type: none"> 1. No proporciona información detallada para control de características individuales 2. No proporciona una medida del grado de severidad de los defectos 	No proporciona información detallada para control de características individuales

TABLA 2-2 COMPARACION CUALITATIVA ENTRE
LAS CARTAS DE CONTROL

¿QUE USOS SE DAN A LAS CARTAS DE CONTROL?

Las cartas de control también son susceptibles de clasificarse en dos tipos generales según su utilización. Las cartas proporcionan más información que datos graficados en orden cronológico: también indican como la influencia de varios factores (tales como materiales, mano de obra, métodos) varía sobre un periodo de tiempo. Si dos o más factores están influenciando los datos simultáneamente, se puede estratificar los datos y graficar cartas por separado para que la influencia de cada uno pueda ser estudiado y comparado. Por ejemplo, cuando dos tipos de materiales se utilizan, la diferencia en su respuesta puede ponerse en evidencia construyendo una carta para cada material. En otras palabras se puede examinar la naturaleza de estas influencias estratificando los datos de acuerdo con los factores del proceso, o en otros casos modificando la manera de formar los subgrupos. Este uso de las cartas se conoce como análisis de procesos.

Bajo este mismo rubro, se clasifica el tipo de estudios donde se compara la capacidad natural del proceso con respecto a la variación, y a las especificaciones. Hay que recordar que un proceso "bajo control" sólo quiere decir que las únicas causas presentes son las aleatorias. No necesariamente quiere decir que el producto cumple con las especificaciones. (Este tópico tan importante está discutido en más detalle en el Capítulo 4).

Ahora bien, supóngase que el análisis del proceso se ha efectuado y que un estado de control estadístico se ha logrado y la producción se encuen-

tra satisfactoria con respecto a las especificaciones. Entonces la estandarización de los métodos de trabajo es necesaria para mantener este feliz estado. Una carta de control nos permite ver si esta estandarización fue correcta y si se sigue manteniendo. Si esto es verdad, entonces de este punto de vista en adelante (casi) todos los puntos de la carta deben estar dentro de los límites de control que son una continuación de los mismos usados durante el estado de control estadístico. Si puntos caen fuera de estos límites, entonces algún cambio debe haber ocurrido en el proceso o en los materiales. Las causas de este cambio deben ser investigadas y la acción correctiva apropiada debe ser tomada. Este uso de las cartas se llama control de procesos.

Cartas para análisis de procesos y cartas para control de procesos se hacen de la misma manera pero sus objetivos difieren. El objetivo del análisis de procesos es comparar y adecuar el proceso a las especificaciones, modificando el proceso si esto es necesario en base a información arrojada por una o más cartas de control. El objetivo del control de procesos es, empezando con un proceso satisfactorio, detectar cualquier anomalía en el proceso a través de gráficas llevado a cabo día tras día. Ejemplos externos de ambos de estos usos se darán en el Capítulo 4.

¿CUALES SON LOS PASOS PARA INICIAR EL USO DE LAS CARTAS?

- 1) Determinar el objetivo que se quiere lograr con las cartas.
- 2) Escoger la variable (característica) para graficar

3) Escoger el tipo de carta. La Tabla 2-2 compara varias de las cartas de control básicas.

4) Decidir que tipo de subgrupo racional es el más indicado.

Por lo general, en la mayoría de los casos el criterio de selección es el orden de producción, donde pueden presentarse las dos siguientes variantes :

- a) El primer subgrupo lo integran aquellos productos fabricados en un determinado momento; el segundo lo formarán aquéllos obtenidos un cierto período de tiempo después que los del primero; y así sucesivamente.
- b) Se pretende que los elementos que integran cada subgrupo, sean una muestra representativa de toda la producción a lo largo de un período de tiempo dado.

Ver Juran (1974), pag 23-5 a 23-7 .

5) Decidir el tamaño y frecuencia del subgrupo. Por ejemplo, con respecto al tamaño $n=5$ es común para cartas \bar{X} y R y $n>50$ es usual para cartas p y np . Para consejos más detallados para estas cartas u otros tipos, ver Jurán (1974), Sección 23, Grant y Levenworth (1980), pág. 120, y Duncan (1974).

6) Proporcionar un sistema para coleccionar los datos y hacer las mediciones.

- 7) Hacer la carta de control con el propósito de analizar el proceso. Tomar los datos para un cierto período de tiempo (típicamente 25 subgrupos) o utilizar datos ya existentes. En base a ellos, ver si el proceso está bajo control y cumple con las especificaciones. Si éste no es el caso, investigar más y tomar las acciones apropiadas.

- 8) Controlar el proceso con las cartas. Si los métodos de trabajo estandarizados implementados en el paso 7) se mantienen, la carta de control debe mostrarse bajo control. Si alguna anomalía aparece en la carta, investigar la causa inmediatamente y tomar la acción apropiada.
- 9) Recalcular las líneas de control periódicamente. Si el equipo o métodos cambian, hay que recalcular los límites empezando con paso 7). En cualquier caso escrutinios periódicos de las cartas son convenientes.
- 10) En base al paso 9), reducir la frecuencia o tamaño de los subgrupos hasta llegar a desaparecer la carta en caso que su uso ya no sea necesario. (Generalmente es necesario hacer auditorías de calidad sobre cualquier aspecto de un proceso con una cierta periodicidad.

CAPITULO 3

CONSTRUCCION DE LAS CARTAS DE CONTROL

ANALISIS PRELIMINAR DE UN PROCESO.

Para un proceso determinado, se tiene información acerca de la maquinaria, equipo, material y/o algunas propiedades utilizadas, y se desea contestar algunas preguntas tales como precisión, reproducibilidad, confiabilidad y en general un control del procesos al observar algunas variables del mismo.

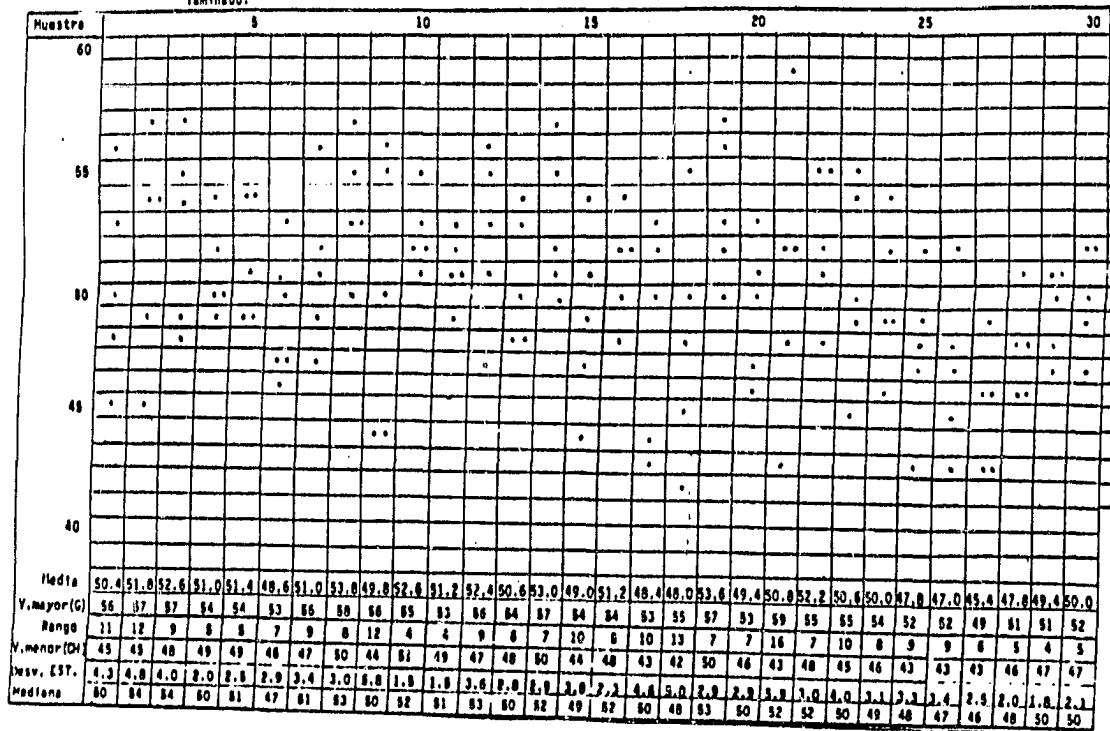
Un análisis preliminar de las principales variables del proceso ayudaría grandemente en el desarrollo del control de calidad, con ventajas en ahorros de tiempo y dinero. Los datos obtenidos por este análisis preliminar deben ser tratados por técnicas elementales de estadística (como se expusieron en el Capítulo 1) con el objeto de hacer una adecuada planeación para la utilización posterior de cartas de control.

Es recomendable contar con la mayor cantidad de datos posibles, lo cual dependerá de la disponibilidad económica, tiempo, recursos humanos y variables utilizadas para el control del proceso. Se deben buscar diseños de formatos de registros para la recolección de la información, en donde se haga un listado de tipo cronológico, pudiendo existir subconjuntos de estos listados separados, por ejemplo, por el número de maquinaria, turno, personal, característica del material, etc. Todas las consideraciones mencionadas deben contar con una codificación en el manejo de información. Por ejemplo ver

ANÁLISIS DEL PROCESO DE LAMINADO						
Producto: Operación: Equipo utilizado: Inspector: Vo. Bo. Variable o característica medida: Especificación:						
No. Muestra	Mediciones Registradas					Observaciones
	1	2	3	4	5	
01						
02						
.						
.						
.						
99						

Fig. 3-1: Hoja para vaciado de datos.

Gráfico de datos individuales, histograma y estadísticas para las medidas de espesor de una plancha pasada por el proceso de laminado.



$\bar{x} = 50.36$
 $C = 54.4$
 $R = 8.0$
 $Ch = 46.4$
 $\hat{\sigma} = 3.742$

CARTA DE CONTROL PARA LA MEDIA.

Se tiene el resultado bien conocido de que la distribución de los valores de la media \bar{X} , de muestras extraídas al azar de una sola población, tiende a ser normal cuando el tamaño de la muestra es razonablemente grande. Para muchas poblaciones encontradas en la práctica industrial, un tamaño de muestra de $n=5$ resulta adecuado. Entonces en estos casos casi todas las observaciones de \bar{X} (el 99.73%) se encontrará dentro del intervalo de ± 3 veces la desviación estándar de \bar{X} , alrededor de la media poblacional \bar{X}' .

En símbolos se tiene:

$$P(\bar{X} - 3\sigma_{\bar{X}} < \bar{X} < \bar{X}' + 3\sigma_{\bar{X}}) \approx 0.9973$$

donde

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma'}{\sqrt{n}}$$

y σ' es la desviación estándar de la población.

Ahora bien, en el cálculo práctico de los límites de control para \bar{X} , no se conoce ni \bar{X}' ni σ' . Sin embargo, se puede aproximar \bar{X}' con la gran media $\bar{\bar{X}}$. La desviación estándar poblacional σ' se puede estimar ya sea con la media de los rangos \bar{R} , o con la media de las desviaciones estándar de los subgrupos \bar{s} , a través de las fórmulas:

$$\sigma' \hat{=} R/d_2$$

$$\sigma' \hat{=} \hat{\sigma}/c_2$$

donde los valores de d_2 y c_2 se encuentran en el Apéndice A y B respectivamente.

Entonces, una forma de calcular los límites de control, es utilizando el valor del rango promedio que en el caso del Ejemplo 1 da:

$$\sigma_X \hat{=} \bar{R}/d_2 = 8/2.326 = 3.43$$

$$\sigma_{\bar{X}} = \sigma_X' / \sqrt{5} \hat{=} 1.54$$

$$\text{LCS (Límite de Control Superior para la media)} = 50.36 + 3(1.54) = 54.97$$

$$\text{LCI (Límite de Control Inferior para la media)} = 50.36 - 3(1.54) = 45.75$$

La fórmula general para este caso resulta ser:

$$\bar{\bar{X}} \pm A_2 \bar{R}$$

donde A_2 se obtiene del apéndice C, o del cálculo de

$$A_2 = \frac{3}{d_2 \sqrt{n}} \quad (a)$$

Otra forma de calcular los límites de control, es utilizar el promedio de las desviaciones estándar de las muestras denotado por $\bar{\sigma}$ y el valor de

$$\sigma' \hat{=} R/d_2$$

$$\sigma' \hat{=} \sigma/c_2$$

donde los valores de d_2 y c_2 se encuentran en el Apéndice.

Entonces, una forma de calcular los límites de control, es utilizando el valor del rango promedio que en el caso del Ejemplo 1 da:

$$\sigma_X \hat{=} \bar{R}/d_2 = 8/2.326 = 3.43$$

$$\sigma_{\bar{X}} = \sigma'_X / \sqrt{5} \hat{=} 1.54$$

$$\text{LCS (Límite de Control Superior para la media)} = 50.36 + 3(1.54) = 54.97$$

$$\text{LCI (Límite de Control Inferior para la media)} = 50.36 - 3(1.54) = 45.75$$

La fórmula general para este caso resulta ser:

$$\bar{X} \pm A_2 \bar{R}$$

donde A_2 se obtiene del apéndice , o del cálculo de

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

Otra forma de calcular los límites de control, es utilizar el promedio de las desviaciones estándar de las muestras denotado por $\bar{\sigma}$ y el valor de

c_2 del apéndice B

$$\bar{\sigma} = 3.242$$

$$\sigma_X^1 = \sigma/c_2 = 3.242/0.8407 = 3.857$$

$$\sigma_{\bar{X}} = \sigma_X^1 / \sqrt{n} = 1.72$$

y entonces:

$$LCS = (\text{Límite de Control Superior para la media}) = 50.36 + 3(1.72) = 55.53$$

$$LCI = (\text{Límite de Control Inferior para la media}) = 50.36 - 3(1.72) = 45.19$$

Nótese que los valores varían ligeramente de los calculados en base al rango promedio \bar{R} .

La fórmula general para este caso es:

$$\bar{X} \pm A_1 \bar{\sigma}$$

donde A_1 se obtiene del apéndice D, o del cálculo de

$$A_1 = \frac{3}{c_2 \sqrt{n}} \quad (b)$$

En la Figura 3-3, se encuentra la carta de control para \bar{X} para los datos correspondientes al Ejemplo 1 del proceso de laminado.

(b) Supra ref. 2 .

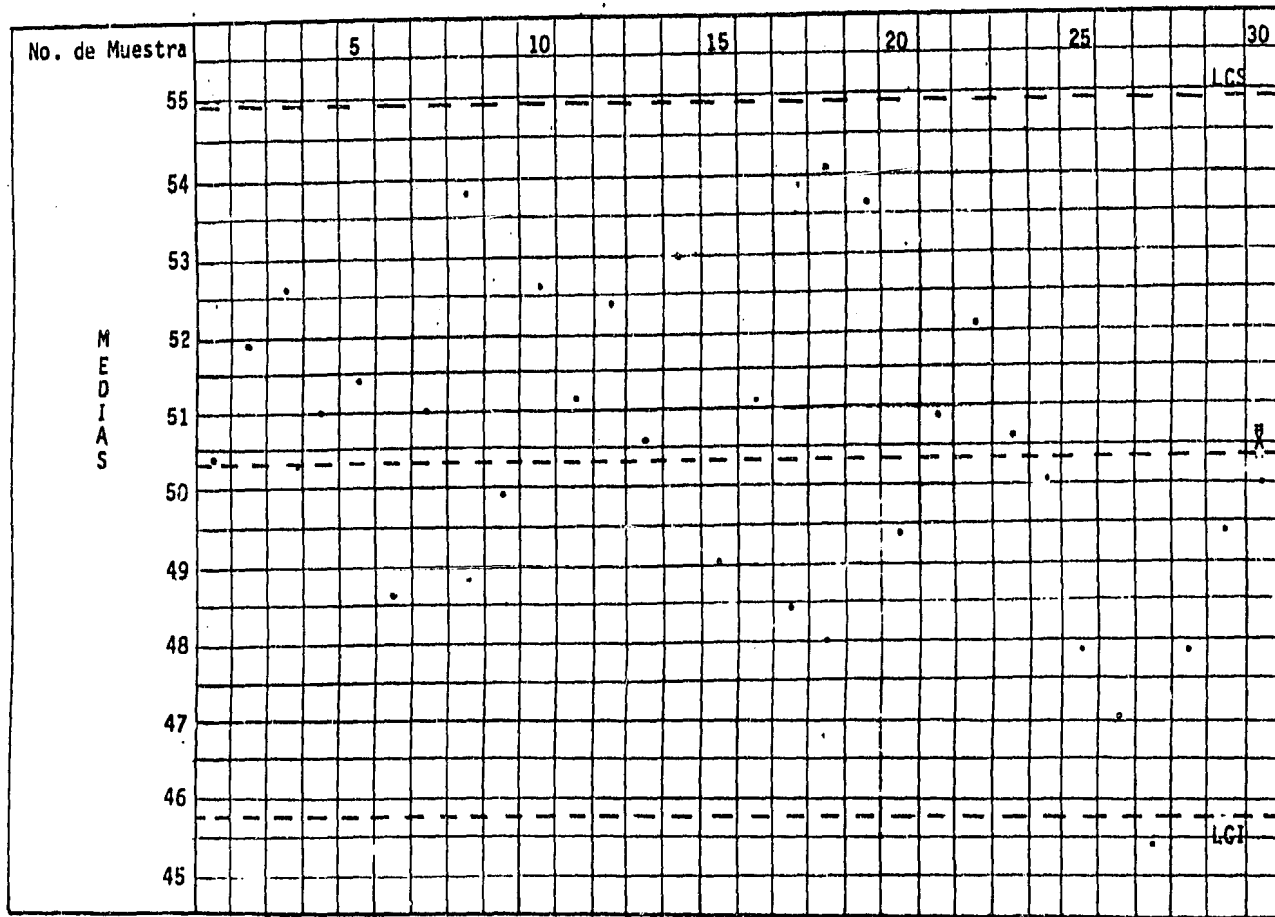


Fig.3-3: Carta de control para medias (basada en \bar{R}) para los datos del Ejemplo 1 (Proceso de laminado).

CARTA DE CONTROL PARA EL RANGO.

De igual forma que se obtuvo la carta de control para la media $\bar{X} \pm 3\sigma_{\bar{X}}$, se obtiene para la carta de control del rango:

$$\bar{R} \pm 3\sigma_R$$

y puede suceder que el límite inferior resultara aritméticamente menor a cero (es común para $n \leq 6$), para la cual el límite inferior se fijará en cero.

Para El Ejemplo 1, se tiene

$$\bar{R} = 8.0$$

y utilizando el apéndice C' para la determinación de D_3 y D_4 se tiene:

$$\begin{aligned} \bar{R} - 3\sigma_R &\approx D_3\bar{R} \\ \bar{R} + 3\sigma_R &\approx D_4\bar{R} \end{aligned} \quad (c)$$

por lo cual:

$$LCS = (\text{Límite de Control Superior para el rango}) = (2.11)(8.0) = 16.88$$

$$LCI = (\text{Límite de Control Inferior para el rango}) = (0)(8.0) = 0$$

Si se desea tomar el valor conocido o estimado de la desviación estándar de la población σ' , se tendría para el cálculo de los límites de con-

(c) Supra ref. 2 .

control para R la fórmula:

$$d_2\sigma' \pm 3\sigma_R$$

y utilizando el apéndice E para la determinación de los factores D_1 y D_2 se tiene:

$$\begin{aligned}d_2\sigma' - 3\sigma_R &\approx D_1\sigma' & (d) \\d_2\sigma' + 3\sigma_R &\approx D_2\sigma'\end{aligned}$$

por lo cual

$$LCS = (\text{Límite de Control Superior para el Rango}) = 4.92(3.43) = 16.88$$

$$LCI = (\text{Límite de Control Inferior para el Rango}) = 0(3.43) = 0$$

cuyos valores concuerdan exactamente con los valores anteriores.

Desarrollando una carta de control para los rangos obtenidos del Ejemplo 1 se tiene la Figura 3-4.

(d) Supra ref. 2 .

control para R la fórmula:

$$d_2\sigma' \pm 3\sigma_R$$

y utilizando el apéndice para la determinación de los factores D_1 y D_2 se tiene:

$$d_2\sigma' - 3\sigma_R \approx D_1\sigma'$$

$$d_2\sigma' + 3\sigma_R \approx D_2\sigma'$$

por lo cual

$$\text{LCS} = (\text{Límite de Control Superior para el Rango}) = 4.92(3.43) = 16.88$$

$$\text{LCI} = (\text{Límite de Control Inferior para el Rango}) = 0(3.43) = 0$$

cuyos valores concuerdan exactamente con los valores anteriores.

Desarrollando una carta de control para los rangos obtenidos del Ejemplo 1 se tiene la Figura 3-4.

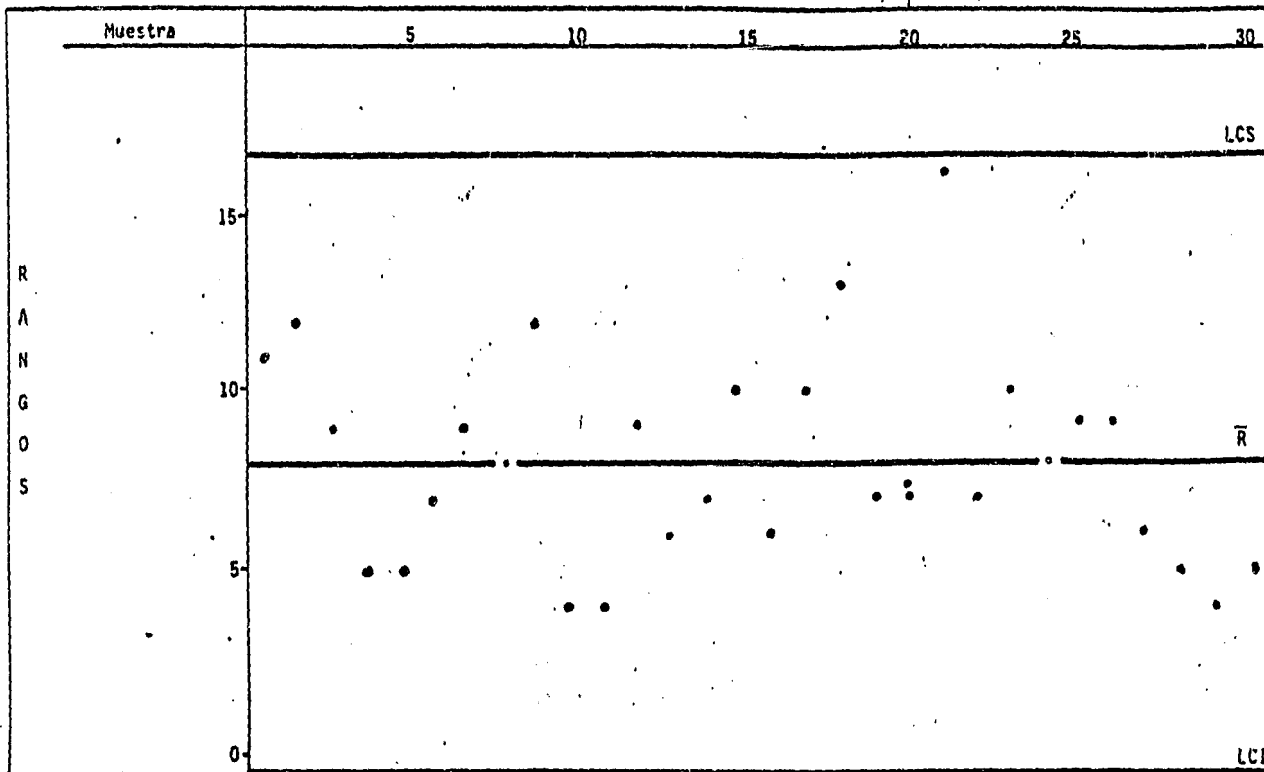


Fig. 3-4: Carta de control para rangos para los datos del Ejemplo 1.

