

capítulo

CALIDAD SIX-SIGMA

308 Administración por calidad total

*Definición de administración por calidad total
Definición del Premio Nacional a la Calidad Malcolm Baldrige*

310 Especificación y costos de la calidad

Desarrollo de las especificaciones de la calidad *Definición de calidad del diseño*
Costo de la calidad *Definición de conformidad con la calidad*
Funciones del departamento *Definición de calidad en el origen*
de control de calidad *Definición de dimensiones de la calidad*
Definición de costo de la calidad

313 Calidad Six-Sigma

Metodología Six-Sigma *Definición de Six-Sigma*
Herramientas analíticas para Six-Sigma *Definición de DPMO*
y el mejoramiento continuo *Definición de DMAIC*
Funciones y responsabilidades en Six-Sigma *Definición de ciclo PDCA*
Definición de mejoramiento continuo
Definición de kaizen
Definición de Six-Sigma esbelta
Definición de cintas negras, cintas negras maestros y cintas verdes

319 Sistema Shingo: diseño de fallo y seguro

Definición de procedimientos de fallo y seguro
Definición de poka-yoke

320 ISO 9000 e ISO 14000

Definición de ISO 9000

322 Indicadores de referencia externos de mejora de la calidad

Definición de indicadores de referencia externos

322 Conclusión

324 Caso: Hank Kolb, director de Aseguramiento de la calidad

326 Caso: Investigación valorativa: otra clase de espina de pescado

9

General Electric (GE) ha sido promotor importante de Six-Sigma durante 10 años. Jack Welch, el legendario y ahora retirado CEO, declaró que “el gran mito es que Six-Sigma se refiere al control de calidad y las estadísticas. Es mucho más que eso. Finalmente, conduce a que el liderazgo sea mejor porque proporciona herramientas para analizar los temas difíciles. La idea fundamental de Six-Sigma es imponer un giro completo a una compañía, enfocar la organización hacia afuera, en el cliente”. El compromiso de calidad de GE se centra en Six-Sigma. En el sitio de Internet de GE se define Six-Sigma de la siguiente manera:

Primero: ¿Qué es Six-Sigma? Antes veamos lo que no es. No se trata de una sociedad secreta, lema ni cliché. Six-Sigma es un proceso sumamente disciplinado que ayuda a enfocarse en el desarrollo y entrega de productos y servicios casi perfectos. ¿Por qué “Sigma”? La palabra es un término estadístico que mide qué tanto se desvía un proceso de la perfección. La idea central detrás de Six-Sigma es que si se puede medir cuántos “defectos” hay en un proceso, se puede saber sistemáticamente cómo eliminarlos y acercarse lo más posible a la marca de “cero defectos”. Para lograr la calidad de los Six-Sigma, un



proceso debe producir no más de 3.4 defectos por millón de oportunidades. Una “oportunidad” se define como una probabilidad de no conformidad o de no cumplir con las especificaciones requeridas. Lo anterior significa que casi no se deben tener errores en la ejecución de los principales procesos.

Fundamentalmente, Six-Sigma gira en torno a unos cuantos conceptos clave.

| | |
|---------------------------------|---|
| Crítico para la calidad: | Los atributos más importantes para el cliente |
| Defecto: | No cumplir con lo que quiere el cliente |
| Capacidad del proceso: | Lo que ofrece el proceso |
| Variación: | Lo que el cliente percibe y considera |
| Operaciones estables: | Garantizar procesos congruentes y predecibles para mejorar lo que ve y considera el cliente |
| Diseño para Six-Sigma: | Diseño para cumplir con las necesidades del cliente y la capacidad del proceso → |

En este capítulo, se hará un repaso del tema en general de la administración por calidad total, TQM, y el movimiento de la calidad. Después se presentan las características y conceptos básicos del planteamiento de Six-Sigma para la TQM. Luego se describe el sistema Shingo, que tiene un planteamiento único para la calidad al enfocarse en la prevención de errores. A continuación se hará un repaso de las normas para certificación de calidad ISO 9000 y 14000 que usan muchas compañías en el mundo. Por último, se proporcionan los principales pasos del análisis de los indicadores de referencia externos para mejorar la calidad.

ADMINISTRACIÓN POR CALIDAD TOTAL

Administración por calidad total

La **administración por calidad total** se puede definir como “la administración de toda la organización de modo que sobresalga en todas las dimensiones de productos y servicios que son importantes para el cliente”. Principalmente, tiene dos objetivos operacionales fundamentales.

1. Diseño cuidadoso del producto o servicio.
2. Garantizar que los sistemas de la organización pueden producir consistentemente el diseño.

Estos dos objetivos sólo se logran si toda la organización está orientada a los mismos, de ahí el término de administración por calidad *total*. En la década de 1980, la TQM se tornó en una preocupación nacional en Estados Unidos principalmente en respuesta a la superioridad japonesa en la calidad de fabricación automotriz y otros bienes perdurables como equipos de aire acondicionado para habitaciones. Un estudio ampliamente citado de fabricantes de estos equipos de Japón y Estados Unidos demostró que los productos estadounidenses de mejor calidad tenían tasas de defectos promedio *superiores* a los de los fabricantes japoneses más deficientes.¹ Era tal la desventaja de calidad en Estados Unidos que la prioridad nacional fue mejorar la calidad de toda la industria y el Departamento de Comercio estableció en 1987 el **Premio Nacional a la Calidad Malcolm Baldrige** para ayudar a que las compañías revisaran y estructuraran sus programas de calidad. En esa época también adquirió importancia el requisito de que

Premio Nacional a la Calidad Malcolm Baldrige

I N N O V A C I Ó N

PREMIO NACIONAL A LA CALIDAD MALCOLM BALDRIGE

El premio se otorga a organizaciones que han demostrado una calidad sobresaliente en sus productos y procesos. Se pueden otorgar tres premios al año en cada una de las siguientes categorías: manufactura, servicio, pequeña empresa, educación, atención médica y no lucrativa.

Los solicitantes del premio deben enviar una petición de 50 páginas o menos que detalle los procesos y resultados de sus actividades bajo siete categorías importantes: Liderazgo; planeación estratégica; enfoque al cliente y mercado; administración de medidas, análisis y conocimientos; enfoque en la mano de obra; gestión del proceso; y resultados. El Consejo de examinadores y jueces de Baldrige califican las solicitudes sobre un total de 1 000 puntos. Las solicitudes de puntuación alta son elegidas para visitas en el sitio y de este grupo se selecciona a los que reciben el premio. Normalmente el presidente de Estados Unidos presenta los premios durante una ceremonia especial en Washington, DC. Un beneficio importante para los solicitantes es el informe de retroalimentación que preparan los examinadores con base en sus procesos y prácticas. Mu-

chos estados han usado los criterios Baldrige como base para sus programas de calidad. Un informe del Consejo privado de Competitividad, *Building on Baldrige: American Quality for the 21st Century*, indica, “Más que cualquier otro programa, el Premio a la Calidad Baldrige tiene la responsabilidad de hacer de la calidad una prioridad nacional y difundir las mejores prácticas a todo Estados Unidos”.



ilustración 9.1

Comparación de los gurúes de calidad

| | CROSBY | DEMING | JURAN |
|---|---|--|--|
| Definición de calidad | Conformidad con los requisitos | Un grado predecible de uniformidad y dependencia a un costo bajo y adecuado para el mercado | Idoneidad de uso (satisface las necesidades del cliente) |
| Grado de responsabilidad de la alta dirección | Responsable de la calidad | Responsable del 94% de los problemas de calidad | Menos del 20% de los problemas de calidad se deben a los trabajadores |
| Estándar de desempeño/motivación | Cero defectos | La calidad tiene muchas "escalas"; uso de estadísticas para medir el desempeño de todas las áreas; crítico de cero defectos | Evitar campañas para hacer un trabajo perfecto |
| Planteamiento general | Prevención, no inspección | Reducir la capacidad de variación según el mejoramiento continuo; suspensión de la inspección en masa | Planteamiento general de administración de la calidad; en especial los elementos humanos |
| Estructura | 14 pasos para el mejoramiento de la calidad | 14 puntos para la administración | 10 pasos al mejoramiento de la calidad |
| Control estadístico del proceso (CEP) | Niveles de calidad de rechazos estadísticamente aceptables [se quiere el 100% de calidad perfecta] | Se deben usar métodos estadísticos de control de calidad | Recomienda el CEP pero advierte que puede conducir a un planteamiento con herramientas |
| Base de mejoramiento | Un proceso, no un programa; metas de mejoramiento | Continuo para reducir la variación; eliminar metas sin métodos | Planteamiento de equipo por proyecto; establecer metas |
| Trabajo en equipo | Equipos de mejoramiento de calidad; consejos de calidad | Participación de los empleados en la toma de decisiones; deshacer los obstáculos entre departamentos | Planteamiento de equipo y círculo de calidad |
| Costos de la calidad | Costo de no conformidad; la calidad es gratis | Menos que óptimo; mejoramiento continuo | La calidad no es gratis, no hay un punto mejor |
| Compra y bienes recibidos | Requisitos del estado; el proveedor es la extensión de la empresa; la mayoría de las fallas se debe a los compradores | Inspección demasiado tarde; el muestreo permite que los defectos entren en el sistema; se requiere evidencia estadística y gráficas de control | Los problemas son complejos; se realizan encuestas formales |
| Calificación del vendedor | Sí; las auditorías de calidad son inútiles | No, es crítico de la mayoría de los sistemas | Sí, pero se debe ayudar a que el proveedor mejore |

los proveedores demostraran que midieran y documentaran sus prácticas de calidad de conformidad con criterios específicos, llamados estándares ISO, si es que querían competir por contratos internacionales. Más adelante se retomará el tema.

Los líderes filosóficos del movimiento de calidad, principalmente Philip Crosby, W. Edwards Deming y Joseph M. Juran, los llamados gurúes de la calidad, han definido qué es calidad y cómo lograrla en una manera ligeramente diferente (véase ilustración 9.1), aunque todos transmiten el mismo mensaje: Para lograr una calidad sobresaliente se requiere liderazgo de calidad de la alta dirección, enfoque en el cliente, participación total en la fuerza laboral y mejoramiento continuo basado en un análisis riguroso de los procesos. Más adelante en el capítulo se analizará la forma en que se aplican estos preceptos en el planteamiento más reciente de TQM: Six-Sigma. Por ahora, se estudiarán algunos conceptos fundamentales implícitos en cualquier esfuerzo de calidad: especificaciones de calidad y costos de calidad.

ESPECIFICACIÓN Y COSTOS DE LA CALIDAD

Para cualquier programa de calidad es fundamental la determinación de las especificaciones y costos de calidad para lograr (o *no*) dichas especificaciones.

DESARROLLO DE LAS ESPECIFICACIONES DE LA CALIDAD

Calidad del diseño

Las especificaciones de calidad de un producto o servicio se derivan de las decisiones y acciones tomadas en relación con la calidad de su diseño y conformidad a ese diseño. **Calidad del diseño** se refiere al valor inherente del producto en el mercado y, por consiguiente, es una decisión estratégica para la empresa. Las dimensiones de calidad se presentan en la ilustración 9.2. Estas dimensiones se refieren a las características del producto o servicio relacionadas directamente con los aspectos de diseño. Una empresa diseña un producto o servicio para atender la necesidad de un mercado en particular.

Una empresa diseña un producto o servicio con ciertas características de desempeño basadas en lo que espera el mercado de intención. Los materiales y atributos de los procesos de manufactura pueden influir en gran medida en la confiabilidad y durabilidad de un producto. En este caso, la compañía intenta diseñar un producto o servicio que pueda fabricarse o venderse a un costo razonable. La capacidad de servicio del producto puede tener un fuerte impacto en el costo del producto o servicio al cliente una vez realizada la compra inicial. De igual forma, a la compañía le puede afectar la garantía y el costo de reparación. La estética puede influir en gran medida sobre el deseo de adquirir un producto o servicio, en particular en productos al consumidor. Especialmente cuando está implicado un nombre de marca, el diseño con frecuencia representa la siguiente generación de un flujo constante de productos o servicios. Por ejemplo, la consistencia en el desempeño relativo del producto en comparación con la tecnología de punta puede ser una gran influencia en la forma de percibir la calidad del producto. Lo anterior puede ser muy importante para el éxito a largo plazo del producto o servicio.

Conformidad con la calidad

Conformidad con la calidad se refiere al grado al que se cumplen las especificaciones del producto o servicio. Las actividades implicadas en lograr la conformidad son de naturaleza táctica y diaria. Debe haber evidencia de que un producto o servicio puede tener una alta calidad de diseño pero una baja conformidad con la calidad y viceversa.

Calidad en el origen

Calidad en el origen con frecuencia se analiza en el contexto de la conformidad con la calidad. Lo anterior significa que la persona que hace el trabajo tiene la responsabilidad de ver que se cumplen las especificaciones. Si está implicado un producto, normalmente es responsabilidad de la gerencia de manufactura lograr las especificaciones de calidad; en el caso de una empresa de servicios, la responsabilidad por lo general es de la gerencia de operaciones de la sucursal. En la ilustración 9.3 se presentan dos ejemplos de las **dimensiones de la calidad**. Uno de ellos es una impresora láser que cumple con los estándares de páginas por minuto y densidad de impresión; el segundo es la transacción de una cuenta de cheques en un banco.

Dimensiones de la calidad

Tanto la calidad del diseño y la conformidad con la calidad deben ofrecer productos que cumplan con los objetivos del cliente de esos productos. Con frecuencia se emplea el término *idoneidad de uso* del producto y pretende identificar las dimensiones del producto (o servicio) que el cliente quiere (es decir, la voz del cliente) y generar un programa de control de calidad que garantice el cumplimiento de dichas dimensiones.

Ilustración 9.2

Las dimensiones de la calidad del diseño

| DIMENSIÓN | SIGNIFICADO |
|---------------------------|---|
| Desempeño | Características principales del producto o servicio |
| Características | Detalles, campanas y silbatos adicionales, características secundarias |
| Confiabilidad/durabilidad | Congruencia del desempeño con el tiempo, probabilidad de falla, vida útil |
| Capacidad de servicio | Facilidad de reparación |
| Estética | Características sensoriales (sonido, sensación, vista, etcétera) |
| Calidad percibida | Desempeño anterior y reputación |

ilustración 9.3

Ejemplos de dimensiones de la calidad

| DIMENSIÓN | MEDIDAS | |
|-------------------------------|---|---|
| | EJEMPLO DE PRODUCTO: IMPRESORA LÁSER | EJEMPLO DE SERVICIO: CUENTA DE CHEQUES EN UN BANCO |
| Desempeño | Páginas por minuto Densidad de impresión | Tiempo para procesar las solicitudes del cliente |
| Características | Múltiples bandejas de papel Capacidad de color | Pago automático de cuentas |
| Confiabilidad/ durabilidad | Tiempo promedio entre fallas Tiempo estimado de obsolescencia Vida esperada de principales componentes | Capacidad de variación en el tiempo para procesar las solicitudes Ir conforme a las tendencias de la industria |
| Capacidad de servicio | Disponibilidad de centros de servicio autorizados Número de copias por cartucho de impresión Diseño modular | Informes en línea Facilidad para obtener información actualizada |
| Estética | Disposición del botón de control Estilo de la caja Amabilidad del distribuidor | Aspecto de la recepción del banco Amabilidad del cajero |
| Calidad percibida | Identificación del nombre de marca Calificación en <i>Consumer Reports</i> | Respaldado por líderes de la comunidad |

COSTO DE LA CALIDAD

Aun cuando pocos pueden discrepar sobre la noción de prevención, la gerencia a menudo necesita cifras sólidas para determinar el costo de las actividades de prevención. Joseph Juran identifica este aspecto en su *Quality Control Handbook* (Manual de control de calidad) que escribió en 1951. Hoy en día, los análisis de **costo de la calidad (CC)** son comunes en la industria y constituyen una de las principales funciones del departamento de control de calidad.

Existen muchas definiciones e interpretaciones del término *costo de la calidad*. Desde el punto de vista purista, significa todos los costos atribuibles a la producción de calidad que no es 100% perfecta. Una definición menos estricta sólo considera los costos que son la diferencia entre lo que se espera de un desempeño excelente y los costos actuales.

¿Qué tan importante es el costo de la calidad? Se ha estimado entre 15 y 20% de cada dólar de venta, es decir, el costo del retrabajo, desperdicio, servicio repetido, inspecciones, pruebas, garantías y otros elementos relacionados con la calidad. Philip Crosby establece que el costo correcto de un programa de gestión de calidad bien dirigido debe ser inferior a 2.5%.²

Tres suposiciones básicas justifican un análisis de los costos de la calidad: 1) las fallas son provocadas, 2) la prevención es más barata y 3) se puede medir el desempeño.

Generalmente, los costos de la calidad se clasifican en cuatro tipos:

1. **Costos de evaluación.** Los costos de la inspección, pruebas y demás tareas que garantizan que el producto o proceso sea aceptable.
2. **Costos de prevención.** La suma de todos los costos para prevenir defectos como los costos de identificar la causa del defecto, poner en práctica la medida correctiva para eliminar la causa, capacitar al personal, rediseñar el producto o sistema y comprar equipo nuevo o realizar modificaciones.

Costo de la calidad (CC)



Un socio de Goodyear inspecciona una llanta radial en la fábrica de Sao Paulo, Brasil, antes de montarla en la rueda. Goodyear practica inspecciones visuales e internas de las llantas, incluso saca llantas de la línea de producción para pasarlas por rayos X. Los ingenieros de control de calidad cortan al azar periódicamente ciertas llantas para estudiar varios detalles que puedan afectar el rendimiento, el viaje o la seguridad.

ilustración 9.4

Informe de costos de calidad

| | COSTOS DEL MES ACTUAL | PORCENTAJE DEL TOTAL |
|--|-----------------------|----------------------|
| Costos de prevención | | |
| Capacitación de calidad | \$2 000 | 1.3% |
| Asesoría en confiabilidad | 10 000 | 6.5 |
| Corridas de producción piloto | 5 000 | 3.3 |
| Desarrollo de sistemas | 8 000 | 5.2 |
| Total de prevención | <u>25 000</u> | <u>16.3</u> |
| Costos de evaluación | | |
| Inspección de materiales | 6 000 | 3.9 |
| Inspección de suministros | 3 000 | 2.0 |
| Pruebas de confiabilidad | 5 000 | 3.3 |
| Pruebas de laboratorio | 25 000 | 16.3 |
| Total de evaluación | <u>39 000</u> | <u>25.5</u> |
| Costos de falla interna | | |
| Desperdicio | 15 000 | 9.8 |
| Reparación | 18 000 | 11.8 |
| Retrabajo | 12 000 | 7.8 |
| Tiempo muerto | 6 000 | 3.9 |
| Total de falla interna | <u>51 000</u> | <u>33.3</u> |
| Costos de falla externa | | |
| Costos de garantía | 14 000 | 9.2 |
| Reparaciones y reemplazo fuera de garantía | 6 000 | 3.9 |
| Quejas del cliente | 3 000 | 2.0 |
| Responsabilidad del producto | 10 000 | 6.5 |
| Pérdidas de transporte | 5 000 | 3.3 |
| Total de falla externa | <u>38 000</u> | <u>24.9</u> |
| Total de costos de calidad | <u>\$153 000</u> | <u>100.0</u> |

3. **Costos de falla interna.** Costos por defectos en los que se incurrió dentro del sistema: desperdicio, retrabajo, reparación.
4. **Costos de falla externa.** Costos por defectos que pasan el sistema: reemplazos por garantía al cliente, pérdida de los clientes o buena voluntad, manejo de quejas y reparación del producto.

En la ilustración 9.4 se muestra el tipo de informe que podría presentarse con los diversos costos por categorías. La prevención es la de mayor influencia. El método práctico dice que por cada dólar que gaste en la prevención, puede ahorrar hasta 10 dólares en costos de falla y evaluación.

Con frecuencia el incremento en la productividad se presenta como una consecuencia de los esfuerzos por reducir el costo de la calidad. Por ejemplo, un banco estableció mejorar la calidad y reducir el costo de la calidad y descubrió que también había impulsado la productividad. El banco desarrolló esta medida de productividad para el área de procesamiento de préstamos: el número de boletas procesadas entre los recursos requeridos (costo de mano de obra, tiempo en la computadora, formas de las boletas). Antes del programa de mejoramiento de la calidad, el índice de productividad era de 0.2660 [2 080/(\$11.23 × 640 horas + \$0.05 × 2 600 formas + \$500 para costos de sistemas)]. Después de haber terminado el proyecto de mejoramiento de la calidad, el tiempo de mano de obra bajó a 546 horas y el número de formas subió a 2 100, reflejado en un cambio en el índice de 0.3088, un incremento en la productividad del 16 por ciento.



Servicio

FUNCIONES DEL DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD

Aunque este capítulo se centra en los programas de calidad corporativa, es conveniente comentar las funciones de los departamentos de control de calidad.

I N N O V A C I Ó N

J. D. POWER Y ASOCIADOS REDEFINE LA CALIDAD

J. D. Power y Asociados, la organización de vigilancia que se consagra a dar a los consumidores datos de calidad de productos y satisfacción de los clientes, redefinió recientemente su "Estudio inicial de calidad" de manera semejante a lo que se ha dicho en esta sección. El estudio, orientado a la compra de autos nuevos, acepta que la tecnología integrada en el diseño general de un vehículo nuevo es tan importante como los defectos y las fallas, cuando se trata de determinar la calidad. El estudio está diseñado para detectar problemas que tienen los nuevos propietarios en dos categorías:

La *calidad de la producción* abarca problemas que causan una descompostura completa o mal funcionamiento de cualquier componente, característica o accesorio, incluyendo los que dejan de trabajar o piezas sueltas que se rompen o se aflojan. Aquí se incluye:

- Calidad de la manufactura mecánica: basada en problemas del motor o la transmisión, así como problemas que afectan la experiencia de manejo, como el tirón de los frenos, ruidos raros o vibraciones.
- Calidad de la manufactura de carrocería e interiores: basada en problemas de ruido del viento, escurrimientos,

accesorios y acabados malos, imperfección de la pintura y cascabeleos.

- Calidad de la manufactura de características y accesorios: basada en problemas con los asientos, limpiaparabrisas, sistema de navegación, sistema de entretenimiento para el asiento posterior, calefacción y acondicionador de aire, sistema estereofónico, quemacocos y computadora de viaje.

El *diseño de calidad* se ocupa de situaciones en las que controles o características funcionan como se diseñaron, pero son difíciles de usar o entender. Aquí se incluyen:

- Calidad del diseño mecánico: basada en problemas con el motor o la transmisión y los que afectan la experiencia de manejo, como viaje amortiguado, suavidad de la dirección y los frenos, manejo y estabilidad.
- Calidad de diseño de carrocería e interiores: basada en problemas con el diseño delantero y posterior, apariencia de interiores y exteriores y el sonido de las puertas cuando cierran.
- Calidad de diseño de características y accesorios: basada en problemas con los asientos, estereofónico o sistema de navegación, calentador, acondicionador de aire y quemacocos.

