UNIDAD 1

ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

(HUMBERTO GUTIÉRREZ PULIDO/ROMÁN DE LA VARA SALAZAR,"CONTROL ESTADÍSTICO DE CALIDAD Y SEIS SIGMA",MC GRAW HILL)

Las variables de salida o de respuesta de un proceso deben cumplir con ciertas metas y/o especificaciones, a fin de que sea posible considerar que el proceso funciona de manera satisfactoria. Por ello, una tarea primordial del control de calidad es conocer la *capacidad* o *habilidad de un proceso,* que consiste en determinar la amplitud de la variación natural del proceso para una característica de calidad dada. Esto permitirá saber en qué medida tal característica de calidad es satisfactoria.

En esta unidad se estudian las principales técnicas de la estadística descriptiva para el análisis de una variable de tipo continuo. Estas técnicas son de gran utilidad para entender mejor la capacidad de un proceso.

Por lo general, para realizar un estudio de capacidad se toman datos del proceso durante un periodo considerable para que se refleje bien el desempeño del proceso. El periodo de referencia depende de la velocidad del proceso, ya que si se trata de un proceso masivo que produce muchas piezas por día, entonces se considera un periodo de cuatro a 10 días, y de ahí, cada determinado tiempo se toma una pequeña cantidad de productos hasta completar una muestra de 120a 150.Pero cuando se trata de un proceso lento, que produce pocos productos por día, es necesario incrementar el periodo de estudio para completar una muestra de por lo menos 50 o 60 productos. En ambos casos, en la medida que se tengan más datos y un periodo más amplio será posible conocer mejor el estado real del proceso.

EJEMPLO

En un proceso de inyección de plástico una característica de calidad del producto (disco) es su grosor, que debe ser de 1.20. mm con una tolerancia de ±0.10 mm.

Así, para considerar que el proceso de *inyección* fue satisfactorio, el grosor del disco debe estar entre la especificación inferior, EI = 1.10 *Y* la superior, ES = 1.30. En un estudio de capacidad para este proceso es necesario contestar las siguientes interrogantes: ¿qué tipo de discos en cuanto a grosor se están produciendo? ¿El grosor medio es adecuado? ¿La variabilidad del grosor es mucha o poca?

Para contestar estas preguntas, durante una semana se obtuvieron de una línea de producción los 125 datos de la tabla 1.1. El muestreo fue sistemático: cada determinado tiempo se tomaban cinco productos *y* se medían *y* al final de la semana se tuvieron los datos referidos. A continuación se analizarán estos datos por medio de diferentes *estadísticos.*

TABLA 1.1 Datos para el grosor de los discos, ejemplo 1.1.

1.1 1.20 1.17 1.16 1.16 1.15 1.17 1.20 1.16 1.19 1.17 1.13 1.15 120 1.18 1.17
1.16 1.20 1.17 1.17 120 1.14 1.19 1.13 1.19 1.16 1.18 1.16 1.17 1.15 1.21 1.15
1.20 1.18 1.17 1.17 1.13 1.16 1.16 1.17 1.20 1.18 1.15 1.13 1.20 1.17 1:19 1.23
120 1.24 1.17 1.17 1.17 1.17 1.18 124 1.16 1.18 1.16 1.22 1.23 1.22 1.19 1.13
1.15 1.15 1.22 1.19 1.18 1.19 1.17 1.16 1.17 1.18 1.19 1.23 1.19 1.16 1.19 1.20
1.17 1.13 1.22 1.19 1.21 120 1.19 1.17 1.19 1.22 1.19 1.18 1.11 1.19 1.19 1.17
1.19 1.17 1.20 1.16 1.19 1.20 1.20 1.17 1.25 1.16 1.16 1.20 1.20 1.16 1.18 1.21
1.20 1.22 1.19 1.14 1.19 1.17 1.20 1.16 1.15 1.20 1.12 1.11 1.18

Medidas de tendencia central

Con las mediciones de una característica de calidad como las del ejemplo 1.1, el primer aspecto a investigar consiste en conocer la *tendencia central* de los datos, es decir, identificar un valor en torno al cual los datos tienden a aglomerarse o concentrarse. Esto permitirá saber si el proceso está centrado; es decir, si la tendencia central de la variable de salida es igualo está muy próxima a un valor nominal deseado (en el ejemplo el valor nominal es 1.20). A continuación veremos tres medidas de la tendencia central: la media, la mediana y la moda.

Media muestral

Supongamos que X_1, X_2, x_3, ... , X_n son las observaciones numéricas de una muestra; entonces, la medida más usual de su tendencia central es proporcionada por la *media* (o promedio) muestral, que es igual a la media aritmética de todos los datos:

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + ... + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$$

es decir, la media muestral se obtiene sumando todos los datos y el resultado de la suma se divide entre el número de datos *(n).*

En el ejemplo 1.1, la media de los datos de la tabla 1.1 es $\bar{X}$ = 1.179 mm, con lo cual, el grosor promedio de los discos de la muestra es de 1.179mm. Esto no significa que todos o la mayoría de los discos tengan un grosor de 1.179 mm, es más, en el ejemplo, ningún disco tiene tal grosor. En este caso, dado que la media muestral procede de una muestra significativamente grande que abarca el periodo de una semana, entonces hay evidencia de que el proceso está descentrado de forma moderada a la izquierda o hacia un valor inferior, ya que el valor objetivo para el grosor es de 1.20 mm.

Media poblacional o del proceso, *μ*

Si para calcular la media se utilizan todos los elementos de la población (todos los posibles individuos, especímenes, objetos o medidas de interés sobre los que se hace un estudio), por ejemplo, el grosor de todos los discos producidos en la última semana o mes, entonces el promedio calculado es la media del proceso (o media poblacional) y se denota con la letra griega *μ* (mu).

Es importante destacar que la *media del proceso μ* es igual a cierto valor, aunque no siempre se conoce; mientras que el valor de $\bar{X}$ se obtiene para cada muestra y es diferente (variable) de una muestra a otra, ya que su valor depende de las piezas que se seleccionan *(X* es una variable aleatoria). Por lo anterior, el valor que se observa de la media muestral, $\bar{X}$, por lo general es diferente a la media del

proceso, *μ.* Luego, es preciso tener cuidado con las afirmaciones basadas en $\bar{X}$ sobre la media del proceso o población.

En general, lo que se observa en los estadísticos muestrales acerca del comportamiento de los datos es válido para la muestra, y en la medida que ésta sea representativa y grande también tendrá cierto grado de aproximación para todo el proceso; sin embargo, es necesario utilizar técnicas estadísticas para evaluar lo que significan en todo el proceso.

Mediana o percentil 50

Otra medida de tendencia central de un conjunto de datos es la *mediana* $\tilde{X}$*,* que es igual al valor que divide a la mitad a los datos cuando son ordenados de menor a mayor. Así, para calcular la mediana cuando el número de datos es impar, éstos se ordenan de manera creciente y el que quede en medio de dicho ordenamiento será la mediana. Pero si el número de datos es par, entonces la mediana se calcula dividiendo entre dos la suma de los números que están en el centro del ordenamiento.

En el ejemplo 1.1, la mediana es 1.18mm, lo cual significa que 50% de los grosores de los discos de la muestra son menores o iguales a 1.18,y que el otro 50% son mayores o iguales a 1.18.

Moda

Otra forma de medir la tendencia central de un conjunto de datos es mediante la *moda,* que es igual al dato que se repite más veces. Si varios datos tienen la frecuencia más grande, entonces cada uno de ellos es una moda, y se dice que el conjunto de datos es *multimodal.*

En el ejemplo de los discos hay una sola moda y es 1.17. Esta medición fue la más frecuente, se repitió 23 veces. De esta forma, en el ejemplo tenemos que la media es 1.179, la mediana 1.18 y la moda 1.17.Debido a que la media es la medida de tendencia central más usual, en ocasiones se comete el error de creer

que ésta divide los datos a la mitad o que es el dato más frecuente, es decir, se confunde el concepto de media con el de mediana y moda, respectivamente.

Un aspecto relevante a tomar en cuenta cuando se utiliza la media, es que ésta resulta afectada por datos extremos o atípicos. Por ejemplo, la media y la mediana para los siguientes datos:

1 100, 1 300, 1 000, 1 500, 800, 1 600, 1 100

son $\bar{X}$ = 1 200 y $\tilde{X}$ = 1 100. Pero si a la lista anterior agregamos un dato atípico (el 7600), entonces: $\bar{X}$ = 2 000 y $\tilde{X}$ = 1 200 son muy diferentes entre sí, debido a que 7600 ha jalado a la media, y ahora ya no es una buena medida de tendencia central porque sólo un dato está por arriba de la media. En este tipo de casos, la mediana no es afectada por el dato atípico, lo cual tampoco ocurre cuando la distribución de los datos es sesgada. Por lo tanto, bajo estas condiciones, la *mediana es mejor medida de tendencia central.*

De lo anterior se deriva que, para describir la tendencia central de los datos, es imprescindible apoyarse tanto en la media como en la mediana y la moda. Cuando la media es muy diferente a la mediana es señal de que existen datos atípicos o existe un sesgo importante, por lo que será mejor reportar como medida de tendencia central a la mediana e investigar a qué se deben los datos atípicos, ya que en ocasiones reflejan un aspecto importante del proceso.

Las medidas de tendencia central son insuficientes como criterio de calidad

Suponga que la longitud de una pieza debe estar entre 800 ± 5. Para ver si se cumple con las especificaciones se toma una muestra aleatoria grande y se obtiene que:

$\bar{X}$ = 801, $\tilde{X}$ = 801 y moda = 800

Debido a que estos estadísticos están dentro de las especificaciones, se podría creer que el proceso cumple con éstas. Sin embargo, esto no necesariamente es cierto, ya que en la muestra podría haber datos desde 750 hasta 850 y la media de todos ellos ser 801. Pero también podría ocurrir que el rango de variación de los datos vaya de 797 a 803, con lo que sí se cumpliría con las especificaciones. En otras palabras, las medidas de tendencia central son insuficientes como criterio

de calidad, ya que no toman en cuenta qué tan dispersos están los datos, un hecho vital para la calidad.

Medidas de dispersión o variabilidad

Además de conocer la tendencia central de un conjunto de datos es necesario saber qué tan diferentes son entre sí, es decir, es preciso determinar su variabilidad o dispersión.
Esto es un elemento vital en el estudio de capacidad de un proceso. En seguida veremos cuatro formas de medir la variabilidad.
La *desviación estándar muestra!* es la medida más usual de variabilidad e indica qué tan esparcidos están los datos con respecto a la media; se denota con la letra S y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$S = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + ... + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}}$$

donde X_1, X_2, ... , X_n son las observaciones numéricas de la muestra, *n* su tamaño y *x* es la media muestral. Como se puede apreciar, S mide la distancia que en "promedio" hay entre los datos y la media; por ello, entre más grande sea el valor de S habrá mayor variabilidad en los datos. La desviación estándar es expresada en las mismas unidades de medición (gramos, milímetros, etc.) que los datos. Además, S no muestra la magnitud de los datos, sólo refleja 10 retirado que están los datos de la media y, al igual que ésta, es afectada por datos atípicos.

Desviación estándar poblacional o del proceso, σ

Si para calcular la desviación estándar se emplean todos los elementos de la población o proceso, entonces se obtiene la desviación estándar poblacional y se denota con la letra griega sigma *(σ).* Como se comentó antes, es posible considerar a la población como las mediciones de toda la producción de las últimas semanas, o si las mediciones se toman por muestras, entonces una buena

idea es obtener los parámetros poblacionales (/1 y o) con todas las mediciones realizadas en las últimas semanas, siempre y cuando éstas no sean pocas; de 120 a 150 mediciones en adelante es una buena cantidad.

Por otra parte, el cuadrado de la desviación estándar, S^2, conocido como *varianza muestral,* es muy importante para propósitos de inferencia estadística. Y en forma equivalente (σ^2 es la varianza (o variancia) poblacional.

Otra medida de dispersión es el *rango* o *recorrido, R,* que es igual a la diferencia entre el dato mayor y el dato menor de un conjunto de datos. El rango mide la amplitud de la variación de un grupo de datos, y también es independiente de la magnitud de los datos; por ejemplo, sean los dos conjuntos de datos:

A = {l0, 12, 14} y *B* = {159,161, 163}

entonces se observa que la magnitud de los datos es diferente, y eso es reflejado por la media, que es de 12 y 161,respectivamente. Pero en cuanto a la variabilidad, los datos de ambos conjuntos están dispersos de la misma manera, como 10 indica la desviación estándar que es igual a 2 en ambos casos, y el rango que es de 4 para los dos conjuntos.

Histograma y tabla de frecuencias

En las secciones anteriores se explicó que para el análisis de un conjunto de datos la clave es conocer su tendencia central y su dispersión. Ahora veremos que el *histograma* y la *tabla de frecuencias* permiten visualizar estos dos aspectos de un conjunto de datos, y además muestran la forma en que los datos se distribuyen dentro de su rango de variación. De manera específica, el *histograma* es una representación gráfica, en forma de barras, de la distribución de un conjunto de datos o una variable, donde los datos se clasifican por su magnitud en cierto número de grupos o clases, y cada clase es representada por una barra, cuya longitud es proporcional a la frecuencia de los valores representados. Por lo general, el eje horizontal está formado por una escala numérica para mostrar la

magnitud de los datos; mientras que en el eje vertical se representan las frecuencias.

Comúnmente el histograma se obtiene a partir de la *tabla de frecuencias.* Para obtener ésta, primero se divide el rango de variación de los datos en cierta cantidad de intervalos que cubren todo el rango, y después se determina cuántos datos caen en cada intervalo. Se recomienda que el número de intervalos o clases sea de 5 a 15. Para decidir un valor entre este rango existen varios criterios; por ejemplo, uno de ellos dice que el número de clases debe ser aproximadamente igual a la raíz cuadrada del número de datos. Otro criterio, conocido como la regla de *Sturgess,* señala que el número de clases es igual a 1 + $3.3*log_{IO}$*(número* de datos).

En la tabla 1.2 se aprecia la tabla de frecuencias para los datos del grosor de los discos del ejemplo 1.1. Ahí vemos que al aplicar la regla de Strugles (1 + $3.3*log_{IO}(I25)$ = 7.9), se decidió formar ocho clases; la primera clase representa a los datos con magnitud entre 1.10 y 1.12, y la última clase es para los datos entre 1.24 y 1.26. En el intervalo de la primera clase hay tres datos que corresponden a 2.4% del total; la clase 5 es la de mayor frecuencia e indica que entre 1.18y 1.20 hay 39 datos (31.2%). Por otro lado, en la figura 1.1 se muestra el histograma correspondiente, en el cual se toma como eje vertical a la frecuencia, aunque también podría haberse usado una frecuencia relativa o porcentual. En el histograma se aprecia que la tendencia central de los datos se ubica alrededor de 1.18, no se observan datos raros o atípicos y la distribución de los datos tiene una forma similar a una campana.

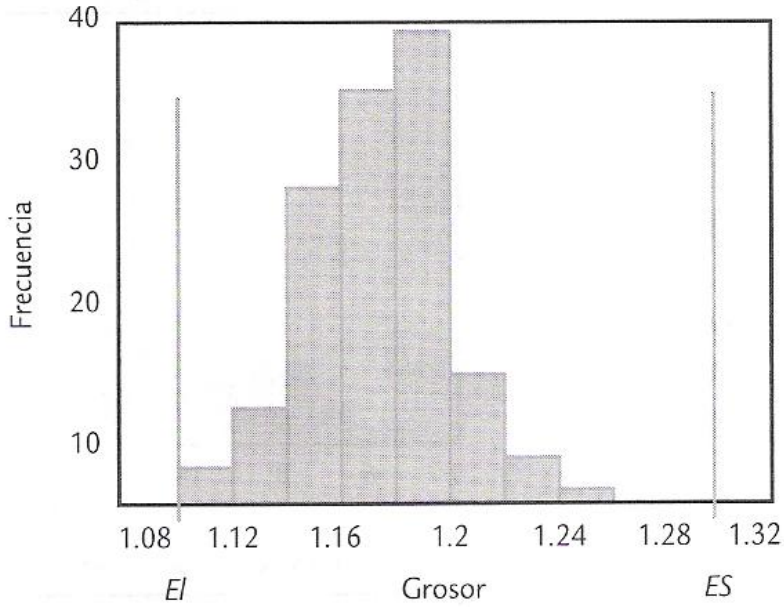
Si en el histograma de la figura 1.1 se insertan las especificaciones (1.10 y 1.30) para el grosor del disco, se observa que la variación de los datos (amplitud del histograma) es un poco menor que las especificaciones. Pero, con respecto a 1.20, que es el grosor óptimo, el proceso está moderadamente descentrado a la izquierda, como ya se había visto cuando se calculó la media. Además, el grosor de los discos no es satisfactorio, ya que la orilla izquierda del histograma debería estar alejada de la especificación inferior *(EI* = 1.10), lo cual no ocurre. Cabe comentar que aunque no hay ningún dato por debajo de la *EI,* no se debe perder de vista que el estudio se hace a partir de una muestra, por lo tanto, si se continúa

tomando datos es casi seguro que se encontrarán mediciones fuera, como lo sugiere la prolongación de la cola izquierda de la curva imaginaria que suaviza al histograma. Con base en lo anterior, la primera acción que se habría de ejecutar para mejorar la capacidad del proceso de inyección de discos es mejorar su centrado.

TABLA 1.2 DE FRECUENCIA PARA EL GROSOR DE DISCOS

CLASE	GROSOR DE DISCOS, X	MARCAS PARA CONTEO	FRECUENCIA	FRECUENCIA PORCENTUAL
1	$1.10 < x \leq 1.12$	///	3	2.4
2	$1.12 < x \leq 1.14$	///// ///	8	6.4
3	$1.14 < x \leq 1.16$	///// ///// ///// ///// ///// /	26	20.8
4	$1.16 < x \leq 1.18$	///// ///// ///// ///// ///// ///// ////	34	27.2
5	$1.18 < x \leq 1.20$	///// ///// ///// ///// ///// ///// ///// ////	39	31.2
6	$1.20 < x \leq 1.22$	///// ////	9	7.2
7	$1.22 < x \leq 1.24$	/////	5	4.0
8	$1.24 < x \leq 1.26$	/	1	0.8

A través del ejemplo anterior queda claro que el histograma ayuda a ver la tendencia central de los datos, facilita el entendimiento de la variabilidad y favorece el pensamiento estadístico, ya que de un 'solo vistazo se logra tener una idea acerca de la capacidad de un proceso, se evitan tomar decisiones sólo apoyándose en la media y se detectan datos raros y formas especiales de la distribución de los datos. Estos detalles de la interpretación del histograma los veremos con mayor profundidad a continuación.



Histograma para grosor de discos.

Fig.1.1

Interpretación del histograma

Cuando un histograma se construye de manera correcta, es resultado de un número suficiente de datos (de preferencia más de 100), y éstos son representativos del estado del proceso durante el periodo de interés; entonces, se recomienda considerar los siguientes puntos en la interpretación del histograma.

1. Observar la tendencia central de los datos. Localizar en el eje horizontal o escala de medición las barras con mayores frecuencias. En el histograma de la figura 1.1, una parte sustancial de las mediciones se localiza entre l.14 y l.20 mm.

2. Estudiar el centrado del proceso. Para ello, es necesario apoyarse en el punto anterior y observar la posición central del cuerpo del histograma con respecto a 1<1calidad óptima y a las especificaciones. Por ejemplo, en la figura 1.2 incisos *a)* y *e)* se muestran procesos centrados, el primero presenta poca variabilidad, pero en el segundo ocurre lo contrario.

Mientras que en los incisos *b)* y *d)* se observan procesos descentrados, el primero con poca variabilidad y el segundo con mucha. Aun cuando se cumplan las especificaciones, si el proceso no está centrado, la calidad que se produce no es

adecuada, ya que entre más se aleje del óptimo más mala calidad se tendrá. Por ello, en caso de tener un proceso descentrado se procede a realizar los ajustes o cambios necesarios para centrar el proceso.

3. Examinar la variabilidad del proceso. Consiste en comparar la amplitud de las especificaciones con el ancho del histograma. Para considerar que la dispersión no es demasiada, el ancho del histograma debe caber de forma holgada en las especificaciones. En la figura 1.2 incisos *a)* y *b)* hay poca variación, mientras que en los incisos *e)* y *d)* ocurre lo contrario.

4. Analizar la forma del histograma. Al observar un histograma considerar que la forma de distribución de campana es la que más se da en salidas de proceso y tiene características similares a la distribución normal y figura 1.2 *a), b), e)* y *d).* Es frecuente que cuando la distribución no es de este tipo sea la señal de un hecho importante que está ocurriendo en el proceso y que tiene un efecto negativo en la calidad. Por ello, es necesario revisar si la forma del histograma es muy diferente a la de campana. Algunas de las formas típicas que no coinciden con una distribución de campana, son las siguientes:

Distribución sesgada. En la figura *1.2e)* se aprecia un histograma con una distribución sesgada a la derecha, ya que la cola derecha es más grande que la izquierda. En términos generales, un sesgo en una variable de salida refleja el desplazamiento paulatino de un proceso debido a desgastes o desajustes; asimismo, puede indicar procedimientos viciados en la forma de obtener las mediciones o un desempeño especial del proceso, en el sentido que aparecen algunos valores inusualmente altos de un solo lado de la distribución (izquierdo o derecho). Cabe aclarar que existen características de calidad que, por su naturaleza, tienen sesgo, como son tiempos de vida y resistencias a la fatiga.

Una forma de decidir si una distribución sesgada indica una situación especial a corregir, consiste en comparar ésta con la distribución de la misma característica o de variables similares para datos obtenidos en otro periodo de tiempo. La recomendación general es que ante la sospecha de que hay algo especial atrás de una distribución con sesgo se debe investigar si efectivamente es así. *Distribución multimodal.* En la figura *1.2f)* se aprecia un

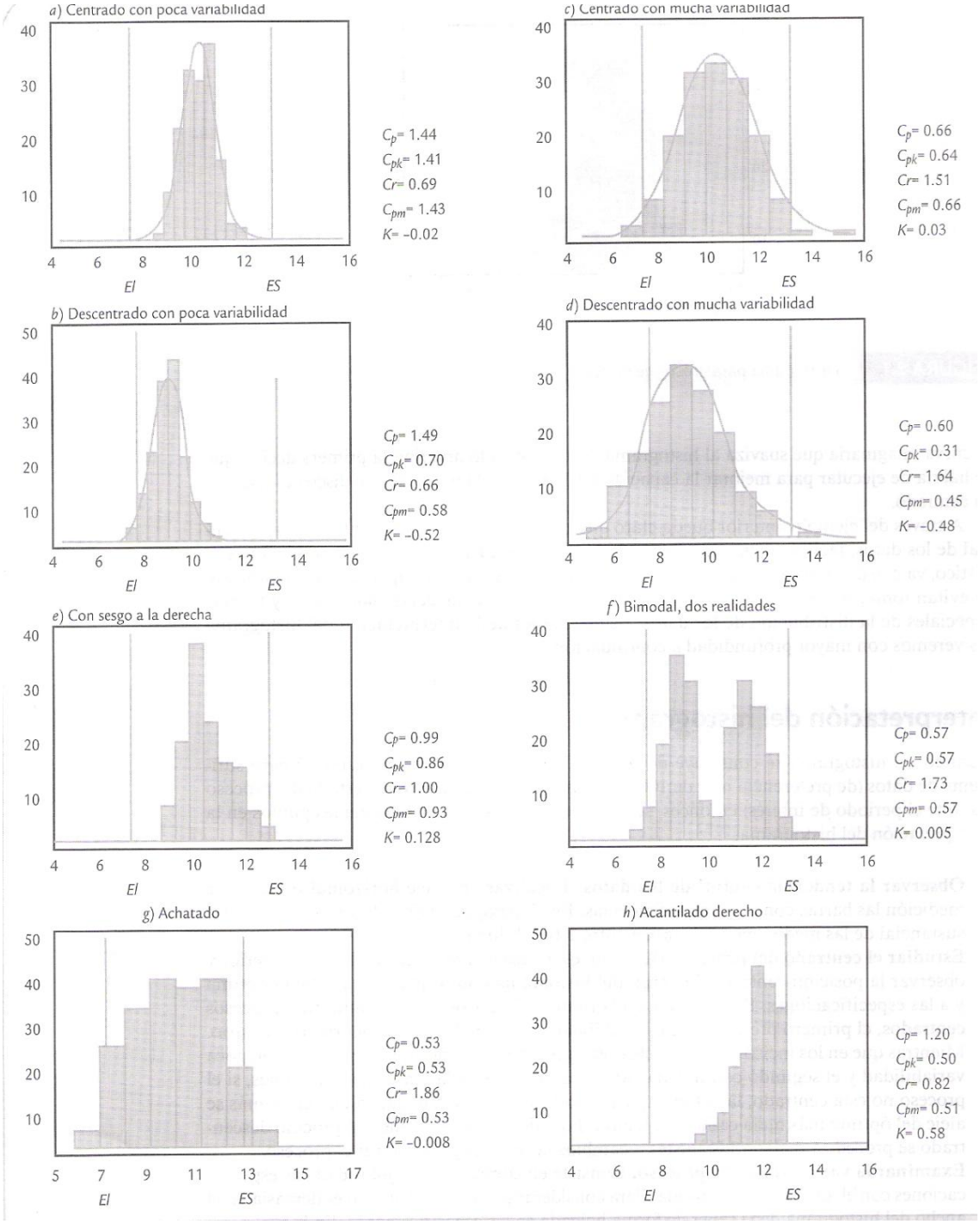


FIG. 1.2

histograma en el que claramente se notan dos modas o picos que muestran dos tendencias centrales diferentes. Este tipo de distribuciones con dos o más modas reflejan la presencia de dos o más realidades o condiciones diferentes

INTERPRETACIÓN DE LOS HISTOGRAMAS

Algunas situaciones que originan una distribución multimodal son:

a) Diferencias importantes de lote a lote en la materia prima que utiliza el proceso, debido a que proceden de diferentes proveedores o al exceso de variación de un mismo proveedor.

b) Cuando en el proceso intervienen varios operadores, con criterios o métodos de trabajo diferentes.

c) Las mediciones de la variable de salida que están representadas en el histograma fueron realizadas por personas o instrumentos diferentes; por lo tanto, se utilizaron distintos criterios o instrumentos mal calibrados.

d) El proceso, cuando generó los resultados de la distribución multimodal, fue operando en condiciones diferentes (una condición para cada moda).

e) En general, una distribución multimodal se debe a la presencia de fuentes de variación bien definidas que deben ser identificadas y corregidas, a fin de mejorar la capacidad del proceso correspondiente. Una forma de identificarlas es analizar por separado los datos en función de diferentes lotes de materia prima, operadores, instrumentos de medición, turnos o días de producción, etc., para así comparar los resultados y ver si hay diferencias significativas.

Distribución muy plana. En la figura *1.2g)* se aprecia un histograma que muestra una distribución muy chata o plana y que está lejos de tener forma de campana. Las situaciones que pueden causar esto son las mismas que las de la distribución multimodal, pero con la particularidad de que las diferencias son menos fuertes; sin embargo, afectan de manera seria la capacidad de un proceso. Por lo tanto, también deben ser identificadas y corregidas mediante la estrategia recomendada antes.

• *Distribución con acantilados.* En el histograma de la figura *1.2h)* se observa un acantilado derecho, que es una suspensión o corte muy brusco en la caída de la distribución.

Algunas de las posibles causas que motivan la presencia de un acantilado son: un lote de artículos previamente inspeccionados al 100% donde se excluyó a los artículos que no cumplen con alguna medida mínima o que exceden una medida máxima (como en la figura), problemas con el equipo de medición, errores en la

medición o inspección (cuando el inspector está predispuesto a no rechazar un artículo y observa que éste casi cumplía con los requisitos, registra la medida mínima aceptable). En general, un acantilado es anormal y, por lo tanto, se debe buscar la causa del mismo.

5. Datos raros o atípicos. Una pequeña cantidad de mediciones muy extremas o atípicas son identificadas con facilidad mediante un histograma, debido a que aparecen una o más barras pequeñas bastante separadas o aisladas del resto. Un dato raro refleja una situación especial que se debe investigar, y entre las posibles causas están las siguientes:

El dato es incorrecto, ya sea por error de medición, de registro o de "dedo" cuando fue introducido a la computadora.

La medición fue realizada sobre un artículo o individuo que no forma parte del proceso o población a la que pertenece el resto.

Si han sido descartadas las dos situaciones anteriores, entonces la medición se debe a un evento raro o especial. Es decir, cuando se hizo la medición, en el proceso estaba ocurriendo una situación especial o fuera de lo común

6. Estratificar. En ocasiones, en el histograma no se observa ninguna forma particular pero existe mucha variación y, en consecuencia, la capacidad del proceso es baja. Cuando los datos proceden de distintas máquinas, proveedores, lotes, turnos u operadores, puede encontrarse información valiosa si se hace un histograma por cada fuente (estratificar), con lo que se podrá determinar cuál es la máquina o el proveedor más problemático.

De acuerdo con los puntos anteriores, es recomendable que siempre que se realice un estudio de la salida de un proceso se utilice el histograma y éste se interprete a detalle. De esa manera será posible detectar situaciones problemáticas y posibles soluciones para las mismas. Además, será una forma concreta de que los datos y mediciones sobre los procesos, que en ocasiones abundan, se conviertan en información útil para la toma de decisiones y acciones. Será necesario tener la precaución de que el histograma se haya obtenido de manera correcta, sobre todo en lo referente al número de clases y a la cantidad de datos.

Limitaciones del histograma

Aunque el histograma es una herramienta fundamental para analizar el desempeño de un proceso, tiene algunas limitaciones:

1. No considera el tiempo en el que se obtuvieron los datos; por lo tanto, con el histograma es difícil detectar tendencias que ocurren a través del tiempo. Por tal razón, no ayuda a estudiar la estabilidad del proceso en el tiempo, lo cual se analiza por medio de cartas de control.
2. No es la técnica más apropiada para comparar de manera práctica varios procesos o grupos de datos; en esos casos, el diagrama de caja o la gráfica de medias son más apropiados.
3. La cantidad de clases o barras influye en la forma del histograma, por lo que una buena práctica es que a partir de la cantidad de clases que de manera inicial sugiere un software, se analice el histograma con un número de clases ligeramente menor y un poco más de clases, a fin de verificar si se observa algo diferente.

DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA

En la industria, las empresas y el gobierno, el volumen de datos que se recopilan es verdaderamente enorme. Incluso un solo tipo de dato como sería el de la cantidad de errores de facturación diarios cometidos en un banco implica la presencia de tal volumen de datos que en realidad más que ser de ayuda, generará confusión. Observe los datos que se muestran en la tabla 1.2

Tabla 1.2 Cantidad de errores diarios cometidos en la facturación

0	1	3	0	1
1	5	4	1	2
1	0	2	0	0
2	1	1	1	2
0	4	1	3	1
1	3	4	0	0
1	3	0	1	2

DATOS NO AGRUPADOS

Los datos no agrupados son un listado de valores observados. Los datos agrupados representan el agrupamiento de todos los valores observados. Los datos pueden ser discretos o continuos.

Dado que con datos desorganizados no se puede obtener información alguna, es necesario contar con un método que permita organizarlos. La tabla 1.2 Servirá para ejemplificar este concepto. Un analista que se dedicara a observar la información presentada en esta tabla difícilmente podría comprender que significan todos estos datos.

Se podrá entender mejor todo marcando la frecuencia con la que cada valor se presenta, como se muestra en la tabla 1.3

El primer paso consiste en hacer un *ordenamiento,* es decir organizar los datos numéricos desordenados por orden ascendente o descendente de magnitud. En la primera columna de la tabla 1.3 se muestra un ordenamiento en orden ascendente del 0 al 5. E siguiente paso consiste en tabular la frecuencia con la que aparece cada uno de los valores. Para ello, se pone una raya o marca debajo de la columna de tabulación y en la hilera correspondiente. Empiece por los números 0, 1, 2, …. De la tabla 1.2 y siga poniendo rayas hasta que haya tabulado todos los datos. La última columna de la tabla 1.3 Es el valor numérico de las rayas marcadas y se conoce con el nombre de *frecuencia.*

El análisis de la tabla 1.3 ahora permite visualizar la distribución de los datos. Si se eliminara la columna correspondiente a “tabulación”, la tabla resultante se conoce como *distribución de frecuencia,* que viene a ser un ordenamiento de los datos que permite observar los valores de frecuencia de cada una de las categorías.

Tabla 1.3 Marcado de la cantidad de errores diarios cometidos en la facturación.

NUMERO DE RECHAZOS	TABULACION	FRECUENCIA
0	𝍸 IIII	9
1	𝍸 𝍸 III	13
2	𝍸	5
3	IIII	4
4	III	3
5	I	1

La distribución de frecuencia es un método muy útil para visualizar datos y es un concepto fundamental en estadística. El saber que un conjunto de números tiene cierto tipo de distribución básico para poder resolver los problemas del control de la calidad. Existen diversos tipos de distribuciones de frecuencia, y el conocer el tipo en si ya puede dar la pauta de cómo resolver determinado problema.

Para mayor claridad visual, las distribuciones de frecuencia se presentan en forma gráfica. Existen diversas formas de presentar las frecuencias de una distribución.

El *histograma* está formado por un conjunto de rectángulos que representan la frecuencia de cada categoría. Representa gráficamente las frecuencias correspondientes a los valores observados. La figura 1.3 es un histograma de los datos de la tabla 1.2

Dado que se trata de una variable discreta, teóricamente podrá haberse representado utilizando una línea vertical en vez de un rectángulo (véase la figura ..). Sin embargo, el rectángulo es lo que más se utiliza.

Otro tipo de representación gráfica es la distribución de frecuencia relativa. En este caso el término relativo indica la representación de proporciones o fracciones del total. La frecuencia relativa se calcula dividiendo la frecuencia de cada uno de los valores de los datos (en este caso, la cantidad de rechazos) entre el total, que viene a ser la suma de las frecuencias. Estos cálculos corresponden a la tercera columna de la tabla 1.2 La frecuencia relativa tiene la ventaja de servir como referencia. Por ejemplo, la proporción correspondiente a nueve unidades

rechazadas es 0.26. Hay quienes en l escala vertical prefieren utilizar porcentaje en lugar de fracciones.

La frecuencia acumulativa se calcula sumando a la frecuencia de cada uno de los valores de los datos la suma de las frecuencias de los valores anteriores de los datos. Como puede observarse en la cuarta columna de la tabla 1.2 las frecuencias acumulativas de 0 unidades rechazadas es 9; para una sola unidad rechazada es 9 + 13 = 22, para

Tabla 1.4 Diversos tipos de distribuciones de frecuencia de los datos de la tabla1.2

CANTIDAD DE RECHAZOS	FRECUENCIA	FRECUENCIA RELATIVA	FRECUENCIA ACUMULATIVA	FRECUENCIA ACUMULATIVA RELATIVA
0	9	9 ÷ 35 = 0.26	9	9 ÷ 35 = 0.26
1	13	13 ÷ 35 = 0.37	9 + 13 = 22	22 ÷ 35 = 0.63
2	5	5 ÷ 35 = 0.14	22 + 5 = 27	27 ÷ 35 = 0.77
3	4	4 ÷ 35 = 0.11	27 + 4 = 31	31 ÷ 35 = 0.89
4	3	3 ÷ 35 = 0.09	31 + 3 = 34	34 ÷ 35 = 0.97
5	1	1 ÷ 35 = 0.03	34 + 1 = 35	35 ÷ 35 = 1.00
Total	35	1.00		

no quede duda de dónde colocar el valor de una observación. Por tanto, los valores de los límites cuentan con un valor decimal o figura significativa más de exactitud que los valores observados. Dado que el intervalo es impar, habrá el mismo número de valores de datos a ambos lados del punto medio. En el caso de la primera celda cuyo punto medio es de 2.533 y con un intervalo de 0.005, habrá dos valores a ambos lados. Es decir, en la celda se ubican los valores 2.531, 2.532, 2.533, 2.534 Y2.535. Para evitar que haya saltos, los límites reales se amplían la mitad de un segmento al siguiente número, y se obtienen así los valores 2.5305 y 2.5355. En la siguiente línea numérica se podrá ver ejemplificado este principio:

Algunos analistas prefieren que los límites estén en las mismas ubicaciones decimales que los datos. Tal práctica no causará problema alguno en tanto el

intervalo de la celda sea impar y se tenga presente que los límites verdaderos se localizan entre el límite hipotético y el siguiente número. En este libro esta es la práctica que se adopta y se muestra en la tabla 1.6. Es decir, el límite inferior de la primera celda es 2.531.

Una vez definidos los límites de una celda, los límites de las demás celdas se calculan sumando sucesivamente los intervalos de una celda. Es decir, los límites inferiores son 2.531 + 0.005 = 2.536, 2.536 + 0.005 = 2.541, ..., 2.566 + 0.005 = 2.571.

Los límites superiores se calculan de igual manera y aparecen en la primera columna de la tabla 1.6.

6. Anotación de la frecuencia de una celda. La cantidad de números presentes en cada celda se anota en la columna de frecuencias de la tabla 1.6. Analizando la tabla 3-5 se podrá observar que para la celda inferior hay: un 2.531, dos 2.532, un 2.533, dos 2.534 y cero 2.535. Es decir, hay un total de seis valores en la celda inferior y la celda cuyo punto medio es de 2.533 y tiene una frecuencia 6. Las cantidades correspondientes de las otras celdas se calculan de manera similar.

En la tabla 1.6 se muestra la distribución de frecuencia ya completa. Esta distribución permite tener una idea más clara del valor central y de cómo se dispersan los valores en tomo de tal valor, de lo que permitirían los datos desorganizados o una hoja de anotaciones. El histograma se muestra en la figura 1.5.

La información acerca de la construcción de histogramas de frecuencia relativa, frecuencia acumulativa y frecuencia acumulativa relativa para datos agrupados es la misma que para datos no agrupados sin embargo existe una excepción. Con los dos histogramas de frecuencia acumulativa el límite verdadero de la celda superior es el valor que se identifica en la abscisa. La construcción de estos histogramas para el problema ilustrativo corresponde, para que haga un ejercicio, al lector.

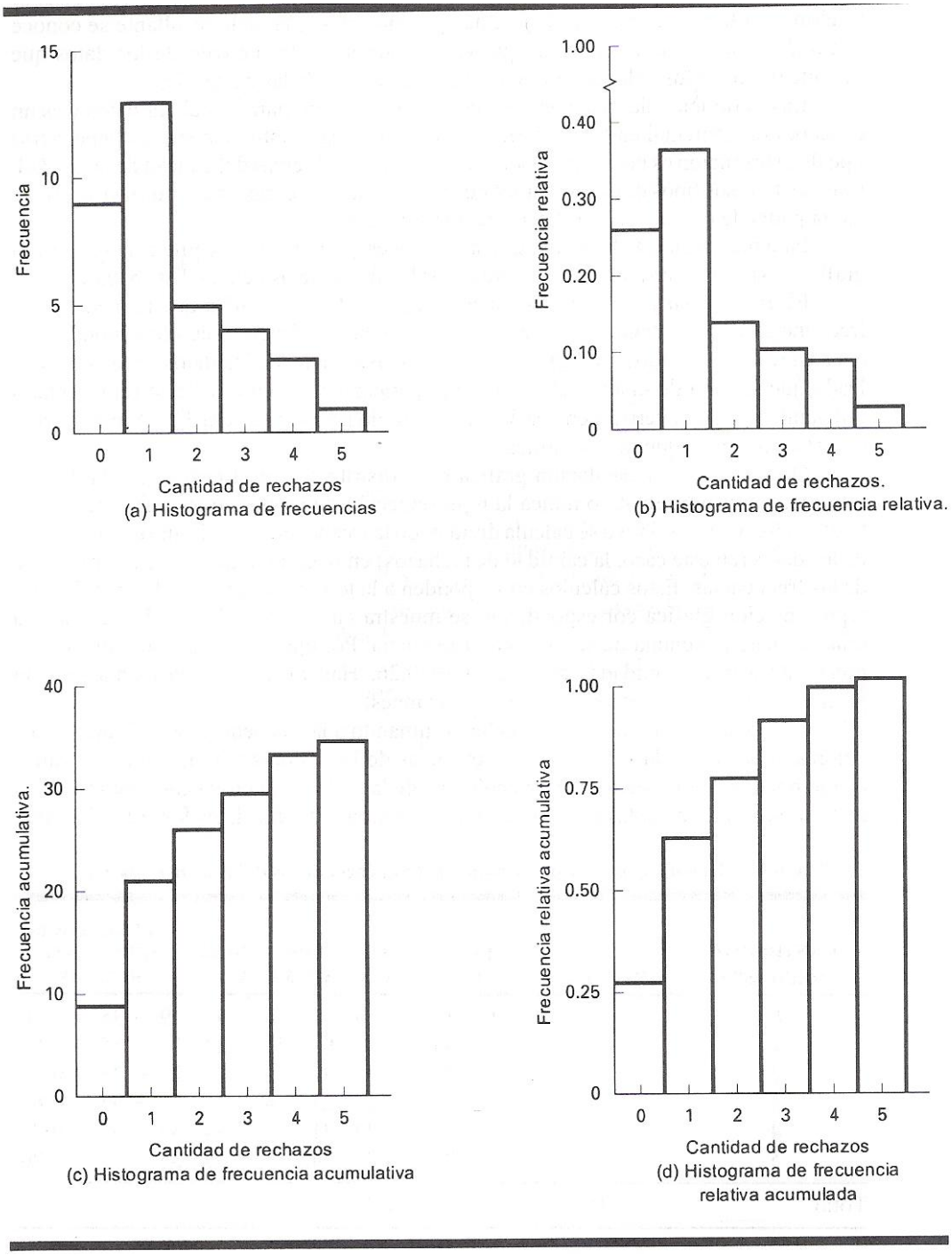


Fig. 1.3 Representación gráfica de los datos de las tablas 1.2 y 1.3.

Tabla 1.4 Peso del eje de acero (kilogramos)

2.559	2.556	2.566	2.546	2.561
2.570	2.546	2.565	2.543	2.538
2.560	2.560	2.545	2.551	2.568
2.546	2.555	2.551	2.554	2.574
2.568	2.572	2.550	2.556	2.551
2.561	2.560	2.564	2.567	2.560
2.551	2.562	2.542	2.549	2.561
2.556	2.550	2.561	2.558	2.556
2.559	2.557	2.532	2.575	2.551
2.550	2.559	2.565	2.552	2.560
2.534	2.547	2.569	2.559	2.549
2.544	2.550	2.552	2.536	2.570
2.564	2.553	2.558	2.538	2.564
2.552	2.543	2.562	2.571	2.553
2.539	2.569	2.552	2.536	2.537
2.532	2.552	2.575 (H)	2.545	2.551
2.547	2.537	2.547	2.533	2.538
2.571	2.545	2.545	2.556	2.543
2.551	2.569	2.559	2.534	2.561
2.567	2.572	2.558	2.542	2.574
2.570	2.542	2.552	2.551	2.553
2.546	2.531 (L)	2.563	2.554	2.544

Tabla 1.5 Hoja de anotaciones del peso del eje de acero (codificado tomando como referencia 2.500 kg)

PESO	TABULACION	PESO	TABULACION	PESO	TABULACION
31	I	46	IIII	61	𝍸
32	II	47	III	62	II
33	I	48		63	I
34	II	49	II	64	III
35		50	IIII	65	II
36	II	51	𝍸 III	66	I
37	II	52	𝍸 I	67	II
38	III	53	III	68	II
39	I	54	II	69	III
40		55	I	70	III
41		56	𝍸	71	II
42	III	57	I	72	II
43	III	58	III	73	
44	II	59	𝍸	74	II
45	IIII	60	𝍸	75	II

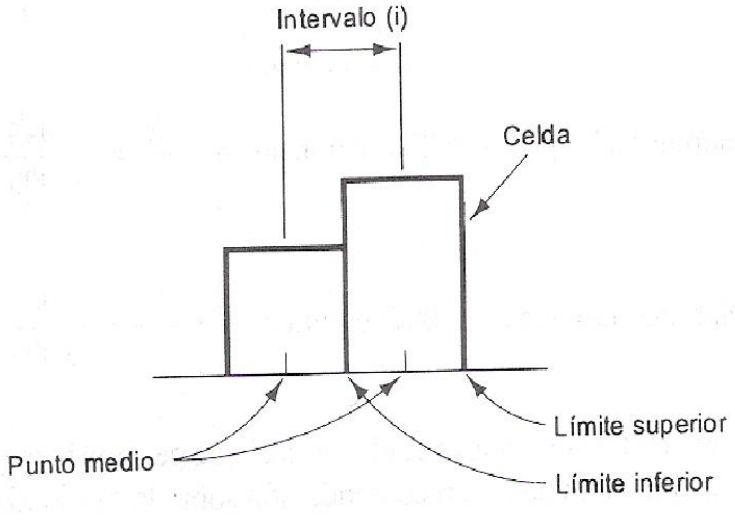


Fig. 1.4 Nomenclatura de las celdas.

El histograma describe las variaciones presentes en el proceso. Sirve para:

1. Definir la capacidad o habilidad del proceso.
2. Comparar lo obtenido con las especificaciones.
3. Darse una idea de la forma de la población.
4. Indica las discrepancias de los datos, como, por ejemplo, saltos o vacíos.