CARTA DE CONTROL PARA LA DESVIACION ESTANDAR

Así como para la media se tenía $\bar{X} \pm 3\sigma_{\bar{X}}$ y para el rango $R \pm 3\sigma_R$, ahora para la desviación estándar resultará:

$$\bar{\sigma} \pm 3\sigma_{\sigma}$$

y el límite inferior debe ser ajustado a cero en el caso de $n \leq 5$.

Para el Ejemplo 1 se tiene

$$\bar{\sigma} = 3.242$$

y utilizando el Apéndice D para el cálculo de B_3 y B_4 se tiene:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} - 3\sigma_{\sigma} &\approx B_3 \bar{\sigma} \\ \bar{\sigma} + 3\sigma_{\sigma} &= B_4 \bar{\sigma} \end{aligned} \quad (e)$$

por lo cual

$$\begin{aligned} \text{LCS (Límite de Control Superior para la desviación estándar)} &= \\ &= 0(3.242) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LCI (Límite de Control Inferior para la desviación estándar)} &= \\ &= 2.09(3.242) = 6.776 \end{aligned}$$

(e) Supra ref. 2 .

Si se desea tomar el valor conocido o estimado de la desviación estándar de la población σ' , se tendría:

$$c_2 \sigma' \pm 3 \sigma_\sigma$$

y utilizando el Apendice F para el cálculo de B_1 y B_2 se tiene:

$$\begin{aligned} c_2 \sigma' - 3 \sigma_\sigma &\approx B_1 \sigma' & (f) \\ c_2 \sigma' + 3 \sigma_\sigma &\approx B_2 \sigma' \end{aligned}$$

por lo cual:

$$\begin{aligned} \text{LCS (Límite de Control Superior para la desviación estándar)} &= \\ &= 0(3.43) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LCI (Límite de Control Inferior para la desviación estándar)} &= \\ &= 1.76(3.43) = 6.037 \end{aligned}$$

Desarrollando una carta de control para las desviaciones estándar obtenidas del Ejemplo 1, se obtiene la Figura 3-5.

(f) Supra. ref. 2 .

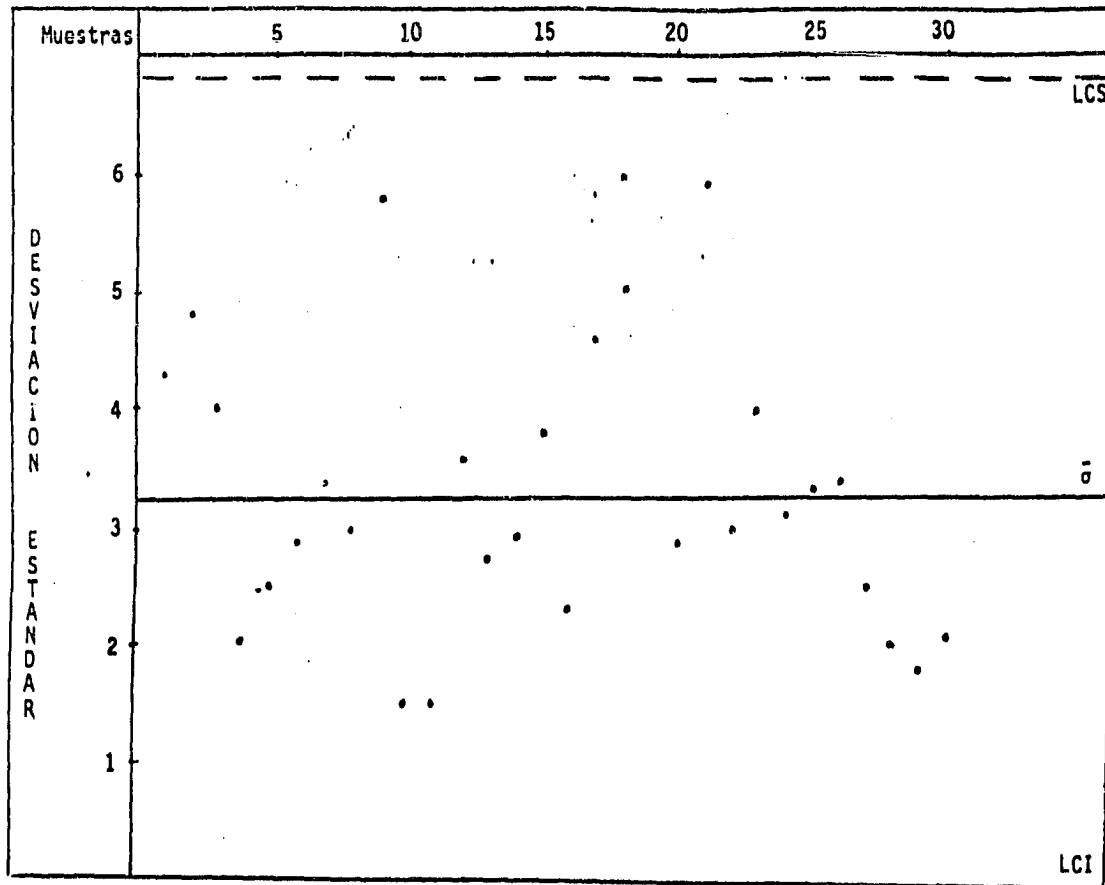


Fig. 3-5., Carta de Control para medianas para los datos del Ejemplo 1.

CARTA DE CONTROL PARA LA FRACCIÓN DE DEFECTUOSOS. TAMAÑO MUESTRA VARIABLE.

La fracción de artículos defectuosos "p" es la relación entre el número de artículos defectuosos y el número de artículos inspeccionados. Si se desea el porcentaje de artículos defectuosos, simplemente es 100 p.

Los límites de control son obtenidos como:

$$\bar{p} \pm 3\sigma_p$$

donde \bar{p} es el valor observado de la fracción de artículos defectuosos considerando todos los subgrupos unidos en un gran lote y σ_p es la desviación estándar de las p, determinadas en cada subgrupo. Se puede demostrar que:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n_i}} \quad (g) \quad [2]$$

donde n_i = tamaño de muestra i-ésima.

(g) Supra ref. 2 .

Para simplificar los cálculos, se puede hacer uso de la siguiente fórmula que es una aproximación a la fórmula 2:

$$\sigma_p \cong \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{\bar{n}}} \quad (h) \quad [3]$$

donde \bar{n} = tamaño promedio de las muestras = $1/k \sum_{i=1}^k n_i$

Ejemplo 2. Supongamos que se decide que un artículo es defectuoso o no defectuoso dependiendo si contiene alguna fractura en una inspección de su superficie. Los datos colocados en orden cronológico se encuentran en la Tabla 3-1.

En la primera columna está colocado el día cronológico en el cual fue tomada la muestra, cuyo tamaño " n_i " está dado en la columna 2, y por último, la columna 3 contiene el número de artículos defectuosos encontrados para esa muestra.

La columna 4 contiene el cálculo para la fracción de defectuosos:

$$p_i = \frac{DEF}{n_i}$$

Al final de la Tabla aparece la suma de todos los artículos defectuosos y el número total de defectuosos. Con estas sumas es posible obtener \bar{p} :

$$\bar{p} = \frac{DEF \text{ total}}{n \text{ total}} = \frac{639}{10818} \approx 0.0591$$

(h) Supra ref. 2 .

Tabla 3-1 Datos para el número de artículos defectuosos encontrados en una inspección de superficie.

Día	No. Art. Inspeccion. n_i	No. Art. Defectuosos DEF	Fracc. de Defectuosos p	σ_p $= \sqrt{\frac{p(1-p)}{n_i}}$	$\bar{p} \pm 3 \sigma_p$ [2]	
					LCI	LCS
01	552	18	0.0326	0.0160	0.0290	0.0892
02	477	27	0.0566	0.0108	0.0267	0.0915
03	551	44	0.0799	0.0100	0.0289	0.0892
04	542	50	0.0923	0.0101	0.0287	0.0894
05	623	19	0.0305	0.0094	0.0307	0.0874
06	415	11	0.0265	0.0116	0.0244	0.0938
07	644	32	0.0497	0.0093	0.0312	0.0869
08	572	22	0.0385	0.0099	0.0295	0.0886
09	461	23	0.0499	0.0110	0.0261	0.0920
10	440	33	0.0750	0.0112	0.0254	0.0928
11	586	41	0.0700	0.0097	0.0299	0.0883
12	450	31	0.0689	0.0111	0.0257	0.0924
13	454	63	0.1388	0.0111	0.0259	0.0923
14	509	28	0.0550	0.0104	0.0277	0.0904
15	619	20	0.0323	0.0095	0.0306	0.0875
16	678	35	0.0516	0.0091	0.0319	0.0862
17	641	58	0.0905	0.0093	0.0311	0.0870
18	528	39	0.0739	0.0103	0.0283	0.0898
19	482	12	0.0249	0.0107	0.0269	0.0913
20	594	33	0.0556	0.0097	0.0300	0.0881

TOTAL	10818	639
-------	-------	-----

El valor de \bar{n} , resultará para las 20 muestras

$$\bar{n} = \frac{n \text{ total}}{20} = \frac{10818}{20} = 540.9$$

y la desviación estándar general aplicando \bar{n} [3] es:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{\bar{n}}} = 0.0101$$

por lo cual se obtienen los límites siguientes:

LCS (Límite de Control Superior de la fracción de defectuosos)

$$= \bar{p} + 3\sigma_p = 0.0591 + 3(0.0101) = 0.0895$$

LCI (Límite de Control Inferior de la fracción de defectuosos)

$$= \bar{p} - 3\sigma_p = 0.0591 - 3(0.0101) = 0.0287$$

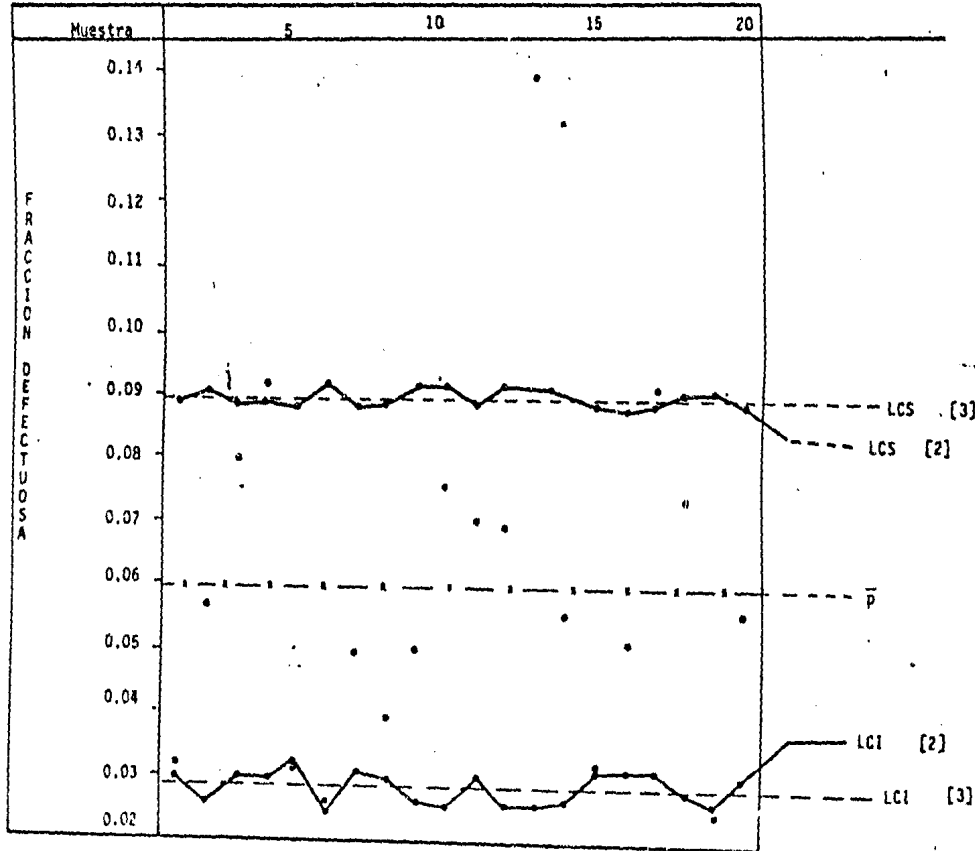
Los datos colocados en una carta de control con estos límites se muestra en la Figura 3-6 .

Si la desviación estándar es calculada por la fórmula [2]:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n_i}}$$

entonces los límites de control vienen dados en las columnas 6 y 7 de la Tabla 3-1, con la desviación estándar mostrada en la columna 5.

Fig. 3-6 1: Carta de control para p , la fracción defectuosa para los datos del Ejemplo 2.



La gráfica de estos límites viene mostrada en la Figura 3-8 y como puede observarse no está formada por dos rectas paralelas, como en los límites del caso anterior.

Para este ejemplo, la fracción defectuosa de la muestra número 5 se encuentra dentro de los límites de control calculados mediante la fórmula 3 y fuera de los límites obtenidos mediante la fórmula 2. Lo inverso sucede con la muestra 6, la cual cae fuera de los límites de [3] y dentro de los límites de [2].

Si no existe una gran variación en el tamaño de muestra, los dos métodos aquí enunciados son aproximadamente equivalentes, y puede apreciarse fácilmente que es deseable contar con un tamaño de muestra constante.

CARTA DE CONTROL PARA LA FRACCION DE DEFECTUOSOS, TAMAÑO DE MUESTRA CONSTANTE.

Si el tamaño de muestra es constante, puede resultar conveniente colocar la información en función del número de defectuosos "np", en lugar de la fracción de defectuosos "p" y los límites quedarían expresados como

$$\begin{aligned} & n\bar{p} + 3\sigma_{np} \\ & n\bar{p} \pm 3\sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})} \end{aligned} \quad (1)$$

Ejemplo 3. Supóngase el mismo número de artículos defectuosos del Ejemplo 2 y tómese un tamaño de muestra constante de 500 (ver Tabla 3-2)

(i) Supra ref. 2 .

TABLA 3 -2. Datos para el número de artículos defectuosos encontrados en una inspección de superficie suponiendo que $n = 500$ en cada lote.

Dfa D	Número Art. Inspec. n	Número Art. Defectuosos DEF	Fracción de Defectuosos p
01	500	18	0.0360
02	500	27	0.054
03	500	44	0.088
04	500	50	0.100
05	500	19	0.038
06	500	11	0.022
07	500	32	0.064
08	500	22	0.044
09	500	23	0.046
10	500	33	0.066
11	500	41	0.082
12	500	31	0.062
13	500	63	0.126
14	500	28	0.056
15	500	20	0.040
16	500	35	0.070
17	500	58	0.116
18	500	39	0.078
19	500	12	0.024
20	500	33	0.066
Total	10,000	639	0.0639

Calculando se obtiene:

$$n\bar{p} = 639/20 = 31.95$$

$$\bar{p} = \frac{639}{10000} = 0.0639$$

$$\sigma_{np} = \sqrt{31.95 (1 - 0.0639)} = 5.47$$

quedando los límites:

LCS (Límite de Control Superior para el número de defectuosos) =

$$31.95 + 3(5.47) = 48.4$$

LCI (Límite de Control Inferior para el número de defectuosos) =

$$31.95 - 3(5.47) = 15.5$$

Ver Figura 3-7 para observar los datos y límites de esta carta de control.

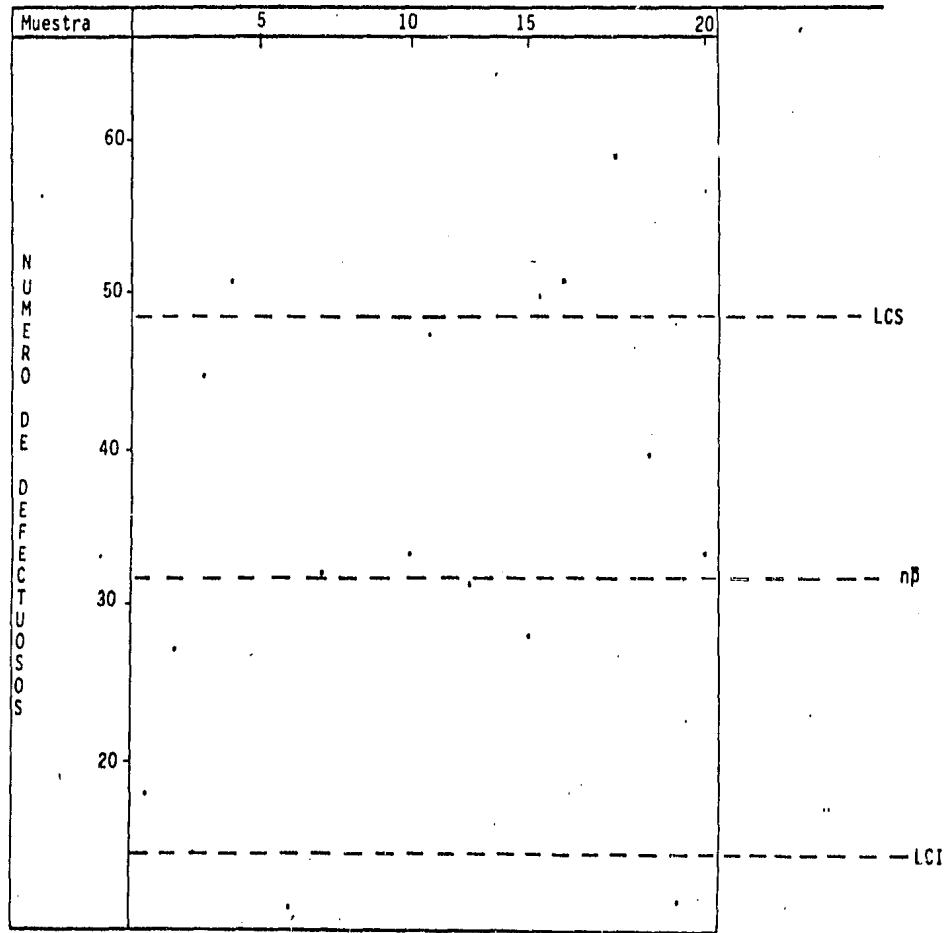


Fig. 3-7 : Carta de control para np , número de defectuosos para los datos del Ejemplo 3.

CARTA DE CONTROL PARA NUMERO DE DEFECTOS POR UNIDAD.

Un artículo se clasifica como defectuoso, si no cumple una o más de las especificaciones impuestas. Cada una de las pruebas fallidas para el artículo se le conoce como defecto, y un artículo defectuoso contiene uno o más defectos.

La muestra tomada para medir el número de defectos puede ser desde un artículo hasta un tamaño muestral no-constante. (Por ejemplo, tramos de cable eléctrico de diferentes largos). Esto causa complicaciones para obtener un control y es conveniente expresar el número de defectos por número de unidades:

$$u = \frac{c}{n}$$

donde c = número de defectos

n = número de unidades (tamaño muestral)

y la fórmula para determinar sus límites de control es:

$$\begin{aligned} \bar{u} \pm \sigma_u \\ \bar{u} \pm \sqrt{\bar{u}/n} \end{aligned} \quad (j)$$

donde $\bar{u} = \frac{\text{número total de defectos}}{\text{número total de unidades}}$ y n = tamaño muestra (constante).

(j) Supra ref. 2 .

Si el tamaño de muestra no es constante, entonces es necesario tomar en cuenta el tamaño muestral, y la fórmula quedaría:

$$\bar{u} \pm \sqrt{\bar{u}/n_i} \quad (k) \quad [4]$$

donde n_i = tamaño de la muestra i -ésima.

Es posible proceder acorde a la sección anterior y aplicar la fórmula

$$\bar{u} \pm \sqrt{\bar{u}/\bar{n}} \quad (1) \quad [5]$$

para la obtención de los límites y donde \bar{n} = tamaño promedio de las muestras.

Ejemplo 4. A continuación se tiene la Tabla 3-3 donde se encuentra el número de defectos y de unidades en diferentes muestras colocadas cronológicamente.

La columna 1 muestra la fecha progresiva, la columna 2 muestra las unidades producidas y la columna 3 los defectos observados para ese número de unidades.

Se calcula el número de defectos por unidad para cada fecha y este resultado se encuentra en la columna 4. Los valores totales son:

(k) y (1) supra ref. 2 .

TABLA 3-3. Datos para el número de unidades producidas y el número de defectos observados para un cierto proceso.

