



El Control Estadístico de Procesos (SPC) tiene como objetivo hacer predecible un proceso en el tiempo.

CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS

Las herramientas usadas para este fin son las gráficas de control que permiten distinguir causas especiales de las causas comunes de variación. Luego de identificarlas con el gráfico, el paso siguiente es eliminar las causas especiales, ya que son ajenas al desenvolvimiento natural del proceso con lo que se logra el estado de Proceso Bajo Control Estadístico; es decir, un proceso predecible y afectado exclusivamente por causas comunes (aleatorias) de variación.

Roberto **CARRO PAZ**
Daniel **GONZÁLEZ GÓMEZ**

11



El Sistema de Producción y Operaciones

CRÉDITOS FOTOGRÁFICOS:

La totalidad de las fotografías incluidas en este trabajo han sido tomadas por los autores.

Ni la totalidad ni parte de este trabajo pueden reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito de los autores.

CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS

SPC - Statistical Process Control



El Control Estadístico de Procesos (SPC) tiene como objetivo hacer predecible un proceso en el tiempo. Las herramientas usadas para este fin son las gráficas de control que permiten distinguir causas especiales de las causas comunes de variación. Luego de identificarlas con el gráfico, el paso siguiente es eliminar las causas especiales, ya que son ajenas al desenvolvimiento natural del proceso con lo que se logra el estado de Proceso Bajo Control Estadístico; es decir, un proceso predecible y afectado exclusivamente por causas comunes (aleatorias) de variación.

Al explorar la filosofía que fundamenta la administración de la Calidad Total (TQM) definimos cinco características de la calidad centradas en el cliente: conformidad con las especificaciones, valor, adecuación para el uso previsto, soporte e impresiones psicológicas. Debido a las mismas, muchas organizaciones están tratando de incorporar la calidad al diseño de sus procesos por medio de métodos de mejoramiento continuo.

El mejoramiento de la calidad se basa en la vigilancia continua de los insumos y de los productos durante los procesos para la elaboración de diferentes bienes o servicios. Cuando es posible medir o comparar los insumos y productos, las herramientas estadísticas como gráficas de control son útiles para evaluar el grado de conformidad alcanzado con respecto a las especificaciones.

El Control Estadístico de Procesos (SPC; por sus siglas en inglés de *Statistical Process Control*) es la aplicación de técnicas estadísticas para determinar si el resultado de un proceso concuerda con el diseño del producto o servicio correspondiente. Las herramientas conocidas como gráficas de control se usan en el SPC para detectar la elaboración de productos o servicios defectuosos; o bien, para indicar que el proceso de producción se ha modificado y los productos o servicios se desviarán de sus respectivas especificaciones de diseño, a menos que se tomen medidas para corregir esa situación. El Control Estadístico también suele utilizarse con el propósito de informar a la gerencia sobre los cambios introducidos en los procesos que hayan repercutido favorablemente en la producción resultante de dichos procesos. Algunos ejemplos de cambios de procesos que se detectan por medio de SPC son los siguientes:

- Aumento repentino en la producción de cajas de velocidades defectuosas.
- Disminución del número promedio de quejas de huéspedes recibidas en un hotel cada día.
- Una medición sistemáticamente baja en el diámetro de un cigüeñal.
- Disminución en el número de unidades desechadas en una máquina fresadora.

Otro enfoque de la administración de la calidad, el muestreo de aceptación, es la aplicación de técnicas estadísticas para determinar si una cantidad de material determinada o un producto que ya ha sido fabricado debe aceptarse o rechazarse, a partir de la inspección o prueba de una muestra. Además, pueden usarse gráficas estadísticas y diagramas con el objeto de juzgar la calidad de productos o servicios. En este capítulo exploraremos las técnicas de control estadístico de procesos para comprender mejor el papel que desempeñan en la toma de decisiones, con el propósito de observar si el proceso está dentro de su variabilidad aleatoria o ha salido de control produciendo fallas que sean asignables a algún problema determinado.



VARIABILIDAD EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN

No hay dos productos o servicios exactamente iguales porque los procesos mediante los cuales se producen incluyen muchas fuentes de variación, incluso cuando dichos procesos se desarrollen en la forma prevista. Por ejemplo, los diámetros de los cigüeñales pueden no ser idénticos a causa de diferencias en el desgaste de las herramientas, la dureza del material, la habilidad del operario o la temperatura prevaeciente en el momento de su fabricación. En forma similar, el tiempo necesario para atender una solicitud para la emisión de una tarjeta de crédito varía de acuerdo con la carga de trabajo del departamento de crédito, los antecedentes financieros del solicitante y las habilidades y aptitudes de los empleados. Nada puede hacerse para suprimir por completo las variaciones en los procesos, pero la gerencia tiene la opción de investigar las causas de variación a fin de minimizarlas.

En la figura 11.1 se muestran los pasos para determinar la variación del proceso. Primero -véase la figura 11.1(a)- se toma una serie de pequeñas muestras y se las coloca en una escala proporcional (el eje horizontal). Después en el eje vertical, se indica el número de veces que ocurrieron (frecuencia). Eventualmente, después de un número de muestras, se tienen las distribuciones mostradas en la figura 11.1(b). Las distribuciones, por supuesto, difieren -véase la figura 11.1(c) dependiendo de lo que revelaron las muestras. Si sólo se encuentran causas de variaciones naturales en el proceso, entonces las distribuciones serán similares a la que aparece en la figura 11.1(d). Si aparecen causas de variaciones asignables (esto es, causas que no se esperan como parte del proceso), entonces las muestras producirán distribuciones inesperadas, tales como las mostradas en la figura 11.1(e).

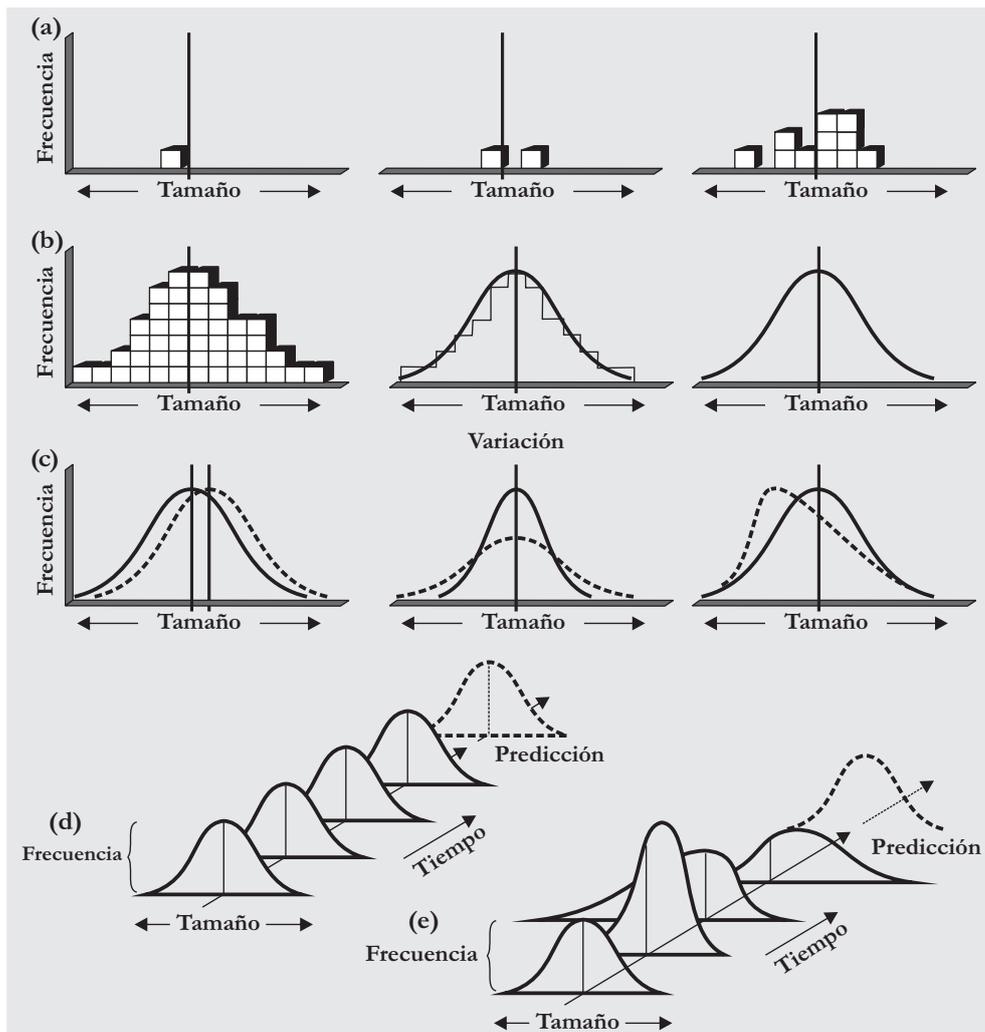


Figura 11.1
 Variaciones naturales y asignables. (a) Las muestras varían de una a otra; (b) pero forman un patrón que, si es estable, es llamado distribución. (c) Las distribuciones pueden diferir en la medida de la tendencia central, variación, forma o cualquier combinación de éstas. (d) Si sólo se presentan causas de variación naturales, la salida del proceso forma una distribución que es estable a través del tiempo y es predecible. (e) Si se presentan causas de variación asignables, la salida de proceso no es estable a través del tiempo y no es predecible.

El trabajo del administrador de operaciones es, desde luego, eliminar las variaciones asignables y mantener los procesos bajo control. La figura 11.2 muestra tres tipos de salidas del proceso; la figura 11.2(a) muestra un proceso fuera de control; la figura 11.2(b) muestra un proceso bajo control pero que no se desempeña dentro de los límites de control, y la figura 11.2(c) muestra un proceso bajo control que se encuentra dentro de los límites establecidos.