Otros tipos de gráficas de distribución de frecuencia

Para representar distribuciones de frecuencia también se puede utilizar gráficas de barras, como se muestra en la figura 1.6(a), en donde se utilizan los datos de la tabla 1.2. Como ya se indicó antes, aunque la gráfica de barras es teóricamente correcta para datos discretos, por lo general no se le utiliza.

El *polígono* o el *polígono de frecuencia* es otra forma gráfica de representar distribuciones de frecuencia, mostrada en la figura 1.6 (b), en la que se usan los datos de la tabla 1.6. Se construye poniendo un punto sobre cada uno de los puntos intermedios de las celdas, a la altura correspondiente para cada frecuencia. La curva se prolonga en cada uno de sus extremos hasta cerrar la figura. Puesto que el histograma muestra el área de cada una de las celdas, se le considera como mejor representación gráfica que el polígono, por lo que es la que más se emplea.

Tabla 1.6 Distribuciones de frecuencia del peso de un eje de acero (kilogramos)

LIMITES DE LAS CELDAS	PUNTO INTERMEDIO DE LAS CELDAS	FRECUENCIA
2.531–2.535	2.533	6
2.536–2.540	2.538	8
2.541–2.545	2.543	12
2.546–2.550	2.548	13
2.551–2.555	2.553	20
2.556–2.560	2.558	19
2.561–2.565	2.563	13
2.566–2.570	2.568	11
2.571–2.575	2.573	8
Total		110

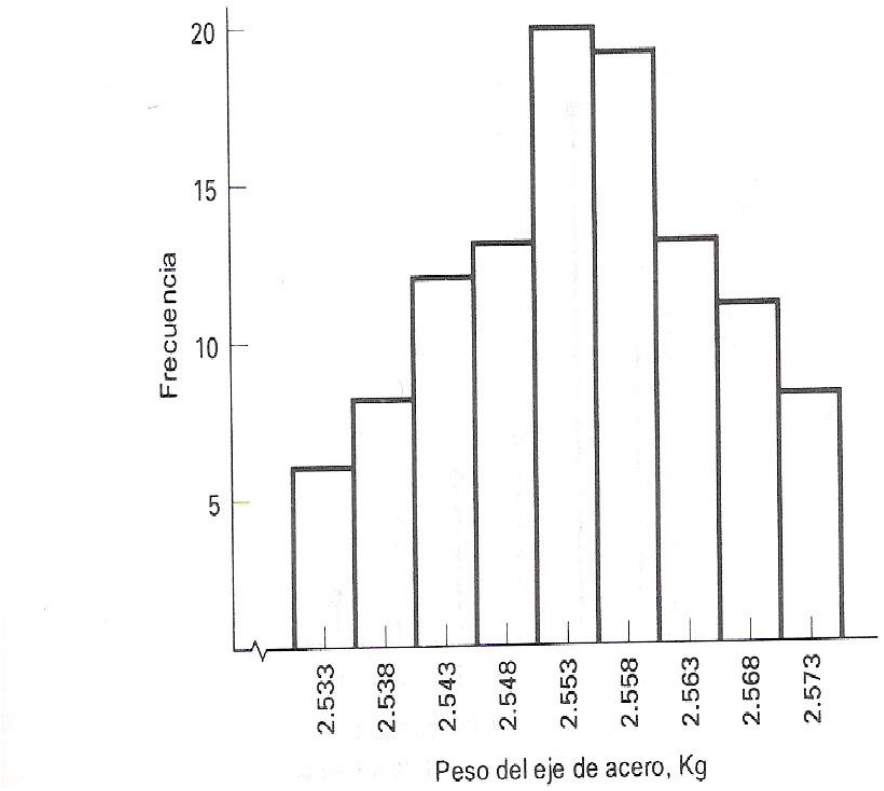
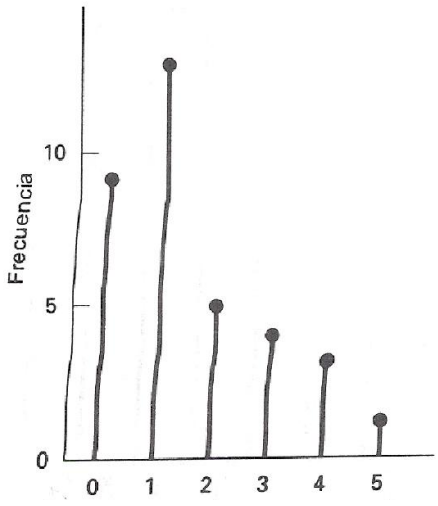
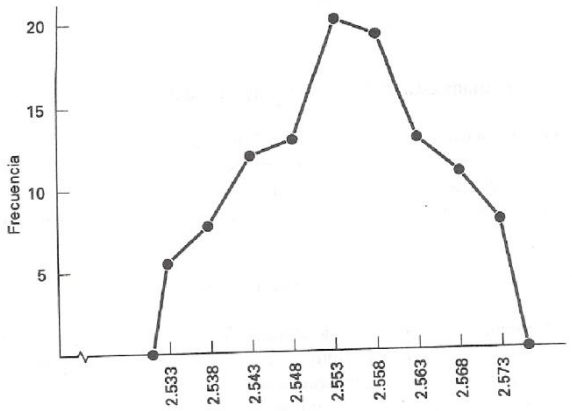


Fig. 1.5 Histograma de los datos de la tabla 1.6

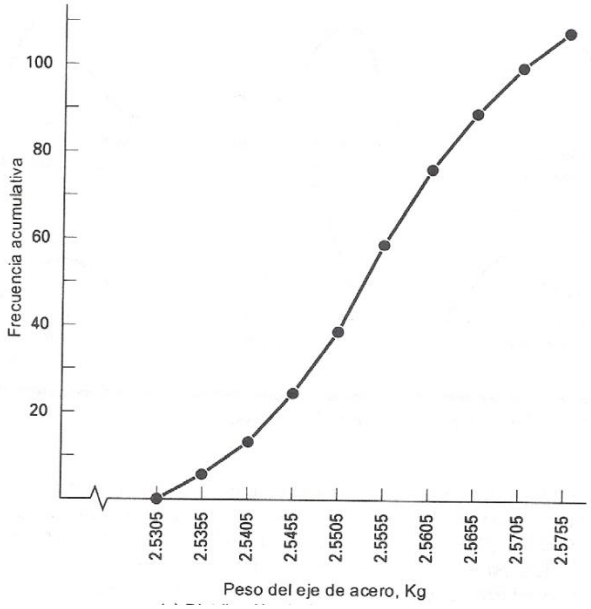


(a) Gráfica de barras de los datos de la tabla 1.2



Peso del eje de acero, kg

(b) Polígono de datos de la tabla 1.6



La gráfica que sirve para presentar la frecuencia de todos los valores excepto el límite superior de celda correspondiente a una celda determinada se *denomina frecuencia acumulativa* u *ojiva.* En la figura 1.6(c) se muestra la curva de distribución de frecuencia acumulativa de los datos de la tabla 1.6, Se pone en la gráfica el valor acumulativo correspondiente a cada celda y los puntos así obtenidos se unen entre sí mediante una línea recta. El límite superior de celda real se marca en la abcisa.

Características de las gráficas de distribución de frecuencia

En las gráficas de la figura 1.6 se utilizan líneas curvas continuas en vez de las formas rectangulares características del histograma. La curva continua representa la distribución de frecuencia de una población, en tanto que el histograma representa la distribución de frecuencia de una muestra.

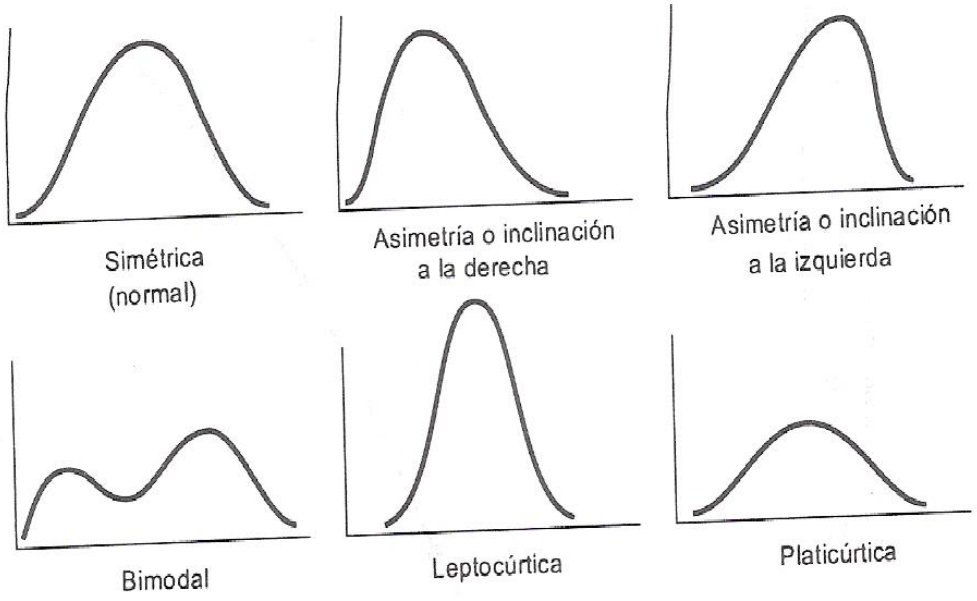


Fig. 1.6 Distribuciones de frecuencia típicas.

Las curvas de distribución de frecuencia muestran ciertas características que son significativas. Una de ellas se refiere a la simetría de la distribución de los datos, o bien la falta de éstos. ¿Los datos están distribuidos de igual manera a ambos lados del valor central, o bien, éstos se agrupan más hacia la derecha o la izquierda? Otra característica es la que se refiere a la cantidad de modas o picos de los datos. Puede haber una moda, dos modas (bimodal) o muchas. La última característica se refiere a la agudeza de la distribución de los datos. Si la forma de la curva es excesivamente aguda se le conoce como *leptocúrtica;* si está más bien aplanada se le denomina *platicúrtica.*

Las distribuciones de frecuencia nos pueden dar muy buena información sobre un problema de control de calidad, la que permite tomar decisiones sin necesidad de hacer mayor análisis. También es posible hacer comparaciones entre

distribuciones tomando en cuenta su ubicación, su abertura y su forma, tal como se ilustra en la figura 1.7 .

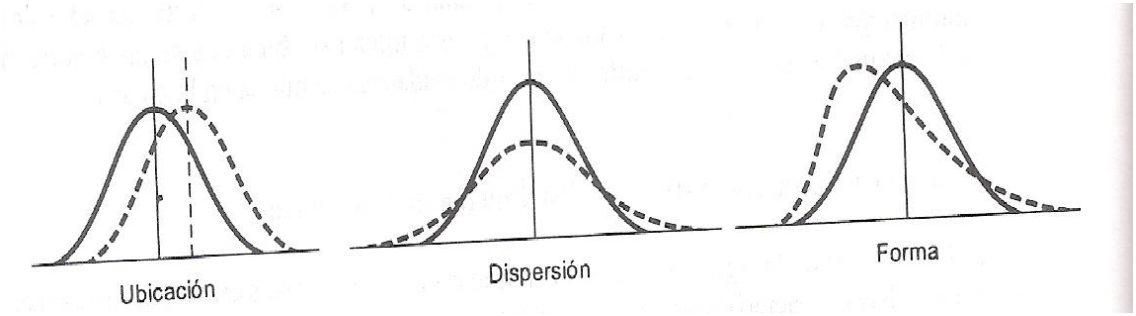


Figura 1.7 Diferencias debido a ubicación, abertura y forma.

Análisis de los histogramas

El análisis de un histograma proporciona información sobre las especificaciones, la forma de la distribución de frecuencia de la población y sobre un problema de control de calidad en especial. En la figura 3.9 se muestra un histograma del porcentaje de concentración de la capa de pintura de base que se aplica previamente a la aplicación de la pintura definitiva. La concentración ideal es entre 1.45 Y 1.74%, como se puede apreciar en el rectángulo sombreado. De una concentración de menos de 1.45% resultaría una mala calidad; más de 1.75% de concentración daría más de la calidad necesaria, pero resultaría más cara y disminuiría la productividad. No hay que obtener estadísticas muy elaboradas para saber que todas las medidas correctivas deberán estar encaminadas a lograr que la diseminación de la distribución se aproxime al valor ideal de 1.6%.

Al agregar más especificaciones a la gráfica se va generando mayor información útil para la solución del problema. Dado que la diseminación de la distribución es indicación de la capacidad del proceso, la gráfica indicará directamente el grado de esta capacidad.

Comentario final

Otro tipo de distribución semejante al histograma es el diagrama de Pareto. El análisis de Pareto es una técnica muy eficiente para descubrir dónde residen los principales problemas relacionados con la calidad. Son dos las diferencias entre un diagrama de Pareto y una distribución frecuencia.

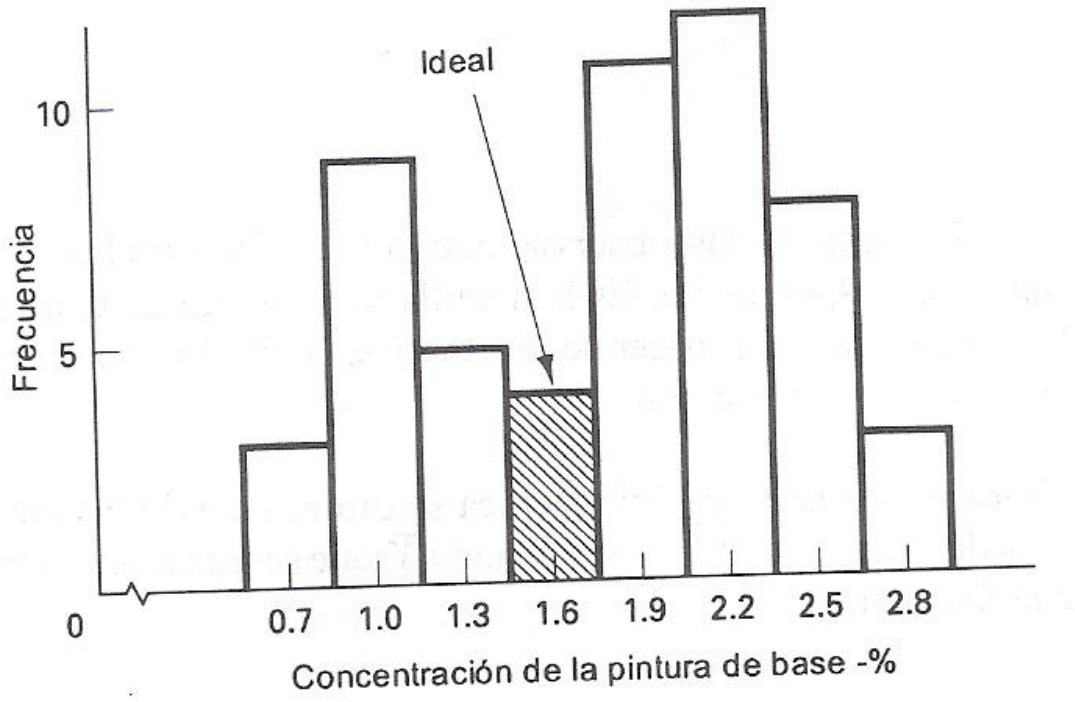


Fig. 1.8 Histograma de la concentración de pintura de base.

En la abscisa se usan categorías en vez de los valores de los datos; la segunda es que las categorías se disponen por orden descendente, empezando por la mayor, y no por orden numérico.

Una de las limitaciones de la distribución de frecuencia es el hecho de que no muestra el orden como se fueron produciendo los datos. En otras palabras, los datos iniciales bien pueden estar todos ubicados en un lado y los datos que aparecieron después, en el otro lado. Si este es el caso, la interpretación de la distribución de frecuencia será distinta. Las gráficas de corrida, que se explicarán en el capítulo 4, muestran el orden como se fueron produciendo los datos y pueden ayudar a realizar el análisis.

MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL

Para resolver muchos de los problemas del control de calidad bastará con recurrir a una distribución de frecuencia. Sin embargo existe un buen número de ellas en las que no se desee emplear una técnica gráfica, o para las que se necesite de la información adicional que proporcionan las técnicas analíticas. Los métodos analíticos utilizados para describir un grupo de datos ofrecen la ventaja de requerir de menos espacio que una gráfica. También permiten comparar entre sí diversos grupos de datos. Asimismo permiten efectuar cálculos e inferencias adicionales. Son dos los métodos analíticos que más se utilizan para describir un grupo de datos: las medidas de tendencia central y las medidas de dispersión. Esta última se explicará en la sección siguiente. En ésta, se explicará qué son las medidas de tendencia central.

La *medida de la tendencia central* de una distribución es un valor numérico que sirve para describir la ubicación central de los datos o en qué medida los datos tienden a agruparse en el centro. Se utilizan por lo general tres tipos de medidas: (1) la media, (2) la mediana y (3) la moda.

La media

La media es la suma de las observaciones realizadas dividida entre la cantidad de observaciones correspondiente. Es la medida más común de una tendencia central. El cálculo de la media se puede hacer de tres formas: (1) de datos no agrupados, (2) de datos agrupados y (3) media ponderada.

I. Datos no agrupados. Esta técnica se utiliza cuando los datos no están organizados.

La media se representa por la notación $\bar{X};$ que se lee como "Xtestada", y se calcula mediante la fórmula:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n} = \frac{X_1 + X_2 + ... + X_n}{n}$$

Donde

$\bar{X}$ = *media*

n = *cantidad de valores observados*

$X_1, X_2, ..., X_n$ = *valor observado que se identifica mediante el subíndice 1,2,…..,n o el subíndice general i*

Σ= símbolo que significa "la suma de"

La primera expresión es una forma simplificada de escribir la fórmula, $\sum_{i=1}^{n} X_i$ que se lee como la "sumatoria de 1 a n de *X* subíndice *i"* y significa sumar todos los valores de las observaciones.

PROBLEMA ILUSTRATIVO

Un técnico midió la resistencia de cinco bobinas y anotó los resultados en ohms *(Ω): X_1* =3.35, *X_2*= 3.37, *X_3=3.28,* X_4=3.34 y X_5= 3.30. Calcule el promedio.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n} = \frac{3.35 + 3.37 + 3.28 + 3.34 + 3.30}{5} = 3.33\Omega$$

En casi todas las calculadoras electrónicas y portátiles es posible calcular automáticamente la media o promedio de los datos que se van introduciendo.

2. Datos agrupados. Una vez que se agrupan los datos de conformidad con una distribución de frecuencia, se puede utilizar la siguiente técnica. La fórmula para obtener la media de los datos agrupados es

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} f_i X_i}{n} = \frac{f_1 X_1 + f_2 X_2 + ... + f_h X_h}{f_1 + f_2 + ... + f_h}$$

donde n = suma de frecuencias

f_i = frecuencia de una celda o frecuencia de un valor observado

X_i = punto intermedio de una celda o de un valor observado

h = cantidad de celdas o de valores observados

Esta fórmula se utiliza cuando se trata de agrupamientos de celdas en donde hay más de un valor observado por celda, como es el caso del problema del eje de

acero (tabla 3-6). También se utiliza cuando cada uno de los valores observados, X_i, tiene su propia frecuencia, f_i, como en el caso del problema de los errores de facturación (tabla 1.1). En esta situación, *h* representa a la cantidad de valores observados.

En otras palabras, si la distribución de frecuencia se agrupó en celdas, X_i, es el punto medio de la celda y f_i la cantidad de observaciones realizadas en esa celda. Si la distribución de frecuencia se ha agrupado de acuerdo con los valores individuales observados, X_i es el valor observado y f_i es la cantidad de veces que el valor se observa en los datos. Esta técnica se aplica por igual en variables discretas y continuas.

El punto intermedio de una celda se utiliza como valor representativo de dicha celda. El punto intermedio se multiplica por su frecuencia de celda, en cada una de las celdas; se suman los productos obtenidos; y se divide entre la cantidad total de observaciones realizadas. En el problema ilustrativo siguiente, las tres primeras columnas corresponden a las de una distribución de frecuencia típica. La cuarta columna es el resultado del producto de la segunda columna (punto medio) y de la tercera columna (frecuencia) y se le denomina *"f X".*

PROBLEMA ILUSTRATIVO

Basándose en los datos sobre la distribución de frecuencia de la vida de 320 llantas de automóviles en un margen de 1,000 km (621.37 millas) que se muestran en la tabla 3-7, calcule la media.

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{n} f_i X_i}{n} = \frac{11{,}549}{320}$$

= 36.1 (que está comprendido en 1000 km)

Entonces $X = 36.1 \times 10^3 Km$

Si se compara la media calculada con la técnica anterior con la obtenida utilizando la técnica para datos no agrupados, es posible que haya una pequeña diferencia en los resultados. La causa se debe a que las observaciones en cada celda no se hayan distribuido uniformemente en cada uno de ellas. En la práctica, la diferencia no es de magnitud tal como para afectar la exactitud del problema.

3. Media ponderada. Cuando varías medias se combinan con distintas frecuencias, se está calculando una *media ponderada.*

Tabla 1.7

Distribuciones de frecuencia de la vida de 320 llantas a lo largo de 1000 km.

LIMITES	PUNTO INTERMEDIO x_i	FRECUENCIA f_i	CALCULO $f_i x_i$
23.6–26.5	25.0	4	100
26.6–29.5	28.0	36	1,008
29.6–32.5	31.0	51	1,581
32.6–35.5	34.0	63	2,142
35.6–38.5	37.0	58	2,146
38.6–41.5	40.0	52	2,080
41.6–44.5	43.0	34	1,462
44.6–47.5	46.0	16	736
47.6–50.5	49.0	6	294
Total		$n = 320$	$\Sigma f_i X_i = 11{,}549$

la media ponderada se calcula utilizando la fórmula:

$$\overline{X}_w = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \overline{X}_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}$$

donde $\overline{X}_w$ = media ponderada
w_i = peso de la media

PROBLEMA ILUSTRATIVO

Se realizaron en tres ocasiones distintas pruebas de resistencia a la tensión en ejes de aleación de aluminio, y se obtuvieron tres valores de media en megapascales (MPa) distintos. La primera vez se realizaron cinco pruebas, obteniéndose una media de 207 MPa (30,000 psi); la segunda, seis y la media resultó ser de 203 Mpa; la última vez se hicieron tres pruebas y la media fue de 206 Mpa. Calcule la media ponderada.

$$\bar{X}_w = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i X_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}$$

$$= \frac{(5)(297) + (6)(203) + (3)(206)}{5 + 6 + 3}$$

$$= 205\,\text{MPa}$$

La técnica de la media ponderada es un caso especial de la técnica de datos agrupados, con la particularidad de que los datos no están organizados de acuerdo con una distribución de frecuencia. En el ejemplo anterior, los pesos son números enteros.

Otra forma de resolver el mismo problema es empleando proporciones. Así,

$$w_1 = \frac{5}{5+6+3} = 0.36$$

$$w_2 = \frac{6}{5+6+3} = 0.436$$

$$w_3 = \frac{3}{5+6+3} = 0.21$$

Y la suma de los pesos es igual a 1.00. Es necesario utilizar esta técnica cuando los pesos están expresados en porcentajes o en su equivalente decimal.

A menos que se indique otra cosa, $\bar{X}$ representa la media de los valores observados

$\bar{X}_{\bar{x}}$ o $\bar{\bar{X}}$:media de medias

$\bar{R}$: media de rangos

$\bar{c}$: media del conteo de rechazos

$\bar{s}$: media de las desviaciones estándares de la muestra, etc.

Mediana

Otro valor que sirve para medir la tendencia central es la *mediana,* y se define como el valor que divide una serie de observaciones ordenadas de manera tal que la cantidad de elementos que la precede es igual a la cantidad de elementos que la siguen.

I. Técnica para datos no agrupados. Hay dos situaciones que se pueden presentar al calcular la mediana de una serie de datos no agrupados: cuando la cantidad de la serie es impar y cuando es par. En el primer caso, la mediana corresponde al punto medio de los valores. Por ejemplo, la mediana del conjunto ordenado de los números 3, 4, 5, 6, 8, 8 y 10 es 6, en tanto que la del conjunto 22, 24, 24, 24 Y30 es 24. Cuando la cantidad de elemento de la serie es par, la mediana corresponde al promedio de los dos números de en medio. Por ejemplo, la mediana del conjunto ordenado de los números 3, 4, 5, 6,

8 y 8 es el promedio de 5 y 6, es decir (5 + 6)/2 = 5.5. Si ambos números que están en medio fueran el mismo, como en el caso del conjunto 22, 24, 24, 24, 30 y 30, se calcularía también como el promedio de los dos números de en medio; en el caso del ejemplo, (24 + 24)/2 =24. El lector deberá tener siempre cuidado de que los números estén ordenados antes de proceder a calcular la mediana.

2. Técnica para datos agrupados. Si los datos están agrupados de conformidad con una distribución de frecuencia, la mediana se calcula ubicando la celda en donde esté el número de la posición media y luego haciendo una interpolación dentro de la celda. La fórmula de la interpolación para hacer este cálculo es la siguiente:

$$Md = L_m + \left(\frac{\frac{n}{2} - cf_m}{f_m} \right) i$$

donde Md = mediana

L_m = límite inferior de la celda en donde está la mediana

n = número total de observaciones

cf_m= frecuencia acumulativa de todas las celdas abajo de L_m

f_m= frecuencia de la celda de la mediana

i = intervalo de la celda

En este ejemplo sobre cómo usar la fórmula, se emplearán los datos de la tabla 1.7. Contando a partir de la celda más baja, cuyo punto medio es de 25.0, el punto intermedio (320/2= 160) se localiza en la celda cuyo punto medio es de 37.0 y su límite inferior es de 35.6. La frecuencia acumulativa *(cf_m)* es de 154, el intervalo de celda es 3 y la frecuencia de la celda de la mediana es 58.

$$Md = L_m + \left(\frac{\frac{n}{2} - cf_m}{f_m} \right) i$$

$$= 35.6 + \left(\frac{\frac{320}{2} - 154}{58} \right) 3$$

= 35.9 (que está comprendido en 1000 km)

Si el conteo se inicia en la parte superior de la distribución, la frecuencia acumulativa se cuenta hasta el límite superior de la celda y la cantidad interpolada se resta del límite superior. Sin embargo, lo más común es empezar a contar por la parte inferior de la distribución.

Moda

La *moda* (Mo) de un conjunto de números es el valor que aparece con la mayor frecuencia. Puede suceder que en una serie de números no haya moda o que haya varias.

Por ejemplo, la serie de números 3, 3, 4, 5, 5, 5, Y 7 tiene una moda de 5; la serie de números 22, 23, 25, 30, 32, Y 36 no tiene moda; la serie de números 105, 105, 105, 107, 108, 109, 109, 109, 110 y 112 tiene dos modas, 105 y 109. Se dice que una serie de números es *unimodal* si sólo tiene una moda; *bimodal* si tiene dos modas y *multimodal* si tiene más de dos modas.

Al agrupar los datos en una distribución de frecuencia, el punto intermedio de la celda que tenga la frecuencia mayor corresponderá a la moda, dado que este punto representa al punto más alto (mayor frecuencia) del histograma. Para un mejor cálculo de la moda, se efectúa una interpolación de manera similar a la utilizada para la mediana.

Aunque esto en realidad no es necesario, dado que la moda se usa básicamente como un método de inspección que permita calcular la tendencia central, y por ello no se necesita lograr más exactitud que la del punto medio de una celda.

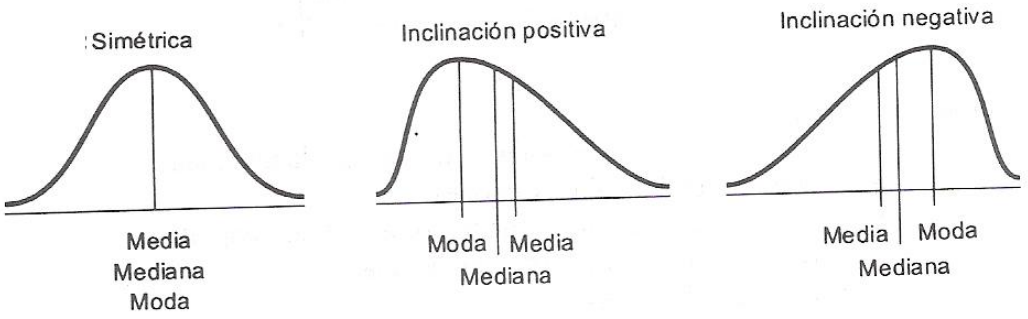


Fig. 1.9 relación entre media, mediana y moda.

Relación que existe entre las diversas medidas de tendencia central

En los polígonos curvilíneos de la figura 1.9 se podrán observar las diferencias que existen entre las tres medidas de tendencia central. Si la distribución es simétrica, los valores de la media, mediana y moda serán idénticos; si la distribución es asimétrica, los valores serán distintos.

La media es la medida de tendencia central que más se utiliza. Sirve cuando la distribución es simétrica o su asimetría no es significativa; también cuando tomando como base la media se desea calcular medidas de dispersión, gráficas de control, etcétera; y cuando en la estadística inductiva se necesita echar mano de un valor estable.

La mediana constituye una medida eficiente de la tendencia central cuando la distribución tiene asimetría positiva (inclinación a la derecha) o negativa

(inclinación a la izquierda). Sirve cuando se desea encontrar el punto medio exacto de una distribución.

Si la distribución tiene valores extremos, la media se verá afectada en tanto que la mediana no. Por ejemplo, en el caso de una serie de números como 12, 13, 14, 15, 16, la mediana y la media son idénticas y su valor es de 14, en tanto que la media es de 12.

Las gráficas de control construidas con base en la mediana son muy fáciles de usar y excelentes para monitorear la calidad.

La moda se utiliza cuando se necesita una rápida y aproximada medida de la tendencia central. Por ello, la moda de un histograma se determina fácilmente mediante una revisión visual. Además, la moda sirve para el valor más característico de una distribución, como podría ser la edad moda de un grupo determinado.

Otras formas de medir la tendencia central son la media geométrica, la media armónica y la media cuadrática. Estas medidas no se utilizan en el control de calidad.

MEDIDAS DE DISPERSIÓN

Introducción

En la sección anterior se habló de las diversas técnicas utilizadas para describir la tendencia central de los datos. La segunda herramienta que se utiliza en la estadística consiste en lo que se denomina *medidas de dispersión,* mediante las que se describe cómo se diseminan o dispersan los datos en torno del valor central. Estas medidas de dispersión y las de tendencia central son necesarias para describir a un grupo de datos. Por ejemplo, los empleados de los departamentos de plateado y de armado de una fábrica reciben el mismo salario mensual de $225.36; sin embargo, el salario más alto del departamento de plateado es de $230.72 y el más bajo es de $219.43; en el departamento de armado el salario más alto es de $280.79 y el más bajo es de $173.54. Los datos del departamento de armado están más diseminados o dispersos en relación con la media que los del departamento de plateado.

Las medidas de dispersión de las que se hablará en esta sección son el rango la desviación estándar y la variancia. Otro tipo de medidas como es la desviación media y la desviación cuartil no se utilizan en el control de calidad.

Rango

El rango de valores de una serie de números es la diferencia entre los valores u observaciones mayor y menor. Simbólicamente se expresa mediante la fórmula:

$R=X_H - X_L$

donde
R = rango
X_H = mayor valor observado en una serie
X_L = menor valor observado en una serie

PROBLEMA ILUSTRATIVO

Si el salario mensual más alto del departamento del armado es de $280.79 y el más bajo es de $173.54, calcule el campo de valores.
$R=X_H - X_L$

= $280.79 - 173.54
= $107.25
El rango es la medida de dispersión más fácil y sencilla de calcular. Otra medida relacionada con la del rango, y que a veces se utiliza, es el *rango medio,* es decir, el rango dividido entre dos, *Rl2.*

Desviación estándar

La *desviación estándar* es un valor numérico, expresado en las unidades de los valores observados, que mide la tendencia a la dispersión de los datos. Una

desviación estándar grande indica una mayor variabilidad en los datos que en el caso de una desviación estándar pequeña. Se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - X)^2}{n-1}}$$

Donde

S = desviación estándar de la muestra

X_i= valor observado

$\bar{X}$ = media

n = cantidad de valores observados

Para explicar el concepto de desviación estándar se utilizará, como ejemplo, el caso de la tabla 1.8. En la primera columna *(X_i)* aparecen seis valores observados, en kilogramos; tomando como base estos valores, se obtiene la media $\bar{X}$ = 3.0. La segunda columna, *(Xi-$\bar{X}$),* es la desviación de la media de cada uno de los valores observados.

Si se suman las desviaciones el resultado será O, y siempre se obtendrá este resultado, aunque no nos proporciona ninguna medida de dispersión. Sin embargo, si las desviaciones se elevan al cuadrado, todas resultarán positivas y su suma siempre será mayor de cero. En la tercera columna se muestran los cálculos *(Xi-$\bar{X}$)²,* y la suma resultante es 0.08, valor que variará dependiendo de los valores observados. La media de las desviaciones que se elevaron al cuadrado se determina dividiendo entre n; sin embargo, por razones teóricas se dividirá entre n-1. Es decir:

$$\frac{\sum (X_1 - X)^2}{n-1} = \frac{0.08}{6-1} = 0.016 Kg^2$$

Tabla 1.8 Análisis de la desviación estándar

X_i	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$
3.2	0.2	0.04

2.9	-0.1	0.01
3.0	0.0	0.00
2.9	-0.1	0.01
3.1	0.1	0.01
2.9	-0.1	0.1
$\bar{X}$ =3.0	$\sum$ =0	$\sum$ =0.08

En la respuesta obtenida las unidades están al cuadrado. Si bien no es posible aceptar este resultado como una medida de la dispersión, en cambio sí es útil como medida de la variabilidad, utilizable en estadística avanzada. Se le llama *variancia* y está representada por el símbolo S^2. Si se extrae raíz cuadrada, el resultado estará expresado en las mismas unidades de los valores observados. El cálculo es el siguiente:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0.08}{6-1}} = 0.13kg$$

Esta fórmula tiene el propósito de explicar, más que el de servir para realizar cálculos.

Puesto que puede haber datos agrupados y no agrupados, hay varias técnicas para efectuar los cálculos.

I. Técnica para datos no agrupados. Es posible utilizar la fórmula empleada para determinar la desviación estándar para el caso de los datos no agrupados. Sin embargo, es preferible utilizar otra fórmula para realizar los cálculos:

$$S = \sqrt{\frac{n\sum_{i=1}^{n}X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n}X_i\right)^2}{n(n-1)}}$$

PROBLEMA ILUSTRATIVO

Calcule la desviación estándar de la humedad presente en un rollo de papel kraft. Los resultados obtenidos en seis lecturas efectuadas en todo el rollo de papel fueron 6.7, 6.0, 6.4, 6.4, 5.9 y 5.8%

$$S = \sqrt{\frac{n\sum_{i=1}^{n} X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} X_i\right)^2}{n(n-1)}}$$

$$= \sqrt{\frac{6(231.26) - (37.2)^2}{6(6-1)}}$$

= 0.35%

En muchas calculadoras portátiles puede calcularse la desviación estándar con la simple introducción de los datos y ordenando el comando respectivo.

2. Técnica para datos agrupados. Si los datos están agrupados conforme a una distribución de frecuencia, se puede aplicar la siguiente técnica. La fórmula de la desviación estándar de los datos agrupados es la siguiente:

$$S = \sqrt{\frac{n\sum_{i=1}^{h} (f_i X_i^2) - \left(\sum_{i=1}^{h} f_i X_i\right)^2}{n(n-1)}}$$

en donde los símbolos $f_i, X_i, n \;\; y \;\; h$ significan lo mismo que en el caso de la media de los datos agrupados.

En esta técnica se añaden dos columnas más a la distribución de frecuencia. Tales columnas se designan como "fX" y "fX^2", como se muestra en la tabla 1.9. Recuérdese que la columna "fX" se necesita para calcular la media; por tanto, sólo se necesita una columna más para calcular la desviación estándar. La técnica se ilustra mediante el siguiente ejemplo.

No redondee los valores correspondientes a $\sum fX$ o $\sum fX^2$, ya que afectará la precisión. En muchos modelos de calculadoras portátiles se pueden introducir datos agrupados y dar un comando para calcular S.

A menos que se indique otra cosa, *S* significa S_x, la desviación estándar muestra de los valores observados. Se utiliza la misma fórmula para calcular

S_x, = desviación estándar de la muestra de medias

S_p = desviaciones estándar de la muestra de proporciones

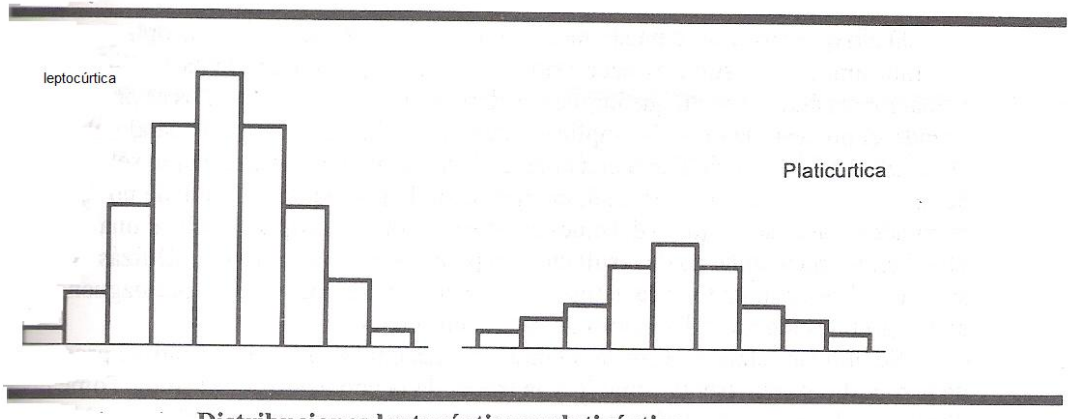
S_R - desviación estándar de la muestra de rangos

S_s - desviación estándar de la muestra de desviaciones estándares, etc.

Tabla 1.9

Velocidades de un carro de pasajeros (en km/h) durante un intervalo de 15 minutos, en I-57, en la ubicación 236.

LIMITES	PUNTO MEDIO X_i	FRECUENCIA f_i	CALCULO f_iX_i	CALCULO $f_iX_i^2$
72.6–81.5	77.0	5	385	29,645
81.6–90.5	86.0	19	1634	140,524
90.6–99.5	95.0	31	2945	279,775
99.6–108.5	104.0	27	2808	292,032
108.6–117.5	113.0	14	1582	178,766
Total		$n = 96$	$\Sigma fX = 9354$	$\Sigma fX^2 = 920{,}742$



Distribuciones leptocúrtica y platicúrtica.

Fig. 1.12

CONCEPTO DE POBLACION Y MUESTRA

Ya es necesario abordar el concepto de población y muestra. Al construir una distribución de frecuencia de los pesos de diversos ejes de acero, se escogió una pequeña porción, o *muestra,* representativa de todos los ejes. Asimismo, los datos obtenidos sobre las velocidades de un carro de pasajeros representaron sólo un fragmento de todos los carros de pasajeros. La población es el conjunto total de las mediciones y, en los ejemplos anteriores, la población corresponde a la totalidad de los ejes de acero y de los carros de pasajeros. Cuando se calculan las medias, las desviaciones estándar y otro tipo de mediciones relacionadas con las muestras, dichas medidas se denominan *estadísticas.* Dado que la composición de las muestras puede variar, las estadísticas calculadas resultarán ser mayores o menores que los valores reales de la población, y se conocen como *parámetros.* Los parámetros se consideran como valores de referencia fija (estándar) o como el cálculo más aproximado de estos valores en un momento determinado.

En una población puede figurar un número infinito de elementos, por ejemplo, la producción diaria de ejes de acero. Puede ser infinita o casi infinita, como es el caso de la cantidad de remaches de la producción anual de aeroplanos tipo jet. La población se define de diversas maneras, dependiendo de la situación de que se trate. Por ejemplo, el estudio de un producto podría implicar a la población de la producción de una hora, de una semana, de 5000 piezas, etcétera.

Dado que rara vez se puede medir la totalidad de la población, se opta por elegir una muestra. El muestreo es necesario cuando es imposible medir la totalidad de la población; cuando el gasto que implica la observación de todos los datos es prohibitivo: cuando el proceso de revisión implica la destrucción del producto; o cuando el probar el comportamiento de la población entera podría ser muy peligroso, como sería el caso de un nuevo fármaco. En realidad, el análisis de la población total puede no producir resultados más exactos que el del muestreo. Se ha demostrado que el realizar una revisión 100% en forma manual no da resultados tan precisos como el muestreo. Quizás la razón sea que el aburrimiento y la fatiga favorecen que los inspectores prejuzguen cada elemento revisado considerándolo de antemano aceptable.

Se utilizan letras griegas para nombrar a las poblaciones. Por tanto, el promedio de la muestra se representa como $\bar{X}$ y la media de la población por *μ* (mu). Tome nota de que la palabra "promedio" se reemplaza por la palabra "media" al hablar de población.

El símbolo X_0 es el valor estándar o de referencia. Los conceptos matemáticos se basan en que *μ* es valor real *(*X_0 representa un equivalente práctico que permita el uso de los conceptos). La desviación estándar de la muestra se representa por S, y la desviación estándar de la población por el símbolo *σ* (sigma). El símbolo S_o es el valor estándar o de referencia y guarda la misma relación con *σ que* X_0 con μ. Nunca será posible llegar a conocer el valor real de la población; por ello, se utilizan los símbolos $\hat{\mu}$ *y* $\hat{\sigma}$ para indicar que se trata de la "aproximación de". En la tabla 1.11 se comparan muestra y población. La distribución de frecuencia de una muestra se representa mediante un histograma, en tanto que la distribución de frecuencia de una población se representa mediante una curva continua. Conforme haya oportunidad, se irán presentando comparaciones adicionales de estos dos conceptos.

El objetivo fundamental de elegir una muestra permite aprender algo sobre la población y sirve como auxiliar para tomar una decisión. La muestra escogida deberá ser tal que tienda a parecerse o a representar a toda la población. Qué tan bien representa la muestra a la población dependerá del tamaño de la muestra, del azar, del método de muestreo y de si las condiciones cambian o no.

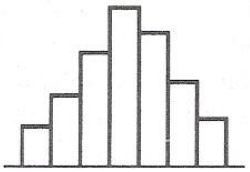
En la tabla 1.12 se muestran los resultados obtenidos en un experimento que ilustra la relación entre muestras y población. En un recipiente hay 800 esferas azules y 200 verdes, cuyo diámetro es de 5 mm (aproximadamente, 3/16 pulgadas). Se considera que las 1,000 esferas son la población, cuyo 20% es verde. Se escogen muestras cuyo tamaño es de 10 unidades, se anotan en la tabla y luego se devuelven al recipiente. En la tabla se ejemplifican los diferentes resultados obtenidos con la muestra y lo que habría que esperar de la población conocida. Sólo en las muestras 2 y 7 1as estadísticas de la muestra son iguales a los parámetros de la población. Definitivamente interviene el factor azar determinante de la composición de la muestra. Al combinar las ocho muestras

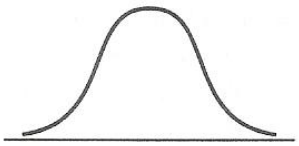
individuales en una sola, más grande, el porcentaje de esferas verdes es de 18.8, lo que corresponde al valor de población cercano al 20%.

Tabla 1.11

Comparación de muestra y población.

MUESTRA	POBLACION
Estadísticas	Parámetro
$\overline{X}$ — promedio	$\mu(\overline{X}_0)$ — media
s — desviación estándar de la muestra	$\sigma(s_0)$ — desviación estándar





Si bien es posible hacer inferencias acerca de la población tomando como base las muestras, también es cierto que conocer la población ofrecerá información para analizar la muestra. Es decir, es posible determinar si una muestra proviene de tal o cual población. Este concepto es necesario para comprender la teoría de la gráfica de control.