Dfa	Unidades Producidas n_i	Defectos Observados c	Defectos por Unidad u	$\sigma_u \sqrt{\bar{u}/n_i}$	LCI †	LCS †
01	20	18	0.900	0.183	0.120	1.217
02	20	7	0.350	0.183	0.120	1.217
03	28	24	0.857	0.155	0.205	1.133
04	21	5	0.238	0.178	0.133	1.204
05	22	19	0.864	0.174	0.146	1.192
06	25	11	0.440	0.164	0.178	1.160
07	22	22	1.000	0.174	0.146	1.192
08	28	22	0.786	0.155	0.205	1.133
09	23	23	1.000	0.171	0.157	1.180
10	25	13	0.520	0.164	0.178	1.160
11	22	11	0.500	0.174	0.146	1.192
12	23	21	0.913	0.171	0.157	1.180
13	20	6	0.300	0.183	0.120	1.217
14	23	28	1.217	0.171	0.157	1.180
15	23	20	0.870	0.171	0.157	1.180
16	20	5	0.250	0.183	0.120	1.217
17	26	8	0.308	0.160	0.188	1.150
18	20	19	0.950	0.183	0.120	1.217
19	20	12	0.600	0.183	0.120	1.217
20	28	12	0.464	0.155	0.205	1.133
Total	459	307				

† Cálculos realizados mediante la fórmula 4.

$$n \text{ total} = 459$$

$$c \text{ total} = 307$$

$$\bar{u} = c \text{ Total} / n = 0.6688$$

$$\bar{n} = n \text{ Total} / 20 = 459/20 = 22.95$$

por lo cual, si se aplica la fórmula 5 que utiliza \bar{n} , se tiene:

$$\sigma_u = \sqrt{\bar{u} / \bar{n}} = \sqrt{0.6688/22.94} = 0.171$$

y los límites son:

LCS (Límite de Control Superior para número de defectos)

$$= 0.6688 + 3(0.171) = 1.181$$

LCI (Límite de Control Inferior para número de defectos)

$$= 0.6688 - 3(0.171) = 0.157$$

Si se utiliza la fórmula 4, los resultados se muestran en las columnas 5, 6 y 7. Los datos de los defectos por unidad y los límites de Control respectivos se encuentran en l. Figura 3-8 .

CARTA DE CONTROL PARA NUMERO TOTAL DE DEFECTOS.

En muchos tipos de artículos producidos, existe una alta probabilidad de que se presenten defectos y se puede suponer que la variable que corresponde al número total de defectos sigue la distribución de Poisson.

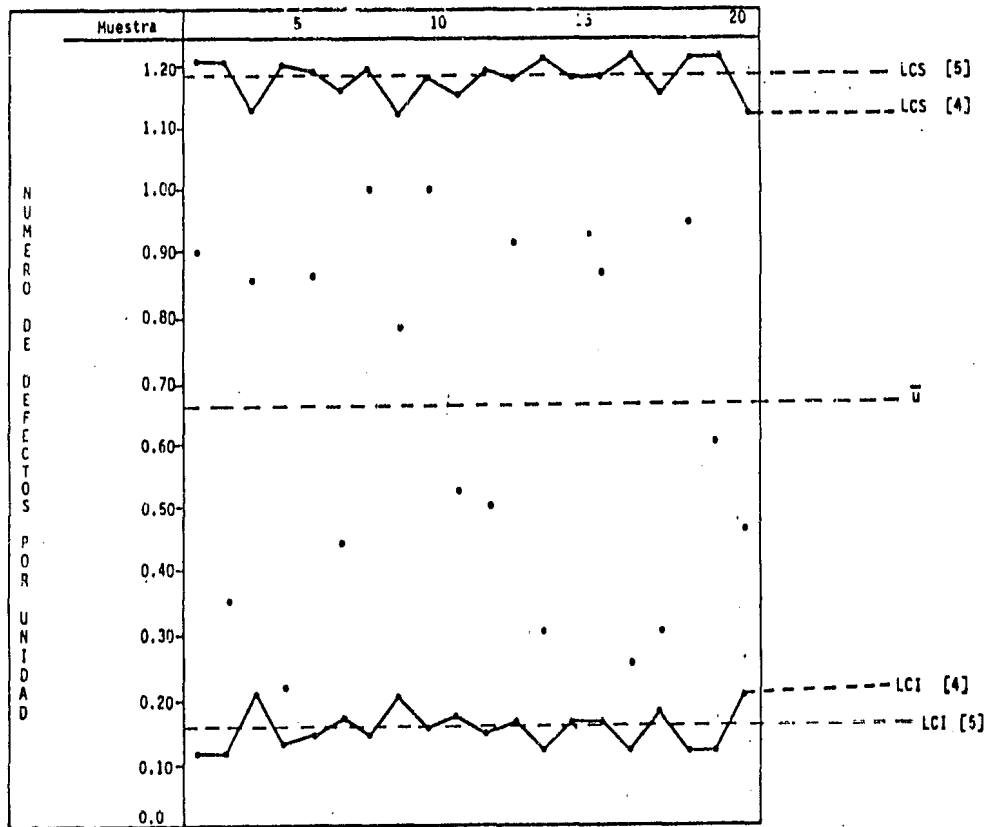


Fig. 4-8 : Carta de control para u , el número de defectos por unidad para los datos del Ejemplo 4.

Esta carta es equivalente a la carta de control para número de defectos por unidad "u" cuando el tamaño de muestra es constante. Es particularmente efectiva cuando el número posible de defectos por unidad es grande pero los porcentajes para cualquiera de los defectos es pequeño.

Los límites de control para el número total de defectos viene dado por:

$$\begin{aligned} \bar{c} \pm 3\sigma_c \\ \bar{c} \pm 3\sqrt{\bar{c}} \end{aligned} \quad (m)$$

donde \bar{c} = es el número total de defectos en todas las muestras dividido por el número total de muestras, o en otras palabras, el número promedio de defectos por muestra.

Ejemplo 5. Tomando el número de defectos observados del ejemplo 4, el valor \bar{c} resultaría:

$$\bar{c} = \frac{307}{20} = 15.35$$

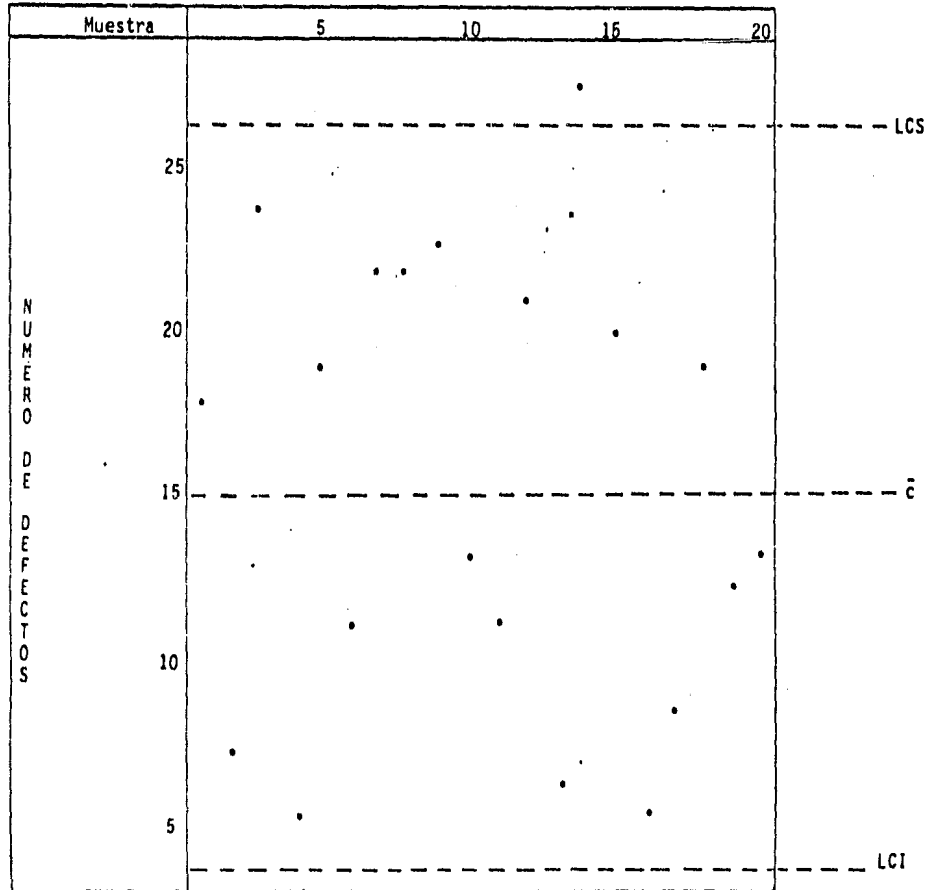
$$\sigma_c = \sqrt{\bar{c}} = 3.92$$

y los límites son:

$$\begin{aligned} \text{LCS (Límite de Control Superior para el número total de defectos)} \\ = 15.35 + 3(3.92) = 27.10 \end{aligned}$$

(m) Supra ref. 2 .

Fig. 3-9. Carta de control para c, para los datos del ejemplo 5.



LSC (límite de control inferior para el número total de defectos)

$$= 15.35 - 3(3.92) = 3.60$$

Los datos para el número total de defectos y sus límites de control colocados en una carta de control, son mostrados en la Figura 3-9 ,

Ejemplo 6. Hechos del caso. En la tabla 3-4, se indican los errores de alineación observados en la inspección final de un determinado modelo de avión. La Figura 3-10 ofrece la representación del gráfico de control de estas 50 observaciones. Los defectos observados en cada avión constituyen un subgrupo de este gráfico.

El número total de defectos de alineación encontrados en los primeros 25 subgrupos, era de 200. El cálculo de la media es :

$$\bar{c} = \frac{200}{25} = 8.0$$

Los límites de control de prueba, calculados a partir de este valor medio, son los siguientes :

Límite de Control Superior

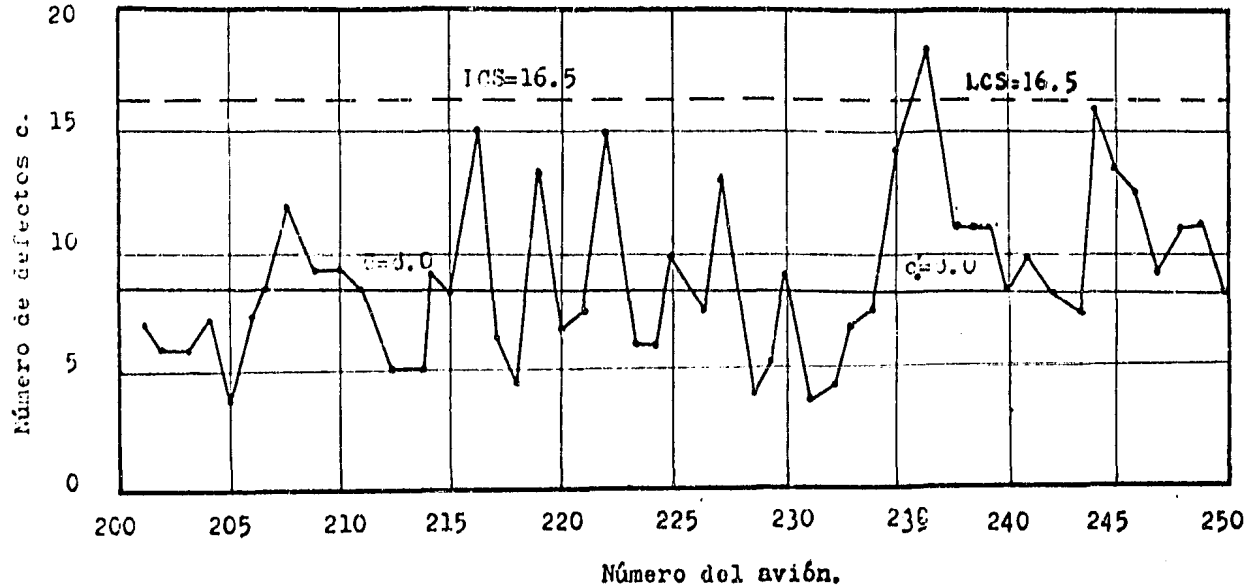
$$LCS = \bar{c} + 3 \sqrt{\bar{c}} = 8 + 3 \sqrt{8} = 16.5$$

Tabla 3-4 Defectos de alineación de un avión, observados en una inspección final.

Número	Núm. de defectos	Número	Núm. de defectos
201	7	226	7
202	6	227	13
203	6	228	4
204	7	229	5
205	4	230	9
206	7	231	3
207	8	232	4
208	12	233	6
209	9	234	7
210	9	235	14
211	8	236	18
212	5	237	11
213	5	238	11
214	9	239	11
215	8	240	8
216	15	241	10
217	6	242	8
218	4	243	7
219	13	244	16
220	7	245	13
221	8	246	12
222	15	247	9
223	6	248	11
224	6	249	11
225	10	250	8
TOTAL	200	TOTAL.....	236

Fig. 3-10 Gráfico de control de defectos c .

Datos defectos de alineación



Límite de Control Inferior

$$LCI = \bar{c} - 3/\sqrt{\bar{c}} = 8 - 3/\sqrt{8} = 0$$

(Cuando para el límite de control inferior de un gráfico c se obtenga un valor negativo, se adoptará el valor cero.)

Como ninguno de los 25 primeros puntos de este gráfico sale fuera de los límites de control de prueba, calculados a partir de ellos mismos, puede tomarse un número estándar de defectos c , igual a \bar{c} , continuando el gráfico de control a lo largo del siguiente período, con una línea central de 8.0 y unos límites de control de 16.5 y 0.

Del segundo grupo de 25 puntos, uno de ellos (avión No. 236) se encuentra por encima del límite de control superior. La media durante este período fue de :

$$\bar{c} = \frac{236}{25} = 9.44$$

(Omitiendo el valor fuera de control, la media es 9.08)

De los 16 últimos puntos, correspondientes a las aviones 235 al 250, 12 están por encima del valor estándar c : 3 se encuentran exactamente sobre ese valor, y sólo uno cae por debajo. Parece evidente que se ha pro-

ducido un empeoramiento ligero, pero definitivo, de la calidad (o un incremento de rigurosidad en la inspección) durante este período.

En un caso como éste, debería continuarse casi siempre con el valor estándar c previamente establecido, a pesar de la evidencia de una deterioración de la calidad.

El postulado principal referente al gráfico p también se aplica al gráfico c , y dice : el valor estándar no debería revisarse en el sentido de rebajar la calidad, sólo porque el personal de producción va prestando menos atención a la misma. Por otro lado, si unas normas de inspección más estrictas hubieran hecho que la calidad pareciera más pobre, aunque en realidad no fuera peor que antes, podría justificarse una revisión de c a un valor mayor.

CAPITULO 4

INTERPRETACION Y APLICACION DE LAS CARTAS DE CONTROL DE CALIDAD

INTRODUCCION

En el Capitulo anterior se introdujeron las cartas de control definiendo los conceptos básicos relacionados con ellas. Después en el Capitulo 3, se explicaron las fórmulas para su construcción. En este Capitulo se dará una introducción a la interpretación de la información que proporciona este método gráfico y se ilustrará su aplicación en la industria mediante seis ejemplos.

Como se describió brevemente en el Capitulo 2, la información que proporcionan las cartas se puede agrupar en dos grandes rubros: información para el análisis de procesos e información para el control de procesos. De hecho, los dos principales criterios para juzgar hasta que punto son correctas la planificación y la operación de un proceso, son:

- 1) que el proceso sea capaz de mantener las tolerancias (especificaciones) y
- 2) que el proceso sea estable y libre de sorpresas desagradables.

Las cartas de control se han desarrollado para probar cuantitativamente los procesos en relación a estos dos criterios:

1. Para medir la aptitud de un proceso para mantener las tolerancias (y para analizarlo y modificarlo si no cumple), se hace un estudio cuantitativo de la "capacidad del proceso con respecto a la variación". La capacidad del proceso con respecto a la variación es la mínima variación que se puede conseguir con él. Bajo este criterio, en la tercera sección de este Capítulo, se discuten unas técnicas para el análisis de procesos basándose en las cartas de control para atributos. En la cuarta sección se profundiza más en este análisis utilizando como herramienta las poderosas cartas \bar{X} y R.
2. Para medir la estabilidad de un proceso (el segundo criterio mencionado anteriormente), se utiliza el concepto de "estado de control estadístico" medido a través de la ausencia de "causas atribuibles" como fue explicado en el Capítulo 2. En la siguiente sección se exponen las siglas que se utilizan para comprobar la existencia de causas atribuibles. Además para cada regla se mencionan las causas a las cuales se puede atribuir la falta de control y que ocurren con mayor frecuencia en la industria.

COMO LEER LAS CARTAS DE CONTROL.

Como se mencionó anteriormente, cuando se está utilizando una carta con el fin de controlar un proceso, el propósito de construir la carta es para determinar, en base a los movimientos de los puntos, si han ocurrido cambios en el proceso y, en caso afirmativo, determinar que tipo de cambios se suscitaron. Por lo tanto, para utilizar las cartas de control efectivamente, es necesario establecer criterios para evaluar los que se considerará como una

normalidad. Cuando el proceso está bajo control esto quiere decir que:
1) ningún punto cae fuera de los límites de control y 2) el agrupamiento de puntos no muestra ninguna forma particular (por ejemplo, una tendencia de aumentar, un movimiento cíclico, etc.). Por lo tanto, se sabrá que alguna anomalía ha ocurrido (causas atribuibles han entrado al sistema) si:
1) existen puntos fuera de los límites de control, ó 2) los puntos muestran alguna forma particular aunque todos caen dentro de los límites de control.

En lo que sigue se dan seis formas particulares de puntos que pueden ocurrir en las cartas de control. Para cada una, se dan una gráfica, las razones típicas por las cuales puede ocurrir dicha forma, y algunas pruebas estadísticas para checar o confirmar la existencia de la forma bajo discusión.

1. CAMBIOS (BRINCOS) EN EL NIVEL DEL PROCESO.

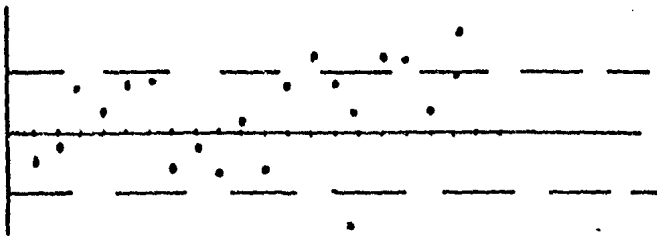


Fig. 4-1: Un brinco en el nivel de un proceso.

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN AFECTAR LA CARTA \bar{X} DE ESTA MISMA MANERA
(VARIABILIDAD ESTABLE).

1. Cambio en la producción de materiales o subensambles procedientes de diferentes fuentes.
2. Nuevo trabajador o máquina.
3. Modificación del método de producción o proceso.
4. Cambio en el dispositivo de inspección o el método de inspección.

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN AFECTAR LA CARTA R DE ESTA MANERA.

1. Cambio en el material (más heterogéneo).
2. Cambio en el método (mayor velocidad acompañado por un pérdida de precisión).
3. Cambio en el operario (a uno menos entrenado).
4. Cambio en el método de inspección (p.e. a un análisis químico más barato pero menos preciso).

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN AFECTAR LAS CARTAS p, np, u, o c DE ESTA MANERA.

Al igual que en el caso de la carta \bar{X} . En especial un aumento (o disminución) del nivel puede asociarse con un cambio en el criterio de inspección aumentando (disminuyendo) su severidad.

PRUEBAS PARA UN CAMBIO DE NIVEL (BRINCO).

Para definir estas pruebas es necesario subdividir al área de la carta en seis zonas entre los límites de control superior e inferior. Estas zonas se etiquetan A,B,C,C,B,A, con las zonas C localizadas simétricamente alrededor de la línea central, como aparece en la Figura 4-2.

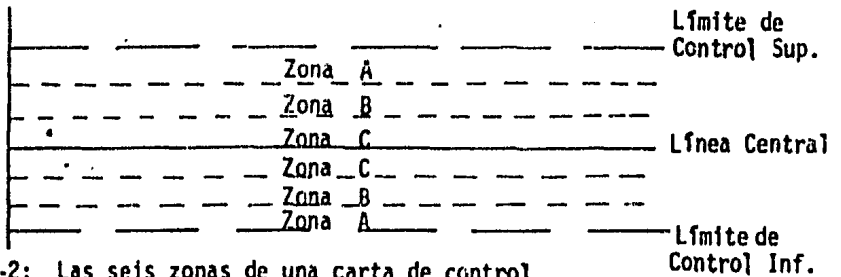


Fig. 4-2: Las seis zonas de una carta de control.

Entonces las pruebas para detectar causas atribuibles (falta de control)

son:

Prueba 1: Un punto más allá de la Zona A. Esta es la prueba I de Shewhart y es el criterio más sencillo de aplicar, solamente notando si el punto sale de los límites de control.

Prueba 2: Dos de tres puntos en la Zona A o más allá.

Prueba 3: Cuatro de cinco puntos en la Zona B o más allá.

Prueba 4. Nueve puntos seguidos en la Zona C o más allá.

2. TENDENCIAS EN EL NIVEL DEL PROCESO.

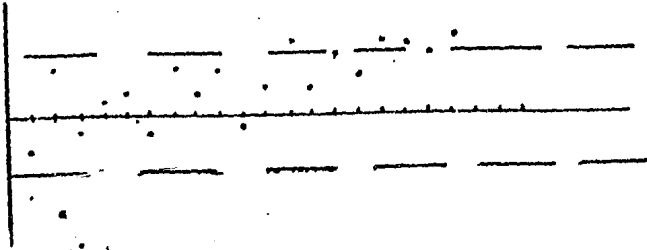


Fig. 4-3: Una tendencia ascendente en el nivel de un proceso.

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN AFECTAR LA CARTA \bar{X} DE ESTA MANERA (VARIABILIDAD ESTABLE)

1. Determinación gradual de equipo que afecta toda la producción.
2. Desgaste de las herramientas de corte.
3. Acumulación de productos de desperdicio en las tuberías.
4. Calentamiento de la máquina.
5. Reducción gradual en la concentración de la solución para cromar.

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN AFECTAR LA CARTA R DE ESTA MANERA.

1. Mejora o empeora de la habilidad del operario.

2. Fatiga del operario (la tendencia se repetirá en cada turno).
3. Cambio en las proporciones de subprocesos alimentando una línea de ensamble.
4. Cambio gradual en la homogeneidad de la materia prima (mejor o peor).

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN AFECTAR LAS CARTAS \bar{x} , np, u o c DE ESTA MANERA.

Las mismas que afectan las cartas \bar{x} y R ; sin embargo en este caso no existiría tanta oportunidad de discriminar entre diferentes causas ya que casi todas las causas darán una tendencia ascendente en las cartas para atributos (\bar{p} , np, u, y c).

PRUEBAS PARA DETECTAR TENDENCIAS.

Prueba 5. Seis puntos seguidos en aumento (o en disminución).