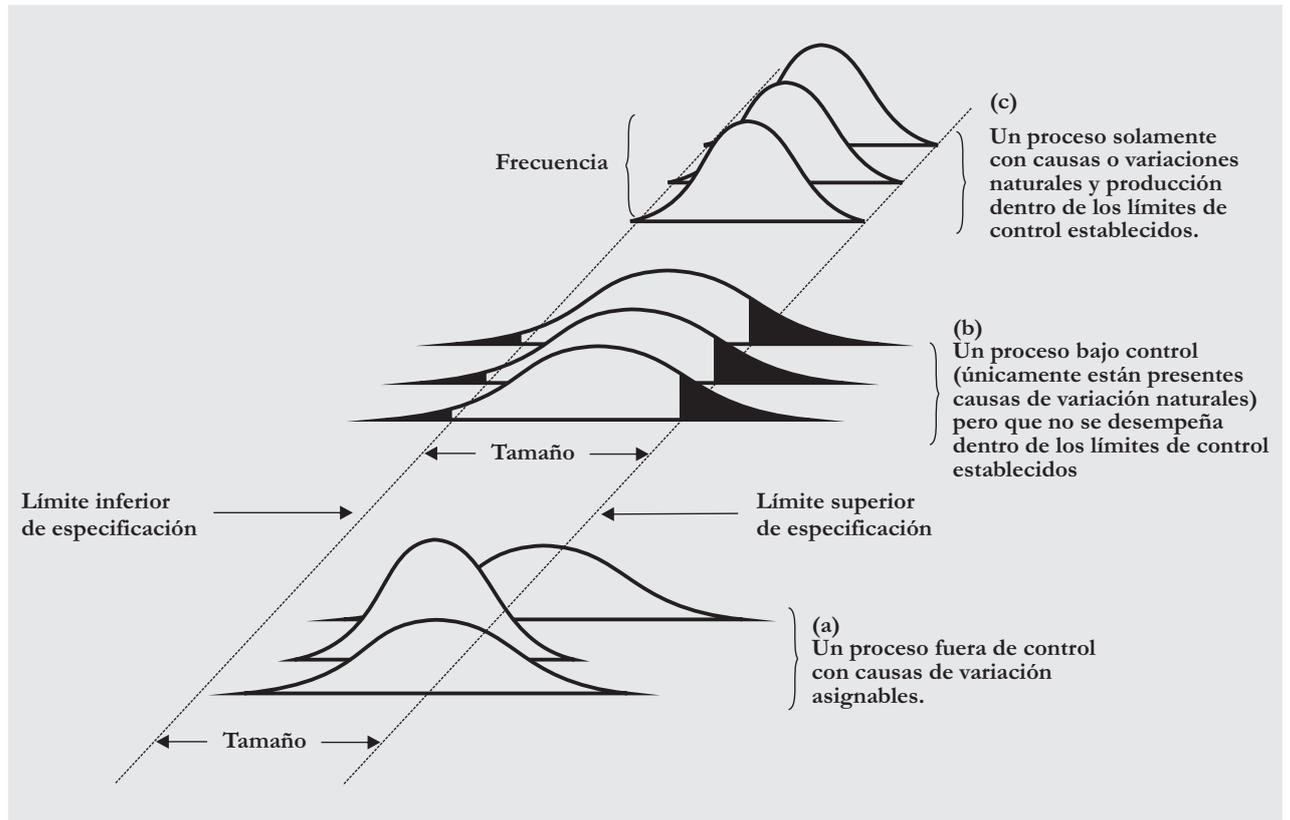


Figura 11.2
Control del proceso: tres tipos de salida del proceso

Causas comunes

Existen dos categorías básicas de variación en los productos: causas comunes y causas asignables. Las primeras son fuentes de variación puramente aleatorias, no identificables e imposibles de evitar mientras se utilice el procedimiento actual. Por ejemplo, una máquina para llenar cajas de cereal no vaciará exactamente la misma cantidad de cereal en todas las cajas. Si el consumidor pesara un gran número de cajas llenadas por esa máquina y representara gráficamente los resultados por medio de un diagrama de dispersión, los datos tenderían a formar un patrón que suele describirse como una distribución. Tal distribución se caracteriza por su media, su expansión y su forma.

1. La **media** es la suma de las observaciones dividida entre el número total de observaciones:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

donde:

x_i = observación de una característica de calidad (por ejemplo, el peso)

n = número total de observaciones

\bar{x} = media



2. La **variación** es una medida de la dispersión de las observaciones en torno a la media. Dos medidas que se usan comúnmente en la práctica son el rango y la desviación estándar. El rango es la diferencia entre la observación más grande contenida en una muestra y la más pequeña. La desviación estándar es la raíz cuadrada de una población, basada en una muestra, y se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum x_i - \bar{x}}{n-1}} \quad \text{o bien} \quad \delta = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}{n-1}}$$

donde:

δ = desviación estándar de una muestra

n = número total de observaciones de la muestra

\bar{x} = media

x_i = observación de una característica de calidad

Si el rango o la desviación estándar tienen valores relativamente pequeños, eso implica que las observaciones están agrupadas cerca de la media.

3. Dos formas comunes en las distribuciones de procesos son la simétrica y la asimétrica o sesgada. Una **distribución simétrica** presenta el mismo número de observaciones ubicadas encima y por debajo de la media. Una **distribución asimétrica** presenta una preponderancia de observaciones ya sea encima o por debajo de la media.

Si la variabilidad del proceso proviene únicamente de causas comunes de variación; la suposición típica es que se trata de una distribución simétrica, donde la mayoría de las observaciones se localiza cerca del centro. La figura 11.3 muestra la distribución correspondiente a la máquina para rellenar cajas cuando sólo existen causas comunes de variación. El peso medio de esas cajas es de 425 gramos y la distribución es simétrica con respecto a la media.

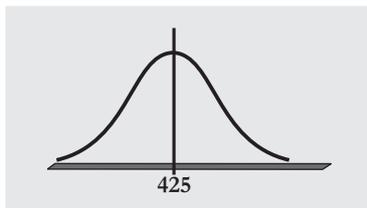


Figura 11.3

Distribución del proceso para la máquina envasadora de cajas de cereal cuando sólo se presentan causas comunes de variación.

Causas asignables

En la segunda categoría de variación cualquier factor causante de variación logra ser identificado y eliminado. Entre las causas asignables de variación figuran, por ejemplo, un empleado que necesite capacitación o una máquina que requiera una reparación. Veamos otra vez el ejemplo de la máquina para llenar cajas. La figura 11.4 muestra la forma en que las causas asignables modifican la distribución de la producción de dicha máquina. La curva gris representa la distribución del proceso cuando sólo existen causas comunes de variación.

La línea negra ilustra un cambio en la distribución debido a la presencia de causas asignables. En la figura 11.4(a), la línea negra indica que la máquina introdujo en las cajas una cantidad de cereal mayor que la prevista, a causa de lo cual aumentó el peso promedio de cada caja. En la figura 11.4(b), observamos que un aumento en la variabilidad del peso del cereal contenido en cada caja afectó la expansión de la distribución. En la figura 11.4(c), la línea negra indica que en la producción de la máquina figuran más cajas livianas que cajas pesadas. Esta distribución es asimétrica; es decir, ya no es simétrica con respecto al valor promedio.

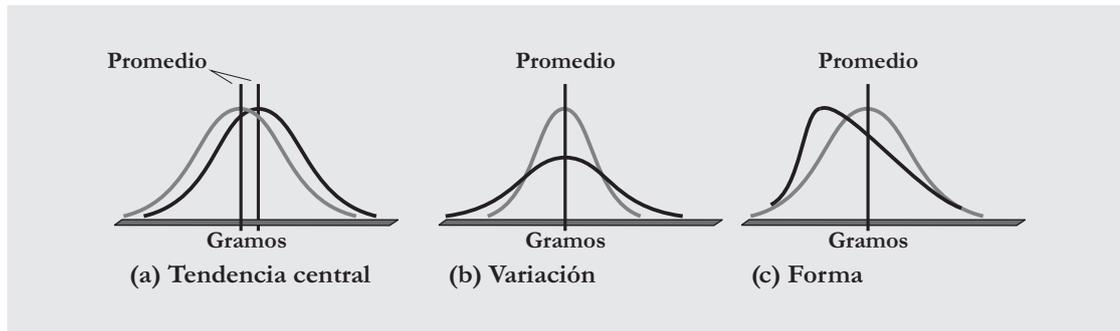


Figura 11.4

Efecto de las causas asignables sobre la distribución del proceso para la máquina de llenado de cereal.

Se dice que un proceso está bajo control estadístico cuando la localización, expansión o forma de su distribución no cambia con el tiempo. Una vez que el proceso está bajo control estadístico, los gerentes usan procedimientos SPC para detectar el momento en que surgen causas asignables, de modo que éstas se eliminen. La figura 11.5 muestra las diferencias entre un proceso que está bajo control estadístico y otro que no lo está. En la figura 11.5(a) la máquina está generando diferentes distribuciones del peso de las cajas de cereal a través del tiempo, lo cual indica causas asignables que es preciso eliminar. En la figura 11.5(b) las distribuciones del peso son estables a través del tiempo. En consecuencia, el proceso está bajo control estadístico. Más adelante veremos cómo pueden aplicarse técnicas SPC en proyectos de mejoramiento continuo para reducir la variabilidad de un proceso.

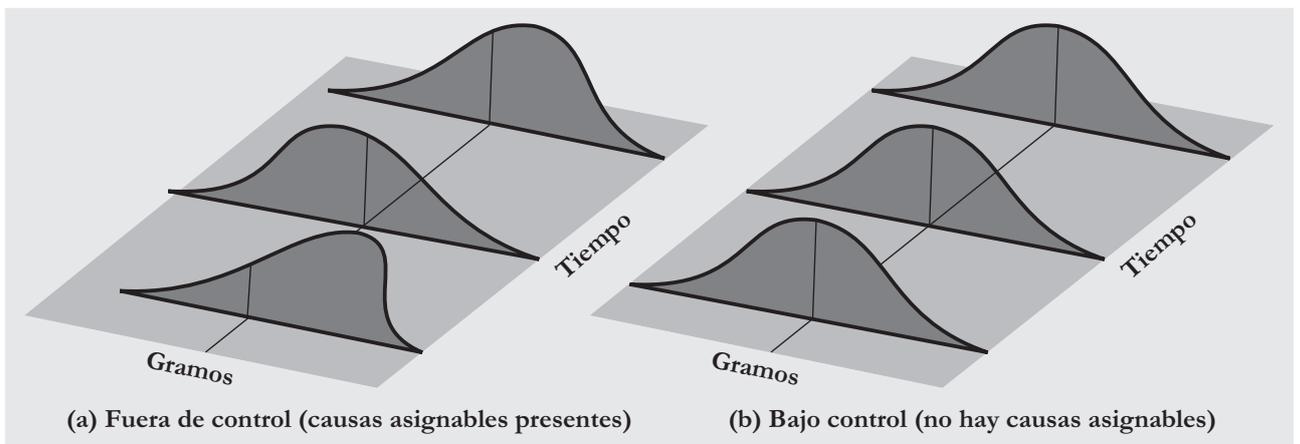


Figura 11.5

Efecto de las causas asignables sobre el control de procesos.

PROCESO DE INSPECCIÓN

Muchas compañías usan incorrectamente la inspección de calidad, pues intentan (a menudo sin éxito) sacar las unidades defectuosas antes de que lleguen al consumidor. Este enfoque está condenado al fracaso a causa de los costos internos y externos de las fallas. En cambio, las compañías de categoría mundial combinan la inspección precoz con el SPC para vigilar la calidad y estar en condiciones de detectar y corregir la presencia de anomalías.

Entre las decisiones más importantes en la aplicación de un programa de este tipo figuran las referentes a cómo medir las características de la calidad, qué tamaño de muestras recolectar y en qué etapas del proceso será conveniente realizar inspecciones.