Adaptado de "J. D. Power and Associates' Study Redefines Quality", *The McGraw-Hill Companies Employee Newsletter* 19, núm. 6 (junio de 2006).

El departamento típico de control de calidad de manufactura tiene que realizar varias funciones, como probar la confiabilidad de los diseños en laboratorio y en campo, reunir datos sobre el rendimiento de los productos en el campo y resolver problemas de calidad; planear y presupuestar el programa de control de calidad de la planta y, por último, diseñar y supervisar los sistemas de control de calidad y los procedimientos de inspección y, de hecho, realizar la inspección de las actividades que requieren conocimientos técnicos especiales para cumplirse. Las herramientas del departamento de control de calidad se agrupan bajo el encabezado de control estadístico de la calidad y constan de dos secciones principales: muestreo para aceptación y control de procesos. En el capítulo 9A se tratarán estos temas.

CALIDAD SIX-SIGMA

Six-Sigma se refiere a la filosofía y los métodos que usan compañías como General Electric y Motorola para eliminar defectos en sus productos y procesos. Un defecto simplemente es cualquier componente que no se encuentra dentro de las especificaciones de los clientes. Cada paso o actividad de una compañía representa una posibilidad de que ocurran defectos y con los programas de Six-Sigma se trata de reducir la variación de los procesos que generan estos efectos. De hecho, Six-Sigma propone que se consideren las variaciones como el enemigo de la calidad y gran parte de la teoría en que se basa Six-Sigma se dedica a abordar este problema. Un proceso que está en control de Six-Sigma producirá no más de dos defectos por millón de unidades. Muchas veces se indica como cuatro defectos por millón de unidades, que es cierto si el proceso transcurre a menos de un sigma de la especificación deseada.

Una de las ventajas del pensamiento de Six-Sigma es que los gerentes pueden describir fácilmente el desempeño de un proceso en términos de su variabilidad y comparar varios procesos usando una

Six-Sigma

Defectos por millón de oportunidades (DPMO)

medida común. Esta medida es: **defectos por millón de oportunidades (DPMO)**. El cálculo requiere tres datos:

1. **Unidad.** El artículo producido o el servicio prestado.
2. **Defecto.** Cualquier artículo o suceso que no cumpla con los requisitos del cliente.
3. **Oportunidad.** Posibilidad de que ocurra un defecto.

Para un cálculo directo, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{DPMO} = \frac{\text{Número de defectos}}{\text{Número de oportunidades de error por unidad} \times \text{número de unidades} \times 1\,000\,000}$$

EJEMPLO 9.1

Los clientes de un banco hipotecario esperan que sus solicitudes de hipotecas se procesen a los 10 días de presentadas. En términos de Six-Sigma, esto se llamaría un *requisito crítico de los clientes* (CCR: *critical customer requirement*). Si se contaran todos los defectos (préstamos de una muestra mensual que tardan más de 10 días en tramitarse) y se determinara que 150 préstamos de 1 000 solicitudes procesadas el mes pasado no cumplen el requisito de los clientes, entonces los $\text{DPMO} = 150/1\,000 \times 1\,000\,000$ o 150 000 préstamos de cada millón procesados no cumplen un CCR. Dicho de otra manera, significa que sólo 850 000 préstamos de cada millón se aprueban en el tiempo esperado. Estadísticamente, 15% de los préstamos son defectuosos y 85% están correctos. Se trata de un caso en el que todos los préstamos procesados en menos de 10 días cumplen los criterios. Muchas veces hay requisitos superiores e inferiores de los clientes, y no sólo un requisito superior, como se hizo aquí. ●

Los programas de Six-Sigma tienen dos aspectos: el lado metodológico y el lado de la gente, que aquí se verán en ese orden.

METODOLOGÍA SIX-SIGMA

Mientras que los métodos de Six-Sigma incluyen muchas herramientas estadísticas que se empleaban en otros movimientos por la calidad, aquí se aplican de manera sistemática y enfocadas en los proyectos, mediante el ciclo de definir, medir, analizar, incrementar y controlar (**DMAIC**). El ciclo DMAIC es una versión más detallada del **ciclo PDCA** de Deming, que consta de cuatro pasos: planear, desarrollar, comprobar y actuar, que son la base del **mejoramiento continuo** (el mejoramiento continuo, también conocido como **kaizen**, busca mejorar constantemente maquinaria, materiales, utilización de mano de obra y métodos de producción a través de la aplicación de sugerencias e ideas de los equipos de la compañía). Como Six-Sigma, también subraya el método científico, particularmente la comprobación de hipótesis sobre la relación entre insumos (las x) y productos (las y) de los procesos usando diseño de métodos de experimentos (DOE: *design of experiments*). La disponibilidad de modernos programas de cómputo para estadística ha reducido el laborioso trabajo de analizar y desplegar los datos y ahora es parte de las herramientas de Six-Sigma. Pero el objetivo general de la metodología es entender y lograr lo que quiere el cliente, ya que se considera la clave para la rentabilidad de un proceso de producción. De hecho, para recalcar el punto, algunos dicen que DMAIC significa “Directores Menos Ignoran A los Clientes”.

El planteamiento común de los proyectos de Six-Sigma es la metodología DMAIC desarrollada por General Electric, como se describe a continuación:³

1. Definir (D)
 - Identificar a los clientes y sus prioridades.
 - Identificar un proyecto adecuado para los esfuerzos de Six-Sigma basado en los objetivos de la empresa, así como en las necesidades y retroalimentación de los clientes.
 - Identificar las características cruciales para la calidad (CTQ: *critical to quality*) que el cliente considera que influyen más en la calidad.
2. Medir (M)
 - Determinar cómo medir el proceso y cómo se ejecuta.
 - Identificar los procesos internos claves que influyen en las características cruciales para la calidad y medir los defectos que se generan actualmente en relación con esos procesos.
3. Analizar (A)

DMAIC

Ciclo PDCA

Mejoramiento continuo

Kaizen

- Determinar las causas más probables de los defectos.
 - Entender por qué se generan los defectos identificando las variables clave que tienen más probabilidades de producir variaciones en los procesos.
4. Incrementar (I)
 - Identificar los medios para eliminar las causas de los defectos.
 - Confirmar las variables clave y cuantificar sus efectos en las características cruciales para la calidad.
 - Identificar los márgenes máximos de aceptación de las variables clave y un sistema para medir las desviaciones de dichas variables.
 - Modificar los procesos para estar dentro de los límites apropiados.
 5. Control (C)
 - Determinar cómo mantener las mejoras.
 - Fijar herramientas para que las variables clave se mantengan dentro de los límites máximos de aceptación en el proceso modificado.

HERRAMIENTAS ANALÍTICAS PARA SIX-SIGMA Y EL MEJORAMIENTO CONTINUO

Las herramientas analíticas para Six-Sigma se usan desde hace muchos años en los programas tradicionales de mejora de la calidad. Lo que las hace únicas en su aplicación de Six-Sigma es la integración de estas herramientas en un sistema de administración corporativa. Las herramientas comunes de todas las iniciativas de calidad, incluyendo Six-Sigma, son diagramas de flujos, gráficas de corridas, gráficas de Pareto, histogramas, formas de comprobación, diagramas de causas y efectos, y gráficas de control. En la ilustración 9.5 se presentan ejemplos de lo anterior, junto con el diagrama de flujos de oportunidades, ordenado según las categorías DMAIC, en el que normalmente aparecen.

Diagramas de flujo. Hay muchos tipos de diagramas de flujo. El que se muestra en la ilustración 9.5 representa los pasos del proceso como parte del análisis de SIPOC (suministrador, insumo, proceso, obra, cliente). Básicamente, SIPOC es un modelo formalizado de insumos y productos, que se usa para definir las etapas de un proyecto.

Gráficas de corridas. Representan tendencias de los datos al paso del tiempo y, por eso, ayudan a entender la magnitud de un problema en la etapa de definición. Por lo común grafican la mediana de un proceso.

Gráficas de Pareto. Estas gráficas desglosan un problema en las contribuciones relativas de sus componentes. Se basan en el resultado empírico común de que un gran porcentaje de los problemas se deben a un pequeño porcentaje de causas. En el ejemplo, 80% de las quejas de los clientes se deben a entregas demoradas, que son 20% de las causas anotadas.

Formas de comprobación. Son formas básicas que sirven para uniformar el acopio de datos. Sirven para crear histogramas como se muestra en las gráficas de Pareto.

Diagrama de causas y efectos. También llamados *diagramas de espina de pescado*, muestran las relaciones propuestas hipotéticamente entre causas potenciales y el problema que se estudia. Cuando se tiene un diagrama de causas y efectos, procedería el análisis para averiguar cuál de las causas potenciales contribuía al problema.

Diagrama de flujo de oportunidades. Se usa para discernir en un proceso los pasos que agregan valor de los que no lo agregan.

Gráficas de control. Se trata de gráficas de series temporales que muestran los valores graficados de una estadística, incluyendo un promedio central y uno o más límites de control. Aquí se usa para asegurarse de que los cambios introducidos están en control estadístico. Véase en el capítulo 9A una exposición de los tipos y usos de gráficas para el control de procesos.

Otras herramientas que tienen un uso extenso en los proyectos de Six-Sigma son modo de falla y análisis de efectos (FMEA: *Failure Mode and Effect Analysis*) y diseño de experimentos (DOE).

Modo de falla y análisis de efectos. Se trata de un método estructurado para identificar, calcular, conferir prioridades y evaluar el riesgo de posibles fallas en cada etapa de un proceso. Comienza por identificar cada elemento, montaje o parte del proceso y anotar los modos posibles de fallo, causas potenciales y efectos de cada falla. Para cada modo de falla se calcula un número de prioridad de riesgo (RPN: *Risk Priority Number*). Es un índice usado para medir el orden de importancia de los elementos anotados en la gráfica FMEA. Véase la ilustración 9.6. Estas condiciones incluyen la probabilidad de que suceda el fallo (ocurrencia), el daño que resulte del fallo (gravedad) y la probabili-

ilustración 9.5

Herramientas analíticas para Six-Sigma y mejoramiento continuo

Definir

Diagrama de los principales pasos de un proceso*

| PROVEEDORES | INSUMOS | PROCESOS | PRODUCTOS | CLIENTES |
|-------------------|--------------|---------------------|-----------|------------|
| Fabricante | Copiadora | | Copias | Usted |
| Compañía papelera | Papel | | | Expediente |
| | Tinta | Sacar una fotocopia | | Otros |
| Ustedes | Original | | | |
| Compañía de luz | Electricidad | | | |

PASOS DEL PROCESO

```

    graph LR
    A[Poner original sobre cristal] --> B[Bajar tapa]
    B --> C[Ajustar medidas]
    C --> D[Oprimir INICIO]
    D --> E[Retirar original y copias]
    
```

Gráfica de corridas**
Volumen promedio mensual de entregas (por tienda)

| Mes | Volumen promedio mensual de entregas |
|-----|--------------------------------------|
| Ene | 900 |
| Feb | 1200 |
| Mar | 1500 |
| Abr | 1800 |
| May | 1951 |
| Jun | 2400 |
| Jul | 2350 |
| Ago | 2250 |
| Sep | 2150 |
| Oct | 2100 |
| Nov | 2050 |
| Dic | 2100 |

FORMAS DE VACIADO DE DATOS*
Los formatos de verificación son formas básicas para uniformar el vaciado de datos en espacios previstos para anotarlos

Definir qué datos se vacían → Tiempo de espera de la máquina (línea 13)

Operador: Wendy Fecha: 19 de mayo

| Causa | Frecuencia | Comentarios |
|----------------------|------------|--|
| Transporte de cartón | ### ### II | |
| Revisión metal | ### | |
| Sin producto | ### I | |
| Unidad sellada | ## | |
| Código de barras | ### | |
| Banda transportadora | | |
| Producto defectuoso | ### | Descarapeladas III quemadas Poco peso II |
| Otro | ## | |

Lista de las características o condiciones de interés

Incluye lugar para poner los datos

Si se quiere, se agrega espacio para seguimiento de los factores de estratificación

Espacio para comentarios

Medida

Gráfica de Pareto**
Tipos de quejas de clientes
Total = 2 520 octubre-diciembre (en 6 tiendas)

| Tipo de queja | Núm. total de quejas de clientes |
|--------------------|----------------------------------|
| Entregas demoradas | 1890 |
| Pedido erróneo | 220 |
| Comida fría | 206 |
| Sabor | 117 |
| Otro | 87 |

Nota sobre la ilustración: El tiempo de entrega se definió como el tiempo total desde que se coloca el pedido hasta que lo recibe el cliente.

* Fuente: Rath & Strong, *Rath & Strong's Six Sigma Pocket Guide*, 2001.

** Fuente: Raytheon Six Sigma, *The Memory Jogger™ II*, 2001.

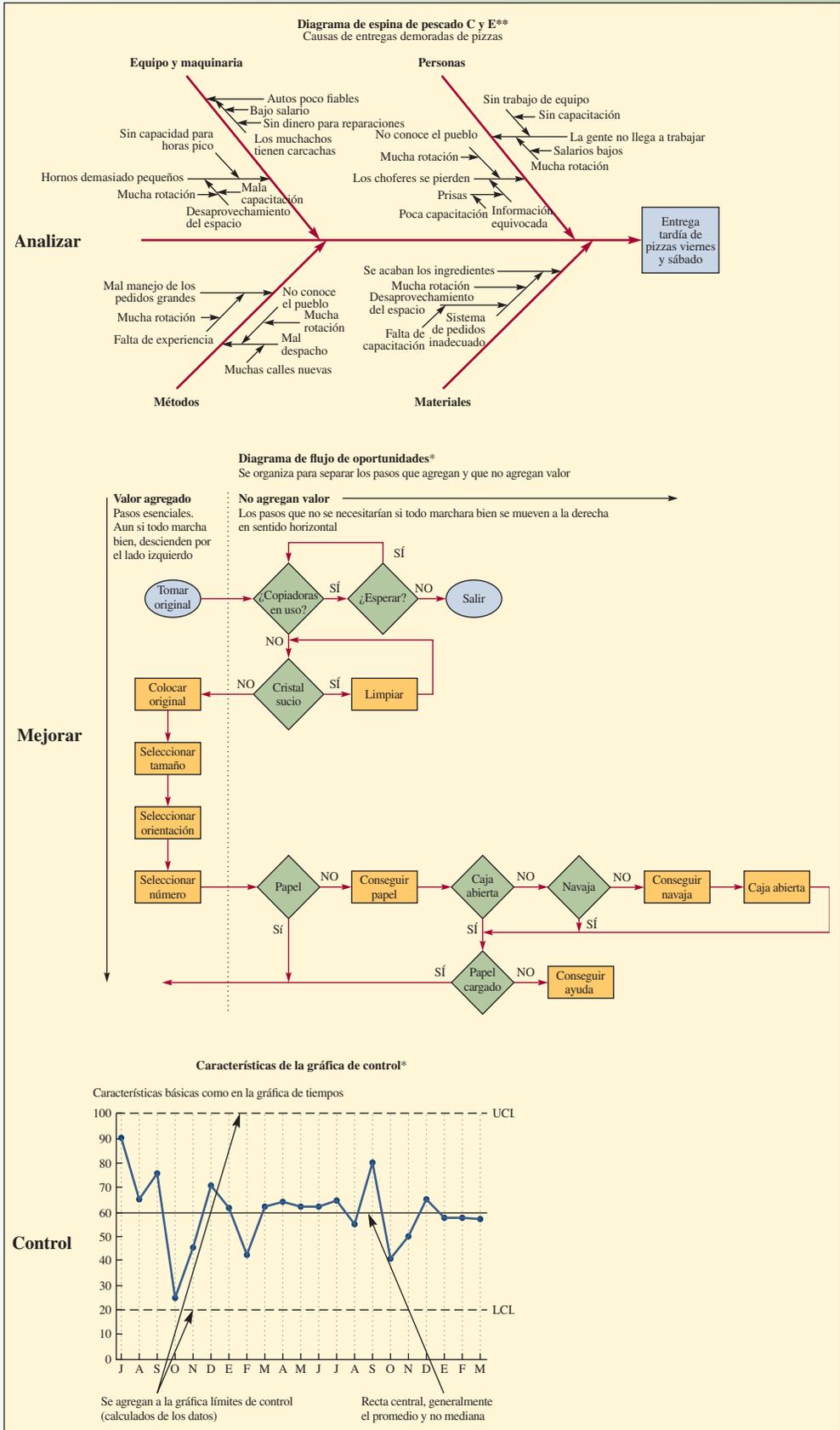


ilustración 9.6

Forma FMEA

| Análisis FMEA | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------------------|------------------------------|----------|------------------------|------------|--------------------|-----------|---|--------------------|-------------------------|----------------------------------|----------|------------|-----------|-----|
| Proyecto: _____ | | | | | | | | | | Fecha: _____ (original) | | | | | |
| Equipo: _____ | | | | | | | | | | _____ (revisado) | | | | | |
| Elemento o paso del proceso | Modo fallo potencial | Efectos potenciales de fallo | Gravedad | Causas potenciales (s) | Ocurrencia | Controles actuales | Detección | RPN | Acción recomendada | Responsabilidad y plazo | “Después” → Acción emprendida | Gravedad | Ocurrencia | Detección | RPN |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| Prioridad de riesgo total (número): | | | | | | | | Prioridad “posterior” de riesgo (número): | | | | | | | |

Fuente: Rath & Strong, *Rath & Strong Six Sigma Pocket Guide*, 2001, p. 31.

dad de detectar el fallo internamente (detección). Los elementos de más RPN deben ser los primeros en considerarse para mejoramiento. El FMEA sugiere una acción recomendada para eliminar la condición de fallo; que se asigne una persona o departamento responsable para resolver el problema y se vuelva a elaborar el sistema, diseño o proceso y que se vuelva a calcular el RPN.

Diseño de experimentos (DOE: *design of experiments*). El diseño de experimentos, que a veces se llama *pruebas multivariadas*, es una metodología estadística para determinar las relaciones causales entre las variables de procesos (eje de las x) y la variable de producción (eje de las y). En contraste con las pruebas estadísticas comunes, en las que hay que cambiar las variables una por una para determinar cuál es la que más influye, DOE permite experimentar simultáneamente con muchas variables mediante una selección cuidadosa de un subconjunto de éstas.

Six-Sigma esbelta

Six-Sigma esbelta combina las herramientas de implantación y control de calidad de Six-Sigma con conceptos de administración de materiales de *manufactura esbelta*. En la manufactura esbelta (que se estudiará detalladamente en el capítulo 12) se consigue un volumen grande de producción con los menores desperdicios, mediante el uso de métodos de inventario justo a tiempo. El término *esbelta* en este contexto se centra en aminorar los costos reduciendo al mínimo las materias primas, trabajos por terminar e inventario de bienes terminados. Reducir el inventario exige un nivel superior de calidad, dado que los procesos tienen que ser previsible, pues no hay existencias sobrantes. Aminorar la variabilidad es un impulsor clave de los buenos programas de Six-Sigma esbeltos.

FUNCIONES Y RESPONSABILIDADES EN SIX-SIGMA

La buena implantación de Six-Sigma se basa en seguir prácticas sensatas del personal, así como en metodologías técnicas. A continuación se presenta un breve resumen de las prácticas del personal que se emplean para la implantación de Six-Sigma.

1. **Líderes ejecutivos que realmente se comprometan con Six-Sigma y que lo promuevan en toda la organización y campeones que se apropien de los procesos que hay que mejorar.** Los campeones salen de las filas de los ejecutivos y gerentes y se espera que identifiquen las medidas apropiadas al comenzar los proyectos y que se cercioren de que los esfuerzos de mejoramiento se enfoquen en los resultados comerciales (véase el apartado “Innovación”, ¿Qué hace un buen campeón?).

I N N O V A C I Ó N

¿QUÉ HACE UN BUEN CAMPEÓN?

En una compañía de manufactura que está implantando un programa Six-Sigma, un campeón designado se reúne periódicamente con sus cintas negras. En una junta de rendición de informes, una cinta negra le informó que tenía que comprar e instalar una mesa para separar defectos de la cadena de producción. Costaría alrededor de 17 000 unidades monetarias, pero daría una alternativa a cerrar toda la cadena, lo que podría costar más. El contralor le dijo que siguiera el proceso normal de solicitud y recibiría su mesa en unos cuatro meses. La demora habría arruinado el proyecto en ese instan-

te: presentar el proyecto “a la manera usual” habría mostrado poco compromiso de apoyar al programa Six-Sigma. Entonces, el campeón pidió los datos que justificaban la solicitud, los analizó, estuvo de acuerdo y consiguió una autorización inmediata de los ejecutivos para conseguir una mesa para la semana entrante.

Es materia de un buen campeón: quitar estorbos y enviar señales claras de que él y la alta gerencia concuerdan y se comprometen con Six-Sigma. El campeón hace lo necesario para apoyar a las cintas negras.

Fuente: Greg Brue, *Six Sigma for Managers* (Nueva York: McGraw-Hill, 2002), p. 84.

2. **Capacitación corporativa en los conceptos y herramientas de Six-Sigma.** GE gastó más de mil millones de dólares para capacitar en los conceptos a sus profesionales. Ahora, casi todo profesional de la organización está calificado en las técnicas de Six-Sigma. Para comunicar la necesidad de atacar con fuerza los problemas, los profesionales reciben títulos tomados de las artes marciales según sus habilidades y funciones: **cintas negras**, que entrenan o, de hecho, dirigen un equipo de mejoramiento Six-Sigma; **cintas negras maestros**, que reciben capacitación exhaustiva en las herramientas estadísticas y procesos de mejora (realizan las mismas funciones que los cintas negras, pero para más equipos), y **cintas verdes**, que son empleados que recibieron suficiente capacitación en Six-Sigma para participar en un equipo o, en algunas compañías, para trabajar individualmente en algún proyecto de pequeña escala relacionado con su trabajo. Diversas compañías usan estas “cintas” en combinaciones distintas con patrocinadores y campeones que guían los equipos.
3. **Se determina la dificultad de los objetivos de mejoramiento.**
4. **Refuerzo continuo y premios.** En GE, antes de que se declaren los ahorros de un proyecto, el cinta negra responsable tiene que aportar pruebas de que los problemas se arreglaron permanentemente.