3. CICLOS RECURRENTES (PERIODICIDAD)

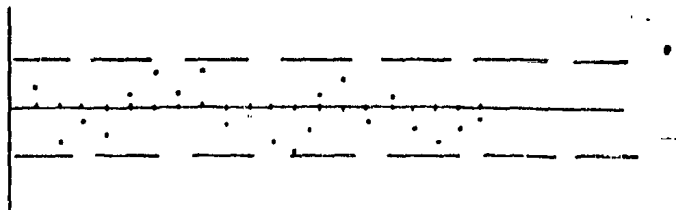


Fig. 4 -4: Ciclos recurrentes (periodicidad)

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN AFECTAR LA CARTA \bar{X} DE ESTA MANERA (VARIABILIDAD ESTABLE)

1. Temperatura u otros cambios periódicos en el ambiente.
2. Diferencias en los dispositivos de medición o de prueba que se utilizan en un cierto orden.
3. Rotación regular de máquinas u operarios.
4. Efecto sistemático producido por dos máquinas, husillos, operarios o vendedores que se usan alternadamente.

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN AFECTAR LA CARTA R DE ESTA MANERA.

1. Mantenimiento preventivo programado.
2. Fatiga de trabajadores o secretarías.

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN AFECTAR LAS CARTAS p , np , u \bar{c} DE ESTA MANERA.

Las mismas que afectan las cartas \bar{X} y R. Adicionalmente el rol estándar de inspectores que pueden ser más o menos estrictos pueden dar cartas con esta apariencia.

PRUEBAS PARA CICLOS RECURRENTES (PERIODICIDAD).

Prueba 6. Catorce puntos seguidos alternando entre altos y bajos.

Esta prueba sería particularmente sensitiva para detectar la causa 4)

descrita anteriormente para la carta \bar{X} . Un arreglo de datos como el de la Figura 4-4 puede ser detectado con una "prueba de corridas" la cual está descrita en el libro de Draper y Smith (1981), pags. 157- a 162.

4. ALTA PROPORCIÓN DE LOS PUNTOS CERCA O FUERA DE LOS LÍMITES.

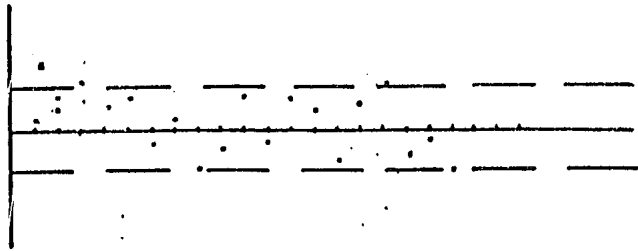


Fig.4-5: Alta proporción de los puntos cerca o fuera de los límites.

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN AFECTAR LA CARTA \bar{X} DE ESTA MANERA (VARIABILIDAD ESTABLE)

1. Sobre control (ajustes innecesarios en el proceso). Para un ejemplo ver Grant y Levenworth (1980), Ejemplo 3-3 y comentarios, también Juran (1974) pags. 9-24 a 9.26.
2. Diferencias sistemáticas grandes en la calidad del material.
3. Diferencias matemáticas grandes en los métodos de prueba o en los dispositivos.

4. Control de dos o más procesos en la misma carta (uno con resultados mayores y el otro con resultados menores). Ver ejemplo 4 más adelante.

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN AFECTAR LA CARTA R DE ESTA MANERA.

1. Mezcla de materiales de calidades bastante diferentes.
2. Diferentes trabajadores utilizando la misma carta R (uno más hábil que el otro).
3. Datos de proceso operando bajo diferentes condiciones graficados en la misma carta.

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN AFECTAR LAS CARTAS p, np, u O c DE ESTA MANERA.

1. Diferentes operarios o máquinas graficados en la misma carta.
2. Diferencias en la severidad de inspección.
3. Falta de independencia de unidades sucesivas. Ver Grant y Levenworth (1980), págs. 248-250 para algunos ejemplos excelentes.

PRUEBAS PARA DETECTAR UNA ALTA PROPOSICION DE LOS PUNTOS CERCA O FUERA DE LOS LIMITES.

Prueba 7. Ocho puntos seguidos a ambos lados de la línea central con ninguno en la Zona C .

5. FALTA DE VARIABILIDAD (ESTATIFICACION).

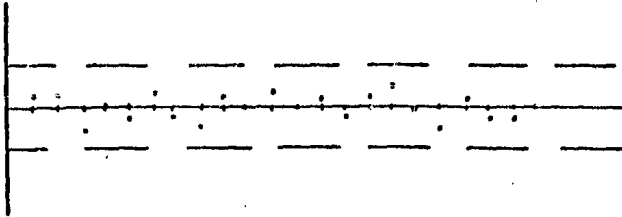


Fig. 4.-6: Falta de variabilidad de los puntos en una carta de control.

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN AFECTAR LA CARTA \bar{X} DE ESTA MANERA (VARIABILIDAD ESTABLE).

1. Una equivocación en el cálculo de los límites de control para la carta \bar{X} .
2. Agrupamiento en una misma muestra (subgrupo) de datos provenientes de universos con medias bastante diferentes.

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN AFECTAR A LA CARTA R DE ESTA MANERA.

1. Una equivocación en el cálculo de los límites de control para la carta R.
2. Agrupamiento en una misma muestra (subgrupo) de datos provenientes de universos con medias bastante diferentes.

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN AFECTAR A LAS CARTAS p, np, u ó c DE ESTA MISMA MANERA.

1. Una equivocación en el cálculo de los límites de control para la carta.
2. "Cuchareo" de los resultados de la inspección.

PRUEBA PARA DETECTAR FALTA DE VARIABILIDAD.

Prueba 8. Quince puntos seguidos en la Zona C, arriba y abajo de la línea central.

6. CORRELACION ENTRE LOS PUNTOS EN DIFERENTES CARTAS DE CONTROL.

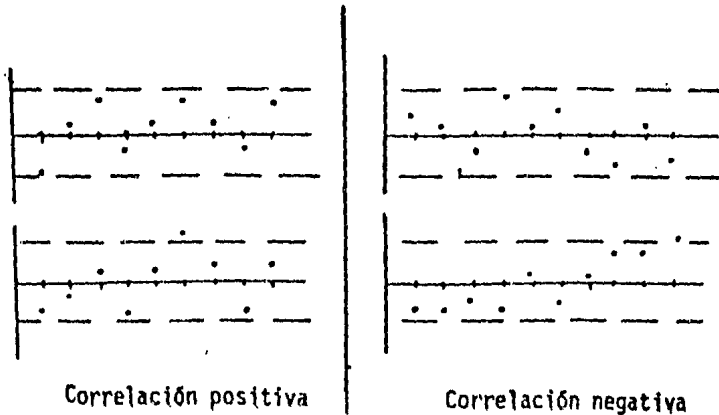


Fig. 4-7: Correlación entre cartas de control.

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN OCASIONAR UNA CORRELACION ENTRE LA CARTA \bar{X} Y R PARA EL MISMO PROCESO.

1. Si los promedios están correlacionados positivamente con los rangos, la población tiene un sesgo positivo (cola larga hacia el lado mayor). Si la correlación es negativa indica sesgo negativo.
2. Los mismos datos graficados (equivocadamente) en las dos cartas.

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN OCASIONAR UNA CORRELACION ENTRE LAS CARTAS \bar{X} O LAS CARTAS R PARA PROCESOS DISTINTOS.

1. Relaciones desconocidas de causa y efecto reflejadas en las dos cartas. Ver Ejemplo 2 más adelante para una excelente ilustración de este fenómeno.
2. Los mismos datos graficados (equivocadamente) en las dos cartas.

ALGUNAS CAUSAS QUE PUEDEN OCASIONAR UNA CORRELACION ENTRE CARTAS PARA ATRIBUTOS CORRESPONDIENTES A PROCESOS DISTINTOS.

Las mismas que en el caso anterior de correlación entre cartas \bar{X} para procesos distintos.

PRUEBAS PARA DETECTAR UNA CORRELACION ENTRE CARTAS.

La prueba más útil en general es la correlación de Pearson sobre los datos que generaron las cartas sospechosas. Ver Snedecor y Cochran(1980).

Para una versión más gráfica de una prueba sencilla y rápida (pero muy sensitiva) para correlación, ver Ishikawa (1982), Cap. 9 .

A continuación se presentan tres ejemplos ilustrativos, en los cuales se pone de relieve el empleo de las técnicas anteriormente expuestas.

Ejemplo 1 : Fresado de una entalla en un bloque terminal de un avión. Exposición de las etapas a realizar en el empleo de los gráficos \bar{X} y R aplicados a una operación de fabricación.

Decisiones previas al gráfico de control. Los elevados porcentajes de piezas defectuosas obtenidos en el taller de una compañía de aviación suscitó la necesidad de examinar las razones del problema. En vista de que la mayor parte de los defectos se debían a que las dimensiones estaban fuera de tolerancia, se decidió intentar buscar las causas mediante el empleo de los gráficos \bar{X} y R.

Estos gráficos, en los que, naturalmente, se reflejaban las medidas reales, sólo iban a emplearse para aquellas dimensiones que eran causa de rechace de numerosas piezas.

Entre éstas , se seleccionaron aquéllas cuyos costes de recuperación o de deshecho, eran elevados, o que provocaban un retraso en las operaciones de montaje. Aunque el objetivo inicial de todos los gráficos \bar{X} y R eran descubrir las causas del problema, se anunció que se mantendrían algunos de ellos para el control rutinario del proceso y, posiblemente, para la inspección de aceptación.

En este ejemplo se contempla una de estas dimensiones, la anchura de una muesca en duraluminio forjado empleado como bloque terminal en el extremo de la viga del ala del avión. El acabado de esta hendidura se hacía mediante una operación de fresado. La especificación de la anchura de la muesca era 0.8750 $\left\{ \begin{array}{l} +0.0050 \\ - 0.0000 \end{array} \right.$ pulgadas. Los técnicos proyectistas

habían definido esta dimensión con una tolerancia unilateral debido a las exigencias del ajuste del bloque terminal. Era fundamental que esa medida fuese de 0.8750 pulgadas por lo menos y lo más cercana posible a ese valor.

La mayor parte de las piezas de avión producidas en ese taller eran de grandes dimensiones, fabricadas en lotes de un tamaño que podía variar de pocos cientos a varios miles. Se acordó que por consideraciones prácticas, se requeriría un criterio uniforme respecto al método a adoptar para la toma de muestras, así como para su tamaño y frecuencia, a fin de aplicarlo en todos los gráficos \bar{X} y R a emplear. Un factor limitante era el escaso personal disponible para la inspección del gráfico de control, en relación con la cantidad de éstos que se pretendía utilizar . Sobre esta ba-

se , se decidió inspeccionar para cada gráfico, una muestra que fuera aproximadamente un 5% de la producción total de la pieza en cuestión. La opinión general proponía subgrupos de cinco elementos, así que éste fue el tamaño de muestra adoptado. Condición esencial era que siempre que fuera posible, las mediciones se realizaran a pie de máquina . Para que no se acumularan estos lotes de cinco piezas en el puesto de trabajo, se estableció que se inspeccionara una pieza de cada 20 fabricadas, consistiendo cada subgrupo en cinco de esas observaciones.

En la figura 4-8 se ilustra el tipo de anotación emplea que se adoptó porque muchas de las dimensiones se tomaban con una aproximación de una diezmillonésima de pulgada pensándose que con tantas cifras significativas, cualquier forma de distribución de datos que exigiera muchos cálculos mentales provocaría retrasos y errores.

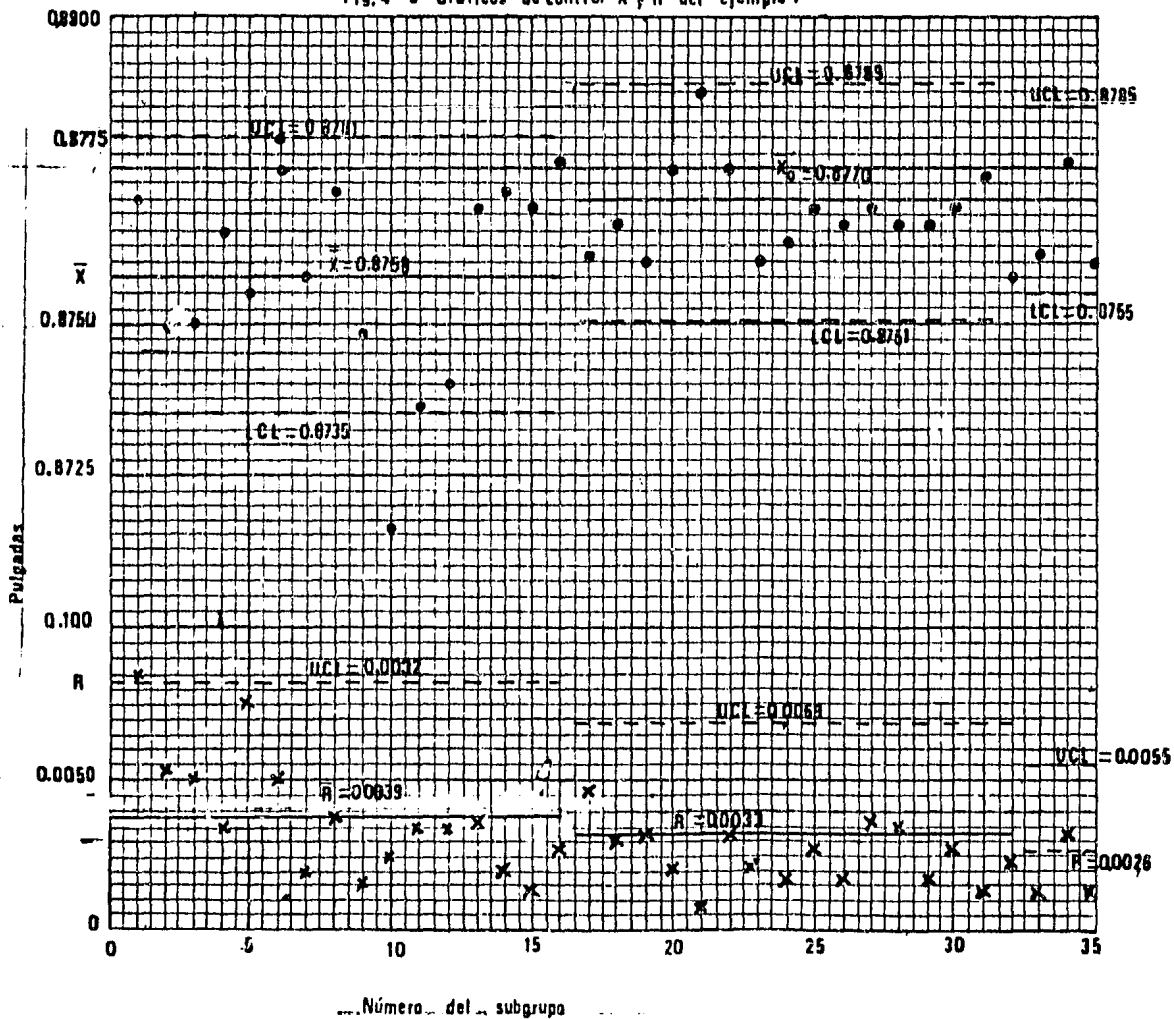
Para asegurar los datos para cada gráfico \bar{X} y R, se plasmó el método de inspección en unas instrucciones escritas. En el caso de la anchura de la muesca del bloque terminal, consistía en tomar la medida con un micrómetro colocado en dos posiciones distintas, perfectamente especificadas. El valor que se registraba era la media de estas dos observaciones.

Construcción de los gráficos de control. En la figura 4-8 se reflejan las medidas reales de los 16 primeros subgrupos, que corresponden a una producción de 1600 de estos bloques terminales. Las medias y las amplitudes se calcularon según se indica en la figura 4-8 , representándose en la figura 4-9 .

HOJA DE DATOS DEL GRÁFICO DE CONTROL \bar{X} Y R											
Producto: BLOQUE TERMINAL		Dept. n° 78				Orden n° 54321					
Característica: ANCHURA DE LA NUECA		Lim. esp. { 0.8800 in. máx.				0.8750 in. mín.					
Unid. de med. 0.0001" por encima de 0.8000											
SUBGRUPO N°	1	2	3	4	5	6	7	\bar{X}	R		
a	772	756	756	744	802	783	747	1	770	85	
	b	804	787	773	780	726	807	766	2	780	54
		3	761	51							
	c	779	733	722	734	748	711	753	4	769	36
		5	756	76							
d	719	742	760	774	758	762	758	5	756	76	
	6	780	50								
e	777	734	745	774	774	757	767	6	780	50	
	7	758	20								
TOTAL	3851	3752	3756	3826	3778	3900	3791	8	771	38	
MEANA, \bar{X}	770	750	761	765	756	780	758	9	748	16	
AMPLIUD, R	85	54	51	36	76	50	20	10	717	25	
FECHA o TIEMPO	3/7	3/7	3/7	3/8	3/8	3/8	3/9	11	737	86	
SUBGRUPO N°	8	9	10	11	12	13	14	12	740	36	
	13	769	38								
a	788	767	713	716	746	749	721	14	772	20	
	b	750	747	730	730	727	762	767	15	768	13
		16	777	27							
	c	784	741	710	752	763	778	785			
d	769	746	708	725	734	787	772				
e	762	747	727	751	730	771	768				
TOTAL	3853	3738	3505	3684	3700	3847	3860				
MEANA, \bar{X}	771	748	717	787	740	769	772	12	129	621	
AMPLIUD, R	38	16	25	36	36	38	20	CÁLCULO DE LOS LÍMITES			
FECHA o TIEMPO	3/9	3/9	3/10	3/10	3/10	4/2	4/2	$\bar{X} = 12129 \div 16 = 758$ $\bar{R} = 621 \div 16 = 39$ $A_2\bar{R} = 0.68(39) = 23$ $UCL_2 = \bar{X} + A_2\bar{R} = 758 + 23 = 781$ $LCL_2 = \bar{X} - A_2\bar{R} = 758 - 23 = 735$ $UCL_R = D_4\bar{R} = 2.11(39) = 82$ $LCL_R = D_3\bar{R} = 0$			
SUBGRUPO N°	15	16									
a	771	767									
	b	768	767								
	c	769	770								
d	770	774									
e	771	786									
TOTAL	3839	3826									
MEANA, \bar{X}	768	777									
AMPLIUD, R	13	27									
FECHA o TIEMPO	4/3	4/3									

Fig. 4-8 Hoja de datos \bar{X} y R correspondiente al ejemplo 1.

Fig. 4-9 Gráficos de control \bar{X} y R del ejemplo 1



Cuando se iba por el decimosegundo subgrupo, antes de completar esta producción y de calcular la línea central y los límites de control, el inspector de control de calidad se dio cuenta de que el operador de la máquina, de vez en cuando verificaba su trabajo mediante la medición con un micrómetro, de la anchura de la muesca del bloque terminal que acababa de salir de la máquina. Como la pieza todavía estaba caliente de la operación de fresado, la medida tomada por el operario era, debido a la dilatación del metal por la temperatura, demasiado elevada. Además, dicho operario, influenciado por la tolerancia unilateral, tendía por exceso a la dimensión nominal de 0.8750 pulgadas.

Incluso sin la línea central ni los límites de control viendo el gráfico y la hoja de datos, era evidente que muchas muescas eran demasiado estrechas. Después del decimosegundo subgrupo se instruyó al operador para que efectuara sus mediciones una vez que la pieza se hubiera enfriado a la temperatura ambiente y tendiera al valor 0.8775, punto medio entre los límites superior e inferior de tolerancia. Esto se reflejó en los resultados obtenidos en los subgrupos 13 al 16 .

Determinación de los límites de control de prueba. El cálculo de los límites de control de prueba se efectuó después de haber completado la producción con los 16 primeros subgrupos.

Como se indica en la figura 4-8, se emplearon los factores A_2 y D_4 , correspondientes al apéndice 3 . Estos límites de control se representan en el gráfico de la figura 4-9 .

Conclusiones preliminares deducidas de los gráficos. El primer subgrupo se encuentra por encima del límite de control superior del gráfico R. El subgrupo 10 está por debajo del límite de control inferior del gráfico \bar{X} . Además, los 10 últimos puntos del gráfico R caen por debajo de la línea central. Evidentemente, las medidas obtenidas no son el resultado de un sistema constante de causas debidas al azar .

Dejando aparte el subgrupo 1, la \bar{R} de los 15 subgrupos restantes es $\frac{536}{15} = 36$, lo cual da un límite superior de control revisado de :

$$D_4 \bar{R} = 2.11(36) = 76.$$

El subgrupo 5 cae exactamente en dicho límite.

Cuando se trata de máquinas manuales, la experiencia demuestra que en los casos en que la dispersión de un proceso controlado depende en parte del cuidado que preste el operario, la introducción del gráfico de control hace que ese cuidado se incremente, reduciéndose de esta manera la dispersión del proceso. Por esta razón, las amplitudes de los subgrupos iniciales no pueden ser representativas de lo que puede esperarse posteriormente. El aspecto general del gráfico R con la ráfaga de sus 10 últimos puntos por debajo de \bar{R} sugiere que en este caso también se cumple lo anteriormente dicho. Por ello parece razonable revisar de nuevo el valor \bar{R} eliminando el subgrupo 5, obteniéndose $\bar{R} = \frac{460}{14} = 33$, es decir $\bar{R} = 0.0033$ pulgadas.

Con este nuevo \bar{R} puede estimarse σ' , desviación tipo del proceso, que podría anticiparse en caso de que éste se

controlara posteriormente. Esta estimación de σ' vale

$$\bar{R}/D_2 = \frac{0.0033}{2.326} = 0.0014 \text{ pulgadas. Si este fuera el verdadero}$$

valor de σ' , la zona de tolerancia del proceso controlado, $6\sigma'$ debería ser :

$$6(0.0014) = 0.0084 .$$

La zona de tolerancia exigida es :

$$LCS - LCI = 0.8800 - 0.8750 = 0.0050.$$

Resulta evidente que la tolerancia teórica de este proceso es considerablemente mayor que la tolerancia especificada. A no ser que pueda reducirse la dispersión del proceso, es obvio que aunque se lleve bajo control, se obtendrá un elevado porcentaje de producto defectuoso.

Aquí se refleja la situación, en la que la dispersión es demasiado grande y la media del proceso ($\bar{X} = 0.8758$) es demasiado baja; la cual sin embargo es susceptible de ajuste. Las instrucciones dadas al operario después del subgrupo 12 parecían elevar definitivamente el valor medio. A primera vista, parece ser que lo más razonable es reducir los defectos al mínimo intentando mantener el proceso bajo control, con una media centrada entre los límites de especificación superior e inferior, es decir, en 0.8775 .