Mediciones de la calidad

Para detectar las mediciones anormales del producto, los inspectores deben tener la capacidad necesaria para medir los rasgos característicos de la calidad. La calidad puede evaluarse en dos formas.

Una consiste en **medir los atributos** o las características del producto o servicio donde es posible *contar* rápidamente para saber si la calidad es aceptable. Este método permite a los inspectores tomar una simple decisión de si o no, acerca de que un producto o servicio cumple con las especificaciones. Los atributos se usan con frecuencia cuando las especificaciones de calidad son complicadas y la medición por medio de variables resulta difícil o costosa.

Otros ejemplos de atributos que pueden presentarse son el número de formularios de seguro que contienen errores y dan lugar a pagos excesivos o insuficientes, la proporción de radios que no funcionan en la prueba final, la proporción de vuelos regulares que llegan con una diferencia menor de 15 minutos con respecto a la hora prevista. La ventaja de los recuentos de atributos es que para su realización se requieren menos esfuerzos y recursos que en el caso de la medición de variables. La desventaja es que, aún cuando los recursos de atributos bastan para revelar que la calidad de rendimiento ha cambiado, no son de mucha utilidad para conocer la magnitud del cambio. Por ejemplo, un recuento es capaz de revelar que la proporción de vuelos regulares que llegan a menos de 15 minutos de la hora prevista ha disminuido, pero el resultado no muestra cuántos minutos más allá de los 15 permitidos están llegando los vuelos. Para saberlo, habría que medir la desviación real de la llegada prevista, es decir una variable.

La otra forma de evaluar la calidad consiste en **medir variables**; es decir, las características del producto o servicio que son susceptibles de ser medidas, como peso, longitud, volumen o tiempo. Por ejemplo, los inspectores de una empresa automotriz miden el diámetro de un pistón para determinar si el producto se ajusta a las especificaciones (dentro de las tolerancias permitidas) e identificar diferencias en los diámetros a través del tiempo. Asimismo, los gerentes de una empresa logística de distribución de envíos a domicilio observan la cantidad de tiempo que dedican los repartidores a la tarea de repartir las cartas y paquetes. La ventaja de medir alguna característica de la calidad consiste en que si un producto o servicio no satisface sus especificaciones de calidad, el inspector sabe cuál es el valor de la discrepancia. La desventaja es que esas mediciones suelen requerir el uso de equipo especial, ciertas destrezas de los empleados, procedimientos rigurosos, tiempo y esfuerzo.



Muestreo

El método más completo para una inspección consiste en revisar la calidad de todos los productos o servicios en cada una de las etapas. Este procedimiento, llamado **inspección completa**, se usa cuando los costos de pasar los defectos a la siguiente estación de trabajo o al cliente son mayores que los costos de la inspección. Por ejemplo, los proveedores de componentes para aeronaves, revisan muchas veces cada componente antes de enviarlo a un contratista. Aquí, el costo de una falla (lesión, muerte y la destrucción de equipo sumamente costoso) supera por amplio margen el costo de la inspección. La inspección completa garantiza virtualmente que las unidades defectuosas no pasarán a la siguiente operación o al cliente, lo cual es una política congruente con el TQM. Sin embargo, cuando participan inspectores humanos, hasta la inspección completa puede no ser capaz de descubrir todos los defectos. La fatiga del inspector o las imperfecciones en los métodos de prueba provocan que algunos defectos pasen inadvertidos. Las empresas logran superar esas fallas al utilizar equipo de inspección automatizado que registre, resuma y exhiba los datos. Muchas han descubierto que el equipo de inspección automatizado se paga por sí solo en un tiempo razonablemente corto.

Un plan de muestreo proporciona más o menos el mismo grado de protección que obtenemos con una inspección completa. En el plan de muestreo se especifican: el **tamaño de la muestra** -cantidad determinada de observaciones de los productos del proceso seleccionadas al azar-, el **intervalo de tiempo** -tiempo transcurrido entre dos muestras sucesivas, y las **reglas de decisión** -determinar cuándo es necesario entrar en acción-. El muestreo es apropiado cuando los costos de inspección son altos porque para realizarla se requieren conocimientos, habilidades o procedimientos especiales; o bien, equipo costoso. Por ejemplo, los estudios contables usan planes de muestreo cuando realizan una auditoría.

Distribuciones de muestreo. El propósito de un muestreo es calcular una variable o medida de atributos para cierta característica de calidad de la muestra. Esa medida se usará después para evaluar el rendimiento del proceso mismo. Por ejemplo, en la operación de rellenado de las cajas de cereal, una de las dimensiones importantes de la calidad es el peso del producto contenido en cada caja. Supongamos que al determinar el peso de las distintas cajas, la gerencia tomara la decisión de que la máquina debe producir cajas con un peso promedio de 425 grs., igual que la distribución del proceso, pero con una variabilidad mucho menor. La razón de esto es que los valores medios compensan las cifras más altas y más bajas registradas. La figura 11.6 muestra la relación

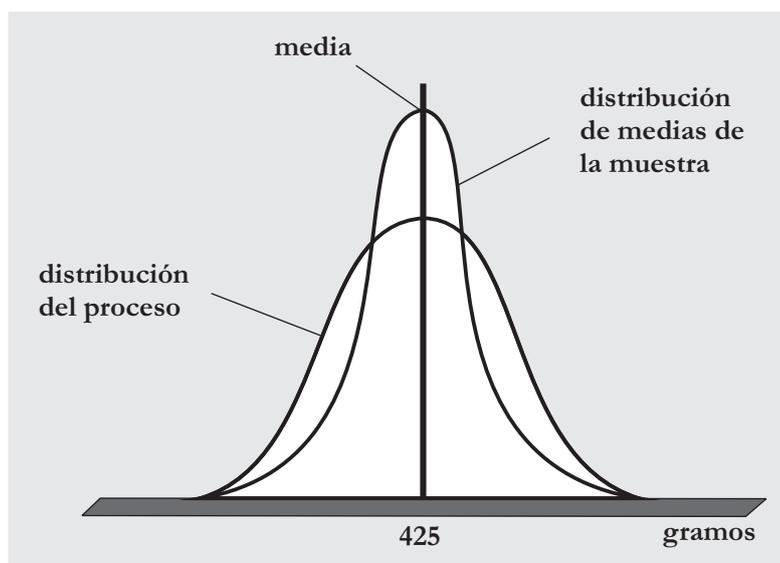


Figura 11.6
Relación entre la distribución de medias y la muestra y la distribución del proceso.



Algunas distribuciones de muestreo (por ejemplo, para medias con tamaños de muestra de 4 o más y proporciones con tamaños de muestra de 20 o más) suelen calcularse en forma aproximada mediante la distribución normal, lo cual permite utilizar las tablas normales. En la figura 11.7 se presentan los porcentajes de valores que están ubicados dentro de ciertos rangos de la distribución normal. Por ejemplo, el 68,26% de la muestra tendrá valores dentro de una desviación estándar de ± 1 de la media de distribución. Podemos calcular la probabilidad de que el resultado de una muestra cualquiera quede fuera de ciertos límites. Por ejemplo, hay una probabilidad de 2,28%, o sea $(100-95,44)/2$, de que una media de la muestra adquiera un valor que supere a la media por más de dos desviaciones estándar. La posibilidad de asignar probabilidades a los resultados de la muestra es importante para la construcción y el empleo de gráficas de control.

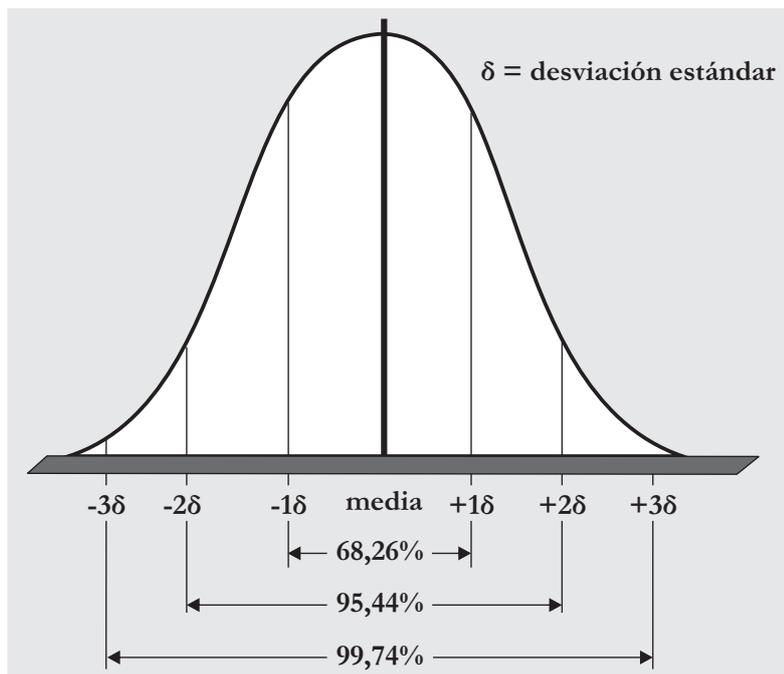


Figura 11.7
Distribución normal

Gráficas de control. Para determinar si las variaciones observadas son anormales, podemos medir y trazar la gráfica de la característica de calidad tomada de la muestra, en un diagrama ordenado por tiempo, conocido como gráfica de control. La gráfica de control tiene un valor nominal o línea central, que generalmente es el objetivo que los gerentes desearían alcanzar por medio del proceso, y dos límites o acotamientos de control basados en la distribución de muestreo de la medida de la calidad.

Los límites de control se usan para juzgar si es necesario emprender alguna acción. El valor más grande representa el **acotamiento de control superior (UCL)** (del inglés, *upper control limit*) y el valor más pequeño representa el **acotamiento de control inferior (LCL)** (del inglés, *lower control limit*). La figura 11.8 muestra cómo se relacionan los acotamientos de control con la distribución de muestreo. Una estadística de muestras ubicada entre el UCL y el LCL indica que el proceso está mostrando causas comunes de variación; en cambio, una estadística ubicada fuera de los acotamientos de control indica que el proceso está exhibiendo causas asignables de variación.

Las observaciones que se encuentran fuera de los acotamientos de control no siempre denotan una mala calidad. Por ejemplo, en la figura 11.8, la causa asignable puede ser algún nuevo procedimiento de facturación introducido para reducir el número de facturas incorrectas que se envían a los clientes. Si la proporción de facturas incorrectas, es decir, la estadística de calidad tomada de una muestra de facturas, desciende por debajo del LCL de la gráfica de control, es probable que el nuevo procedimiento haya provocado un cambio favorable en el proceso de facturación y será necesario construir una nueva gráfica de control.