Cintas negras

Cintas negras maestros

Cintas verdes

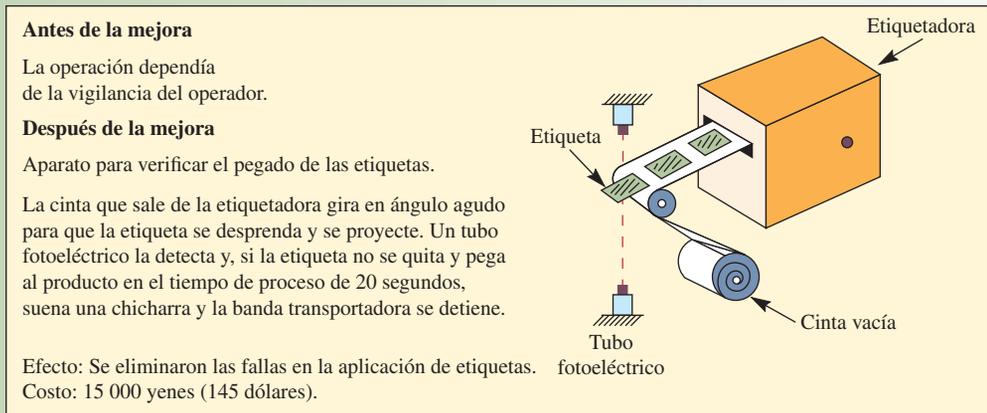
SISTEMA SHINGO: DISEÑO DE FALLO Y SEGURO

El sistema Shingo se desarrolló al mismo tiempo y, en muchos sentidos, en conflicto con el método estadístico de control de calidad. Como se dijo en el capítulo 8 en relación con las aplicaciones de servicio, este sistema (o, para ser más precisos, esta filosofía de la gestión de la producción) toma su nombre de uno de los que idearon el sistema de entrega justo a tiempo de Toyota, Shigeo Shingo. Dos aspectos particulares del sistema Shingo han recibido mayor atención. Uno es cómo hacer recortes drásticos a los tiempos de preparación de las máquinas mediante procedimientos de cambio de troqueles en un minuto (SMED: *single-minute exchange of die*). El otro, que es lo que nos interesa en esta sección, es el uso de inspección de fuentes y el sistema poka-yoke (“a prueba de errores”) para llegar a cero defectos.

Shingo decía que los métodos usuales de control de calidad no evitan los defectos. Aunque proporcionan información probabilística sobre cuándo ocurrirá un defecto, son métodos *a posteriori*. La manera de evitar que surjan defectos al final de un proceso es introducir controles dentro del proceso. Un elemento central del enfoque de Shingo es la diferencia entre errores y defectos. Los defectos se producen porque la gente comete errores. Aunque los errores son inevitables, los defectos se previenen si se da retroalimentación que incite medidas correctivas inmediatamente después de que se cometen los errores. Esta retroalimentación y estas medidas requieren inspección, que debe hacerse en 100% de los artículos producidos. Esta inspección puede ser de tres tipos: verificación sucesiva, autoverificación e inspección de las fuentes. La inspección por *verificación sucesiva* la ejecuta la siguiente persona del proceso o un evaluador objetivo, como el líder de un grupo. La información sobre los defectos se retroalimenta en se-

ilustración 9.7

Ejemplo de poka-yoke (pegar etiquetas a componentes que pasan por una banda transportadora)



Procedimientos de fallo y seguro

Poka-yoke

guida al trabajador que elaboró el producto, para que haga las reparaciones. La *autoverificación* la hace el mismo trabajador y es conveniente de por sí en todos los artículos, salvo los que requieren el uso de los sentidos (como la presencia o gravedad de rayones o igualar matices de pintura), que requieren verificaciones sucesivas. La *inspección de las fuentes* también la realiza el trabajador en lo individual, pero en lugar de buscar defectos, busca errores que causen defectos. Esto impide que los defectos ocurran y, por consiguiente, que haya que volverlos a trabajar. Los tres tipos de inspección dependen de controles que consisten en dispositivos o **procedimientos de fallo y seguro** (llamados **poka-yoke**). Poka-yoke incluye cosas como listas de comprobación o herramientas especiales que 1) impiden que el trabajador cometa un error que desemboque en un defecto antes de que se inicie el proceso o 2) da al trabajador retroalimentación rápida de las anomalías del proceso a tiempo para que las corrija.

Hay una amplia variedad de poka-yokes, que van desde reunir componentes para un depósito (a fin de cerciorarse de que se use el número correcto de componentes en un montaje) hasta complejos aparatos de detección y señalización electrónica. En la ilustración 9.7 se da un ejemplo tomado de los escritos de Shingo.

Queda mucho por decir sobre la obra de Shingo. Este autor arremetía contra la preocupación de la industria por las gráficas de control. Decía que son nada más un reflejo de las condiciones del momento. Cuando el gerente de control de calidad de una planta de compuestos químicos afirmó que tenía 200 gráficas en una planta de 150 empleados, Shingo le preguntó si “acaso no tenían gráficas de control para el control de las gráficas”.⁴

ISO 9000 E ISO 14000



Global

ISO 9000

www.iso.ch

ISO 9000 e ISO 14000 son estándares internacionales de administración y aseguramiento de la calidad. Estos estándares están diseñados para que las compañías documenten que mantienen un sistema de calidad eficiente. Los estándares fueron publicados en 1987 por la Organización Internacional de Estandarización (ISO: International Organization for Standardization), organismo internacional, especializado, reconocido por filiales en más de 160 países. **ISO 9000** se ha convertido en una referencia internacional de las necesidades de administración de la calidad en los tratos entre empresas e ISO 14000 es principalmente para el cuidado del ambiente.

La idea en que se fundan los estándares es que los defectos se previenen con planeación y con la aplicación de *las mejores prácticas* en cada etapa del negocio, del diseño a la manufactura, instalación y servicio. Estos estándares se enfocan en identificar los criterios por los que cualquier organización, independientemente de que sea de manufactura o servicios, asegure que el producto que sale de sus instalaciones cumple los requisitos de los clientes. Estos estándares imponen a una compañía que, primero,

documente e instale sus sistemas de administración de la calidad y que luego verifique, por medio de una auditoría realizada por un tercero independiente y acreditado, el apego de dichos sistemas a los requisitos de los estándares.

Los estándares básicos ISO 9000 fueron revisados en 2000 y se organizaron en tres categorías principales: ISO 9000:2000, ISO 9001:2000 e ISO 9004:2000. Los estándares se basan en ocho principios de administración de la calidad que se definen en el documento ISO 9000:2000. Estos principios se enfocan en procesos de negocios relacionados con diversos sectores de una empresa: 1) enfoque en los clientes, 2) liderazgo, 3) participación de las personas, 4) enfoque en procesos, 5) enfoque en sistemas de administración, 6) mejoramiento continuo, 7) enfoque real en la toma de decisiones, y 8) relaciones de beneficio mutuo con los proveedores. El documento ISO 9001:2000 detalla los requisitos para cumplir con los estándares. ISO 9004:2000 describe las herramientas de los estándares que se usan para mejorar la calidad de la empresa. Estos documentos son generales y se aplican a cualquier organización que elabore productos o preste servicios.

La familia de estándares ISO 14000 de administración ambiental se ocupa de la necesidad de ser responsables con el medio natural. Los estándares definen un método de tres vías para enfrentar las dificultades ecológicas. La primera es la definición de más de 350 estándares internacionales para vigilar la calidad del aire, agua y suelo. En muchos países, estos estándares sirven como base técnica para las normas ambientales. La segunda parte de ISO 14000 es un enfoque estratégico de definición de los requisitos de un sistema de administración ambiental que puede establecerse con las herramientas de supervisión. Por último, el estándar ambiental propone la inclusión de aspectos ecológicos en el diseño de productos y favorece el desarrollo de productos y servicios que no dañen el ambiente.

Además de los estándares generales ISO 9000 e ISO 14000, se han definido muchos otros estándares muy específicos. Los siguientes son algunos ejemplos:

- QS-9000 es un sistema de administración de la calidad desarrollado por Chrysler, Ford y General Motors para proveedores de componentes para producción, materiales y servicios para la industria automotriz.
- ISO/TS 16949, desarrollado por la Fuerza de Tarea Automotriz Internacional, uniforma los estándares de calidad estadounidenses, alemanes, franceses e italianos en la industria automotriz mundial.
- ISO 14001 de estándares ambientales que son aplicados por los proveedores de la industria automotriz como requisitos de Ford y General Motors.
- ANSI/ASQ Z1.4-2003 proporciona métodos para reunir, analizar e interpretar datos para inspección de atributos, mientras que Z1.9-2003 se relaciona con la inspección de variables.
- TL 9000 define los requisitos del sistema de calidad de las telecomunicaciones para el diseño, desarrollo, producción, entrega, instalación y mantenimiento de productos y servicios en la industria de las telecomunicaciones.

Los estándares ISO proporcionan guías de calidad de aceptación universal. Aunque no se requiere certificación, muchas compañías han visto que es esencial para ser competitivas en los mercados globales. Considere la situación en la que usted necesite comprar componentes para su empresa y varios proveedores ofrecen artículos similares con precios parecidos. Suponga que una empresa tiene certificado ISO 9000 y las otras no. ¿A quién le compraría? No hay duda de que la compañía ISO 9000 llevaría la delantera en sus decisiones. ¿Por qué? Porque ISO 9000 especifica cómo opera el proveedor, así como las normas de calidad, tiempos de entrega, niveles de servicio, etcétera.

Hay tres formas de certificación:

1. Del interesado: una empresa se hace una auditoría según los estándares ISO 9000.
2. Del cliente: un cliente hace una auditoría de su proveedor.
3. De un tercero: funge como auditor un centro “calificado”, nacional o internacional, de estándares o certificación.

La mejor certificación de una empresa es a través de un tercero. La empresa que aprueba la auditoría de un tercero queda certificada y puede registrarse y declararse con el estado ISO 9000 y se convierte en parte de un registro de compañías certificadas. La certificación de terceros también tiene ventajas legales en la Comunidad Europea. Por ejemplo, un fabricante es responsable de las lesiones que sufra un usuario de su producto. Pero la empresa puede liberarse de toda responsabilidad demostrando que siguió los estándares de producción convenientes y que seleccionó cuidadosamente a sus proveedores como parte de sus requisitos de adquisiciones. Por este motivo, hay un fuerte incentivo para escoger proveedores con certificación ISO 9000.

INDICADORES DE REFERENCIA EXTERNOS DE MEJORA DE LA CALIDAD

Indicadores de referencia externos

Los métodos de fomento de la calidad descritos hasta este momento se centran más o menos en el interior de la empresa. Buscan mejoras analizando detalladamente las prácticas actuales de la propia compañía. Sin embargo, los **indicadores de referencia externos** salen de la organización para examinar lo que hacen los competidores y los mejores realizadores de fuera de la industria. Los indicadores de referencia comprenden los pasos siguientes:

Identificar procesos que necesitan mejoras. Identificar a la empresa que tenga el liderazgo mundial en ejecución del proceso. En el caso de muchos procesos, puede ser una compañía que no pertenezca a la misma industria. Entre los ejemplos se cuentan Procter and Gamble, que tomó como referencia a L. L. Bean para evaluar su sistema de recepción de pedidos, o ICL (un gran fabricante de

computadoras en Inglaterra) que tomó como referencia a Marks and Spencer (tiendas inglesas de ropa) para mejorar su sistema de distribución. En un estudio de McKinsey se cita una empresa que midió los tiempos de atención en el foso de un circuito de carreras de autos como punto de referencia para cambios con sus trabajadores en una línea de montaje.⁵ *Llame a los gerentes de esa compañía y haga una visita personal para entrevistarlos a ellos y a los trabajadores.* Muchas compañías seleccionan un equipo de trabajadores del proceso como parte del equipo de visitantes.

Analizar los datos. Esto entraña buscar lagunas entre lo que su compañía hace y lo que hace la compañía de referencia. Hay dos aspectos del estudio: uno es comparar los procesos reales; el otro es comparar el desempeño de estos procesos de acuerdo con un conjunto de medidas. En general, los procesos se describen con un diagrama de flujos y evaluaciones subjetivas sobre cómo se relacionan los trabajadores con dichos procesos. En algunos casos, las compañías permiten que se graben en video, aunque hay ahora una tendencia a mantener las cosas veladas, por temor de entregar secretos de procesamiento.



El nuevo Minicooper de la BMW fijó un estándar como el primer auto compacto de lujo, de modo que se convirtió en referencia para la industria automovilística.

CONCLUSIÓN

Ya no es un secreto cómo alcanzar la TQM. La dificultad es asegurarse de que el programa de calidad realmente se enfoca en los clientes y es bastante ágil para establecer rápidamente las mejoras sin perder de vista las necesidades reales del negocio. Debe analizarse la calidad del propio sistema de calidad. También es necesario sostener una cultura de calidad de largo alcance. Algunas compañías (cuyo nombre se omite) que adquirieron una gran reputación por su calidad en las décadas de 1980 y 1990 agotaron el impulso de sus esfuerzos de calidad: sus gerentes ya no pudieron sostener el entusiasmo necesario para que la calidad tuviera la mayor prioridad global. Como dijo Tom Peters: “La mayor parte de los programas de calidad fracasan por cualquiera de dos razones: tienen un sistema sin pasión o una pasión sin sistema.”⁶

VOCABULARIO BÁSICO

Administración de la calidad total (TQM) Manejo de la organización completa de modo tal que sobresalga en todas las dimensiones de productos y servicios que son importantes para el cliente.

Premio Nacional a la Calidad Malcolm Baldrige Premio establecido por el Departamento de Comercio de Estados Unidos y entregado cada año a las compañías de calidad sobresaliente.

Calidad de diseño Valor inherente del producto en el mercado.

Conformidad con la calidad Grado en el que se cumplen las especificaciones del producto o servicio.

Calidad en el origen La persona que hace el trabajo tiene la responsabilidad de ver que se cumplan las especificaciones.

Dimensiones de calidad Criterios con que se mide la calidad.

Costo de la calidad Gastos incurridos para alcanzar la calidad de un producto o servicio, como los costos de prevención, evaluación, falla interna y falla externa.

Six-Sigma Término de estadística referido a una meta de calidad de no más de cuatro defectos por millón de unidades. También se refiere a una doctrina y programa de mejoramiento de la calidad.

DPMO (defectos por millón de oportunidades) Medida de la variabilidad en un proceso.

DMAIC Siglas de la metodología de mejoras **Definir, Medir, Analizar, Incrementar y Controlar** seguida por compañías que emprenden programas de Six-Sigma.

Ciclo PDCA También llamado *ciclo o rueda de Deming*. Se refiere al ciclo de mejoramiento continuo de planear, desarrollar, comprobar y actuar.

Mejoramiento continuo Doctrina que busca constantemente mejoras en los procesos mediante el esfuerzo de los equipos.

Kaizen Término en japonés que significa “mejoramiento continuo”.

Six-Sigma esbelto Programa que combina la implantación y el control de calidad de herramientas de Six-Sigma con el concepto de manejo de materiales de la manufactura esbelta, centrado en rebajar los costos reduciendo las existencias al mínimo absoluto.

Cintas negras, cintas negras maestros, cintas verdes Términos para describir los niveles de habilidades y responsabilidades personales de los programas de Six-Sigma.

Procedimientos de fallo y seguro o poka-yoke Prácticas sencillas que evitan errores o dan retroalimentación oportuna para que el trabajador los corrija.

ISO 9000 Estándares formales usados para certificación de calidad fijados por la Organización Internacional de Estandarización.

Indicadores de referencia externos Buscar fuera de la compañía para examinar qué hacen con respecto a la calidad los mejores dentro y fuera de la compañía.

PREGUNTAS DE REPASO Y DISCUSIÓN

1. ¿La meta de Six-Sigma es realista para servicios como las tiendas de videos Blockbuster?
2. “Si se pide a los empleados de línea que desempeñen actividades de mejoramiento de la calidad, su productividad bajará.” Comente.
3. “No inspecciona la calidad de un producto; la incorpora en un producto.” Comente las implicaciones de esta declaración.
4. “Antes de incorporar la calidad, tiene que pensar en la calidad.” ¿En qué difieren las implicaciones de esta aseveración de las del punto 3?
5. El escritor de negocios Tom Peters propuso que al hacer cambios en los procesos, hay que “ensayarlos, verificarlos e impulsarlos”. ¿Cómo concuerda esto con la doctrina de DMAIC/mejoramiento continuo?
6. Shingo contaba la anécdota de un poka-yoke que creó para ver que los operadores no cometieran el error de poner menos de los cuatro resortes necesarios para el mecanismo de botones de oprimir. El método en vigor exigía que los obreros sacaran los resortes, uno por uno, de una caja que tenía varios centenares y que colocaran dos detrás del botón de encendido y dos detrás del botón de apagado. ¿Qué poka-yoke creó Shingo?
7. Un paquete ordinario de procesamiento de texto se carga con poka-yokes. Anote tres. ¿Hay otros que quisiera que estuvieran en los paquetes?

PROBLEMAS

1. Un gerente afirma que su proceso realmente marcha muy bien. De 1 500 piezas, 1 477 se produjeron sin ningún defecto en particular y pasaron la inspección. Sobre la base de la teoría de Six-Sigma y en igualdad de circunstancias, ¿cómo calificaría este desempeño?
2. El profesor Chase se siente frustrado por su incapacidad para prepararse una buena taza de café por la mañana. Muéstrela con un diagrama de espina de pescado cómo analizaría usted el proceso que sigue para hacerse una taza de su mal brebaje.
3. Use el proceso de indicadores de referencia y todas las herramientas analíticas DMAIC/CI para mostrar cómo mejoraría su aprovechamiento en su peor materia de la escuela.
4. Prepare un diagrama de flujo SIPOC (ilustración 9.5) de los principales pasos que se siguen en el proceso de abordar un vuelo comercial. Inicie el proceso cuando el pasajero llega a la entrada del aeropuerto local.
5. Prepare un diagrama de flujo de oportunidades sobre el mismo proceso de abordar un vuelo comercial.
6. En la siguiente tabla se da una lista de todos los costos de calidad en los que incurrió Sam’s Surf Shop el año anterior. ¿En cuánto evaluó Sam sus costos de calidad el año pasado?

| | |
|--|-------------|
| Costo anuales de inspección | \$155 000 |
| Costo anual de material de desecho | \$286 000 |
| Costo anual de retrabajo | \$34 679 |
| Costo anual de capacitación en calidad | \$456 000 |
| Costo anual de garantías | \$1 546 000 |
| Costo anual de pruebas | \$543 000 |

7. A continuación se da una tabla de datos reunidos durante seis meses en una tienda local de abarrotes. Realice un análisis de Pareto de los datos y determine el porcentaje total de quejas representadas por las categorías más comunes.

| | |
|----------------------------|-----|
| Todos los demás | 71 |
| Registradora | 59 |
| General | 58 |
| Nivel de servicio | 55 |
| Políticas y procedimientos | 40 |
| Marcaje de precios | 45 |
| Calidad de productos | 87 |
| Solicitud de productos | 105 |
| Fila para pagar | 33 |
| Condición de existencias | 170 |

8. Un problema común que enfrentan muchos conductores es un automóvil que no arranca. Prepare un diagrama de espina de pescado que le ayude en el diagnóstico de las causas posibles del problema.



Internet

www.quality.nist.gov

www.isixsigma.com

EJERCICIOS POR INTERNET PARA SU ENRIQUECIMIENTO

1. Visite el sitio en Internet del premio Baldrige y vea quién ganó este año. ¿Qué ideas de calidad demostró el ganador? ¿Qué hizo más creativo el ganador?
2. Visite el sitio en Internet de Six-Sigma para ver cómo las empresas aplican el concepto.

CASO: HANK KOLB, DIRECTOR DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

Hank Kolb silbaba mientras se dirigía a su oficina, un poco todavía con la sensación de ser un extraño, puesto que lo habían contratado hacía cuatro semanas como director de aseguramiento de la calidad. Toda esa semana había estado fuera de la planta, en un seminario que el departamento de capacitación de la corporación dio a los gerentes de calidad de las plantas de manufactura. Ahora esperaba con ansia sumergirse en los problemas de calidad en esta fábrica de productos industriales de 1 200 empleados.

Kolb asomó la cabeza por la oficina de Mark Hamler, su subordinado inmediato como gerente de control de calidad, y le preguntó cómo les había ido la semana anterior. Como Hamler sonrió a medias y apenas dijo: “Ah, bien”, Kolb metió el freno. No conocía muy bien a Hamler y no estaba seguro sobre si insistir ante esa respuesta. Kolb estaba inseguro sobre cómo formar una relación con Hamler, puesto que no lo habían ascendido al puesto que ahora tenía Kolb. En la hoja de evaluación de Hamler se leía: “Conocimientos técnicos soberbios; le faltan habilidades administrativas.” Kolb decidió averiguar más y le preguntó a Hamler qué había pasado. Éste contestó: “Nada más que otro lío de calidad. La semana pasada tuvimos un pequeño problema con la línea Greasex [un disolvente de grasa especial empacado en una lata rociadora, para el sector de alta tecnología]. Se encontró demasiada presión en algunas latas del segundo turno, pero un supervisor las arregló para que pudiéramos embarcarlas. Cumplimos con nuestro calendario de entregas.” Como Kolb todavía no conocía bien la planta ni sus productos, le pidió a Hamler que le diera más datos; con dificultades, Hamler continuó:

—Hemos tenido problemas con el nuevo equipo de llenado y algunas de las latas se presurizaron más del máximo especificado.

La tasa de producción todavía es de 50% de la norma, alrededor de 14 cajas por turno, y nos dimos cuenta a la mitad del turno. Mac Evans [el inspector de esa línea] lo detectó, marcó como “Retenidas” las cajas y siguió con su trabajo. Cuando regresó al final del turno para redactar sobre los rechazos, Wayne Simmons, supervisor de primera línea, estaba junto a una plataforma de bienes terminados sellando una caja de cartón de Greasex de la que se habían quitado las etiquetas “Retenidas”. Le dijo a Mac que otro inspector le contó del problema de presión excesiva en un descanso. Entonces, volvió y quitó las etiquetas. Una por una, paró de cabeza todas las latas de las ocho cajas y las aireó. Le dijo a Mac que la planeación de producción presionaba mucho por ese material y que no podían retrasarlo mandándolo a la sección de retrabajo. Le dijo a Mac que iría con el operador para que hiciera bien su trabajo la próxima vez. Mac no redactó nada, sino que vino a contármelo hace unos tres días. Esto pasa de vez en cuando y le dije que verificara con los de mantenimiento que la máquina de relleno estuviera ajustada. Me encontré a Wayne en el pasillo y le dije que la próxima vez tengo que mandar el material a retrabajar.

Kolb se quedó mudo, no pudo decir mucho. No sabía si era grave o no. Cuando llegó a su oficina, volvió a pensar en lo que Morgenthal, el gerente general, le dijo cuando lo contrató. Le advirtió sobre la “actitud de falta de calidad” en la planta y le dijo que “debería hacer algo al respecto”. Morgenthal subrayó también los problemas de calidad de la planta: “Tenemos que mejorar nuestra calidad; nos está costando mucho dinero. Estoy seguro, pero no puedo probarlo. Hank, tienes todo mi apoyo en este asunto. Estás a cargo de estos problemas de calidad. Tienes que terminar esta espiral descendente de calidad, productividad y rotación.”