Tabla 1.12 Resultado de las ocho muestras de esferas azul y verde obtenidas de una población conocida

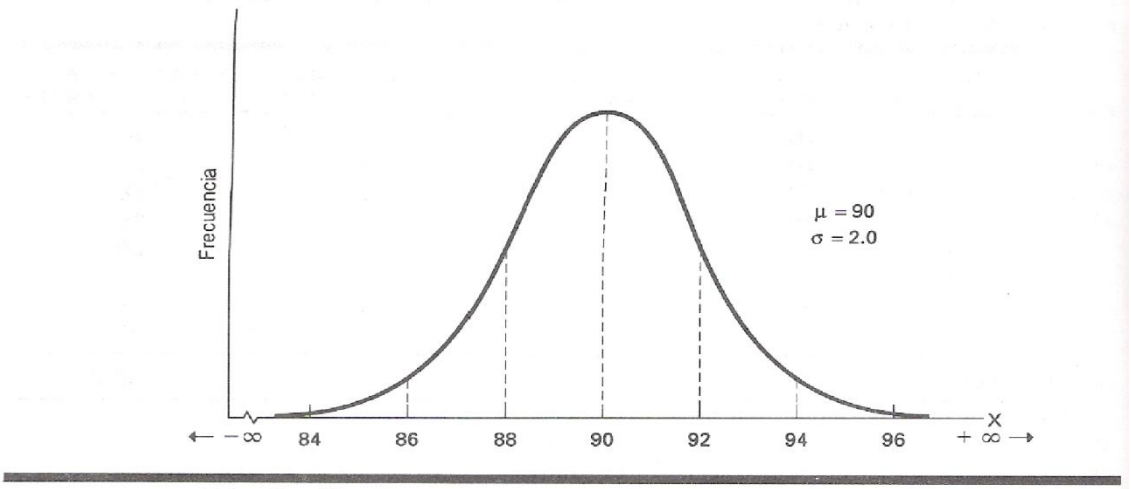
NÚMERO DE MUESTRA	TAMAÑO DE LA MUESTRA	CANTIDAD DE ESFERAS AZULES	CANTIDAD DE ESFERAS VERDES	PORCENTAJE DE ESFERAS VERDES
1	10	9	1	10
2	10	8	2	20
3	10	5	5	50
4	10	9	1	10
5	10	7	3	30
6	10	10	0	0
7	10	8	2	20
8	10	9	1	10
TOTAL	80	65	15	18.8

LA CURVA NORMAL

Descripción

Si bien hay tantas poblaciones como diversas condiciones, a todas se les puede representar utilizando unos cuantos tipos generales. Uno de estos tipos, muy común, se conoce como *curva normal,* o *distribución gaussiana.* La curva normal es una distribución simétrica, unimodal, en forma de campana, y en la que la media, mediana y moda tienen el mismo valor.

Se obtiene una curva de población o de distribución a partir de un histograma de frecuencias. Conforme la dimensión de la muestra del histograma va creciendo, el intervalo de la celda se reduce más y más. Una vez que el tamaño de la muestra es bastante grande y el intervalo de la celda bastante pequeño, el histograma se asemejará a un polígono curvilíneo o a una curva, que representa a la población. En la figura 1.13 se muestra una curva de la población normal correspondiente a la realización de 1,000 observaciones de la resistencia en ohms de un aparato eléctrico cuya media de población *μ,* es de 90 Ω, Y con una desviación estándar de población, *σ,* de 2 Ω. El intervalo entre las líneas de puntos es de una desviación estándar, *σ.*



Distribución normal de la resistencia de un aparato eléctrico cuya μ = 90 ohs y σ = 2.0 ohms.

Figura 1.13

Muchos fenómenos de variación en la naturaleza y en los procesos industriales se comportan de acuerdo con la distribución de frecuencia de las curvas normales. Por ejemplo, las variaciones en peso de los elefantes, la velocidad de los antílopes y la altura de los seres humanos se comportan como una curva normal. Asimismo, las variaciones que se producen en la industria, como es el peso de troqueles de hierro gris, la duración de un foco de 60 W y las dimensiones de un anillo de pistón de acero se asemejan a una curva normal. En el caso de la altura del ser humano, es de esperar que una pequeña porción sea muy alta u otra muy baja, estando la mayoría de las alturas agrupadas en torno al valor promedio. La curva normal es tan excelente descripción de las variaciones que se producen en la mayoría de las características de la calidad industrial, que constituye la base de muchas técnicas para el control de la calidad.

Todas las distribuciones normales de las variables continuas se pueden convertir a la distribución normal estandarizada (véase la figura 1.14), utilizando *el valor normal estandarizado,* Z. Por ejemplo, considérese el valor de 92 Ω de la figura 1.13, que tiene una desviación están dar arriba de la media (μ + *l σ* = 90 + 1(2) = 92). La conversión del

valor Z es:

$$Z = \frac{X_i - \mu}{\sigma} = \frac{92 - 90}{2} = 1$$

que también está 1 σ arriba de la escala Z de la fígura 1.14.

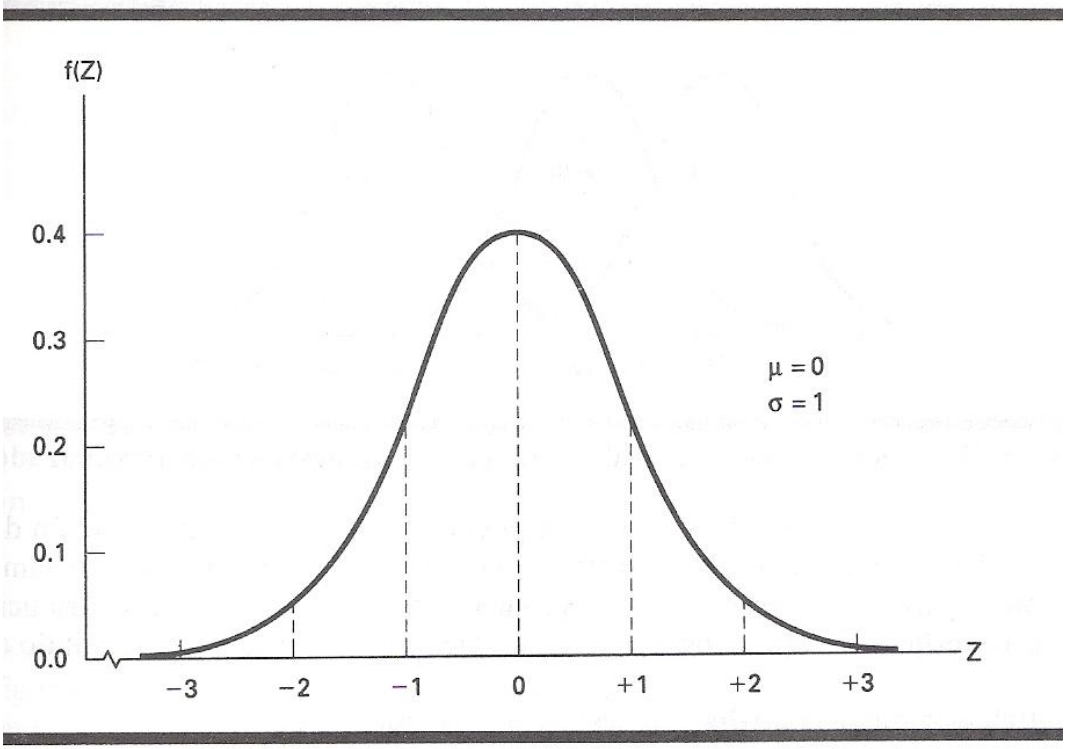
La fórmula de la curva normal estandarizada es

$$f(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z_{\alpha/2}} = 0.3989 e^{-z_{\alpha/2}}$$

donde

π = 3.14159

e = 2.71828



Distribución normal estandarizada, en la que μ = 0 y σ = 1,

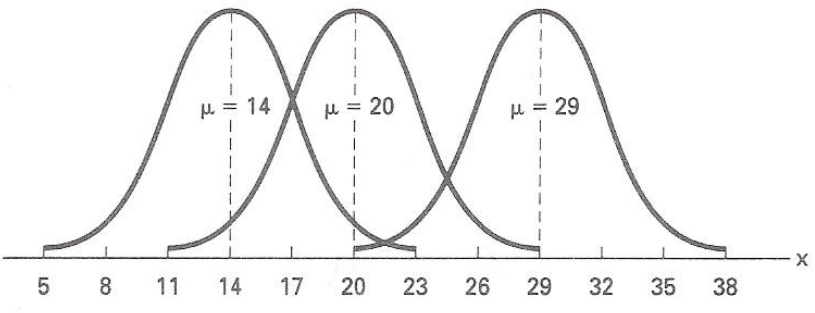
Fig. 1.14

$$Z = \frac{X_i - \mu}{\sigma}$$

En la figura 3-14 se muestra la curva estandarizada, con una media de cero y desviación estándar de l. Se observará el inicio asintótico de *la* curva en *el punto* Z = -3 y Z = +3.

El área *que* queda *debajo* de *la* curva es *igual* a *1.000* o *el 100%, lo que permite* utilizarla para realizar cálculos de probabilidad. Dado *que* el área que está bajo la curva, *entre diversos puntos, constituye* un *dato estadístico útil.*

A la distribución normal se le puede llamar también distribución de probabilidad normal. Si bien es la distribución de población más importante, también hay otras para variables continuas. Se cuenta también con varias distribuciones de probabilidades para variables discretas.



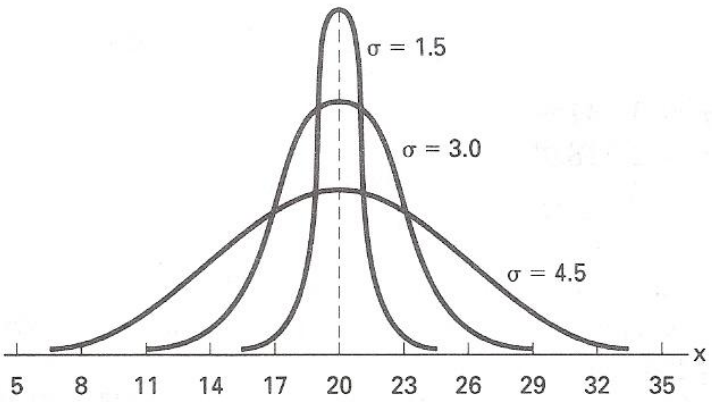
Curva normal con medias diferentes pero desviaciones estándar idénticas.

Fig. 1.15

Relación entre la media y la desviación estándar

Como se habrá podido observar en la fórmula de la curva normal estandarizada, existe una relación bien definida entre la media, la desviación estándar y la curva normal. En la figura 1.15 se muestran tres curvas normales con valores de media distintos; como se podrá ver, en lo único que difieren es en su ubicación. En la figura 1.16 se muestran tres curvas normales cuya media es la misma, pero tienen distintas desviaciones estándar.

En estas figuras se ilustra el principio de que cuanto mayor sea la desviación estándar, más aplanada es la curva (los datos están muy dispersos) y cuando menor sea la desviación estándar, más puntiaguda es la curva (los datos se dispersan en un área muy estrecha). Si la desviación estándar es cero, todos los valores serán idénticos a la media y no habrá curva alguna.



Curva normal con desviaciones estándar distintas pero medias iguales.

Fig. 1.16

La distribución normal queda completamente definida por la media de la población y la desviación estándar de la misma. Asimismo, como podrá observarse en las figuras 1.15 y 1.16, ambos parámetros son independientes. En otras palabras, un cambio en uno no tiene efecto sobre el otro.

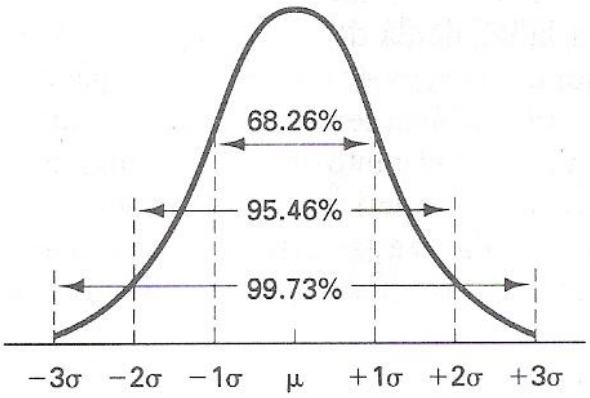


Fig. 1.17 Porcentaje de elementos comprendidos dentro de ciertos valores de la desviación estándar.

Existe una relación entre la desviación estándar y el área comprendida bajo la curva, como se muestra en la figura 1.17. La figura muestra que en la distribución normal, 68.26% de los elementos, está dentro de los límites μ+ 1 σ y μ-1 σ,

95.46% de los elementos están dentro de los límites $\mu + 2\sigma$ y $\mu - 2\sigma$ y 99.73% de los elementos están dentro de $\mu + 3\sigma$ y $\mu - 3\sigma$. Ciento por ciento de los elementos quedan entre los límites $+\infty$ y $-\infty$. Estos porcentajes se cumplen independientemente de la forma de la curva normal. El hecho de que el 99.73 % de los elementos quede comprendido entre los $\pm 3\sigma$ sirve de base para las gráficas de control.

Aplicaciones

Para definir el porcentaje de elementos que están comprendidos entre dos valores determinados se puede recurrir al cálculo. Sin embargo, esto en realidad no es necesario, dado que las áreas que quedan bajo la curva correspondiente a los valores de Z aparecen en la tabla correspondiente a áreas bajo la curva normal. El primer paso consiste en calcular el valor de Z utilizando la fórmula:

$$Z = \frac{X_i - \mu}{\sigma}$$

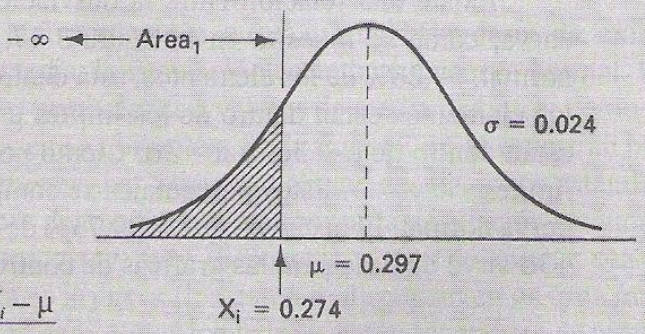
Donde
Z = valor normal estándar
X_i = valor individual
μ = media
σ = desviación estándar de la población.
Luego, utilizando el valor Z obtenido, de una tabla que sólo maneja la mitad de la curva, el valor del área que está bajo la curva, a la izquierda de *X;.* Por ejemplo, si el valor de Z es de = 1.76, el correspondiente valor del área es de 0.0392. Dado que el área total bajo la curva es 10000, el valor de 0.0392 del área se convierte al porcentaje de elementos que están bajo la curva tan sólo desplazando el punto decimal dos lugares a la derecha. Por tanto, 3.92 % de los elementos tienen valor inferior al valor particular *X;.*
Suponiendo que los datos están distribuidos normalmente, se puede determinar porcentaje de elementos de los datos que tienen un valor inferior a un valor

determinado, mayor que un valor dado, y comprendido entre dos valores. Si los valores son mayores y/o menores que las especificaciones se contará con una muy útil herramienta estadística.
Los siguientes problemas ilustrativos mostrarán la aplicación de la técnica.

Nótese que en la ecuación se sustituyó X_0. El concepto de curva normal se basa en los valores de μ y σ ; sin embargo X_0 y S_o se pueden sustituir siempre y cuando haya pruebas de que la distribución es de tipo normal. El último problema ilustra la independencia entre μ y σ. Una ligera modificación en el centrado del proceso no afectará la dispersión.

PROBLEMA ILUSTRATIVO

El valor medio del peso de una marca determinada de cereal durante el año pasado fue de 0.297 kg (10.5 oz), su desviación estándar fue de 0.024 kg. Suponiendo que se trata de una distribución normal, calcule el porcentaje de datos que está comprendido debajo del límite de especificación inferior de 0.274 kg. (*Nota:* Puesto que la media y la desviación estándar se calcularon después de realizar una considerable cantidad de pruebas durante el año, se les considera cálculos válidos de los valores de la población).



$$Z = \frac{X_i - \mu}{\sigma}$$

$$Z = \frac{0.274 - 0.297}{0.024}$$

$$Z = -0.96$$

En la tabla A se observa que si $Z = -0.96$,

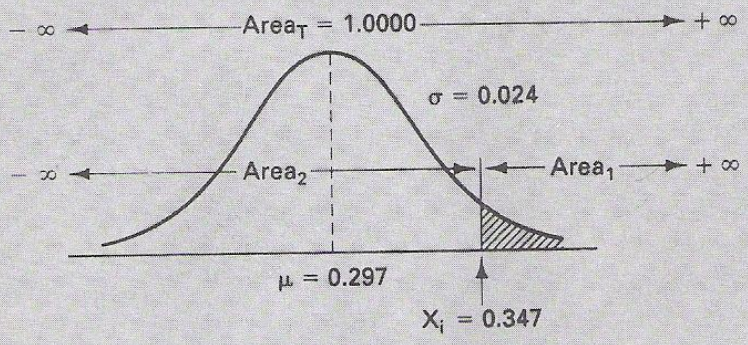
$$\text{Area}_1 = 0.1685 \text{ o } 16.85\%$$

Por tanto, el 16.85 por ciento de los datos pesa menos de 0.274 kg.

PROBLEMA ILUSTRATIVO

Usando los datos del problema anterior, calcule el porcentaje de datos comprendido arriba de 0.347 Kg.

Dado que la tabla A es una tabla de lectura a la izquierda, para resolver este problema hay que usar la relación: $Area_1 + Area_2 = Area_T = 1.0000$. Por tanto se calcula el $Area_2$ y se le resta a 1.0000 para obtener así el $Area_1$.



$$Z_2 = \frac{X_i - \mu}{\sigma}$$

$$= \frac{0.347 - 0.297}{0.024}$$

$$= +2.08$$

En la tabla A se observa que si $Z_2 = +2.08$,

$$Area_2 = 0.9812$$

$$Area_1 = Area_T - Area_2$$

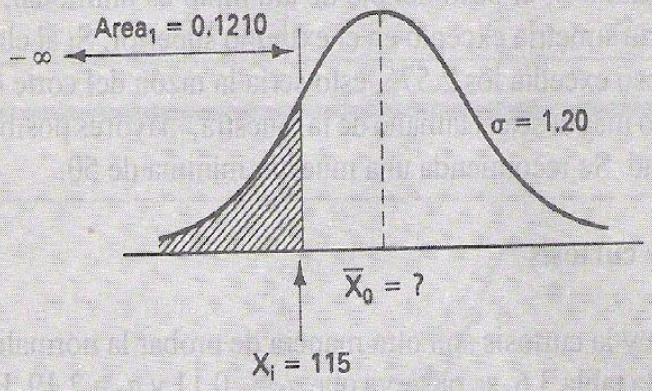
$$= 1.000 - 0.9812$$

Por tanto, el 1.88% de los datos superan a 0.347 kg.

PROBLEMA ILUSTRATIVO

Si lo que se desea es que el 12.1% del voltaje de línea esté por debajo de los 115 V, ¿cómo habrá que ajustar el voltaje medio? La dispersión es de $\sigma = 1.20$ V.

Lo que se pide en este problema es lo opuesto de los anteriores. Primero se localiza en la tabla A el valor 12.1% o 0.1210. Se obtiene así el valor Z y utilizando la fórmula de Z, se despeja el voltaje medio. En la tabla A, con el $\text{Area}_1 = 0.1210$, se obtiene –1.17 como valor de Z.



$$Z_1 = \frac{X_i - \overline{X}_0}{\sigma}$$

$$-1.17 = \frac{115 - \overline{X}_0}{1.20}$$

$$\overline{X}_0 = 116.4 \text{ V}$$

Es decir, el voltaje medio debe centrarse a 116.4 V para que el 12.1% de los valores sea inferior a 115 V.

DIAGRAMA DE PARETO

Alfredo Pareto (1848-1923) llevó a cabo, muy completos estudios sobre la distribución de la riqueza en Europa. Descubrió que unos cuantos concentraban la mayor parte de la riqueza, en tanto que era muy grande el número de pobres que poseían muy poco. Esta desigual distribución de la riqueza se convirtió en parte fundamental de la teoría económica. El doctor Joseph Juran se dio cuenta de que este concepto era universal, por lo que se podía aplicar en diversos campos. Fue él quien acuñó las frases *minoría vital* y *mayoría útil.*

Un diagrama de pareto es una gráfica en donde se organizan diversas .clasificaciones de datos por orden descendente, de izquierda a derecha, como puede observarse en la figura 2.1. En este caso, las clasificaciones de datos - corresponden a tipos de fallas producidas en campo. Ejemplos de otros tipos de clasificaciones de datos serían los problemas relacionados con productos rechazados, las causas de ello y diversos tipos de rechazos. La-minoría vital aparece a la izquierda de la gráfica y la mayoría útil, a la derecha. Hay veces que es necesario combinar elementos de fa mayoría útil en una sola clasificación denominada *otros,* y que en la figura se indican como O. Siempre que se utilice la categoría *otros,* ésta deberá colocarse en el extremo derecho. La escala vertical es para el costo en unidad monetaria, frecuencia o porcentaje. La diferencia entre un diagrama de Pareto y de un histograma radica en que la escala horizontal de una diagrama de Pareto se refiere a categoría en tanto que en el histograma tal escala es numérica.

Hay ocasiones en las que en el diagrama de Pareto aparece una línea acumulativa, tal como se muestra en la figura 2.2. Esta línea representa la suma de los datos, conforme éstos se van aglutinando al avanzar de izquierda a derecha. Se emplean dos escalas; la que está a la izquierda representa frecuencia o costo expresado en unidad monetaria y la. de la derecha representa porcentajes. Mediante los diagramas de Pareto se pueden detectar los problemas que tienen más relevancia. Por lo general, el 80% de los resultados totales se origina en el 20% de los elementos. Lo anterior se puede observar en la figura 2.2**,** en donde los tipos F y C de fallas producidas en el campo son las causantes de casi el 80% del total. De hecho, los elementos más importantes se ubican listando todos los

elementos por orden descendente. La gráfica es muy útil al permitir identificar visual mente en una sola revisión tales minorías de características vitales a las que es importante prestar atención.

Así, se utilizan todos los recursos necesarios para llevar a cabo una acción correctiva.

Ejemplos de tales minorías vitales de características serían:

La minoría de clientes que representan la mayoría de las ventas.

La minoría de productos, procesos, o características de la calidad causantes del grueso de desperdicio o de los costos de reelaboración.

La minoría de rechazos que representa la mayoría de quejas de la clientela.

La minoría de vendedores que está vinculada a la mayoría de partes rechazadas.

La minoría de problemas causante del grueso del retraso de un proceso.

La minoría de productos que representan la mayoría de las ganancias obtenidas.

La minoría de elementos que representan al grueso del costo de un inventario.

Es muy fácil construir un diagrama de Pareto, lo que implica seis pasos:

1. Definir qué método se empleará para clasificar los datos: por problema, por causa, por tipo de rechazo, etcétera.
2. Definir si para clasificar la gradación de las características se va a emplear el costo expresado en unidad monetaria (preferible) o la frecuencia."
3. Reunir los datos correspondientes a determinado periodo.
4. Resumir los datos y disponer las categorías, de la mayor a la más pequeña.

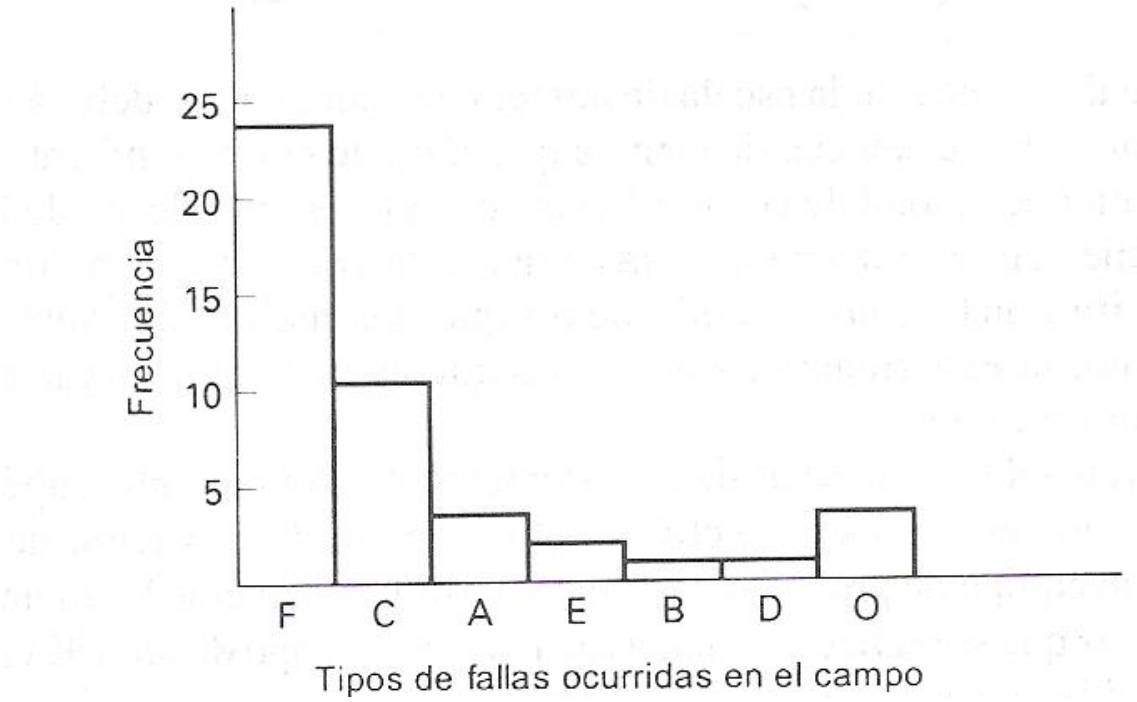


Diagrama de Pareto

5. En caso de que se desee emplearlo, calcular el porcentaje acumulativo.
6. Construir el diagrama y determinar la minoría vital.

En caso de emplearla, la escala de porcentaje acumulativo deberá coincidir con la escala de costo o de frecuencia, de manera que el punto correspondiente al 100% esté a la misma altura que el total de costo o frecuencia. Observe la flecha de la figura 2.2.

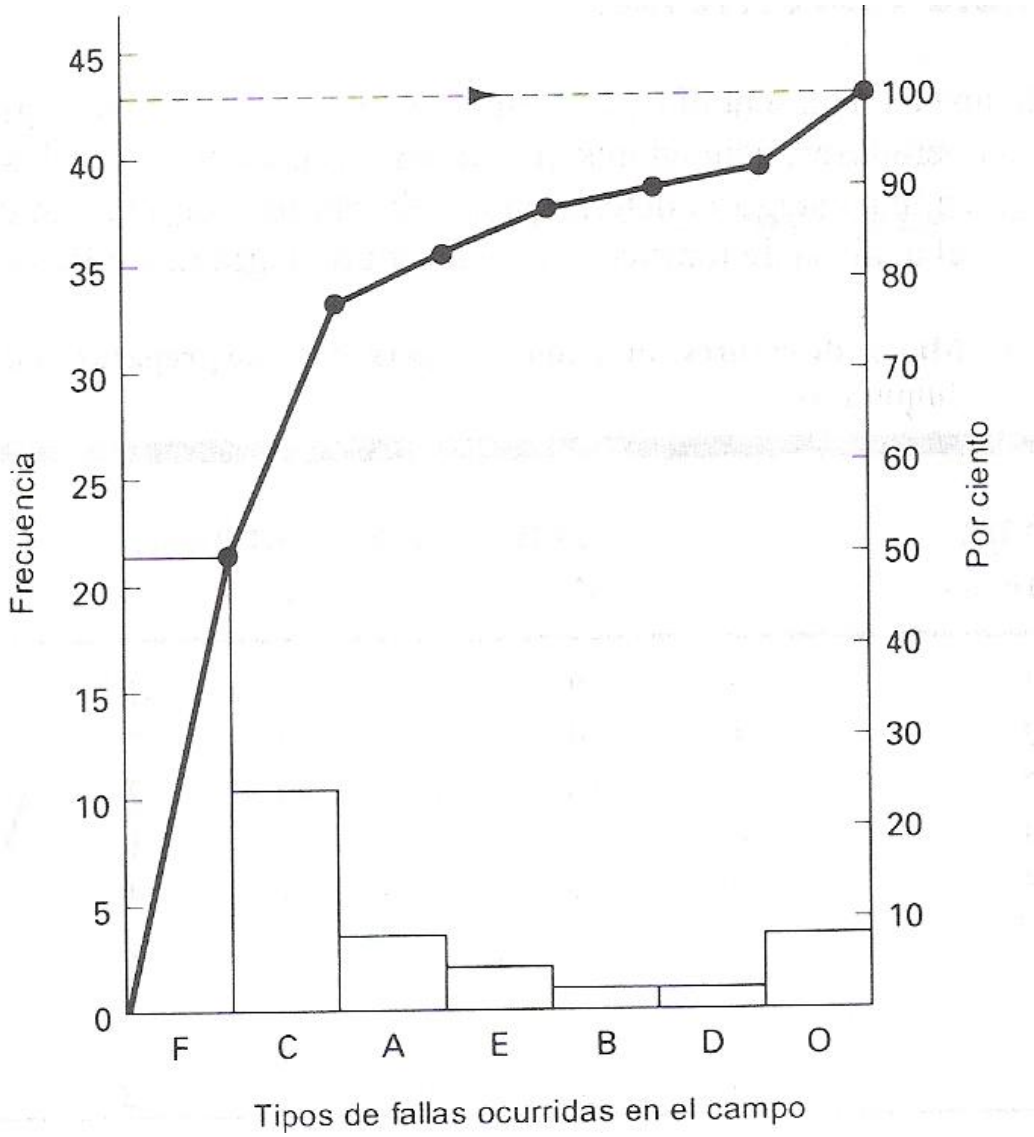
Conviene aclarar que una mejora en la calidad de la minoría vital, digamos del 50%, producirá mucho mayor rendimiento que una mejora del 50% de la mayoría útil. Asimismo, la experiencia ha mostrado que es más fácil lograr una mejora del 50% en la minoría vital.

El diagrama de Pareto se utiliza constantemente. Por ejemplo, supóngase que F es el objetivo de los esfuerzos correctivos del programa de elevación de la calidad. Se comisiona a un equipo de proyecto para que investigue y efectúe las mejoras necesarias.

La siguiente vez que se realice un análisis de Pareto, otro tipo de falla de campo, digamos C, sería el objetivo de la corrección, y de esta forma el proceso de mejora

continua, hasta lograr que las fallas de campo se conviertan en un problema insignificante en el contexto general de la preocupación por lograr la calidad.

El diagrama de Pareto es una poderosa herramienta para la elevación de la calidad. Sirve para detectar problemas y para evaluar las mejoras logradas en un proceso.



Línea acumulativa

DIAGRAMA DE DISPERSIÓN

La manera más sencilla de definir si existe una relación causa y efecto entre dos variables es dibujando un diagrama de dispersión. En la figura 2.14 se muestra la relación que existe entre la velocidad de un automóvil y el rendimiento de gasolina

por kilómetros. En la figura se puede observar que conforme aumenta la velocidad, disminuye el rendimiento. La velocidad del automóvil se grafica en el eje *x* y es una variable independiente. Por lo general, la variable independiente es controlable. El rendimiento se coloca en el eje *y,* y es la variable dependiente, o respuesta. Otros ejemplos de relaciones son:

La velocidad de corte y la vida de una herramienta.

El contenido de humedad y la elongación de un hilo

La temperatura y la dureza de un tubo labial

La presión de choque y la corriente eléctrica

El rendimiento y la concentración

Las interrupciones de la energía eléctrica y la duración de un equipo.

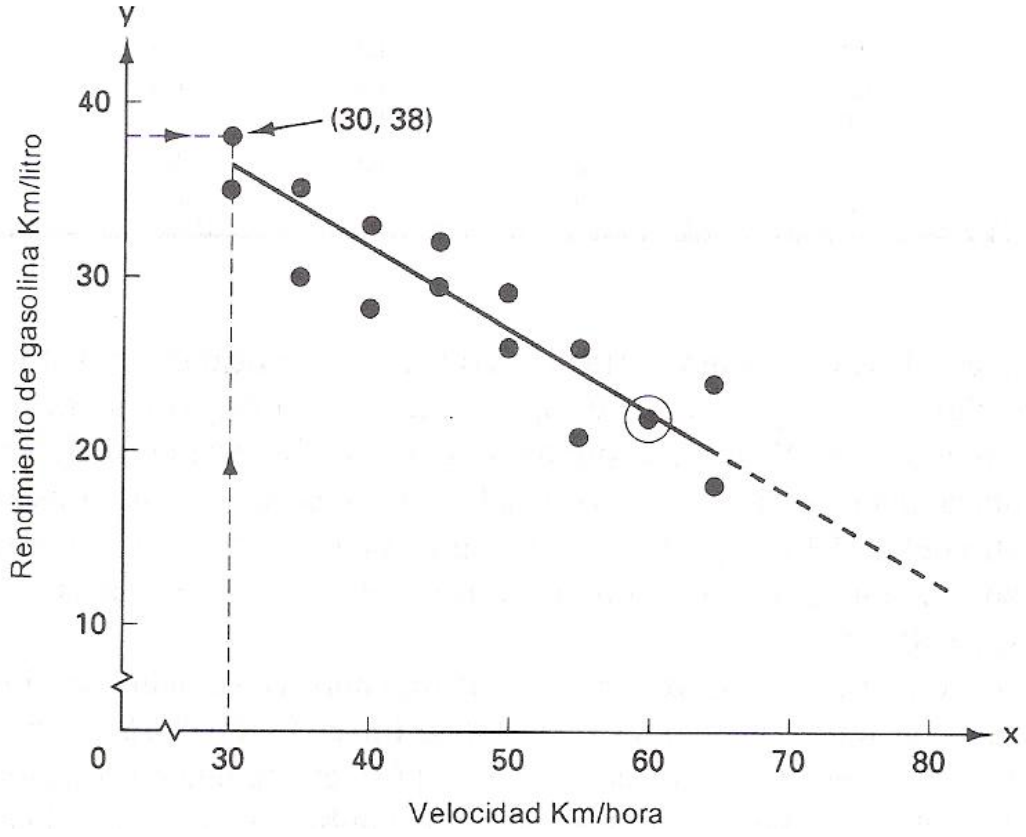


Diagrama de dispersión

La construcción de un diagrama de dispersión comprende cinco sencillos pasos. Los datos se reúnen y se ordenan por pares *(x, y).* La velocidad de un automóvil (causa) se controla y el rendimiento de gasolina (efecto) es el que se mide. En la tabla 2.2 se muestran los pares de datos *x, y* obtenidos.

Tabla: Datos correspondientes a la velocidad de un automóvil comparada contra el rendimiento de gasolina.

NUMERO DE LA MUESTRA	VELOCIDAD (MI/H)	RENDIMIENTO (MI/GAL)	NUMERO DE LA MUESTRA	VELOCIDAD (MI/H)	RENDIMIENTO (MI/GAL)
1	30	38	9	50	26
2	30	35	10	50	29
3	35	35	11	55	32
4	35	30	12	55	21
5	40	33	13	60	22
6	40	28	14	60	22
7	45	32	15	65	18
8	45	26	16	65	24

Las escalas horizontal y vertical se construyen colocando los valores más altos del lado derecho del eje *x* y en la parte superior del eje *y.* Luego de identificar cada escala, se grafican los datos/Se utilizan puntos y se puede observar en la figura 2-14 dónde se representa la muestra número 1 (30,38). El valor *x* es 30 y el valor *y* es 38. Los números de muestra del 2 al 16 se grafican y se completa así el diagrama de dispersión. Si dos puntos son idénticos, se puede optar por usar círculos concéntricos, como fue el caso del valor de 60 km/hora.

Una vez terminado el diagrama de dispersión, ya se puede evaluar la relación o correlación existente entre ambas variables. En la figura 2.15 se muestran diversos patrones y su respectiva interpretación. En el (a), existe una correlación positiva entre ambas variables, ya que cuando *x* aumenta, *y* también lo hace. En el caso (b), hay una correlación negativa entre ambas variables, ya que cuando *x* aumenta, *y* disminuye. En (e) no existe correlación alguna y a este patrón a veces se le denomina patrón tipo \escopeta.

Es fácil entender los patrones representados en los casos (a), (b) y (e); en tanto que los de (d), (e) y (f) son más difíciles. En el caso de (d) puede o no existir la relación entre ambas variables. Al parecer existe una relación negativa entre *x* y *y,* pero no es demasiado estrecha. Será necesario hacer más análisis estadísticos para poder evaluar este patrón. En el caso de (e) se han sobrepuesto los datos para representar diversas causas que están produciendo el mismo efecto. Algunos ejemplos serían el rendimiento de gasolina cuando se avanza a favor del viento, comparándolo con el rendimiento obtenido cuando se avanza en contra del viento, o dos proveedores de un mismo material o dos máquinas distintas. Una causa se grafica utilizando un pequeño punto obscuro y la otra usando un triángulo vacío. Una vez que se separan los datos, vemos que existe una fuerte correlación. En el caso de (f), existe una relación curvilínea en vez de una relación lineal.

Cuando todos los puntos graficados quedan dentro de una línea recta es porque tenemos una correlación perfecta. Debido a variaciones producidas durante la realización del experimento y en la medición, esta situación perfecta raramente se presenta.

A veces es deseable adaptar una línea recta a los datos a fin de contar con una ecuación predictiva. Por ejemplo, suponga que se desea calcular el rendimiento de gasolina a una velocidad de 75 km/h. En el diagrama de dispersión se coloca una línea, sea en forma manual, o matemáticamente, empleando un análisis de cuadrados mínimos.

La idea en ambos casos es que la desviación de los puntos que aparecen al lado de la línea sea la misma. Cuando se prolongue la línea más allá de los datos, se utilizará una línea de puntos, ya que no existen datos para esa área.

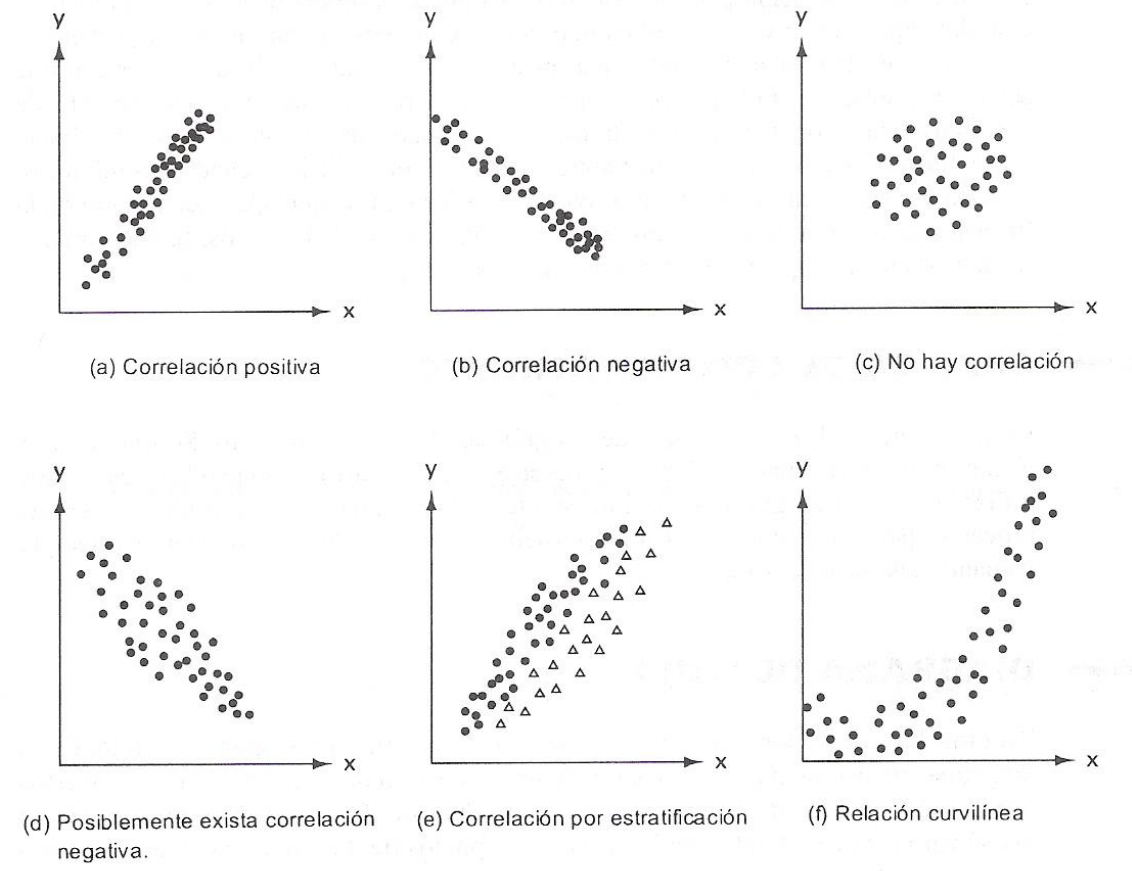


Figura: Diversos patrones del diagrama de dispersión

UNIDAD 2

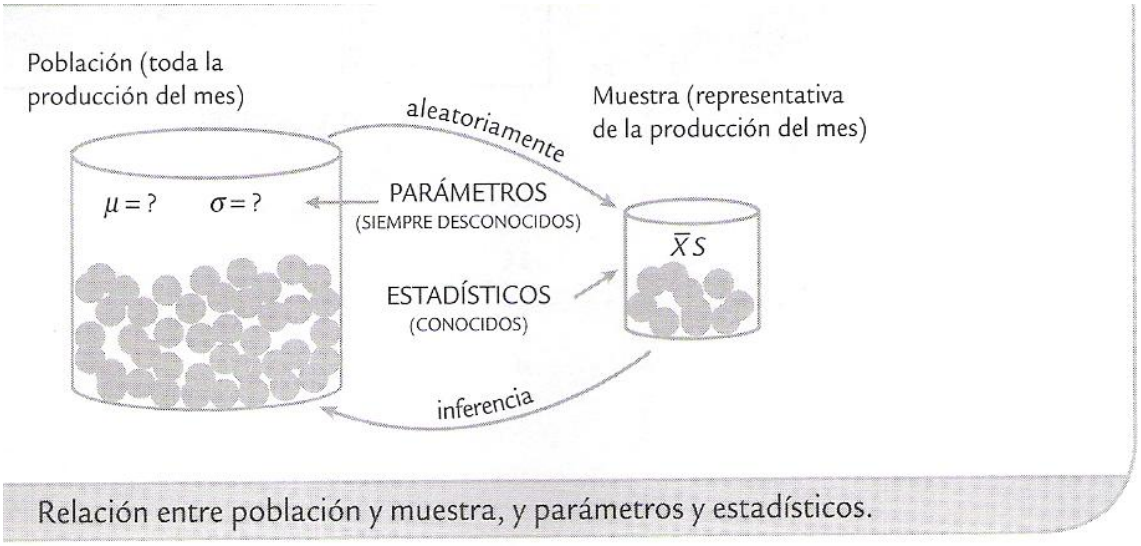
ESTADÍSTICA APLICADA

“Conceptos básicos

Población y muestra, parámetros y estadísticos

Por lo general, los estudios estadísticos están enfocados a conocer y/o tomar decisiones acerca de una *población* o *universo* que, desde el punto de vista estadístico, es el conjunto formado por la totalidad de individuos, especímenes, objetos o medidas de interés sobre los que se realiza un estudio. Por ejemplo, una población son los productos que se producen mediante un proceso durante una semana o un mes, e interesa saber si éstos reúnen las características de calidad requeridas. Otro ejemplo de población son los clientes de una empresa y, en este caso, puede interesar su nivel de satisfacción y en general su percepción acerca de la empresa.

Las poblaciones se clasifican en finitas o infinitas. Si es *finita* y pequeña es posible medir todos los individuos para tener un conocimiento "exacto" de las características *(parámetros)* de esa población. Por ejemplo, un parámetro que resulta de interés es la proporción *p* de productos defectuosos o la media, *μ,* de alguna variable medida a los productos. En cambio, si la población es *infinita* O grande es imposible e incosteab1e medir a todos los individuos, en este caso es preciso sacar una *muestra representativa* de dicha población, y con base en los cálculos sobre los datos muestra1es *(estadísticos)* se realizan, mediante los métodos apropiados, afirmaciones acerca de los parámetros de la población.



Relación entre población y muestra, y parámetros y estadísticos.

Fig. 2.1

En control de calidad las poblaciones de interés son los materiales, los productos terminados, partes o componentes, clientes, etc. En muchos casos estas poblaciones se suponen como infinitas o grandes. Por ejemplo, en empresas con producción masiva es imposible o al menos impráctico medir cada pieza de material que llega, o las propiedades de cada producto terminado. Incluso, si la producción no es masiva, conviene imaginar al proceso como una población infinita o muy grande debido a que el flujo del proceso no se detiene, es decir, no existe el último artículo producido mientras la empresa siga operando. En estos casos los procesos se estudian mediante muestras de artículos extraídos en algún punto del proceso.

Un asunto importante será lograr que las muestras sean representativas, en el sentido de que reflejen las características claves de la población en relación con los objetivos del estudio.

Una forma de lograr esa representatividad consiste en diseñar de manera adecuada un muestreo aleatorio (azar), donde la selección no tenga algún sesgo en una dirección que favorezca la inclusión de ciertos elementos en particular, sino que todos los elementos de la población tengan las mismas oportunidades de ser incluidos en la muestra.

Existen varios métodos de muestreo aleatorio, por ejemplo, el simple, el estratificado, el muestreo sistemático y por conglomerados; cada uno de ellos

logra muestras representativas en función de los objetivos del estudio y de ciertas circunstancias, así como características particulares de la población (véase Gutiérrez Pulido, 2005).

INFERENCIA ESTADÍSTICA

La inferencia estadística tiene como objetivo establecer las características de una población o proceso con base en la información contenida en una muestra. Por lo general, la inferencia se divide en estimación y prueba de hipótesis, y se apoya en cantidades o estadísticos calculados de las observaciones de la muestra. Los *estadísticos,* como medidas o funciones de los datos muestrales, que no contienen parámetros desconocidos, ayudan a caracterizar la distribución de tales datos. Un ejemplo de estadístico es la media $\bar{X}$, la cual sirve para conocer la tendencia central de los datos muestrales y puede ser utilizada de una forma apropiada para realizar inferencias (afirmaciones) sobre la media poblacional μ (parámetro poblacional).