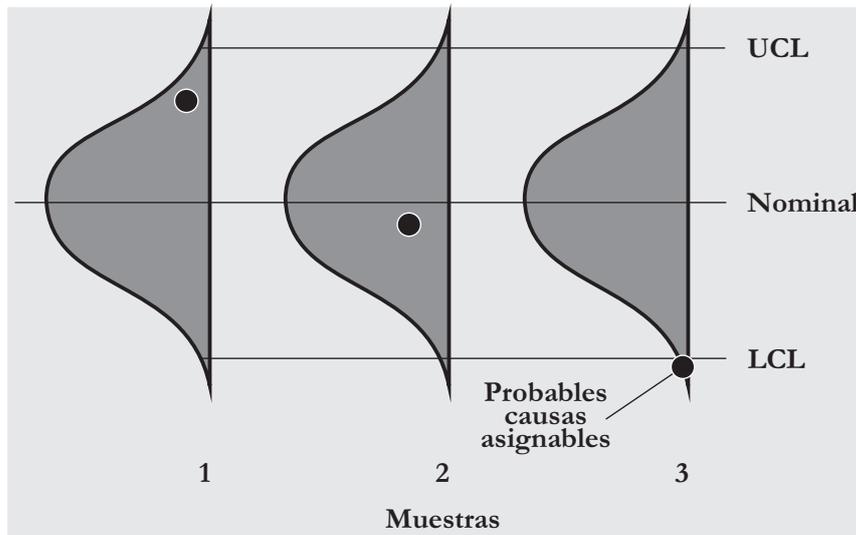


Figura 11.8
Relación de los acotamientos de control con la distribución de muestreo y observaciones tomadas de tres muestras.

Los responsables de vigilar un proceso suelen usar gráficas de control en la siguiente forma:

1. Tomar una muestra aleatoria del proceso, medir la característica de calidad y calcular una medida variable o de atributos.
2. Si la estadística se ubica fuera de los acotamientos de control de la gráfica, buscar una causa asignable.
3. Eliminar la causa si ésta degrada la calidad, o incorporar la causa si con ella mejora la calidad. Reconstruir la gráfica de control con nuevos datos.
4. Repetir periódicamente todo el procedimiento.

A veces es posible detectar los problemas que afectan a un proceso, aun cuando los acotamientos de control no hayan sido rebasados. En la figura 11.9 se presentan ejemplos de gráficas de control que se han popularizado entre la bibliografía de administración, indicando distintos comportamientos en los procesos que denotan situaciones anormales en el comportamiento de las muestras.

Las gráficas de control no son herramientas perfectas para detectar los cambios en la distribución de procesos, por el hecho de que están basadas en distribuciones de muestreo. Se pueden presentar dos tipos de errores cuando se utiliza este tipo de gráficas.

El **error “tipo I” (rechazar un lote de buena calidad)** se produce cuando el empleado o analista saca la conclusión de que el proceso está fuera de control, basándose en un resultado de muestra ubicado fuera de los acotamientos de control, cuando en realidad se trataba de un efecto puramente aleatorio.

Un **error “tipo II” (aceptar un lote de mala calidad)** se presenta cuando el empleado en cuestión concluye que el proceso está bajo control y que sólo se presentan discrepancias aleatorias, cuando en realidad dicho proceso está fuera de control estadístico.

La gerencia puede controlar estos errores mediante la selección adecuada de los acotamientos de control. Dicha selección dependerá de estimar los costos correspondientes a la búsqueda de causas asignables cuando en realidad no existe ninguna, y compararlos con el costo de no detectar un cambio generado en el proceso.



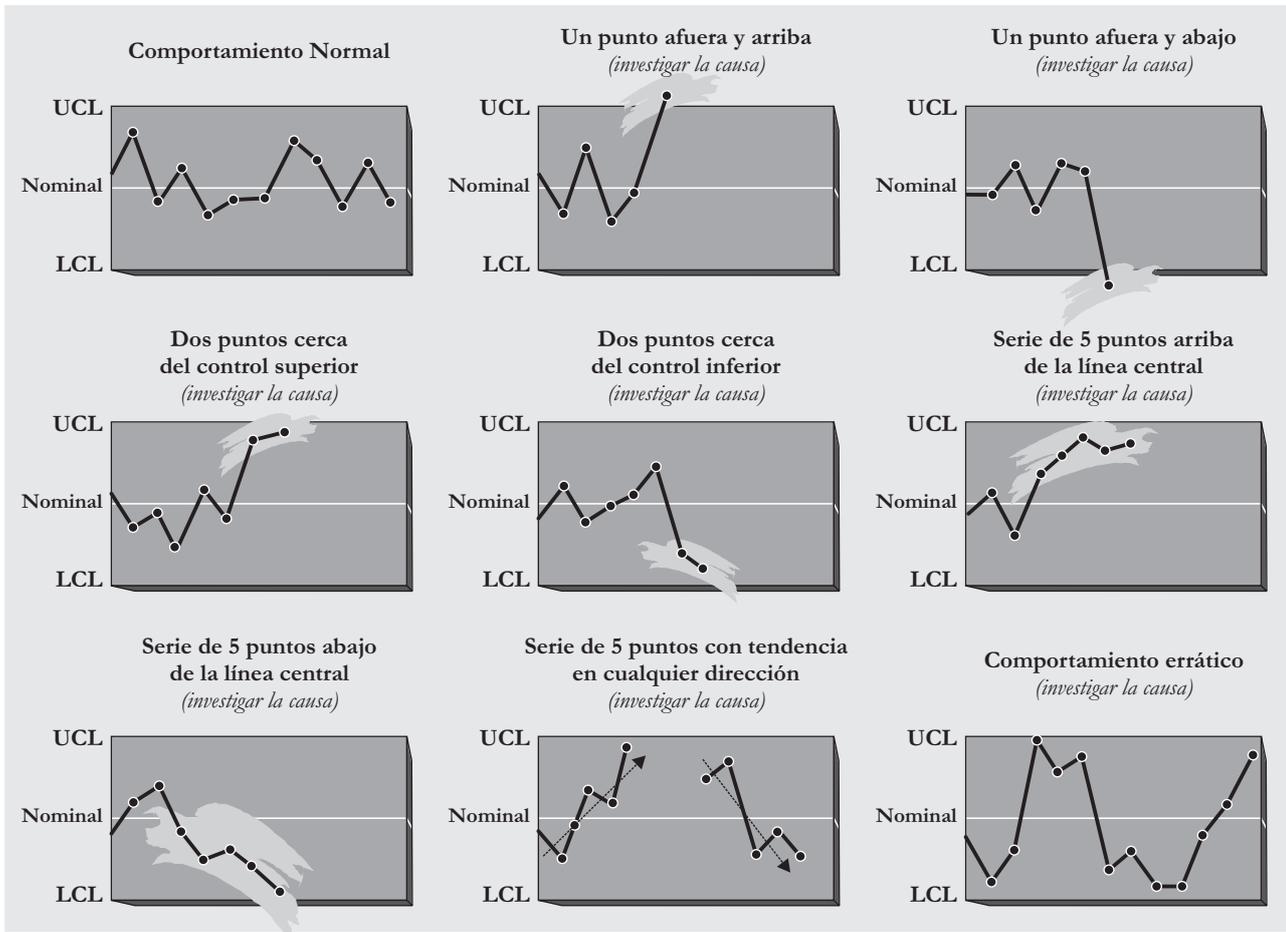


Figura 11.9

Diagramas de flujo con procesos que denotan situaciones anormales en el comportamiento de las muestras.

Fuente: Schroeder, R. Administración de Operaciones. Ed. Macchi. 1992.

La figura 11.10 muestra las consecuencias de estos errores cuando el promedio del proceso es la medida de la calidad.

En la gráfica 11.10(a) se establecieron los acotamientos de control de la distribución de muestreo para tres desviaciones estándar con respecto a la media. Nos referimos a estos acotamientos de control como límites o **acotamientos tres sigma**. En este caso, sigma se refiere a la desviación estándar de la distribución de muestreo, no a la distribución del proceso. En la curva que aparece más a la izquierda, la porción sombreada representa la probabilidad de cometer un error “tipo I”. Esa probabilidad es muy pequeña en el caso de acotamientos tres sigma. En la curva que se ilustra más a la derecha, el promedio del proceso se ha modificado. La porción sombreada de la curva muestra ahora la probabilidad de cometer un error “tipo II”, la cual es bastante grande.

En la figura 11.10(b), la gráfica de control tiene solamente **acotamientos de control dos sigma**, es decir, una expansión más estrecha que en el caso de la gráfica de control tres sigma. Ahora la probabilidad de un error “tipo I” ha aumentado, y la probabilidad de un error “tipo II” ha disminuido.

Así pues, cuando se incrementa la expansión decrecen los errores “tipo I”, al tiempo que se incrementan los errores “tipo II”.

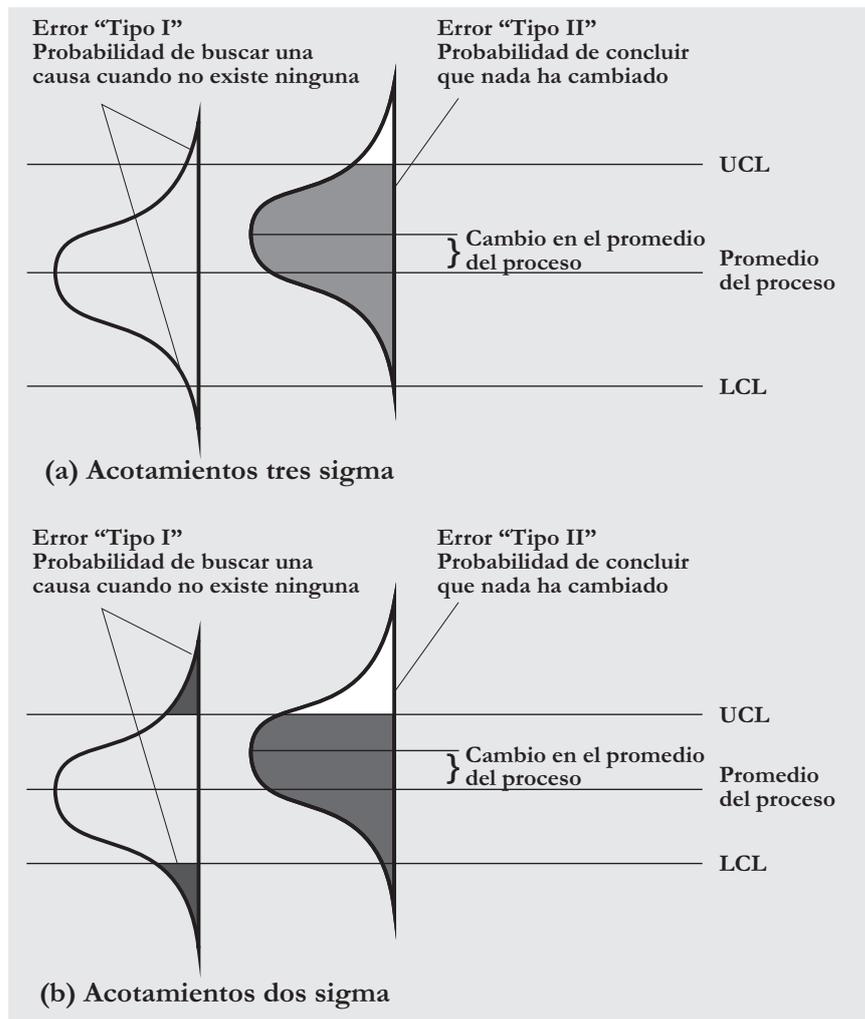


Figura 11.10
Relación de la expansión del acotamiento de control con los errores "Tipo I" y "Tipo II".