El incidente ocurrió la semana pasada: para este momento, probablemente los artículos ya estarían en manos de los clientes y todos lo habían olvidado (o querían olvidarlo). Había problemas más apremiantes en los que Kolb debía pasar el tiempo, pero éste no dejaba de asaltarlo. Pensaba que el departamento de calidad era tratado como una broma y que era una afrenta personal de manufactura. No quería comenzar una guerra con la gente de producción, pero ¿qué podía hacer? Kolb se sentía tan alterado que canceló sus citas y dedicó la mañana a hablar con algunas personas. Después de una mañana larga y llena de tacto, supo esta información:

1. **De personal.** El operador del equipo de llenado había sido transferido de embarque hacía dos semanas. No tenía capacitación formal en el puesto y Wayne le enseñaba, en la práctica, a operar el equipo. Cuando Mac probó la presión de las latas, no encontró al operador y se enteró del material rechazado hasta que se lo dijo Wayne en el cambio de turno.
2. **De mantenimiento de la planta.** Esta máquina de llenado automático fue comprada hacía dos años para usarse en otro producto. Hacía seis meses que se transfirió a la línea de Greasex y mantenimiento respondió 12 pedidos de mantenimiento el mes anterior, para hacer reparaciones o ajustes. La máquina fue adaptada por mantenimiento para manejar la poca viscosidad de Greasex, para lo que no había sido fabricada. Esto incluyó el diseño de una cabeza de llenado especial. No había un calendario de mantenimiento preventivo para esta máquina y los componentes de la sensible cabeza de llenado, reemplazados tres veces en el último semestre, tenían que fabricarse en el taller de máquinas contiguo. El tiempo de detención no estándar era de 15% del tiempo de corrida actual.
3. **De compras.** Las cabezas de la boquilla de plástico para las latas de Greasex, diseñadas por un proveedor para este producto nuevo en un pedido urgente, tenían ligeras irregularidades en la pestaña interior y esto generaba algunos problemas para ajustar la tapa de la lata. Mantenimiento aumentó la aplicación de presión de la cabeza de llenado y resolvió el problema o por lo menos forzaba el paso de las cabezas de la boquilla a pesar de las imperfecciones. Los agentes de compras dijeron que iban a hablar con el representante de ventas del proveedor de la cabeza de la boquilla la próxima vez que viniera.
4. **De diseño y empaque de productos.** La lata, diseñada especialmente para Greasex, tenía un contorno para que el usuario la tomara fácilmente. Este cambio, pedido por investigación de mercados, hizo destacar la apariencia de Greasex entre sus competidores y los ingenieros lo consideraron importante. No se hizo ninguna prueba sobre los efectos del contorno de la lata en la velocidad de llenado ni en la hidrodinámica de llenado de una cabeza de alta presión. Kolb tenía la sospecha de que el nuevo diseño funcionaba como un sistema de Venturi (que el impulso generaba succión) durante el llenado, pero el diseñador del empaque pensaba que no era muy probable.
5. **Del gerente de manufactura.** Ya había oído del problema. De hecho, Simmons había bromeado y se jactaba con otros capataces y supervisores de turnos de cómo había

batido su cuota de producción. El gerente de manufactura pensaba que Simmons era uno de “los mejores capataces que tengo... siempre saca su producción”. De hecho, sus papeles de ascenso estaban sobre el escritorio del gerente de manufactura cuando Kolb llegó. Simmons era considerado fuerte candidato para subir a supervisor de turno. El gerente de manufactura, por presión de Morganthal para que mejorara los costos y redujera los tiempos de entrega, simpatizaba con Kolb pero dijo que la zona de retrabajo hubiera sido aireada con sus manómetros, lo que Wayne hizo a mano. “Pero hablaré con Wayne sobre el incidente”, dijo.

6. **De mercadotecnia.** La introducción de Greasex al mercado se apresuró para ganar a los competidores y estaba en marcha una importante campaña promocional para aumentar el conocimiento en los consumidores. Un diluvio de pedidos tenía empantanado al departamento de recepción de pedidos y tenía a Greasex entre los primeros lugares de compras repetidas. La producción tenía que sacar el material; incluso se toleraba salirse un poco de las especificaciones, porque “es mejor estar en los estantes de las tiendas que no llegar. A quién le importa si la etiqueta quedó algo arrugada o si el material sale con un poco de presión excesiva. Necesitamos participación de mercado ahora en aquel segmento de alta tecnología”.

Lo que más molestaba a Kolb era el problema de seguridad de la presión excesiva en las latas. No tenía modo de saber qué tan riesgosa era la presión alta ni si Simmons la había aireado lo suficiente para reducir el peligro. Los datos del fabricante de las latas, que Hamler le había mostrado, indicaban que la presión detectada por el inspector no estaban en la región de peligro; pero el inspector sólo había seguido el procedimiento de muestreo para probar ocho cajas. Aun si desde el punto de vista moral podía aceptar que no había riesgos de seguridad con el producto, ¿cómo se aseguraría Kolb de que no volviera a pasar?

Kolb no comió el almuerzo. Se quedó en su oficina para meditar en los sucesos de la mañana. En el seminario de la semana anterior habían hablado de la función de la calidad, productividad y calidad, generar una nueva actitud y del desafío de la calidad; pero ¿cuándo le habían dicho qué hacer cuando pasara esto? Había dejado un muy buen trabajo para venir aquí porque pensaba que la compañía tomaba en serio la importancia de la calidad y quería enfrentar un reto. Kolb había pedido y le habían dado un salario igual al de los directores de manufactura, marketing e investigación y desarrollo, y era uno de los que rendía cuentas directamente al gerente general. Pero todavía no sabía qué debía hacer. Ni siquiera sabía qué podía hacer en estas circunstancias.

PREGUNTAS

1. ¿Cuáles son las causas de los problemas de calidad de la línea Greasex? Coloque su respuesta en un diagrama de espina de pescado.
2. ¿Qué pasos en general debe dar Hank para establecer un programa de mejoramiento continuo en la compañía? ¿Qué problemas tiene que superar para hacer su trabajo?

ilustración 9.8

Impulsores de la excelencia (los comos de la excelencia)

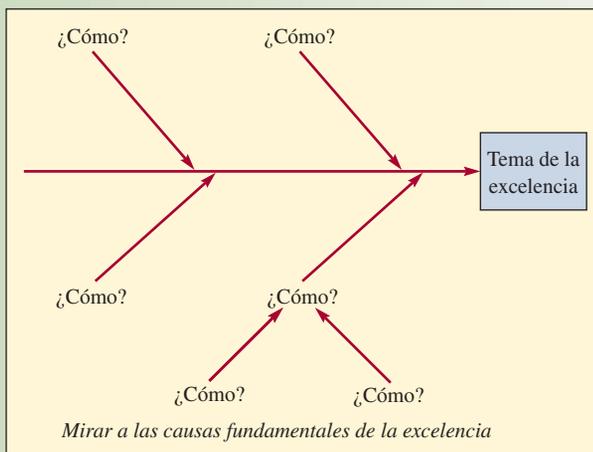
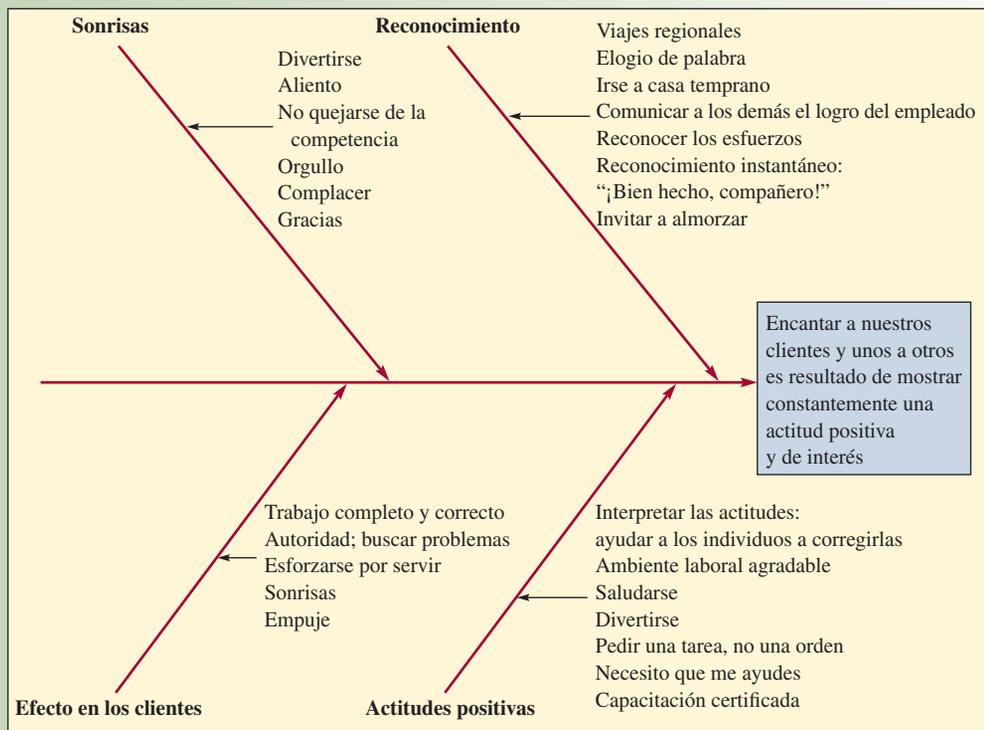


ilustración 9.9

Causas fundamentales de la excelencia

**CASO:** INVESTIGACIÓN VALORATIVA: OTRA CLASE DE ESPINA DE PESCADO

El diagrama de espina de pescado ordinario se dirige a identificar la causa fundamental de un problema. Encontrar esta causa es el inicio para encontrar una solución. Por otro lado, las mejoras no consisten siempre en averiguar qué salió mal, sino también en identificar lo que se hizo bien. Para esto se diseñó el método de la investigación

valorativa (IV). Su mecanismo consiste en pedir anécdotas de éxito a los empleados sobre cómo, por ejemplo, encantaron a sus clientes. A continuación, las anécdotas se ponen en un diagrama de espina de pescado como tema de estudio (véase la ilustración 9.8). El método prosigue reuniendo las causas del éxito, que se anotan en el

diagrama como “espinas” del éxito. Una de sus bondades es que se basa en las capacidades exclusivas de la compañía, no en copiar los enfoques de otros.

Este método lo aplicó con frutos el ejecutivo de Direct Discount Tires, Steve Fournier, Jr., quien dice: “La IV es una herramienta sencilla que puede usarse para averiguar qué cosas se hacen y por qué se hacen de una manera. Da a los empleados la oportunidad de pensar por su cuenta, encontrar soluciones y desempeñarse en niveles superiores, en lugar de ser receptores de un discurso de tipo directivo. Como ellos mismos indagan las respuestas, impulsa el espíritu emprendedor, promueve las innovaciones y, con el tiempo, genera nuevos líderes y nuevas mejores prácticas desde el nivel de trato con el público, con lo que seguimos siendo ‘Los Mejores’. Sin esta in-

novación, corríamos el riesgo de estancarnos” (en la ilustración 9.9 se muestra el diagrama de espina de pescado de Direct Discount Tires).

PREGUNTAS

1. Desde el punto de vista de un trabajador, ¿cuál le parece el mayor beneficio de la investigación valorativa en comparación con el análisis de causa y efecto común?
2. Como ejercicio interesante, piense en su maestro favorito. Haga un diagrama de espina de pescado como indagación valorativa, para identificar por qué cree que ese maestro es tan sobresaliente.

Fuente: William Youngdahl y Caren Siehl, Notas, Escuela Superior de Administración Exterior de Estados Unidos, 2006.

BIBLIOGRAFÍA SELECCIONADA

- Bemowski, K. y B. Stratton (comps.), eds. *101 Good Ideas: How to Improve Just About Any Process*. Washington, DC: American Society for Quality, 1999.
- Blakeslee, J. A., Jr. “Implementing the Six Sigma Solution.” *Quality Progress*, julio de 1999, pp. 77-85.
- Brue, G. *Six Sigma for Managers*. Nueva York: McGraw-Hill, 2002.
- Chowdhury, S. *Design for Six Sigma*. Chicago: Dearborn Trade Publishing, 2002.
- Chowdhury, S. y K. Zimmer. *QS-9000 Pioneers-Registered Companies Share Their Strategies for Success*. Burr Ridge, IL: Richard D. Irwin, 1996.
- Crosby, P. B. *Quality Is Free*. Nueva York: McGraw-Hill, 1979 (reedición 1992).
- . *Quality Is Still Free*. Nueva York: McGraw-Hill, 1996.
- Deming, W. E. *Quality, Productivity and Competitive Position*. Cambridge, MA: MIT Center for Advanced Engineer Study, 1982.
- Eckes, G. *Six Sigma Revolution: How General Electric and Others Turned Process into Profits*. Nueva York: John Wiley and Sons, 2001.
- Evans, J. R. y W. M. Lindsay. *The Management and Control of Quality*. Cincinnati: South-Western/Thomson Learning, 2002.
- Feigenbaum, A. V. *Total Quality Control*, Nueva York: McGraw-Hill, 1991.
- Gitlow, H.; A. Oppenheim y R. Oppenheim. *Quality Management: Tools and Methods for Improvement*. 2a. ed., Nueva York: Irwin/McGraw-Hill, 1995.
- Juran, J. M. *Quality Control Handbook*. 3a. ed., Nueva York: McGraw-Hill, 1979.
- Juran, J. M. y F. M. Gryna. *Quality Planning and Analysis*, 2a. ed. Nueva York: McGraw-Hill, 1980.
- Pande, P. S.; R. P. Neuman y R. R. Cavanagh. *The Six Sigma Way*. Nueva York: McGraw-Hill, 2000.
- . *The Six Sigma Way Team Fieldbook*. Nueva York: McGraw-Hill, 2002.
- Robinson, A. *Modern Approaches to Manufacturing Improvement: The Shingo System*. Cambridge, MA: Productivity Press, 1990.
- Shingo, S. *Zero Quality Control: Source Inspection and the Poka-Yoke System*. Stamford, C.T.: Productivity Press, 1986.
- Taormina, T. *Virtual Leadership and the ISO 9000 Imperative*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1996.
- Welch, J. *Jack: Straight from the Gut*. Nueva York: Warner Business Books, 2001.

NOTAS

1. D. A. Garvin, *Managing Quality* (Nueva York: Free Press, 1988).
2. P. B. Crosby, *Quality Is Free* (Nueva York: New American Library, 1979), p. 15.
3. S. Walleck, D. O’Halloran y C. Leader, “Benchmarking World-Class Performance”, *McKinsey Quarterly*, núm. 1 (1991), p. 7.
4. A. Robinson, *Modern Approaches to Manufacturing Improvement: The Shingo System* (Cambridge, MA: Productivity Press, 1990), p. 234.
5. Walleck, O’Halloran y Leader, “Benchmarking World-Class Performance”, p. 7.
6. Tom Peters, *Thriving on Chaos* (Nueva York: Knopf, 1987), p. 74.

CAPACIDAD DE PROCESOS Y CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS

SUMARIO

Definición de variación asignable
Definición de variación común

3 3 0 Variación a nuestro alrededor

Definición de límites de especificación superior e inferior o límites de tolerancia superior e inferior

3 3 1 Capacidad del proceso

Índice de capacidad (C_{pk})
Definición de índice de capacidad (C_{pk})

3 3 6 Procedimientos de control de procesos

Definición de control estadístico de procesos (CEP)
Definición de atributos

Control de procesos con mediciones de atributos:
uso de gráficas p

Control de procesos con mediciones de variables:
uso de gráficas \bar{X} y R

Definición de variables

Cómo trazar gráficas \bar{X} y R

3 4 3 Muestreo de aceptación

Diseño de un plan de muestreo simple para atributos
Curvas características operativas

3 4 5 Conclusión

3 5 3 Caso: Hot Shot Plastics Company



Al supervisar un proceso utilizando el CEC, los trabajadores toman una muestra donde se miden los diámetros y la media de la muestra se calcula y diagrama. Se diseñan las inversiones en maquinaria, tecnología y educación para reducir el número de defectos que el proceso produce.

Este capítulo sobre control estadístico de la calidad (CEC) cubre los aspectos cuantitativos de la administración de la calidad. En general, el CEC consiste en varias técnicas diferentes diseñadas para evaluar la calidad desde el punto de vista del cumplimiento. Es decir, ¿con qué eficiencia se cubren las especificaciones establecidas durante el diseño de las piezas o servicios que se ofrecen? Por lo general, la administración del desempeño de la calidad que utiliza las técnicas del CEC comprende el muestreo periódico de un proceso y el análisis de estos datos usando criterios de desempeño derivados de manera estadística.

Como se verá, el CEC se puede aplicar tanto en procesos de manufactura como de servicio. Éstos son ejemplos de los tipos de situaciones en los que es posible aplicar el CEC:

- ¿Cuántos defectos de pintura hay en el acabado de un automóvil? ¿Se ha mejorado el proceso de pintura instalando un nuevo rociador?
- ¿Cuánto tiempo tarda la ejecución de pedidos del sistema comercial por Internet? ¿La instalación de un nuevo servidor mejoró el servicio? ¿El desempeño del sistema varía según el día?
- ¿Con qué eficiencia se mantiene la tolerancia dimensional en nuestro ensamblaje de cojinete de bolas de tres pulgadas? En vista de la variabilidad de nuestro proceso para fabricar este cojinete de bolas, ¿cuántos defectos se espera encontrar por cada millón de cojinetes fabricados?
- ¿Cuánto tiempo esperarán los clientes en su automóvil para poder ser atendidos en nuestra ventana de atención durante la hora del almuerzo que es la más ocupada?

Por lo regular, los procesos que ofrecen bienes y servicios muestran cierta variación en sus resultados. Esta variación puede deberse a muchos factores, algunos de los cuales es posible controlar y otros más son inherentes al proceso. La variación provocada por factores que se identifican con claridad y posiblemente se manejen, se conoce como **variación asignable**. Por ejemplo, una variación asignable se debe a los trabajadores que no tienen la misma capacitación o por el ajuste inadecuado de una máquina. La variación que es inherente al proceso mismo se llama **variación común**. Esta última se conoce a menudo como *variación aleatoria* y puede ser el resultado del equipo utilizado para completar un proceso, por ejemplo.

Como el título de este capítulo lo indica, este material requiere de la comprensión de la estadística más básica. Habrá que recordar del estudio de la estadística, incluyendo cifras con una distribución normal, la definición de la media y la desviación estándar. La media \bar{X} es sólo el valor promedio de un conjunto de valores. Matemáticamente es

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N x_i / N$$

[9A.1]

donde:

x_i = Valor observado

N = Número total de valores observados



Servicio

Variación asignable

Variación común

La desviación estándar es

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{N}}$$

Al supervisar un proceso utilizando el CEC, se toman muestras y se calculan las estadísticas de éstas. La distribución asociada con las muestras deberá tener la misma clase de variabilidad que la distribución real del proceso, aunque la varianza real de la distribución de la muestra sea menor. Esto es bueno, porque permite la detección rápida de los cambios en la distribución real del proceso. El propósito del muestreo es encontrar en qué punto cambió el proceso de manera no aleatoria, con el fin de determinar la razón del cambio en poco tiempo.

En la terminología del CEC, *sigma* se utiliza a menudo para referirse a la desviación estándar de la muestra. Como se verá en los ejemplos, *sigma* se calcula de varias maneras, dependiendo de la distribución teórica subyacente (por ejemplo, una distribución normal o una distribución de Poisson).

VARIACIÓN A NUESTRO ALREDEDOR

En general, se acepta que conforme la variación disminuye, la calidad mejora. En ocasiones, este conocimiento es intuitivo. Si un tren llega siempre a tiempo, los horarios se pueden planear con mayor precisión. Si las tallas de ropa son consistentes, es posible ahorrar tiempo haciendo pedidos por catálogo. Pero en raras ocasiones se piensa en esas cosas en términos del valor de una variabilidad baja. Con los ingenieros, el conocimiento está mejor definido. Los pistones deben caber en los cilindros, las puertas deben caber en el espacio asignado para ellas, los componentes eléctricos deben ser compatibles y las cajas de cereal deben contener la cantidad correcta de pasas; de lo contrario, la calidad será inaceptable y los clientes no quedarán satisfechos.

Sin embargo, los ingenieros saben también que es imposible tener una variabilidad de cero. Por esta razón, los diseñadores establecen especificaciones que definen no sólo el valor predeterminado de algo, sino también los límites aceptables en relación con el objetivo. Por ejemplo, si el valor predeterminado de una dimensión es 10 pulgadas, las especificaciones de diseño deben ser 10.00 pulgadas \pm 0.02 pulgadas. Con esto, el departamento de manufactura sabrá que, aun cuando la meta debe ser 10 pulgadas exactamente, cualquier medida entre 9.98 y 10.02 pulgadas es correcta. Estos límites de diseño se conocen con frecuencia como **límites de especificación superior e inferior o límites de tolerancia superior e inferior**.

Una forma tradicional de interpretar una especificación de este tipo es que cualquier pieza que se encuentre dentro del rango permitido es buena, mientras que cualquier pieza que quede fuera de él es deficiente. La ilustración 9A.1A muestra lo anterior. (Observe que el costo es cero en todo el rango de la especificación y luego hay una diferencia significativa en el costo una vez que se viola el límite.)

Genichi Taguchi, notable experto en calidad de Japón, señala que el punto de vista tradicional que muestra la ilustración 9A.1A no tiene sentido por dos razones:

1. Desde el punto de vista del cliente, a menudo no existe prácticamente ninguna diferencia entre un producto que queda justo dentro de las especificaciones y un producto que está justo fuera de éstas. Por el contrario, la diferencia es mucho mayor en la calidad de un producto que tiene las especificaciones meta y aquélla de un producto que se encuentra cerca de uno de los límites.
2. Conforme los clientes se vuelven más exigentes, surge la presión de reducir la variabilidad. Sin embargo, la ilustración 9A.1A no refleja esta lógica.

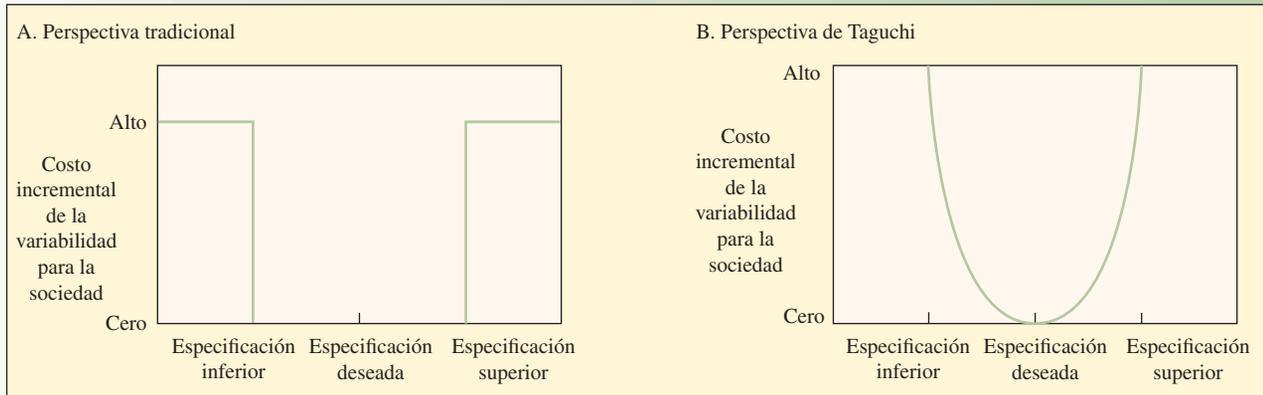
Taguchi sugiere que la ilustración 9A.1B muestra de una forma más correcta la pérdida. Se observa que, en la gráfica, el costo está representado por una curva suave. Hay docenas de ilustraciones de esta idea: la combinación de los engranajes en una transmisión, la velocidad de una película fotográfica, la temperatura en un lugar de trabajo o en una tienda departamental. En casi todo aquello que es posible medir, el cliente no ve una línea definida, sino una degradación de la aceptabilidad conforme se aleja de la especificación “óptima”. Los clientes ven la función de pérdida como en la ilustración 9A.1B más que en la ilustración 9A.1A.