Sin embargo, esta conclusión no tiene en cuenta el hecho de que una hendidura demasiado estrecha puede ensancharse, mientras que una hendidura demasiado grande no puede reducirse de tamaño. En otras palabras, recuperar una pieza cuesta menos que desecharla.

Por esa razón, es preferible centrar el proceso a un nivel en el que muy pocos puntos superen el límite superior de especificación, 0.8800 pulgadas, aunque parte de ellos puedan encontrarse por debajo del límite inferior de especificación, 0.8750 pulgadas. Para un primer cálculo de \bar{X}'_0 el límite superior 3-sigma de las observaciones podría situarse en 0.8800. De ser así :

$$\begin{aligned}\bar{X}'_0 + 3\sigma' &= 0.8800 \\ \bar{X}'_0 + 3(0.0014) &= 0.8800 \\ \bar{X}'_0 &= 0.8758\end{aligned}$$

Casualmente, este valor es exactamente el de $\bar{\bar{X}}$ de los 16 primeros subgrupos. Es evidente que este valor central dará una proporción considerable de producto de recuperación. La experiencia en trabajos de este tipo demuestra que siempre se puede pensar en una reducción de la dispersión del proceso. En ese caso, sería prudente centrarlo en un valor algo por encima de 0.8758, que sería tanto más elevado cuanto mayor fuese la mejora esperada, dependiendo también de la relación de costes entre un producto desechado y uno de recuperación. Se escogió la cifra de 0.8770 .

Continuidad en el empleo de los gráficos. Varias semanas después, al empezar la siguiente orden de producción, se continuó el gráfico de control estableciéndose la línea central en $\bar{X}'_0 = 0.8770$. Los límites de con

trol 3-sigma se basaron en la supuesta $\sigma' = 0.0014$.

Empleando los valores de los apéndices E y G , se tiene :

$$\begin{aligned} \text{LGS}(\bar{X}) &= \bar{X}'_0 + A\sigma' = 0.8770 + 1.34(0.0014) \\ &= 0.8789 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LCI}(\bar{X}) &= \bar{X}'_0 - A\sigma' = 0.8770 - 1.34(0.0014) \\ &= 0.8751 \end{aligned}$$

$$\text{LGS}(R) = D_2\sigma' = 4.92(0.0014) = 0.0069$$

$$\text{Línea central } (R) = d_2\sigma' = 2.32(0.0014) = 0.0033$$

$$\text{LCI}(R) = D_1\sigma' = 0$$

(Como σ' se había estimado de $\bar{R} = 0.0033$, se hubiesen obtenido los mismos valores manejando las fórmulas y factores del apéndice C, para una $\bar{R} = 0.0033$.)

Estos límites son los representados en los gráficos de control de la figura 4-9 entre los subgrupos 17 y 32, cuyas medias y amplitudes eran las siguientes : (al igual que la hoja de datos de la figura 4-8 , \bar{X} viene expresada en 0.0001 de pulgada que sobrepasan el valor 0.800 y R en 0.0001 de pulgada.)

Número de subgrupo	\bar{X}	R
17	761	47
18	766	31
19	760	32
20	775	22
21	788	7
22	775	32

Número de subgrupo	\bar{X}	R
23	760	21
24	763	18
25	768	27
26	766	17
27	769	38
28	766	35
29	766	17
30	769	26
31	774	14
32	758	24
Totales.....	12284	408

Ninguna de las piezas comprobadas para la inspección del gráfico de control desde el subgrupo 17 al 32, salió fuera de los límites de especificación. Los valores medios de esos 16 subgrupos son :

$$\bar{\bar{X}} = \frac{12284}{16} = 768 \text{ (es decir 0.8768 pulg.)}$$

$$\bar{R} = \frac{408}{16} = 26 \text{ (es decir, 0.0026 pulg.)}$$

De estos resultados se deduce que se ha obtenido una nueva reducción de la dispersión del proceso, lo cual debería tenerse en cuenta mediante una revisión de los límites de control, a partir del subgrupo 33.

Como no parece existir ninguna razón para cambiar la media considerada, los nuevos límites de control deberían calcularse, partiendo de un $\bar{X}'_0 = 0.8770$ y un $\bar{R} = 0.0026$, empleando los factores del apéndice C :

$$\begin{aligned} \text{LCS}(\bar{X}) &= \bar{X}'_0 + A_2 \bar{R} = 0.8770 + 0.58(0.0026) \\ &= 0.8785 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LCI}(\bar{X}) &= \bar{X}'_0 - A_2 \bar{R} = 0.8770 - 0.58(0.0026) \\ &= 0.8755 \end{aligned}$$

$$\text{LCS}(R) = D_4 \bar{R} = 2.11(0.0026) = 0.0055$$

$$\text{LCL}(R) = D_3 \bar{R} = 0$$

Estos límites se aplican a los subgrupos 33, 34 y 35, en la figura , con el valor reducido de $\bar{R} = 0.0026$, la estimación de σ' resulta :

$$\frac{0.0026}{2.326} = 0.0011 \text{ pulgadas.}$$

Si el control puede mantenerse a ese nivel, $\bar{X}' + 3\sigma' = 0.8803$ y $\bar{X}' - 3\sigma' = 0.8737$. Esto indica que todavía se producirá una pequeña cantidad de producto de desecho, conservándose una proporción moderada de producto de recuperación. De todas formas, la situación, comparada con la existente antes de comenzar el gráfico de control, experimentó una mejora considerable. A medida que fue pasando el tiempo, se comprobó que era posible mantener el control y disminuir \bar{R} (y σ') más allá del punto en que casi todo el producto se encontraba dentro de los límites de especificación.

Comentarios sobre el ejemplo 1 . El lector debe estar alerta contra la afirmación de que una reducción en la dispersión de la población, puede alcanzarse siempre rápidamente, a pesar de que en este caso haya sido realmente así. Aunque en ciertas operaciones de taller, en las que la habilidad y el cuidado del operario son dos factores importantes a controlar , es posible reducir rápidamente; no ocurre lo mismo cuando se trabaja con máquinas automáticas donde la dispersión del proceso, prácticamente es cuestión de lo que ejecutara la máquina y de la variabilidad de los materiales a mecanizar. En este caso, esta reducción de no es posible más que para aquellas operaciones en las que las características de calidad sean dimensiones.

El ejemplo 1 se ha expuesto detalladamente, no sólo para presentar las formas y los cálculos que implica la construcción de los sencillos gráficos de control de \bar{X} y R , sino también para mostrar como interviene el sentido común para la interpretación de los mismos, así como en la acción basada en dicha interpretación. Un punto a resaltar es que no pueden establecerse leyes fijas que permitan conocer, mediante la interpretación de un gráfico de control, cuál es la acción más adecuada. El responsable de decidir cuál debe ser esa acción, sea un técnico de control de calidad, un encargado, un técnico de organización, o un operario de una máquina, debe conocer perfectamente, tanto el proceso que hay que analizar como los principios generales que fundamentan el análisis del gráfico de control. Aunque desde el punto de vista estadístico, todas las situaciones pueden agruparse en unas pocas clases, cada caso posee algunas caracte

ísticas propias que lo diferencian de todos los demás; los factores económicos que deciden la acción a tomar, deberían tener en cuenta todas las características de cada caso en particular.

Ejemplo 2 : Cambio en la media del proceso de acidez del líquido colorante.

En el proceso de coloración de fibras de lana, es conveniente controlar la acidez del licor colorante, si ésta no es suficiente, la penetración de color resulta deficiente; por otra parte, un licor demasiado ácido afecta la duración de los productos hechos con esa fibra. La acidez se mide adecuadamente por medio del pH. Un pH bajo indica una acidez elevada, y viceversa.

En cualquier proceso de coloración existe una banda de valores de pH para los que se obtienen los mejores resultados en lo que respecta a la duración y a la penetración del color. Para mantener la acidez dentro de la banda deseada, se recomienda utilizar un gráfico de control para el pH.

Este gráfico de control está representado en las Figuras 4-10 y 4-10b (observándose los diversos valores y tendencias del proceso, así como los límites de control fijados),

y en él se indica la media \bar{X} de los valores del pH del licor colorante de cinco calderas Hassong, utilizadas en la coloración de mantas de lana. La Tabla 4-1 expone los valores de \bar{X} y R obtenidos durante el período de aproximadamente 5 semanas, que cubre el gráfico. Por lo general, se efectuaron dos determinaciones diarias del pH de cada caldera, aunque hubo algún día de una y tres mediciones.

En base a datos previos del proceso se habían fijado la línea central del gráfico en $\bar{X}' = 4.22$ y los límites de control en 4.05 y 4.39. Se había comprobado que estos valores de la media y de la dispersión del proceso eran satisfactorios desde el punto de vista de las características deseadas del líquido colorante. En esta gráfica, la acidez disminuye (el pH aumenta) de arriba hacia abajo.

Análisis y actuación: La acidez de la solución colorante depende no sólo de los componentes del licor, sino también de la lana a colorear. A veces hay que trabajar con lanas de diferentes características y aunque se hacen mezclas de lanas de diferentes procedencias, siempre se diferencian en algo unas de otras.

El 10. de febrero se introdujo una mezcla nueva de lanas completamente diferentes. Inmediatamente descendió la acidez. El 5 de febrero, después de haber consumido el exceso de stock antiguo, la acidez cayó por debajo del límite de control y continuó fuera de control hasta después de haber tomado las medidas correctoras, el 12 de febrero. En ese momento se cambió la cantidad de ácido introducido en el licor colorante. A partir de entonces, todos los

Fecha		Calderas					Media	Rango	
		A	B	C	D	E	\bar{X}	R	
ENERO	30a	4.17	4.10	4.24	4.20	4.14	4.17	0.14	
	31b	4.21	4.00	4.30	4.09	4.15	4.15	0.30	
FEB.	1a	4.09	4.09	4.04	4.02	4.11	4.07	0.09	
	1b	4.17	4.15	4.16	4.07	4.10	4.13	0.10	
	1c	4.29	4.23	4.25	4.28	4.05	4.22	0.24	
	2a	4.65	4.35	4.00	4.60	4.05	4.33	0.65	
	2b	4.28	4.28	4.29	4.35	4.45	4.33	0.17	
	5a	4.75	4.17	4.70	4.65	4.43	5.54	0.58	
	6a	4.63	4.60	4.54	4.52	4.41	4.54	0.22	
	6b	4.69	4.51	4.68	4.59	4.58	4.61	0.18	
	7a	4.44	4.88	4.65	4.61	4.53	4.63	0.44	
	7b	4.72	4.58	4.52	4.62	4.61	4.61	0.20	
	8a	4.48	4.39	4.32	4.25	4.41	4.37	0.23	
	8b	4.61	4.57	4.45	4.52	4.55	4.54	0.23	
	8c	4.39	4.32	4.39	4.28	4.07	4.29	0.32	
	9a	3.87	4.49	4.46	4.45	4.48	4.35	0.62	
	9b	4.32	4.23	4.50	4.28	4.22	4.31	0.28	
	12a	4.40	4.20	4.31	4.40	4.29	4.32	0.20	
	12b	4.54	4.41	4.38	4.33	4.14	4.36	0.40	
	13a	4.39	4.45	4.26	4.05	4.20	4.27	0.40	
	FEB.	13b	4.44	4.31	4.35	4.24	4.06	4.28	0.38
		14a	4.31	4.20	4.28	4.23	4.23	4.25	0.11
14b		4.10	4.32	4.36	4.28	4.24	4.26	0.26	
15a		4.21	4.08	4.05	4.13	4.03	4.10	0.18	
15b		4.26	4.18	4.11	4.12	4.03	4.14	0.23	
16a		4.35	4.45	4.15	4.12	3.93	4.20	0.52	
16b		4.29	4.32	4.27	4.17	4.15	4.24	0.17	
19a		4.51	4.09	4.22	4.18	4.05	4.21	0.46	
19b		4.23	4.09	4.15	4.05	4.03	4.11	0.20	
20a		4.30	3.99	3.90	4.11	4.05	4.07	0.40	
20b		4.27	4.24	4.17	4.15	4.27	4.22	0.12	
21a		4.14	4.86	4.03	4.00	3.52	4.11	1.34	
21b		4.32	3.87	3.37	3.68	3.36	3.72	0.96	
22a		4.24	4.37	4.14	4.13	4.02	4.18	0.35	
22b		4.15	4.19	4.30	4.35	4.46	4.29	0.31	
23a		4.14	4.30	4.12	4.10	4.19	4.17	0.20	
23b	4.21	4.19	4.08	4.10	4.12	4.14	0.13		
26a	4.35	4.26	4.24	4.25	4.50	4.32	0.26		
26b	4.31	4.25	4.27	4.24	4.23	4.26	0.08		
27a	4.04	4.09	4.55	4.08	4.04	4.16	0.51		
27b	4.32	4.18	4.40	4.20	4.15	4.25	0.25		
28a	4.25	4.33	4.26	4.32	4.24	4.28	0.09		
28b	4.20	4.35	4.31	4.24	4.20	4.26	0.15		
MARZO	1	4.19	4.17	4.10	4.08	4.16	4.14	0.11	

Tabla 4 -1: Resultados de pH para cinco calderas utilizadas para teñir fibras de lana.

GRAFICA DE CONTROL NUM. N-3/5

PRODUCTO Tejido de fibras de lana PERIODO SÓCENCO - 11 de Febrero

INSPECCION O PRUEBA *de colorante* CARACTERISTICA *de colorante* $\lambda = 722$

$\lambda_{GS} = 4.05$

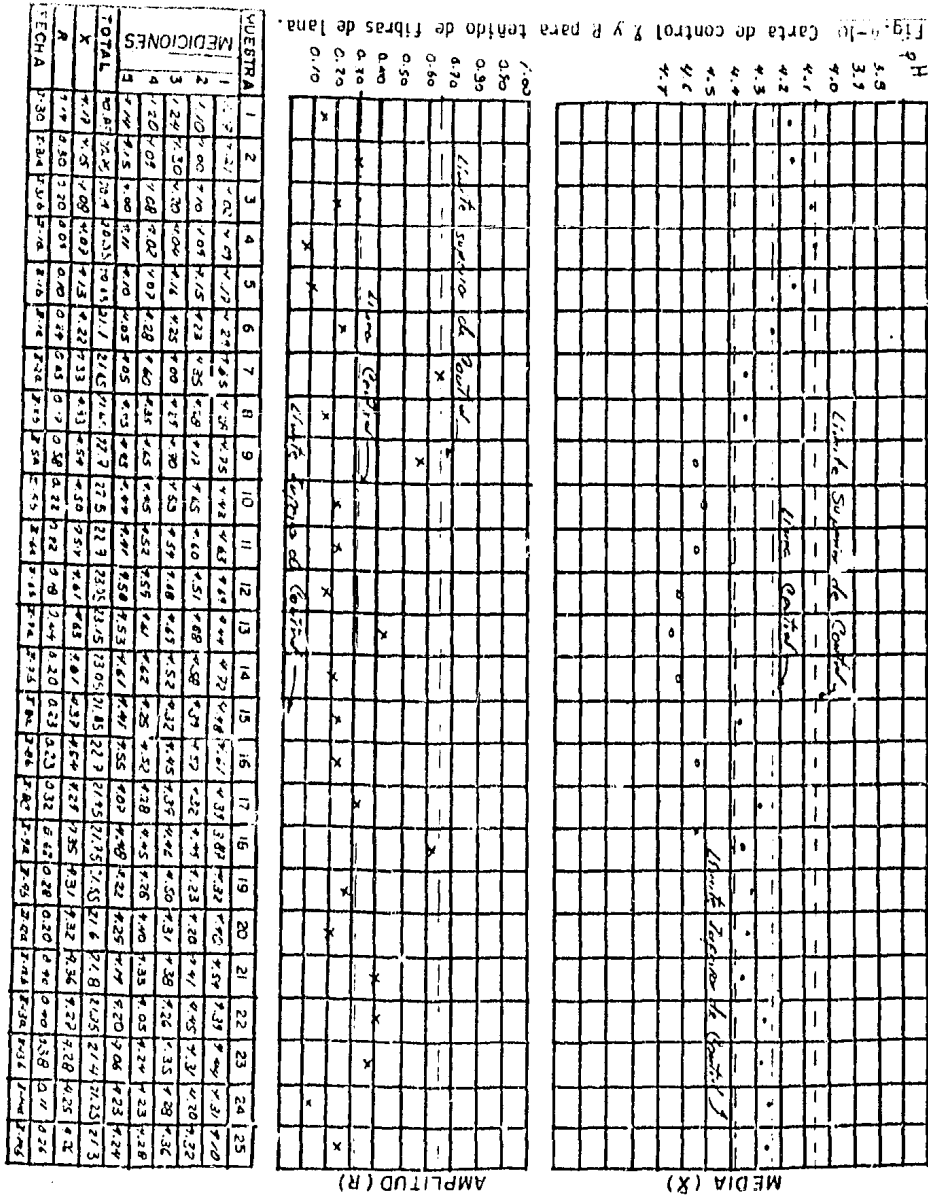


Fig. 9-10 Carta de control X y R para tejido de fibras de lana.

PRODUCTO Teñido de fibras de lana PERIODO 30 Enero - 14 Febrero

Lim de Control $\bar{X} = 4.1$

INSPECCION O PRUEBA Acidez por colorante CARACTERISTICA Con LCS = 4.39 y

LCS = 4.05

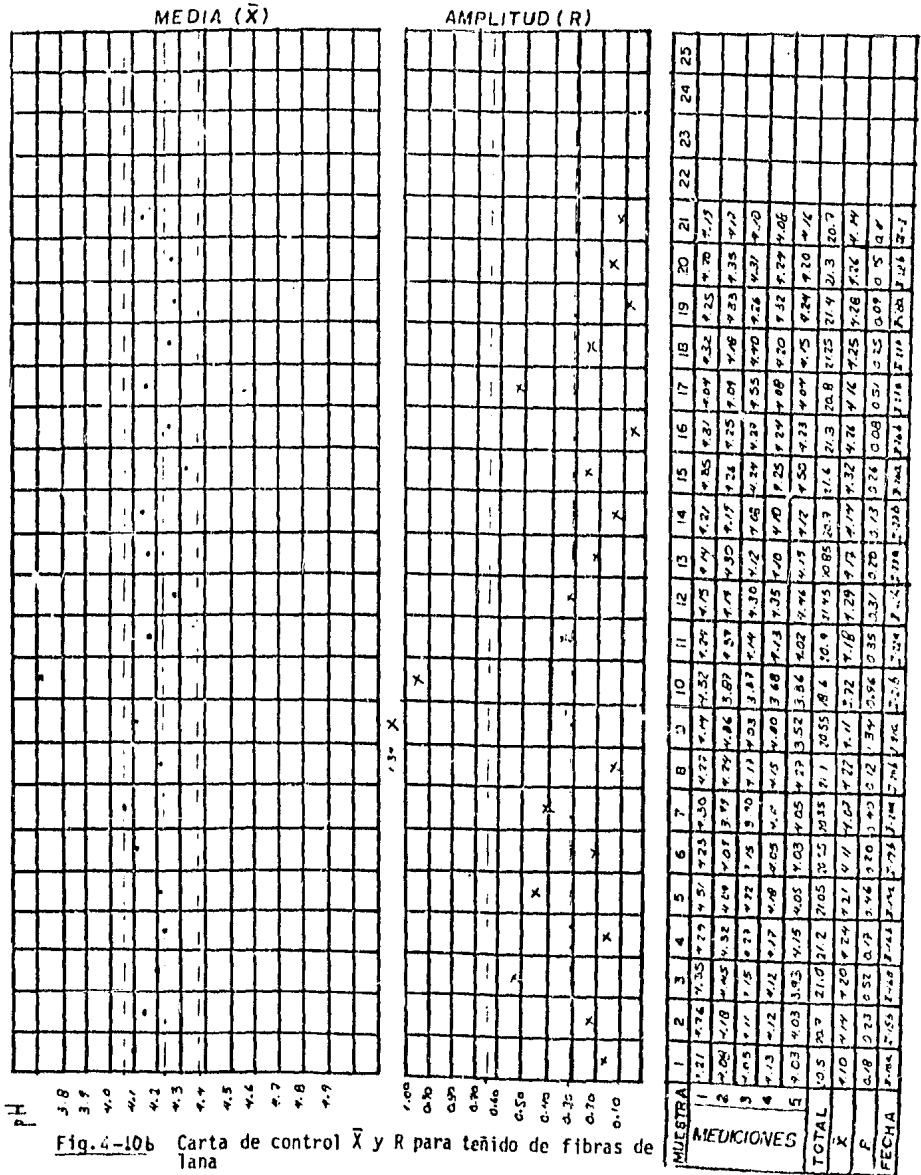


Fig. 4-10b Carta de control \bar{X} y R para teñido de fibras de lana

puntos cayeron dentro de los límites de control, sin embargo, la corrida (ráfaga) de los puntos por debajo de la línea central, indicó que no se había restablecido la media anterior hasta el 15 de febrero. Después de esto, con la sólo excepción de una observación del día 21 de febrero, los valores del pH continuaron, satisfactoriamente, bajo control. La dificultad transitoria del 21 de febrero se debió a que en dos hornadas se empleó material carbonizado (calcinado con ácido sulfúrico concentrado) y mal neutralizado. Este stock era ácido, en relación con el stock normalmente utilizado.

Ejemplo 2: Control de calidad en la determinación del grado de contaminación ambiental.

La Figura 4-11 es una parte de una carta de control para medidas \bar{x} - medio \bar{X} realizada en un laboratorio analítico donde se efectúa de rutina la determinación de un cierto contaminante del aire para la cual $\sigma = 0.13$ parte por millón (ppm). Era importante mantener la concentración de este contaminante en un nivel por debajo de 30ppm. Para lograr esto, varias docenas de muestras fueron analizadas cada semana. Como un control, una mezcla de aire conteniendo exactamente 30ppm del contaminante, también fue mandado cada semana sin distinguirlo de las demás muestras. La carta de control muestra la determinación de este estándar obtenido por un analista sobre un período particular de seis semanas.