Un gerente que usa acotamientos tres sigma expresa implícitamente que el costo de buscar las causas asignables es grande en relación con el costo de no detectar a tiempo algún cambio en el promedio del proceso. Es posible que sea necesario tomar bastantes muestras para generar un promedio de muestra ubicado fuera de los acotamientos de control. Inversamente, el hecho de que un gerente utilice acotamientos dos sigma implica que el costo de no detectar un cambio en el proceso es mayor que el costo de buscar las causas asignables. Con acotamientos de control más pequeños, un mayor número de medias de la muestra quedarán fuera de esos límites, por lo cual será necesario realizar una búsqueda más intensa para encontrar las causas asignables. Con frecuencia no es posible hallar causas asignables, pero podrá detectarse con mayor rapidez un cambio en el promedio del proceso.

MÉTODOS DE CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS

Los métodos de control estadísticos de procesos (SPC) son útiles tanto para medir la calidad actual de los productos o servicios, como para detectar si el proceso mismo ha cambiado en alguna forma que afecte la calidad. En esta sección, primero veremos gráficas de medias y rangos para medidas variables de la calidad, después consideraremos las gráficas de control para atributos de productos o servicios.

Gráficas de control para variables

Las gráficas de control para variables se usan con el propósito de vigilar la media y la variabilidad de la distribución de un proceso.

Gráficas R. Una gráfica de rango, o **gráfica R**, se usa para vigilar la variabilidad de los procesos. Si desea calcular el rango de un conjunto de datos de muestra, el analista resta la medición más pequeña de la medición más grande obtenida en cada muestra. Si cualquiera de los datos queda fuera de los acotamientos de control, se dice que la variabilidad del proceso no está bajo control.

Los acotamientos de control para la *gráfica R* son:

$$UCL_R = D_4 \bar{R} \quad \text{y} \quad LCL_R = D_3 \bar{R}$$

donde:

\bar{R} = promedio de varios valores R pasados y la línea central de la gráfica de control.

D_4 y D_3 = constantes que proporcionan tres acotamientos de desviación estándar (tres sigma) para un tamaño de muestra dado.

Los valores de $D_3 = 0.0021$ y D_4 están contenidos en la tabla de la figura 11.11 y cambian en función del tamaño de la muestra. Observe que la expansión entre los acotamientos de control se vuelve más estrecha cuando aumenta el tamaño de la muestra. Este cambio es consecuencia de contar con más información como base para hacer una estimación del rango del proceso.

Tamaño de la muestra (n)	Factor para UCL y LCL para gráficas \bar{x} (A_2)	Factor para LCL para gráficas R (D_3)	Factor para UCL para gráficas R (D_4)
2	1,880	0	3,267
3	1,023	0	2,575
4	0,729	0	2,282
5	0,577	0	2,115
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

Fuente: 1950 ASTM Manual on Quality Control of Materials. American Society for Testing Materials.

Figura 11.11

Factores para calcular acotamientos tres sigma para la gráfica \bar{x} y la gráfica R

Gráficas \bar{x} : Para medir una media se utiliza una **gráfica \bar{x}** (léase gráfica x barra). Cuando las causas asignables a la variabilidad del proceso han sido identificadas y la variabilidad de dicho proceso se encuentra dentro del control estadístico, el analista puede construir una gráfica \bar{x} .

Los valores de A_2 están contenidos en la tabla de la figura 11.11. Observe que en los acotamientos de control se usa el valor de \bar{R} ; por lo tanto, la gráfica \bar{x} debe construirse después de que la variabilidad del proceso ha quedado bajo control.

$$UCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} \quad \text{y} \quad LCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}$$

donde:

$\bar{\bar{x}}$ = línea central de la gráfica y el promedio de las medias de una muestra pretérita o un valor establecido como objetivo para el proceso

A_2 = constante para proporcionar acotamientos tres sigma para una media de la muestra.

Los analistas pueden desarrollar y usar gráficas \bar{x} y R en la siguiente forma:

Paso 1. Recabar datos sobre la medición de la calidad de una variable (por ejemplo, peso, diámetro o tiempo) y organizar los datos por números de muestra. De preferencia, deben tomarse por lo menos 20 muestras para usarlas en la construcción de una gráfica de control.

Paso 2. Calcular el rango para cada muestra y el rango promedio, \bar{R} , para el conjunto de muestras.

Paso 3. Use la tabla de la figura 11.11 para determinar los acotamientos de control superior e inferior de la gráfica R.

Paso 4. Trace los rangos de la muestra. Si todos están bajo control, avance al paso 5. De lo contrario, encuentre las causas asignables, corríjalas y regrese al paso 1.

Paso 5. Calcule \bar{x} para cada muestra y la línea central de la gráfica \bar{x} .

Paso 6. Use la tabla de la figura 11.11 a fin de determinar los parámetros para $UCL_{\bar{x}}$ y $LCL_{\bar{x}}$, y construya la gráfica \bar{x} .

Paso 7. Trace las medias de la muestra. Si todas están bajo control, el proceso está controlado estadísticamente en términos del promedio del proceso y de la variabilidad del proceso. Siga tomando muestras y vigile el proceso. Si alguna de ellas está fuera de control, desde el punto de vista estadístico, busque las causas asignables, corríjalas y regrese al paso 1. Si no logra encontrar ninguna causa asignable después de realizar una cuidadosa búsqueda, suponga que los puntos fuera de control representan causas comunes de variación y continúe vigilando el proceso.

Si la desviación estándar de la distribución del proceso es conocida, es posible usar otra forma de la gráfica \bar{x} .

$$UCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} + z \delta_{\bar{x}} \quad \text{y} \quad LCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} - z \delta_{\bar{x}}$$

donde:

$$\delta_{\bar{x}} = \frac{\delta}{\sqrt{n}} = \text{desviación estándar de las medias de la muestra}$$

δ = desviación estándar de la distribución del proceso

n = tamaño de la muestra

$\bar{\bar{x}}$ = promedio de las medias de la muestra o un valor establecido como objetivo para el proceso.

El analista puede emplear una gráfica R para asegurarse de que la variabilidad del proceso está bajo control, antes de construir la gráfica \bar{x} . La ventaja de usar esta forma de la gráfica \bar{x} consiste en que el analista tiene la posibilidad de ajustar la expansión de los acotamientos de control modificando el valor de z . Este enfoque suele ser útil para establecer el equilibrio entre los efectos de los errores “tipo I” y “tipo II”.

Ejemplo de cómo usar gráficas \bar{x} y R para vigilar un proceso. La dirección de Metalúrgica Introvatto está preocupada por la producción de un tornillo de acero especial que usan algunos de los clientes más importantes de la empresa. El diámetro del tornillo es crítico. Los datos de cinco muestras aparecen en la siguiente tabla (para simplificar el ejemplo hemos tomado solamente 5 muestras, en la práctica sería conveniente usar más de 20 muestras). El tamaño de la muestra es 4. ¿Está el proceso bajo control?



Número de muestra	Observación					$\bar{\bar{x}}$
	1	2	3	4	R	
1	0,5014	0,5022	0,5009	0,5027	0,0018	0,5018
2	0,5021	0,5041	0,5024	0,5020	0,0021	0,5027
3	0,5018	0,5026	0,5035	0,5023	0,0017	0,5026
4	0,5008	0,5034	0,5024	0,5015	0,0026	0,5020
5	0,5041	0,5056	0,0534	0,5047	0,0022	0,5045

Solución:

Paso 1. Calcular el rango para cada muestra, restando el valor más bajo del más alto. Por ejemplo, en la muestra 1, el rango es $0.5027 - 0.5009 = 0.0018$ pulgadas. En forma similar, los rangos para las muestras 2, 3, 4 y 5 son 0.0021, 0.0017, 0.0026 y 0.0022 pulgadas respectivamente. Como se aprecia en la tabla, $\bar{R} = 0.0021$.

Paso 2. Para construir la gráfica R, seleccione las constantes apropiadas en la tabla de la figura 11.11 para un tamaño de muestra 4. Los acotamientos de control son:

$$UCL_R = D_4 \bar{R} = 2,282 (0,0021) = 0,00479 \text{ pulgadas}$$

$$LCL_R = D_3 \bar{R} = 0 (0,0021) = 0 \text{ pulgadas}$$

Paso 3. Trace los rangos en la gráfica R, como se muestra en la figura 11.12. Ninguno de los rangos de la muestra queda fuera de los acotamientos de control. En consecuencia, la variabilidad del proceso está bajo control estadístico. Si cualquiera de los rangos de la muestra hubiera quedado fuera de esos límites, habríamos tenido que buscar las causas de la variabilidad excesiva, corregirlas y repetir el paso 1.

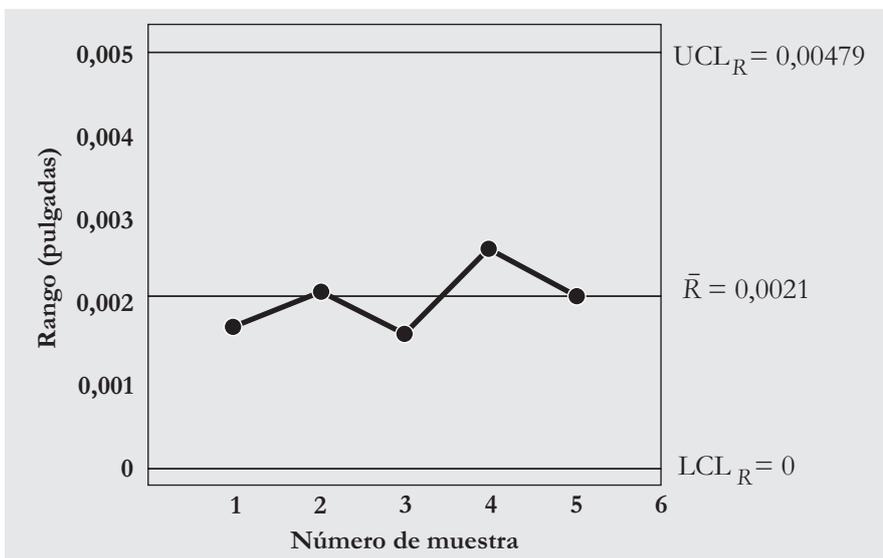


Figura 11.12

Gráfica de rango para el tornillo de acero, mostrando que la variabilidad del proceso está bajo control.