Un aspecto clave en la interpretación y uso de cualquier estadístico es que es una variable aleatoria, ya que su valor depende de los elementos que son seleccionados en la muestra y, por lo tanto, varía de una muestra a otra. La forma de tomar en cuenta este hecho es conocer la distribución de probabilidad de cada estadístico. Del capítulo anterior recordemos que una *distribución de probabilidad* o *distribución de una variable aleatoria X* relaciona el conjunto de valores posibles de X (rango de *X),* con la probabilidad asociada a estos valores. Por ejemplo, en el de la variable aleatoria dada por el estadístico media muestral, *X,* al conocer su distribución de probabilidad podremos saber en qué intervalo se esperan los valores de $\bar{X}$ y cuáles son más probables.

Una distribución de probabilidad también se puede considerar una distribución teórica de frecuencia, que describe cómo se espera que varíen los resultados de la variable aleatoria. De esta forma, lo aleatorio se modela (describe, acota),
y al observar una realización específica de un estadístico es posible corroborar o rechazar supuestos (prueba de hipótesis) o hacer estimaciones poblacionales.

Las distribuciones de probabilidad que más se emplean en intervalos de confianza y pruebas de hipótesis son las distribuciones: *normal, T de Student, ji-cuadrada y*

F. En la figura 2.2 se representan las formas típicas de estas cuatro distribuciones.

ESTIMACIÓN PUNTUAL Y POR INTERVALO

Una población se caracteriza por una variable aleatoria y ésta, a su vez, por su distribución de probabilidad. Por lo general, una distribución depende de parámetros que, si se desconocen, será necesario estimarlos con base en los datos muestrales. Por ejemplo, una distribución normal tiene como parámetros a la media, *μ,* y a la desviación estándar, σ, que si no se conocen se pueden estimar en forma puntual o por intervalo.

El *estimador puntual* de un parámetro es un estadístico que genera un valor numérico simple, y que se utiliza para proporcionar una estimación del valor del parámetro desconocido. Por ejemplo, con frecuencia es necesario estimar el valor de:

- La media *μ* del proceso (población).
- La varianza σ^2 o la desviación estándar σ del proceso.
- La proporción *p* de artículos defectuosos.

Los estimadores puntuales (estadísticos) más recomendados para estimar estos parámetros son, respectivamente:

- La media muestral $\hat{\mu} = \bar{X}$
- La varianza muestral $\hat{\sigma}^2 = S^2$
- La proporción de defectos de la muestra, $\hat{p} = \frac{X}{n}$, en donde X es el número de artículos defectuosos en una muestra de tamaño n
- Por ejemplo, para estimar el grosor promedio de los discos producidos por un proceso, durante una semana se toma una muestra de *n* = 125 discos, y se obtiene que la media muestral es $\bar{X}$ = 1.179. Este valor puede usarse como una estimación puntual de *μ* (la media del proceso).

- Colocar un gorro (símbolo) sobre un parámetro es una manera general de denotar un estimador puntual del parámetro correspondiente, puesto que los estimadores no son únicos.
- Por ejemplo, la estimación de la media, μ, podría hacerse con el uso de la media muestral $\hat{X}$, la mediana $\tilde{X}$, o la moda, dado que las tres son diferentes medidas de la tendencia central de unos datos.

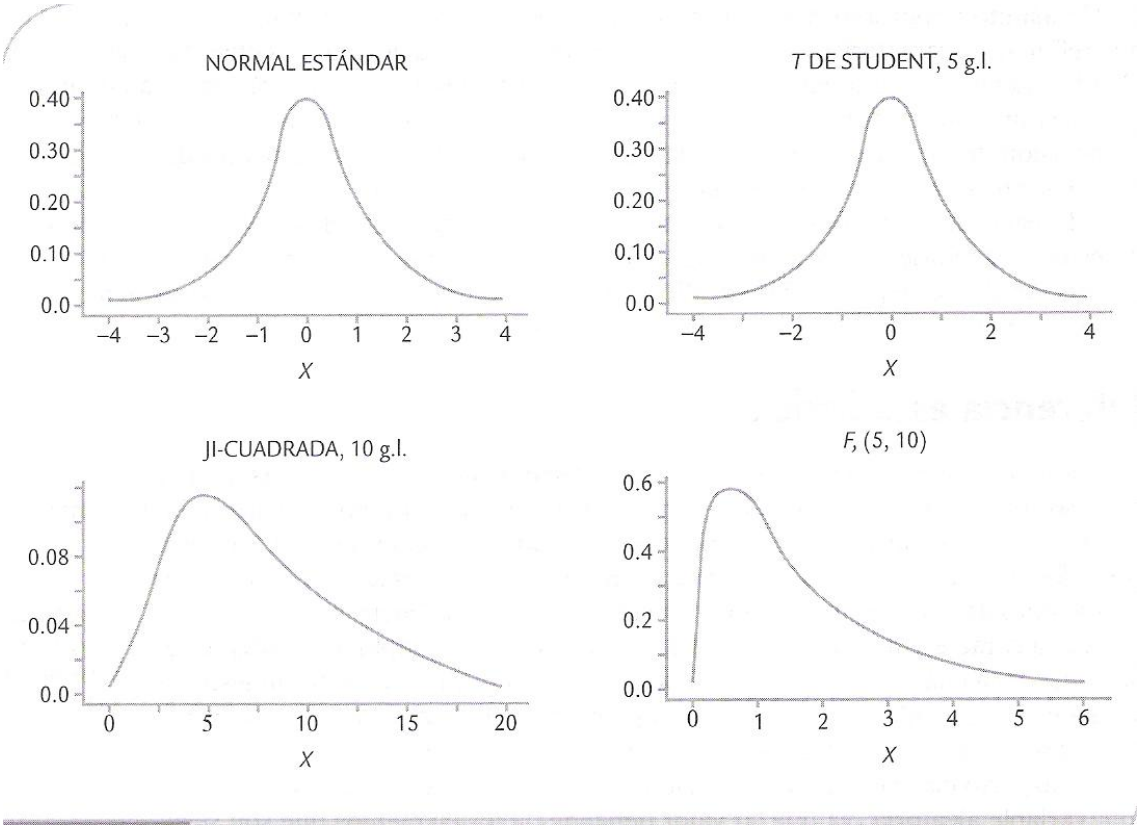


Figura 2.2 Muestra de las distribuciones de probabilidad de mayor uso en inferencia.

ESTIMACIÓN POR INTERVALO

Como la estimación puntual de un parámetro se genera a través de un estadístico, y como el valor de éste es aleatorio porque depende de los elementos que fueron seleccionados en la muestra, entonces la estimación que se hace sobre el parámetro dependerá y variará de una a otra. De esta forma, cuando se quiere tener mayor certidumbre acerca del verdadero valor del parámetro poblacional,

será necesario obtener la información sobre qué tan precisa es la estimación puntual. Así, la estimación puntual dirá poco sobre el parámetro cuando la variación entre una estimación y otra es muy grande. Una
forma de saber qué tan variable es el estimador consiste en calcular la desviación estándar o *error estándar* del estadístico, visto como una variable aleatoria. Por ejemplo, consideremos la desviación estándar S y la media $\bar{X}$ de una muestra de tamaño n. Puesto que $\bar{X}$ es una variable aleatoria, ésta tiene su propia desviación o error estándar que se estima mediante $\hat{\sigma}_{\bar{X}} = S/\sqrt{n}$

Una forma operativa de saber qué tan precisa es la estimación consiste en calcular un *intervalo de confianza* que indique un rango "donde puede estar el parámetro" *c*on cierto nivel de seguridad o confianza. Construir un intervalo al 100(1 - α)% de confianza para un parámetro desconocido *θ* consiste en estimar dos números (estadísticos) *L* y *U,* de manera que la probabilidad de que *θ* se encuentre entre ellos sea 1 - *α,* es decir,

$$P(L \leq \theta \leq U) = 1 - \alpha \qquad \textbf{(2.1)}$$

de *L* y *U* forman el intervalo de confianza buscado *[L, U].*

Intervalo de confianza para una media

Si se trata de encontrar dos números *L* y *U,* tales que el parámetro *μ* se encuentre entre ellos como una probabilidad de 1 - *α.* Esto es,

$$P(L \leq \mu \leq U) = 1 - \alpha$$

Sea $x_1, x_2, ..., x_n$ una muestra aleatoria de tamaño n de una población, con una distribución normal con media *μ* y varianza σ^2, ambas desconocidas. El procedimiento general para de*ducir* el intervalo consiste en partir de un estadístico que involucra al parámetro de interés y que tenga una distribución conocida. En el caso de *μ,* tal estadístico es:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}}$$

el cual tiene una distribución *T* de Student con *n* - 1 grados de libertad. Por lo tanto, en la tabla de esta distribución o en su gráfica se pueden ubicar dos valores críticos $t_{\alpha/2}$ y $-t_{\alpha/2}$, *tales que:*

$$p(-t_{\alpha/2} \leq \frac{X-\mu}{S/\sqrt{n}} \leq t_{\alpha/2}) = 1-\alpha$$

De aquí, al despejar hasta dejar al parámetro de interés sólo en medio de las desigualdades, se llega a que

$$p\left[X - t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq X + t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}}\right] = 1-\alpha \qquad (2.2)$$

Así,

$$L = X - t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}} \quad y \quad U = X + t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}}$$

forman el intervalo al 100(1 - α)% para la media desconocida *μ.* En la tabla de la distribución T de Student se observa que para una muestra mayor o igual a 30, el intervalo al 100(1 - α)% para la media μ es aproximadamente $\bar{X} \pm 2\frac{S}{\sqrt{n}}$, o sea, la media más menos dos veces la estimación de su error estándar.

EJEMPLO 2.1

Recordemos que en el ejemplo anterior se tiene un proceso de inyección de plástico donde una característica de calidad del producto (disco) es su grosor, que debe ser de 1.20 mm con una tolerancia de ±0.10 mm. Para evaluar esta característica de calidad, durante una semana se realiza un muestreo sistemático en una línea de producción y se obtienen 25 muestras de tamaño 5 cada una. Por lo tanto, al final se tiene una muestra de *n* = 125 Y se obtiene la media muestral, $\bar{X}$ = 1.179 mm y la varianza, S^2 = 0.00071, por lo que la estimación del error estándar de la media es $\frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0.0266}{11.18} = 0.0024$.

Cuando $n \geq 45$, la distribución *T* de Student es prácticamente igual a la distribución normal están dar, por lo tanto, de la tabla de la distribución normal se obtiene que $t_{\alpha/2} = z_{\alpha/2} = 1.96$ para α=0.05. De aquí que el intervalo al 100(1-α) % de confianza para la media μ del grosor de los discos está dado por:

$$\bar{X} - t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}} = 1.179 \pm 1.96(\frac{0.0266}{11.18}) = 1.179 \pm 0.00466$$

Entonces, es posible afirmar que con una confianza de 95%, la media μ de grosor de los discos se encuentra en el intervalo [1.174, 1.184].

En el cálculo anterior, al valor de 0.00466 se le conoce como error de estimación porque hasta en 0.00466 puede diferir el estimador puntual $\bar{X}$ del parámetro poblacional *μ.*

Es importante enfatizar que un análisis inferencial, como es la estimación mediante un intervalo de confianza, siempre debe incluir un análisis descriptivo de los datos, ya que de esa manera se comprende mejor tanto la información contenida en la muestra como lo que se está afirmando acerca de la población.

Interpretación de un intervalo

En general, la correcta interpretación de un intervalo de confianza es de la siguiente manera: si se obtuvieran 100 muestras independientes de la misma población o proceso, cada una de tamaño *n* y para cada muestra se calculará el intervalo de confianza a 95% para el mismo parámetro, entonces se espera que 95 de los 100 intervalos contengan el verdadero valor de dicho parámetro. En la práctica, como vimos en el ejemplo anterior, sólo se obtiene un intervalo y se dice que el intervalo *[L, U]* tiene una confianza de 100(1 - α)%; es decir, se realiza una interpretación frecuentista en el sentido de que el parámetro estará en el intervalo 100(1- α)% de las veces que apliquemos el procedimiento.

La longitud del intervalo de confianza es una medida de la precisión de la estimación; por ello, es deseable que la longitud de los intervalos sea pequeña. Pero esta longitud depende de tres aspectos (ver ecuación 2.2); de la varianza de la población, que dependerá de los datos; del tamaño de muestra y por último del nivel de confianza de la estimación. En particular, la persona decide este último

aspecto cuando hace el estudio. Mientras que la amplitud del intervalo en una aplicación específica se reduce conforme se incrementa el tamaño de la muestra.

Tamaño de la muestra

En ocasiones es necesario calcular el tamaño de muestra *n* para lograr que la estimación de una media poblacional *μ* tenga como error máximo a un número *E.* En este caso, como el error de estimación está dado por $E = t_{(\alpha/2,n-1)} S/\sqrt{n}$ entonces despejando *n se* obtiene que

$$n = \frac{t^2{}_{(\alpha/2,n-1)} S^2}{E^2}$$

Como $t_{(\alpha/2,n-1)}$ depende de *n,* y ésta es la incógnita, entonces para propósitos prácticos y con tamaños de muestra mayores que 30, el valor de $t_{(\alpha/2,n-1)}$ puede tomarse como 2. De esta manera,

$$n = \frac{4S^2}{E^2}$$

donde S^2 es un estimador de la varianza. Por ejemplo, si en el caso del grosor medio de los discos se quisiera un error máximo de estimación de 0.004 = *E,* entonces se requiere un tamaño de muestra de

$$n = \frac{4(0.00071)}{(0.004)^2} = 177.5 \approx 178$$

Intervalo para la varianza

De manera similar a como se obtiene el intervalo para la media es posible deducir intervalos de confianza para cualquier parámetro. Por ejemplo, si se desea obtener un intervalo de confianza para la varianza σ^2 pob1acional, tal que:

$$P(L \le \sigma^2 \le U) = 1 - \alpha$$

Entonces, la distribución de referencia es una ji-cuadrada con *n* - 1 grados de libertad, ya que bajo el supuesto de que la variable o población de interés tiene una distribución normal con media y varianza desconocidas, el estadístico

$$X^2 = \frac{(n-1)S^2}{\sigma^2}$$

tiene esta distribución ji-cuadrada con *n* - 1 grados de libertad. Con un poco de álgebra se llega a que el intervalo de confianza para la varianza está dado por

$$\frac{(n-1)S^2}{X^2_{\sigma/2,n-1}} \leq \sigma^2 \leq \frac{(n-1)S^2}{X^2_{1-\alpha/2,n-1}} \quad \textbf{(2.3)}$$

Donde $X^2_{\alpha/2,n-1}$ *y* $X^2_{1-\alpha/2,n-1}$ son puntos críticos de la distribución ji-cuadrada con *n* - 1 grados de libertad y se leen en la tabla de esta distribución para el valor de *α* dado. Es decir, $P(X \rangle X^2_{\alpha/2}) = \alpha/2$.

EJEMPLO 2.2

En el proceso de fabricación de discos para computadoras una de las variables críticas es el rendimiento del formato.

Se toma una muestra aleatoria de *n* = 10 discos de la producción del último turno, se formatean *y* se reporta el rendimiento de cada disco. Los datos obtenidos son: 96.1, 91.06, 93.38, 88.52, 89.57, 92.63, 85.20, 91.41, 89.79, 92.62

Con base en estos datos interesa estimar, de manera puntual *y* por intervalo, la media *y* la desviación estándar para la población de discos de dicho turno. Los estimadores puntuales para estos parámetros son:

$\bar{X}$ = *91.03* *y S= 2.99*

Suponiendo que el rendimiento tiene distribución normal, el intervalo a 95%de confianza para la media *μ* está dado por,

$$\left[\bar{X} - t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}}) \right] = \left[91.03 - 2.26\frac{2.99}{\sqrt{10}} \leq \mu \leq 91.03 + 2.26\frac{2.99}{\sqrt{10}} \right] =$$

$$88.89 \leq \mu \leq 93.17$$

donde el valor del punto crítico $t_{\alpha/2} = t_{0.25}$ = 2.26 se obtiene de las tablas para la distribución *T* de Student con 9 grados de libertad. Así, con una confianza de 95%se estima que el rendimiento promedio de los discos producidos durante ese

turno está entre 88.89 *y* 93.17. El correspondiente intervalo para la desviación estándar *σ* se obtiene sacando la raíz cuadrada al intervalo para la varianza dado en la relación (2.3). Así, el intervalo para *σ* está dado por

$$\frac{(n-1)S^2}{X^2_{\sigma/2,n-1}} \le \sigma^2 \le \frac{(n-1)S^2}{X^2_{1-\alpha/2,n-1}} = \left[\sqrt{\frac{(9)(2.99)^2}{19.02}} \le \sigma^2 \le \sqrt{\frac{(9)(2.99)^2}{2.70}} \right] = 2.05 \le \sigma^2 \le 5.46$$

donde los valores críticos $X^2_{\alpha/2,n-1} = X^2_{0.025,9} = 19.02 \quad y \quad X^2_{1-\alpha/2,n-1} = X^2_{0.975,9} = 2.70$ se obtienen de la tabla de la distribución ji-cuadrada. De esta manera, con una confianza de 95%se estima que la desviación están dar del rendimiento de los discos producidos durante ese turno esté entre 2.05 *y 5.46.*

Cuando no se está satisfecho con la amplitud del intervalo será necesario incrementar la precisión de la estimación, lo cual se realiza aumentando el tamaño de la muestra.

Intervalo para una proporción

Bajo el supuesto de que el número de artículos defectuosos en una muestra sigue una distribución binominal, y si se inspeccionan *n* artículos y se encuentra una proporción *p* de defectuosos, es posible construir un intervalo de confianza para la proporción poblacional *p,* apoyándose en la aproximación de la distribución binomial por la normal, que es adecuada cuando *np* > 5 y *n(1 - p)* ≥5. En estas condiciones se puede afirmar que la proporción muestral sigue de manera aproximada una distribución normal con media *p* y varianza *p(1 - p)/n.* Con la misma argumentación que en el intervalo para la media, se deduce que el intervalo de confianza para la proporción es de la forma.

$$\hat{p} - Z_{\alpha/2}\sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n}} \le p \le \hat{p} + Z_{\alpha/2}\sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n}}$$

EJEMPLO 2.3

Se quiere estimar la proporción *p* de artículos defectuosos en un lote de 2 000 piezas (población). Para ello, se toma una muestra aleatoria de *n* = 100 artículos y se encentra que de éstos, *X* = 5, son defectuosos. Por lo tanto un estimador puntual de *p* es $\hat{p}$ = 5/100 = 0.050. Si se quiere estimar *p* por intervalo, entonces de acuerdo con lo explicado antes, un intervalo a 95% de confianza está dado por,

$$0.50 \pm 1.96\sqrt{\frac{0.05(1-0.05)}{100}} = 0.050 \pm 0.043$$

de aquí que, con una confianza de 95% se estima que *p* está entre 0.007 y 0.093, o en términos porcentuales entre 0.7% y 9.3%. En el cálculo anterior, al valor de 0.043 se le conoce como *error de estimación,* porque hasta en ese valor puede diferir *p* de $\hat{p}$.

Tamaño de la muestra

Si se quiere estimar el tamaño de la muestra *n,* que es necesario para estimar *p* con un error máximo de *E,* entonces dado que $E = Z_{\alpha/2}\sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n}}$ si despejamos de aquí a *n* obtenemos que

$$n = \frac{Z^2{}_{\alpha/2}\,\hat{p}(1-\hat{p})}{E^2}$$

donde $\hat{p}$ *es una* estimación del valor de *p.* Por ejemplo, si en el problema anterior se quisiera un error máximo de *E* = 0.03, con una confianza de 95%, entonces se requiere que *n* = $(1.96)^2$ (0.05)(01 - 0.05)/$(0.03)^2$ = 203. En ocasiones, cuando no se sabe nada de *p* en la fórmula anterior se supone

$\hat{p}$ *= 0.5*

Conceptos básicos de prueba de hipótesis

En un estudio estadístico por lo general se busca responder con cierta confianza ciertas preguntas y/o tomar decisiones. En este contexto, la persona que hace el

estudio puede tener *a priori* ciertas creencias hipótesis que desea comprobar. Por ejemplo:

- Los dos proveedores del material *x* tienen el mismo nivel de calidad.
- El porcentaje de cierto ingrediente afecta el resultado de la mezcla.
- El tiempo de espera de esta operación es de tres horas en promedio.
- La variación del proceso se redujo con los cambios realizados.

A continuación se describen los pasos fundamentales para probar este tipo de hipótesis.

Planteamiento de una hipótesis estadística

Una *hipótesis estadística* es una afirmación sobre los valores de los parámetros de una población o proceso, la cual es susceptible de probarse a partir de la información contenida en una muestra representativa que se obtiene de la población. Por ejemplo, la afirmación "este proceso produce menos de 8% de defectuosos" se puede plantear estadísticamente, en términos de la proporción *p* desconocida de artículos defectuosos que genera el proceso, como se hace a continuación.

H_o: $P = 0.08$ (la proporción de defectuosos es 0.08) **(2.4)**

H_a: $P < 0.08$ (la proporción es menor a 0.08)

A la expresión H_o: $p = 0.08$ se le conoce como *hipótesis nula* y H_a: $p < 0.08$ se le llama *hipótesis alternativa.* El nombre de hipótesis nula se deriva del hecho de comúnmente se plantea como una igualdad, lo cual facilita tener una distribución de probabilidad de referencia específica. En general, la estrategia a seguir para probar una hipótesis consiste en suponer que la hipótesis nula es verdadera, y que en caso de ser rechazada por la evidencia que aportan los datos, se estará aceptando la hipótesis alternativa. Así, en el caso de las proporciones, la afirmación que se desea probar se aceptará como cierta sólo en caso de rechazar la hipótesis nula.

Ahora supongamos que la afirmación a probar es "este proceso produce 8% de defectuosos". Observe que la afirmación señala que su falsedad se da tanto si se

observan menos de 8% de defectuosos como si se observan más de 8% de defectuosos. En este sentido, el planteamiento estadístico debe ser:

H_o: p= 0.08 (la proporción de defectuosos es 0.08) **(2.5)**
H_a: $p \neq 0.08$ (la proporción es diferente a 0.08)

Nótese la diferencia entre las hipótesis alternativas en las expresiones (2.4) y (2.5). En (2.4) H_a se conoce como *hipótesis alternativa de un solo lado (unilateral),* ya que la única manera de rechazar *Ho* es teniendo valores de la proporción muestral $\hat{p}$ significativamente más pequeños 0.08. En cambio, en (2.5) H_a se llama *hipótesis alternativa de dos lados (bilateral),* ya que la evidencia en contra de *Ho* se obtiene con valores pequeños o grandes de la proporción mues*tral* $\hat{p}$. Así, la elección de la hipótesis alternativa en cuanto a si debe ser unilateral o bilateral depende de la afirmación que se quiera probar.
Otro aspecto importante es la selección del valor del parámetro que especifica la hipótesis esto es, ¿por qué 0.08 en las hipótesis de las expresiones (4.4) y (2.5)? Este valor se elige de manera que separe dos situaciones que llevan a tomar diferentes acciones. Por ejemplo, en la hipótesis dada en (2.4) se eligió 0.08, porque ésta es la proporción de defectuosos reportada el mes anterior, y después de implementar un programa de mejora se quiere ver si dio el resultado esperado. En caso de no rechazar *Ho* se concluye que el programa no funcionó y que se deben tomar medidas adicionales para bajar la proporción de defectuosos.

Estadístico de prueba

Probar una hipótesis consiste en investigar, con base en la evidencia contenida en una muestra seleccionada de manera adecuada, si lo afirmado por la hipótesis nula es verdad o no, y en caso de ser falso, se toma como verdadera la alternativa H_a La estrategia para probar la hipótesis parte del supuesto de que H_0 es verdadera, y si los resultados de la investigación contradicen en forma suficiente dicho supuesto, entonces se rechaza H_o y se acepta la hipótesis alternativa. En caso de que los resultados de la investigación no demuestren claramente la

falsedad de H_0, ésta no se rechaza. Es decir, *la hipótesis nula es verdadera mientras no se demuestre lo contrario.*

Una vez planteada la hipótesis se toma una muestra aleatoria de la población bajo estudio.

El estadístico de prueba es una fórmula que permite calcular un número a partir de los datos y hipótesis nula. La magnitud de este número permite discernir si se rechaza o no la hipótesis la H_0. Al conjunto de posibles valores del estadístico de prueba que llevan a rechazar H_o se le llama *región o intervalo de rechazo* para la prueba, y a los posibles valores donde *no* se rechaza H_a se les llama *región* o *intervalo de aceptación.* Por ejemplo, para la hipótesis planteadas en **(2.4) y (2.5**), el estadístico de prueba está dado por:

$$z = \frac{\hat{p} - p_0}{\sqrt{\frac{p_o q_o}{n}}} \qquad \textbf{(2.6)}$$

Donde

$\hat{p}$ es la proporción de defectuosos que se encontró en una muestra de artículos inspeccionados. Si H_o es verdad, el estadístico Z_o sigue aproximadamente la distribución normal estándar. La aproximación es mejor mientras más grande es el valor de *n.* En general, se requiere $np > 5$ para una buena aproximación, este caso, con 70 o más unidades inspeccionadas sería suficiente.

Por ejemplo, supongamos que se toma una muestra de $n = 150$ piezas y de

$x = 20$ son defectuosas, entonces el valor de la proporción es $\hat{p} = x/n = 0.13$. Aunque es preciso verificar si esto implica una diferencia suficiente para rechazar que $p = 0.08$. Por lo pronto, el valor estadístico es $Z_o = 2.41$.

Criterio de rechazo

El estadístico de prueba, construido bajo el supuesto de que *Ho* es verdad, es una variar aleatoria con distribución conocida. Si en efecto, *Ho* es verdad, el valor del estadístico prueba debería caer dentro del rango de valores más probables de su distribución asociada el cual se conoce como *región de aceptación.* Pero si cae en

una de las colas de su distribución asociada, fuera del rango de valores más probables (en la *región de rechazo),* es evidencia contra de que este valor pertenece a dicha distribución (véase figura 2.3). De aquí se deduce que está mal el supuesto bajo el cual se construyó, es decir, H_a debe ser falsa.

Pruebas de una y dos colas
(unilaterales y bilaterales)

La ubicación de la región o intervalo de rechazo depende de si la hipótesis es *bilateral* o *unilateral.* Como se vio en el caso de las proporciones, una hipótesis bilateral cuando la hipótesis alternativa *(H_a)* es del tipo "no es igual" (≠); y unilateral cuando la alternativa es del tipo "mayor que" (>)o "menor que" (<).
Cuando es bilateral, como en la expresión (2.5), la región de rechazo está repartida de manera equitativa entre ambas colas de la distribución del estadístico de prueba. Pero si la hipótesis es unilateral, como en la expresión (2.4), la evidencia en contra de la hipótesis nula se ubica en un sólo lado de la distribución, esto es, la región de rechazo sólo concentra en una de las colas. En la expresión (2.4) la región de rechazo se concentra en el lado izquierdo de la distribución del estadístico dado por (2.6) (véase figura 2.3).

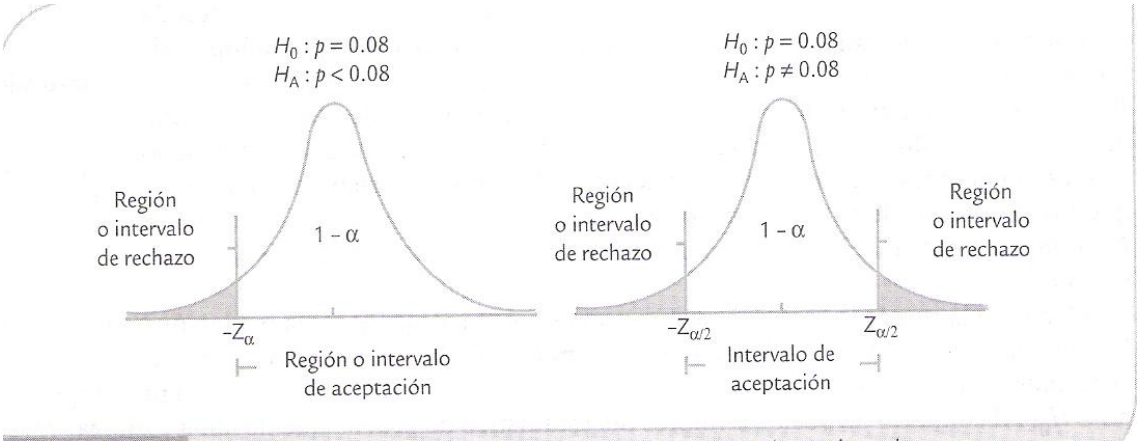


Figura 2.3 Hipótesis unilateral y bilateral, regiones de aceptación y de rechazo

Para probar la hipótesis acerca de la proporción, primero se calcula el estadístico de prueba Z_o de la ecuación (2.6) y se verifica si cae en la región de rechazo o aceptación. Por ejemplo las hipótesis planteadas son las expresiones (2.4) se rechaza H_0 si $Z_0 < -Z_\alpha$. Pero si las hipótesis están dadas por las relaciones (2.5), entonces se rechaza H_0 si $Z_0 < -Z_{\alpha/2}$ o si $Z_0 > Z_{\alpha/2}$, *o* simplemente, si $|Z_0| > Z_{\alpha/2}$. En la figura 2.3 esto equivale a que Z_0 caiga en el rango de las áreas sombreadas, de acuerdo con la hipótesis de que se trate. En caso de rechazar H_0 *se toma* H_a como la afirmación verdadera; en caso de no rechazar H_0, en la práctica ésta se considera como verdadera.

Si queremos probar la hipótesis bilateral con una confianza de 95%, entonces $Z_{\alpha/2} = 1.96$; además, como $\hat{p} = 0.13$ y $Z_0 = 2.41$, entonces $Z_0 > 1.96$; por lo tanto, se rechaza H_0: $p = 0.08$.

De alguna forma, esto ya se intuía, puesto que la proporción muestral $\hat{p} = 0.13$ había sido bastante mayor.

Si en lugar de tener $x = 20$ defectos, se tuvieran $x = 15$, entonces $\hat{p} = 0.10$. Al sustituir esto

(2.6) con $n = 150$, se obtiene que $Z_0 = 0.90$ y así Z_0 no es mayor que $Z_{\alpha/2} = 1.96$. De aquí que no se rechazaría H_0: $p = 0.08$. Es decir, en este caso $\hat{p} = 0.10$ no es evidencia suficiente contra H_0: $p = 0.08$.

EL riesgo de una decisión equivocada: errores tipo I y tipo II

Probar una hipótesis estadística es una decisión probabilística, por lo tanto, existe el riesgo de cometer un *error tipo 1* o un *error tipo II.* El primero ocurre cuando se rechaza H_0 y es verdadera, y el error tipo II es cuando se acepta H_0 y es falsa.

En toda prueba de hipótesis cada tipo de error tiene una probabilidad de ocurrir. *Con α y β* se denotan las probabilidades de los errores tipo 1y II, respectivamente. Así,

α= P{error tipo I}= probabilidad de rechazar H_0 cuando es verdadera

β= P{error tipo II}= probabilidad de aceptar H_0 cuando es falsa

A 1 – β= P{rechazar H_a cuando es falsa} se le llama *potencia de la prueba.* En tanto, también se le conoce a *α* como la *significancia dada de la prueba* y es la probabilidad de la región o intervalo de rechazo; su valor se especifica desde que se planea el estudio. Por lo general se utilizan los valores *α*= 0.05 o 0.01. Mientras más pequeño es el valor de *α* se requiere más evidencia en los datos para rechazar H_0.

Es común que en las pruebas de hipótesis se especifique el valor de *α* y se diseñe la prueba de tal forma que el valor de *β* sea pequeño. Lo anterior se puede lograr con muestras grandes, lo que da mayor *potencia de la prueba.*

En la práctica suele ser más delicado cometer el error tipo 1 que el error tipo II, porque en la mayoría de las hipótesis el rechazar H_0 implica objetar algo que se acepta de manera convencional. Pero no rechazar H_0 representa, en muchos casos seguir como hasta ahora. Por lo anterior, es común que se controle sólo el erro tipo I, mientras que el error tipo II se deja libre como si su magnitud no importara.

Lo cierto es que el error tipo II también importa y la magnitud de su probabilidad debe ser pequeña (se recomienda β= 0.10). El problema es que controlar a β tiene varias implicaciones: por ejemplo, muchas veces se requieren grandes tamaños muestrales.

Prueba para la media

Cuando se estudia un proceso o un fenómeno a través de una variable de tipo continuo suele interesar su media y su varianza (o desviación estándar). En particular, al estudiar la media *μ,* es de interés preguntarse si ésta es igual, mayor o menor a cierto valor μ_0 donde éste es conocido y por alguna razón es considerado un valor estándar. Por ejemplo, puede ser de interés investigar si el rendimiento promedio del proceso durante esta semana es igual, mayor o menor que el de la semana anterior, μ_0 .

Las hipótesis sobre *μ* se pueden probar suponiendo la varianza poblacional σ^2 conocida o desconocida. Sin embargo, como en la mayoría de los estudios

estadísticos es irreal suponer de antemano que se conoce la varianza, nos limitamos a describir el caso cuando σ^2 no se conoce.

Prueba para la media con suposición de varianza desconocida

Sea *X* una variable aleatoria con distribución normal con media μ y varianza σ^2, ambas desconocidas. Se quiere probar la hipótesis de que la media es igual a cierto valor μ_0. Es decir, la hipótesis a probar es:

$H_0: \mu=\mu_0$

$H_a: \mu\neq\mu_0$ ***2.7***

Para probar esta hipótesis se toma una muestra aleatoria de tamaño *n* de los posibles valores de la variable *X* y después se calcula el estadístico de prueba:

$$t_0 = \frac{\bar{x} - \mu_o}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \qquad \textbf{(2.8)}$$

donde S es la desviación estándar de los datos. Bajo el supuesto de que H_0 es verdadera, este estadístico se distribuye de la forma *T* de Student con *n* – 1 grados de libertad. Se rechaza H_o si el valor absoluto del estadístico de prueba es mayor que el valor crítico de la prueba, es decir, se rechaza H_0 si $|t_o| > t_{\alpha/2}$. Es preciso recordar que $t_{\alpha/2}$ es el punto crítico de la distribución *T* de Student, tal que $P(t> t_{\alpha/2}) = \alpha/2$; o sea, las áreas bajo la curva a la derecha del punto $t_{\alpha/2}$ ya la izquierda de $-t_{\alpha/2}$ son iguales a α/2 (véase figura 2.4). Estos valores críticos se obtienen de la tabla de la distribución *T* de Student .

Una breve justificación del criterio de rechazo para la prueba anterior es la siguiente: por medio de la teoría estadística se sabe que bajo el supuesto de que $H_0: \mu=\mu_0$ sea verdadera, el estadístico de prueba t_o se distribuye *T* de Student con *n* - 1 grados de libertad y, en consecuencia, hay una probabilidad de $100(1 - \alpha)\%$ de que el valor de t_o caiga entre $-t_{\alpha/2}$ y $t_{\alpha/2}$.

Luego, si la muestra produce un valor de t_o fuera de estos límites, entonces tal valor de t_o es evidencia de que H_0 es falsa. Por el contrario, si t_o cae entre $-t_{\alpha/2}$ y

$t_{\alpha/2}$ es evidencia a favor de la veracidad de H_0 ya que no existe ninguna contradicción. Obsérvese que la región de rechazo dada por la unión de intervalos $(-\infty,- t_{\alpha/2})$ U $(t_{\alpha/2}, \infty)$ está determinada por la probabilidad αdel error tipo 1 (véase figura 1.4).

En aquellas situaciones en que se desea rechazar $H_0: \mu=\mu_0$ sólo cuando $\mu>\mu_0$, la hipótesis alternativa es unilateral:

$H_a:\mu>\mu_0$ **(2.9)**

En este caso se rechaza H_0 si $t_o> t_\alpha$. Por otra parte, si lo que interesa es rechazar $H_0: \mu=\mu_0$ *sólo* cuando $\mu<\mu_0$ entonces ahora, la hipótesis unilateral se plantea de la forma:

$H_a: \mu<\mu_0$ ***(2.10)***

y se rechaza H_0 si $t_o < -t_\alpha$

EJEMPLO 2.4

Peso de costales. Un fabricante de dulces compra costales de azúcar a cierto ingenio. Según los vendedores, los costales tienen un peso medio de 50.1 kg, con una varianza de (σ^2= 0.5). El comprador piensa que el peso medio es menor. Para confirmar su sospecha decide contrastar las hipótesis:

$H_0: \mu=50.1$ ***(2.11)***

$H_a: \mu<50.1$

con un nivel de significancia de 5% (α = 0.05). Para ello, selecciona de manera aleatoria tres bultos de cada uno de los siguientes cinco pedidos. Pesa los 15 bultos y obtiene que $\bar{X}$ =49.4 y S^2=1.2. De esta manera, el estadístico de prueba calculado de acuerdo con la expresión (1.8) está dado por:

$$t_0 = \frac{\sqrt{n}(\bar{X} - \mu_0)}{s/\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{15}(49.4 - 50.1)}{\sqrt{1.2}} = -2.477$$

De las tablas de la distribución *T* de Student con *n* -1 = 14 grados de libertad, para α= 0.05, se lee el valor crítico

$T_{0.05,14}$= 1.76. Como t_α = -2.47 < -1.76 = $-t_{0.05,14}$, se rechaza la hipótesis H_0 (figura 1.5). Es decir, se rechaza la afirmación del vendedor de que los bultos tienen un peso medio de 50.1, y además la evidencia señala que dicho peso es menor que el declarado.

UNIDAD 3
CONTROL DE CALIDAD

Humberto Gutiérrez Pulido, Calidad Total y Productividad, Mc Graw Hill.

"Evolución e historia reciente del movimiento por la calidad

La búsqueda por hacer las cosas mejor, más rápido y a un menor costo, mediante los tres componentes de una estrategia de calidad: innovación, control y mejora, también ha provocado un cambio continuo en los conceptos y métodos de la calidad. Esto queda claro al analizar la historia reciente del movimiento por la calidad en las cinco etapas que se muestran en la tabla 3.1. Cada etapa se ha construido sobre la siguiente, es decir, una nueva etapa es la mezcla de los mejores métodos, prácticas e ideas de las etapas anteriores, más las mejores ideas y prácticas que han generado los profesionales de la calidad y la administración. Por ejemplo, la administración de la calidad total incluye nuevos supuestos y prácticas sobre la calidad, pero se queda con algunos de los métodos de las etapas pre-inspección, control estadístico y aseguramiento. De esta manera, no es posible decir, por ejemplo, el control estadístico sea obsoleto, más bien es insuficiente como estrategia de calidad.

Tabla 3.1 Etapas del movimiento por la calidad

Criterios considerados	**Inspección**	**Control estadístico de la calidad**	**Aseguramiento de la calidad**	**Administración de la calidad total**	**Reestructurar las organizaciones y mejora sistémica de procesos**
Fecha de inicio	(1800)	(1930)	(1950)	(1980)	(1995)
Preocupación principal	Detección	Control	Coordinación	Impacto estratégico	Competir eficazmente por los clientes, con calidad, precio y servicio, en la era de la información y en

					un mercado global izado
La calidad se ve como:	Un problema a resolver	Un problema a resolver	Un problema a resolver, pero que es atacado en forma preventiva (proactiva)	Una ventaja competitiva	Una ventaja competitiva, y la condición para permanecer en el negocio
Énfasis	Uniformidad del producto	Uniformidad del producto con reducción de la inspección	Todas las etapas, desde el diseño hasta las ventas, y la contribución de todos los grupos funcionales, especialmente diseñadores para prevenir fallas	Necesidades del cliente y el mercado	Enfoque en el cliente y en el mercado, reducción de defectos a un nivel de 3.4 DPMO y reducción del tiempo de ciclo
Métodos	Estándares y mediciones	Herramientas y metodologías estadísticas	Programas y sistemas	Planeación estratégica, establecimiento de metas y movilización de la organización para lograr mejora continua. Un amplio menú de herramientas	Planeación y gestión estratégica, la mejora continua del sistema como parte de las responsabilidades del área directiva. Un amplio menú de metodologías y estrategias
Papel de los profesionales de la calidad	Inspeccionar, contar y clasificar	Encontrar problemas y aplicación de métodos estadísticos	Medición y planeación de la calidad, y diseño de programas	Establecimiento de metas, educación y entrenamiento, asesoría a otros departamento	Detección de oportunidades de mejora, entrenamiento y educación, facilitador de la mejora, diseño de programas acción

				s y diseño de programas	
Quién tiene la Responsabilidad por la calidad	El departamento de inspección	Los departamentos de manufactura e ingeniería	Todos los departamentos, aunque la alta dirección sólo se involucra periféricamente en diseñar, planear y ejecutar las políticas de calidad	Todo el mundo en la organización, con la alta dirección ejerciendo un fuerte liderazgo	Todo el mundo, principalmente la gente que tiene mando es responsable de mejorar el desempeño de sus procesos. La alta dirección encabeza el esfuerzo para generar visiones compartidas, alinear los esfuerzos, eliminar barreras organizacionales, propiciar el aprendizaje organizacional, facultar y potenciar la labor y creatividad del talento humano
Orientación y enfoque	Inspeccionar la calidad del producto terminado	Controlar la calidad	Construir la calidad	Dirigir la calidad	Orientación directa y total al cliente, al mercado y a mejorar el desempeño de los procesos.

Etapa de la inspección

Buscar que un producto reúna los atributos de calidad que desea el cliente ha sido una realidad desde la época artes anal, cuando la calidad del producto se establecía a través de la relación directa entre el artesano y el usuario. El cliente, en el momento en que el artesano le entregaba el producto, revisaba si éste tenía las características deseadas.

Con el advenimiento de la era industrial apareció la producción masiva, y con ella la imposibilidad del contacto directo entre el fabricante y el usuario, surgiendo así

la necesidad de introducir procedimientos para atender la calidad de los productos masivos. Aquí es donde se empieza a responsabilizar a ciertos empleados (inspectores) para que evalúen la calidad y detecten errores.

Estos inspectores utilizaban estándares *(gauges)* para detectar las partes que no se ajustaban, lo cual evidentemente representó un avance, ya que esto conducía a tener un sistema de inspección más consistente que cuando ésta se realizaba a simple vista.

A principios del siglo xx, la inspección por estándares se refinó aún más y fue clave en la línea de ensamble de Henry Ford y en el sistema administrativo propuesto por Frederick W Taylor. Radford (1922) vincula formalmente la inspección al control de calidad, y por primera vez la calidad es considerada una responsabilidad independiente de la administración. De cualquier forma, durante toda la década de 1920 se limitó a contar y detectar la mala calidad.

Etapa del control estadístico de la calidad

En 1931 Walter A. Shewhart, de Bell Telephone Laboratories, dio un fundamento científico a la calidad mediante la publicación del libro *Economic Control of Quality of Manufoctured Product.* En este texto se dieron a conocer las cartas de control y el estudio de la calidad a través de variables, las cuales es necesario estudiar. Establece que el conocimiento obtenido con la realización de estudios estadísticos puede usarse para mejorar el control mediante la estabilización y reducción de la variación en el proceso. Con esto los directivos podían aumentar su confianza de que el producto cumple con las especificaciones.

En la misma época otros dos compañeros de Shewhart, Harold F. Dodge y Harry G. Roming, iniciaron la aplicación de la teoría estadística a la inspección por muestras y desarrollaron el muestreo de aceptación como sustituto de la inspección al 100%.

Durante la Segunda Guerra Mundial, el gobierno de Estados Unidos promovió la aplicación del control estadístico en la industria. Entre otras cosas invitó a un grupo de expertos a elaborar un programa de inspección por muestreo para el

Servicio de Municiones del Ejército y propuso un amplio programa educativo para el personal de la industria y de las universidades. Entre 1943 y 1945, un total de 810 organizaciones enviaron representantes al curso sobre control estadístico de calidad, impartido por la Office of Production Research and Development. Las personas que preparado este curso fueron el doctor W Edwards Deming (discípulo de Shewhart) y los profesores Eugene L. Grant y Holbrook Working (Duncan, 1989).

El conocimiento y las metodologías sobre la calidad que se habían logrado desarrollar en Estados Unidos hasta esas fechas empezaron a trasladarse a Japón, un país derrotado y devastado por la Segunda Guerra Mundial. En esta nación se alcanzó la plenitud de la etapa del control estadístico de calidad y fue la semilla de nuevos conceptos sobre calidad.