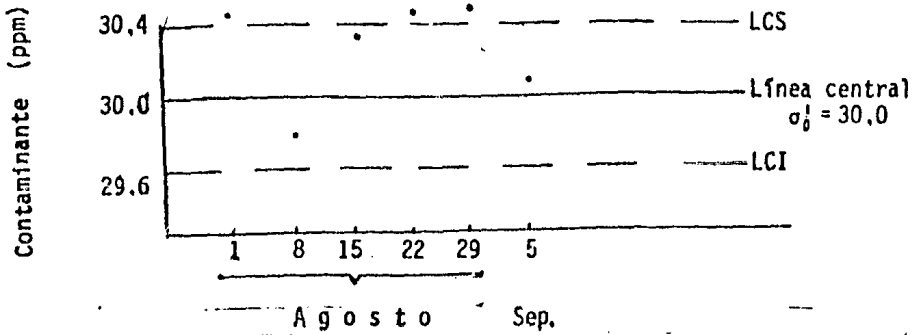


Fig. 4-11 Carta de Control, mostrando las determinaciones semanales hechas por el analista A de una mezcla de aire con 30 ppm del contaminante.

No existe ninguna duda que durante el período estudiado los análisis del estándar estaban bastante fuera de control. No menos de tres de los puntos salieron de los límites 3σ . La explicación más obvia (pero equivocada, como se verá más adelante) es que el analista no había efectuado estos análisis con el mismo cuidado que utilizó en el período cuando se estableció el valor de σ .

Una conjetura sobre la causa de esta falta de control proviene de la inspección de dos cartas de control. Vea la Figura 4-12, la cual muestra la carta de control para el analista A y el analista B. Los cambios en nivel que ocurrieron de una semana a otra son sorprendentemente parecidos para ambos analistas. (Una correlación positiva muy fuerte). Se determinó que los datos de ambas cartas no se habían mezclado de alguna forma. Entonces

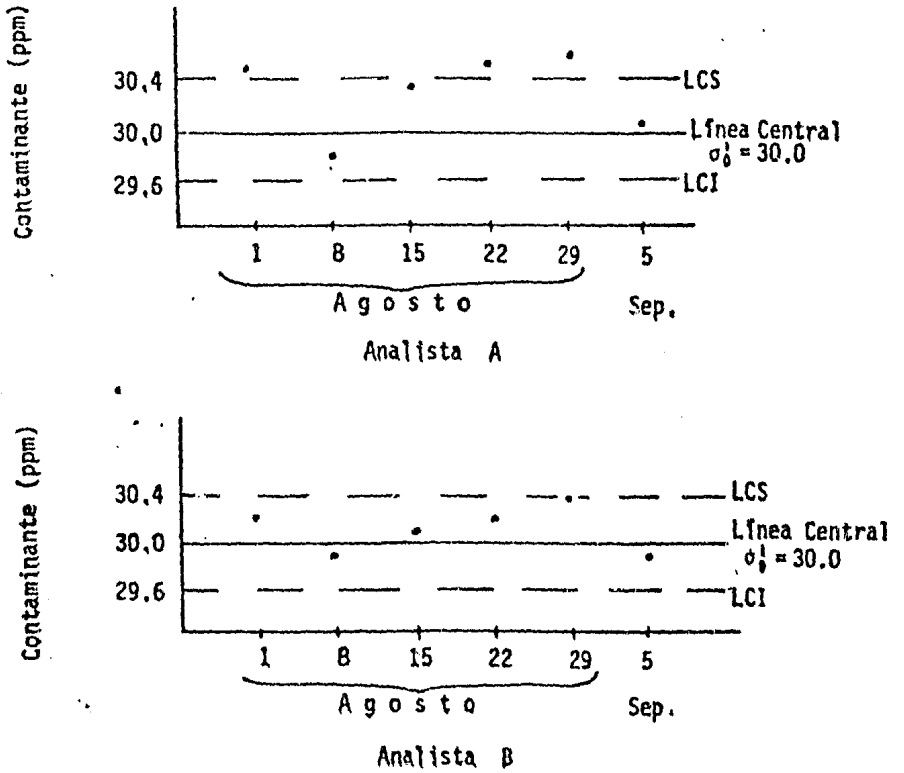


Fig. 4-12: Cartas de Control para analistas A y B, ejemplo de contaminación del aire.

evidentemente había algún factor que estaba afectando los resultados de ambos analistas. La humedad relativa del laboratorio fue un candidato para investigar pronto en el estudio y se encontró que los resultados de ambos analistas eran altamente correlacionados con esta variable. Un número reducido de experimentos especiales confirmaron que la humedad relativa afectaba al método de análisis y se modificó el procedimiento analítico de prueba para eliminar la influencia de este factor en el futuro.

ANÁLISIS DE PROCESOS CON LAS CARTAS DE CONTROL PARA ATRIBUTOS.

Fueron presentados cuatro tipos de cartas de control para atributos en los Capítulos 2 y 3: las cartas p y np para fracción defectuosa y número de artículos defectuosos, y las cartas u y c para el número de defectos por unidad y el número de defectos.

Las ventajas de estas cartas son:

1. Son fáciles de llevar a cabo, ya que los datos necesarios generalmente ya existen o se están generando a través de la inspección rutinaria que se lleva a cabo en la empresa.
2. Son fácilmente comprendidas por todo el personal y dan un buen panorama general de los resultados para cualquier producto. Así que son útiles desde la línea de producción hasta para juntas de la alta gerencia.

Sin embargo, tienen la desventaja de que no son tan sensitivas como las

cartas para variables (\bar{X} y R) a los cambios del sistema, ni proporcionan tanta información como estas últimas para el análisis de las posibles causas de los problemas. De hecho, se debe enfatizar que casi la única pista dada por estas tres cartas por atributos, con respecto a la causa de la falta de control es el tiempo en el cual la falta de control fue observada. Como se han observado, las cartas \bar{X} y R son instrumentos bastante efectivos para diagnosticar las causas del por qué un producto no cumple con las especificaciones. Las cartas por atributos entonces pueden indicar lugares donde valdrá la pena introducir cartas \bar{X} y R.

El primer uso de las cartas por atributos es para detectar puntos fuera de control hacia el lado superior (alto porcentaje de defectuosos), para así investigar y eliminar las causas atribuibles de estos problemas. Sin embargo, las cartas por atributos también proporcionan la base para juzgar si la calidad de un producto está en el nivel deseado. Si éste no es el caso muestran cuanto falta por llegar a ese nivel, si las acciones emprendidas para la mejora de calidad están teniendo éxito y cuando ha alcanzado dicho nivel.

A continuación, se presenta el Ejemplo 3 que ilustra estas ideas a través de una carta de control p para fracción defectuosa.

Ejemplo 3. Mejora de la calidad del producto mediante una carta de control p.

Hechos del caso -La fabricación de un determinado dispositivo electróni-

co fue sometida a una inspección del producto terminado al 100%. En el período inmediato que procedió a la adopción de la carta de control de fracción defectuosa, la relación entre el número de dispositivos rechazados y la producción total era 0.315. Es decir, un 31.5% del producto era defectuoso.

La Tabla 4-2 recoge la relación diaria entre el número de dispositivos sometidos a inspección, una vez terminados y de los que fueron encontrados defectuosos.

Esta relación empieza el 6 de marzo, fecha que comenzó a utilizarse el gráfico de control y termina el 19 de julio, fecha en que se paró la producción como consecuencia de la introducción de un cambio en el diseño. La inspección del producto terminado comprendía la verificación de múltiples cualidades. Aunque el informe de la inspección de producto terminado realizada, recogía treinta causas posibles de rechazo, la mayor parte de estos se debía a cuatro de estas causas. Las fracciones defectuosas obtenidas diariamente, multiplicadas por 100 dan los tantos por ciento defectuosos representados en las Figuras 4-11A, B, C y D.

Del 6 de marzo al 18 de abril, la línea central o valor estándar fue establecido en 31.5% defectuoso, tomado de la experiencia anterior al 6 de marzo. En vista de que durante tres semanas seguidas a partir del 20 de marzo se obtuvo un mejor nivel de calidad, el día 10 de abril el técnico de control de calidad revisó el valor estándar.

El número total de unidades examinadas del 20 de marzo al 8 de abril fue

Tabla 4-2. Resultado de la inspección final diaria, de un dispositivo electrónico.

Fecha	No. de unidades inspeccionadas	No. de unidades defectuosas np	fracción defectuosa p	Fecha	No. de unidades inspeccionadas	No. de unidades defectuosas np	Fracción defectuosa p
Mar. 6	198	72	0.364	May:11	162	45	0.278
7	144	53	0.368	17	354	111	0.314
8	342	133	0.389				
9	72	19	0.264	15	36	13	0.361
10	324	136	0.420	16	333	117	0.351
11	198	82	0.414	17	297	91	0.306
				18	190	81	0.426
13	324	132	0.407	19	108	61	0.565
14	165	55	0.333	20	36	14	0.389
15	213	64	0.300				
16	336	129	0.384	23	86	21	0.244
17	252	79	0.313	24	313	101	0.323
18	177	72	0.407	25	126	41	0.325
				26	216	56	0.259
20	162	47	0.290	27	261	75	0.287
21	270	78	0.289				
22	140	38	0.271	29	543	120	0.221
23	158	40	0.253	30	751	152	0.202
24	245	61	0.249	31	213	43	0.230
25	64	16	0.250	Jun. 1	126	24	0.190
				2	141	29	0.206
27	306	92	0.301	3	162	34	0.210
28	108	28	0.259				
29	195	53	0.272	5	377	33	0.186
30	142	34	0.239	6	156	23	0.147
31	126	27	0.214	7	216	28	0.130
Abr. 1	107	36	0.336	8	90	11	0.122
				9	144	17	0.118
1	162	33	0.204	10	249	32	0.129
4	180	27	0.150				
5	321	84	0.262	12	105	11	0.105
6	162	50	0.309	13	126	21	0.167
7	267	80	0.300	14	198	30	0.152
8	144	39	0.271	15	380	27	0.150
				16	180	37	0.206
10	213	81	0.380	17	252	50	0.198
11	144	43	0.299				
12	126	34	0.270	19	270	40	1.148
13	36	11	0.306	20	270	50	0.185
14	270	61	0.226	21	144	24	0.167
15	72	45	0.625	22	141	26	0.184
17	108	35	0.324	23	114	19	0.167
18	159	73	0.459	24	198	27	0.136
19	231	103	0.446	26	54	8	0.148
20	105	39	0.371	27	126	27	0.214
21	189	90	0.476	28	159	25	0.151
22	189	53	0.280	29	54	9	0.168
24	306	142	0.464	30	72	14	0.194
26	198	68	0.343	Jul. 1	342	58	0.170
26	396	136	0.343				
27	284	85	0.299	3	255	56	0.220
28	199	62	0.312	4	54	9	0.167
29	156	45	0.288	5	288	56	0.194
				6	155	25	0.161
May. 1	90	32	0.356	7	87	18	0.207
2	123	77	0.626	8	225	38	0.169
3	267	101	0.378				
4	264	90	0.341	10	454	90	0.198
5	156	53	0.340	11	159	39	0.245
6	132	45	0.341	12	195	37	0.190
				13	36	6	0.167
8	126	40	0.317				
9	190	70	0.368	18	69	22	0.319
10	261	79	0.303	19	152	41	0.270

de 3259. (Este valor es la suma de los valores de n representados en la Tabla 4-2 durante esos días, es decir, 162,270,140 etc.). El número total de unidades defectuosas fue 863 (la suma de 47,78,38 etc.). El valor medio de la fracción defectuosa p en estas tres semanas fue $863/3259 = 0.265$, valor que el técnico de control de calidad adoptó como nuevo valor estándar, empleado como tal desde el 10 de abril hasta el 20 de junio. A partir del 21 de junio, se modificó de nuevo, esta vez a 0.157, como consecuencia de los valores obtenidos del 5 al 20 de junio, ambos inclusive (410 unidades defectuosas de 2613 examinadas).

Límites de Control. - Los límites en el gráfico p , responden a la pregunta: Si se mantuviera la calidad promedio en el nivel estándar establecido, las variaciones en porcentaje defectuoso de lote en lote (en este caso, de día en día) ¿Podrían explicarse como debidas al azar? Para contestar esa pregunta hay que darse cuenta de que las fluctuaciones del porcentaje defectuoso debidas al azar serán mayores cuanto más pequeños sean los lotes, de ahí que la producción diaria (u otro tamaño de lote) varía, debe variar también la posición de los límites de control, como fue explicado en el Capítulo 3. La Figura 4-13 muestra esta variación.

Razones de la mejora de calidad. - El análisis de las causas de rechazo en los días 10, 11 y 13 de marzo, sugirió que estos puntos estaban fuera de control, debido a ciertos defectos relacionados con una inadecuada preparación de los operarios en una determinada técnica. Por esos días, después se inició un programa intensivo de preparación de aquellos operarios en dicha técnica. Esta fue la razón de la mejora lograda en el nivel de ca-

lidad general, a partir del 20 de marzo.

El 10 de abril, primer día que rigió el nuevo valor estándar 26.5%, el punto representativo resultó estar fuera de control. El 15 de abril el porcentaje defectuoso se disparó al 62.5%. Durante el mes siguiente, muchos puntos estuvieron fuera de control, y el porcentaje defectuoso de cada día se mantendría más elevado que el estándar 26.5%. Casi todo este incremento de producto defectuoso era atribuible al gran número de fallas del dispositivo al realizar la prueba de ensayo. Antes del 10 de abril, esta prueba había provocado un tercio de los rechazos. Durante el período posterior a esta fecha, este defecto fue culpable de casi la mitad de los rechazos.

Esta prueba de ensayo fue modificada entonces, de forma que permitió registrar todos los valores medidos. Esto hizo posible el empleo de las gráficas de controles de variables, es decir gráficos \bar{X} y R. En este caso, el valor diagnóstico de estos gráficos resultó ser excelente, acorde con esto se operaron ciertos cambios en los métodos de producción, que casi eliminaron por completo las fallas en la prueba de ensayo.

Ráfagas o corridas en las cartas de control. - En ocasiones, el gráfico puede sugerir la presencia de causas de variación atribuibles; incluso aunque no existan puntos fuera de control como se explicó anteriormente. Técnicas estadísticas se ha desarrollado con el fin de poder sacar conclusiones a partir de los datos, basándose en el análisis de ráfagas o corridas.

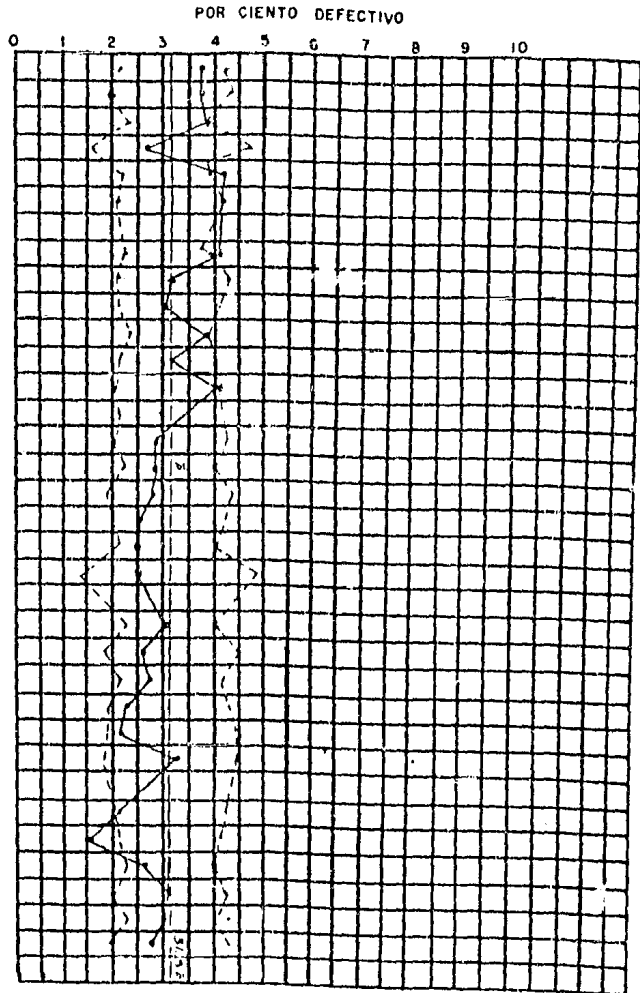
Un análisis simple -aunque impreciso- es considerar que 7 o más puntos

GRAFICA DE CONTROL NUM. M-214A

PRODUCTO Relevador Mod. E-215 PERIODO Marzo 6 - Abril 8

INSPECCION Final CARACTERISTICA Todo defecto

DIA	INSP.	DEF.	%
6	198	72	36.4
7	144	53	36.8
8	342	133	38.9
9	72	19	26.4
10	324	136	42.0
11	198	82	41.4
13	324	132	40.7
14	165	55	33.3
15	213	64	30.0
16	336	129	38.4
17	252	77	31.3
18	177	72	40.7
20	162	47	29.0
21	270	78	28.9
22	140	38	27.1
23	158	40	25.3
24	245	61	24.9
25	64	16	25.0
27	306	92	30.1
28	108	28	25.9
29	195	53	27.2
30	142	34	23.9
31	126	27	21.4
1	107	36	33.6
3	142	33	23.4
4	160	27	16.9
5	321	84	26.2
6	162	50	30.9
7	267	80	30.0
8	144	39	27.1



SEM1	1778	495	27.83
SEM2	1467	531	36.19
SEM3	1039	280	27.14
SEM4	984	270	27.43
SEM5	1236	313	25.32
SEM6			
MES	10224	3178	31.06

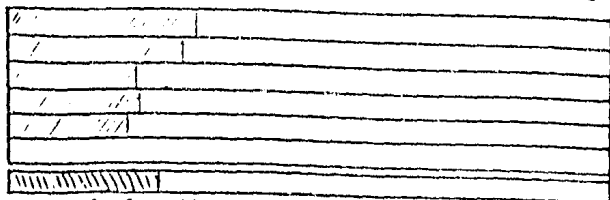
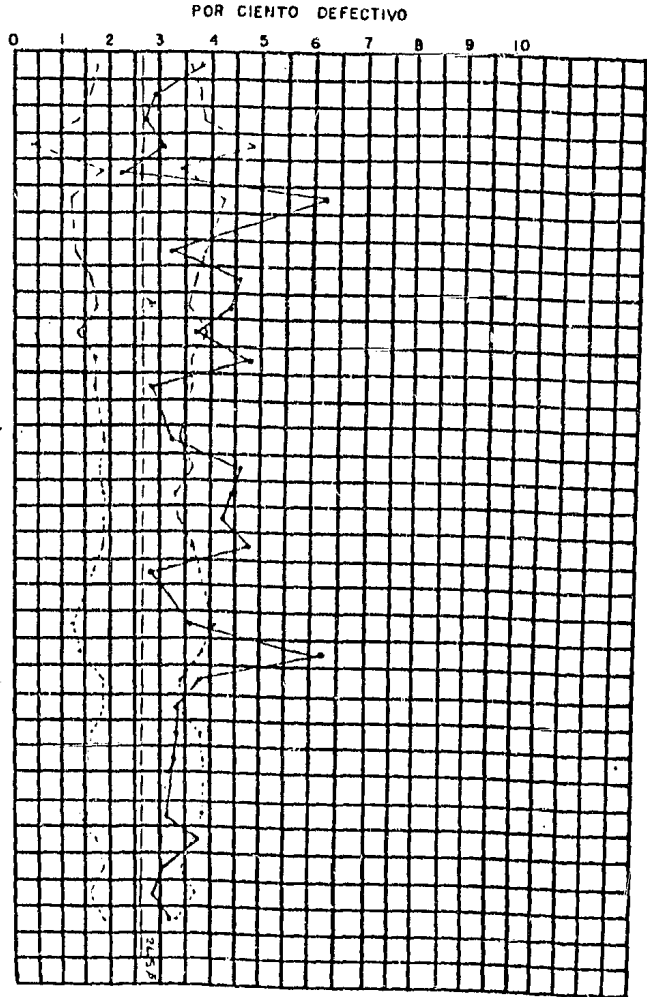


Fig. A-11A: Carta de control p, para la fracción defectuosa de un dispositivo electrónico.

PRODUCTO Relevador Mod. E-213 PERIODO Abril 10 - Mayo 12

INSPECCION Final CARACTERISTICA Todo defectuosos

DIA	INSP.	DEF.	%
10	213	81	38.0
11	144	43	29.9
12	126	34	27.0
13	36	11	30.6
14	270	61	22.6
15	72	45	62.5
17	168	35	32.1
18	159	73	45.9
19	231	103	44.6
20	105	39	37.1
21	169	90	47.6
22	181	53	28.0
24	306	142	32.9
25	198	69	45.9
26	376	136	44.6
27	284	85	37.1
28	199	62	27.6
29	156	45	28.0
30	90	32	35.6
1	123	77	62.6
2	267	101	37.8
3	264	70	34.1
4	156	53	34.0
5	132	75	39.1
6			
7	126	90	31.7
8	190	70	36.8
9	261	79	30.3
10	162	45	27.8
11	354	111	31.4
12			



SEM.1	861	275	31.93
SEM.2	981	373	40.04
SEM.3	1539	538	39.15
SEM.4	1032	318	30.81
SEM.5	1093	345	31.51
SEM.6			
MES	5501	1449	26.34

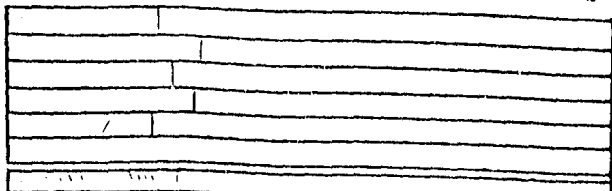


Fig. 1-13 B: Carta de control p, para la fracción defectuosa de un dispositivo electrónico

sucesivos situados al mismo lado de la línea central, indican que la media del proceso puede haber cambiado, y 9 puntos lo confirman.

La Figura 4-13 contiene cuatro ráfagas como esa. La que empezó el 20 de marzo indicó una mejora del nivel de calidad, la cual se debió a un programa intensivo de preparación de los operarios. La evidencia de que el proceso ya no estaba bajo control al nivel estándar del 31.5% defectuoso, proporcionada por esta ráfaga, se confirmó el 4 de abril. La segunda ráfaga empezó el 15 de abril con un punto alto al que siguieron otros varios; esto reflejó el problema con la prueba de ensayo. La tercera ráfaga empezó el 29 de mayo presentándose siete puntos sucesivos por debajo de la línea central, y cayendo el octavo (6 de junio) por debajo del límite inferior de control. La cuarta ráfaga comprendió desde el 30 de junio hasta terminar la producción el 19 de julio y reflejó claramente un ligero relajamiento de los supervisores de producción, quienes sabían que la producción de este modelo iba a terminar pronto.