Desde luego, si los productos se eliminan en forma consistente siempre que quedan fuera de las especificaciones, la curva de pérdidas se vuelve más plana en la mayor parte de los casos hasta un valor que equivale al costo de desecho en los rangos fuera de las especificaciones. Esto se debe a que, al menos en teoría, esos productos nunca se van a vender, de modo que no existe ningún costo externo para la sociedad. Sin embargo, en muchas situaciones prácticas, el proceso es capaz de producir un porcentaje muy

Límites de especificación superior e inferior o límites de tolerancia superior e inferior

Perspectivas del costo de la variabilidad

ilustración 9A.1



alto de productos dentro de las especificaciones y no se lleva a cabo una revisión del 100% o, en caso de que el proceso no pueda producir dentro de las especificaciones, se realiza una revisión del 100% y es posible volver a trabajar en los productos que no cumplen con las especificaciones a fin de que queden dentro del rango. En cualquiera de estas situaciones, la función de la pérdida casi siempre es una suposición razonable.

En las dos secciones siguientes, se analizan dos conceptos: la capacidad del proceso y las gráficas de control. La capacidad del proceso se relaciona con la eficiencia del proceso al fabricar las piezas cuando funciona de manera apropiada. Las gráficas de control se utilizan para verificar en forma continua que el proceso funcione de manera apropiada.

CAPACIDAD DEL PROCESO

Taguchi argumenta que el hecho de estar dentro de la tolerancia no es una decisión de sí o no, sino una función continua. Por otra parte, los expertos en calidad de Motorola señalan que el proceso utilizado para producir un bien o prestar un servicio debe ser tan eficiente que la probabilidad de generar un defecto es muy, muy baja. Motorola hizo famosos la capacidad de los procesos y el diseño de productos con la adopción de los límites Six-Sigma. Al diseñar una pieza, se especifica que ciertas dimensiones deben estar dentro de los límites de especificación superior e inferior.

Como ejemplo sencillo, se supone que se va a diseñar un cojinete para un eje gíatorio, es decir, el eje para las llantas de un auto. Hay muchas variables involucradas tanto en el cojinete como en el eje; por ejemplo, el ancho del cojinete, el tamaño de los rodillos, el tamaño del eje, el largo del eje, cómo está sujeto, etc. El diseñador especifica las tolerancias para cada una de estas variables con el fin de garantizar que las piezas se van a ensamblar de manera apropiada. Suponga que en un principio se selecciona un diseño y que el diámetro del cojinete se establece en 1.250 pulgadas \pm 0.005 pulgadas. Esto significa que las piezas aceptables deberán tener un diámetro que varía entre 1.245 y 1.255 pulgadas (que son los límites de tolerancia superior e inferior).

A continuación, se toma en consideración el proceso con el cual se va a fabricar el cojinete. Se pueden elegir varios procesos diferentes para producir el cojinete. Por lo regular, hay sacrificios que es necesario considerar al diseñar un proceso para fabricar una pieza. Por ejemplo, es probable que el proceso sea muy rápido pero no muy constante, o por el contrario, puede ser lento pero muy constante. La constancia de un proceso para producir un cojinete se puede medir de acuerdo con la desviación estándar de la medida del diámetro. Se puede hacer una prueba con la manufactura de, por decir, 100 cojinetes y medir el diámetro de cada cojinete de la muestra.

Después de realizar la prueba, se descubre que el diámetro promedio o medio es de 1.250 pulgadas. Otra forma de decir lo anterior es que el proceso está “centrado” justo



Dow Chemical Company adoptó los procesos Six-Sigma para lograr la excelencia reduciendo los defectos en sus productos, procesos y servicios.

en medio de los límites de especificación superior e inferior. En realidad, podría ser muy difícil tener un proceso perfectamente centrado como en el ejemplo. Por decir, que los valores del diámetro tienen una desviación estándar o sigma igual a 0.002 pulgadas. Lo que esto significa es que el proceso no produce cojinetes exactamente del mismo tamaño.

Como se verá más adelante en este capítulo, por lo general se vigila un proceso utilizando gráficas de control, de modo que si se empiezan a producir cojinetes que se encuentran a más de tres desviaciones estándar (± 0.006 pulgadas) por encima o por debajo de 1.250 pulgadas el proceso se interrumpe. Esto significa que se producen piezas que varían entre 1.244 (es decir, $1.250 - 3 \times 0.002$) y 1.256 (es decir, $1.250 + 3 \times 0.002$) pulgadas. Los límites 1.244 y 1.256 se consideran los límites más alto y más bajo del proceso. Se debe tener cuidado y no confundir la terminología. Los límites del “proceso” se relacionan con cuán consistente es el proceso para fabricar los cojinetes. Al manejar el proceso, el objetivo es mantenerlo a más o menos tres desviaciones estándar de la media. Los límites de las “especificaciones” se relacionan con el diseño de la pieza. Cabe recordar que, desde el punto de vista del diseño, las piezas aceptables tienen un diámetro entre 1.245 y 1.255 pulgadas (que son los límites de especificación mínimo y máximo).

Como se puede ver, los límites de proceso son ligeramente mayores que las especificaciones que el diseñador dio. Esto no es correcto porque se producirán piezas que no cumplen con las especificaciones. Las compañías con procesos Six-Sigma insisten en que el proceso de fabricación de una pieza sea capaz de operar de modo que los límites de las especificaciones del diseño se encuentren a seis desviaciones estándar de la media del proceso. Para el proceso de manufactura de los cojinetes, ¿qué tan pequeña debe ser la desviación estándar con el fin de que el proceso tenga una capacidad Six-Sigma? Cabe recordar que la especificación de diseño es de 1.250 pulgadas más o menos 0.005 pulgadas. Si se piensa un poco, esas 0.005 pulgadas deben tener una relación con la variación en el proceso. Al dividir 0.005 pulgadas entre 6, que es igual a 0.00083, se puede determinar la desviación estándar de nuestro proceso para un proceso Six-Sigma. De modo que, para que éste tenga una capacidad Six-Sigma, el diámetro medio producido necesita ser exactamente de 1.250 pulgadas y la desviación estándar del proceso debe ser menor o igual a 0.00083 pulgadas.

Es probable que, en este punto, haya confusión respecto a la simple idea de Six-Sigma. Por ejemplo, ¿por qué la compañía no revisa el diámetro de cada cojinete y desecha los que tienen un diámetro menor que 1.245 o mayor que 1.255? Esto sin duda se podría hacer y para muchas piezas sí se realiza una prueba del 100%. El problema es que, para una compañía que produce miles de piezas cada hora, probar cada una de las dimensiones críticas de cada pieza puede ser muy costoso. Para los cojinetes, hay con facilidad 10 o más dimensiones críticas además del diámetro y habría que revisar todas y cada una de ellas. Con la estrategia de la prueba del 100%, ¿la compañía pasaría más tiempo probando las piezas que el que invierte en fabricarlas! Por esta razón, una compañía emplea pequeñas muestras para revisar en forma periódica que el proceso se encuentre en control estadístico. Más adelante en este mismo capítulo, se estudia exactamente cómo funciona el muestreo estadístico.

Se dice que un proceso es *capaz* cuando la media y la desviación estándar son operativas, de modo que los límites de control más alto y más bajo son aceptables en relación con los límites de las especificaciones superior e inferior. Considere el diagrama A en la ilustración 9A.2. Representa la distribución de la dimensión del diámetro de los cojinetes en el proceso original. El promedio o valor medio es 1.250 y las especificaciones de diseño más baja y más alta son 1.245 y 1.255, respectivamente. Los límites de control del proceso son más y menos tres desviaciones estándar (1.244 y 1.256). Existe una probabilidad (las áreas rojas) de producir piezas defectuosas.

Si se mejora el proceso reduciendo la desviación estándar relacionada con el diámetro de los cojinetes, la probabilidad baja. El diagrama B en la ilustración 9A.2 muestra un nuevo proceso en el que la desviación estándar disminuyó a 0.00083 (el área naranja). Aun cuando no se ve en el diagrama, existe cierta probabilidad de que se produzca un defecto en este nuevo proceso, pero es muy, muy pequeña.

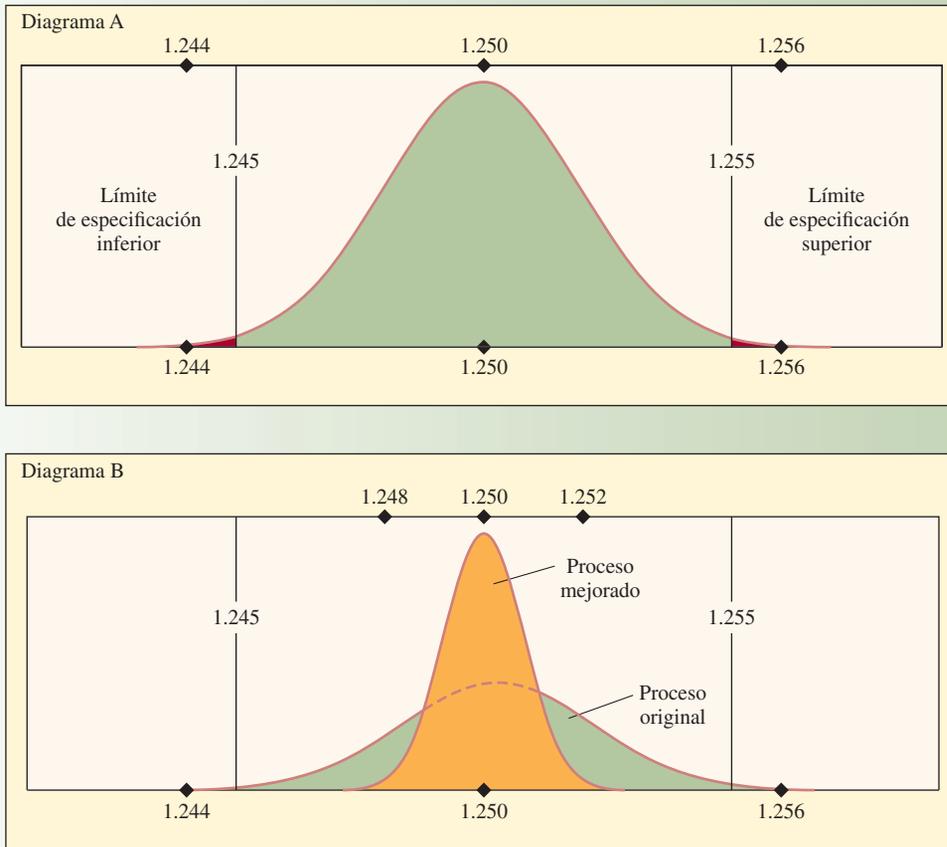
Suponga que el valor central o media del proceso se aleja de la media. La ilustración 9A.3 muestra la media con una desviación estándar más cerca del límite más alto de las especificaciones. Desde luego, esto da lugar a un número ligeramente más alto de defectos esperados, pero se ve que el proceso es todavía muy bueno. Se usa el *índice de capacidad* para medir la eficiencia en la producción del proceso en relación con las tolerancias de diseño. En la siguiente sección se describe la forma de calcular este índice.

ÍNDICE DE CAPACIDAD (C_{pk})

El *índice de capacidad* (C_{pk}) muestra la eficiencia con la que las piezas producidas entran en el rango que los límites de diseño especifican. Si estos límites son más altos que las tres sigmas permitidas en el proceso, la media del proceso puede alejarse del centro antes del reajuste y se seguirá produciendo un alto porcentaje de piezas buenas.

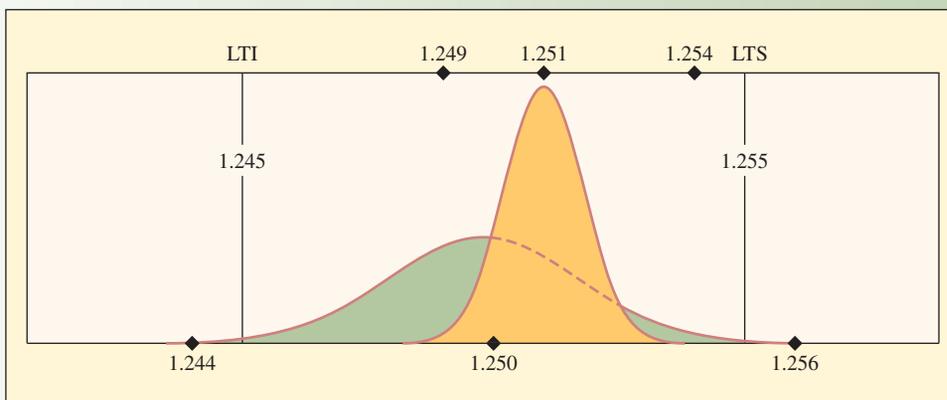
Capacidad del proceso

ilustración 9A.2



Capacidad del proceso con un cambio en la media del proceso

ilustración 9A.3



De acuerdo con las ilustraciones 9A.2 y 9A.3, el índice de capacidad (C_{pk}) es la posición de la media y las colas del proceso en relación con las especificaciones de diseño. Mientras más alejados del centro, mayor será la probabilidad de producir piezas defectuosas.

Como la media del proceso puede cambiar en cualquier dirección, la dirección del cambio y su distancia de la especificación de diseño establecen el límite en la capacidad del proceso. La dirección del cambio es hacia el número más pequeño.



De manera formal, el índice de capacidad (C_{pk}) se calcula como el número más pequeño como sigue:

$$[9A.3] \quad C_{pk} = \min \left[\frac{\bar{X} - LTI}{3\sigma} \text{ o } \frac{LTS - \bar{X}}{3\sigma} \right]$$

Según la ilustración 9A.3, el proceso se centra en 1.251 y $\sigma = 0.00083$ (σ es el símbolo de la desviación estándar).

$$C_{pk} = \min \left[\frac{1.251 - 1.245}{3(.00083)} \text{ o } \frac{1.255 - 1.251}{3(.00083)} \right]$$

$$= \min \left[\frac{.006}{.00249} \text{ o } \frac{.004}{.00249} \right]$$

$$C_{pk} = \min [2.4 \text{ o } 1.6]$$

$C_{pk} = 1.6$, que es el número menor.

Esto indica que la media del proceso cambió a la derecha de manera similar a la ilustración 9A.3, pero las piezas se encuentran dentro de los límites del diseño.

En ocasiones, resulta útil calcular la probabilidad real de producir un defecto. Suponiendo que el proceso produce con una desviación estándar constante, se trata de un cálculo muy sencillo, sobre todo si se tiene acceso a una hoja de cálculo. La estrategia consiste en calcular la probabilidad de producir una pieza que quede fuera de los límites de diseño superior e inferior dadas la media y la desviación estándar del proceso.

Según el ejemplo, donde el proceso no está centrado, con una media de 1.251 pulgadas, $\sigma = 0.00083$, $LTI = 1.245$ y $LTS = 1.255$, primero se debe de calcular el valor Z asociado con los límites de tolerancia (especificación) superior e inferior. Hay que recordar, con base en el estudio de las estadísticas, que el valor Z es la desviación estándar ya sea a la derecha o a la izquierda de cero en una distribución de la probabilidad.

$$Z_{LTI} = \frac{LTI - \bar{X}}{\sigma} \quad Z_{LTS} = \frac{LTS - \bar{X}}{\sigma}$$

Para este ejemplo,

$$Z_{LTI} = \frac{1.245 - 1.251}{.00083} = -7.2289 \quad Z_{LTS} = \frac{1.255 - 1.251}{.00083} = 4.8193$$

Una forma fácil de obtener las probabilidades asociadas con estos valores Z es usar la función NORMSDIST integrada en Excel (también puede utilizar la tabla en el apéndice G). El formato para esta función es NORMSDIST(Z), donde Z es el valor Z calculado anteriormente. Excel regresa los valores siguientes. (Se descubrió que probablemente se obtengan resultados un tanto diferentes de los proporcionados aquí, dependiendo de la versión de Excel que se use.)

$$\text{DISTR.NORM.ESTAND} (-7.2289) = 2.43461\text{E-}13 \text{ y } \text{DISTR.NORM.ESTAND} (4.8193) = 0.99999928$$

La interpretación de esta información requiere de entender exactamente lo que la función DISTR.NORM.ESTAND proporciona. DISTR.NORM.ESTAND da la probabilidad acumulada a la izquierda del valor Z dado. Como $Z = 7.2289$ es el número de desviaciones estándar relacionadas con el límite de especificación más bajo, la fracción de las piezas que se van a producir en un nivel más bajo que éste es 2.43461E-13. Esta cifra se encuentra en una notación científica, y E-13 al final significa que se debe mover el punto decimal trece lugares para obtener la fracción real de piezas defectuosas. De modo que esta fracción es 0.0000000000024361, ¡un número muy bajo! De manera similar, se observa que aproximadamente 0.99999928 de las piezas quedarán por debajo del límite de especificación más alto. Lo que en realidad interesa es la fracción que quedará sobre este límite, ya que es el número de piezas defectuosas. Esta fracción de defectos sobre la especificación más baja es $1 - 0.99999928 = 0.00000082$ de las piezas.

Al sumar estas dos fracciones de piezas defectuosas, se tiene 0.00000082000024361. Esto se puede interpretar como que sólo se espera que alrededor de 0.82 piezas por millón sean defectuosas. Es evidente

que se trata de un gran proceso. Pero cuando se solucionen los problemas del final del capítulo, se notará que no siempre es así.

EJEMPLO 9A.1

El gerente de aseguramiento de la calidad evalúa la capacidad de un proceso que inserta grasa presurizada en una lata de aerosol. Las especificaciones de diseño requieren de una presión promedio de 60 libras por pulgada cuadrada (psi) en cada lata con un límite de tolerancia superior de 65 psi y uno inferior de 55 psi. Se toma una muestra de la producción y se descubre que las latas tienen un promedio de 61 psi con una desviación estándar de 2 psi. ¿Cuál es la capacidad del proceso? ¿Cuál es la probabilidad de producir un defecto?

SOLUCIÓN

Paso 1: Interpretar los datos del problema

$$LTI = 55 \quad LTS = 65 \quad \bar{X} = 61 \quad \sigma = 2$$

Paso 2: Calcular el C_{pk}

$$C_{pk} = \min \left[\frac{\bar{X} - LTI}{3\sigma}, \frac{LTS - \bar{X}}{3\sigma} \right]$$

$$C_{pk} = \min \left[\frac{61 - 55}{3(2)}, \frac{65 - 61}{3(2)} \right]$$

$$C_{pk} = \min [1, .6667] = .6667$$

Paso 3: Calcular la probabilidad de producir un defecto

Probabilidad de una lata con menos de 55 psi

$$Z = \frac{X - \bar{X}}{\sigma} = \frac{55 - 61}{2} = -3$$

$$\text{DISTR.NORM.ESTAND}(-3) = 0.001349898$$

Probabilidad de una lata con más de 65 psi

$$Z = \frac{X - \bar{X}}{\sigma} = \frac{65 - 61}{2} = 2$$

$$1 - \text{DISTR.NORM.ESTAND}(2) = 1 - 0.977249868 = 0.022750132$$

Probabilidad de una lata con menos de 55 psi o más de 65 psi

$$\text{Probabilidad} = 0.001349898 + 0.022750132 = 0.024100030$$

O aproximadamente 2.4% de las latas estarán defectuosas. ●

La tabla siguiente es una referencia rápida para la fracción de unidades defectuosas para diversos límites de diseño (expresados en desviaciones estándar). Esta tabla supone que la desviación estándar es constante y que el proceso está centrado exactamente entre los límites de diseño.

| LÍMITES DE DISEÑO | PIEZAS DEFECTUOSAS | FRACCIÓN DE DEFECTOS |
|-------------------|---------------------------|----------------------|
| $\pm 1\sigma$ | 317 por cada mil | .3173 |
| $\pm 2\sigma$ | 45 por cada mil | .0455 |
| $\pm 3\sigma$ | 2.7 por cada mil | .0027 |
| $\pm 4\sigma$ | 63 por cada millón | .000063 |
| $\pm 5\sigma$ | 574 por cada mil millones | .00000574 |
| $\pm 6\sigma$ | 2 por cada mil millones | .00000002 |

El límite de diseño de Six-Sigma de Motorola con un cambio del proceso de 1.5σ fuera de la media ($C_{pk} = 1.5$) da 3.4 defectos por cada millón. Si la media se encuentra exactamente en el centro ($C_{pk} = 2$), entonces se esperan 2 defectos por cada *mil millones*, como muestra la tabla anterior.

PROCEDIMIENTOS DE CONTROL DE PROCESOS

Control estadístico de procesos (CEP)

Atributos



Administración interactiva de operaciones

El control de procesos se ocupa de vigilar la calidad *mientras se produce el producto o servicio*. Los objetivos típicos de los planes de control de procesos son proporcionar información oportuna sobre si los artículos producidos en ese momento cumplen con las especificaciones de diseño y detectar cambios en el proceso que indiquen que es probable que los productos *futuros* no cumplan con esas especificaciones. El **control estadístico de procesos (CEP)** comprende probar una muestra aleatoria de la producción de un proceso para determinar si éste produce artículos que están dentro del rango preseleccionado.

Todos los ejemplos dados hasta el momento se basan en características de calidad (o *variables*) que es posible medir, como el diámetro o el peso de una pieza. Los **atributos** son características de calidad que se clasifican como que cumplen o no cumplen con la especificación. Los productos o servicios se pueden observar como buenos o malos, como que funcionan bien o funcionan mal. Por ejemplo, una podadora de césped funciona o no; alcanza cierto nivel de torque y caballos de fuerza o no lo hace. Este tipo de medición se conoce como muestreo por atributos. De manera alternativa, el torque y los caballos de fuerza de una podadora se pueden medir como una cantidad de desviación de un estándar establecido. Este tipo de medición se conoce como muestreo por variables. La sección siguiente describe algunos enfoques estándar para controlar procesos: primero un enfoque útil para medir atributos y luego un enfoque para medir variables. Ambas técnicas resultan en la elaboración de gráficas de control. La ilustración 9A.4 muestra algunos ejemplos de la forma de analizar las gráficas de control para entender la operación de un proceso.