En el verano de 1950, el estadístico estadounidense W Edwards Deming impartió varias conferencias a altos directivos de empresas japonesas y les planteó las ventajas del control estadístico de calidad. Siguiendo sus recomendaciones, algunos de ellos empezaron a reportar incrementos en la productividad sin comprar equipos. Durante ese mismo verano, más de 400 ingenieros japoneses recibieron un curso de ocho días sobre control de calidad, impartido también por el doctor Deming. Su presencia en Japón en 1950 se debió a una invitación expresa de la Unión de Científicos e Ingenieros Japoneses (JUSE, por sus siglas en inglés). Las conferencias y cursos del doctor Deming consolidaron algunas actividades previas sobre control de calidad y desencadenaron una serie de tareas en pro de la calidad de los productos japoneses, hasta convertirse en un movimiento que generó aportes clave al trabajo por la calidad. Deming enseñó a los ejecutivos e ingenieros japoneses a estudiar y reducir la variación mediante la aplicación de cartas de control. Asimismo, mostró los principios del pensamiento científico con el ciclo **PHVA**: Planear, Hacer, Verificar y Actuar. La aplicación de este ciclo permitió aprender a realizar mejoras. Los japoneses lo utilizaron como un medio para reconstruir su país, mientras que en Estados Unidos este ciclo fue desdeñado debido a circunstancias de bonanza de la posguerra. En 1951, la JUSE estableció los premios de calidad Deming, que con el tiempo se convirtieron

en un fuerte estímulo para la mejora. Para este premio se utilizaron las regalías de un libro que se basaba en las conferencias del doctor Deming.

Con la influencia de líderes japoneses como Kaoru Ishikawa, Genichi Taguchi, Shigeo Shingo, Taichi Ohono, etc., se continuó refinando el ciclo PHVA y la introducción de otras técnicas para apoyar la mejora continua enfocada en los medios (causas) y no en el producto final (los resultados).

Etapa del aseguramiento de la calidad

Durante esta etapa, el concepto de calidad evolucionó de una perspectiva estrecha y centrada en la manufactura a una intervención en los esfuerzos por la calidad en áreas como diseño, ingeniería, planeación y actividades de servicio. Así, el aseguramiento de la calidad implicó un enfoque más proactivo por la calidad y aparecieron nuevas herramientas y conceptos fundamentales para este movimiento.

Por ejemplo, a principios de la década de 1950, dos de los maestros de la calidad: Armand Feigenbaum y Joseph Juran empezaron a introducir el concepto de costos de calidad, que proporcionó un poderoso fundamento económico al movimiento por la calidad. Con esto se supo que la mala calidad cuesta mucho y que al mejorar se reducen los costos de no calidad. En 1956, Feigenbaum publicó su libro sobre control total de calidad, donde señala que el control inicia con el diseño y termina solamente cuando el producto se ha entregado en las manos del cliente, quien debe mostrarse satisfecho. Además, afirma que la calidad es trabajo de todos. Las ideas de Feigenbaum y Juran enfatizan la responsabilidad de la administración por la calidad. En 1954, el doctor Joseph Juran visitó por primera vez Japón y sus enseñanzas contribuyeron a que los directivos de ese país tuvieran una nueva visión sobre la responsabilidad de los directivos para mejorar la calidad y la productividad. En 1962, el doctor Kaoru Ishikawa formalizó los círculos de calidad, iniciados desde 1950, y desde entonces las actividades de éstos se difundieron rápidamente. Los círculos de calidad son la maduración de los múltiples estudios y de la capacitación sobre el control de calidad dirigido a supervisores y obreros.

La continuación de las diversas actividades (conferencias, publicaciones, cursos) de impulso al control de calidad en Japón, iniciadas en la década de 1950, empezó a dar resultado con un incremento significativo de la calidad de los productos japoneses. La competitividad de la industria japonesa fue ganando terreno hasta convertirse en líder en varias ramas industriales, como se señala a continuación:

• En 1970, los países occidentales perdieron la supremacía en la industria pesada como la de acero, bronce, latón y textil. Su participación en el mercado mundial declinó y hubo necesidad de cerrar plantas en occidente debido a la competencia de Japón. El diagnóstico de occidente fue que tal pérdida de competitividad se debía al bajo costo de la mano de obra en Japón (Goldratt y Fox, 1992).

• En 1975, los países occidentales perdieron el liderazgo en aparatos electrodomésticos: el mercado occidental es literalmente invadido por estéreos, televisores, hornos de microondas y otros productos de los países asiáticos, ya no sólo japoneses. Además de la mano de obra barata, se añadieron nuevos elementos para explicar esto: el *dumping* y el plagio- dratt y Fox, 1992)

• Es a finales de la década de 1970 cuando la competencia de los productos japoneses empieza a provocar alarma en la industria orgullo de Estados Unidos: la automotriz. En 1980 se prenden los "focos de alarma" en este país por la competencia de los productos orientales. Por ejemplo, General Motors gastó cerca de 70 000 millones de dólares en nueva tecnología y adquisiciones, pero seguía perdiendo mercado.

• En mayo de 1980, la cadena de televisión estadounidense NBC transmitió un programa titulado "Si Japón puede, ¿por qué nosotros no?'; que explicaba a los estadounidenses las ventajas del control de calidad japonés. Es a raíz de este documental que el doctor Deming se hizo conocido en los medios empresariales de Estados Unidos.

• En febrero de 1981, un total de 30 ejecutivos de Ford se reunieron con E. Deming, convencidos de que sus problemas se localizaban en alguna parte específica del proceso. Esperaban que Deming les hablara de autos, de cómo

producirlos sin problemas. Aunque habló de variación y de estadística, su charla se centró en los aspectos fundamentales: ¿qué estaba haciendo la alta administración por mejorar sus procesos? A partir de entonces, Ford inició un programa de calidad con apoyo de Deming (Gabor, 1990).

• A mediados de la década de 1980, Japón asume el liderazgo en electrónica, en la producción de microchips (Goldratt y Fox, 1992). Es aquí donde queda totalmente en evidencia que la penetración de los productos del lejano oriente no se debía únicamente a la mano de obra barata, pues para estas alturas los salarios en Japón eran equiparables a los de Estados Unidos; también se descarta el plagio de sus productos. Se descubrió que hacía más de 30 años se había iniciado un proceso de mejora continua que los condujo a aprovechar la tecnología disponible en el mundo y, como resultado de ello, desarrollaron nuevas propuestas tecnológicas que los llevó al liderazgo tecnológico en diversas áreas. Es decir que, desde 1950, se venían haciendo las tres actividades fundamentales por la calidad: innovación, control y mejora.

Así, la versión japonesa del control total de calidad (Company-Wide Quality Control) fue más allá de la versión de Feigenbaum: involucró a todas las divisiones y a todos los empleados en un enfoque integrado para alcanzar objetivos de calidad, costos y calidad en el servicio. Para que todos los empleados trabajaran por la calidad se les proporcionaba la capacitación y motivación necesarias. Sobre este último punto, en Estados Unidos apareció un movimiento muy importante por la calidad, conocido como Zero Defects, que se enfocaba en elevar las expectativas de la administración, así como en motivar y concientizar a los trabajadores por la calidad de "promover un constante y consciente deseo de hacer el trabajo bien a la primera vez" (Halpin, 1966).

James F. Halpin, director de calidad de Martin Company, explicaba: "La razón detrás de la falta de perfección fue simplemente que ésta no se esperaba. Al mismo tiempo que la administración demanda perfección, ésta ocurre". Este enfoque de la calidad lo continuó Philip B. Crosby, quien también trabajó en Martin Company y durante esta etapa escribió dos libros muy populares: *La calidad no cuesta,* publicado en 1979, y *Calidad sin lágrimas,* en 1984. En general, este

enfoque de cero defectos, que enfatizaba la calidad como un problema de motivación y expectativas, entró en rivalidad con enfoques como el de Deming, que aborda la calidad desde una perspectiva más integral.

Al final, en esta etapa de aseguramiento de la calidad, se empieza a poner énfasis en el diseño y aparecen herramientas para coadyuvar a este fin, como la confiabilidad, el diseño de experimentos, el análisis de modo y el efecto de falla (AMEF), entre otros.

Etapa de la administración de la calidad total

En la década de 1980, se tomó plena conciencia de la importancia estratégica de la calidad, de su mejora y de la satisfacción del cliente, con lo que se empezó a publicitar lo hecho en Japón; además muchas empresas y organizaciones del mundo occidental iniciaron sus programas de gestión de la calidad total como una acción estratégica para mejorar su competitividad. También se publicó una amplia y variada literatura sobre la administración de la calidad total y sus herramientas.

Por ejemplo, en 1986 aparece el libro *Out o/ the Crisis. Quality, Productivity and Competitive Position,* de E. Deming, en el que expone los principios en los que se debe basar la administración de una organización para mejorar su competitividad en forma continua. Esta obra se convirtió en un aporte fundamental para entender qué es lo que asegura la calidad en las organizaciones, el papel de la alta dirección en la calidad y la importancia de la estadística para mejorar los procesos y tomar decisiones.

En 1987 aparecieron la serie de **normas ISO-9000,** con el objetivo de unificar y estandarizar los numerosos enfoques de sistemas de aseguramiento de calidad que hasta a la fecha existían. En 1994, estas normas sufrieron una primera ligera modificación, pero es hasta el año 2000 cuando se les hace un cambio radical y se reemplaza el concepto de Sistema de *Ase*guramiento de la Calidad por el de Sistema de Gestión de la Calidad. Con el tiempo, estas normas se han convertido en un referente fundamental para miles de empresas y organizaciones que han certificado sus sistemas de gestión de la calidad basándose en ellas.

Durante las décadas de 1980 y 1990 se escribieron cientos de libros que explicaban qué era la calidad, cómo lograrla y cuáles eran sus métodos, y cómo lograr mejores estilos y hábitos de liderazgo de los directivos. Además de E. Deming, algunos de los autores que más contribuyeron a la calidad fueron: Joseph Duran, Kaouro Ishikawa, Philips Crosby, Masaki Imai, Arman Feigenbaum, Shigeo Shingo, Taichi Ohono, Genichi Taguchi, Peter Drucker, Peter Senge, Stephen Covey, Tom Peters, Michael Poner, etcétera.

En 1988, Motorola inició la aplicación del programa de Seis Sigma (6σ) con el propósito de mejorar la calidad de productos electrónicos, logrando ahorros millonarios y el premio estadounidense a la calidad Malcolm Baldrige. A mediados de los noventa la estrategia Seis Sigma fue adoptada, enriquecida y generalizada por un gran número de compañías, de las que destacan Allied Signal en 1994 y General Electric (GE) en 1995. Esta última tuvo éxitos espectaculares con la aplicación de 6σ, no sólo en sus procesos de manufactura, sino también en su división financiera y de entretenimiento. En la actualidad, 6σ sigue siendo una de las estrategias de mejora de mayor impacto.

En 1987, en Estados Unidos se estableció por decreto gubernamental el premio a la calidad Malcolm Baldrige, el cual se entrega desde 1988. El galardón se designó así en honor de quien fuera el impulsor del premio y secretario de Comercio en Estados Unidos desde 1981 hasta su trágica muerte en un accidente de rodeo en 1987. El propósito del premio es estimular a las compañías de Estados Unidos a mejorar su calidad y productividad, reconocer logros en ese campo y que las organizaciones premiadas sean un ejemplo para las otras, además de establecer pautas y criteriosa seguir que ayuden a las organizaciones a mejorar. (En www.quality.nist.gov se puede consultar información sobre ese premio.)

A finales de los ochenta y principios de los noventa, otros países y regiones establecen sus propios premios a la calidad con propósitos similares. Por ejemplo, el Premio Europeo a la Calidad/ Excelencia se entrega desde 1992 (www.efqm.org). En México se entrega el Premio Nacional e Calidad desde 1990, y desde 2008 se basa en un modelo de competitividad

(www.competitividad.org.rnx). En Argentina también se otorga uno desde 1994 www.premiocalidad.com.ar). Durante toda la década de los noventa, en muchos países surgieron diversos premios de calidad, regionales y estatales que aún se siguen entregando.

Etapa de reestructurar las organizaciones y de mejora sistémica de procesos en la era de la información

Al final de la década de 1990, el movimiento por la calidad llevaba en occidente casi 20 años. Durante este tiempo se había desarrollado una conciencia clara en las principales organizaciones de que asunto estratégico, una ventaja competitiva y una oportunidad de negocio. Además, se acumularon experiencias de éxitos y también muchos intentos fallidos de hacer que las prácticas directivas estuvieran alineadas con las propuestas de la administración de la calidad total. En muchas compañías, los viejos supuestos y modelos mentales acerca de que la calidad es un problema, y es una labor de manufactura, seguían dominando algunas de las prácticas directivas. Por ello se siguen proponiendo enfoques renovados para reinventar a las empresas con el fin de que logren sobrevivir en un mundo globalizado, partiendo de repensar su misión (la razón de ser), junto con la creación de visiones compartidas que estimulen y orienten el trabajo directivo. Lo anterior, en el contexto de la globalización y la era de la información, ha llevado a que muchas organizaciones líderes se reestructuren y se concentren en lo que es clave, asimismo han sub contratado con otras empresas funciones completas. Esto ha llevado a que se generen nuevas estructuras y estrategias acordes con la misión y la visión. Se habla de que es indispensable desarrollar ventajas competitivas y profundizar en estrategias para hacer las cosas mejor, más rápido y a menor costo, a través de los tres conjuntos de actividades de la calidad: innovación, control y mejora.

Se sabe que la organización es un sistema (múltiples componentes y procesos interdependientes) que se debe administrar como tal. Este sistema debe ser esbelto y flexible; además, debe crear valor para el cliente y para las partes interesadas (propietarios, comunidad, etc.), Todos los sistemas están constituidos por procesos clave para la creación de valor para el cliente, los cuales deben

mejorarse hasta niveles de calidad sin precedentes (3.4 defectos por millón de oportunidades, por ejemplo). Así, todo el mundo, principalmente la gente que tiene el mando, es responsable de mejorar el desempeño de sus procesos. La alta dirección encabeza el esfuerzo para generar visiones compartidas, alinear los esfuerzos dentro de la compañía, eliminar barreras organizacionales, propiciar el aprendizaje organizacional y facultar y potenciar el trabajo y la creatividad del talento humano de la organización. Lo anterior se efectúa en un contexto cuya orientación de la calidad es directa y total hacia el cliente y el mercado.

Por lo tanto, es posible afirmar que en la actualidad el movimiento por la calidad ha evolucionado hasta profundizar en prácticas directivas, metodologías y estrategias que ayudan a impactar la cultura y efectividad de la organización para cumplir con su misión y visión. Esto presupone un análisis estratégico del entorno para desarrollar ventajas competitivas en la era de la información y en un mercado globalizado, y aplicar diferentes estrategias para hacer las cosas mejor, más rápido y a un menor costo, involucrando y potenciando el talento humano.

Japón

Como vimos antes, el papel de Japón en la calidad y la productividad fue decisivo. Por ello, y con el ánimo de entender mejor la calidad, se presentan aquí algunos detalles del Imperio del Sol Naciente. La conquista de los mercados internacionales de los productos japoneses se puede cuantificar por las cifras de su balanza comercial. En la década de 1980, Japón tuvo un superávit comercial anual de aproximadamente 70 mil millones de dólares en promedio. Para la siguiente década, ese superávit anual fue de alrededor de 120 mil millones de dólares. Sus exportaciones en 2008 fueron de 773 mil millones de dólares; con un superávit comercial de 83 mil millones de dólares. Una interrogante ante estas cifras es: ¿a qué se debe el éxito en las exportaciones japonesas? La respuesta no está en los recursos naturales o extensión de éstos, ya que Japón es un país falto de recursos naturales (petróleo, carbón, mineral de hierro, cobre, manganeso, madera) y con un territorio montañoso con abundantes volcanes y más de 5 mil pequeñas islas. La extensión total de su territorio es de 369000 km^2, es decir, 25 veces más pequeña que el de Estados Unidos, y su economía es 35% de la del

país americano, en términos del PIB. Se puede decir que es una nación pequeña con poca tierra cultivable y habitable y escasos recursos naturales. Ahora se acepta que uno de los factores que contribuyeron al milagro japonés son sus programas de calidad, productividad e innovación tecnológica. El fenómeno japonés fue determinante en las condiciones actuales de competencia mundial por los mercados, así como en los cambios en la forma de dirigir una organización.

Competitividad y mejora de la calidad

La **competitividad** se entiende como la capacidad de una empresa para generar un producto o servicio de mejor manera que sus competidores. Esta capacidad resulta fundamental en un mundo de mercados globalizados, en los que el cliente por lo general puede elegir lo que necesita de entre varias opciones. Así, cada vez más las organizaciones, ya sea un fabricante, un hotel, una escuela, un banco, un gobierno local o un partido político, compiten por los clientes, por los estudiantes por los recursos de apoyo, etc. Esto lleva a que las compañías busquen mejorar la integración e interrelación de sus diversas actividades.

Un punto de partida básico es saber que los elementos significativos para la satisfacción del cliente, y con ello para la competitividad de una empresa, están determinados por la calidad y los atributos del producto, el precio y la calidad del servicio (que incluye el tiempo de entrega de los productos o servicios), como se muestra en la fig. 3.1 Se es más competitivo cuando se ofrece mejor calidad a bajo precio y con un buen servicio. La calidad está dada por las características, los atributos y la tecnología de! producto mismo; en tanto, el precio es lo que el consumidor final paga por el bien, y la calidad de! servicio la determina la forma en que el cliente es atendido por la empresa. Un asunto cada vez más crítico en relación con la calidad del servicio es la rapidez con la que hacen las cosas, lo cual influye en el tiempo de entrega (lapso que transcurre desde que el cliente pide el producto hasta que se le entrega). La rapidez con la que se hacen las cosas resulta fuertemente influida por la eficacia y coordinación de las diferentes tareas, y por dejar de hacer actividades que no agregan valor al producto.

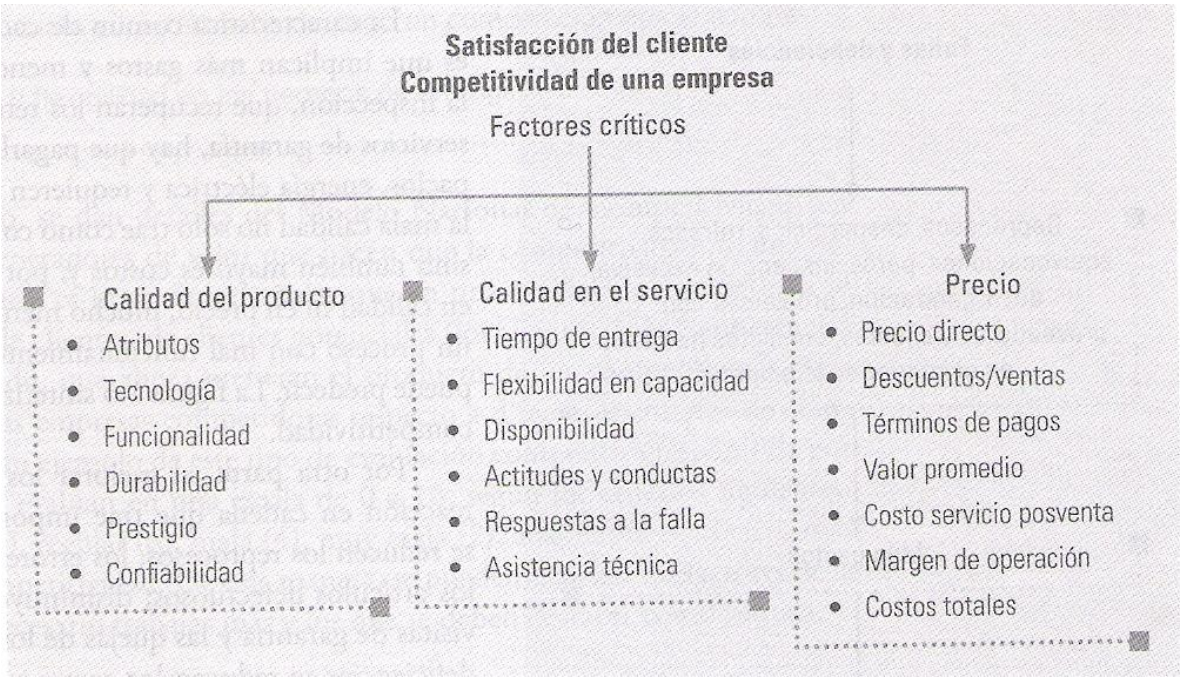


Figura 3.1 Los factores críticos de la competitividad

Un **proceso** es un conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados. Algunos ejemplos de procesos son: la facturación, las compras, las etapas de la manufactura de un producto, etcétera.

De manera tradicional, se creía que la calidad, e! precio y e! tiempo de entrega eran objetivo antagónicos en el sentido de que se podía mejorar cualquiera de los tres sólo en detrimento de los otros dos. De hecho, algunas organizaciones siguen actuando a partir de la creencia de que mejorar la calidad implica necesariamente un precio más alto y un mayor tiempo de producción del bien o servicio. Sin embargo, cada día hay más empresas en las que se sabe que la calidad y la mejora de los diversos procesos influyen positivamente en los tres factores. Es decir, cada vez hay más compañías que actúan sabiendo que el productor de mejor calidad tiene costos totales más bajos, mientras que el productor de más mala calidad tiene costos totales más altos, ya que cuando se tiene mala calidad en las diferentes actividades y procesos, hay equivocaciones y fallas de todo tipo, por ejemplo:

• Reprocesos y retrasos

• Pagar por elaborar productos malos

• Aros y fallas en el proceso (fallas en facturación, programación y producción)

• Desperdicios (espacios, materiales, movimientos, actividades, productos)

• Una inspección excesiva para tratar de que los productos de mala calidad no salgan al mercado

• Reinspección y eliminación de rechazo

• Más capacitación, instrucciones y presión a los trabajadores

• Gastos por servicios de garantía por fallas del producto y por devoluciones o reclamos

• Problemas con proveedores

• Clientes insatisfechos y pérdidas de ventas

• Problemas, diferencias y conflictos humanos en el interior de la empresa

La característica común de cada uno de los aspectos anteriores es que implican más gastos y menos ingresos. A los encargados de la inspección, que recuperan los retrasos y atienden reclamaciones y servicios de garantía, hay que pagarles y, además, usan máquinas, espacios, energía eléctrica y requieren personas que lo coordinen. Así, la mala calidad no sólo trae como consecuencia clientes insatisfechos, sino también mayores costos y, por lo tanto, no se puede competir en calidad ni en precio, mucho menos en tiempos de entrega, ya que un proceso con mal funcionamiento es errático e inestable, y no se puede predecir. La figura 3.2 sintetiza la relación entre mala calidad y competitividad.

Por otra parte, al mejorar los diversos procesos se logra una reacción en cadena que trae importantes beneficios; por ejemplo, se reducen los reprocesos, los errores, los retrasos, los desperdicios y los artículos defectuosos; disminuye la devolución de artículos, las visitas de garantía y las quejas de los clientes. Al lograr tener menos deficiencias se reducen los costos y se liberan recursos materiales y humanos que se pueden destinar a elaborar más producto, resolver

otros problemas, reducir los tiempos de entrega o proporcionar un mejor servicio al cliente, con lo que se incrementaría la productividad y los empleados estarían más contenta con su trabajo.

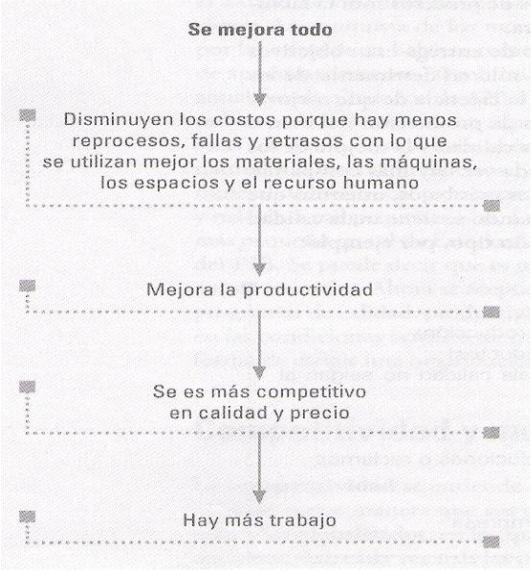
Lo anterior se sintetiza en el esquema de la figura el cual fue presentado por primera vez en 1950 por Edwards Deming, a un grupo de industriales japoneses.

En resumen, la competitividad se define como la capacidad de una empresa de generar valor para el cliente, los proveedores y los accionistas, de mejor manera que sus competidores. Esta capacidad se manifiesta por:

• calidad y diferenciación del producto o servicio

• precio y términos de pago;

• calidad en el servicio, que incluye tiempos, oportunidad y flexibilidad de entrega, además de apoyo en refacciones y reparaciones, soporte en capacitación para el uso del producto *y* para conocer sus potencialidades.



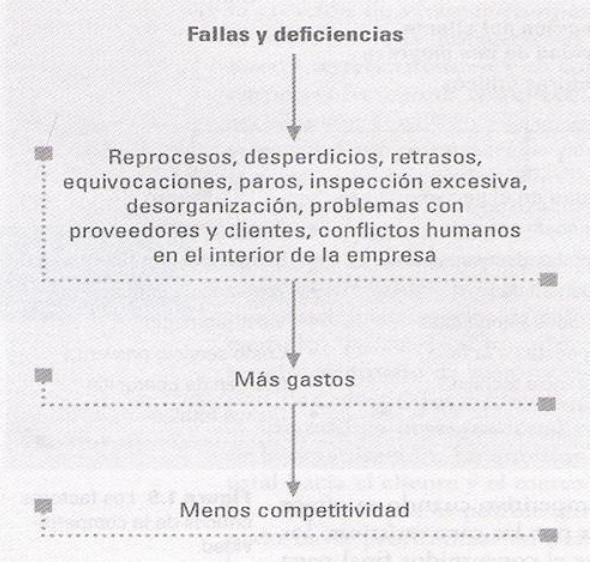


Figura 3.2 Con fallas y deficiencias no se puede competir en calidad ni precio, menos en tiempos de entrega.

Análisis de la competitividad

De acuerdo con lo anterior, un análisis de la competitividad en una organización tendría que contrastar sus indicadores de competitividad contra los correspondientes de otras empresas del mismo ramo industrial o comercial, y así contestar interrogantes como las siguientes:

• ¿Cómo es la calidad de su producto y servicio comparado con la de sus competidores?

• ¿En qué se distingue su producto y servicio?

• ¿Cuáles son las ventajas competitivas a desarrollar o fortalecer?

•¿Cómo es el precio de su producto y los términos de pago en comparación con la competencia?

• ¿Tiene calidad, cumplimiento y flexibilidad en los tiempos de entrega?

Es importante señalar que en una evaluación competitiva se debe considerar la opinión o voz de clientes, de clientes potenciales (los clientes de la competencia) y de ex clientes (clientes del pasado, que ahora prefieren el producto de los competidores), para comparar los resultados de diversas empresas competidoras respecto a diferentes criterios de competitividad.

La tabla 3.2 muestra un ejemplo de este tipo de evaluación competitiva respondida por los clientes. Todos los criterios se evalúan en una escala de 0 a 10, según los criterios siguientes: muy buena (10 puntos), buena (8), regular (6), mala (4), muy mala (2), adaptando el adjetivo más adecuado con cada criterio de competitividad. De esta manera, se pueden detectar los factores de la competitividad sobre los que es necesario trabajar más y los que se deben destacar como ventaja.

Tabla 3.2 Ejemplo de una evaluación competitiva en la que el competidor A tiene mejor posición, y la peor el B.

Criterio (o atributo)	Nuestra empresa	Competidor A	Competidor B
Calidad	Aceptable (6)	Excelente (10)	Mala (4)
Precio	Moderado (6)	Elevado (4)	Bajo (8)
Términos de pago	Aceptables (6)	Malos (4)	Muy malos (2)
Términos de entrega	Largos (4)	Cortos (8)	Muy largos (4)
Cumplimiento de tiempos	Casi siempre cumple (8)	A veces no cumple (6)	Con frecuencia no cumple (4)
Servicios de pre y posventa	Regular (6)	Bueno (8)	Pésimo (2)
Información sobre el producto	Abundante y poco clara (6)	Suficiente y clara (8)	Poca (4)
Diferenciación del producto	Originalidad Media (6)	Innovador (8)	Siempre hace imitaciones (6)
Calificación (suma de puntos y porcentual)	**48** (48/80) X 100 = 60%	**56** (61.5/80)X100 = 70%	**28** (28/80) = 35 %

Calidad y productividad

En la sección anterior se trataron la calidad y la productividad con un enfoque en sus interrelaciones con otros factores, pero no se analizaron a detalle. En esta sección se estudiaran a fondo.

Respecto a la **calidad** existen varias definiciones; para Juran (1990): “Calidad es que un producto sea adecuado para su uso. Así, la calidad consiste en ausencia de deficiencias en aquellas características que satisfacen al cliente”, Por su parte, la American Society for Quality (ASQ) señala: “Calidad es un término subjetivo para el que cada persona o sector tiene su propia definición. En un sentido técnico, la calidad puede tener dos significados: 1) son las características de un producto o de servicio que influyen en su capacidad de satisfacer necesidades implícitas o específicas; 2) Es un producto o un servicio libre de deficiencias". Por su parte, la norma 150-9000:2005 define calidad como" el grado en el que un conjunto de características inherentes cumple con los requisitos", entendiendo requisito como una necesidad o expectativa establecida, generalmente implícita u obligatoria.

En términos menos formales, la calidad la define e! cliente, ya que es e! juicio que éste tiene sobre un producto o servicio que por lo general es la aprobación o rechazo. Un cliente queda satisfecho si se le ofrece todo lo que él esperaba encontrar y más. Así, la calidad es ante todo la satisfacción de! cliente, la cual está ligada a las expectativas que éste tiene sobre e! producto o servicio. Tales expectativas son generadas de acuerdo con las necesidades, los antecedentes, el precio, la publicidad, la tecnología, la imagen de la empresa, etc. Se dice que hay satisfacción si el cliente percibió en el producto o servicio al menos lo que esperaba.

Una forma de ver la calidad en donde se integran varios de los elementos anteriores es definiéndola como "la creación de valor para e! cliente", y este valor se debe ver como el resultado del siguiente cociente:

$$Valor = \frac{Atributos\,del\,producto + imagen + relaciones}{\Pr ecio}$$

donde los **atributos del producto** se refieren a las características del producto mismo que influyen en su funcionamiento tanto presente como futuro, así como en su estética. La **imagen** (o reputación) es e! prestigio actual de la organización según la percepción y opinión de! cliente, y es el resultado de la historia de la organización a los ojos de! mercado que atiende. La imagen es un aspecto sumamente importante, ya que en un mercado globalizado, en donde es frecuente encontrar muchos productos y condiciones de relativa igualdad en sus atributos, el cliente se decide por la marca; es decir, por e! prestigio. Por último, en el numerador también están las relaciones, las cuales están determinadas por la calidad en el servicio y en general por la calidad en las relaciones que la empresa mantiene con los diferentes actores o factores externos; por ejemplo, clientes, cadena de distribución, proveedores, comunidad, otros competidores, oficinas gubernamentales, etc. Los tres aspectos anteriores se suman r se dividen entre el precio que el cliente paga por el producto, para así obtener e! valor que el cliente percibe por lo que pagó. Además, estos cuatro factores no son independientes, ya que, por ejemplo, un mal producto afecta de manera desfavorable la imagen y las relaciones.

Existen varios ejemplos de organizaciones en las que queda en evidencia la importancia de los factores que forman la anterior ecuación del valor. Un ejemplo es la empresa zapatera mexicana Canadá, que por muchas décadas fue líder en el mercado zapatero y, hasta fines de la década de 1970, su calzado era sinónimo de calidad, ya que era frecuente escuchar la frase: "están a todo dar tus Canadá". para referirse a unos zapatos de calidad. Sin embargo, esta imagen se empezó a deteriorar a raíz de que la empresa introdujo en el mercado zapatos de piel sintética y suelas de materiales no convencionales, lo que tal vez a corto plazo fue un "excelente negocio", pues estos materiales eran mucho más baratos que los tradicionales de origen animal pero, a largo plazo, esos pesos ahorrados en materiales se convirtieron en una desinversión en el prestigio que se había construido a lo largo de los años, como una empresa que fabricaba zapatos de

calidad. El resultado es que tiempo después los zapatos Canadá eran catalogados como anticuados y de mala calidad. El gigante invencible de épocas pasadas fue derrotado por sus deudas y malos resultados; en 1995 pasó a manos de nuevos dueños y administradores que intentaron rescatarla sin lograrlo y, finalmente, en 2003 la empresa cerró.

De lo anterior se desprende la necesidad de enfocar la empresa hacia el cliente, de tal forma que el negocio se vea desde su perspectiva. Cada actividad y todos los procesos deben justificar su razón de ser en función del valor que agrega para el cliente, de lo contrario no tiene razón de ser. Así, crear valor es generar aquello que es valioso para el cliente o, en otras palabras, maximizar la ecuación del valor. Lo deseable es que el valor sea mayor que uno, lo que indicará que el cliente recibe más de lo que paga por el producto. Hay cuatro formas de maximizar el valor para el cliente: reducir el precio del producto, incrementar los atributos de calidad y funcionalidad del producto o servicio, mejorar la imagen de la empresa y trabajar por una mejor atención y en general por relaciones más adecuadas con el mundo que interactúa con la empresa. Estas cuatro formas o líneas de acción para crear valor para el cliente deben atenderse simultáneamente, ya que si una de ellas se descuida, e! comprador percibirá que el producto no tiene el valor suficiente y, por consiguiente, se sentirá insatisfecho, con las respectivas consecuencias.

Para atender las cuatro líneas de acción se deben seguir las tres actividades centrales de un sistema de calidad: diseñar y desarrollar nuevos productos y procesos, monitorear y controlar los procesos, y mejorar los procesos.

Una actividad útil para fundamentar y direccionar estas tres líneas de acción es reflexionar sobre el concepto de calidad expuesto antes. Un punto de partida es dialogar acerca de las siguientes preguntas:

• ¿De forma sistemática se recibe algún tipo de información sobre la satisfacción de sus clientes (quejas, retrasos, facturación, atención, servicio, desempeño del producto o atributos del servicio)? En otras palabras, ¿cómo se recaba información y retroalimentación de sus clientes?

• ¿Para determinar prioridades y acciones clave hacia el futuro se toma en cuenta la satisfacción del cliente?

• ¿Se sabe cuáles son las razones principales por las que sus clientes prefieren su empresa sobre otras? ¿Cuál es su ventaja competitiva?

• ¿En el último año se ha ejecutado alguna acción importante que haya creado valor para el cliente?

• ¿Se está dialogando y trabajando para crear nuevos atributos al producto o servicio, pensando en generar calidad en el futuro para el cliente?

• ¿La organización es de calidad?, es decir, ¿está enfocada en crear valor para el cliente, o en beneficiar al dueño o jefe?

• ¿Se tienen identificados los diferentes procesos en los que se divide la organización, y se hacen esfuerzos sistemáticos para mejorar su operación o su diseño?

Productividad

La productividad tiene que ver con los resultados que se obtienen en un proceso o un sistema, por lo que incrementar la productividad es lograr mejores resultados considerando los recursos empleados para generarlos. En general, la productividad se mide por el cociente formado por los resultados logrados y los recursos empleados. Los resultados logrados pueden medirse en unidades producidas, en piezas vendidas o en utilidades, mientras que los recursos empleados pueden cuantificarse por número de trabajadores, tiempo total empleado, horas máquina, etc. En otras palabras, la medición de la productividad resulta de valorar adecuadamente los recursos empleados para producir o generar ciertos resultados.

Es usual ver la productividad a través de dos componentes: **eficiencia *y* eficacia.** La primera es simplemente la relación entre el resultado alcanzado y los recursos utilizados, mientras que la eficacia es el grado en que se realizan las actividades planeadas y se alcanzan los resultados planeados. Así, buscar eficiencia es tratar

de optimizar los recursos y procurar que no haya desperdicio de recursos; mientras que la eficacia implica utilizar los recursos para el logro de los objetivos trazados (hacer lo planeado). Se puede ser eficiente y no generar desperdicio, pero al ser eficaz no se están alcanzando los objetivos planeados. Adicionalmente, por **efectividad** se entiende que los objetivos planteados son trascendentes y éstos se deben alcanzar.

La figura 3.3 Muestra los componentes de la productividad y se ejemplifica la definición de eficiencia y eficacia midiendo los recursos empleados a través del tiempo total y los resultados mediante la cantidad de productos generados en buenas condiciones. Esta figura sugiere dos programas para incrementar la productividad : mejorar la eficiencia reduciendo los tiempos desperdiciados por paros de equipos, falta de materiales, desbalanceo de capacidades, mantenimiento no programado, reparaciones y retrasos en los suministros y en las órdenes de compra .

Según una encuesta aplicada en los sectores metal-mecánico, calzado, muebles, textil y confección en México (Giral *et al.,* 1998), la eficiencia promedio detectada fue de 50%, es decir, en estos sectores se desperdiciaba la mitad del tiempo, en promedio, en aspectos inherentes a fallas de planeación y organización de la producción, principalmente. De aquí que tome sentido la afirmación de la figura 3.3, que dice que más que producir más rápido es mejor hacerla reduciendo los tiempos desperdiciados a lo largo de los procesos.

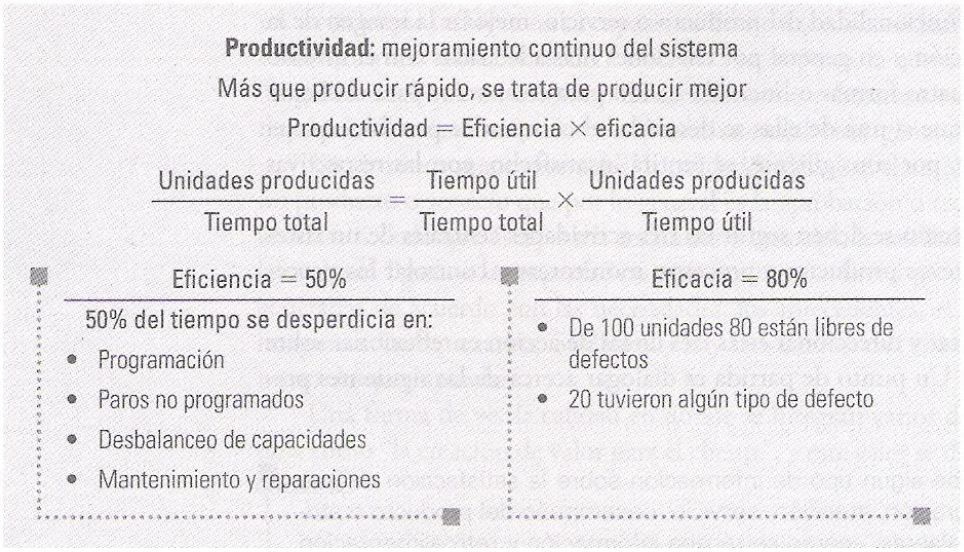


Figura 3.3 La productividad y sus componentes

Por otro lado, está la mejora de la eficacia, cuyo propósito es optimizar la productividad del equipo, los materiales y los procesos, así como capacitar a la gente para alcanzar los objetivos planteados, mediante la disminución de productos con defectos, fallas en arranques yen operación de procesos, y deficiencias en materiales, en diseños y en equipos. Además, la eficacia debe buscar incrementar y mejorar las habilidades de los empleados y generar programas que les ayuden a hacer mejor su trabajo. Según la encuesta referida antes, la eficacia promedio detectada fue de 80%, es decir, en un tiempo útil en que se producen 100 unidades, sólo 80 están libres de defectos, las otras 20 se quedaron a lo largo del proceso por algún tipo de defecto. De estas 20 algunas podrán reprocesarse y otras serán desperdicio.

De esta manera, si se multiplica eficiencia por eficacia, se tiene una productividad promedio del orden de 40%, en las ramas industriales referidas, lo que indica el potencial y el área de oportunidad que existe en mejorar el actual sistema de trabajo y en organizar por medio de programas de mejora continua.

Para terminar esta sección cabe preguntar: ¿Quién causa la mala calidad y la baja productividad en una organización? Porque si en una empresa existe una lista

enorme de problemas como desorganización, falta de calidad, falta de información clara y oportuna, costos altos, retrasos, devoluciones y reclamos de clientes, al preguntar ¿cuál es la causa de esas fallas y retrasos?, no sería raro escuchar respuestas que afirmaran que el problema son los trabajadores, que lo que se necesita es apretar a la gente, que no habría problemas si todos cumplieran con su responsabilidad. En consecuencia, la conducta típica de quienes piensan así sería buscar las soluciones en la gente, mediante la administración por reacción (regaños, reclamos, juntas, avisos de advertencia, despidos, presión). La administración por reacción centra la atención en los efectos y en los hechos puntuales, lo que suele desembocar en explicaciones ficticias e impide ver los patrones más importantes y las causas de éstos. Sin embargo, la historia de la calidad y la mejora ha demostrado ampliamente que la calidad y la productividad la dan los procesos y los sistemas, por lo que es necesario trabajar en éstos capacitando, rediseñando, mejorando métodos de organización, de solución de problemas, de torna de decisiones y de comunicación. El personal se adapta al sistema y no es la causa básica de la mala calidad. Más de 90% de las fallas está fuera del alcance de la gente de labor directa. La causas deben buscarse a lo largo del proceso, desde los insumos, y preguntando si éstos cumplen con los requerimientos y si se reciben a tiempo. Asimismo, hay que inspeccionar los procesos de transformación y ver dónde se originan los incumplimientos, cuáles son las causas de éstos y cómo pueden remediarse y evitarse. También hay que investigar si los productos y servicios satisfacen las necesidades, si son los que demanda el cliente y si se entregan a tiempo.” **Humberto Gutiérrez Pulido, Calidad Total y Productividad, Mc Graw Hill.**

“DEFINICIÓN DE LA CALIDAD

La calidad puede ser un concepto confuso debido en parte a que las personas consideran la calidad de acuerdo con diversos criterios basados en sus funciones individuales dentro de la cadena de valor de producción-comercialización. Además, el significado de calidad sigue evolucionando conforme la profesión de la calidad crece y madura. Ni asesores ni profesionales de los negocios concuerdan en una definición universal. En un estudio, en que se pidió a los administradores

de 86 empresas del este de Estados Unidos definir la calidad, se obtuvieron varias docenas de numerosas respuestas, entre las que se incluyen las siguientes:

1. Perfección.
2. Consistencia.
3. Eliminación de desperdicios.
4. Velocidad de entrega.
5. Observancia de las políticas y procedimientos.
6. Proveer un producto bueno y útil.
7. Hacerlo bien la primera vez.
8. Complacer o satisfacer a los clientes.
9. Servicio y satisfacción total para el cliente.

Por tanto, es importante entender las diferentes perspectivas desde las cuales se ve la calidad a fin de apreciar por completo el papel que desempeña en las distintas partes de una organización de negocios.

Perspectiva con base en el juicio

Una noción común sobre la calidad, que los consumidores utilizan con frecuencia, es que es sinónimo de superioridad o excelencia. En 1931, Walter Shewhart definió primero la calidad como la bondad de un producto. Este punto de vista se conoce como la definición *trascendente* (*trascender:* "elevarse o extenderse más allá de los límites ordinarios"). En este sentido, la calidad " se puede reconocer en forma absoluta y universal, una marca de normas inflexibles y altos logros". Como tal, no se puede definir con precisión, usted la reconoce cuando la ve. Es común relacionarla de manera vaga con una comparación de rasgos y características de los productos y promulgada mediante esfuerzos de mercadotecnia dirigidos a desarrollar la calidad como una imagen variable en la mente de los consumidores. Ejemplos comunes de los productos a los que se atribuye esta imagen son los hoteles Ritz-Carlton y los automóviles Lexus.

Sin embargo, la excelencia es abstracta y subjetiva y los estándares de excelencia pueden variar de manera considerable entre los individuos. De ahí que la definición trascendente sea de poco valor práctico para los gerentes. No provee un medio mediante el que la calidad se pueda medir o evaluar como base para la toma de decisiones.

Perspectiva con base en el producto

Otra definición de la calidad es que es una función de una variable medible, específica y que las diferencias en la calidad reflejan diferencias en la cantidad de algún atributo del producto, como el número de puntadas por pulgada en una camisa o el número de cilindros en un motor. Esta evaluación implica que niveles o cantidades superiores de características de producto sean equivalentes a una calidad superior. Como resultado, se supone de forma equivocada que la calidad se relaciona con el precio: cuanto más alto sea el precio, más alta será la calidad. Considere el caso de un hombre de Florida que compró un Lamborghini de 262 000 sólo para hallar un toldo con goteras, una batería que sin previo aviso dejó de funcionar, un quemacocos que se desprendió cuando el auto golpeó un tope y puertas que se atascaban. Sin embargo, un producto (un término empleado en este libro para referirse a un bien manufacturado o servicio) no necesita ser caro para que los consumidores lo consideren de alta calidad. Asimismo, tal como sucede con la idea de la excelencia, la evaluación de los atributos del producto puede variar de manera considerable entre las personas.

Perspectiva con base en el usuario

Una tercera definición de la calidad se basa en la suposición de que la calidad se determina de acuerdo con lo que el cliente quiere. Las personas tienen distintos deseos y necesidades y, por tanto diferentes normas de calidad, lo que nos lleva a una definición basada en el usuario: La calidad se define como la adecuación al uso, o cuán bien desempeña su función el producto. Por ejemplo, tanto un Cadillac sedán como un jeep Cherokee se adaptan a un uso, pero cubren distintas necesidades de diferentes grupos de clientes. Si se desea un vehículo para viajar por carretera con accesorios de lujo, un Cadillac cubrirá mejor estas necesidades.