ANÁLISIS DE PROCESOS CON LAS CARTAS \bar{X} Y R PARA VARIABLES: CAPACIDAD DEL PROCESO CON RESPECTO A LA VARIACION.

Como se mencionó en la introducción de este Capítulo, las cartas se utilizan para el control y análisis de procesos. Las cartas \bar{X} y R son herramientas poderosas para el análisis de un proceso con el motivo de medir su capacidad de cumplir las especificaciones mejorando si éste no es el caso y planear para productos futuros para que se pueda asegurar el cumplimiento de las especificaciones para ellos. Este proceso de medición y análisis

lisis se conoce bajo el nombre de "estudio de la capacidad del proceso con respecto a la variación" abreviándose a "capacidad de proceso" en caso de que ésto no de lugar a confusión.

El resto de este Capítulo se dedicará a describir esta técnica y se ilustrará con cuatro ejemplos. Para una discusión más extensa de este tema ver Juran (1974) págs. 9-14 a 9-39 y 23-29 a 23-30; y Grant y Levenworth (1980) págs. 125 a 131 y 154 a 169.

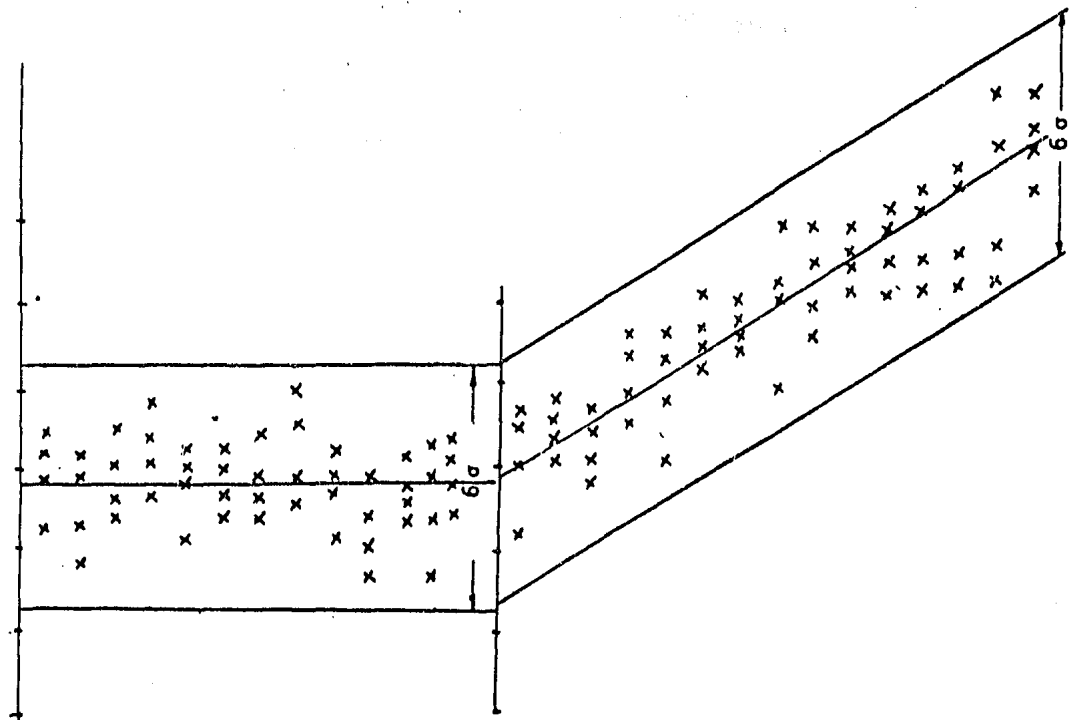
EL CONCEPTO DE CAPACIDAD DEL PROCESO.

La capacidad de un proceso (con respecto a la variación) es la reproducibilidad inherente medida del producto que produce el proceso.

Una gráfica ilustrando el concepto de capacidad del proceso es la Figura 4-14. En ésta se ve en la parte a) un reflejo de la variación natural en una propiedad del producto que fue medida en piezas sucesivas. Nótese que este proceso también está bajo control estadístico. La capacidad del proceso está representada por la distancia entre las dos líneas horizontales entre las cuales están contenidos todos (o casi todos) los puntos que representan las mediciones sobre piezas individuales.

En la Figura 4-14b se ve un proceso de la misma "reproducibilidad instantánea" y, por lo tanto, capacidad pero fuera de control debido a una tendencia de aumento en las mediciones. Entonces los dos procesos ilustrados tienen la misma capacidad, pero el segundo no podrá cumplir con especifica-

Medidas de piezas individuales



a) Reproducibilidad instantánea,
proceso bajo control.

b) Reproducibilidad instantánea,
Proceso fuera de control.

Fig. 4-14: Capacidad de proceso para dos procesos.

ciones tan estrechas como el primero, debido a la falta de control estadístico.

FORMULA PARA LA CAPACIDAD DEL PROCESO.

La fórmula más ampliamente utilizada para expresar la capacidad del proceso es:

$$\text{Capacidad del proceso} = 6\sigma$$

donde σ = la desviación estándar del proceso bajo un estado de control estadístico, es decir, sin tendencias ni cambios bruscos.

Esta capacidad del proceso es una medida de lo mejor que el proceso puede hacer con respecto a la variación en sus condiciones actuales. El ingeniero no puede reducir esta capacidad "natural" del proceso; por lo tanto, su meta es alcanzarla eliminando toda causa que no se lo permite.

MEDICION DE LA CAPACIDAD DEL PROCESO.

El método más adecuado es a través de las cartas de control \bar{X} y R. Típicamente el subgrupo consiste en 5 piezas consecutivas y se toman por lo menos 10 subgrupos. Si los datos no muestran falta de control en las cartas \bar{X} y R, la capacidad del proceso con respecto a la variación se calcula como 6σ , lo cual incluye 99.73% de los datos (suponiendo normalidad). Los

6σ son calculados por la fórmula

$$6\sigma \approx 6s = 6\bar{R}/d_2$$

donde la s = la desviación estándar calculada de la muestra total ($n = 50$)

\bar{R} = rango promedio de los 10 subgrupos

d_2 = el factor numérico que se utiliza para convertir rangos a desviaciones estándar, que se encuentran en el Apéndice, basándose en el tamaño del subgrupo (típicamente = 5).

Si el proceso da evidencia de una falta de control, el encargado del estudio tiene dos opciones:

1. Desechar los datos; tratar de eliminar las causas atribuibles que causaron la falta de control; y repetir la fase de colección de datos.
2. Aceptar los resultados de los cálculos como una buena aproximación a la capacidad del procesos. Esta es la práctica usual cuando la condición de falta de control es menor.

RELACION ENTRE LAS TOLERANCIAS (ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO Y LA CAPACIDAD DEL PROCESO.

La razón principal para cuantificar la capacidad de un proceso con respecto a la variación es poder calcular la habilidad del proceso de mantener las tolerancias (especificaciones) del producto. Para procesos que están ba-

jo control estadístico, la comparación de la capacidad 6σ con las tolerancias permite un cálculo fácil de la proporción defectuosa utilizando la teoría estadística (curva normal en la mayor parte de los casos).

Como se explicará más adelante, un poco de holgura es deseable entre la capacidad y las tolerancias debido a que el proceso no siempre se puede mantener bien centrado entre los límites de especificación. Entonces se ha definido un índice de capacidad del proceso, C_p , para un producto como:

$$C_p = \text{ancho de las tolerancias} \div \text{capacidad del proceso.}$$

Este índice se utiliza como una herramienta para girar decisiones sobre el proceso, creando cuatro clases de procesos y una regla de decisión para cada uno:

Índice de capacidad del proceso, C_p	Clase del proceso	Decisión
$C_p > 1.33$	1	Más que adecuado. Ver sugerencias más adelante para aprovechar esta capacidad de sobra
$1 < C_p < 1.33$	2	Adecuado para el trabajo, pero requiere de un control estricto conforme a que C_p se acerca 1
$0.67 < C_p < 1$	3	No adecuado para el trabajo. Un análisis de la capacidad del proceso necesario. Alta probabilidad de éxito a bajo costo.
$C_p < 0.67$	4	No adecuado para el trabajo. Un análisis de capacidad del proceso necesario. Generalmente requiere de gastos mayores para adecuar el proceso a las tolerancias.

En seguida, se estudiará el proceso del Ejemplo 1 del Capítulo 2 para calcular su capacidad y su habilidad de mantener las tolerancias.

Ejemplo 1, Capítulo 3 (continuado). En este ejemplo se midió el espesor de planchas metálicas pasadas por el proceso de laminado, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 3-2. Como se observa en las cartas de control para \bar{X} y R (Figuras 3-3 y 3-4), el proceso está razonablemente bien controlado. Por lo tanto, se puede proceder a cuantificar la capacidad del proceso de laminado como:

$$\begin{aligned}6\sigma &= 6R/d_2 = 6(8.0/2.326) = \\ &= 6(3.44) = 20.64 \text{ mm}\end{aligned}$$

Ahora las especificaciones para las planchas son de 44 mm a 58 mm, una tolerancia total de 14 mm. Entonces el índice de capacidad del proceso para este producto resulta ser:

$$C_p = 14\text{mm}/20.64 = 0.678$$

y por lo tanto la clase del proceso es de 3 (casi 4) y el proceso no es de acuerdo para las especificaciones del producto. Habrá que realizar un análisis de la capacidad del proceso como está descrito en la siguiente subsección.

ANÁLISIS DE CAPACIDAD - DEL PROCESO.

El análisis de la capacidad de un proceso se dirige a contestar dos pre-

guntas fundamentales:

- 1) ¿Podrá el proceso cumplir con las especificaciones del producto?
- 2) ¿Por qué este proceso no puede mantener las tolerancias del producto?

Para empezar con la forma más fundamental de este análisis se compara la capacidad del proceso con las tolerancias (especificaciones) del producto en forma gráfica. La Figura 4-15 muestra un proceso adecuado para cumplir las tolerancias.

La Figura 4-16 muestra el mismo proceso que ya no es adecuado para cumplir las especificaciones más estrechas de otro producto.

En la práctica existen muchas situaciones donde los productos no cumplen con las especificaciones aunque el proceso tenga la capacidad inherente de cumplirlas (como en la Figura 4-15). Unas cuantas razones principales corresponden a la mayoría de estas fallas.

Proceso mal dirigido. La Figura 4-17 muestra el mismo proceso que el de la Figura 4-15. Sin embargo, el "centrado" de este proceso está algo mal, y el proceso está en peligro de producir artículos defectuosos. En la Figura 4-18 el centrado ya está tan errado que se está produciendo un porcentaje considerable de defectuosos.

Centrar el proceso a veces es muy sencillo (p.e.. un simple ajuste de algún control de la máquina), pero otras veces resulta muy complicado y cos-

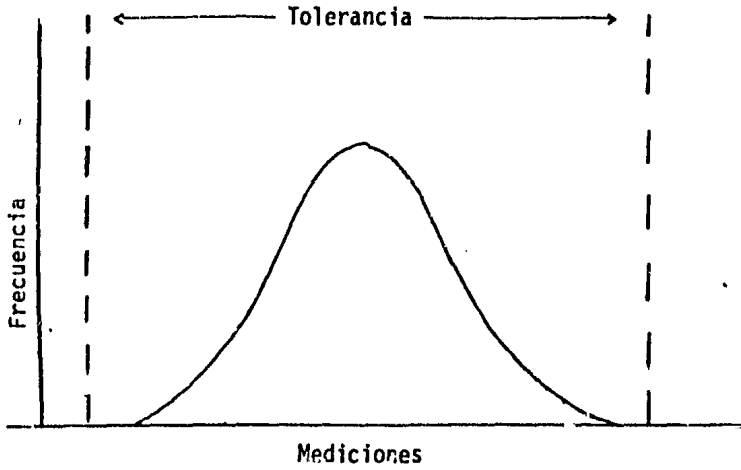


Fig. 4-15: Capacidad del proceso adecuado para mantener las tolerancias, $C_p > 1$.

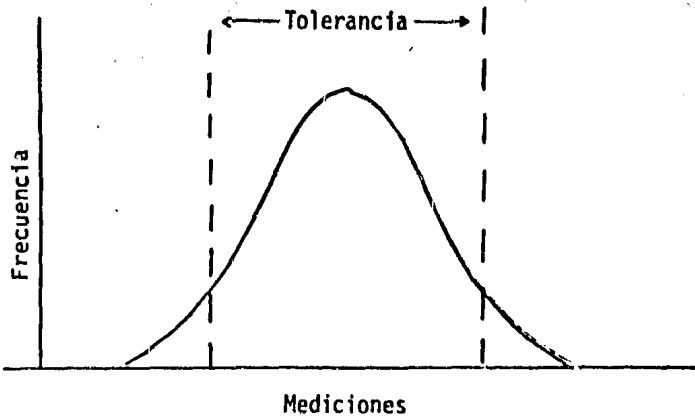


Fig. 4-16: Capacidad del proceso inadecuado para mantener las tolerancias, $C_p < 1$.

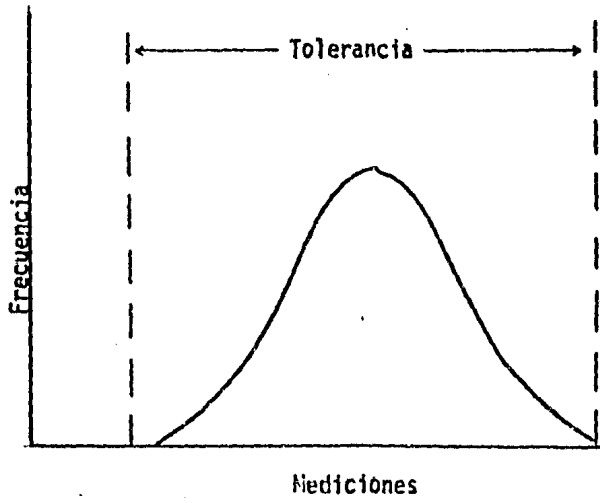


Fig. 4-17: Proceso con centramiento algo inadecuado.

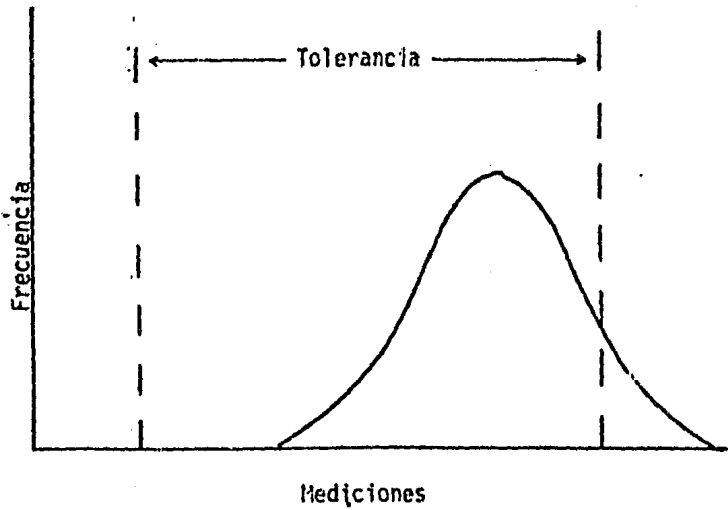


Fig. 4-18: Proceso con un mal centrado.

toso (p.e., elevar la resistencia a la tensión de un producto, reducir el porcentaje de impurezas de un producto químico, etc.). Puede requerir hasta investigación original.

INSTRUMENTACION INADECUADA.

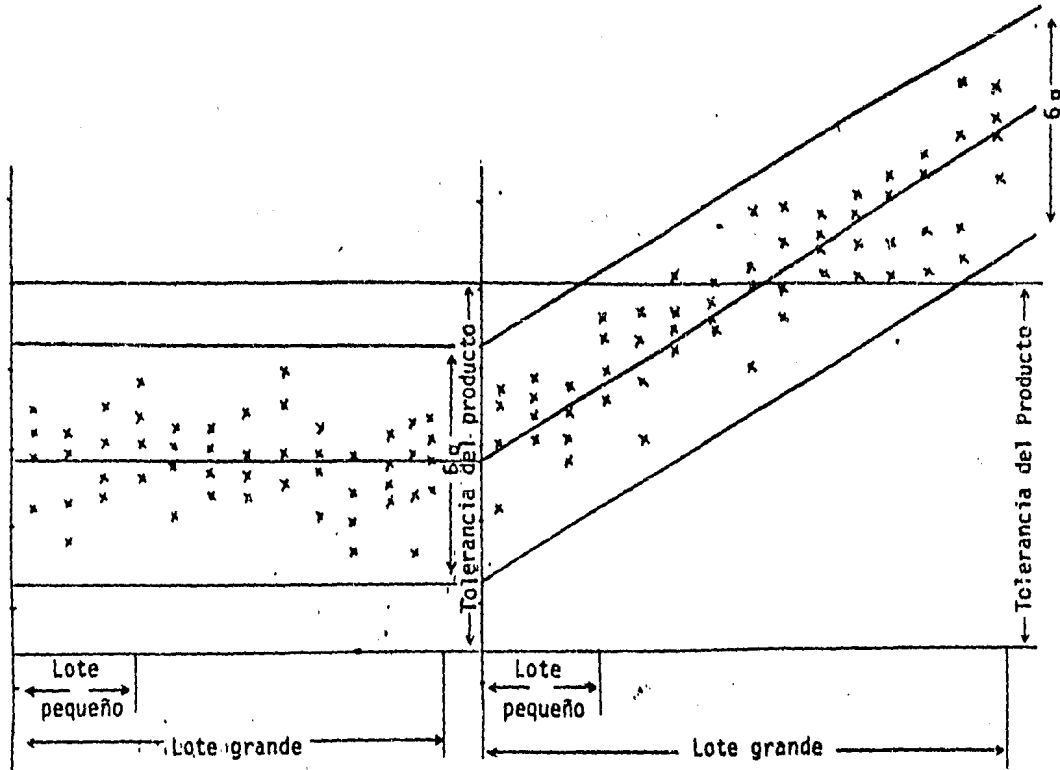
Una segunda razón principal para la falta de cumplimiento de las tolerancias con un proceso adecuado es debido a la falta de suministro al personal de dispositivos de medición adecuados para dirigir el proceso. Estos no deben ser calibradores del tipo pasa-no-pasa, sino dispositivos de medición variable que tengan la precisión necesaria de dividir el rango de tolerancia en por lo menos 5 y preferiblemente 10 divisiones. Para un ejemplo, ver Juran y Gryna (1980), págs. 316-318.

TENDENCIAS EN EL CENTRADO DEL PROCESO.

Los procesos ilustrados en la Figura 4-14 poseen una reproducibilidad "instantánea" igual. Como se ve en la Figura 4-19, cuando se incluyen las tolerancias, el efecto de la tendencia ascendente del proceso en la Figura 4-19b) no es dañino para un lote pequeño. Sin embargo, para un lote grande esta tendencia producirá a largo plazo un producto 100% defectuoso. En estos casos es necesario primero, cuantificar la tasa de aumento de la tendencia y, segundo, tomar alguna acción correctiva.

Se ilustra este fenómeno, y una posible solución a ella, en el ejemplo siguiente.

Medias de piezas individuales



a) Capacidad adecuada y sin tendencias. b) Capacidad inadecuada debida a la tendencia ascendente.

Fig. 4-19: Capacidad del proceso para dos procesos.

Ejemplo 4. Determinación del ajuste inicial de una máquina cuando se espera una tendencia en el valor de una dimensión.

En algunas máquinas, la herramienta se va gastando de una forma constante a lo largo de su período de utilización. Este fenómeno puede ser uno de los factores que influyen en alguna dimensión del producto terminado, y así mismo puede colaborar a que el valor medio presente una tendencia. Cuando los subgrupos se seleccionan de forma que se espacian uniformemente con respecto a este fenómeno de desgaste, los gráficos de control por \bar{X} , aproximadamente tienen el mismo aspecto que la Figura 4-2Q. El gráfico R, sin embargo, probablemente se mantendría bajo control, proporcionando una estimación de σ' constante.

En tal caso, la línea central y los gráficos de control del gráfico \bar{X} , en lugar de ser horizontales, deberían tener una cierta inclinación. La pendiente de la línea central y σ' , estimadas a partir de \bar{R} , se obtuvieron de las mismas observaciones. Una vez conocidas, será posible determinar el ajuste inicial así como la longitud de la ráfaga, y estos dos valores darán el período de tiempo máximo entre ajustes de máquina compatible con las tolerancias especificadas.

Hechos del caso. En ciertas operaciones realizadas en un taller, la experiencia ha demostrado que un rápido desgaste de las herramientas provoca una tendencia constante y definida en el valor medio de las dimensiones de las piezas mecanizadas. En muchas especificaciones de dimensiones, la zona comprendida entre sus límites $U - L$, era considerablemente mayor

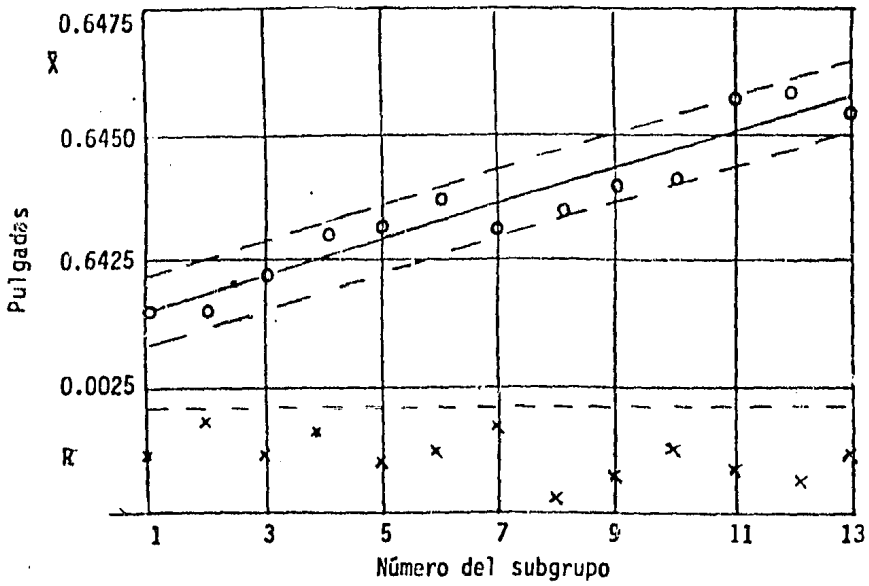


Fig. 4-20: Representación de la recta de tendencia en el gráfico \bar{X} .

que la amplitud de la tolerancia natural del proceso, $6\sigma'$. Esto proporcionó un amplio margen de seguridad contra la fabricación de producto defectuoso, mientras el ajuste de la máquina permitiera mantener el valor medio de la dimensión muy cerca del punto medio entre los límites de la especificación. Sin embargo, la tendencia del valor medio de una dimensión a cambiar rápidamente, como resultado del desgaste de la herramienta, exigía frecuentes reglajes para devolverlo a la posición deseada. Cada nuevo reglaje implicaba unos costes considerables, por el gasto que suponía el reglaje en sí y por las horas-máquina parada.