Paso 4. Calcule la media para cada muestra. Por ejemplo, la media para la muestra 1 es:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{0,5014 + 0,5022 + 0,5009 + 0,5027}{4} = 0,5018 \text{ pulgadas}$$

En forma similar, las medias de las muestras 2, 3, 4 y 5 son 0.5027, 0.5026, 0.5020 y 0.5045 respectivamente. Tal como lo ilustra la tabla, $\bar{\bar{x}} = 0.5027$.

Paso 5. Ahora construya la gráfica \bar{x} para el promedio de este proceso. El diámetro promedio del tornillo es 0,5027 pulgadas y el rango promedio es 0,0021 pulgadas, por lo cual puede usar $\bar{\bar{x}} = 0,5027$; $\bar{R} = 0,0021$ y A_2 que aparece en la tabla de la figura 7.11, para un tamaño de muestra 4, para construir los acotamientos de control:

$$UCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} = 0,5027 + 0,729 (0,0021) = 0,5042 \text{ pulgadas}$$

$$LCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R} = 0,5027 - 0,729 (0,0021) = 0,5012 \text{ pulgadas}$$

Paso 6. Trace las medias de la muestra en la gráfica de control, como se aprecia en la figura 11.13

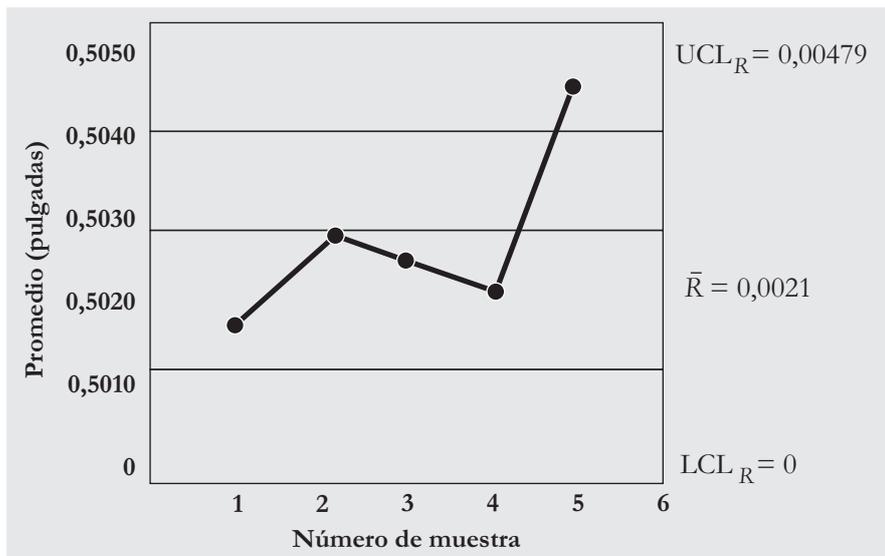


Figura 11.13

Gráfica \bar{x} para el tornillo de acero, ilustrando que la muestra 5 está fuera de control.

La media de la muestra 5 ha quedado por arriba del acotamiento de control superior, lo cual indica que el promedio de este proceso está fuera de control y que será necesario explorar las causas asignables, tal vez con la ayuda de un diagrama de causa y efecto. Si se logra encontrar causas asignables, será menester corregir los problemas, recopilar nuevos datos y construir otra vez las gráficas.

Gráficas de control para atributos

Dos gráficas que se utilizan comúnmente para realizar mediciones de calidad basadas en atributos del producto o servicio son la **gráfica p** y la **gráfica c** . La *gráfica p* se emplea para controlar la proporción de productos o servicios defectuosos generados por un proceso. La *gráfica c* se utiliza para controlar el número de defectos cuando en un producto o servicio puede haber más de un defecto.

Gráficas p . Es una gráfica de control que se usa comúnmente para representar atributos. En este caso, la característica de calidad no se mide sino que se cuenta, y el elemento o servicio se declara satisfactorio o deficiente en su totalidad. Por ejemplo, en el sector bancario, los atributos susceptibles de una operación de recuento pueden ser el número de depósitos no endosados o el número de declaraciones financieras incorrectas remitidas. Este método implica seleccionar una muestra aleatoria, examinar cada uno de sus elementos y calcular la proporción de la muestra que presenta defectos, p , la cual es equivalente al número de unidades defectuosas, dividido entre el tamaño de la muestra.

En el caso de una gráfica p , el muestreo implica una decisión de *sí o no*; el elemento o servicio examinado está defectuoso o no lo está. La distribución estadística fundamental se basa en la distribución binomial. Sin embargo, si los tamaños de muestra son grandes, la distribución normal proporciona una buena aproximación a ese respecto. La desviación estándar de la distribución de la proporción defectuosa δ_p es entonces:



$$\delta_p = \sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n}$$

donde:

n = tamaño de la muestra

\bar{p} = proporción defectuosa de la proporción histórica promedio o valor objetivo y línea central de la gráfica

La línea central de la gráfica p puede ser el promedio de la proporción defectuosa de la muestra pasada o un objetivo que la gerencia haya establecido para el proceso. Podemos emplear δ_p para encontrar los acotamientos de control superior e inferior de una gráfica p :

$$UCL_p = \bar{p} + z\delta_p \quad \text{y} \quad LCL_p = \bar{p} - z\delta_p$$

donde:

z = desvío normal (número de desviaciones estándar con respecto al promedio)

Periódicamente se toma una muestra aleatoria de tamaño n y se cuenta el número de productos o servicios defectuosos. Este último número se divide entre el tamaño de la muestra para obtener una proporción de muestra defectuosa, p , la cual se dibuja después sobre la gráfica. Cuando una proporción de muestra defectuosa queda fuera de los acotamientos de control, el analista supone que la proporción defectuosa generada por el proceso en cuestión ha cambiado y busca la causa asignable. Es posible que el analista no logre encontrar ninguna causa asignable porque siempre existe una pequeña probabilidad de que una proporción fuera de control se haya producido en manera fortuita. Sin embargo, si el analista descubre causas asignables, esos datos de muestra no deberán servir de base para calcular los acotamientos de control que se utilizarán en la gráfica.

Ejemplo de uso de una gráfica p para observar un proceso. Tomemos como ejemplo el caso de una compañía de seguros. Supongamos que el Gerente de Operaciones de esta compañía está implementando un control de las pólizas que la empresa realiza. Cada semana toma una muestra de los trabajos realizados (que ascienden a 2.500 pólizas) y anota la cantidad de pólizas que están mal confeccionadas. Los resultados de las 12 últimas semanas aparecen en la tabla. ¿Está fuera de control este proceso? La empresa utiliza acotamientos de control tres sigma.

Solución:

Número de muestra	Cantidad de errores
1	15
2	12
3	19
4	2
5	19
6	4
7	24
8	7
9	10
10	17
11	15
12	3
Total	147

Paso 1. Construya una gráfica p , usando datos del pasado para calcular \bar{p} .

$$\bar{p} = \frac{\text{Total de defectos}}{\text{Número total de observaciones}} = \frac{147}{12 \times 2.500} = 0,0049$$

$$\delta_p = \sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n} = \sqrt{0,0049(1-0,0049)/2.500} = 0,0014$$

$$UCL_p = \bar{p} + z\delta_p = 0,0049 + 3(0,0014) = 0,0091$$

$$LCL_p = \bar{p} - z\delta_p = 0,0049 - 3(0,0014) = 0,0007$$

Paso 2. Calcule la proporción defectuosa de esta muestra. En el caso de la muestra 1, la proporción de elementos defectuosos es $15/2500 = 0,0060$.

Paso 3. Dibuje en la gráfica cada una de las proporciones defectuosas de la muestra, como vemos en la figura 11.14

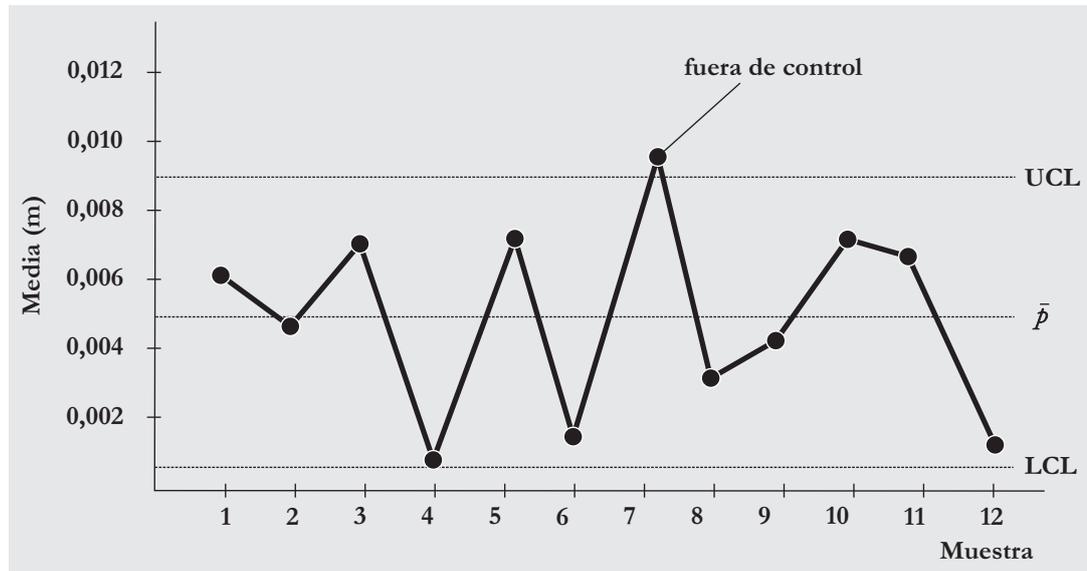


Figura 11.14

Gráfica p donde vemos que la muestra 7 está fuera de control.

La muestra 7 rebasa el acotamiento de control superior; por lo tanto, el proceso está fuera de control y será necesario averiguar las razones del mal desempeño registrado durante esa semana. Tal vez los números fueron ingresados erróneamente en la computadora por una persona en proceso de capacitación o una máquina codificadora tenía una falla. Una vez corregido el problema, el analista vuelve a calcular los acotamientos de control utilizando nuevos datos. Si todos los elementos de la proporción defectuosa de la nueva muestra se localizan dentro de los acotamientos de control, entonces el proceso está bajo control estadístico. Cada semana se toma otra muestra y el resultado se traza sobre la gráfica. Así pues, la *gráfica p* es una herramienta que no sólo sirve para medir la calidad del producto, sino también para indicar en qué momento requiere ajustes el proceso.