CONTROL DE PROCESOS CON MEDICIONES DE ATRIBUTOS:

USO DE GRÁFICAS P

La medición por atributos significa tomar muestras y tomar una sola decisión: el artículo es bueno o es malo. Como se trata de una decisión de sí o no, se utiliza la estadística simple para crear una gráfica *p* con un límite de control superior (LCS) y un límite de control inferior (LCI). Se pueden trazar estos límites de control en una gráfica y luego representar la fracción de defectos de cada una de las muestras probadas. Se supone que el proceso funciona de manera correcta cuando las muestras, que se toman periódicamente durante el día, permanecen entre los límites de control.

$$[9A.4] \quad \bar{p} = \frac{\text{Número total de defectos de todas las muestras}}{\text{Número de muestras} \times \text{Tamaño de la muestra}}$$

$$[9A.5] \quad s_p = \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$$

$$[9A.6] \quad \text{LCS} = \bar{p} + z s_p$$

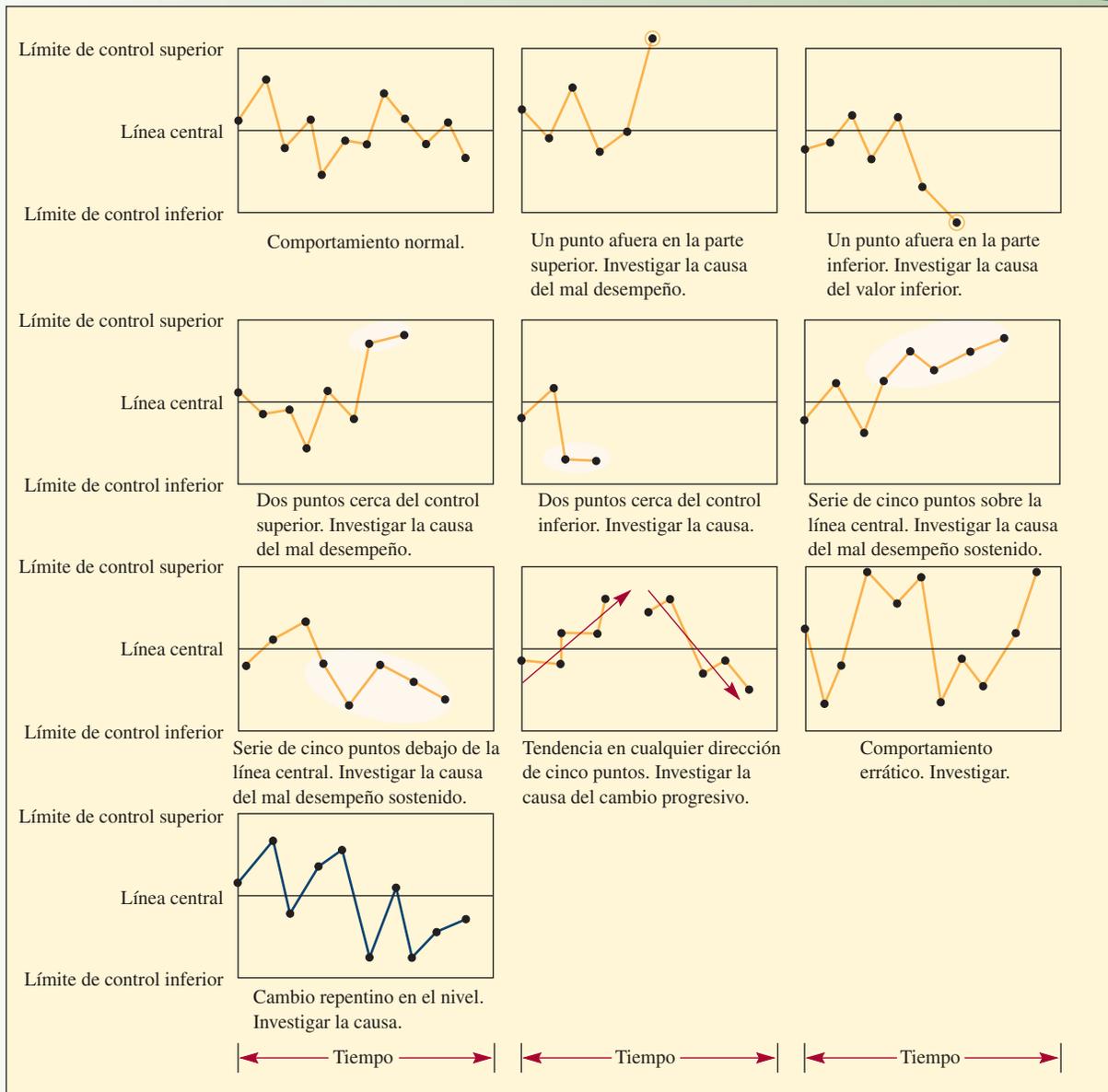
$$[9A.7] \quad \text{LCI} = \bar{p} - z s_p$$

donde \bar{p} es la fracción defectuosa, s_p es la desviación estándar, n es el tamaño de la muestra y z es el número de desviaciones estándar para una confianza específica. Por lo general, se usa $z = 3$ (99.7% de confianza) o $z = 2.58$ (99% de confianza).

Tamaño de la muestra El tamaño de la muestra debe ser suficientemente grande para permitir el conteo del atributo. Por ejemplo, si una máquina produce 1% de defectos, una muestra de cinco unidades, pocas veces capturaría un defecto. Una regla práctica al crear una gráfica *p* es hacer que la muestra tenga el tamaño suficiente para esperar contar el atributo dos veces en cada muestra. De modo que, si el índice aproximado de defectos es 1%, el tamaño de la muestra apropiado sería de 200 unidades.

Gráfica de control de evidencias para una investigación

ilustración 9A.4



Una nota final: En los cálculos mostrados en las ecuaciones 9A.4 a 9A.7, la suposición es que el tamaño de la muestra es fijo. El cálculo de la desviación estándar depende de esta suposición. Si el tamaño de la muestra varía, es necesario volver a calcular la desviación estándar y los límites de control más alto y más bajo para cada muestra.

EJEMPLO 9A.2: Diseño de gráficas de control

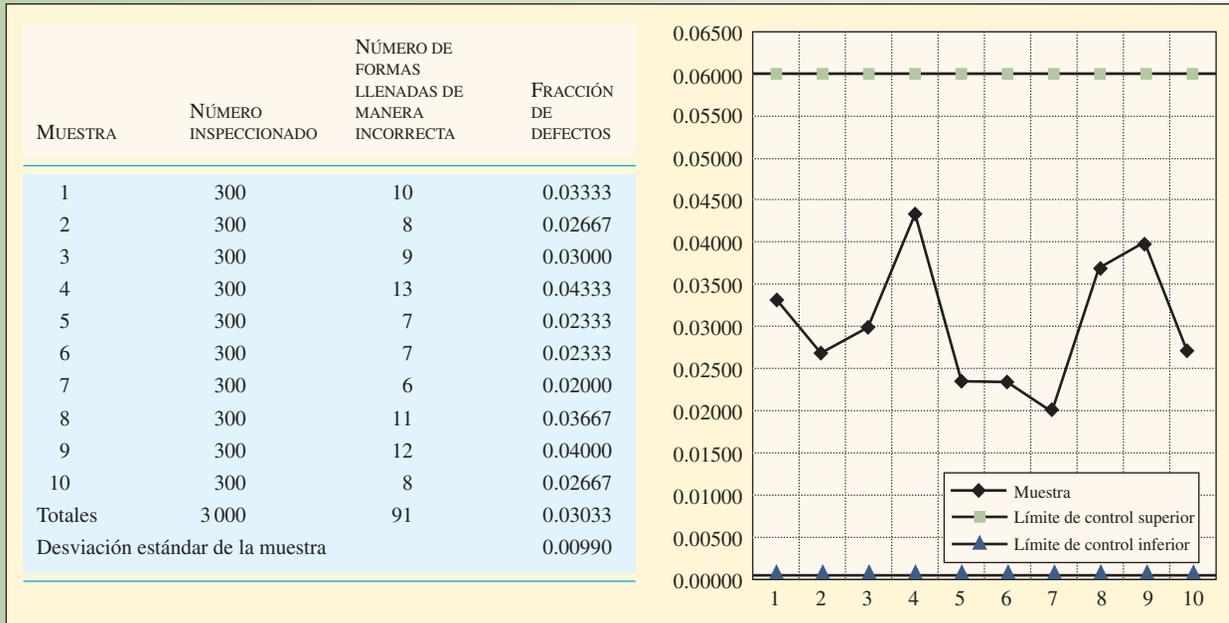
Una compañía de seguros quiere diseñar una gráfica de control para vigilar si las formas de cobro de los seguros se llenan de manera correcta. La compañía quiere usar la gráfica para saber si las mejoras en el diseño de la forma son efectivas. Para iniciar el proceso, la empresa recopila la información sobre el número de formas llenadas de manera incorrecta durante los últimos 10 días. La compañía de seguros procesa miles de estas formas al día y, debido al alto costo de inspeccionar cada forma, sólo se recopila una pequeña muestra representativa cada día. Los datos y el análisis se muestran en la ilustración 9A.5.



Servicio

ilustración 9A.5

Forma de cobro de la compañía de seguros

**SOLUCIÓN**

Para elaborar la gráfica de control, primero se debe calcular la fracción general de defectos de todas las muestras. Ésta constituye la línea central para la gráfica de control.

$$\bar{p} = \frac{\text{Número total de defectos de todas las muestras}}{\text{Número de muestras} \times \text{Tamaño de la muestra}} = \frac{91}{3\,000} = 0.03033$$

A continuación, se calcula la desviación estándar de la muestra:

$$s_p = \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} = \sqrt{\frac{0.03033(1-0.03033)}{300}} = 0.00990$$

Por último, calcule los límites de control más alto y más bajo. Un valor z de 3 da 99.7% de confianza en que el proceso se encuentra dentro de estos límites.

$$\text{LCL} = \bar{p} + 3s_p = 0.03033 + 3(0.00990) = 0.06003$$

$$\text{LCI} = \bar{p} - 3s_p = 0.03033 - 3(0.00990) = 0.00063$$

Los cálculos en la ilustración 9A.5, con la gráfica de control, se incluyen en la hoja de cálculo SPC.xls. ●



Excel: SPC.xls

CONTROL DE PROCESOS CON MEDICIONES DE VARIABLES:**USO DE GRÁFICAS \bar{X} Y R**

Las gráficas \bar{X} y R (de rango) se utilizan con frecuencia en el control estadístico del proceso.

En el muestreo por atributos, se determina si algo es bueno o malo, si queda bien o no; se trata de una situación de seguir o no. Sin embargo, en la medición de **variables**, se mide el peso, volumen, número de pulgadas o cualquier otra variable real, y se desarrollan gráficas de control para determinar el grado de aceptación o rechazo del proceso, con base en esas mediciones. Por ejemplo, en el muestreo por atributos, podría decidirse si se rechaza algo que pesa más de 10 libras y se acepta algo que pesa menos de 10 libras. En el muestreo por variables, se mide una muestra y se registran pesos de 9.8 libras o 10.2 libras.

Variables



Un supervisor y un entrenador de equipo examinan unas gráficas de control de procesos en la línea de ensamble del Ford Fiesta en Cologne-Niehl, Alemania.

Estos valores se usan para crear o modificar las gráficas de control y saber si se encuentran dentro de los límites aceptables.

Hay cuatro aspectos principales que es necesario tomar en cuenta al crear una gráfica de control: el tamaño de las muestras, el número de muestras, la frecuencia de las muestras y los límites de control.

Tamaño de las muestras Para las aplicaciones industriales en el control de procesos que comprende la medición de variables, es preferible que las muestras sean pequeñas. Existen dos razones principales para lo anterior. En primer lugar, es necesario tomar la muestra en un periodo razonable; de lo contrario, es probable que el proceso cambie mientras se toman las muestras. Y en segundo, mientras más grande sea la muestra, costará más tomarla.

Al parecer, el tamaño de las muestras preferido es de cuatro o cinco unidades. Las *medias* de las muestras de este tamaño tienen una distribución aproximadamente normal, sin importar cuál sea la distribución de la población principal. Las muestras mayores de cinco dan límites de control más estrechos y, por lo tanto, mayor sensibilidad. De hecho, para detectar las variaciones más finas de un proceso, quizá sea necesario utilizar muestras más extensas. Sin embargo, cuando el tamaño de las muestras excede las 15 unidades más o menos, será mejor usar gráficas \bar{X} con desviación estándar σ , en lugar de gráficas \bar{X} con el rango R , como en el ejemplo 9A.3.

Número de muestras Una vez creada la gráfica, es posible comparar cada muestra tomada con la gráfica y tomar una decisión sobre si el proceso es aceptable. Sin embargo, para elaborar las gráficas, la prudencia y las estadísticas sugieren que se tomen alrededor de 25 muestras.

Frecuencia de las muestras La frecuencia con la que es necesario tomar una muestra depende del costo del muestreo (además del costo de la unidad en caso de que ésta se destruya como parte de la prueba) y el beneficio de ajustar el sistema. Por lo regular, es mejor empezar con el muestreo frecuente de un proceso y distanciar poco a poco las muestras conforme aumenta la confianza en el proceso. Por ejemplo, se puede empezar con una muestra de cinco unidades cada media hora y terminar con la sensación de que una muestra al día es adecuada.

Límites de control Una práctica estándar, en el control estadístico del proceso para las variables, es establecer límites de control tres desviaciones estándar sobre la media y tres desviaciones estándar debajo de ésta. Esto significa que se espera que 99.7% de las medias de la muestra caigan dentro de los límites de control (es decir, en un intervalo de confianza de 99.7%). De ahí que, si la media de una muestra cae fuera de esta banda ancha obvia, se obtienen evidencias importantes de que el proceso está fuera de control.

CÓMO TRAZAR GRÁFICAS \bar{X} Y R

Si se conoce la desviación estándar de la distribución del proceso, es posible definir la gráfica \bar{X} :

$$\text{[9A.8]} \quad \text{LCS}_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + z s_{\bar{X}} \quad \text{y} \quad \text{LCI}_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - z s_{\bar{X}}$$

donde

$S_{\bar{X}} = s/\sqrt{n}$ = Desviación estándar de las medias de la muestra

s = 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 predeterminado para el proceso

z = Número de desviaciones estándar para un nivel de confianza específico (por lo regular, $z = 3$)

Una gráfica \bar{X} es simplemente un diagrama de las medias de las muestras tomadas de un proceso. $\bar{\bar{X}}$ es el promedio de las medias.

En la práctica, no se conoce la desviación estándar de un proceso. Por esta razón, casi siempre se emplea información real sobre la muestra. La sección siguiente describe este enfoque práctico.

Una gráfica R es un diagrama del rango dentro de cada muestra. Este rango es la diferencia entre los números más altos y más bajos en esa muestra. Los valores R proporcionan una medida de la variación que se calcula con facilidad y se utiliza como una desviación estándar. Una gráfica \bar{R} es el promedio del rango de cada muestra. Definidos de manera más específica, éstos son

$$\text{[Igual que 9A.1]} \quad \bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

donde

$\bar{\bar{X}}$ = Media de la muestra

i = Número de artículos

n = Número total de artículos en la muestra

$$\text{[9A.9]} \quad \bar{\bar{R}} = \frac{\sum_{j=1}^m R_j}{m}$$

donde

$\bar{\bar{R}}$ = El promedio de las medias de las muestras

j = Número de muestras

m = Número total de muestras

$$\text{[9A.10]} \quad \bar{\bar{R}} = \frac{\sum_{j=1}^m R_j}{m}$$

donde

R_j = Diferencia entre las medidas más alta y más baja en la muestra

$\bar{\bar{R}}$ = Promedio de las diferencias en las mediciones R para todas las muestras

E. L. Grant y R. Leavenworth calcularon una tabla (ilustración 9A.6) que permite calcular con facilidad los límites de control superior e inferior tanto para la gráfica \bar{X} como para la gráfica R .¹ Éstos se definen como

$$\text{[9A.11]} \quad \text{Límite de control superior para } \bar{X} = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{\bar{R}}$$

Factor para determinar a partir de \bar{R} los tres límites de control sigma para las gráficas \bar{X} y R

ilustración 9A.6

| NÚMERO DE OBSERVACIONES EN EL SUBGRUPO n | FACTOR PARA LA GRÁFICA \bar{X} A_2 | FACTORES PARA LA GRÁFICA R | |
|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | LÍMITE DE CONTROL INFERIOR D_3 | LÍMITE DE CONTROL SUPERIOR D_4 |
| 2 | 1.88 | 0 | 3.27 |
| 3 | 1.02 | 0 | 2.57 |
| 4 | 0.73 | 0 | 2.28 |
| 5 | 0.58 | 0 | 2.11 |
| 6 | 0.48 | 0 | 2.00 |
| 7 | 0.42 | 0.08 | 1.92 |
| 8 | 0.37 | 0.14 | 1.86 |
| 9 | 0.34 | 0.18 | 1.82 |
| 10 | 0.31 | 0.22 | 1.78 |
| 11 | 0.29 | 0.26 | 1.74 |
| 12 | 0.27 | 0.28 | 1.72 |
| 13 | 0.25 | 0.31 | 1.69 |
| 14 | 0.24 | 0.33 | 1.67 |
| 15 | 0.22 | 0.35 | 1.65 |
| 16 | 0.21 | 0.36 | 1.64 |
| 17 | 0.20 | 0.38 | 1.62 |
| 18 | 0.19 | 0.39 | 1.61 |
| 19 | 0.19 | 0.40 | 1.60 |
| 20 | 0.18 | 0.41 | 1.59 |

Límite de control superior para $\bar{X} = LCS_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R}$
 Límite de control inferior para $\bar{X} = LCI_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}$
 Límite de control superior para $R = LCS_R = D_4 \bar{R}$
 Límite de control inferior para $R = LCI_R = D_3 \bar{R}$



Excel: SPC.xls

Nota: Todos los factores se basan en la distribución normal.

[9A.12] Límite de control inferior para $\bar{X} = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}$

[9A.13] Límite de control superior para $R = D_4 \bar{R}$

[9A.14] Límite de control inferior para $R = D_3 \bar{R}$

EJEMPLO 9A.3: Gráficas \bar{X} y R

Se quiere trazar gráficas \bar{X} y R para un proceso. La ilustración 9A.7 muestra las medidas para las 25 muestras. Las dos últimas columnas muestran el promedio de la muestra \bar{X} y el rango R .

Los valores para A_2 , D_3 y D_4 se obtuvieron de la ilustración 9A.6.

$$\text{Límite de control superior para } \bar{X} = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R} = 10.21 + 0.58(0.60) = 10.56$$

$$\text{Límite de control inferior para } \bar{X} = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R} = 10.21 - 0.58(0.60) = 9.86$$

$$\text{Límite de control superior para } R = D_4 \bar{R} = 2.11(0.60) = 1.27$$

$$\text{Límite de control inferior para } R = D_3 \bar{R} = 0(0.60) = 0$$

ilustración 9A.7

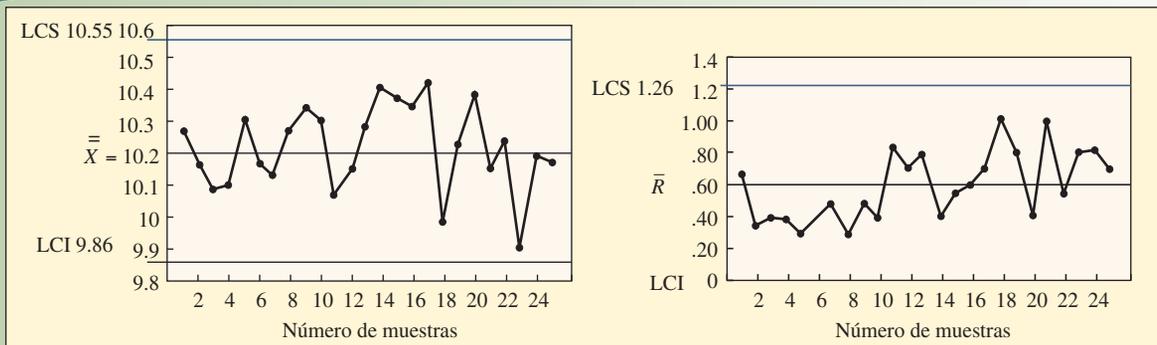
Medidas en las muestras de cinco unidades de un proceso

| NÚMERO DE MUESTRAS | CADA UNIDAD EN UNA MUESTRA | | | | | PROMEDIO \bar{X} | RANGO R |
|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|------------------|
| 1 | 10.60 | 10.40 | 10.30 | 9.90 | 10.20 | 10.28 | .70 |
| 2 | 9.98 | 10.25 | 10.05 | 10.23 | 10.33 | 10.17 | .35 |
| 3 | 9.85 | 9.90 | 10.20 | 10.25 | 10.15 | 10.07 | .40 |
| 4 | 10.20 | 10.10 | 10.30 | 9.90 | 9.95 | 10.09 | .40 |
| 5 | 10.30 | 10.20 | 10.24 | 10.50 | 10.30 | 10.31 | .30 |
| 6 | 10.10 | 10.30 | 10.20 | 10.30 | 9.90 | 10.16 | .40 |
| 7 | 9.98 | 9.90 | 10.20 | 10.40 | 10.10 | 10.12 | .50 |
| 8 | 10.10 | 10.30 | 10.40 | 10.24 | 10.30 | 10.27 | .30 |
| 9 | 10.30 | 10.20 | 10.60 | 10.50 | 10.10 | 10.34 | .50 |
| 10 | 10.30 | 10.40 | 10.50 | 10.10 | 10.20 | 10.30 | .40 |
| 11 | 9.90 | 9.50 | 10.20 | 10.30 | 10.35 | 10.05 | .85 |
| 12 | 10.10 | 10.36 | 10.50 | 9.80 | 9.95 | 10.14 | .70 |
| 13 | 10.20 | 10.50 | 10.70 | 10.10 | 9.90 | 10.28 | .80 |
| 14 | 10.20 | 10.60 | 10.50 | 10.30 | 10.40 | 10.40 | .40 |
| 15 | 10.54 | 10.30 | 10.40 | 10.55 | 10.00 | 10.36 | .55 |
| 16 | 10.20 | 10.60 | 10.15 | 10.00 | 10.50 | 10.29 | .60 |
| 17 | 10.20 | 10.40 | 10.60 | 10.80 | 10.10 | 10.42 | .70 |
| 18 | 9.90 | 9.50 | 9.90 | 10.50 | 10.00 | 9.96 | 1.00 |
| 19 | 10.60 | 10.30 | 10.50 | 9.90 | 9.80 | 10.22 | .80 |
| 20 | 10.60 | 10.40 | 10.30 | 10.40 | 10.20 | 10.38 | .40 |
| 21 | 9.90 | 9.60 | 10.50 | 10.10 | 10.60 | 10.14 | 1.00 |
| 22 | 9.95 | 10.20 | 10.50 | 10.30 | 10.20 | 10.23 | .55 |
| 23 | 10.20 | 9.50 | 9.60 | 9.80 | 10.30 | 9.88 | .80 |
| 24 | 10.30 | 10.60 | 10.30 | 9.90 | 9.80 | 10.18 | .80 |
| 25 | 9.90 | 10.30 | 10.60 | 9.90 | 10.10 | 10.16 | .70 |
| | | | | | | $\bar{\bar{X}} = 10.21$ | |
| | | | | | | | $\bar{R} = 0.60$ |



Excel: SPC.xls

ilustración 9A.8

Gráfica \bar{X} y gráfica R 

Excel: SPC.xls

SOLUCIÓN

La ilustración 9A.8 muestra la gráfica \bar{X} y la gráfica R con un diagrama de todas las medias de la muestra y los rangos de las muestras. Todos los puntos se encuentran dentro de los límites de control, aunque la muestra 23 está cerca del límite de control más bajo \bar{X} . ●

MUESTREO DE ACEPTACIÓN

DISEÑO DE UN PLAN DE MUESTREO SIMPLE PARA ATRIBUTOS

El muestreo de aceptación se realiza con bienes que ya existen para determinar qué porcentaje de los productos cumple con las especificaciones. Estos productos pueden ser artículos recibidos de otra compañía y evaluados por el departamento que los recibe, o también pueden ser componentes que pasaron por una etapa de procesamiento y que son evaluados por el personal de la compañía ya sea en producción o en la función de almacenamiento. El ejemplo siguiente está relacionado con la necesidad de una inspección.