Si se quiere un vehículo para acampar, salir de pesca o ir a esquiar, se podría considerar que un jeep tiene mejor calidad.

La experiencia de Nissan Motor Car Company Limited en el mercado de Estados Unidos ofrece un ejemplo de la aplicación del concepto de adaptación al uso. Nissan, que producía una línea de vehículos llamados Datsun (que se derivaban de las raíces históricas de la compañía), incursionó en el mercado estadounidense en 1960. Como no quería usar el nombre de Nissan en una aventura tan riesgosa, decidió utilizar el nombre Datsun en todos los autos y camiones que vendiera en Estados Unidos. Aunque el automóvil era económico, los conductores estadounidenses consideraron que era lento, difícil de manejar, de baja potencia y no muy cómodo. En esencia, carecía de la mayor parte de las cualidades que los conductores estadounidenses esperaban. El representante de la empresa en Estados Unidos, el señor Katayama, no dejaba de hacer preguntas y enviar las respuestas a Tokio. Durante un tiempo, su empresa se negó a creer que las preferencias de los estadounidenses fueran diferentes de las suyas. Después de muchos años de acoso, el señor Katayama obtuvo finalmente un producto del gusto de los estadounidenses, el auto deportivo 240Z de 1970. Con el tiempo, el nombre Nissan reemplazó al de Datsun. Los aficionados a los autos saben ya que Nissan relanzó una versión moderna de este vehículo clásico en 2002.

Un segundo ejemplo proviene de una compañía estadounidense de aparatos electrodomésticos cuyas estufas y refrigeradores admiraron a los compradores japoneses. Por desgracia, los aposentos más pequeños de los hogares típicos japoneses carecían de espacio suficiente para acomodar los modelos estadounidenses. Algunos ni siquiera pasaban por las angostas puertas de las cocinas. Aunque las características de desempeño de los productos eran elevadas, éstos simplemente no se podían utilizar en Japón.

Perspectiva con base en el valor

Un cuarto enfoque para definir la calidad se basa en el valor; es decir, la relación de la utilidad o satisfacción con el precio. Desde este punto de vista, un producto de calidad es aquel que es tan útil como los productos con los que compite y se

vende a un menor precio, o bien, aquel que ofrece mayor utilidad o satisfacción a un precio comparable. Así, uno podría comprar un producto genérico y no uno de marca, si se desempeña tan bien como el de marca a un menor precio. Un ejemplo de esta perspectiva en la práctica es evidente en una comparación de los mercados automotrices estadounidense y japonés. Un ejecutivo de mercadotecnia de Chrysler señaló: "Una de las razones principales de que las principales marcas japonesas (Toyota y Honda) no ofrezcan los enormes incentivos de los Tres Grandes (General Motors,

Ford y Chrysler) es que ellos tienen una mejor reputación por la durabilidad de largo plazo." En esencia, los incentivos y descuentos son pagos a los clientes para compensar la menor calidad."

La competencia con base en el valor se convirtió en una estrategia de negocios clave a principios de la década de 1990. Por ejemplo, Procter & Gamble instituyó un concepto que denomina precios de valor, mediante el cual ofrece productos a precios bajos "todos los días" en un intento por contrarrestar la práctica común entre los consumidores de comprar cualquier marca que esté en oferta. De esta manera, P&G esperaba lograr una lealtad del cliente hacia la marca y ventas más consistentes, que darían ventajas significativas a su sistema de manufactura. La competencia exige que las empresas busquen satisfacer las necesidades de los clientes a precios más bajos. El enfoque del valor para la calidad incorpora el objetivo de una empresa de equilibrar las características del producto (el lado de la calidad para el cliente) con eficiencias internas (el lado de las operaciones).

Perspectiva con base en la manufactura

Un quinto enfoque de la calidad se basa en la manufactura y define a la calidad como el resultado deseable de la práctica de ingeniería y manufactura o la *conformidad con las especificaciones.* Las **especificaciones** son objetivos y tolerancias que determinan los diseñadores de productos y servicios. Los objetivos son los valores ideales por los que se esforzará la producción; las tolerancias se especifican porque los diseñadores reconocen que es imposible alcanzar los objetivos en todo momento de la manufactura. Por ejemplo, la dimensión de una

parte se puede especificar como "0.236 ± 0.003 cm". Estas medidas significarían que el objetivo, o valor ideal, es 0.236 centímetros y que la variación permitida es 0.003 centímetros desde el objetivo (una tolerancia de 0.006 cm). Por tanto, cualquier dimensión en el intervalo de 0.233 a 0.239 centímetros se considera aceptable y se dice que cumple con las especificaciones. De manera similar, en los servicios, la "llegada a tiempo" de un avión se puede especificar como dentro de 15 minutos de la hora programada de llegada. El objetivo es la hora programada y la tolerancia se especifica como 15 minutos.

Por ejemplo, para Coca-Cola Company la calidad es "fabricar un producto en el que las personas puedan confiar cada vez que lo obtienen", según Donald R. Keough, antiguo presidente y director de operaciones. A través de rigurosas normas de calidad y empaque, la empresa busca asegurar que sus productos tengan el mismo sabor en cualquier parte del mundo donde un consumidor los compre. Incluso las organizaciones de servicio buscan una consistencia en el desempeño. La conformidad con las especificaciones es una definición clave de la calidad, porque ofrece un medio para medirla. Sin embargo, las especificaciones no tienen sentido si no reflejan los atributos que el consumidor estima importantes.

Integración de perspectivas sobre la calidad

Aunque la calidad del producto debe ser importante para todos los individuos en la cadena de valor, la forma de ver la calidad puede depender de la posición de uno en la cadena de valor; es decir, si uno es el diseñador, fabricante o proveedor de servicios, distribuidor o cliente. Para entender este concepto con más claridad desde una perspectiva de manufactura, analice la figura 3.4. El cliente es la fuerza impulsora para la producción de bienes y servicios y, por lo general, los clientes ven la calidad desde la perspectiva transcendente o con base en el producto. Los bienes y servicios producidos deben satisfacer las necesidades del cliente; de hecho, la existencia de las organizaciones de negocios depende de la satisfacción de las necesidades de sus clientes. Es el papel de la función de mercadotecnia determinar estas necesidades. Un producto que satisface las necesidades del cliente se puede describir como un producto de calidad. De ahí que la definición

de la calidad basada en el usuario sea de gran importancia para la gente que trabaja en mercadotecnia.

El fabricante debe traducir los requisitos del cliente en especificaciones detalladas del producto y el proceso. Hacer esta traducción es el papel de la investigación y el desarrollo, el diseño de producto y la ingeniería. Las especificaciones de producto podrían atender atributos como tamaño, forma, acabado, sabor, dimensiones, tolerancias, materiales, características operativas y aspectos de seguridad. Las especificaciones del proceso indican los tipos de equipo, herramientas e instalaciones que se utilizarán en la producción. Los diseñadores de producto deben equilibrar el desempeño y el costo para cumplir con los objetivos de mercadotecnia; por tanto, la definición de la calidad basada en el valor es la más útil en esta etapa.

Durante las operaciones de manufactura puede ocurrir mucha variación. Los parámetros de las máquinas se desajustan; los operadores y armadores cometen errores; o los materiales pueden estar defectuosos. Incluso en el proceso más controlado, las variaciones específicas en el resultado son inevitables e impredecibles. La función de manufactura debe garantizar que se cumplen las especificaciones de diseño durante la producción y que el desempeño del producto final es el esperado. Por tanto, para el personal de producción, la calidad se describe mediante la definición basada en la manufactura. La conformidad con las especificaciones del producto es su objetivo.

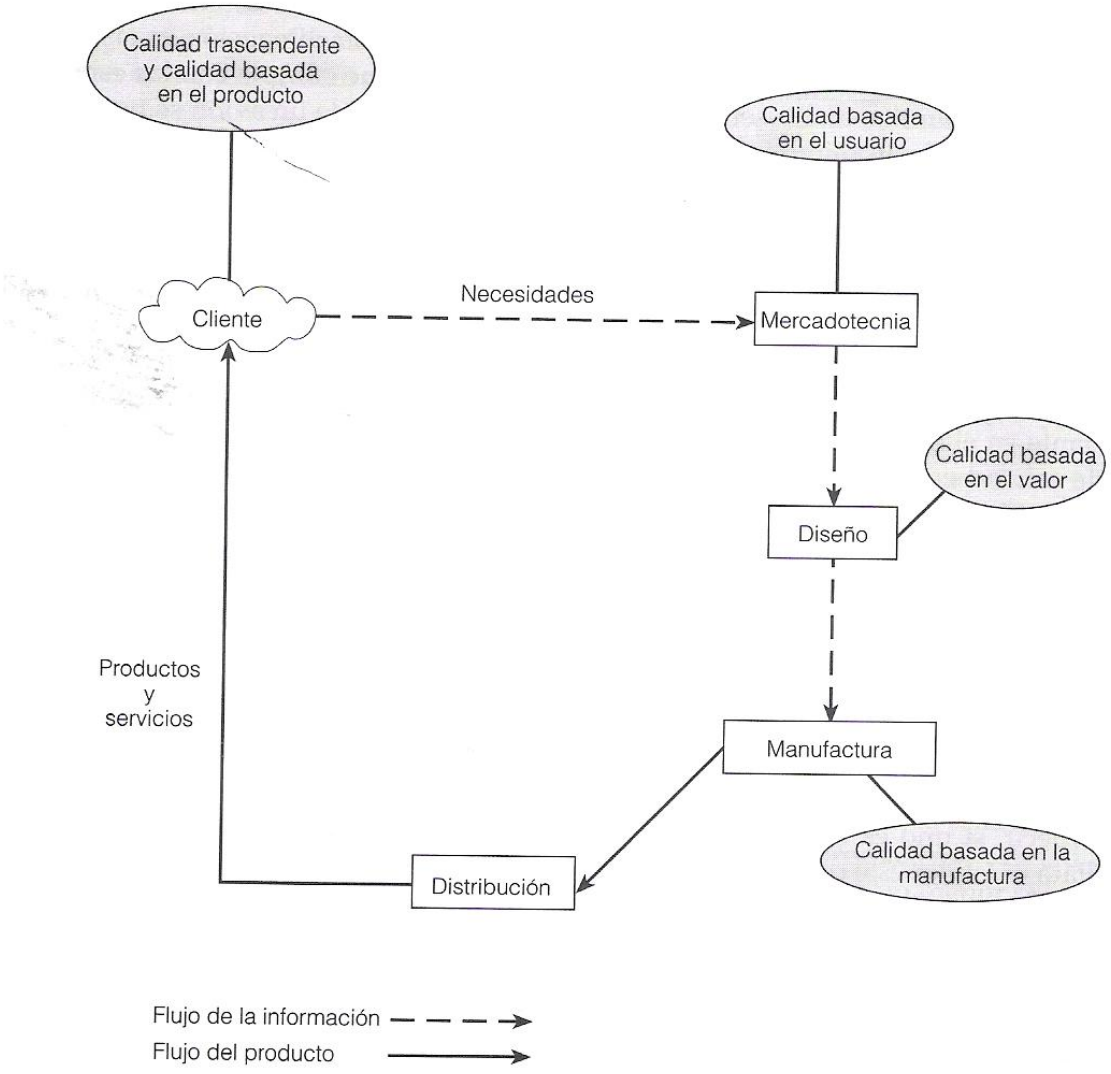


Figura 3.4 Perspectivas de la calidad en la cadena de valor

El ciclo de producción-distribución se completa cuando el producto ha sido llevado de la planta de manufactura, quizá a través de tiendas al mayoreo o al detalle, al cliente. Sin embargo, la distribución no es el fin de la relación del cliente con el fabricante. Es probable que el cliente requiera servicios diversos, como instalación, información para el usuario y capacitación especial. Estos servicios forman parte del producto y no se pueden ignorar en la administración de la calidad.

La atención en los hospitales ofrece una buena ilustración de cómo los distintos puntos de vista hacia la calidad afectan un solo producto dentro del contexto de servicio. La definición trascendente de la calidad se aplica a la necesidad del hospital de promover y mantener una imagen de excelencia al asegurar la competencia de su personal médico, la disponibilidad de tratamientos para trastornos raros o complicados o la existencia de tecnología médica avanzada. Los pacientes y otras organizaciones emiten juicios subjetivos acerca de esta clase de calidad. Aquellos que verifican la eficiencia del hospital y supervisan la consistencia de los tratamientos y el consumo de recursos definen la calidad de acuerdo con las dimensiones basadas en el producto. Esta perspectiva de la calidad predomina entre el gobierno y las agencias que acreditan la atención de la salud.

Las percepciones de los pacientes acerca de la calidad de la atención de la salud se enfocan en criterios basados en el producto y el usuario y sus expectativas son elevadas debido a las mejoras ampliamente pub licitadas en la atención médica, avances en los tratamientos con fármacos y las intervenciones quirúrgicas innovadoras. Estas expectativas incrementan la presión sobre los hospitales para que provean diversos servicios con el fin de satisfacerlas. Conforme aumenta la demanda de servicios sin fallas, el personal médico y los servicios de apoyo deben volver su atención a la definición de la calidad basada en la manufactura. Este punto de vista de las agencias de acreditación y la profesión médica exige sujetarse a diversas prácticas y determina los requisitos de autorización para la práctica.

Calidad impulsada por el diente

En 1978, el American National Standards Institute (ANSI) y la American Society for Quality (ASQ) estandarizaron las definiciones oficiales de la terminología relacionada con la calidad."

Estos grupos definieron la calidad como "la totalidad de los rasgos y características de un producto o servicio en que se sustenta su capacidad para satisfacer determinadas necesidades". Esta definición depende en gran medida de

los enfoques basados en el producto y el usuario y es impulsada por la necesidad de dar valor agregado a los clientes y, por tanto, influir en la satisfacción y la preferencia." A finales de la década de 1980, muchas empresas empezaron a utilizar una definición más sencilla, pero poderosa, de la calidad impulsada por el cliente, que en la actualidad sigue siendo popular:

La calidad es satisfacer o exceder las expectativas del cliente.

Para entender esta definición, uno debe comprender los significados de "cliente". La mayoría de las personas consideran al cliente como el comprador final de un producto o servicio; por ejemplo, la persona que compra un automóvil para uso personal o el huésped que se registra en un hotel es considerado un comprador final. A estos clientes se les conoce con mayor precisión como **consumidores**. Es evidente que cubrir las expectativas de los consumidores es el objetivo final de cualquier empresa. Sin embargo, antes de que un producto llegue a los consumidores, podría pasar por una cadena de diversas empresas o departamentos, cada uno de los cuales agrega cierto valor al producto. Por ejemplo, una planta de motores para automóviles podría comprar acero de una compañía acerera, producir los motores y luego transportarlos a una planta de ensamble. La compañía acerera es un proveedor de la planta de motores; esta última es un proveedor de la planta de ensamble. Por tanto, la planta de motores es cliente de la compañía acerera y la planta de ensamble es cliente de la de motores. Estos clientes se conocen como **clientes externos**.

Todo empleado de una compañía tiene también **clientes internos** que reciben bienes y servicios de proveedores dentro de la empresa. Por ejemplo, un departamento de ensamble es cliente interno del departamento de maquillado y los gerentes son clientes internos del grupo de secretarias. La mayor parte de los negocios constan de muchas" cadenas de clientes" de este tipo. Por tanto, el trabajo de un empleado no es simplemente complacer a su supervisor; es satisfacer las necesidades de clientes específicos internos y externos. El hecho de no satisfacer las necesidades y expectativas de los clientes internos puede dar como resultado una mala calidad de producto. Por ejemplo, un mal diseño para un sistema de reservaciones de hotel por computadora dificulta el trabajo de los

empleados de reservaciones y, por consiguiente, afecta la satisfacción de los consumidores. La identificación de quiénes son los clientes y la comprensión de sus expectativas son fundamentales para alcanzar la satisfacción del cliente. Este enfoque es una desviación radical de formas tradicionales de pensar en una organización orientada hacia las funciones. Permite que los trabajadores entiendan su lugar en el sistema más grande y su contribución al producto final. (¿Quiénes son los clientes de una universidad, sus profesores y alumnos?)

La calidad impulsada por el cliente es fundamental para las organizaciones de alto desempeño.Por ejemplo, Hilton Hotels Corp., puso en práctica su programa Ultima te Service en 2004, que capacita a los empleados para anticipar las necesidades de los huéspedes; personalizar el servicio; y si es necesario, tratar las quejas de manera rápida y transparente en un esfuerzo por asegurar niveles altos de satisfacción del cliente. Hilton usa también inspecciones rigurosas y encuestas de seguimiento de lealtad por satisfacción.” **James R. Evans/William M. Lindsay, Administración y Control de la Calidad, Cengage learning.**

“filosofias

En la década de 1890, Caesar Ritz definió las normas para un hotel de lujo; éstas evolucionaron hacia las responsabilidades de los empleados con la calidad ("Damas y caballeros que sirven a damas y caballeros") de The Ritz-Carlton Hotel Company, L.L.c., que incluyen anticiparse a los deseos y necesidades de los huéspedes, solucionar sus problemas y mostrar una conducta de preocupación genuina por los huéspedes y entre sí. La administración de Ritz-Carlton reconoció que la clave para garantizar el cumplimiento de estas responsabilidades era crear una "fuerza laboral calificada y facultada que trabaje con orgullo y alegría". Esta filosofía enfocada hacia la calidad llevó a la empresa a recibir el Premio Nacional a la Calidad Malcolm Baldrige (Malcolm Baldrige National Quality Award) en dos ocasiones.

El concepto de "orgullo y alegría" en el trabajo (y su impacto en la calidad) es una de las bases de la filosofía del ya fallecido W.Edwards Deming. Deming, junto con Joseph M. Juran y Philip B. Crosby, son considerados verdaderos" gurús de la administración" en la revolución de la calidad. Sus estudios sobre la medición, la

administración y la mejora de la calidad han tenido un impacto significativo en incontables administradores y corporaciones enteras en todo el mundo.
Este capítulo presenta las filosofías de administración de calidad de estos tres líderes, describe sus semejanzas y diferencias y examina sus contribuciones individuales a la práctica moderna. Además, estudia las contribuciones de otras personas clave que han ayudado a moldear el pensamiento actual en la administración de calidad. Estas filosofías se convirtieron en la piedra angular para la práctica de la administración de calidad y en marcos de referencia, como el Premio Deming, el Premio Nacional a la Calidad Malcolm Baldrige, las normas ISO9000 y la filosofía SixSigma.

LA FILOSOFÍA DE DEMING

Ningún individuo ha tenido más influencia en la administración de la calidad que el Dr.W. Edwards Deming (1900-1993).Deming recibió un doctorado en física y tuvo una formación importante en estadística, de modo que gran parte de su filosofía tiene sus raíces en estas ciencias. Trabajó para Western Electric en los inicios del control estadístico de la calidad en las décadas de 1920 y 1930.Deming reconoció la importancia de considerar los procesos administrativos desde un punto de vista estadístico. Durante la Segunda Guerra Mundial impartió cursos de control de calidad como parte del esfuerzo de defensa de Estados Unidos, pero se dio cuenta de que enseñar estadística sólo a los ingenieros y trabajadores de las fábricas nunca solucionaría los problemas fundamentales de la calidad que era necesario resolver en la manufactura. A pesar de numerosos esfuerzos, se ignoraron sus intentos por transmitir el mensaje de la calidad a los directivos de alto nivel en Estados Unidos.

Poco después de la Segunda Guerra Mundial, Deming fue invitado a Japón para ayudar al país a realizar un censo. Los japoneses habían escuchado sobre sus teorías y la utilidad de las mismas para las empresas estadounidenses durante la guerra. Como consecuencia, pronto empezó a enseñarles control estadístico de la calidad. Sin embargo, su filosofía trascendió la estadística. Deming hablaba sobre la importancia del liderazgo de la alta dirección, las asociaciones entre clientes y

proveedores y la mejora continua en los procesos de manufactura y desarrollo de productos. Los directivos japoneses adoptaron estas ideas, y el resto, como dicen, es historia. La influencia de Deming en la industria japonesa fue tan importante que la Union of Japanese Scientists and Engineers (UJSE,por sus siglas en inglés) estableció en 1951 el Deming Application Prize, para reconocer a las empresas que mostraban un alto nivel de logro en las prácticas de calidad. Deming recibió también del emperador el más alto honor en la Orden Real del Tesoro Sagrado. El expresidente de NEC Electronics dijo en una ocasión “No pasa un día sin que piense en lo que el doctor Deming significó para nosotros."

Aunque Deming vivía en Washington, D. c., era prácticamente desconocido en Estados hasta 1980, cuando la NBC transmitió un programa llamado "Si Japón puede …¿por qué nosotros no?" El documental destacó las contribuciones de Deming en Japón y su trabajo posterior con Nashua Corporation. Poco después, su nombre se mencionaba con frecuencia entre los ejecutivos corporativos estadounidenses. Empresas como Ford, CM y Procter & Gamble lo invitaron a trabajar con ellas para mejorar la calidad. Para su sorpresa, Deming no diseñó un "programa de mejora de la calidad" para ellas; su meta era cambiar las perspectivas en la administración, a menudo, en forma radical. Deming trabajó con pasión hasta su muerte en diciembre de 1993, a la edad de 93 años, sabiendo que tenía poco tiempo para lograr una diferencia en su país natal. Cuando se le preguntó cómo le gustaría ser recordado, Deming contestó: "Es probable que ni siquiera me recuerden." Luego, después de una larga pausa, agregó: "Bueno, quizás ... como a una persona que pasó su vida tratando de evitar que Estados Unidos se suicidara."

A diferencia de otros consultores y gurús de la administración, Deming nunca definió ni describió la calidad de manera precisa. En su último libro, afirmó: "Un producto o servicio tiene calidad si ayuda a alguien y goza de un mercado adecuado y sustentable."? Desde el punto de vista de Deming, la variación es la principal culpable de la mala calidad. En los ensambles mecánicos, por ejemplo, las variaciones respecto a las especificaciones en las dimensiones de las piezas dan lugar a un desempeño inconsistente y desgaste y fallas prematuros. De

manera similar, las inconsistencias en el comportamiento humano en los servicios frustran a los clientes y afectan la reputación de las empresas. Para lograr una reducción en la variación, Deming recurrió a un ciclo permanente que consta de diseño del producto o servicio, manufactura o prestación del servicio, pruebas y ventas, seguido de estudios de mercado y luego rediseño y mejora. Afirmó que una calidad más alta lleva a una mayor productividad que, a su vez, da lugar a una fuerza competitiva a largo plazo. En la teoría de "reacción en cadena" de Deming (figura 3.5) se resume este punto de vista. Esta teoría afirma que las mejoras en la calidad originan menores costos porque el resultado es menos reproceso, menos errores, menos demoras y mejor uso del tiempo y el material. A su vez, los costos más bajos dan lugar a mejoras en la productividad. Con una mejor calidad y precios más bajos, una empresa puede lograr mayor participación en el mercado y, de esta manera, subsistir, ofreciendo cada vez más empleos. Deming insistió en que los directores deben asumir la responsabilidad de la mejora de la calidad.

La filosofía de Deming experimentó muchos cambios que él mismo siguió aprendiendo. En sus primeros trabajos en Estados Unidos, enseñó sus "14 puntos" (tabla 3.3), los cuales se estudiarán más adelante en este mismo capítulo. Los 14 puntos provocaron cierta confusión y malos entendidos entre los empresarios, porque Deming no explicó con claridad sus razones.



Figura 3.5 La reacción en cadena de Deming

Sin embargo, casi al final de su vida, resumió las bases de los 14 puntos en lo que llamó “un sistema de conocimiento profundo”. Entender los elementos de este “sistema” ofrece las perspectivas críticas necesarias para diseñar prácticas administrativas eficaces y tomar decisiones en el complejo ambiente de negocios de hoy día.

Tabla 3.3 Los 14 puntos de Deming

1. Crear y dar a conocer a todos los empleados una declaración de *los objetivos y* propósitos de *la empresa* u *organización. La* administración debe demostrar en forma constante su compromiso con esta declaración.
2. Aprender la nueva filosofía, desde los altos ejecutivos hasta las bases de *la* empresa.
3. Entender el propósito de la inspección, para la mejora de los procesos y reducción de los costos.

4. Terminar con la práctica de otorgar contratos basándose únicamente en el precio.
5. Mejorar el sistema de producción y servicio en forma continua y permanente.
6. Instituir la capacitación.
7. Enseñar e instituir el liderazgo.
8. Eliminar el temor. Crear confianza. Crear el ambiente adecuado para la innovación.
9. Optimizar hacia los objetivos y propósitos de la empresa los esfuerzos de equipos, grupos y áreas de personal.
10. Eliminar las exhortaciones para la fuerza laboral.
11. (a) Eliminar las cuotas numéricas para *la* producción; en cambio, aprender e instituir métodos para mejorar.

    b) Eliminar *la* administración por objetivos. En vez de ella, aprender las capacidades de los procesos y cómo mejorarlos.

12. Eliminar las barreras que evitan que las personas se sientan orgullosas de su trabajo.
13. Fomentar la educación y la automejora personal.
14. Emprender acciones para lograr la transformación.

El sistema de Deming de conocimiento profundo consta de cuatro partes relacionadas:

1. Valoración del sistema.

2. Comprensión de la variación.

3. Teoría del conocimiento.

4. Psicología.

Aquí se expone cada una de estas partes.

Sistemas. Los componentes de cualquier sistema deben funcionar en conjunto si el sistema va a ser eficaz. Por lo general, las organizaciones tradicionales llevan a

cabo la administración de acuerdo con las funciones en los organigramas verticales. Sin embargo, cuando ocurren interacciones entre las partes de un sistema (por ejemplo, entre las funciones y departamentos de una organización), los administradores no pueden manejar bien el sistema si se limitan simplemente a atender cada una de las partes en forma aislada; deben entender los procesos que cruzan los límites de las funciones, alinear estos procesos hacia una visión o meta común y optimizar sus interacciones. La suboptimización (hacer lo mejor para los componentes individuales) da como resultado pérdidas para todos los que participan en el sistema. Según Deming, es mala administración, por ejemplo, comprar materiales o servicios al precio más bajo o minimizar el costo de la manufactura a costa del sistema. Por ejemplo, los materiales baratos pueden ser de tal calidad inferior que den lugar a costos excesivos en desperdicio y reparaciones durante la manufactura y el ensamble. Reducir el costo de la manufactura solamente podría dar como resultado productos que no cumplen con las especificaciones de los diseñadores ni satisfacen las necesidades del cliente. Estas situaciones producen un efecto de ganar-perder. En este caso, si el departamento de compras gana, el de manufactura pierde; si por otra parte el de manufactura gana, el cliente pierde; y así sucesivamente. Para manejar cualquier sistema, los administradores deben entender las relaciones entre los componentes del sistema y entre las personas que trabajan en él.

Deming insistió en que los sistemas deben enfocarse hacia un propósito. Los accionistas pueden cristalizar beneficios financieros, los empleados pueden recibir oportunidades de capacitación y educación que aumenten su satisfacción en el trabajo, los clientes pueden recibir productos y servicios que satisfagan sus necesidades y creen satisfacción, la comunidad se puede beneficiar del liderazgo del negocio y el ambiente puede beneficiarse de una administración responsable.

El pensamiento por sistemas se aplica también en el manejo de la gente. Enfrentar a individuos o departamentos en una lucha por los recursos es autodestructivo para una organización. El desempeño de individuos o departamentos tendrá como objetivo maximizar su propia ganancia esperada, no la de toda la empresa. Por tanto, optimizar el sistema requiere de una cooperación interna. De modo similar,

el uso de cuotas de ventas u objetivos arbitrarios de reducción de costos no va a motivar a la gente para que mejore el sistema ni la satisfacción del cliente; la gente sólo se va a esforzar por cumplir con las cuotas o metas y optimizar sus recompensas individuales. Las evaluaciones del desempeño tradicionales no consideran las interacciones dentro del sistema. Muchos factores afectan el desempeño individual de los empleados, entre otros:

• La capacitación recibida.

• La información y los recursos que se proporcionan.

• El liderazgo de supervisores y administradores.

• Las interrupciones en el trabajo.

• Las políticas y prácticas administrativas.

Pocas evaluaciones del desempeño reconocen estos factores y, por lo común, culpan a los individuos, los cuales tienen poca capacidad para controlar su ambiente.

Variación. La segunda parte del conocimiento profundo es la comprensión básica de la teoría estadística y la variación. Observamos variación en todas partes, desde la forma de golpear una pelota de golf hasta la comida y el servicio en un restaurante.

Un dispositivo llamado quincunx ilustra un proceso de variación natural. En la figura 3.6 muestra un quincunx simulado por computadora. En un quincunx, se dejan caer pequeñas esferas desde un orificio en la parte superior y golpean una serie de agujas mientras caen hacia cajas de recolección. Las agujas hacen que

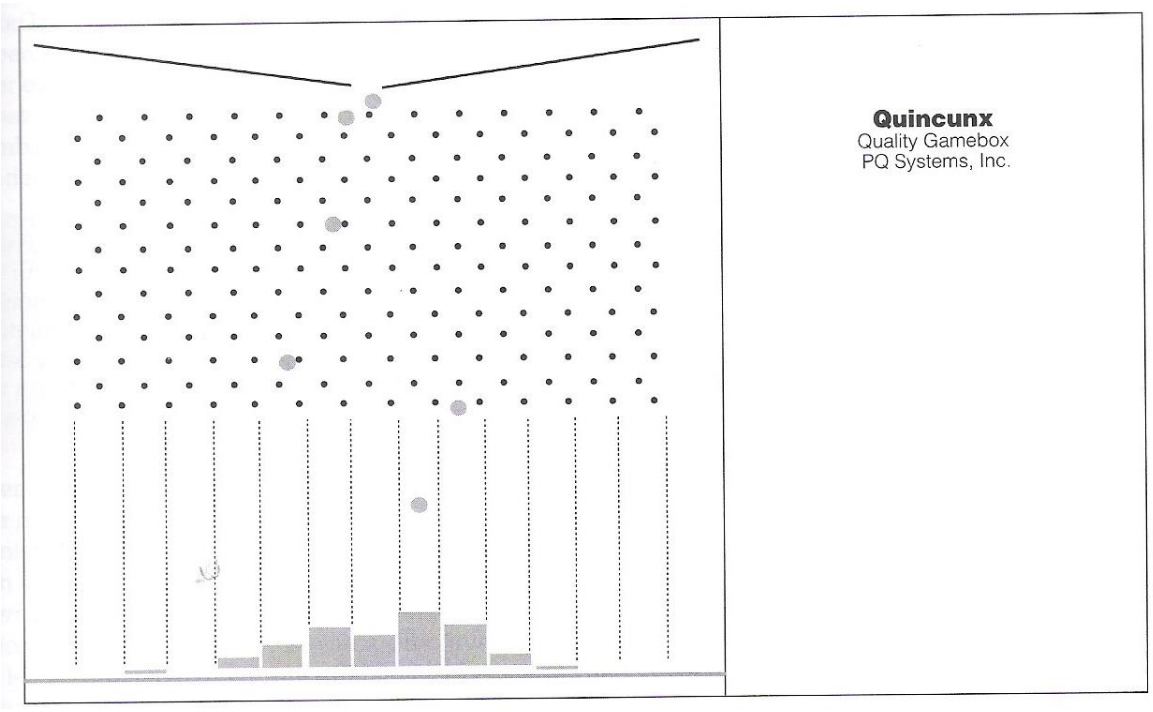


Figura 3.6 Un quincunx en acción

cada esfera se mueva en forma aleatoria hacia la izquierda o la derecha a medida que golpea cada aguja en su camino descendente. Obsérvese que la mayoría de las esferas se dirigen hacia la mitad de la caja. En la figura 3.7 se muestra la distribución de frecuencia del lugar al que llegaron las esferas en una simulación.

Observe la forma de campana de la distribución casi simétrica. Una distribución normal tiene forma de campana. Aun cuando todas las esferas se lanzan desde la misma posición, el resultado final muestra una variación.

El mismo tipo de variación existe en cualquier proceso de producción y servicio, debido casi siempre a factores inherentes en el diseño del sistema, que no se pueden controlar con facilidad. En la actualidad, la tecnología moderna ha mejorado nuestra capacidad para producir numerosas partes físicas con muy poca variación; sin embargo, aquella que se deriva del desempeño y el comportamiento del ser humano sigue afectando los esfuerzos dirigidos a mejorar la calidad. Deming sugirió que la administración primero entiende y luego trabaja reducir la variación a través de mejoras en tecnología, diseño de procesos y capacitación.

Con menos variación, tanto el productor corno el consumidor se benefician. El productor se beneficia al necesitar menos inspecciones, experimentar menos desperdicios y reprocesos y al tener un desempeño humano más consistente, lo cual da corno resultado mayor productividad y satisfacción del cliente. El consumidor tiene la ventaja de saber que todos los productos y servicios tienen características de calidad semejantes y que se van a desempeñar o a entregar en forma consistente. Esta ventaja puede ser crítica, sobre todo cuando el consumidor es otra empresa que utiliza grandes cantidades del producto en sus operaciones de manufactura o servicios.

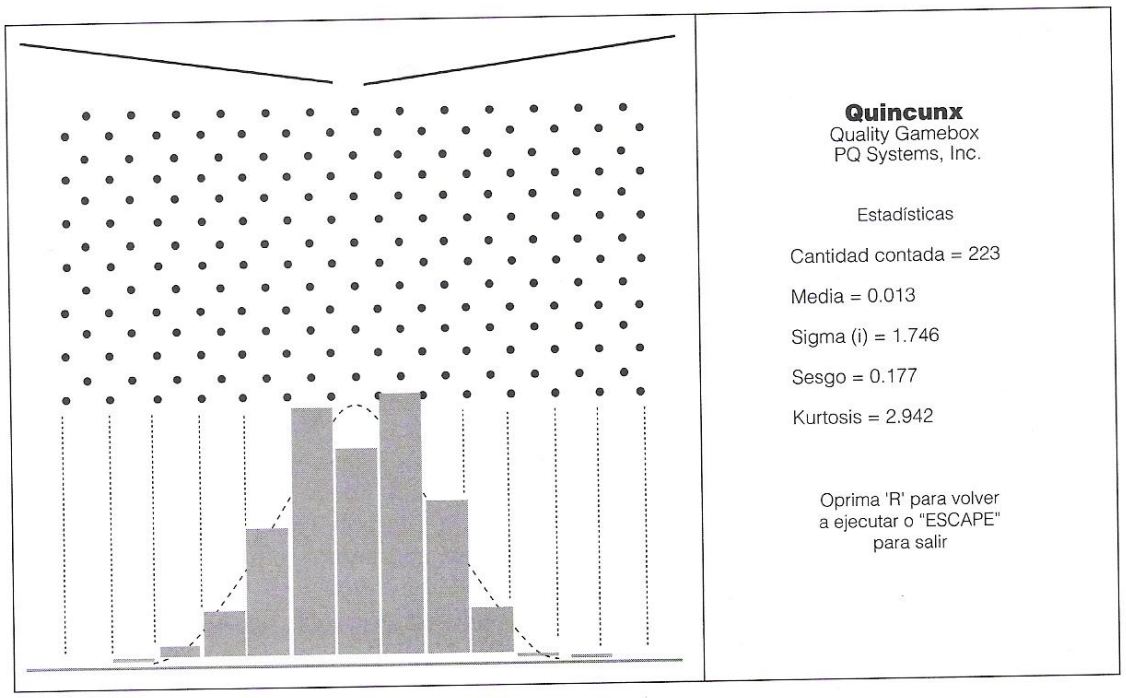


Figura 3.7 Resultados de un experimento con quincunx

Los métodos estadísticos son herramientas importantes que se utilizan para identificar y cuantificar la variación. Deming propuso que todos los empleados de una empresa deben estar familiarizados con las técnicas estadísticas y otras herramientas para solucionar problemas. Así, la estadística se puede convertir en un lenguaje común con el que todos los empleados (desde los directores hasta los obreros) se comuniquen entre sí. Su valor radica en su objetividad; la estadística deja poco lugar para la ambigüedad o los malos entendidos.

Teoría del conocimiento La tercera parte del conocimiento profundo es la epistemología o "teoría del conocimiento", la rama de la filosofía que se ocupa de la naturaleza y el alcance del conocimiento, sus supuestos y bases y la confiabilidad general de las afirmaciones sobre el conocimiento. El sistema de Deming mostraba una influencia importante de Clarence Irwing Lewis, autor de Mind and the World, quien decía: "No hay conocimiento sin interpretación. Si la interpretación, que representa una actividad de la mente, está sujeta siempre a la comprobación de experiencias futuras, ¿cómo es posible el conocimiento? .. En el mejor de los casos, sólo es probable un argumento del pasado al futuro, e incluso esta probabilidad se debe basar en principios que son por sí mismos más que probables." Básicamente, los administradores entender cómo funcionan las cosas y por qué deben ser eficaces las decisiones que afectan el futuro. Cualquier plan racional, por muy sencillo que sea, requiere predicción en relación con las condiciones, el comportamiento y la comparación del desempeño, y estas predicciones se deben basar en la teoría.

Por ejemplo, es fácil aprender un enfoque de "recetario de cocina" para la estadística, si se es capaz de ejecutar un programa de computadora o un procedimiento en Microsoft Excel. Sin embargo, al hacerlo se corre el riesgo de utilizar las herramientas en forma inadecuada. Entender las hipótesis y la teoría detrás de las técnicas y herramientas estadísticas es vital para aplicarlas en forma correcta. Numerosos administradores manejan un enfoque de "recetario de cocina" similar para la administración leyendo el libro de autoayuda más reciente y siguiendo ciegamente las recomendaciones del autor. Muchas empresas adoptan el enfoque popular más reciente que sugieren los consultores de negocios, sólo para ver que éste fracasa. Copiar un ejemplo de éxito, sin entenderlo, puede llevar a un desastre.

Deming insistió en que el conocimiento no es posible sin la teoría, y que la experiencia por sí sola no establece una teoría. Ésta es una de las razones por las que Deming nunca dio a los administradores "soluciones" o instrucciones para lograr la calidad. Quería que ellos aprendieran y descubrieran lo que funciona y lo que es apropiado para sus empresas. El concepto moderno de aprendizaje

organizacional refleja la teoría del conocimiento. Por ejemplo, muchos gerentes de proyecto llevan a cabo informes o revisiones al terminar los proyectos. Éstas les permiten entender qué salió mal y qué salió bien, ayudándoles a adquirir una base de conocimientos y a proporcionar información para mejorar en el futuro. Los datos objetivos y un proceso sistemático de resolución de problemas proporcionan las bases para la toma de decisiones.

Psicología La psicología nos ayuda a entender a las personas, las interacciones entre personas y circunstancias, las interacciones entre líderes y empleados, y cualquier sistema administrativo. Es determinante diseñar un ambiente laboral que promueva la satisfacción y el bienestar de los empleados. Gran parte de la filosofía de Deming se basa en la comprensión del comportamiento humano y el trato justo para las personas. Cada persona es diferente. Un verdadero líder debe ser consciente de estas diferencias y trabajar hacia la optimización de las competencias y preferencias de todos. La mayoría de los administradores trabajan bajo el esto de que las personas son semejantes. Sin embargo, un verdadero líder entiende que la gente aprende de diferentes maneras y a distintas velocidades, y maneja el sistema de manera acorde.

Las personas nacen con una necesidad de amor y cariño en sus relaciones con otras personas. Algunas circunstancias dan a las personas dignidad y autoestima. Por el contrario, las circunstancias que niegan a las personas estas ventajas sofocan la motivación intrínseca. El temor no motiva a las personas; en vez de ello, evita que el sistema alcance todo su potencial. Si las personas no disfrutan de su trabajo, no serán productivas ni se enfocarán en los principios de calidad. La psicología nos ayuda a nutrir y conservar estos atributos positivos innatos de las personas; de lo contrario, se tendrá que recurrir a recompensas y castigos que no ofrecen valores a largo plazo.

Una de las creencias más controvertidas de Deming es que la remuneración no es un motivador, afirmación que los psicólogos industriales han hecho durante décadas. El presidente de General Motors dijo alguna vez que si GM duplicara el salario de cada empleado, nada cambiaría. Los estímulos monetarios constituyen

una salida para los administradores que no entienden cómo manejar la motivación intrínseca.

Cuando la alegría en el trabajo se vuelve secundaria a obtener una buena evaluación, los empleados se rigen por fuerzas externas y deben actuar para proteger lo que tienen y evitar el castigo.

Impactos del conocimiento profundo El destacado consultor Peter Scholtes hace algunos comentarios importantes acerca del hecho de no entender los componentes del conocimiento profundo.

Cuando las personas no entienden los sistemas:

• Ven a los eventos como incidentes, en lugar de verlos como el resultado neto de numerosas interacciones y fuerzas interdependientes.

• Ven los síntomas pero no las causas profundas de los problemas.

• No entienden cómo una intervención en una parte de (una organización) puede causar estragos en otro lugar o en otro momento.

• Culpan a los individuos por los problemas incluso cuando esos individuos tienen poca o ninguna capacidad de controlar los eventos que les rodean.

• No entienden el antiguo proverbio africano que dice: "Se necesita toda una aldea para criar a un niño."

Cuando la gente no entiende la variación:

• No ve las tendencias que se presentan.

• Ve tendencias donde no las hay.

• No sabe en qué momento las expectativas son reales.

• No entiende el desempeño pasado, así que no puede predecir el desempeño futuro.

• No conoce la diferencia entre predicción, pronóstico y adivinación.

• Culpa o da crédito a los demás cuando, para esas personas, lo que sucedió sólo fue cuestión de suerte; situación que casi siempre se presenta porque la gente suele atribuir todo al esfuerzo humano, al heroísmo, a la debilidad, al error o al sabotaje intencional, sin importar la causa sistémica.

• Es menos probable que distinga entre los hechos y las opiniones.

Cuando la gente no entiende la psicología:

• No comprende la motivación ni la razón por la que las personas hacen lo que hacen.

• Recurre a recompensas y castigos y otras formas de motivación inducida que no ofrecen un efecto positivo y afectan e impiden la relación entre el motivador y el motivado.

• No entiende el proceso de cambio y la resistencia ante éste.

• Recurre a enfoques de coerción y paternalistas al tratar con las personas.

• Crea cinismo, desmoralización, falta de motivación, culpabilidad, resentimiento, desgaste, falta de cordura y rotación de personal.

Cuando la gente no entiende la teoría del conocimiento:

• No sabe cómo planear y lograr el aprendizaje y la mejora.

• No comprende la diferencia entre mejora y cambio.

• Los problemas quedan sin resolver, a pesar de sus mejores esfuerzos.

Una mínima parte del sistema de Deming del conocimiento profundo es original. Walter Shewhart distinguió la diferencia entre las causas comunes y especiales de la variación en la década de 1920; las escuelas de administración empezaron a enseñar muchas de las teorías conductuales en las que se basa el trabajo de Deming en la década de 1960; los científicos de la administración refinaron la teoría de sistemas desde la década de 1950 hasta la década de 1970;y los científicos de todos los campos entienden desde hace mucho las relaciones entre

la predicción, la observación y la teoría. La principal contribución de Deming fue reunir todos estos conceptos dentro del contexto de los negocios. Reconoció su sinergia y los desarrolló en una teoría universal unificada de la administración.

14 puntos de Deming

Los 14 puntos enumerados en la tabla 3.3 datan de hace varias décadas, cuando muchas organizaciones estaban dirigidas por administradores autocráticos motivados por las utilidades a corto plazo, y a quienes les interesaba muy poco la participación de la fuerza laboral o el interés en la mejora de la calidad. Deming fue enfático en su creencia de que estas prácticas administrativas necesitaban un cambio radical y propuso los 14 puntos para lograr la excelencia en la calidad. Aunque en la actualidad las prácticas administrativas son muy diferentes de las que había cuando Deming empezó a difundir su filosofía, los 14 puntos todavía comunican perspectivas importantes para los administradores. Consideraremos en forma breve las lecciones clave de cada uno.

1: Crear una visión y demostrar compromiso Una organización debe definir sus valores, su misión y visión del futuro para ofrecer a sus administradores y empleados una dirección a largo plazo. Deming creía que los negocios no deberían existir sólo para obtener utilidades; son entidades sociales cuyo fin básico es servir a sus clientes y empleados. Para cumplir este propósito deben adoptar una perspectiva a largo plazo, invertir en innovación, capacitación e investigación, y aceptar la responsabilidad de ofrecer empleos y mejorar la posición competitiva de la empresa. Esta responsabilidad radica en la alta dirección, la cual debe demostrar compromiso,

Comprometerse a lograr una mejora en su organización, quizá a través del enfoque basado en Baldrige o Six Sigma, todavía es difícil para los directivos. Aun cuando éstos realizan una evaluación completa de su organización y saben que necesitan para cambiar, muchos no aprovechan las oportunidades. Las razones van desde la negación ("¡No somos tan malos!") hasta las excusas ("En este momento, estamos muy ocupados."). El liderazgo efectivo empieza con el compromiso.