Gráficas c . A veces los productos tienen más de un defecto por unidad. Por ejemplo, un rollo de alfombra puede tener varios defectos, como fibras apelmotonadas, descoloridas o manchas originadas en el proceso de producción. Otras situaciones en donde es posible que se presente más de un defecto, son las imperfecciones en los tableros frontales de la pantalla de un televisor, los accidentes que ocurren en una esquina cualquiera y las quejas de los huéspedes de un hotel. Cuando la gerencia desea reducir el número de defectos por unidad, resulta útil otro tipo de representación de control: la *gráfica c* .

La distribución de muestreo subyacente en una *gráfica c* corresponde a la distribución de Poisson. Éste se basa en la suposición de que los defectos se presentan dentro de una región continua y que la probabilidad de que dos o más defectos se presenten en una misma localización cualquiera es insignificante. La media de la distribución es \bar{c} y la desviación es $\sqrt{\bar{c}}$. Una táctica útil consiste en usar la aproximación normal a la distribución de Poisson, con lo cual la línea central de la gráfica es:

$$UCL_c = \bar{c} + z\sqrt{\bar{c}} \quad \text{y} \quad LCL_c = \bar{c} - z\sqrt{\bar{c}}$$

Ejemplo de uso de una gráfica c para vigilar los defectos por unidad. Lesdesma S.A. fabrica papel para la industria gráfica. En la fase final del proceso, el papel pasa por una máquina que mide varias características de calidad. Cuando el proceso está bajo control, el promedio es de 20 defectos por cada rollo de papel.

- Elabore una gráfica de control para el número de defectos por rollo. Use acotamientos de control dos sigma.
- Los dos primeros rollos contenían 27 y 5 defectos, respectivamente. ¿Se encuentra este proceso bajo control?

Solución:

- El número promedio de defectos por rollo es 20. Por lo tanto,

$$UCL_c = \bar{c} + z\sqrt{\bar{c}} = 20 + 2(\sqrt{20}) = 28,94$$

$$LCL_c = \bar{c} - z\sqrt{\bar{c}} = 20 - 2(\sqrt{20}) = 11,06$$

La gráfica de control se ilustra en la figura 11.15

- Puesto que el primer rollo tenía sólo 27 defectos, o sea, menos de los que indica el acotamiento de control superior, el proceso sigue estando bajo control. Cinco defectos es menor que el valor del acotamiento de control inferior y, por consiguiente, el proceso se encuentra técnicamente fuera de control. Sin embargo, la gráfica de control indica que ha sucedido algo bueno. En este caso, sería conveniente que la gerencia localizara la causa asignable y la aprovechara para reducir el número promedio de defectos.

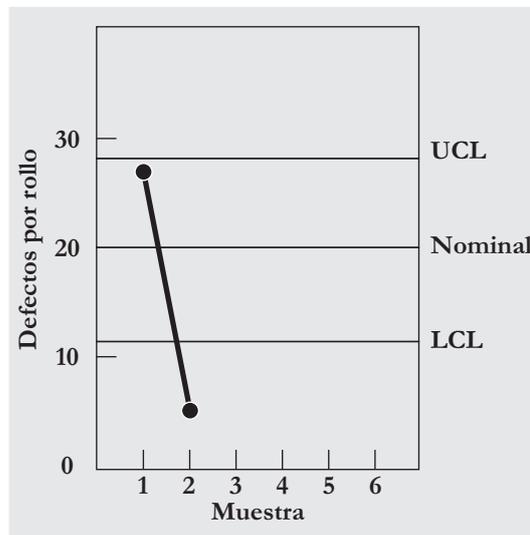


Figura 11.15
Gráfica c de defectos por rollo de papel.

CAPACIDAD DE LOS PROCESOS

Las técnicas de control estadístico de procesos ayudan a los gerentes a realizar y mantener una distribución de procesos que no cambia en lo que se refiere a su media y su varianza. Los acotamientos de control señalan cuándo cambia la media o la variabilidad del proceso. Sin embargo, un proceso que se encuentra bajo control estadístico no siempre genera productos o servicios de acuerdo con sus respectivas especificaciones de diseño porque los acotamientos de control están basados en la media y la variabilidad de la distribución de muestreo, no en las especificaciones de diseño.

La capacidad de proceso se refiere a la capacidad de un proceso para cumplir debidamente las especificaciones de diseño de un producto o servicio dado. Las especificaciones de diseño se expresan a menudo como un valor nominal, u objetivo, y como una tolerancia, o margen aceptable por encima o por debajo del valor nominal. Por ejemplo, las especificaciones de diseño referentes a la vida útil de una lamparita de iluminación pueden indicar un valor nominal de 1000 horas y una tolerancia de +/-200 horas. Esta tolerancia arroja una *especificación superior* de 1200 horas y una *especificación inferior* de 800 horas. El proceso de fabricación de las lamparitas debe ser capaz de producirlas dentro de esas especificaciones de diseño; de lo contrario, habrá cierta proporción de lamparitas defectuosas. A la gerencia le interesa también detectar los casos en que la vida útil de sus lamparitas sobrepasa las 1200 horas, porque al estudiarlos se aprendería tal vez algo que pudiera incorporarse en el futuro al proceso de producción.

La figura 11.16 muestra la relación entre una distribución de procesos y las especificaciones superior e inferior para el proceso de fabricación de lamparitas luminosas, bajo dos condiciones diferentes. En la figura 11.16(a), se dice que el proceso es capaz porque los extremos de la distribución del proceso se encuentran dentro de las especificaciones superior e inferior. En la figura 11.16(b), en cambio, el proceso no es capaz porque produce demasiadas lamparitas de corta vida.

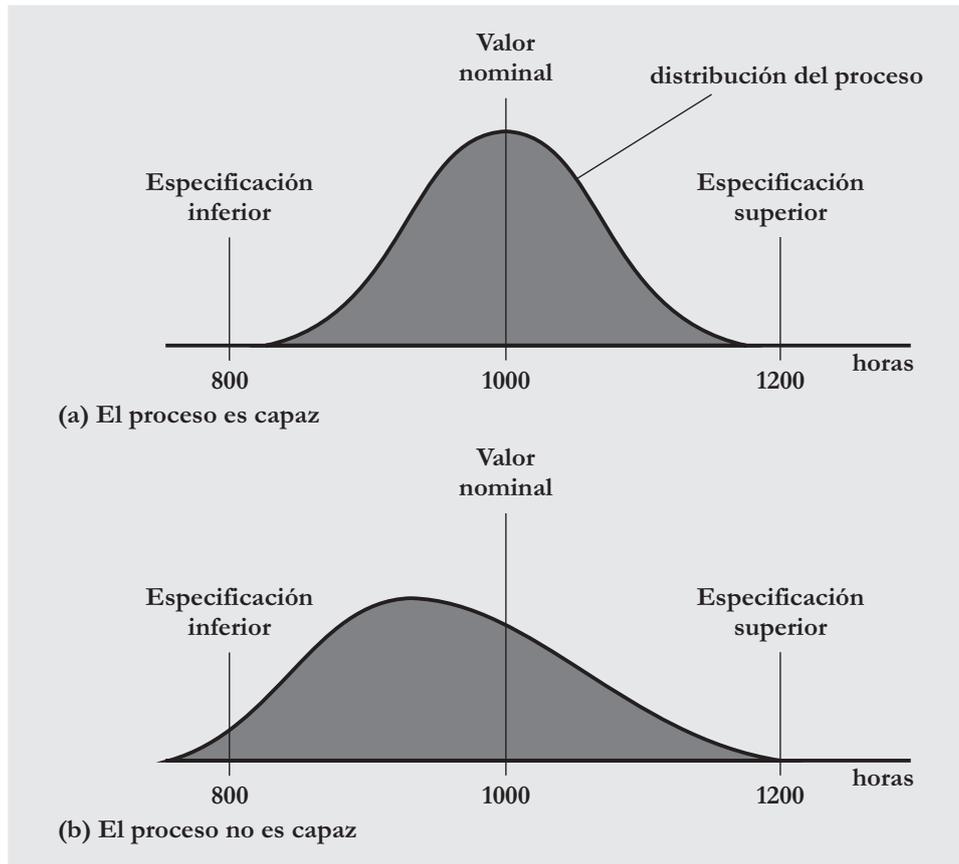


Figura 11.16
Relación entre la distribución de un proceso y las respectivas especificaciones

La figura 11.17 muestra claramente por qué están tan preocupados los gerentes por reducir la variabilidad de los procesos. Cuanto menor sea la variabilidad (representada por desviaciones estándar más bajas), tanto menos frecuente será la producción deficiente.

Esta figura muestra lo que la reducción de la variabilidad significa para una distribución del proceso, que es una distribución de probabilidad normal. La empresa que tiene calidad dos sigma (los límites de tolerancia equivalentes a la media de la distribución del proceso, más o menos dos desviaciones estándar) produce 4,56% de partes defectuosas; es decir, 45.600 partes defectuosas por millón.

La empresa que tiene calidad cuatro sigma produce sólo 0,0063% de defectos; es decir 63 partes defectuosas por millón.

Por último, la empresa con calidad seis sigma produce únicamente 0,0000002% de defectos, es decir, 0,002 partes defectuosas por millón.



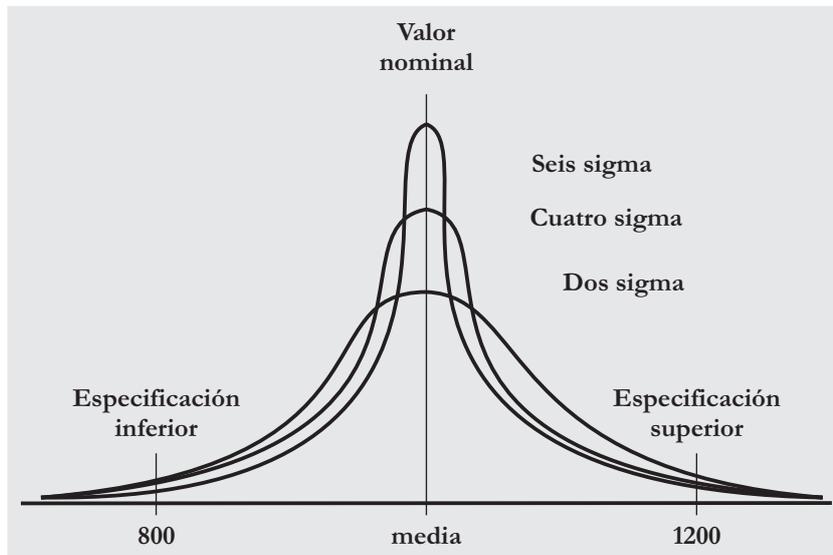


Figura 11.17
Efectos de la disminución de la variabilidad sobre la capacidad de proceso.

¿Cómo puede determinar en términos cuantitativos un gerente si un proceso es suficientemente capaz? En la práctica, se utilizan comúnmente dos medidas para valorar la capacidad de un proceso: la razón de capacidad de proceso y el índice de capacidad de proceso.