El muestreo de aceptación se lleva a cabo a través de un plan de muestreo. En esta sección, se ilustran los procedimientos de planeación para un solo plan de muestreo; es decir, un plan en el que la calidad esté determinada por la evaluación de una muestra. (Es posible desarrollar otros planes que utilicen dos o más muestras. Véase J. M. Juran y F. M. Gryna, *Quality Planning and Analysis*, para un análisis de estos planes.)

EJEMPLO 9A.4: Costos para justificar la inspección

Una inspección total (de 100%) se justifica cuando el costo de la pérdida en la que se incurre por no inspeccionar es mayor que el costo de inspección. Por ejemplo, un artículo defectuoso da como resultado una pérdida de 10 dólares y el porcentaje promedio de artículos defectuosos en un lote es de 3%.

SOLUCIÓN

Si el porcentaje promedio de artículos defectuosos en un lote es de 3%, el costo esperado de los artículos defectuosos es de 0.03×10 o 0.30 dólares cada uno. Por lo tanto, si el costo de inspeccionar cada artículo es menor de 0.30 dólares, la mejor decisión es realizar una inspección de 100%. Sin embargo, no se van a eliminar todos los artículos defectuosos, porque los inspectores dejarán pasar algunos defectuosos y rechazarán algunos buenos.

El propósito de un plan de muestreo es probar el lote para 1) conocer su calidad o 2) garantizar que la calidad sea la que se supone que debe ser. Por lo tanto, si un supervisor de control de calidad ya conoce la calidad (como los 0.03 dados en el ejemplo), no realiza el muestreo para detectar los defectos. Quizá sea necesario inspeccionar todos los productos para eliminar los defectos o ninguno de ellos, y el rechazo se llevará a cabo en el proceso. La elección depende del costo de la inspección y del costo en el que se incurre por no rechazar los productos defectuosos. ●

Un plan de muestreo simple está definido por n y c , donde n es el número de unidades en la muestra y c es el número de aceptación. El tamaño de n puede variar de uno hasta todos los artículos del lote (casi siempre indicado con N) del que se toman las muestras. El número de aceptación c indica el número máximo de artículos defectuosos que se pueden encontrar en una muestra antes de rechazar el lote. Los valores para n y c se determinan mediante la interacción de cuatro factores (NCA, α , PTDL y β) que cuantifican los objetivos del fabricante del producto y su consumidor. El objetivo del fabricante es asegurarse de que el plan de muestreo tiene una probabilidad baja de rechazar lotes buenos. Los lotes se definen como de alta calidad si contienen no más de un nivel específico de defectos, lo que se conoce como *nivel de calidad aceptable* (NCA [AQL: *Acceptable Quality Level*]).² El objetivo del consumidor es asegurarse de que el plan de muestreo tiene una probabilidad baja de aceptar lotes malos. Los lotes se definen como de baja calidad si el porcentaje de defectos es mayor que una cantidad específica, lo que se conoce como *porcentaje de tolerancia de defectos en el lote* (PTDL [LTPD: *Lot Tolerance Percent Defective*]). La probabilidad asociada con el rechazo de un lote de alta calidad se indica con la letra griega alfa (α) y se conoce como *riesgo del productor*. La probabilidad relacionada con la aceptación de un lote de baja calidad se indica con la letra beta (β) y se llama *riesgo del consumidor*. La selección de valores particulares para NCA, α , PTDL y β es una decisión basada en un sacrificio de costos o, con mayor frecuencia, una política empresarial o unos requisitos contractuales.



Excel: SPC.xls



Láminas de aluminio son inspeccionadas bajo las lámparas de control de calidad en la línea de producción de aluminio de la planta de extrusión Alcoa Székesfehérvár, en Hungría.

ilustración 9A.9

Extracto de la tabla de un plan de muestreo para $\alpha = 0.05$, $\beta = 0.10$

| c | PTDL \div NCA | $n \cdot$ NCA | c | PTDL \div NCA | $n \cdot$ NCA |
|-----|-----------------|---------------|-----|-----------------|---------------|
| 0 | 44.890 | 0.052 | 5 | 3.549 | 2.613 |
| 1 | 10.946 | 0.355 | 6 | 3.206 | 3.286 |
| 2 | 6.509 | 0.818 | 7 | 2.957 | 3.981 |
| 3 | 4.890 | 1.366 | 8 | 2.768 | 4.695 |
| 4 | 4.057 | 1.970 | 9 | 2.618 | 5.426 |

Se cuenta una anécdota graciosa, supuestamente acerca de Hewlett-Packard durante una de sus primeras negociaciones con los distribuidores japoneses, quienes subrayaban la producción de alta calidad. HP había insistido en un NCA de 2% en una compra de 100 cables. Durante el acuerdo de compra, tuvo lugar una acalorada discusión en la que el distribuidor japonés no aceptaba esta especificación del NCA. HP insistió en que ellos no se moverían del 2% del NCA. El distribuidor japonés finalmente estuvo de acuerdo. Más adelante, cuando la caja llegó, había dos paquetes en su interior. Uno de ellos contenía 100 cables buenos y el otro tenía dos cables con una nota que decía: “Le enviamos 100 cables buenos, pero como usted insistió en un NCA de 2%, anexamos dos cables defectuosos en este paquete, aunque no entendemos para qué los quiere.”

El ejemplo siguiente, utilizando un extracto de una tabla de muestreo de aceptación estándar, ilustra cómo se usan los cuatro parámetros (NCA, α , PTDL y β) en el desarrollo de un plan de muestreo.

EJEMPLO 9A.5: Valores de n y c

Hi-Tech Industries fabrica escáneres de radar Z-Band, que se utilizan para detectar trampas de velocidad. Las tarjetas de circuito impreso de los escáneres se compran a un distribuidor externo. El distribuidor produce las tarjetas con un NCA de 2% y está dispuesto a correr un riesgo de 5% (α) de que se rechacen lotes con este nivel o menor número de defectos. Hi-Tech considera inaceptables los lotes con 8% o más defectos (PTDL) y quiere asegurarse de que aceptará esos lotes de baja calidad no más de 10% de las veces (β). Se acaba de entregar un envío grande. ¿Qué valores de n y c se deben seleccionar para determinar la calidad de este lote?

SOLUCIÓN

Los parámetros del problema son NCA = 0.02, $\alpha = 0.05$, PTDL = 0.08 y $\beta = 0.10$. Puede tomarse la ilustración 9A.9 para encontrar c y n .

Primero, divida PTDL entre NCA ($0.08 \div 0.02 = 4$). Luego, encuentre la razón en la columna 2 que es igual o mayor que la cantidad (4). Este valor es 4.057, que está asociado con $c = 4$.

Por último, encuentre el valor en la columna 3 que está en la misma fila que $c = 4$ y divida esa cantidad entre NCA para obtener n ($1.970 \div 0.02 = 98.5$).

El plan de muestreo apropiado es $c = 4$, $n = 99$. ●

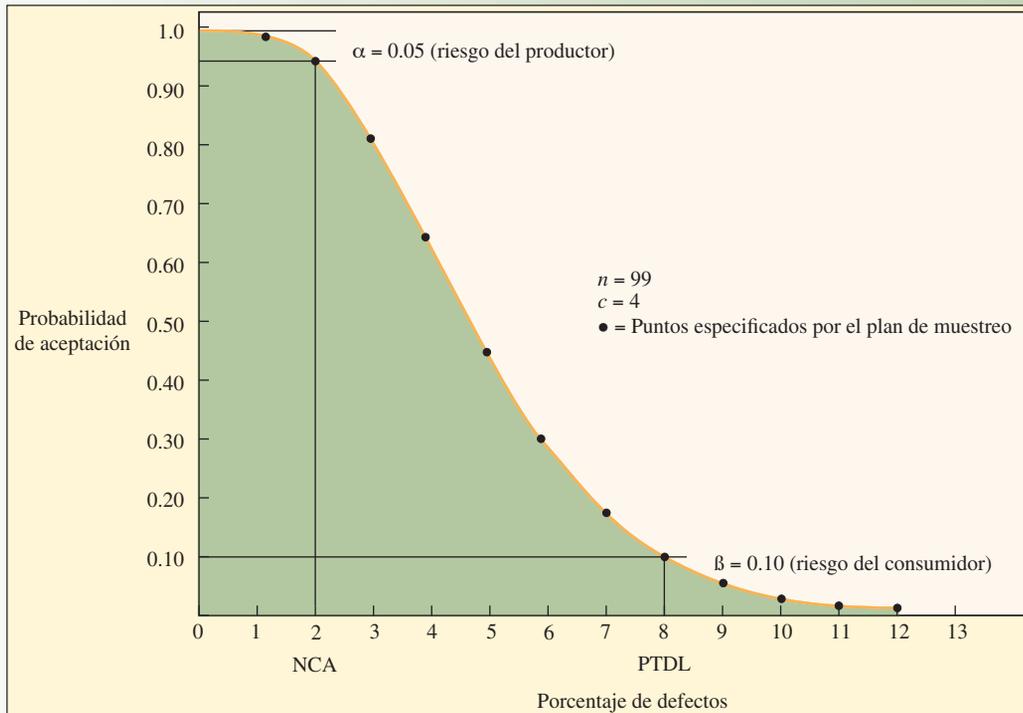
CURVAS CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS

Aun cuando un plan de muestreo como el que se acaba de describir cumple con los requisitos para los valores extremos de buena y mala calidad, todavía no se puede determinar la eficiencia del plan al discriminar entre los lotes buenos y malos con valores intermedios. Por esta razón, los planes de muestreo casi siempre se muestran en forma gráfica mediante el uso de curvas de características operativas (CO). Estas curvas, que son únicas para cada combinación de n y c , simplemente ilustran la probabilidad de aceptar lotes con diversos porcentajes de defectos. De hecho, el procedimiento que se sigue al desarrollar el plan especifica dos puntos en una curva CO: un punto definido por NCA y $1 - \alpha$ y el otro punto definido por PTDL y β . Las curvas para los valores comunes de n y c se pueden calcular u obtener de tablas disponibles.³

Cómo dar forma a la curva CO Un plan de muestreo que discrimina a la perfección entre los lotes buenos y malos tiene una pendiente infinita (vertical) en el valor seleccionado de NCA. En la ilustración 9A.10, cualquier porcentaje de defectos a la izquierda de 2% siempre sería aceptado y aquéllos a la dere-

Curva característica operativa para $NCA = 0.02$, $\alpha = 0.05$, $PTDL = 0.08$, $\beta = 0.10$

ilustración 9A.10



cha siempre serían rechazados. Sin embargo, una curva así sólo es posible con la inspección completa de todas las unidades y por lo tanto no es una posibilidad en el caso de un plan de muestreo real.

Una curva CO debe ser empinada en la región de mayor interés (entre el NCA y el PTDL), que se logra al variar n y c . Si c permanece constante, el hecho de aumentar el tamaño de la muestra n hace que la curva CO sea más vertical. En tanto que, al mantener n constante, el hecho de disminuir c (el número máximo de unidades defectuosas) también hace que la curva sea más vertical, acercándose más al origen.

Efectos del tamaño del lote El tamaño del lote del que se toma la muestra tiene un efecto relativamente bajo en la calidad de la protección. Por ejemplo, si se considera que las muestras (todas del mismo tamaño de 20 unidades) se toman de lotes diferentes que van desde un tamaño de 200 unidades hasta un lote de tamaño infinito. Si se sabe que cada lote tiene 5% de defectos, la probabilidad de aceptar el lote con base en la muestra de 20 unidades varía entre 0.34 y aproximadamente 0.36. Esto significa que mientras el tamaño del lote sea varias veces más grande que el tamaño de la muestra, en la práctica no hay ninguna diferencia en relación con el tamaño del lote. Parece algo difícil de aceptar, pero estadísticamente (en promedio a la larga), sin importar si se tiene un auto o una caja llenos de productos, se obtiene la misma respuesta. Sólo parece que un auto lleno de productos debe tener un tamaño de muestra más grande. Desde luego, con esto se supone que el lote se elige al azar y que los defectos se encuentran extendidos de manera aleatoria en todo el lote.

CONCLUSIÓN

El control estadístico de la calidad es un tema vital. La calidad se ha vuelto tan importante que se espera que los procedimientos estadísticos de calidad formen parte de todas las empresas exitosas. Los planes de muestreo y el control estadístico del proceso se toman con el énfasis hacia aspectos más amplios (como eliminar el muestreo de aceptación al lado del muelle gracias a que la calidad confiable del proveedor y el facultamiento de los empleados transforman gran parte del control de procesos). Las compa-

ñías de manufactura de clase mundial esperan que la gente entienda los conceptos básicos del material presentado en este capítulo.

VOCABULARIO BÁSICO

Variación asignable Desviación en la producción de un proceso, que es posible identificar y manejar con claridad.

Variación común Desviación en la producción de un proceso, que es aleatoria e inherente al proceso mismo.

Límites de especificación o tolerancia superior e inferior Rango de valores en una medida asociada con un proceso, que son permitidos debido al uso para el que un producto o servicio está diseñado.

Índice de capacidad (C_{pk}) Razón del rango de valores que produce un proceso, dividido entre el rango de valores permitido por la especificación de diseño.

Control estadístico de procesos (CEP) Técnicas para probar una muestra aleatoria de la producción de un proceso, para determinar si éste produce los artículos dentro de un rango definido.

Atributos Características de la calidad que se clasifican como que cumplen o no con las especificaciones.

Variables Características de la calidad que se miden en peso, volumen, pulgadas, centímetros o alguna otra medida real.

REVISIÓN DE FÓRMULAS

Media o promedio

[9A.1]

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N x_i / N$$

Desviación estándar

[9A.2]

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{N}}$$

Índice de capacidad

[9A.3]

$$C_{pk} = \min \left[\frac{\bar{X} - LTI}{3\sigma}, \frac{LTS - \bar{X}}{3\sigma} \right]$$

Gráficas de control de procesos con mediciones de atributos

[9A.4]

$$\bar{p} = \frac{\text{Número total de defectos de todas las muestras}}{\text{Número de muestras} \times \text{Tamaño de la muestra}}$$

[9A.5]

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

[9A.6]

$$LCS = \bar{p} + z s_p$$

[9A.7]

$$LCI = \bar{p} - z s_p$$

Gráficas \bar{X} y R de control de procesos

[9A.8]

$$LCS_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + z s_{\bar{X}} \quad \text{y} \quad LCI_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - z s_{\bar{X}}$$

[9A.9]

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{j=1}^m \bar{X}_j}{m}$$

[9A.10]

$$\bar{R} = \frac{\sum_{j=1}^m R_j}{m}$$

[9A.11]

Límite de control superior para $\bar{X} = \bar{\bar{X}} + A_2\bar{R}$

[9A.12]

Límite de control inferior para $\bar{X} = \bar{\bar{X}} - A_2\bar{R}$

[9A.13]

Límite de control superior para $R = D_4\bar{R}$

[9A.14]

Límite de control inferior para $R = D_3\bar{R}$

PROBLEMAS RESUELTOS

PROBLEMA RESUELTO 1

Todos los días se tomaban muestras de las formas llenas, de un departamento en particular, en una compañía de seguros para revisar la calidad del desempeño de ese departamento. Con el fin de establecer una norma tentativa para el departamento, se tomó una muestra de 100 unidades al día durante 15 días, obteniendo estos resultados:

| MUESTRA | TAMAÑO DE LA MUESTRA | NÚMERO DE FORMAS CON ERRORES | MUESTRA | TAMAÑO DE LA MUESTRA | NÚMERO DE FORMAS CON ERRORES |
|---------|----------------------|------------------------------|---------|----------------------|------------------------------|
| 1 | 100 | 4 | 9 | 100 | 4 |
| 2 | 100 | 3 | 10 | 100 | 2 |
| 3 | 100 | 5 | 11 | 100 | 7 |
| 4 | 100 | 0 | 12 | 100 | 2 |
| 5 | 100 | 2 | 13 | 100 | 1 |
| 6 | 100 | 8 | 14 | 100 | 3 |
| 7 | 100 | 1 | 15 | 100 | 1 |
| 8 | 100 | 3 | | | |

- Desarrolle una gráfica p utilizando un intervalo de confianza de 95% ($1.96s_p$).
- Diagrame las 15 muestras recolectadas.
- ¿Qué comentarios puede hacer sobre el proceso?

Solución

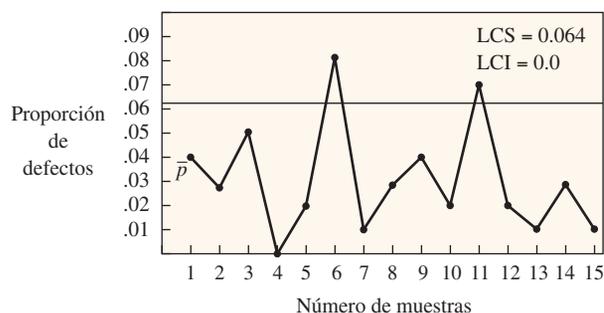
$$a) \bar{p} = \frac{46}{15(100)} = 0.0307$$

$$s_p = \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} = \sqrt{\frac{0.0307(1-0.0307)}{100}} = \sqrt{0.0003} = 0.017$$

$$LCS = \bar{p} + 1.96s_p = 0.031 + 1.96(0.017) = 0.064$$

$$LCI = \bar{p} - 1.96s_p = 0.031 - 1.96(0.017) = 0.00232 \text{ o cero}$$

- A continuación se presenta un diagrama de los defectos.



Excel: SPC.xls

- c) De las 15 muestras, dos se encuentran fuera de los límites de control. Como estos límites se establecieron en 95%, o uno de cada 20, se diría que el proceso está fuera de control. Es necesario examinarlo para encontrar la causa de una variación tan extensa.

PROBLEMA RESUELTO 2

La gerencia trata de decidir si es necesario inspeccionar la pieza A, que se produce con un índice de defectos consistente de 3%. Si no se inspecciona, los productos defectuosos pasarán toda la etapa de ensamblaje y tendrán que reemplazarse más adelante. Si se inspeccionan todas las piezas A, se encontrará una tercera parte de las piezas defectuosas, elevando así la calidad al 2% de piezas defectuosas.

- a) ¿Es necesario hacer la inspección si el costo de ésta es de 0.01 dólares por unidad y el costo de reemplazo de una pieza defectuosa en el ensamblaje final es de 4 dólares?
 b) Si el costo de inspección es de 0.05 dólares por unidad en lugar de 0.01. ¿Cambiaría su respuesta en a)?

Solución

¿Es necesario inspeccionar la pieza A?

0.03 defectos sin inspección.

0.02 defectos con inspección.

- a) Este problema se puede solucionar con facilidad tomando en cuenta la oportunidad de una mejora de 1 por ciento.
 Beneficio = 0.01 (\$4.00) = \$0.04
 Costo de la inspección = \$0.01
 Por lo tanto, inspeccionar y ahorrar 0.03 dólares por unidad.
 b) Un costo de 0.05 dólares por unidad al inspeccionar sería 0.01 dólares más alto que el ahorro, de modo que no se debe realizar la inspección.

PREGUNTAS DE REPASO Y DISCUSIÓN

1. El índice de capacidad permite cierto alejamiento de la media del proceso. Analice lo que esto significa en términos de la calidad del producto.
2. Analice los propósitos y las diferencias entre las gráficas p y las gráficas \bar{X} y R .
3. En un acuerdo entre un proveedor y un cliente, el primero debe asegurarse de que todas las piezas se encuentran dentro de la tolerancia antes de enviarlas al cliente. ¿Cuál es el efecto en el costo de la calidad para el cliente?
4. En la situación descrita en la pregunta 3, ¿cuál sería el efecto sobre el costo de la calidad para el proveedor?
5. Analice la diferencia entre lograr un NCA (nivel de calidad aceptable) de cero y un NCA positivo (como un NCA de 2 por ciento).

PROBLEMAS

1. Una compañía que actualmente emplea un proceso de inspección en su departamento de recepción de materiales trata de instalar un programa de reducción general de costos. Una reducción posible es la eliminación de un puesto de inspección. Este puesto pone a prueba el material que tiene un contenido defectuoso con un promedio de 0.04. Al inspeccionar todos los artículos, el inspector puede eliminar todos los defectos e inspeccionar 50 unidades por hora. El pago por hora de este puesto, incluidas las prestaciones, es de 9 dólares. Si se elimina el puesto de inspección, los defectos llegarán a la línea de ensamble y será necesario reemplazar los productos más adelante a un costo de 10 dólares cada uno, al detectar los defectos durante las pruebas de producto finales.
 - a) ¿Se debe eliminar este puesto de inspección?
 - b) ¿Cuál es el costo de inspeccionar cada unidad?
 - c) ¿Se genera un beneficio (o una pérdida) del proceso de inspección actual? ¿De cuánto?
2. Un fabricante de productos de metal produce varillas con un diámetro exterior que tiene una especificación de 1 ± 0.01 pulgadas. El operador de una máquina toma varias medidas de la muestra a través del tiempo y determina que el diámetro exterior medio de la muestra es de 1.002 pulgadas con una desviación estándar de 0.003 pulgadas.
 - a) Calcule el índice de capacidad del proceso para este ejemplo.
 - b) ¿Qué le dice esta cifra acerca del proceso?
3. Se tomaron 10 muestras de 15 piezas cada una de un proceso continuo con el fin de establecer una gráfica p para control. Las muestras y el número de piezas defectuosas en cada una aparecen en la tabla siguiente:

| MUESTRA | n | NÚMERO DE DEFECTOS EN LA MUESTRA | | n | NÚMERO DE DEFECTOS EN LA MUESTRA |
|---------|-----|----------------------------------|---------|-----|----------------------------------|
| | | MUESTRA | MUESTRA | | |
| 1 | 15 | 3 | 6 | 15 | 2 |
| 2 | 15 | 1 | 7 | 15 | 0 |
| 3 | 15 | 0 | 8 | 15 | 3 |
| 4 | 15 | 0 | 9 | 15 | 1 |
| 5 | 15 | 0 | 10 | 15 | 0 |

- a) Elabore una gráfica p para una confianza de 95% (1.96 desviaciones estándar).
- b) Con base en los puntos de datos en el diagrama, ¿qué comentarios puede hacer?
4. La producción de un proceso contiene 0.02 unidades defectuosas. El reemplazo de cada una de las unidades defectuosas que no son detectadas y llegan a los últimos pasos del ensamblaje tiene un costo de 25 dólares. Es posible establecer un proceso de inspección, que detectaría y eliminaría todas las piezas defectuosas, con el fin de probar las unidades. Sin embargo, el inspector, quien puede probar 20 unidades por hora, recibe un pago de 8 dólares la hora, incluidas sus prestaciones. ¿Es conveniente instalar una estación de inspección para probar todas las unidades?
- a) ¿Cuál es el costo de inspeccionar cada unidad?
- b) ¿Cuál es el beneficio (o la pérdida) derivado del proceso de inspección?
5. En un punto específico de un proceso de producción, hay un índice de errores de 3%. Si se colocara un inspector en este punto, sería posible detectar y eliminar todos los errores. Sin embargo, al inspector se le pagan 8 dólares por hora y puede inspeccionar las unidades en el proceso a una velocidad de 30 por hora.