Punto 2: Aprender la nueva filosofía Los métodos administrativos tradicionales basados en los principios de Frederick Taylor que datan de los primeros años del siglo xx, como la producción basada en las cuotas, la medición del trabajo y las relaciones laborales antagónicas, no funcionan en el ambiente de negocios global actual. Deming reconoció este problema desde hace mucho y buscó cambiar las actitudes predominantes que ignoraban la importancia de mejorar la calidad. De manera específica, las empresas no sobreviven si a causa de productos de baja calidad o inadecuados al uso los clientes están insatisfechos. En vez de ello, las empresas deben adoptar un enfoque hacia el cliente, basado en la cooperación mutua entre la mano de obra y la administración y en un ciclo de mejora sin fin. Con la finalidad de enfocarse de manera eficaz en las necesidades del cliente, todos, desde los directores hasta los almacenistas, deben aprender los principios de calidad y excelencia en el desempeño.

En la actualidad, muchos de estos principios se enseñan a los administradores y empleados de primera línea a través de la capacitación y el reforzamiento de los valores de la organización. Sin embargo, las personas cambian de trabajo y las organizaciones casi siempre tienen mala memoria; todos requieren renovarse en forma continua para aprender nuevos enfoques y repasar los ya conocidos.

Punto 3: Entender la inspección Deming sabía que la inspección era el principal medio de control de la calidad; las empresas empleaban a docenas e incluso cientos de personas de tiempo completo que inspeccionaban la calidad. La inspección de rutina reconoce que están presentes algunos defectos, pero no agrega valor al producto. En vez de ello, rara vez es exacta, y fomenta la manufactura de productos defectuosos al dejar que alguien más detecte y corrija el problema. El reproceso y la eliminación del material defectuoso reducen la productividad y aumenta los costos. En los sectores de servicios, el trabajo repetido no es posible; las fallas externas son las que más dañan al negocio.

Deming motivó a los empleados a responsabilizarse de su trabajo, en lugar de dejar los problemas a otra persona en la línea de producción. Las herramientas estadísticas simples se pueden usar para controlar los procesos y eliminar la inspección masiva como la actividad principal en el control de la calidad. La

inspección se debe utilizar como una herramienta de recopilación de información que lleve a una mejora, no como medio de "asegurar" la calidad o culpar a los empleados.

En la actualidad, esta nueva función de la inspección se ha integrado en las prácticas de administración de calidad de casi todas las empresas. Sin embargo, pocos administradores entienden realmente el concepto de la variación y cómo afecta sus procesos y prácticas de inspección. Al entender y buscar reducir la variación, los administradores pueden eliminar muchas fuentes de inspección innecesaria, reduciendo así costos que no tienen valor agregado relacionados con las operaciones.

Punto 4: Dejar de tomar decisiones con base únicamente en los costos
Desde hace mucho, los departamentos de compras se rigen por la reducción de costos y la competencia entre proveedores sin tomar en cuenta la calidad. En 1931, Walter Shewhart señaló que el precio no tiene ningún significado si no hay calidad." No obstante, por tradición, el desempeño del gerente de compras se evalúa de acuerdo con los costos. Deming reconoció que los costos directos relacionados con materiales de mala calidad que surgen durante la producción o los periodos de garantía, así como la pérdida de la buena voluntad de los clientes, pueden exceder con mucho el "ahorro" en costos que se percibe en el momento de la compra. Por tanto, el departamento de compras debe entender su función como proveedor en la producción. Esta relación hace que los individuos vuelvan a considerar el significado de una "frontera organizacional". No son simplemente los cuatro muros que rodean la planta de producción. El proveedor y el fabricante deben considerarse como una "macroorganización".

Deming también aconsejó a las empresas que establecieran relaciones a largo plazo con menos proveedores, dando lugar a la lealtad y a las oportunidades de mejora mutua. Anteriormente, la administración justificaba la existencia de diversos proveedores por razones como la protección en caso de huelgas o desastres naturales, al tiempo que ignoraban los costos "ocultos", como más viajes para visitar a los proveedores, pérdida de descuentos por volumen, incremento en los gastos por pedido, que dan como resultado costos unitarios más

altos, e incremento en los gastos administrativos y de inventarios. Lo más importante es que el cambio constante de proveedores con base sólo en el precio aumenta la variación en el material de producción, porque cada proveedor maneja un proceso diferente. En contraste, una base de proveedores menor reduce la variación en el proceso y, por tanto, disminuye el desperdicio, el reproceso y la necesidad de un ajuste para adaptarse a la variación. Una relación a largo plazo fortalece los lazos entre proveedores y clientes, permite al proveedor producir en mayor cantidad, mejora la comunicación con el cliente y, por consiguiente, aumenta las oportunidades de mejorar los procesos. Los proveedores saben que sólo se aceptan bienes de calidad, si quieren mantener una relación a largo plazo.

El énfasis actual en la administración de la cadena de suministros (SCM,por sus siglas en inglés) refleja el logro del punto 4. La SCM se enfoca en gran medida en la perspectiva de sistema de la cadena de suministro, con el objetivo de minimizar los costos totales y establecer asociaciones más fuertes con los proveedores.

Punto 5: Mejorar en forma continua y permanente Las mejoras son necesarias tanto en el diseño como en las operaciones. Un mejor diseño de bienes y servicios se deriva de la comprensión de las necesidades de los clientes y de análisis de mercado continuos y otras fuentes de retroalimentación, así como del entendimiento de los procesos de manufactura y prestación de servicios. Las mejoras en las operaciones se logran reduciendo las causas y los impactos de la variación, y comprometiendo a los empleados a participar en la innovación y en la búsqueda de formas de realizar su trabajo con mayor eficiencia y eficacia. Al mejorar la calidad aumenta la productividad y se reducen los costos, como sugiere la reacción en cadena de Deming (figura 3.5).

Tradicionalmente, la mejora continua no era una práctica común en los negocios; en la actualidad, se reconoce como un medio necesario para la supervivencia en un ambiente de negocios global y muy competitivo. Las herramientas para la mejora están en constante evolución, y las organizaciones necesitan tener la seguridad de que sus empleados las entienden y aplican de manera efectiva, para lo cual requieren capacitación, que es el enfoque del siguiente punto.

6: Instituir la capacitación Las personas son el recurso más valioso de una organización; quieren hacer un buen trabajo, pero con frecuencia no saben cómo. La administración debe asumir la responsabilidad de ayudarles. La capacitación no sólo origina mejoras en la calidad y la productividad, sino que también eleva la moral de los trabajadores y les demuestra que empresa está dedicada a ayudarles y a invertir en su futuro. Además, la capacitación reduce las barreras entre trabajadores y supervisores, dándoles a ambos un incentivo para mejorar cada vez más. Por ejemplo, en Honda of America en Marysville, Ohio, todos los empleados empiezan trabajando en el piso de producción, sin importar el nivel de su puesto.

La capacitación debe ir más allá de las habilidades laborales básicas, como manejar una máquina o seguir el guion al hablar con los clientes; debe incluir herramientas para diagnosticar, analizar y solucionar problemas de calidad e identificar las oportunidades de mejorar. En la actualidad, muchas empresas tienen excelentes programas de capacitación para la tecnología relacionada con la producción directa, pero todavía no mejoran las habilidades auxiliares de su fuerza laboral. Aquí es donde radican algunas de las oportunidades más lucrativas de tener un impacto en los resultados clave del negocio.

Punto 7: Instituir el liderazgo Deming reconoció que uno de los principales impedimentos para la mejora era la ausencia de liderazgo. El trabajo de la administración es el liderazgo, no a supervisión consiste simplemente en vigilar y dirigir el trabajo; el liderazgo significa ofrecer una guía para ayudar a los empleados a realizar mejor su trabajo con menos esfuerzo. En muchas empresas, los supervisores saben poco acerca del trabajo en sí, porque este puesto se utiliza como un nivel de entrada para los universitarios recién egresados. Los supervisores nunca han trabajado en el departamento y no pueden capacitar a los trabajadores, de modo que su principal responsabilidad es sacar el producto. La supervisión debe ofrecer un vínculo entre la administración y la fuerza de trabajo. Los buenos supervisores no son los policías o burócratas, sino más bien entrenadores que ayudan a los empleados a realizar un mejor trabajo y desarrollar

sus habilidades. El liderazgo puede ayudar a eliminar del trabajo el elemento de temor y a motivar el trabajo en equipo.

El liderazgo fue, es y seguirá siendo una cuestión problemática en todas las organizaciones, sobre todo conforme las nuevas generaciones de administradores reemplacen a aquellos que han aprendido a ser líderes. Por tanto, este punto de Deming siempre será pertinente para las organizaciones.

Punto 8: Eiminar el temor Eliminar el temor constituye la base de muchos de los 14 puntos de Deming. *El* temor se manifiesta de muchas maneras: temor a represalias, al fracaso, a lo desconocido**,** a perder el control y al cambio. Ningún sistema funciona sin el respeto mutuo entre administradores y trabajadores. A menudo, los empleados tienen miedo de informar sobre problemas en la calidad porque quizá no cubrirían sus cuotas, se podría reducir su pago de incentivo o se les podría culpar por los problemas en el sistema. Una de las historias clásicas de Deming habla de un supervisor que no quería interrumpir la producción para reparar una pieza de maquinaria desgastada. Detener la producción significaba no cumplir con su cuota diaria. No dijo nada y la máquina falló, por lo que la línea tuvo que detenerse durante cuatro días. Algunos jefes también sienten temor de cooperar con otros departamentos, porque los otros jefes podrían recibir calificaciones más altas en su desempeño y aun bonos, o porque temen perder sus puestos o sufrir reorganizaciones. El temor fomenta el pensamiento a corto plazo.

A los administradores les da miedo perder poder. Bushe presenta un ejemplo." Después de poner en práctica un programa de control estadístico de la calidad en una planta automotriz, en ocasiones, grupos de trabajadores pudieron ofrecer mejores recomendaciones acerca de las mejoras al sistema que el cuerpo de ingenieros a nivel corporativo, cuyo proceder iba en contra de la cultura bien establecida de la planta. Los gerentes medios ya no eran los "expertos". Su temor redujo su apoyo al programa, que con el tiempo se eliminó.

El temor es un problema cultural para todas las organizaciones. Crear una cultura libre de temores es un proceso lento, pero se puede destruir en un instante con

una transición de liderazgo y un cambio en las políticas a nivel corporativo. Por tanto, los directivos actuales necesitan seguir siendo sensibles al impacto que el temor puede tener en sus organizaciones.

Punto 9: Optimizar los esfuerzos de los equipos El trabajo en equipo ayuda a eliminar las barreras entre los departamentos y las personas. Los obstáculos entre las áreas funcionales se presentan cuando los administradores temen perder el poder. La competencia interna por los aumentos y las evaluaciones del desempeño contribuyen a la creación de obstáculos. La falta de cooperación da lugar a una mala calidad porque otros departamentos no entienden lo que quieren los clientes internos y no obtienen lo que necesitan de sus proveedores internos.

Quizá la principal barrera para los esfuerzos de un trabajo en equipo en Estados Unidos surge de cuestiones que enfrentan a sindicatos y patrones. Salvo honrosas excepciones, la historia de las relaciones entre trabajo y administración en las empresas estadounidenses ha sido en gran medida contradictoria. La falta de sensibilidad a las necesidades de los trabajadores, la explotación de éstos y las prácticas y políticas administrativas deficientes con frecuencia dan como resultado relaciones tensas entre los directivos y sus subordinados. Los directivos de las áreas operativas tienen también parte de la culpa; se han resistido a muchos esfuerzos administrativos por reducir las rígidas tareas basadas en reglas y prefieren apegarse a los enfoques estructurados fundamentados en los principios históricos de la administración científica de Frederick W. Taylor.

A pesar de los esfuerzos ocasionales por promover la cooperación entre trabajadores y directivos y los intentos por encontrar un terreno común para el involucramiento de los empleados y las iniciativas de participación, los directivos se muestran escépticos ante la posibilidad de que los sindicatos y sus miembros contribuyan con su mejor esfuerzo. Los sindicatos todavía parecen tener la creencia de que la administración trata de disminuir su poder y que busca eliminar a los sindicatos a través de iniciativas directas de trabajo que resultan atractivas para los trabajadores. Las recesiones en la economía, que presionan a la administración a reducir los costos mediante recortes de personal y a buscar "concesiones" por parte de los sindicatos, reducen también los beneficios de la

cooperación y los niveles de confianza entre trabajo y dirección logrados en periodos más prósperos.

Un ejemplo reciente involucró cuatro sindicatos en un hospital de Canadá. Se introdujo una iniciativa de mejora de la calidad en dos etapas que comprendían un esfuerzo de calidad total y una reingeniería. Las respuestas de los líderes sindicales ante la mejora de la calidad estaban relacionadas directamente con cuánto percibían ellos la mejora de calidad como una amenaza a sus intereses encubiertos en la sobrevivencia del sindicato y en la protección del bienestar de los miembros. Los investigadores encontraron que el desarrollo de relaciones compartidas más positivas entre el equipo de ejecución de la mejora de calidad y el sindicato era afectado por el grado al que los sindicatos y la administración incorporan los intereses concedidos mutuos y por el equilibrio de poder entre las partes. Este ejemplo muestra que la capacitación y la participación de los empleados son medios importantes para eliminar esas barreras.

Punto 10*: *Eliminar las exhortaciones Muchos primeros intentos por mejorar la calidad se enfocaban sólo en el cambio conductual. Sin embargo, los carteles, lemas y programas de motivación que piden cero defectos, hacerlo bien desde la primera vez, mejorar la productividad y la calidad, etc., están dirigidos a las personas equivocadas; suponen que todos los problemas con la calidad son el resultado de la conducta humana y que los trabajadores pueden mejorar simplemente a través de los métodos motivacionales. Los trabajadores se sienten frustrados cuando no pueden mejorar o se les penaliza por los defectos.

Los enfoques motivacionales ignoran la fuente principal de muchos problemas: el sistema. Las causas de la variación derivadas del diseño del sistema son problema de la dirección y no de los trabajadores. En todo caso, los intentos de solucionar los problemas por parte de los empleados sólo aumentan la variación. Las mejoras se presentan al entender la naturaleza de las causas comunes y especiales. Por tanto, el pensamiento estadístico y la capacitación, y no los lemas, son las mejores formas de mejorar la calidad. La motivación se logra mejor a partir de la confianza y el liderazgo que con lemas y objetivos.

Punto 11: Eliminar las cuotas numéricas y la administración por objetivos (MBO, por sus siglas en inglés) En muchas organizaciones se administra por números. La medición ha sido utilizada, y con frecuencia todavía se usa, de manera punitiva. Las normas y cuotas se derivan de las perspectivas a corto plazo y crean temor. No fomentan la mejora, en particular si las recompensas o evaluaciones por desempeño se relacionan con el cumplimiento de las cuotas. Es posible que los trabajadores sacrifiquen la calidad a fin de lograr un objetivo. Una vez que cumplen con una norma, los trabajadores tienen pocos incentivos para seguir la producción o mejorar la calidad; no hacen más de lo que se les pide.

Las metas arbitrarias por parte de la dirección, como incrementar las ventas en 5 por ciento el próximo año o reducir 10 por ciento los costos para el próximo trimestre, no tienen ningún significado sin un método para lograrlo. Deming reconoció que las metas son útiles, pero las metas numéricas que otros establecen sin incluir un método que ayude a alcanzarlas generan frustración y resentimiento. Además, la variación en el sistema año con año o trimestre a trimestre (por ejemplo, un incremento de 5 por ciento o una reducción de 6 por ciento) hace que las comparaciones no tengan sentido. La administración debe entender el sistema y tratar de mejorarlo en forma continua, en lugar de enfocarse en las metas a corto plazo.

Punto 12: Eliminar las barreras que impiden sentir orgullo por el trabajo realizado La gente en la planta e incluso en la administración a menudo recibe un trato como si fuera "una mercancía", según las palabras de Deming. A los obreros de las fábricas se les asignan tareas monótonas, se les proporcionan máquinas, herramientas o materiales de segunda, se les indica pasar por alto artículos defectuosos a fin de acallar las presiones de ventas e informar a supervisores que no saben nada sobre el trabajo. Se espera que los empleados de confianza trabajen por la noche y los fines de semana para que compensen las medidas de reducción de costos que han dado como resultado el despido de sus colegas. A muchos se les da el nivel de "empleado de confianza" sólo para no pagarles el tiempo extra. Ni siquiera los empleados que son profesionales de la calidad son inmunes a estas situaciones. Un técnico de inspección declaró "Esta profesión

siempre parece ser la culpable de los problemas." Un ingeniero de calidad afirmó: "Ahora, los gerentes de un nivel superior al mío me dan pocas indicaciones se resisten al cambio y hacen muy poco para que su gente avance." Un supervisor de calidad dijo “Alguien menos calificado podría realizar mi trabajo ... por menos dinero." ¿Cómo se pueden enorgullecer estas personas de su trabajo? Muchos ni siquiera pueden estar seguros de que el año próximo tendrán un empleo.

Deming creía que una de las barreras principales para enorgullecerse del trabajo es la evaluación del desempeño. Ésta destruye el trabajo en equipo al promover la competencia por recursos limitados, fomenta la mediocridad porque casi siempre los objetivos se basan en números en lo que el jefe quiere en lugar de la calidad, se enfoca en el corto plazo y desalienta la toma de riesgos, y confunde los "recursos humanos" con otros recursos. Si todas las personas trabajan dentro de un sistema, no deben individualizarse para que se les clasifique. Algunas personas tienen que estar por" debajo del promedio", lo cual sólo da como resultado frustración si éstos trabajan dentro del sistema. Deming clasificó el desempeño en tres categorías: la mayoría de los desempeños que se encuentran dentro del sistema, los desempeños fuera del sistema en el lado superior y los que están fuera del sistema del lado inferior. Los métodos estadísticos proporcionan la base para estas clasificaciones. Los individuos que tienen un desempeño superior deben recibir una compensación especial; quienes muestran un desempeño inferior necesitan capacitación adicional o ser reemplazados.

Aunque muchas empresas no eliminarán por completo las evaluaciones del desempeño, algunas han realizado cambios importantes. En la actualidad, muchas separan la evaluación del desempeño de las revisiones de salario anuales, utilizando la primera para reconocer el logro de los resultados y el uso de los procesos de calidad.

Punto 13: Fomentar la educación y la automejora La diferencia entre este punto y e1 6 es sutil. El punto 6 se refiere a la capacitación en habilidades de trabajo específicas; el punto 13 se refiere a la educación general amplia y continua para el desarrollo personal. Las organizaciones deben invertir en sus empleados en todos los niveles para garantizar el éxito a largo plazo. Una misión fundamental

de los negocios es proporcionar empleos como se indica en el punto 1, pero los negocios y la sociedad también tienen la responsabilidad de mejorar la valía de la persona. El desarrollo del valor de la persona es un poderoso método de motivación.

En la actualidad, muchas empresas entienden que elevar la base de conocimientos generales de su personal (fuera de las habilidades específicas para el trabajo) devuelve muchos beneficios. Sin embargo, otros aún ven esta tarea como un costo que se puede eliminar con facilidad cuando es preciso realizar concesiones financieras.

Punto 14: Emprender una acción Cualquier cambio cultural empieza con la dirección e incluye a todos. Cambiar una cultura organizacional, casi siempre significa enfrentar un escepticismo y una resistencia que muchas empresas encuentran difícil de manejar, sobre todo cuando muchas de las prácticas administrativas tradicionales que Deming consideraba debían eliminarse, están muy arraigadas en la cultura de la organización.

Muchas personas han criticado a Deming debido a que su filosofía es sólo eso: una filosofía. Carece de dirección específica y enfoques prescriptivos, y no se adapta a la cultura de negocios estadounidense tradicional. Como se dijo antes, Deming no propuso métodos específicos para ponerla en práctica, porque quería que las personas estudiaran sus ideas y sacaran de ahí sus propias estrategias. Como decía a menudo: "No hay pudín instantáneo." A pesar de la controversia, muchas empresas organizaron sus enfoques de calidad con base en la filosofía de Deming. Algunas empresas, como Zytec Corporation, ganadora del premio Baldrige en 1991 y que ahora forma parte de Artesyn Technologies, tuvieron mucho éxito. Otro ejemplo es Hillerich & Bradsby.

Hillerich & Bradsby Co. (H&B) ha fabricado durante más de 115 años los bates de beisbol marca Louisville Slugger." A mediados de la década de 1980, la empresa enfrentó dificultades importantes debido a cambios en el mercado y la competencia. El director ejecutivo, JackHillerich, asistió a un seminario Deming de cuatro días donde aprendió las bases para los esfuerzos de calidad actuales de su

empresa. Al regresar del seminario decidió ver qué cambios de los que Deming recomendaba, eran posibles en una empresa vieja con un sindicato viejo y con un largo historial de problemas entre los trabajadores y la administración; Hillerich convenció a los funcionarios del sindicato a asistir a otro seminario Deming junto con cinco directores. Después del seminario, un grupo de líderes sindicales clave y la administración desarrollaron una estrategia para cambiar la empresa. Hablaron sobre crear confianza y cambiar el sistema "para convertirlo en algo en lo que desees trabajar". Los empleados se mostraron interesados, pero escépticos. Para demostrar su compromiso, los directivos estudiaron los 14 puntos de Deming y eligieron varios que consideraron adecuados para lograr un progreso a través de acciones que demostrarían su intención seria de cambiar. Uno de los primeros cambios fue la eliminación de las cuotas de trabajo que se relacionaban con salarios por hora y la de un programa de advertencias y castigos por no cubrirlas. En vez de ello, se inició un enfoque basado en equipos. Aunque sólo unos cuantos trabajadores aprovecharon el cambio, la productividad en general mejoró al disminuir el reproceso, porque los empleados se enorgullecían de su trabajo y producían las cosas bien desde la primera vez. H&B también eliminó las evaluaciones del desempeño y los pagos en las ventas basados en comisiones. La empresa concentró sus esfuerzos en capacitación y educación, lo cual dio como resultado una apertura para el cambio y la capacidad de trabajar en equipo. En la actualidad, la filosofía de Deming es aún el centro de los principios que guían a H&B.

La herencia de Deming sigue viva a través del W. Edwards Deming Institute (deming.org).

LA FILOSOFÍA DE JURAN

Joseph Juran (1904-) nació en Rumania y llegó a Estados Unidos en 1912. Colaboró con la Western Electric en la década de 1920, en la época en que fue pionera del desarrollo de los métodos estadísticos para la calidad. Trabajó durante mucho tiempo en empresas como ingeniero industrial y, en 1951, realizó la mayoría de los trabajos de redacción, edición y publicación del *Quality Control Handbook.* Este libro, uno de los manuales de calidad más completos jamás

escritos, se ha revisado varias veces y sigue siendo un libro de consulta muy popular.

Al igual que Deming, Juran enseñó los principios de calidad a los japoneses en la década de 1950 y fue una fuerza importante en su reorganización para la calidad. Entre los pasos que emprendieron las organizaciones japonesas como resultado del liderazgo de Juran estuvieron los siguientes:

• Dirigir la calidad desde el nivel de dirección principal.

• Capacitar a toda la jerarquía administrativa en los principios de la calidad.

• Luchar por mejorar la calidad a una velocidad inusual.

• Informar del avance en las metas de calidad a los niveles ejecutivos.

• Hacer participar a la fuerza laboral en la calidad.

• Revisar la estructura de recompensas y reconocimiento para incluir la calidad.

Estos principios aún son el eje central de la cultura de calidad moderna

Durante la revolución de la calidad en la segunda mitad del siglo xx, Juran también se unió a la conclusión de Deming acerca de que las empresas estadounidenses enfrentaban una crisis importante en la calidad, debido a los enormes costos de la mala calidad y la pérdida de ventas ante la competencia del extranjero. Ambos creían que la solución a esta crisis dependía de una nueva manera de pensar respecto a la calidad que incluía todos los niveles de la jerarquía administrativa. La alta dirección en particular requiere capacitación y experiencia en la administración para la calidad. Incluso en este siglo, Juran continúa advirtiendo que Estados Unidos enfrenta la posibilidad de perder su posición como superpotencia económica a menos que mejore la calidad de sus bienes y servicios.

Sin embargo, a diferencia de Deming, Juran no propuso un cambio cultural importante en la organización; más bien, buscaba mejorar la calidad trabajando dentro del sistema con el que los directivos estaban familiarizados. Por tanto, sus programas fueron diseñados para adaptarse a la planificación estratégica actual

de negocios de la empresa con un riesgo de rechazo mínimo. Afirmaba que los empleados en los distintos niveles de la organización hablaban un "idioma" propio. (Por su parte, Deming creía que la estadística debía ser el lenguaje común.) Juran afirmaba que los directores hablan el lenguaje del dinero; los trabajadores el lenguaje de las cosas, y la gerencia media debe hablar ambos idiomas y traducir de dinero a cosas. Por consiguiente, para captar la atención de los directores, las cuestiones relacionadas con la calidad se deben expresar en el idioma que ellos entienden: el dinero. De ahí que Juran se inclinara por el uso de la contabilidad de costos de calidad y el análisis para centrar la atención en los problemas de calidad. En el nivel operativo, Juran se enfocó en aumentar el cumplimiento con las especificaciones mediante la eliminación de defectos, apoyado en gran medida por las herramientas de estadística para el análisis. Por tanto, su filosofía se adapta muy bien a los sistemas administrativos existentes.

La definición que dio Juran de la calidad hace pensar que se debe considerar desde las perspectivas interna y externa; es decir, la calidad se relaciona con "(1) el desempeño del producto que da como resultado la satisfacción del cliente; (2) productos sin deficiencias, lo que evita la insatisfacción del cliente". La manera como se diseñan, fabrican y entregan productos y servicios y el servicio en campo contribuyen a la adaptación al uso. Por tanto, la búsqueda de la calidad se considera en dos niveles: (1) la misión de la empresa como un todo es lograr una alta calidad de diseño; y (2) la misión de cada departamento en la empresa es lograr calidad de alto cumplimiento. Al igual que Deming, Juran apoyaba una espiral de actividades sin fin que incluye investigación de mercado, desarrollo de productos, diseño, planificación para la manufactura, compras, control del proceso de producción, inspección, pruebas y ventas, seguidas de la retroalimentación del cliente. La interdependencia de estas funciones destaca la necesidad de contar con una administración de calidad competente en toda la empresa. Los directores deben desempeñar un papel activo y entusiasta en el proceso de administración de calidad.

Las recomendaciones de Juran se concentran en tres procesos de calidad principales, llamados la **Trilogía de calidad:** (1) *planificación de la calidad,* el

proceso de preparación para cumplir los objetivos de calidad; (2) *control de calidad,* el proceso de satisfacer los objetivos de calidad durante las operaciones, y (3) *mejora de la calidad,* el proceso de alcanzar niveles de desempeño sin precedentes. En la época en la que propuso esta estructura, pocas empresas participaban en actividades importantes de planificación o mejora. Por tanto, Juran promovía un cambio cultural significativo en la forma de pensar de la administración.

La planificación de la calidad empieza al identificar a los clientes, tanto internos como externos; determinar sus necesidades; traducir las necesidades del cliente en especificaciones; desarrollar características de productos que respondan a esas necesidades, y elaborar los procesos capaces de producir el producto o prestar el servicio. Por tanto, al igual que Deming, Juran quería que los empleados supieran quién utiliza sus productos, ya sea en el siguiente departamento o en otra organización. Así, se establecen metas de calidad orientadas a satisfacer las necesidades de clientes y proveedores por igual a un costo combinado mínimo. Después, se debe diseñar el proceso mediante el cual se obtiene un producto a fin de satisfacer las necesidades de los clientes y cumplir con las metas de calidad bajo las condiciones actuales de operación. La planificación estratégica para la calidad (similar al proceso de planificación financiera de la empresa) determina las metas a corto y largo plazos, establece las prioridades, compara los resultados con los planes anteriores y combina los planes con otros objetivos estratégicos corporativos.

Como equivalente a la insistencia de Deming de identificar y reducir las fuentes de variación, Juran afirmó que el control de calidad requiere determinar qué se va a controlar, establecer las unidades de medición para evaluar la información de manera objetiva, fijar las normas de desempeño, medir el desempeño real, interpretar la diferencia entre el desempeño real y las normas y emprender una acción en cuanto a la diferencia.

Sin embargo, a diferencia de Deming, Juran especificó un programa detallado para el mejoramiento de la calidad. En este tipo de programa se tiene que probar que la mejora es necesaria, identificar proyectos específicos de la mejora,

organizar el apoyo para los proyectos, diagnosticar las causas, proporcionar remedios para las causas, probar que los remedios son eficaces en las condiciones operativas actuales y ofrecer el control con el fin de conservar las mejoras. El enfoque de Juran se refleja en las prácticas de gran variedad de organizaciones en la actualidad.

Muchos aspectos de las filosofías de Deming y Juran son semejantes. El enfoque hacia el compromiso de la alta dirección, la necesidad de mejora, el uso de técnicas para el control de la calidad y la importancia de la capacitación son fundamentales para ambas filosofías. Sin embargo, éstas no concuerdan en todos los puntos. Por ejemplo, Juran creía que Deming equivocado al decir a los administradores que eliminaran el temor. Según Juran: "El temor puede sacar lo mejor de las personas. '" El Juran Institute, fundado por Juran,ofrece capacitación importante en forma de seminarios, cintas de video y otros materiales (www.juran.com).

FILOSOFÍA DE CROSBY

Philip B. Crosby (1926-2001) fue vicepresidente corporativo para la calidad en International Telephone and Telegraph (ITT) durante 14 años, después de abrirse camino desde el puesto de inspector de líneas. Cuando salió de ITT, estableció la empresa Philip Crosby Associates en 1979 para desarrollar y ofrecer programas de capacitación. También es autor de varios libros famosos. Su primer libro, *Quality Is Free* (La calidad no cuesta), vendió alrededor de 1millón de ejemplares y fue el responsable en gran medida de que los altos directivos de las corporaciones estadounidenses prestaran atención a la calidad. La esencia de la filosofía de la calidad de Crosby se resume en lo que él llama los "Absolutos de la administración de calidad" y los “Elementos fundamentales de la mejora". Los Absolutos de la administración de calidad de Crosby incluyen los siguientes puntos:

- *Calidad significa cumplimiento con los requisitos, no elegancia.* Crosby se apresura a eliminar el mito de que la calidad sigue la definición trascendente expuesta anteriormente. Es preciso establecer los requisitos en forma clara, a fin de que no se interpreten de manera errónea. Los

requisitos actúan como dispositivos de comunicación y son férreos; una vez establecidos, uno puede tomar medidas para determinar el cumplimiento con esos requisitos. La falta de no cumplimiento detectado es la ausencia de calidad. Los problemas de calidad se convierten en problemas de no cumplimiento o conformidad, es decir, variación en los resultados. Establecer los requisitos es responsabilidad de la administración. Crosby sostiene que una vez especificados los requisitos, la calidad se juzga sólo basándose en si han sido alcanzados. Por tanto, es preciso que la administración defina con claridad estos requisitos y no suponer que el personal operativo los sobrentiende.

- *No existen los llamados problemas de calidad.* Las personas o departamentos que ocasionan los problemas son los mismos que deben identificarlos. Por tanto, una empresa puede experimentar problemas de contabilidad, problemas de manufactura, problemas de diseño, problemas de atención al público, etc. En otras palabras, la calidad se origina en las áreas operativas y no en el departamento de calidad y, por consiguiente, la responsabilidad por esa clase de problemas recae en esas áreas. El departamento de calidad debe medir el cumplimiento, informar sobre los resultados y guiar para generar una actitud positiva hacia la mejora de la calidad. Este absoluto es similar al punto 3 de Deming.
- *La economía de la calidad no existe; siempre es más barato hacer bien el trabajo desde la primera vez.* Crosby apoya la premisa de que la "economía de la calidad" no tiene ningún significado. La calidad no cuesta. Lo que cuesta dinero son las acciones relacionadas con no hacer bien las cosas desde la primera vez. La reacción en cadena de Deming transmite un mensaje similar.
- *La única medida de desempeño es el costo de la calidad, que es el gasto derivado del no cumplimiento.* Crosby señaló que la mayor parte de las empresas gastan 15 a 20 por ciento del dinero de sus ventas en costos relacionados con la calidad. Una empresa con un programa de administración de calidad bien manejado puede lograr un costo de la calidad menor a 2.5 por ciento de las ventas, sobre todo en las categorías

de prevención y evaluación. El programa de Crosby requiere medir y hacer saber a todos lo que cuesta una mala calidad. Los datos sobre costos de calidad son útiles para atraer la atención de la administración hacia los problemas, para seleccionar las oportunidades de emprender una acción correctiva y registrar la mejora de la calidad a través del tiempo. Estos datos ofrecen una prueba visible de la mejora y el reconocimiento de los logros. Juran apoyó este enfoque.

- *La única norma de desempeño es "cero defectos (CD)".* Crosby consideraba que el concepto de cero defectos es interpretado en forma incorrecta y ha sido objeto de rechazo. Muchos piensan que se trata de un programa motivacional. Éste se describe como sigue: *Cero Defectos es una norma de desempeño. Es la norma de los artesanos, sin importar la tarea que realicen ... El lema de CD es hacer bien las cosas desde la primera vez. Esto significa concentrarse en evitar los defectos más que detectarlos y corregirlos.*

  Las personas están condicionadas a creer que el error es inevitable; por tanto, no sólo lo aceptan, sino que lo anticipan. No nos molesta cometer algunos errores en nuestro trabajo ... errar es humano. Todos tenemos nuestras normas en los negocios o *en la vida académica; nuestros propios puntos en los que los errores comienzan a molestamos. Es bueno obtener una A en la escuela, pero estaría bien pasar con una* C.

  Sin embargo, no conservamos estas normas cuando se trata de nuestra vida personal. Si lo hiciéramos, deberíamos esperar de vez en cuando recibir menos de lo debido al cambiar el cheque de nómina; deberíamos esperar que las enfermeras dejaran caer un porcentaje constante de recién nacidos ... Como individuos no toleramos estas cosas. Tenemos una doble norma: una para nosotros mismos y otra para nuestro trabajo.

  La mayor parte de los errores humanos se deben a la falta de atención y no a la falta de conocimiento. La falta de atención surge cuando suponemos que un error es inevitable. Si consideramos esta condición con detenimiento y nos prometemos a nosotros mismos hacer un esfuerzo consciente y constante por realizar nuestro trabajo bien desde la primera vez, daríamos

un gran paso hacia la eliminación de las pérdidas por reproceso, desperdicio y reparaciones que aumentan los costos y reducen las oportunidades individuales.

No obstante, Juran y Deming señalarían lo inútil e incluso hipócrita que resulta exhortar a un obrero a producir la perfección, debido a que la mayoría de las imperfecciones se derivan de sistemas de manufactura mal diseñados que están más allá del control de los trabajadores.

Los elementos fundamentales de Crosby para la mejora son *determinación, educación* y *ejecución.* La determinación significa que los directores deben tomar en serio la mejora de la calidad. Todos deben entender los Absolutos, que sólo se logran a través de la educación. Por último, cada miembro del equipo administrativo debe entender el proceso de ejecución.

A diferencia de Juran y Deming, el enfoque de Crosby fue sobre todo conductual. Recalcó el uso de procesos administrativos y organizacionales en lugar de técnicas estadísticas para cambiar la cultura corporativa y las actitudes. Sin embargo, al igual que Juran y a diferencia de Deming, su enfoque se adapta a las estructuras organizacionales existentes.

COMPARACIONES DE LAS FILOSOFÍAS DE LA CALIDAD

A pesar de sus diferencias significativas para ejecutar el cambio organizacional, las filosofías de Deming, Juran y Crosby tienen más semejanzas que diferencias. Cada una considera la calidad como imperativo en la competitividad futura en los mercados globales; hace el compromiso de la alta dirección una necesidad absoluta; demuestra que las prácticas de la administración, de calidad ahorran, no cuestan, dinero; establece que la calidad es responsabilidad de la administración y no de los trabajadores; recalca la necesidad de una mejora continua y sin fin; reconoce la importancia del cliente y las relaciones estrechas entre la administración y los trabajadores, y reconoce la necesidad de cambiar la cultura organizacional, así como las dificultades relacionadas con este cambio.

La naturaleza individual de las empresas complica la aplicación estricta de cualquier filosofía específica. Aunque cada una de estas filosofías puede ser muy eficaz, una empresa debe entender primero la naturaleza y las diferencias de cada una y, luego, desarrollar una estrategia de administración de calidad adaptada a su organización. En cualquier enfoque se deben incluir metas y objetivos, asignación de responsabilidades, sistema de medición y descripción de las herramientas que se van a usar; una descripción del estilo de administración que se utilizará y una estrategia para su ejecución. Después de estos pasos, el equipo administrativo es responsable de guiar a la organización hasta la ejecución exitosa del programa.

OTROS FILÓSOFOS DE LA CALIDAD

Otros personajes destacados en el área de la calidad son A. V. Feigenbaum y Kaoru Ishikawa. Feigenbaum e Ishikawa recibieron el título de Miembros Honorarios de la American Society for Quality (ASQ) en 1986.16 En esa época, la sociedad tenía sólo cuatro miembros honorarios vivos, dos de los cuales eran W. Edwards Deming y Joseph M. Juran. Como es obvio, la ASQ no da a la ligera el título de "Miembro Honorario". En esta sección, se revisan en forma breve los logros de este grupo selecto, y se presenta a otro pensador que ha tenido gran influencia en el movimiento por la calidad, Genichi Taguchi .

A.V. Feigenbaum

La carrera de Feigenbaum en la calidad empezó hace más de 40 años. Durante 10 años, fue director internacional de manufactura y control de calidad en General Electric. En 1968, fundó General Systems Company en Pittsfield, Massachusetts, y ahora ocupa el cargo de presidente. A lo largo de los años, Feigenbaum ha viajado y ha dado pláticas a diversas audiencias y grupos de todo el mundo. Fue electo presidente fundador del consejo de la International Academy of Quality, que ha contado con la participación activa de la European Organization for Quality Control, la Union of Japanese Scientists and Engineers aUSE), así como de la American Society for Quality.

Feigenbaum es mejor conocido por acuñar la frase **control de calidad total,** que definió como " ... un sistema eficaz para integrar el desarrollo de la calidad, el mantenimiento de la calidad y los esfuerzos de mejora de la calidad de los diversos grupos en una organización, a fin de permitir la producción y el servicio en los niveles más económicos posibles que den lugar la total satisfacción del cliente". Su libro *Total Quality Control* se publicó por primera vez en 1951 con el título *Quality Control: Principles, Practice, and Administration.* Consideró la calidad como una herramienta de negocios estratégica que requiere la participación de todos los qee integran la organización, y promovió el uso de los costos de la calidad como herramienta de medida y evaluación.

La filosofía de Feigenbaum se resume en sus Tres pasos hacia la calidad:

1. Liderazgo de calidad: un esfuerzo continuo en la administración se basa en la planificación firme y no en la reacción ante las fallas. La administración debe mantener un enfoque constante y guiar el esfuerzo de calidad.

2.Tecnologia de calidad moderna: el departamento de calidad tradicional no puede resolver 80 a 90 por ciento de los problemas de calidad. Esta tarea requiere la integración del personal de oficina, así como ingenieros y trabajadores de la planta en el proceso, quienes evalúan de modo continuo y ponen en práctica técnicas nuevas para satisfacer a los clientes en el futuro.

3. Compromiso de la organización: la capacitación continua y la motivación de todos los trabajadores, así como una integración de la calidad en la planificación de negocios indican la importancia de la calidad y proporcionan los medios para incluirla en todos los aspectos de las actividades de la empresa.

Los japoneses comprendieron este concepto del control de calidad total como el fundamento para su práctica conocida como control de calidad en toda la empresa, CCTE *(companywide quality control,* CWQC), que empezó en la década de 1960. Feigenbaum popularizó también el término *fábrica oculta,* que describía la parte de la capacidad de las plantas que se desperdicia debido a la mala calidad. Muchas de sus ideas siguen integradas en el pensamiento

contemporáneo, y se han convertido en elementos importantes de los criterios para el

Malcolm Baldrige National Quality Award. Estos aspectos incluyen los principios de que el cliente es el juez de la calidad; la calidad y la innovación están relacionadas entre sí y se benefician mutuamente; administrar la calidad es lo mismo que dirigir el negocio; la calidad es un proceso de mejora continua, y los clientes y proveedores deben participar en el proceso.

Kaoru Ishikawa

Uno de los pioneros de la revolución de la calidad en Japón, Kaoru Ishikawa, fue el personaje más destacado en la calidad japonesa hasta su muerte en 1989. Contribuyó al desarrollo de amplios delineamientos de la estrategia de calidad japonesa y, sin su liderazgo, el movimiento por la calidad en Japón no habría tenido el éxito y la aceptación mundial que tiene en la actualidad. El doctor Ishikawa fue profesor de ingeniería en la Universidad de Tokio durante muchos años. Como miembro del consejo de revisión editorial del periódico japonés *Quality Control for Foremen,* fundado en 1962, y posteriormente como director general de QC Circle Headquarters en la Union of Japanese Scientists and Engineers (JUSE), el doctor Ishikawa influyó en el desarrollo de una perspectiva de la calidad participativa ascendente, que se convirtió en la marca distintiva del enfoque japonés en la administración de calidad. Sin embargo, Ishikawa captó también la atención de los directivos y los convenció de que era necesario un enfoque hacia el control de calidad en toda la empresa para lograr el éxito total.

Ishikawa se basó en el concepto de calidad total de Feigenbaum y promovió una mayor participación de todos los empleados, desde la dirección hasta el personal de planta, reduciendo la dependencia en los profesionales y los departamentos de calidad. Se dedicó a recopilar y analizar datos reales utilizando herramientas visuales simples, técnicas estadísticas y el trabajo en equipo como bases para la ejecución de la calidad total. Al igual que otros, Ishikawa creía que la calidad empieza con el cliente y, por tanto, entender sus necesidades es la base para

mejorar, y que las quejas se deben buscar activamente. A continuación, resumimos algunos elementos clave de su filosofía.

1. La calidad empieza con la educación y termina con la educación.

2. El primer paso en la calidad es conocer las necesidades del cliente.

3. El estado ideal del control de calidad ocurre cuando la inspección ya no es necesaria.

4. Eliminar el origen y no los síntomas.

5. El control de calidad es responsabilidad de los trabajadores y las divisiones.

6. No confundir los medios con los objetivos.

7. Poner la calidad en primer lugar y establecer sus perspectivas de las utilidades a largo plazo.

8. La mercadotecnia es la entrada y la salida de la calidad.

9. Los directivos no deben demostrar enojo cuando sus subordinados presentan los hechos.

10. Noventa y cinco por ciento de los problemas en una empresa se solucionan con herramientas sencillas de análisis y solución de problemas.

11. Los datos sin información de difusión (es decir, la variabilidad) son falsos.

Genichi Taguchi

El ingeniero japonés Genichi Taguchi, cuya filosofía se basó en gran medida en la de Deming, explicó el valor económico de reducir la variación. Taguchi sostuvo que la definición de calidad basada en la manufactura como cumplimiento con los límites de especificación presenta errores inherentes. Por ejemplo, supóngase que la especificación para alguna característica de calidad es 0.500 ± 0.020.Con esta definición, el valor real de la característica de calidad puede estar en el intervalo de 0.480a 0.520.De acuerdo con esto el cliente, ya sea el consumidor o el siguiente departamento en el proceso de producción, aceptaría cualquier valor en

el intervalo de 0.480 a 0.520, pero no se sentiría satisfecho si queda fuera de este intervalo de tolerancia.

Asimismo, esta estrategia supone que los costos no dependen del valor real de la característica de calidad, siempre que caiga dentro de la tolerancia especificada (figura 3.8).

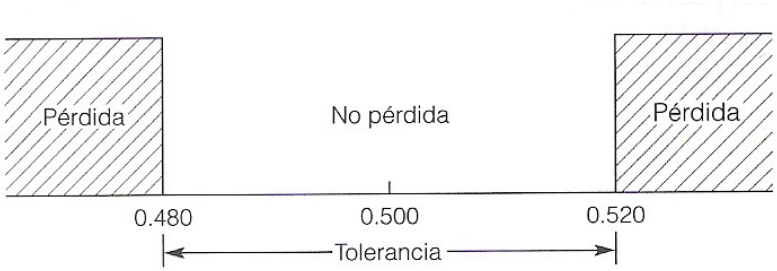


Figura 3.8 Perspectiva económica tradicional de cumplimiento con las especificaciones

Pero, cuál es la verdadera diferencia entre 0.479 y 0.481? La primera medida se consideraría como "fuera de las especificaciones" y el producto se tendría que reprocesar o se consideraría desperdicio, mientras que la segunda sería aceptable. En realidad, el impacto de cualquiera de los dos valores en la característica de desempeño del producto sería casi igual. Ninguno de los valores se aproxima a la especificación nominal de 0.500; ésta es el valor objetivo ideal para la característica de calidad crítica. Según el enfoque de Taguchi, mientras menor sea la variación respecto a la especificación nominal, mejor será la calidad. A su vez, los productos son más consistentes y los costos totales son menores. El ejemplo siguiente apoya esta idea.