La introducción del punto de vista gráfico de control, proporcionó una base para reducir la frecuencia de los reglajes. El valor medio de la distribución de frecuencias de la variable X (en este caso una dimensión) iba cambiando a lo largo del tiempo de una forma casi uniforme, pero, ni la forma de la distribución, ni su dispersión (medida por σ') cambiaban. De datos oportunamente tomados del gráfico de control, fue posible estimar σ' , así como la razón de cambio de la media \bar{X} y expresándola en términos de una ecuación.

La estimación de σ' hizo posible determinar un valor medio para el primer reglaje, de forma que permitiera un período máximo entre reglajes. La estimación de la razón de cambio de la dimensión aportó un criterio para poder decidir la frecuencia con que debían efectuarse los reglajes. Una vez estimados σ' y la relación de cambio de \bar{X} para una operación, fue posible utilizar esta información en otros trabajos. Resultaron beneficiados incluso aquellos cuyas secuencias eran relativamente cortas, muchos de los cuales se completaron realizando un sólo reglaje, a diferencia

Número del Subgrupo	\bar{X}	R
1	0.6417	0.0011
2	0.6418	0.0016
3	0.6424	0.0010
4	0.6431	0.0015
5	0.6433	0.0009
6	0.6437	0.0010
7	0.6433	0.0014
8	0.6436	0.0004
9	0.6441	0.0006
10	0.6444	0.0011
11	0.6456	0.0009
12	0.6457	0.0007
13	0.6454	0.0009
Totales.....	8.3681	0.0131

$$\bar{X} = \frac{83681}{13} = 0.6437$$

$$\bar{R} = \frac{0.0131}{13} = 0.0010$$

Tabla 4-3: Datos para el cálculo de la carta \bar{X} y R para el ejemplo.

de los dos o tres que normalmente era necesario emplear antes del gráfico de control de trabajos de índole similar.

Obtención de la línea de tendencia de un gráfico \bar{X} . Considérense los siguientes valores de \bar{X} y R para la especificación 0.644 ± 0.004 pulgadas. Se tomaron subgrupos de cinco elementos cada media hora.

En la toma de datos para el cálculo de una línea de tendencia y los correspondientes límites de control, deberían tomarse ciertas precauciones. La producción entre dos subgrupos consecutivos debería ser aproximadamente constante. Una buena norma sería considerar los elementos integrantes de un subgrupo en el mismo orden en que se fabricaron, de esa forma la tendencia general se reflejaría algo en la amplitud del grupo.

En el gráfico \bar{X} convencional, la línea central es horizontal. Si existe una tendencia al alza de valores \bar{X} , la línea central debe ser una línea inclinada, cuya posición puede describirse por una ecuación de la forma $\bar{X} = a + bh$, siendo h el símbolo que representa el número del subgrupo (preferiblemente el sistema de numeración debe ser tal que tenga su origen en el subgrupo medio), a es el valor de \bar{X} cuando h vale 0, y b es la pendiente de la recta. El método de los mínimos cuadrados proporciona un camino satisfactorio para encontrar los valores a y b para cualquier conjunto de valores.

Bajo ciertas circunstancias especiales, la obtención de la recta de mínimos cuadrados es una operación muy sencilla. Tal es el caso cuando los valores observados de la variable colocados sobre el eje vertical (en este caso, valores de \bar{X}) están espaciados uniformemente sobre el eje horizontal (en este caso, es la escala de numeración de los subgrupos h); cuando existe un número de observaciones impar y cuando en el eje horizontal se toma como origen el punto medio del mismo (es decir, el valor 0 de h corresponde al subgrupo central). Si se cumplen estas condiciones,

$$a = \bar{\bar{X}}, b = \frac{\sum h \bar{X}}{\sum h^2}$$

El método del cálculo se ilustra en la tabla 4-4

Para simplificar las operaciones, los valores \bar{X} de la Tabla 4-4 están expresados en diezmilésimas de pulgada por encima de 0.6400. La ecuación $\bar{X} = 370 + 3.29h$, también viene en las mismas unidades. Pasándola a pulgadas se obtiene $\bar{X} = 0.6437 + 0.000329h$. Para dibujar esta recta en el gráfico de control (Fig. 4-18), hay que conocer dos puntos de la misma y unirlos.

$$\text{Por ejemplo: para } h = -6, \bar{X} = 0.6437 + (0.000329)(-6) = 0.6417$$

$$\text{para } h = +6, \bar{X} = 0.6437 + (0.000329)(6) = 0.6457$$

Interpretación del gráfico de control como base de actuación. Los límites de control son líneas paralelas a la central. El superior está $A_2\bar{R}$ unidades por encima de la línea de tendencia, y el inferior, $A_2\bar{R}$ por debajo de ella. En este caso, $A_2\bar{R} = 0.58(0.0010) = 0.0006$. En la Figura 4-18 están representados estos límites, a esa distancia de la recta central.

Para decidir el valor de la dimensión media a alcanzar en el ajuste inicial de la máquina, antes hay que estimar σ^t cuyo valor es $R/d_2 = 0.0010/2.326 = 0.00043$. Entonces puede compararse la zona de tolerancia U-L con σ^t . En este caso

$$U - L = 0.6480 - 0.6400 = 0.0080$$

Esto equivale a $18.6\sigma^t$.

Número del Subgrupo	Número del subgrupo revisado h	Valor medio del subgrupo \bar{x}	$h\bar{x}$	h^2
1	-6	17	-102	36
2	-5	18	- 90	25
3	-4	24	- 96	16
4	-3	31	- 93	9
5	-2	33	- 66	4
6	-1	37	- 37	1
7	0	33	0	0
8	1	36	36	1
9	2	41	82	4
10	3	44	132	9
11	4	56	224	16
12	5	57	285	25
13	6	54	324	36
Totales	0	481	599	182

$$a = \bar{\bar{x}} = \frac{481}{13} = 37.0$$

$$b = \frac{\sum h\bar{x}}{\sum h^2} = \frac{599}{182} = 3.29$$

$$\bar{x} = a + bh = 37.0 + 3.29h$$

Tabla 4.-4: Cálculo de la ecuación de la recta de tendencia por el método de los mínimos cuadrados, para la variable \bar{x} . (\bar{x} viene expresada por las diezmilésimas de pulgada que sobrepasa el valor 0.6400).

Esto debe decidirse cuántos múltiplos de σ' debe haber entre el ajuste inicial y el límite de especificación. En algunos casos podría ser $3\sigma'$; en otros, un múltiplo más grande, tal como $4\sigma'$. Cuando, como en este caso, la zona de tolerancia es suficientemente grande como para permitir una secuencia entre ajustes larga, probablemente se justifique el margen de seguridad adicional que implica el uso de $4\sigma'$. Para determinar el momento de un nuevo reglaje, debería utilizarse el mismo múltiplo de σ' . Con $4\sigma'$ se obtienen los siguientes valores: El ajuste inicial debe hacerse en el punto

$$\bar{x} = L + 4\sigma' = 0.6400 + 0.0017 = 0.6417$$

El nuevo reglaje debe hacerse cuando la línea de tendencia alcance el valor $U - 4\sigma' = 0.6480 - 0.0017 = 0.6463$.

La pendiente de la línea de tendencia $b = 0.000329$, mide el cambio esperado de la dimensión media de un subgrupo al siguiente. El intervalo entre reglajes puede estimarse así $(0.6463 - 0.6413) / 0.000329 + 14$, es decir, debe efectuarse un reglaje cada once subgrupos. Si los subgrupos se toman cada media hora, quiere decir que se requiere un reglaje cada 7 horas.

Proceso Errático. Una cuarta razón por la falta de cumplir las tolerancias con un proceso adecuado es debido a los cambios bruscos y erráticos en la medida del proceso. La razón de estos cambios puede ser el calentamiento

de una máquina fría, un nuevo lote de material, etc. La acción apropiada dependerá de cada caso. Ver la Figura 4-1 sobre otras causas y métodos de detección.

Mezcla de Productos. Un obstáculo común a la utilización de la capacidad inherente de un proceso es que, por razones de productividad, productos de varios procesos se mezclan a la hora de su fabricación. Ejemplo de esto son: moldes de plástico con varias cavidades, máquinas de llenado con varias cabezas de llenado, etc. La variación total entre piezas es debido a la variación dentro de piezas fabricadas con una misma cavidad, cabeza, etc., y la variedad entre cavidades, cabezas, etc. Es útil analizar y separar esta variabilidad total en componentes para medir la capacidad inherente del proceso y tratar de ajustar las cavidades, cabezas, etc. para que su centramiento sea correcto y uniforme en cada uno. Para técnicas estadísticas específicas para este fin, ver Juran (1974), págs. 9-29 a 9-31.

Ejemplo 5. Ajuste de controles termostáticos, compensando por las diferencias obtenidas por distintos operarios.

Hechos del caso. Todos los controles termostáticos de un dispositivo eléctrico se ajustaron en dos bancos de unidades, en los que fueron puestos a un nivel de temperatura dado. Después de permanecer algunos minutos en estas condiciones, cada termostato fue adaptado por un operario en la unidad de ajuste hasta que se encendía una luz. Para evitar que se desajustaran, se les colocó, a continuación, un seguro de tuerca. Cada banco de

unidades tenía su propio operario. Estos controles se fabricaron en dos turnos. Los cuatro operarios utilizaron los dos bancos de unidades.

Las especificaciones establecieron las temperaturas así como sus tolerancias a las que debían accionarse los interruptores controlados termostáticamente. Una vez terminado, se verificó cada dispositivo mediante un aparato de pruebas que operaba según el principio pasa-no-pasa, para determinar si se cumplían las tolerancias. Siempre que en esta inspección final se encontraba un termostato fuera de tolerancia, había que sacarlo, calibrarlo de nuevo y volverlo a montar.

Entre el primer ajuste del control termostático y su montaje final en el dispositivo completo, podían transcurrir varias semanas. De ahí que no resultara económico que la verificación del termostato sólo dependiera de la inspección al 100% final. Cualquier error sistemático introducido en la regulación del mismo, podía ser responsable de algunos termostatos defectuosos hasta que fueran detectados, una vez efectuado el montaje final; lo cual a su vez, podía provocar unos costes de recuperación muy elevados.

Por esta razón, inmediatamente después de regularse, se tomaron muestras de los controles termostáticos, verificándose en un banco de pruebas que permitiría medir las temperaturas de accionamiento reales y representándose a continuación los gráficos de control por \bar{X} y R. Al principio se tomaban cinco termostatos recién regulados; en general, un subgrupo podía contener, fruto del cambio de turno, termostatos ajustados por los dos operarios.

Se comprobó que este procedimiento era satisfactorio para detectar un problema que se presentara de vez en cuando, y para encontrar la forma de corregirlo. Normalmente, las causas atribuibles podían eliminarse mediante un mantenimiento adecuado en uno de los dos bancos de ajuste.

Análisis y Actuación. Aún cuando el proceso estuviera bajo control, algunos termostatos se encontraban fuera de las tolerancias especificadas. Con el valor de σ' estimado a partir de la \bar{R} de los gráficos de control, la zona de tolerancia tenía una amplitud aproximada de $5\sigma'$.

En vista de este caso, se decidió separar los subgrupos por operarios y por bancos de trabajo, de tal forma que todos los termostatos pertenecientes a un mismo subgrupo procedieran de un mismo operario y de un sólo banco. Esto dio a conocer que en cada cambio de turno, los termostatos ajustados por uno de los operarios mostraban una media de las temperaturas "on" y "off" considerablemente más elevada que los terminados por el otro. Al cambiar los operarios de un banco a otro, se vio que esta diferencia era atribuible a su persona y no a los bancos. La desviación era debida al efecto de la luz de la unidad de ajuste a lo largo del tiempo.

A partir de entonces y para compensar la diferencia entre los operarios "cálidos" y los "fríos" se establecieron unos nuevos niveles de temperatura que ofreciera un cierto margen. El sistema de toma de muestras por operarios redujo \bar{R} y σ' . El cambio del valor patrón de temperatura ayudó a conservar la misma media de proceso para todos los operarios, de esta forma se man-

tuvo el proceso bajo control con límites de control más estrechos. La nueva σ' valía alrededor de 5/6 de la anterior, así que ahora la amplitud de la zona de tolerancia era seis veces el nuevo valor de σ' . Prestando una atención cuidadosa al empleo rutinario de los gráficos de control con el fin de impedir que se produzcan cambios en la media del proceso, es posible fabricar todos los termostatos dentro de las tolerancias y evitar, por tanto, los costes de recuperación, una vez realizado el montaje final

UTILIZACION DEL CONOCIMIENTO DE LA CAPACIDAD DEL PROCESO.

Para el proceso actual, tolerancias inadecuadas ($C_p < 1$).

Como se mencionó anteriormente, si al analizar la capacidad del proceso se encuentra que no es compatible con las tolerancias, quedan tres opciones a la empresa:

- 1) "Modificar" el proceso. Esto puede consistir en la modificación de las herramientas, la máquina o la secuencia de operaciones. O algunos pasos adicionales pueden ser introducidos para homogenizar más el material que alimenta al proceso.
- 2) Modificar las tolerancias. Un estudio de capacidad provee una base firme para una discusión sobre las tolerancias (especificaciones) con el departamento de diseño.
- 3) "Sufrir y separar". Inspección 100% con separación de las unidades

defectuosas es en el mejor de los casos solamente un parche, no una solución definitiva. El gasto de la inspección y la corrección de las fallas tendrá que continuar hasta que una solución más adecuada se encuentre.

Para el proceso actual, habiendo capacidad excesiva ($C_p > 1.33$).

Existen varias maneras de aprovechar este feliz hallazgo:

- 1) Vender la precisión excesiva.
- 2) Vender el método.
- 3) Reasignar el producto a máquinas menos precisas.
- 4) Reducir el costo de control de calidad.
- 5) Acelerar el proceso.

Para la planificación de productos nuevos.

- 1) Decisión de si el nuevo producto se puede fabricar con la maquinaria disponible.
- 2) Comparación entre procesos alternativos de manufactura.
- 3) Compra de maquinaria nueva.
- 4) Planeación de operaciones secuenciales en base a las capacidades de cada subproceso del proceso total.
- 5) Formación de una base de datos sobre la capacidad por departamentos, por compañía, por industria.

Para más detalles y ejemplos adicionales sobre el uso del conocimiento de la capacidad de procesos, se dirige el lector al libro de Juran (1974), pags. 9-34 a 9-39.

C O N C L U S I O N E S

Los adelantos técnicos han permitido obtener un mejor nivel de vida, aportando toda clase de satisfactores modernos (T.V., hornos de microondas, cirugía con rayos láser, computadores de bolsillo, etc.) así como los materiales y maquinaria idóneos para fabricarlos.

Para alcanzar tal grado de sofisticación, ha sido necesario establecer un sistema de control , con el cual se puedan cumplir y verificar cada uno de los objetivos propuestos inicialmente.

El Control Estadístico de Calidad, como ha quedado de manifiesto en el presente texto, se convierte en una herramienta fundamental para dicho control, aportando una gran variedad de técnicas, las cuales cubren en su totalidad las vicisitudes que se presentan en la industria.

De esas técnicas estadísticas, las Cartas de Control de Shewart, son las de mayor aplicación; gran parte de su difusión se debe a la sencillez de sus cálculos y valiosos resultados, lo cual ha motivado su análisis en la presente tesis.

Las Cartas cubren el control de calidad de sistemas de producción continuos (tales como refacciones automotrices) o producciones intermitentes (alguna clase de pedido especial) dicho control se puede efectuar ya sea mediante variables o atributos , por lo que su aplicación en un aparato productivo puede redundar en grandes beneficios, a un bajo costo de ca-

pacitación del personal, además de los ahorros que se obtienen al reducirse los gastos de inspección.

La historia de las cartas de control es amplia, fueron desarrolladas en la década de los años 20 por el Dr. Walter A. Shewart en los Laboratorios de la Bell Telephone.

En un principio dichas técnicas exigían cálculos frecuentes de cuadrados y raíces cuadradas para obtener desviaciones tipo. Esto fue un obstáculo definitivo para la introducción de las técnicas en muchos lugares. Posteriores desarrollos efectuados por estadísticos matemáticos, hicieron posible el empleo de la amplitud o rango en lugar de la desviación tipo, sustituyéndose el cálculo de la raíz cuadrada de la suma de cuadrados por una simple sustracción. Este hecho hizo posible la utilización del gráfico de control en muchos casos que anteriormente parecía estar fuera de alcance.

Durante el transcurso de la II Guerra Mundial con la adopción de normas militares, el control de calidad se acentuó y se patentizó la utilidad del control estadístico.

En años de postguerra, sistemas de producción como el japonés agregaron nuevas perspectivas en el control de calidad. Diagramas de Ishikawa (o espina de pescado o causa-efecto, como también se le conoce) y círculos de calidad, son una muestra representativa de dichas innovaciones.

En la actualidad, el sistema productivo nacional, se ha

visto en la necesidad de alcanzar una calidad competitiva en el mercado, esto solo se puede lograr mediante el control de calidad; grandes empresas automotrices y otras transnacionales han vuelto sus ojos a él, capacitando a su personal y adoptando normas más estrictas de calidad.

Con el desarrollo de programas y reformas educativas y de instituciones como el CONALEP (Consejo Nacional para la Educación Profesional) y CECYTS (Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos), se vislumbra la perspectiva de crear técnicos profesionales en control de calidad, capaces de subsanar las necesidades crecientes de aseguramiento de la calidad en la industria nacional.

Por lo tanto se puede concluir que, un factor determinante y decisivo para satisfacer dichas necesidades es el Control Estadístico de Calidad, por tal motivo es imperativo su difusión a nivel tanto industrial como escolar.

APENDICE A

El Factor para estimar σ' en base a R

No. de observaciones en el subgrupo n	Factor para estimar σ' $d_2 = \bar{r}/\sigma'$
2	1.128
3	1.693
4	2.059
5	2.326
6	2.534
7	2.704
8	2.847
9	2.970
10	3.078
20	3.735
30	4.086
40	4.322
50	4.498
60	4.639
70	4.755
80	4.854
90	4.939
100	5.015

Nota: d_2 es la esperanza del rango de una muestra de tamaño h tomado de una distribución normal estandarizada $N(0,1)$.

$$\text{Estimador de } \sigma' = \bar{R}/d_2$$

APENDICE B

El factor \bar{c}_2 para estimar σ' en base a $\bar{\sigma}$.

No. de observaciones en el subgrupo n	Factor para estimar σ' $c_2 = \bar{\sigma}/\sigma'$
2	0.5642
3	0.7236
4	0.7979
5	0.8407
6	0.8686
7	0.8882
8	0.9027
9	0.9139
10	0.9227
20	0.9619
30	0.9748
40	0.9811
50	0.9849

Estimador de $\sigma' = \bar{\sigma}/c_2$

APENDICE C

Factores para determinar en base a \bar{R} , los límites de control 3-sigma para las cartas \bar{X} y R.

No. de observaciones en el subgrupo n	Factor para la carta \bar{X} A_2	Factores para la carta R	
		L.C. Inferior D_3	L.C. Superior D_4
2	1.881	0	3.268
3	1.023	0	2.574
4	0.729	0	2.282
5	0.577	0	2.114
6	0.483	0	2.004
7	0.419	0.076	1.924
8	0.373	0.136	1.864
9	0.337	0.184	1.816
10	0.308	0.223	1.777
20	0.180	0.413	1.594

APENDICE D

Factores para determinar en base a $\bar{\sigma}$, los límites de control
3 - sigma para las cartas \bar{X} y σ .

No. de observaciones en el subgrupo n	Factor para la carta \bar{X} A_1	Factores para la carta σ	
		L.C. Inferior B_3	L.C. Superior B_4
2	3.759	0	3.267
3	2.394	0	2.568
4	1.880	0	2.266
5	1.596	0	2.089
6	1.410	0.030	1.970
7	1.277	0.118	1.882
8	1.175	0.185	1.815
9	1.094	0.239	1.761
10	1.028	0.284	1.716
20	0.697	0.51	1.49
30	0.562	0.60	1.40
40	0.483	0.66	1.34
50	0.431	0.70	1.30

APENDICE E

Factores para determinar en base a σ' , los límites
3 - sigma para la carta R.

No. de observaciones en el subgrupo n	L.C.Inferior D_1	L.C.Superior D_2
2	0	3.686
3	0	4.358
4	0	4.698
5	0	4.918
6	0	5.078
7	0.205	5.203
8	0.387	5.307
9	0.546	5.394
10	0.687	5.469
20	1.550	5.92

APENDICE F

Factores para determinar en base a σ' , los límites
3 - sigma para la carta σ .

No. de observaciones en el subgrupo n	L.C.Inferior B_1	L.C.Superior B_2
2	0	1.843
3	0	1.858
4	0	1.808
5	0	1.756
6	0.025	1.711
7	0.105	1.672
8	0.167	1.638
9	0.219	1.609
10	0.262	1.584
20	0.491	1.433
30	0.590	1.360
40	0.650	1.310
50	0.680	1.280

B I B L I O G R A F I A

- 1.- A. V. FEIGENBAUM 13a IMPRESION "CONTROL DE CALIDAD".
CECSA, MEXICO D.F.
- 2.- GRANT Y LEAVENWORTH (1972) "CONTROL ESTADISTICO DE LA CALIDAD" .
CECSA, MEXICO D.F.
- 3.- HUXLEY, D.P., AGUILAR, A.M., GARIBAY, J.B. Y LANDE-
ROS, J.V. (1979) "TECNICAS ESTADISTICAS PARA INGE-
NERIA, CIENCIAS AGROPECUARIAS Y CIENCIAS QUIMICAS",
CINVESTAV - SEP , MEXICO D.F.
- 4.- JURAN, J.M. Y GRYNA, P.M. "PLANEACION Y ANALISIS
DE LA CALIDAD".
ED. REVERTE, BARCELONA ESP.