Razón de capacidad de proceso. Un proceso es capaz si tiene una distribución cuyos valores extremos se localizan dentro de las especificaciones superior e inferior para un producto o servicio. En términos generales, la mayoría de los valores de una distribución del proceso se encuentra dentro de más o menos tres desviaciones estándar de la media. En otras palabras, el rango de valores de la medición de calidad generados por el proceso es de seis desviaciones estándar aproximadamente. Por lo tanto, si un proceso es capaz, la diferencia entre la especificación superior y la inferior, conocida como amplitud de tolerancia, debe ser mayor que seis desviaciones estándar (variabilidad de proceso). La razón de proceso, C_{pk} , se define como:

$$C_{pk} = \text{Mínimo de} \left[\frac{\bar{x} - \text{Especificación inferior}}{3\delta} ; \frac{\text{Especificación superior} - \bar{x}}{3\delta} \right]$$

Elegimos el valor mínimo de las dos razones porque representa la situación que ocurriría en el peor caso posible. Si C_{pk} es mayor que un valor crítico mayor que 1,0 (digamos 1,33) y la razón de capacidad de proceso es mayor que su valor crítico, podemos afirmar por fin que el proceso es capaz. Si C_{pk} es menor que 1,0, entonces el promedio del proceso se encontrará cerca de alguno de los límites de tolerancia y se estará generando una producción con muchos defectos.

El índice de capacidad será siempre menor o igual que la razón de capacidad. Cuando C_{pk} es igual a la razón de capacidad de proceso, este último está centrado entre las especificaciones superior e inferior, por lo cual la media de la distribución del proceso está centrada en el valor nominal de las especificaciones de diseño.

Ejemplo de evaluación de la capacidad de proceso en el caso de la producción de lamparitas. En el proceso de fabricación de lamparitas de iluminación se producen lámparas con una vida promedio de 900 horas y una desviación estándar de 48 horas. El valor nominal del rango de tolerancia es de 1000 horas, con una especificación superior de 1200 horas y una especificación inferior de 800 horas. El gerente de operaciones desea averiguar si este proceso es capaz de producir las lamparitas de acuerdo con las especificaciones de diseño.

Solución:

A fin de evaluar la capacidad del proceso, calcularemos primero la razón de capacidad de proceso y el índice de capacidad de proceso:

$$C_{pk} = \frac{1200 - 800}{6(48)} = 1,39$$

$$\text{Cálculo de la especificación inferior} = \frac{900 - 800}{3(48)} = 0,69$$

$$\text{Cálculo de la especificación superior} = \frac{1200 - 900}{3(48)} = 2,08$$

$$C_{pk} = \text{Mínimo de } \left[0,69 ; 2,08 \right] = 0,69$$

La razón de capacidad de proceso, con un valor de 1.39, nos indica que la variabilidad observada en la máquina resulta aceptable en relación con el rango de los límites de tolerancia. Sin embargo, el índice de capacidad de proceso indica que la distribución de la producción se encuentra demasiado cerca de la especificación inferior y que, por lo tanto, se producirán lamparitas de corta vida en el proceso. Así pues, el gerente tendrá que buscar la forma de lograr que el promedio del proceso se aproxime más al valor nominal que aparece en las especificaciones de diseño.

PUNTOS RELEVANTES

- La clave para que un producto o servicio satisfaga las especificaciones de diseño consiste en reducir el grado de variabilidad de la producción. Cuando un proceso no se encuentra en un estado de control estadístico, los productos que están sujetos a las causas comunes de variación presentan una distribución de probabilidad estable. Cuando existen causas asignables de variación, el proceso se encuentra fuera de control estadístico. Los métodos de control estadístico de procesos (SPC) se utilizan para detectar la presencia de causas asignables de variación.
- En tres puntos del proceso pueden localizarse instalaciones de inspección: donde se reciben los materiales a su llegada, en puntos seleccionados en el curso del proceso y al final del mismo. En la inspección se observa si los procesos requieren alguna acción correctiva.
- Las gráficas de control estadístico de procesos son útiles para medir la calidad actual generada por el proceso y detectar si éste ha cambiado en detrimento de la calidad. Así, las *gráficas R* se usan para vigilar la variabilidad de los procesos, las *gráficas \bar{x}* y las *gráficas p* detectan las variaciones anormales en el promedio de un proceso, y las *gráficas c* se emplean para controlar el número de defectos cuando un proceso, como parte de un producto o servicio, podría dar por resultado múltiples defectos por unidad de producción. La presencia de variaciones anormales pone en marcha, de inmediato, la búsqueda de causas asignables.
- La variabilidad del proceso debe someterse a control antes de trazar las gráficas de control para el promedio del proceso. La razón de esto es que el rango promedio se usa en el cálculo de los acotamientos de control para las gráficas de control del promedio de un proceso. Las decisiones cruciales en el diseño de gráficas de control son el tamaño de la muestra y los acotamientos de control.
- La línea central de una gráfica de control puede ser el promedio de mediciones de calidad obtenidas en el pasado o un objetivo de la gerencia relacionado con las especificaciones del producto. La expansión de los acotamientos de control afecta las probabilidades de detectar un cambio en el promedio o rango del proceso, y también las probabilidades de buscar causas asignables cuando en realidad no existe ninguna.





- Existe la posibilidad de que un proceso se encuentre bajo control estadístico y que, a pesar de eso, no sea capaz de generar toda su producción dentro de las especificaciones de diseño. La razón de capacidad de proceso y el índice de capacidad de proceso son mediciones cuantitativas que permiten valorar la capacidad de un proceso

TÉRMINOSCLAVE

- Atributos
- Capacidad de proceso
- Causas asignables a la variación
- Causas comunes a la variación
- Control estadístico de procesos (SPC)
- Error “tipo 1”
- Error “tipo 2”
- *Gráfica c*
- Gráfica de control
- *Gráfica p*
- *Gráfica R*
- *Gráfica \bar{x}*
- Índice de capacidad de proceso (C_{pk})
- Ingeniería de calidad
- Muestreo de aceptación
- Razón de capacidad de proceso (C_p)
- Tamaño de la muestra
- Tolerancia
- Valor nominal
- Variables

REFERENCIASBIBLIOGRÁFICAS

- Charbonneay, Harvey C. y Gordon, N.J. *Industrial Quality Certain*. Prentice-Hall. N.J., 1978
- Crosby, P.B. *Quality is Free*. McGraw-Hill. New York, 1979.
- Deming, W.E. *Out of the Crisis*. Center for Advanced Engineering Study. Cambridge, Mass.; MIT. 1986.
- Denton, D.K. *Lessons on Competitiveness: Motorola's Approach*. Production and Inventory Management Journal. Pp. 22-23. 1991.
- Duncan, A.J. *Quality Control and Industrial Statistics*. 5ª ed. Homewood, Ill. Irwin, 1986.
- Grant, E.L. y Leavenworth, R.S. *The Incline of Quality*. Harvard Business Review. Pp. 163-171
- Grant, E.L. y Leavenworth, R.S. *The Incline of Quality*. Harvard Business Review. Pp. 163-171
- Juran, J.M. y Gryna, Jr. F.M. *Quality Planning and Analysis*. 2ª ed. McGraw-Hill. New York. 1980.
- Messina, W.S. *Statistical Quality for Manufacturing Managers*. John Wiley & Sons. New York. 1987.

ANEXOTABLAS

Distribucion Normal										
2	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
0	.5000	.5040	.5080	.5120	.5160	.5199	.5279	.5279	.5319	.5359
.1	.5398	.5478	.5517	.5517	.5557	.5596	.5636	.8675	.5714	.5753
.2	.5793	.5831	.5910	.5910	.5948	.5587	.6026	.6064	.6103	.6141
.3	.6179	.6217	.6293	.6293	.6331	.6368	.6407	.6443	.6480	.6517
.4	.6554	.6591	.6664	.6664	.6736	.6736	.6772	.6808	.6844	.6879
.5	.6915	.6950	.7019	.7019	.7088	.7088	.7123	.7157	.7190	.7224
.6	.7257	.7291	.7357	.7357	.7455	.7455	.7422	.7486	.7517	.7549
.7	.7580	.7611	.7673	.7673	.7734	.7734	.7764	.7794	.7823	.7852
.8	.7881	.7910	.7967	.7967	.8023	.8023	.8051	.8078	.8106	.8133
.9	.8159	.8186	.8238	.8238	.8259	.8289	.8315	.8340	.8365	.8389
1.0	.8416	.8438	.8485	.8485	.8531	.8531	.8554	.8577	.8599	.8621
1.1	.8643	.8665	.8708	.8708	.8749	.8749	.8770	.8790	.8810	.8830
1.2	.8849	.8869	.8907	.8907	.8944	.8944	.8962	.8980	.8997	.9015
1.3	.9032	.9049	.9082	.9082	.9115	.9115	.9131	.9147	.9162	.9177
1.4	.9192	.9207	.9236	.9236	.9265	.9265	.9279	.9292	.9306	.9319
1.5	.9332	.9345	.9370	.9370	.9394	.9394	.9406	.9418	.9429	.9441
1.6	.9452	.9463	.9484	.9484	.9505	.9505	.9515	.9525	.9535	.9545
1.7	.9554	.9564	.9582	.9582	.9599	.9599	.9608	.9616	.9625	.9633
1.8	.9641	.9649	.9664	.9664	.9678	.9678	.9686	.9693	.9699	.9706
1.9	.9713	.9719	.9732	.9732	.9744	.9744	.9750	.9756	.9761	.9767
2.0	.9772	.9778	.9788	.9788	.9798	.9798	.9803	.9808	.9812	.9817
2.1	.9821	.9826	.9834	.9834	.9842	.9842	.9846	.9850	.9854	.9857
2.2	.9861	.9864	.9871	.9871	.9878	.9878	.9881	.9884	.9887	.9890
2.3	.9893	.9896	.9901	.9901	.9906	.9906	.9909	.9911	.9913	.9916
2.4	.9918	.9920	.9925	.9925	.9929	.9929	.9931	.9932	.9934	.9936
2.5	.9938	.9940	.9943	.9943	.9946	.9946	.9948	.9949	.9951	.9952
2.6	.9953	.9955	.9957	.9957	.9960	.9960	.9961	.9962	.9963	.9964
2.7	.9965	.9966	.9968	.9968	.9970	.9970	.9971	.9972	.9973	.9974
2.8	.9974	.9975	.9977	.9977	.9978	.9978	.9979	.9979	.9980	.9981
2.9	.9981	.9982	.9983	.9983	.9984	.9984	.9985	.9985	.9986	.9986
3.0	.9987	.9987	.9988	.9988	.9989	.9989	.9989	.9989	.9990	.9990
3.1	.9990	.9991	.9991	.9991	.9992	.9992	.9992	.9992	.9993	.9993
3.2	.9993	.9993	.9994	.9994	.9994	.9994	.9994	.9994	.9995	.9995
3.3	.9995	.9995	.9996	.9996	.9996	.9996	.9996	.9996	.9996	.9997