Si no se recurre a ningún inspector y los errores pasan este punto, hay un costo de 10 dólares por unidad para corregir el error en una etapa posterior. ¿Es conveniente contratar a un inspector?

6. Una máquina automatizada a alta velocidad fabrica resistores para circuitos electrónicos. La máquina está programada para producir un lote muy numeroso de resistores de 1 000 ohms cada uno. Con el fin de ajustar la máquina y crear una gráfica de control para utilizarla a lo largo de todo el proceso, se tomaron 15 muestras con cuatro resistores cada una. La lista completa de muestras y sus valores medidos es la siguiente:

| NÚMERO DE LA MUESTRA | LECTURAS (EN OHMS) | | | |
|----------------------|--------------------|------|------|------|
| | | | | |
| 1 | 1010 | 991 | 985 | 986 |
| 2 | 995 | 996 | 1009 | 994 |
| 3 | 990 | 1003 | 1015 | 1008 |
| 4 | 1015 | 1020 | 1009 | 998 |
| 5 | 1013 | 1019 | 1005 | 993 |
| 6 | 994 | 1001 | 994 | 1005 |
| 7 | 989 | 992 | 982 | 1020 |
| 8 | 1001 | 986 | 996 | 996 |
| 9 | 1006 | 989 | 1005 | 1007 |
| 10 | 992 | 1007 | 1006 | 979 |
| 11 | 996 | 1006 | 997 | 989 |
| 12 | 1019 | 996 | 991 | 1011 |
| 13 | 981 | 991 | 989 | 1003 |
| 14 | 999 | 993 | 988 | 984 |
| 15 | 1013 | 1002 | 1005 | 992 |

Elabore una gráfica \bar{X} y una gráfica R y diagrame los valores. Con base en las gráficas, ¿qué comentarios puede hacer sobre el proceso? (Utilice tres límites de control Sigma como en la ilustración 9A.6.)

7. En el pasado, Alpha Corporation no realizaba inspecciones de control de calidad en los productos que recibía, sino que confiaba en sus proveedores. Sin embargo, hace poco la empresa tuvo una experiencia desagradable con la calidad de los artículos que compra y quiere establecer planes de muestreo para que los use el departamento de recepción de productos.

Para un componente X en particular, Alpha tiene una tolerancia de defectos por lote de 10%. Zenon Corporation, compañía a la que Alpha compra este componente, tiene un nivel de calidad aceptable en sus instalaciones de producción de 3% para el componente X . Alpha tiene un riesgo para el consumidor de 10% y Zenon maneja un riesgo para el productor de 5%.

- a) Al recibir un envío del Producto X de Zenon Corporation, ¿qué tamaño de muestra debe probar el departamento de recepción de productos?
- b) ¿Cuál es el número de defectos permitido con el fin de aceptar el envío?
8. A usted lo acaban de nombrar asistente del administrador de un hospital de su localidad y su primer proyecto consiste en investigar la calidad de las comidas para los pacientes que prepara el departamento de servicio de alimentos. Para ello, realizó una encuesta durante 10 días presentando con cada comida un sencillo cuestionario a 400 pacientes, pidiéndoles que marcaran si la comida había sido satisfactoria o no satisfactoria. Para mayor simplicidad en este problema, suponga que la respuesta fue de 1 000 cuestionarios regresados de 1 200 comidas cada día. Los resultados son los siguientes:

| | NÚMERO DE ALIMENTOS | |
|--------------|---------------------|----------------------|
| | NO SATISFACTORIOS | TAMAÑO DE LA MUESTRA |
| Diciembre 1 | 74 | 1000 |
| Diciembre 2 | 42 | 1000 |
| Diciembre 3 | 64 | 1000 |
| Diciembre 4 | 80 | 1000 |
| Diciembre 5 | 40 | 1000 |
| Diciembre 6 | 50 | 1000 |
| Diciembre 7 | 65 | 1000 |
| Diciembre 8 | 70 | 1000 |
| Diciembre 9 | 40 | 1000 |
| Diciembre 10 | 75 | 1000 |
| | 600 | 10 000 |

- a) Elabore una gráfica p con base en los resultados del cuestionario, utilizando un intervalo de confianza de 95.5%, que son dos desviaciones estándar.
- b) ¿Qué comentarios puede hacer acerca de los resultados de la encuesta?
9. En un departamento de una empresa de electrónica se fabrican chips de circuitos integrados a gran escala. Estos chips se integran a dispositivos analógicos que después se encapsulan en un material epóxico. El rendimiento no es muy bueno para la manufactura de chips integrados a gran escala, de modo que el NCA especificado por el departamento es de 0.15, mientras que el PTDL que el departamento de ensamblaje considera aceptable es de 0.40.
- a) Desarrolle un plan de muestreo.
- b) Explique qué significa el plan de muestreo; es decir, ¿cómo diría a alguna persona que realizara la prueba?
10. Los departamentos de policía estatal y local tratan de analizar los índices delictivos con el fin de cambiar sus patrullas de las áreas en las que los índices van a la baja a aquellas en donde se han incrementado. La ciudad y el condado están divididos en áreas que contienen 5 000 residencias. La policía reconoce que no se denuncian todos los delitos e infracciones: la gente no quiere verse involucrada, considera que las infracciones no son tan grandes como para denunciarlas, no se sienten a gusto de ir a la policía o no se dan el tiempo de hacerlo, entre otras razones. Debido a lo anterior, cada mes, la policía contacta por teléfono a una muestra aleatoria de 1 000 de las 5 000 residencias para obtener información sobre delincuencia (a quienes contestan las llamadas se les garantiza el anonimato). Éstos son los datos recopilados durante los últimos 12 meses para un área:

| MES | INCIDENCIA DE DELITOS | TAMAÑO DE LA MUESTRA | ÍNDICE DELICTIVO |
|------------|-----------------------|----------------------|------------------|
| Enero | 7 | 1000 | 0.007 |
| Febrero | 9 | 1000 | 0.009 |
| Marzo | 7 | 1000 | 0.007 |
| Abril | 7 | 1000 | 0.007 |
| Mayo | 7 | 1000 | 0.007 |
| Junio | 9 | 1000 | 0.009 |
| Julio | 7 | 1000 | 0.007 |
| Agosto | 10 | 1000 | 0.010 |
| Septiembre | 8 | 1000 | 0.008 |
| Octubre | 11 | 1000 | 0.011 |
| Noviembre | 10 | 1000 | 0.010 |
| Diciembre | 8 | 1000 | 0.008 |

Elabore una gráfica p para una confianza de 95% (1.96) y diagrame cada uno de los meses. Si los próximos tres meses muestran que la incidencia de delitos en esa área será

Enero = 10 (de 1 000 elementos en la muestra)

Febrero = 12 (de 1 000 elementos en la muestra)

Marzo = 11 (de 1 000 elementos en la muestra)

¿Qué comentarios puede hacer en cuanto al índice de crímenes?

11. Algunos ciudadanos se quejaron con los miembros del consejo ciudadano diciendo que la ley debería ofrecer una protección equitativa en contra de la delincuencia. Los ciudadanos argumentaron que esta protección equitativa se debe interpretar como la indicación de que las áreas con un índice delictivo alto deben contar con mayor protección por parte de la policía que las áreas con un índice más bajo. Por lo tanto, las patrullas de la policía y los métodos de prevención (como el alumbrado público o la limpieza de áreas y edificios abandonados) se deben aplicar en proporción a la ocurrencia de los delitos.

De modo similar al problema 10, la ciudad se dividió en 20 áreas geográficas, cada una de las cuales contiene 5 000 residencias. Las 1 000 residencias en la muestra de cada área mostraron el siguiente índice delictivo durante el mes pasado:

| ÁREA | NÚMERO DE DELITOS | TAMAÑO DE LA MUESTRA | ÍNDICE DELICTIVO |
|------|-------------------|----------------------|------------------|
| 1 | 14 | 1000 | 0.014 |
| 2 | 3 | 1000 | 0.003 |
| 3 | 19 | 1000 | 0.019 |
| 4 | 18 | 1000 | 0.018 |
| 5 | 14 | 1000 | 0.014 |
| 6 | 28 | 1000 | 0.028 |
| 7 | 10 | 1000 | 0.010 |
| 8 | 18 | 1000 | 0.018 |
| 9 | 12 | 1000 | 0.012 |
| 10 | 3 | 1000 | 0.003 |
| 11 | 20 | 1000 | 0.020 |
| 12 | 15 | 1000 | 0.015 |
| 13 | 12 | 1000 | 0.012 |
| 14 | 14 | 1000 | 0.014 |
| 15 | 10 | 1000 | 0.010 |
| 16 | 30 | 1000 | 0.030 |
| 17 | 4 | 1000 | 0.004 |
| 18 | 20 | 1000 | 0.020 |
| 19 | 6 | 1000 | 0.006 |
| 20 | 30 | 1000 | 0.030 |
| | <u>300</u> | | |

Sugiera una reubicación de los esfuerzos de protección, si lo considera apropiado, con base en un análisis de la gráfica p . Para ser más acertado en su recomendación, seleccione un nivel de confianza de 95% (es decir, $Z = 1.96$).

12. La tabla siguiente contiene las medidas de la dimensión de longitud clave de un inyector de combustible. Estas muestras de cinco elementos se tomaron a intervalos de una hora.

| NÚMERO DE LA MUESTRA | OBSERVACIONES | | | | |
|----------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 0.486 | 0.499 | 0.493 | 0.511 | 0.481 |
| 2 | 0.499 | 0.506 | 0.516 | 0.494 | 0.529 |
| 3 | 0.496 | 0.500 | 0.515 | 0.488 | 0.521 |
| 4 | 0.495 | 0.506 | 0.483 | 0.487 | 0.489 |

(continúa)

| NÚMERO DE LA MUESTRA | OBSERVACIONES | | | | |
|----------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 5 | 0.472 | 0.502 | 0.526 | 0.469 | 0.481 |
| 6 | 0.473 | 0.495 | 0.507 | 0.493 | 0.506 |
| 7 | 0.495 | 0.512 | 0.490 | 0.471 | 0.504 |
| 8 | 0.525 | 0.501 | 0.498 | 0.474 | 0.485 |
| 9 | 0.497 | 0.501 | 0.517 | 0.506 | 0.516 |
| 10 | 0.495 | 0.505 | 0.516 | 0.511 | 0.497 |
| 11 | 0.495 | 0.482 | 0.468 | 0.492 | 0.492 |
| 12 | 0.483 | 0.459 | 0.526 | 0.506 | 0.522 |
| 13 | 0.521 | 0.512 | 0.493 | 0.525 | 0.510 |
| 14 | 0.487 | 0.521 | 0.507 | 0.501 | 0.500 |
| 15 | 0.493 | 0.516 | 0.499 | 0.511 | 0.513 |
| 16 | 0.473 | 0.506 | 0.479 | 0.480 | 0.523 |
| 17 | 0.477 | 0.485 | 0.513 | 0.484 | 0.496 |
| 18 | 0.515 | 0.493 | 0.493 | 0.485 | 0.475 |
| 19 | 0.511 | 0.536 | 0.486 | 0.497 | 0.491 |
| 20 | 0.509 | 0.490 | 0.470 | 0.504 | 0.512 |

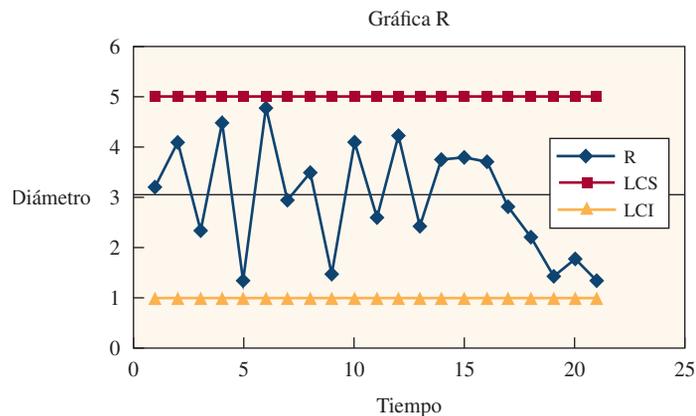
Elabore una gráfica \bar{X} Tres-Sigma y una gráfica R (use la ilustración 9A.6) para la longitud del inyector de combustible. ¿Qué puede decir sobre este proceso?

13. C-Spec, Inc., trata de determinar si una máquina que tiene es capaz de fresar la pieza de un motor que tiene una especificación clave de 4 ± 0.003 pulgadas. Después de probar esta máquina, C-Spec determinó que tiene una media de muestra de 4.001 pulgadas con una desviación estándar de 0.002 pulgadas.
 - a) Calcule el C_{pk} para esta máquina.
 - b) ¿C-Spec debe utilizar esta máquina para producir esta pieza? ¿Por qué?
14. El gerente de una línea de ensamblaje tomó cinco muestras, cada una con seis observaciones, en condiciones ideales, para establecer límites de control para una gráfica de barras \bar{X} . La media y el rango de cada muestra aparecen en la tabla siguiente:

| NÚMERO DE LA MUESTRA | MEDIA DE LA MUESTRA | RANGO DE LA MUESTRA |
|----------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 2.18 | 0.33 |
| 2 | 2.12 | 0.38 |
| 3 | 1.86 | 0.40 |
| 4 | 1.98 | 0.38 |
| 5 | 2.02 | 0.35 |

¿Cuál sería el límite de control inferior de la desviación estándar de 3?

15. Interprete la siguiente gráfica de control y determine qué acción es apropiada, en caso de haberla.



16. A continuación, se dan los valores de \bar{X} barra y valores de R para cinco muestras. Si el límite de control inferior para la gráfica de \bar{X} barra es 8.34, ¿cuál es el tamaño de la muestra?

| MUESTRA | \bar{X} BARRA | R |
|---------|-----------------|------|
| 1 | 8.51 | 0.44 |
| 2 | 8.37 | 0.58 |
| 3 | 8.42 | 0.66 |
| 4 | 8.61 | 0.47 |
| 5 | 8.54 | 0.60 |

PROBLEMA AVANZADO

17. Las especificaciones de diseño requieren que una dimensión clave de un producto mida 100 ± 10 unidades. Un proceso que se ha considerado para fabricar este producto tiene una desviación estándar de cuatro unidades.
- ¿Qué puede decir (cuantitativamente) sobre la capacidad del proceso?
 - Suponga que el promedio del proceso cambia a 92. Calcule la nueva capacidad del proceso.
 - ¿Qué puede decir acerca del proceso después del cambio? Aproximadamente ¿qué porcentaje de los artículos producidos serán defectuosos?

CASO: HOT SHOT PLASTICS COMPANY

En una compañía llamada Hot Shot Plastics se producen llaveros de plástico. Primero se moldea el plástico y luego se recorta para darle la forma necesaria. Los tiempos del curado (que es el tiempo requerido para que el plástico se enfríe) durante el proceso de moldeado afectan la calidad de los llaveros producidos. La meta es lograr un control estadístico de los tiempos de curado utilizando gráficas \bar{X} y R.

Los datos sobre el tiempo de curado de 25 muestras, cada una de cuatro elementos, se tomaron cuando se suponía que el proceso estaba bajo control y se muestran a continuación (nota: la hoja de cálculo, en el DVD, "Hot Shot Plastics.xls" contiene esta información).

| NÚMERO DE MUESTRA | OBSERVACIONES | | | | MEDIA | RANGO |
|-------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 27.34667 | 27.50085 | 29.94412 | 28.21249 | 28.25103 | 2.59745 |
| 2 | 27.79695 | 26.15006 | 31.21295 | 31.33272 | 29.12317 | 5.18266 |
| 3 | 33.53255 | 29.32971 | 29.70460 | 31.05300 | 30.90497 | 4.20284 |
| 4 | 37.98409 | 32.26942 | 31.91741 | 29.44279 | 32.90343 | 8.54130 |
| 5 | 33.82722 | 30.32543 | 28.38117 | 33.70124 | 31.55877 | 5.44605 |
| 6 | 29.68356 | 29.56677 | 27.23077 | 34.00417 | 30.12132 | 6.77340 |
| 7 | 32.62640 | 26.32030 | 32.07892 | 36.17198 | 31.79940 | 9.85168 |
| 8 | 30.29575 | 30.52868 | 24.43315 | 26.85241 | 28.02750 | 6.09553 |
| 9 | 28.43856 | 30.48251 | 32.43083 | 30.76162 | 30.52838 | 3.99227 |
| 10 | 28.27790 | 33.94916 | 30.47406 | 28.87447 | 30.39390 | 5.67126 |
| 11 | 26.91885 | 27.66133 | 31.46936 | 29.66928 | 28.92971 | 4.55051 |
| 12 | 28.46547 | 28.29937 | 28.99441 | 31.14511 | 29.22609 | 2.84574 |
| 13 | 32.42677 | 26.10410 | 29.47718 | 37.20079 | 31.30221 | 11.09669 |
| 14 | 28.84273 | 30.51801 | 32.23614 | 30.47104 | 30.51698 | 3.39341 |
| 15 | 30.75136 | 32.99922 | 28.08452 | 26.19981 | 29.50873 | 6.79941 |
| 16 | 31.25754 | 24.29473 | 35.46477 | 28.41126 | 29.85708 | 11.17004 |
| 17 | 31.24921 | 28.57954 | 35.00865 | 31.23591 | 31.51833 | 6.42911 |
| 18 | 31.41554 | 35.80049 | 33.60909 | 27.82131 | 32.16161 | 7.97918 |
| 19 | 32.20230 | 32.02005 | 32.71018 | 29.37620 | 31.57718 | 3.33398 |
| 20 | 26.91603 | 29.77775 | 33.92696 | 33.78366 | 31.10110 | 7.01093 |
| 21 | 35.05322 | 32.93284 | 31.51641 | 27.73615 | 31.80966 | 7.31707 |
| 22 | 32.12483 | 29.32853 | 30.99709 | 31.39641 | 30.96172 | 2.79630 |
| 23 | 30.09172 | 32.43938 | 27.84725 | 30.70726 | 30.27140 | 4.59213 |
| 24 | 30.04835 | 27.23709 | 22.01801 | 28.69624 | 26.99992 | 8.03034 |
| 25 | 29.30273 | 30.83735 | 30.82735 | 31.90733 | 30.71869 | 2.60460 |
| | | | | Medias | 30.40289 | 5.932155 |

PREGUNTAS

1. Elabore gráficas \bar{X} y R utilizando estos datos y el método descrito en el capítulo.
2. Analice la gráfica y comente si el proceso parece estar bajo control y ser estable.
3. Se recopilaron doce muestras adicionales de la información sobre el tiempo de curado del proceso de moldeado en una corrida de producción real.

La información sobre estas dos muestras nuevas se incluye a continuación. Actualice sus gráficas de control y compare los resultados con los datos anteriores. Las gráficas \bar{X} y R se elaboraron con los nuevos datos utilizando los mismos límites de control establecidos antes. Comente sobre lo que muestran las nuevas gráficas.

| NÚMERO DE MUESTRA | OBSERVACIONES | | | | MEDIA | RANGO |
|-------------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 31.65830 | 29.78330 | 31.87910 | 33.91250 | 31.80830 | 4.12920 |
| 2 | 34.46430 | 25.18480 | 37.76689 | 39.21143 | 34.15686 | 14.02663 |
| 3 | 41.34268 | 39.54590 | 29.55710 | 32.57350 | 35.75480 | 11.78558 |
| 4 | 29.47310 | 25.37840 | 25.04380 | 24.00350 | 25.97470 | 5.46960 |
| 5 | 25.46710 | 34.85160 | 30.19150 | 31.62220 | 30.53310 | 9.38450 |
| 6 | 46.25184 | 34.71356 | 41.41277 | 44.63319 | 41.75284 | 11.53828 |
| 7 | 35.44750 | 38.83289 | 33.08860 | 31.63490 | 34.75097 | 7.19799 |
| 8 | 34.55143 | 33.86330 | 35.18869 | 42.31515 | 36.47964 | 8.45185 |
| 9 | 43.43549 | 37.36371 | 38.85718 | 39.25132 | 39.72693 | 6.07178 |
| 10 | 37.05298 | 42.47056 | 35.90282 | 38.21905 | 38.41135 | 6.56774 |
| 11 | 38.57292 | 39.06772 | 32.22090 | 33.20200 | 35.76589 | 6.84682 |
| 12 | 27.03050 | 33.63970 | 26.63060 | 42.79176 | 32.52314 | 16.16116 |

BIBLIOGRAFÍA SELECCIONADA

- Evans, J. R. y W. M. Lindsay. *Managing for Quality and Performance Excellence*. 7a. ed., Mason, OH: South-Western College Publications, 2007.
- Rath and Strong. *Rath & Strong's Six Sigma Pocket Guide*. Rath and Strong, Inc., 2000.
- Small, B. B. (with committee). *Statistical Quality Control Handbook*. Western Electric Co., Inc., 1956.
- Zimmerman, S. M. y M. L. Icenogel. *Statistical Quality Control; Using Excel*. 2a. ed., Milwaukee, WI: ASQ Quality Press, 2002.

NOTAS

1. E. L. Grant y R. S. Leavenworth, *Statistical Quality Control* (Nueva York: McGraw-Hill, 1996).
2. Hay cierta controversia en relación con los NCA, sobre el argumento de que la especificación de un porcentaje aceptable de piezas defectuosas es incongruente con la meta teórica de cero defectos. En la práctica, incluso en las empresas con el mejor control de calidad, hay un nivel de calidad aceptable. La diferencia es que éste se puede establecer en partes por millón en lugar de partes por cientos. Éste es el caso del estándar de calidad Six-Sigma de Motorola, que sostiene que son aceptables no más de 3.4 defectos por un millón de piezas.
3. Véase, por ejemplo, H. F. Dodge y H. G. Romig, *Sampling Inspection Tables – Single and Double Sampling* (Nueva York: John Wiley and Sons, 1959); y *Military Standard Sampling Procedures and Tables for Inspection by Attributes* (MIL-STD-105D), (Washington, DC: U. S. Government Printing Office, 1983).