El periódico japonés *Ashai* publicó un ejemplo en el que se compara el costo y la calidad de los televisores Sony producidos en las plantas de Japón y San Diego. La densidad de color de todas las unidades producidas en la planta de San Diego estuvieron dentro de las especificaciones, mientras que algunas de las unidades de la planta japonesa no cumplían con ellas (figura 3.9). Sin embargo, la pérdida promedio por unidad de la planta de San Diego era $ 0.89 mayor que la de la planta en Japón. Este incremento en los costos ocurrió porque los trabajadores

ajustaron las unidades que no cumplían con las especificaciones en la planta de San Diego, lo cual aumentó el costo del proceso. Además, una unidad ajustada para cumplir con las especificaciones mínimas tenía más probabilidades de generar quejas entre los clientes que una próxima al valor objetivo original, incurriendo así en costos de servicio más elevados. En la figura 3.9 se ilustra que menos televisores producidos en Estados Unidos cumplen con el valor objetivo para la densidad de color. La distribución de la calidad en la planta japonesa fue más uniforme respecto al valor objetivo y, aun cuando algunas unidades no cumplieron con las especificaciones, el costo total fue menor. Taguchi midió la calidad como variación respecto al valor objetivo de una especificación de diseño y luego convirtió esa variación en una "función de pérdida" económica que expresa el costo de la variación en términos monetarios.

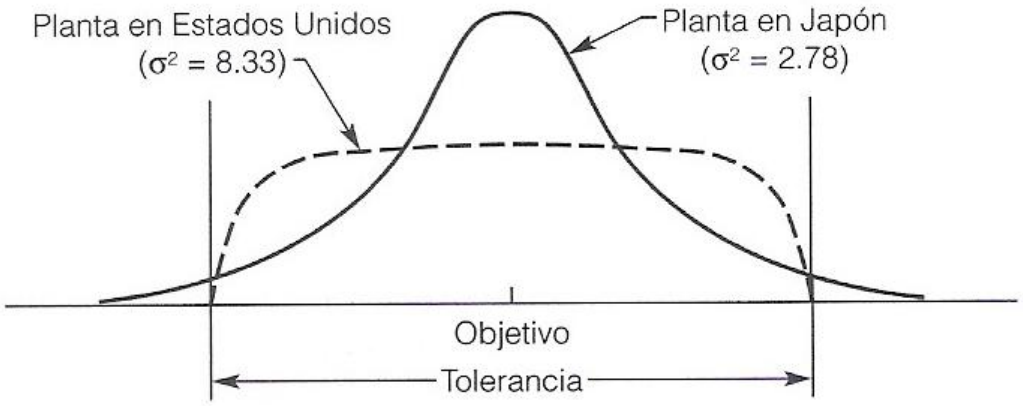


Figura 3.9 Variación en los televisores fabricados en Estados Unidos contra los producidos en Japón.

Taguchi también contribuyó a mejorar los enfoques de ingeniería para el diseño de productos. Al diseñar un producto que sea insensible a la variación en la manufactura, los límites de especificación pierden su significado. Sugirió ciertas técnicas del diseño de experimentos para identificar las variables de diseño más importantes, a fin de minimizar los efectos de los factores no controlables en la variación de productos. Por tanto, sus enfoques atacaron los problemas de calidad desde el principio de la etapa de diseño, en lugar de reaccionar ante aquellos que

surgen en etapas posteriores de la producción.” **James R Evans/William M. Lindsay, Administración y control de la calidad, CENGAGE Learning.**

“Mikel Harry

Desde que la metodología Seis Sigma se difundió a finales de los noventa, el término se ha vuelto una forma de referirse a procesos que buscan niveles casi perfectos de calidad. En Seis Sigma el uso de datos en forma disciplinada ayuda a la eliminación de defectos en los procesos. La representación estadística del Seis Sigma permite describir de manera cuantitativa, la forma en que se está desempeñando un proceso. Para lograr Seis Sigma, un proceso no debe producir más de 3.4 defectos por millón de oportunidades, prácticamente ningún producto fuera de especificación. En este método se denomina "oportunidad" a la cantidad total de situaciones posibles en las que se pudiera crear un defecto. El nivel de "sígmas" de un proceso se puede calcular con facilidad utilizando el estimador Seis Sigma.

El objetivo fundamental es la implantación de una estrategia basada en la medición del mejoramiento de los procesos y la reducción de variabilidad mediante la ejecución de proyectos de mejoramiento. Esto se logra mediante el uso de los dos procedimientos que integran el Seis Sigma: DMAIC y DMADV. El procedimiento DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar *(Improve)* y Controlar) tiene como objetivo mejorar los procesos que son fuente de productos o servicios defectuosos y justifican, desde el punto de vista económico, su mejoramiento gradual e incremental. El procedimiento DMADV (Definir, Medir, Analizar, Diseñar y Verificar) se utiliza para desarrollar nuevos procesos o productos para que desde su diseño estén capacitados para lograr niveles de calidad Seis Sigma. También se puede aplicar en un proceso ya existente que requiera algo más que un mejoramiento gradual, pues equivale a rediseñarlo en su totalidad para reducir drásticamente sus niveles de defecto. En ambos casos, los procedimientos DMAIC y DMADV los llevan a la práctica los cintas verdes seis sigma y cintas negras seis sigma, supervisados por el cinta negra maestro, que son personal altamente capacitado en el uso de las técnicas y procedimientos de la metodología Seis Sigma; los primeros con dedicación parcial y los segundos con tiempo completo.

De acuerdo con la Six Sigma Academy, los cinta negra ahorran a su compañía alrededor de 230 000 dólares americanos por proyecto y tienen capacidad de realizar de cuatro a seis proyectos por año. General Electric, una de las empresas más exitosas en la implantación de Seis Sigma, estima que los beneficios logrados ascendieron a 10 000 millones de dólares durante los primeros cinco años. Esta firma adoptó la metodología de Mikel Harry en 1995, después de que Motorola y Allied Signallo habían hecho con éxito. Desde entonces, cientos o quizá miles de empresas de todo el mundo han aprovechado los beneficios de este sistema.

Shigeo Shingo

Este autor es posiblemente más conocido por sus contribuciones al área de la optimización de la producción que a la calidad total. Sin embargo, el argumento cardinal de su filosofía es que una de las principales barreras para optimizar la producción es la existencia de problemas de calidad. Su método SMED (Cambio Rápido de Instrumental) funciona, de manera óptima, si se cuenta con un proceso de cero defectos, para lo cual propone la creación del sistema poka-yoke (a prueba de errores).

El sistema poka-yoke consiste en la creación de elementos que detecten los defectos de producción y lo informen de inmediato para establecer la causa del problema y evitar que vuelva a ocurrir; esto es, se debe inspeccionar en la fuente para detectar a tiempo los errores. Mediante este procedimiento se detiene y corrige el proceso en forma automática para evitar que el error derive en un producto defectuoso. Para reducir defectos dentro de las actividades de producción, el concepto más importante es reconocer que los mismos se originan en el proceso y que las inspecciones sólo pueden descubrirlos mas no prevenirlos. El "cero defectos" no puede alcanzarse si se olvida este concepto.

Adicionalmente, Shingo subraya que debemos reconocer que los trabajadores son seres humanos y que, como tales, en ciertas ocasiones incurren en olvidos. Es necesario incluir un poka-yoke (lista de chequeo o mecanismo) durante la fase operativa, de tal forma que si la persona olvida algo, el accesorio se lo señale, y así se logre prevenir la ocurrencia de errores. Un sistema de "chequeos

sucesivos", en lugar de la inspección realizada por una sola persona, asegura la calidad del producto en el origen y es más efectiva para lograr cero defectos. El chequeo sucesivo consiste en que el siguiente operario revisa la calidad del producto del proceso anterior. Este sistema de inspección 100% es incluso más rápido y efectivo que las inspecciones por muestreo realizadas al final del proceso. Los sistemas de control de calidad total consisten en que todo el personal de la organización se involucre en la prevención de errores a través del ciclo de calidad y el control de calidad cero (poka-yoke e inspección en la fuente).

Según Shingo, el proceso de dirección de una empresa se basa en acciones individuales y la conjunción de éstas en actividades de grupo dentro de cada una de las categorías de dirección ejecutiva (tecnológica, financiera, de producción, de mercado y de recursos humanos). Las fases de la acción individual son: la voluntad de los individuos, políticas que rigen el comportamiento de éstos, programación, ejecución y control de las acciones a través de la verificación, y satisfacción de los estándares establecidos. Existen diferencias socio culturales y de organización de los trabajos muy importantes entre Japón y Occidente. Las áreas en donde estas diferencias son más marcadas son los sistemas de empleo y salario, el sindicalismo, el trabajo en grupo, las políticas de comunicación de las empresas, el manejo y entendimiento de los inventarios, así como los métodos de programación y control de la producción.

En una de sus muchas publicaciones, Shingo proporciona amplias recomendaciones para el mejoramiento de la calidad de las operaciones en plantas manufactureras (1985). Entre otras cosas, propone diversas técnicas de ingeniería industrial para el óptimo funcionamiento del proceso productivo y una metodología para la solución de los problemas que típicamente se presentan en un círculo de calidad.

Conclusiones de las aportaciones de los autores

Del análisis de las tesis expuestas y de las propuestas de otros autores, podemos concluir que la mayor parte de lo tratado en la amplia variedad de publicaciones sobre calidad total se concentra en los siguientes temas:

1. Compromiso de alta administración-liderazgo.

2. Equipos de mejoramiento de calidad.

3. Medición de calidad.

4. Corrección de problemas.

5. Comité de calidad.

&. Capacitación y educación.

7. Objetivos de calidad.

8. Prevención de errores.

9. Reconocimiento y recompensas.

10. Crecimiento con rentabilidad económica.

11. Conocimiento de mercados y clientes.

12. Planeación estratégica.

13. Cultura de calidad.

14. Enfoque total de sistemas.

15. Administración de la información.

16. Políticas de calidad.

17. Constancia y propósito para la competitividad.

18. Métodos de supervisión.

19. Diseño de productos y procesos.

20. Control del proceso.

21. Relación con proveedores.

22. Auditorías o evaluación al sistema de calidad.”**Humberto Cantú Delgado, Desarrollo de una Cultura de Calidad, Mc Graw Hill.**

“Peter M. Senge (organizaciones que aprenden)

Finalizamos esta panorámica de las ideas de los maestros de la calidad hablando un poco de la obra de Peter M. Senge, profesor del Instituto de Tecnología de Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology, MIT), quien no es parte de la generación de los precursores de la calidad que hemos visto antes. Más bien, se puede ubicar como parte de la generación posterior a los maestros de la calidad. Sin embargo, hemos decido incluirlo en este repaso debido a su aporte a la perspectiva sistémica de las organizaciones y su propuesta para que éstas logren ser inteligentes y aprendan de sus experiencias.

La idea de que las empresas aprenden, al igual que las personas, es un tema que desde la década de 1990 ha recibido gran atención por parte de la gente que busca alternativas para mejorar el desempeño de las organizaciones. Una compañía aprende si de manera continua y sistemática busca obtener el máximo provecho de sus experiencias aprendiendo de ellas. De esta manera podrá detectar y corregir los errores y trampas más graves y será capaz de sobreponerse a las dificultades, reconocer amenazas y enfrentar nuevas oportunidades. Detrás de la idea de estudiar el **aprendizaje organizacional**, está la intención de comprender la forma en que las organizaciones funcionan, evolucionan y corrigen sus errores y su rumbo.

Una empresa abierta al aprendizaje busca que las personas estén aprendiendo y poniendo en práctica todo el potencial de sus capacidades. Esto es: la capacidad de comprender la complejidad, de adquirir compromisos, de asumir su responsabilidad, de buscar el continuo auto crecimiento y de crear sinergias a través del trabajo en equipo. Por el contrario, las compañías que no aprenden, las dominan las inercias, los estilos de liderazgo tradicional y el control excesivo.

Cabe señalar que existe un buen número de expertos que han estudiado el tema del aprendizaje organizacional; por ejemplo, Chris Argyris, profesor de la Universidad de Harvard, tiene una vasta obra sobre el tema. Su libro *Sobre el aprendizaje organizacional,* 2001, cuya edición original en inglés se publicó en 1999, hace una amplia revisión sobre el campo.

Aquí damos un repaso a las ideas de Senge sobre aprendizaje organizacional. Su obra cumbre es *La quinta disciplina,* cuya edición original en inglés apareció en 1990. En ella expone, de forma sencilla, una serie de pautas para que las organizaciones se abran a! aprendizaje. Define a las empresas inteligentes como aquellas en las que la gente expande continuamente su aptitud para crear los resultados que desea, en las que se cultivan nuevos y expansivos patrones de pensamiento y en las que los trabajadores aprenden a aprender, enfatizando que la capacidad de aprender con mayor rapidez que los competidores quizá sea la única ventaja competitiva sostenible. Asimismo, señala que parte de la problemática de las organizaciones para aprender y evolucionar es la manera en la que se enseña a analizar el mundo. Al respecto comenta:

Desde muy temprana edad nos enseñan a analizar los problemas, a fragmentar el mundo. Al parecer esto facilita las tareas complejas, pero sin saberlo pagamos un precio enorme: Ya no vemos las consecuencias de nuestros actos; perdemos nuestra sensación intrínseca de conexión con una totalidad más vasta ... necesitamos destruir la ilusión de que el mundo está compuesto por fuerzas separadas y desconectadas. Cuando abandonemos esta ilusión podremos construir organizaciones inteligentes, en las que la gente expanda continuamente su aptitud para crear los resultados que desean ... en las que la aspiración colectiva quede en libertad y la gente continuamente aprenda a aprender en conjunto ... Los seres humanos fueron creados para aprender. Nadie enseña a un niño a caminar, a hablar o a dominar las relaciones espaciales necesarias para poner ocho cubos uno encima de otro sin que se caigan. Desafortunadamente, las instituciones más importantes de nuestra sociedad están orientadas predominantemente hacia el control, en lugar de hacia el aprendizaje,

recompensando a los individuos por trabajar para otros, en lugar de hacerlo por cultivar su curiosidad y su impulso natural por aprender.

La propuesta central de Senge para construir organizaciones inteligentes es que se cultiven y dominen cinco disciplinas que, aunque su desarrollo se dio por separado, al practicarlas en conjunto cada cual dará una dimensión vital para la construcción de empresas con auténtica capacidad de aprendizaje, aptas para perfeccionar su habilidad y alcanzar sus mayores aspiraciones. Estas cinco disciplinas son: el dominio personal, los modelos mentales, la construcción de una visión compartida, el aprendizaje en equipo y el pensamiento sistémico. Para que haya aprendizaje es necesario que estas disciplinas se vean como un todo, y eso es posible cuando se aplica el pensamiento sistémico.

Un punto de partida para entender mejor el reto de alcanzar organizaciones abiertas al aprendizaje es la concepción misma de aprendizaje, ya que a éste se le considera sólo como la absorción de información. En lugar de esto, se trata de que a través del aprendizaje se capacite para hacer algo nuevo y se logre percibir, desde perspectivas diferentes, las cosas del entorno con el fin de ampliar la capacidad para crear. Sin embargo, para dar este paso es necesario practicar los cambios de enfoque o desplazamientos mentales (metanoia) que permitan transitar de una perspectiva a otra mejor. A continuación se describen brevemente las cinco disciplinas.

Dominio personal

El primer requisito para que una organización aprenda es que su gente quiera mejorar su vida y su trabajo. Por ello, esta primera disciplina proporciona la base espiritual de las organizaciones inteligentes.

La disciplina del **dominio personal** permite aclarar y ahondar continuamente la visión (sueños y metas) de las personas, concentrar las energías en ésta, desarrollar paciencia y aprender a ver la realidad objetivamente. De esta manera, para que una empresa aprenda es necesario que sus trabajadores saquen lo

mejor de sí, lo mejor de las aspiraciones de los seres humanos, y que, al aclarar las cosas que en realidad les interesan, pongan sus vidas al servicio de sus mayores aspiraciones. En otras palabras, la esencia del dominio personal consiste en aprender y generar la tensión creativa, que precisamente nace de tener una imagen clara de a dónde queremos llegar y decir la verdad sobre dónde estamos, la realidad actual. La brecha entre lo que se quiere (visión) y lo que se tiene (realidad actual) genera una tensión creativa natural.

Esta tensión creativa se asemeja a la fuerza ejercida por una liga alrededor de las dos manos. A medida que se separan, la tensión se hace mayor. La tensión creativa puede disminuirse llevando la realidad actual hacia la visión, o bajando la visión hacia la realidad actual. Los que aprenden a trabajar con tensión creativa saben usar la energía que ésta genera para desplazar la realidad hacia sus visiones.

Entonces, e! primer paso para generar esa tensión creativa es tener una visión clara de las cosas trascendentes que se quieren lograr en el mediano plazo (cinco a 10 años). Pero también es importante reconocer tal cual es la realidad personal actual, ya que una fotografía precisa de la realidad actual es tan importante como una imagen del futuro deseado. *A*l contraponer la visión con la realidad actual se genera esa energía extra que se requiere para esforzarnos, para sacar lo mejor de nosotros, para sobreponernos a nuestras propias limitaciones.

La tensión creativa es diferente de la solución de problemas, donde la energía proviene de intentar salirse de un aspecto indeseable de la realidad. Con la tensión creativa, la energía viene de la visión, de lo que se quiere crear. Mucha gente se ve obligada a cambiar cuando sus problemas son grandes, por lo que el estímulo del problema los obliga a mejorar, pero este estímulo externo pierde su intensidad a medida que pasa el tiempo, ya sea porque los problemas pierden su vigencia o porque las personas se acostumbran a vivir con esos problemas. En la solución de problemas la motivación es externa, mientras que en la tensión creativa la motivación es interna y genuina.

Una organización comprometida con el dominio personal alienta continuamente la visión personal de su gente, el compromiso con la verdad y la voluntad de enfrentar honestamente las brechas entre ambos aspectos.

Modelos mentales

Con frecuencia las mejores ideas en una organización ni siquiera llegan a la fase de implementación. La razón es que están en contraposición con los modelos mentales (paradigmas), que son ideas, supuestos y creencias muy arraigados que controlan los actos e influyen sobre el modo de comprender el mundo y actuar. Sin embargo, estas ideas y creencias, aunque arraigadas, están por debajo del nivel consciente, por lo que sin saberlo influyen en las actitudes y acciones. Una empresa no puede trabajar con nuevas ideas mientras sigan prevaleciendo en ella las viejas ideas de liderazgo, control y desconfianza hacia la gente, y de pensar que el cliente es alguien a quien nunca se le va a dar gusto: ideas inadecuadas como que el trabajo en equipo es una pérdida de tiempo, que la mala calidad se debe al descuido de la gente y que, por lo tanto, la solución es presionarlos. Entonces, al estar estas creencias en contradicción con los principios básicos en los que se deben sostener los esfuerzos de mejora, por más que se diga que la mejora y el cliente son lo primero, en la práctica terminarán dominando las viejas ideas y con ello los esfuerzos por mejorar darán resultados negativos.

Para revertir lo anterior, es necesario trabajar en la disciplina de modelos mentales, mirando hacia adentro para aprender a exhumar las imágenes internas del mundo, llevarlas a la superficie y someterlas a un riguroso escrutinio. Para esto se requiere de la aptitud para entablar diálogos abiertos en los que se equilibre la indagación (preguntar lo que se piensa) y la persuasión (convencimiento) y en los que la gente manifieste sus pensamientos para exponerlos a la influencia de otros.

En otras palabras, es importante que haya un equilibrio entre cuestionamiento y argumentación ya que la mayoría de los directivos son hábiles al plantear sus puntos de vista, debido a que los presentan en forma convincente. Estas habilidades pueden convertirse en limitaciones a medida que los gerentes ascienden a niveles de mayor responsabilidad y confrontan aspectos más

complejos que requieren aprendizaje colectivo entre personas diferentes, pero igualmente conocedoras. Los líderes de las organizaciones inteligentes necesitan tanto las habilidades de cuestionar como las de argumentar. Cuando los gerentes argumenten sus puntos de vista, deberán ser capaces de: explicar los razonamientos y los hechos que sustentan su punto de vista, pedir a otros que evalúen sus puntos de vista y solicitar a otros que ofrezcan puntos de vista diferentes.

Asimismo, cuando evalúen los puntos de vista de otros colegas, deben ser capaces de tratar de comprenderlos a profundidad, en lugar de limitarse a ver cómo la nueva opinión difiere de la suya o como pueden validar su punto de vista original. También deben explicar en sus propias palabras lo que están entendiendo como puntos de vista de sus colegas. Cuando lleguen a un punto muerto (los otros no son receptivos a ser cuestionados), necesitan preguntar qué tipo de información o razonamiento puede romper el impasse o si el tema puede someterse a un proceso que genere nueva información.

Construcción de una visión compartida

Si para el individuo resulta fundamental tener una visión clara de las cosas que le interesa lograr, para una organización es un asunto de supervivencia, ya que sin un rumbo claro y retador hacia el cual dirigir los esfuerzos e iniciativas, éstos se desperdiciarán en diferentes direcciones y prioridades. Por ello, con la práctica de la disciplina de **visión compartida** se debe generar un proceso, una práctica para crear esa imagen de futuro, ese vínculo común que impregne a la organización y brinde coherencia a las diferentes actividades. Cuando la gente comparte una visión, se conecta y vincula por una aspiración común.

Así, que un requisito básico para alcanzar la práctica de esta disciplina es que en la organización se fomenten el dominio y las visiones personales. Debido a que una visión compartida emerge de las visiones y sentimientos personales, se trata de generar un proceso mediante el cual las visiones individuales se unan para lograr una sola. Cuando varias personas se juntan para crear la visión de una organización, cada quien ve, a lo sumo, su propia imagen de la organización,

aunque su responsabilidad recaiga sobre el total. Al integrar los diferentes puntos de vista, la imagen se hace más real e intensa, ya que entre más personas se unan a la visión, más real se hace ésta en relación con la foto mental de lo que imaginan poder lograr. Entonces se convierten en "socios", "creadores", "participantes"; la visión ya no descansa en hombros de un solo individuo ni es una frase sin sentido.

Así, en un principio es "mi visión", luego se transforma en "nuestra visión". Las habilidades para crear una visión compartida incluyen alentar la generación de visiones individuales, lograr que los líderes compartan su propia visión en lugar de ser voceros de la visión corporativa y estar preparados para preguntar: ¿Merece esta visión su compromiso? Habrá momentos en que una imagen particular de la visión parecerá predominante, pero a la larga evolucionará. Hoy en día muchos directivos tratan de resolver este tema escribiendo una "declaración de visión". Por lo general, esas visiones carecen de la vitalidad, frescura y excitación que nace en la gente cuando ésta se pregunta: ¿Qué es lo que queremos lograr?

Aprendizaje en equipo

Como se mencionó antes, una organización que aprende significa ampliar la capacidad para crear. A través de esta disciplina se trata de aumentar la capacidad de un equipo para generar los resultados que se desean. El punto de partida es precisamente aclarar lo que se quiere, ya que si esto no se entiende, los miembros encauzan sus energías en diferentes direcciones, como se muestra en la figura 3.10a. El resultado de esto es: enfoques diferentes, desunión, comunicación ineficaz y protección territorial. Lo que ilustra en la figura 3.10a es similar a lo que pasaría si un grupo de directivos sentados en una mesa (la organización) empujara cada uno hacia el frente. El resultado es que la mesa se colapsaría o se desplazaría lentamente en la dirección del más fuerte. Por desgracia, en una organización el más fuerte termina siendo la inercia, la tradición, los estilos de liderazgo autoritarios, etc. En este sentido, el reto que tendría un

equipo es aclarar las cosas que verdaderamente le interesan, como se muestra en la figura 3.10b.

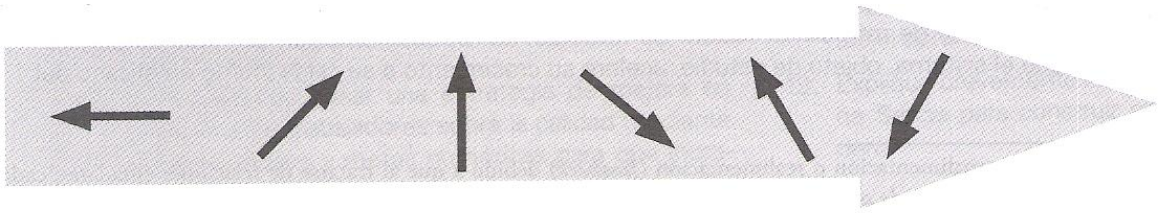


Figura 3.10a Las energías de los miembros de los equipos se encauzan en direcciones diferentes.

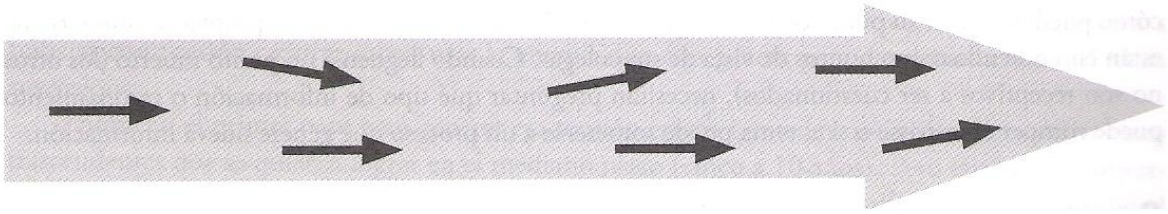


Figura 3.10b Hay un propósito común, una visión compartida que permite complementar esfuerzos.

Así, la práctica de esta disciplina implica alinear esfuerzos y desarrollar la capacidad del equipo para crear los resultados que se desean. Esto implica, ante todo, ver el pensamiento como un fenómeno colectivo, apoyado en la práctica del diálogo y la discusión, para desarrollar flujos libres de significados entre los miembros del equipo, lo cual permite descubrir percepciones que no se alcanzan individualmente.

Pensamiento sistémico

Con esta disciplina se busca aprender a ver el todo, entenderlo y mejorado, sin enfocarse en foros instantáneas y en partes aisladas, ayudando a que los patrones totales resulten más claros. Esta quinta disciplina, además de ver en

conjunto a las cuatro previas, busca que se encuentre la interrelación entre las diferentes partes de un sistema.

Aprender a pensar en forma sistémica no es sencillo, ya que desde pequeños se nos enseña a aislar los elementos que integran la realidad, asignando siempre una causa a cada efecto. Por ejemplo, considere el caso de un niño que lanza una piedra y rompe un vidrio. Al cuestionar por qué se rompió el vidrio, muchos contestarán que porque un niño tiró una piedra y todos quedan conformes con esta explicación. A este tipo de pensamiento se le llama de explicación lineal o pensamiento lineal. En un extremo está la causa y en el opuesto el efecto. La esencia del **pensamiento sistémico**, la quinta disciplina de Senge, consiste en un cambio de perspectiva de las situaciones que vivimos para identificar las interrelaciones, en lugar de asociadas a cadenas lineales de causa-efecto. Es necesario ver los procesos de cambio que se generan, en vez de las imágenes instantáneas que se producen.

Un buen pensador sistémico es capaz de profundizar en el análisis de los hechos o acontecimientos, ya que éstos son el resultado de ciertas conductas que se dan en la organización, que si no se identifican, difícilmente se van a comprender los acontecimientos negativos que se presentan en un sistema. Además, al profundizar en el análisis se encontrará que las conductas son propiciadas por la estructura sistémica. Finalmente, esta estructura fue generada por los modelos mentales o ideas prevalecientes en la empresa. Por lo tanto, si se quieren cambiar de raíz los acontecimientos, es necesario mejorar los modelos mentales para que al aplicarlos también se mejore la estructura sistémica y así propiciar nuevas y mejores conductas que al final modifiquen los hechos.

De la teoría general de sistemas, se desprenden algunos elementos clave del pensamiento sistémico.

• Los sistemas se dividen a su vez en subsistemas (lo que existe dentro del sistema) y suprasistemas (el universo en el que se desenvuelve el sistema).

• Los sistemas cuentan con fronteras definidas (los límites del sistema) y están provistos de sensores con los que perciben su medio ambiente.

• Cualquier tipo de sistema tiene como principal propósito la equifinalidad. Es decir, todos los elementos que lo integran funcionan para alcanzar el mismo objetivo o finalidad.

• Los sistemas generan la sinergia entre sus partes, cuya suma de 2 + 2 > 4, o bien, la suma total siempre es mayor que la suma de sus partes. A esta característica también se le llama de retroalimentación de refuerzo. La retroalimentación de refuerzo permite que el sistema, objeto de estudio, acelere su crecimiento o su caída (como en el caso del pánico financiero que se produce en los mercados) creando un efecto de "bola de nieve hasta cierto límite, donde comienza a producirse la retroalimentación de equilibrio que tiende a conservar en cierto estado las cosas (para bien o para mal).

• Los sistemas cuentan con un elemento regulador de sus procesos para mantener el equilibrio, que se conoce como retroalimentación de equilibrio.

• Todo sistema cuenta, dentro de sí, con un mecanismo de demora o de espera. Este elemento se refiere a que siempre existe un lapso de tiempo entre una causa y el efecto deseado. Si se llega a comprender este fenómeno, es posible manejarlo; pero si no, puede acarrear grandes dificultades.

La clave para comprender los procesos de retroalimentación y demora consiste en entender que bajo las apariencias siempre existe un sistema independiente que se desarrolla según sus propias leyes, y que mientras más se traten de atacar los síntomas superficiales sin prestar atención a lo que ocurre en el fondo, más energía se gastará en vano.

Senge describe una serie de estructuras genéricas (arquetipos sistémicos) que se repiten en muchos de los problemas sistémicos y que si se desconocen nos mantienen prisioneros sin percatarnos de ello. Los arquetipos sistémicos por lo general son resultado de cierta combinación de ciclos reforzadores o ciclos compensadores.” **Humberto Gutiérrez Pulido, Calidad Total y Productividad, Mc Graw Hill.**

“COSTO DE LA CALIDAD

En la mayoría de las empresas, la contabilidad de costos es una función importante. Todas las organizaciones miden y reportan los costos como una base para el control y la mejora. El concepto **costo de la calidad** (COQ, por sus siglas en inglés) surgió en la década de 1950.Por tradición, el informe de los costos relacionados con la calidad se limitaba a la inspección y las pruebas; otros costos se acumulaban en las cuentas de gastos administrativos. Conforme los directivos empezaron a definir y aislar el rango completo de los costos relacionados con la calidad, surgieron varios hechos sorprendentes. Primero, los costos relacionados con la calidad eran mucho más elevados de los que se reportaban anteriormente, casi siempre en el rango de 20 a 40 por ciento de las ventas. Segundo, los costos relacionados con la calidad sólo estaban relacionados con las operaciones de manufactura, sino también con servicios auxiliares, como los departamentos de compras y servicio a clientes. Tercero, la mayor parte de los costos resultaban de la mala calidad y se podían evitar. Por último, aunque los costos de la mala calidad se podían evitar, no se asignaba ninguna responsabilidad clara por la acción para reducirlos, ni tampoco se formulaba ningún enfoque estructurado para hacerlo.

Como resultado de ello, muchas empresas empezaron a desarrollar programas de costos de calidad. Los "costos de la calidad" o, de manera más específica, los costos de la *mala* calidad, son los que se relacionan con evitar la mala calidad o aquellos en que se incurre como resultado de la mala calidad.

Juran señaló que los trabajadores y los supervisores hablan el "idioma de las cosas": unidades, defectos, etc. Por desgracia, los problemas de calidad expresados como el número de defectos casi siempre tienen poco impacto en los directivos, quienes, por lo general, se preocupan más por el desempeño financiero. Pero, si la magnitud de los problemas de calidad se pudieran traducir en términos monetarios, por ejemplo" ¿cuánto nos costaría manejar este negocio si no tuviéramos problemas con la calidad?", los ojos de los directivos se abrirían. Las cifras en dólares se pueden sumar de manera significativa en todos los departamentos o productos, y compararse con otros indicadores monetarios. Los gerentes medios, quienes tratan tanto con los trabajadores y supervisores como

con los directivos, deben tener la habilidad de hablar ambos idiomas. La información sobre el costo de la calidad tiene muchos otros propósitos: ayuda a los directivos a evaluar la importancia relativa de los problemas de calidad y, de esta manera, identificar las principales oportunidades de reducir los costos; sirve de ayuda en la elaboración de presupuestos y en las actividades de control de costos; por último, sirve como calificación para evaluar el éxito de la organización en el logro de los objetivos de calidad.

Para establecer un enfoque de costos de calidad es preciso identificar las actividades que generan los costos, medir los, reportarlos de manera significativa para los directivos y analizarlos a fin de identificar las áreas que deben mejorar. Las siguientes secciones analizan estas actividades con mayor detalle.

Clasificación de los costos de calidad

Los costos de calidad se pueden organizar en cuatro categorías principales: costos de prevención, costos de evaluación, costos de fallas internas y costos de fallas externas. Los **costos de prevención** son inversiones que se realizan para evitar que haya productos que no cumplan con las normas y que éstos lleguen al cliente, e incluyen los siguientes costos específicos:

• *Costos de planeación de la calidad,* como salarios de las personas relacionadas con la planeación de la calidad y los equipos para la solución de problemas, el desarrollo de nuevos procedimientos, el diseño de equipo nuevo y los estudios de confiabilidad.

• *Costos del control de procesos,* que incluyen costos incurrido s en analizar los procesos de producción e implementar los planes de control de procesos.

• *Costos de los sistemas de información* incurridos en desarrollar los requisitos de datos e indicadores.

• *Costos de capacitación, entrenamiento y administración general,* que incluyen programas de capacitación y entrenamiento internos y externos, gastos en personal de oficina y provisiones varias.

Los **costos de evaluación** son los que se relacionan con los esfuerzos por garantizar la conformidad con los requisitos, casi siempre a través de la medición y el análisis de los datos para detectar la falta de conformidad. Las categorías de los costos de evaluación incluyen las siguientes:

• *Costos de pruebas e inspección* relacionados con el material que llega, el trabajo en proceso y los bienes terminados, incluidos los costos del equipo y los salarios.
• *Costos de mantenimiento de instrumentos* debido a la calibración y reparación de los instrumentos de medición.
• *Costos de medición y control de procesos,* que comprenden el tiempo que los trabajadores invierten en recopilar y analizar los indicadores de calidad.
Los **costos de fallas internas** se presentan como resultado de la calidad insatisfactoria detectada antes de entregar un producto al cliente; algunos ejemplos son los siguientes:

• *Costos del desperdicio y reproceso* o que incluyen material, mano de obra y gastos de administración.
• *Costos de las acciones correctivas,* que surgen del tiempo invertido en determinar las causas de las fallas y en corregir los problemas de producción.
• *Costos de degradación,* como los ingresos perdidos al vender un producto a un precio inferior, porque no cumple con las especificaciones.
• *Fallas en los procesos,* como el tiempo de inactividad de las máquinas y las reparaciones de equipos, que no estaban en los planes.

Los **costos de las fallas externas** ocurren cuando los productos de mala calidad llegan al cliente; de manera específica:
• *Costos debido a las quejas de los clientes y las devoluciones,* que incluyen el reproceso de los artículos devueltos, los pedidos cancelados y los costos de flete adicionales.

• *Costos de devolución de productos y reclamación de garantías,* que incluyen el costo de reparación o reemplazo, así como los costos administrativos relacionados.

• *Costos por responsabilidad del producto,* que resultan de acciones y demandas jurídicas.

Los expertos calculan que de 60 a 90 por ciento del total de los costos de calidad son resultado de fallas internas y externas, y la responsabilidad es de los directivos, aunque no es fácil que ellos las controlen. En el pasado, los directivos reaccionaban a los altos costos de las fallas incrementando la inspección. Sin embargo, este tipo de acciones sólo aumentan los costos de evaluación. El resultado general es poca, o ninguna, mejora en la calidad o la productividad.

En la práctica, un incremento en la prevención casi siempre genera mayores ahorros en todas las otras categorías de costos. En un escenario típico, el costo de reemplazar un componente de mala calidad en el campo podría ser de 500 dólares; el costo de reemplazo después del ensamble podría ser de 50 dólares; el costo de las pruebas y el reemplazo durante el ensamblaje podría ser de 5 dólares, y el costo de cambiar el diseño para evitar el problema quizá sólo sea de 50 centavos.

Es evidente que una mejor prevención de la mala calidad reduce los costos de las fallas internas, ya que se fabrican menos artículos defectuosos; los costos de las fallas externas también bajan. Además, se requiere de menor evaluación, porque los productos se hacen bien desde la primera vez. Sin embargo, como la producción casi siempre se considera a corto plazo, muchos directivos no entienden ni implementan estas ideas.

Una forma conveniente de informar los costos de calidad es a través de una segmentación por función organizacional, como se muestra en la figura 3.11. Esta matriz sirve para varios propósitos. Primero, permite a todos los departamentos reconocer sus contribuciones al costo de la calidad y participar en un programa del costo de la calidad. En segundo lugar, señala las áreas donde se manejan altos costos de la calidad y centra la atención en los esfuerzos por mejorar. Este informe se puede manejar con facilidad en una hoja de cálculo. A menudo, los

costos de la calidad se establecen como un *índice;* es decir, la razón del valor actual con el periodo de base.

Por ejemplo, si clasificamos los costos de las fallas internas desde el más alto hasta el más bajo, es posible que 70 u 80 por ciento de todos los costos se deban a sólo uno o dos problemas de manufactura. La identificación de estos "pocos costos vitales", como se les conoce, lleva a una acción correctiva que tiene alto rendimiento a un bajo costo. Esta técnica, llamada *análisis de Pareto,* la cual es una de las "siete herramientas del control de calidad".

Por ejemplo, suponga que los costos por fallas internas sobre un periodo de tiempo en particular, revelan lo siguiente:

	Ingeniería de diseño	**Compras**	**Producción**	…	**Finanzas**	…	**Contabilidad**	**Totales**
Costos de prevención Planeación de la calidad Capacitación y entrenamiento ….								
Costos de evaluación Instrumentos de prueba e inspección …								
Costos de fallas internas Desperdicio Reproceso ….								
Costos de fallas externas Devoluciones Costos de devolución ….								

Totales								

Figura 3.11 Matriz del costo de la calidad

Artículo	Monto
Desecho:	$ 8427
Vuelto a hacer:	$ 12 889
Acción correctiva:	$ 3200
Degradado:	$ 5164
Fallas del equipo:	$ 2101
Total	$ 31 781

Si esto lo organizamos de mayor a menor y se calcula el porcentaje para cada uno, se tiene:

Artículo	Monto	Porcentaje
Vuelto a hacer:	$12889	40.6
Desecho:	$ 8427	26.5
Degradado:	$ 5164	16.2
Acción correctiva:	$ 3200	10.1
Fallas del equipo:	$ 2101	6.6

Se puede observar que cerca del 67 por ciento de los costos de las fallas internas, resultan en trabajos repetidos o vueltos a hacer y desecho. Esto sugiere que la tecnología de producción es inadecuada, el suministro de materiales es malo o que la fuerza de trabajo quizá necesita un mejor entrenamiento. Esto puede ser mostrado con un análisis gráfico utilizando Excel® o cualquier otra hoja de cálculo. Los gerentes pueden investigar además para identificar la fuente del problema, corregido y reducir de modo significativo el origen de los costos.

Usando el análisis de Pareto, los costos del tiempo extra de calidad pueden ser analizados para identificar puntos que requieren de una atención significativa. Por ejemplo, el alza constante en los costos de las fallas internas y la reducción en los costos de evaluación podrían indicar un problema en el ensamble, las pruebas de mantenimiento del equipo o una ausencia de control sobre las partes compradas. Desde luego, esta información sólo indica las áreas que deben mejorar; no indica a los directivos cuáles son los problemas específicos.

En la mayoría de las empresas que participan en un programa de costo de la calidad, por lo regular, los directivos encuentran que los costos más altos ocurren en la categoría de las fallas externas, seguidos por los de las fallas internas, la evaluación y la prevención, en ese orden. Es evidente que el orden se debe invertir, es decir, la mayoría de los costos de calidad se deberían encontrar en la prevención, algunos en la evaluación, quizá una pequeña cantidad en las fallas internas y casi ninguno en las fallas externas. Por tanto, las empresas deben primero tratar de reducir a cero los costos de las fallas externas invirtiendo en las actividades de evaluación para descubrir el origen de las fallas y emprender una acción correctiva.

Conforme la calidad mejora, los costos de las fallas bajarán, y la cantidad de evaluación se puede reducir cambiando el énfasis hacia las actividades de prevención.

Costos de calidad en las organizaciones de servicios

La naturaleza de los costos de la calidad difiere entre las organizaciones de servicios y las de manufactura. Los costos tradicionales de las fallas externas, como las garantías y el apoyo en el campo son menos relevantes para los servicios que para la manufactura. Los costos relacionados con los procesos, como servicios al cliente y el personal que maneja las quejas, así como los clientes perdidos son más críticos.

Los costos de las fallas internas quizá no sean tan evidentes en los servicios como lo son en la manufactura. Por ejemplo, un pequeño distribuidor centró gran parte de su atención en minimizar los inventarios, al tiempo que trataba de mejorar el servicio. La empresa sabía que existían los pedidos no surtidos, pero creía que formaban parte de la naturaleza del negocio. Un análisis más detallado reveló la existencia de casi un pedido no surtido de cada cinco. Después de estudiar el proceso, se determinó que el costo de los pedidos no surtidos era de 30 dólares por transacción, lo que daba un costo anual de 200 000 dólares. Entre las razones estaban el hecho de que los proveedores no cumplían con las fechas de entrega, errores en los pedidos y otras operaciones sin valor agregado. Los costos de las fallas internas suelen ser mucho más bajos para las organizaciones de servicio

que tienen mucho contacto con el cliente y pocas oportunidades de corregir un error antes de que llegue al cliente. Para entonces, el error se convierte en una falla externa.

Las técnicas de muestreo y medición del trabajo se utilizan con frecuencia para recopilar los costos de calidad en las organizaciones de servicio. Por ejemplo, la medición del trabajo se puede utilizar para determinar cuánto tiempo pasa un empleado en diversas actividades relacionadas con la calidad. La proporción de tiempo invertido multiplicada por el salario del individuo representa un cálculo del costo de la calidad para esa actividad. Las encuestas entre consumidores y otros medios de retroalimentación del cliente también se usan para determinar los costos de calidad para los servicios. Sin embargo, en general, la naturaleza intangible de los resultados dificulta la contabilidad de los costos de calidad para los servicios.

Captación de los costos de calidad a través del costo basado en las actividades

La importancia de la calidad ha tenido impacto significativo en el papel que desempeñan los sistemas de contabilidad en los negocios. Los sistemas de contabilidad estándar casi siempre son capaces de proporcionar datos sobre los costos de calidad para la mano de obra directa, gastos de administración, desperdicio, gastos de garantías, costos de responsabilidad de los productos y mantenimiento, reparación y calibración del equipo de prueba. Sin embargo, la mayoría de los sistemas de contabilidad no están estructurados para la captura de información importante de los costos de calidad. Es necesario hacer un esfuerzo especial para determinar los costos como aquellos del esfuerzo de servicios, el diseño de los productos, el esfuerzo de ingeniería de corrección, el reproceso, la inspección durante los procesos y las pérdidas debido a los cambios en ingeniería. Algunos costos debido a fallas externas, como la ausencia de satisfacción de los clientes y los ingresos perdidos en el futuro, son imposibles de calcular con precisión. Aunque los costos de prevención son los más importantes, los costos de

evaluación, de fallas internas, fallas externas y prevención (en ese orden) casi siempre son más fáciles de obtener.

Los sistemas contables tradicionales se enfocaban en promover la eficiencia de la producción en masa, en especial la producción con pocos productos estándar y altos costos directos de mano de obra. Los sistemas tradicionales miden con precisión los recursos que se consumen en proporción con el número de unidades fabricadas de cada producto. Los productos actuales se caracterizan por una mano de obra mucho más barata y muchas actividades que consumen recursos no están relacionadas con el volumen de unidades producidas. Como resultado de la automatización, por lo general, la mano de obra directa representa sólo el 15 por ciento del costo de manufactura y puede ser de sólo 5 por ciento en los sectores industriales de alta tecnología. Mientras tanto, los costos de administración han aumentado a 55 por ciento o más, y se distribuyen en todos los productos que utilizan la misma fórmula.

Debido a estos cambios, los sistemas contables tradicionales presentan un panorama inadecuado de la eficiencia y la eficacia de la manufactura, y operan de manera deficiente al asignar los gastos de estos recursos de apoyo entre los productos individuales. Además, no dan ningún valor a elementos como el reproceso o los cuellos de botella que impiden el procesamiento. Como estos costos están ocultos, los directivos casi siempre tienen pocos recursos para reducidos.

El **costeo basado en las actividades** organiza la información por trabajo (o actividad) que consume los recursos y ofrece valor en un negocio. Con el tiempo, la gente que consume los recursos en el trabajo logra el valor que los clientes pagan. Algunos ejemplos de actividades serían mover, inspeccionar, recibir, enviar y procesar pedidos. Para tener una idea de estas actividades, los equipos multifuncionales de trabajadores, directivos y empleados de oficina delinean cada uno de los pasos de todos los procesos de negocios utilizando diagramas de flujo. En estos diagramas se señalan las operaciones que agregan valor y revelan aquellas que no lo hacen.

El costeo basado en las actividades asegura el gasto administrativo entre los productos y servicios que lo utilizan. Conocer los costos de las actividades apoya

los esfuerzos por mejorar los procesos. Una vez que las actividades se pueden relacionar con los productos o servicios individuales, queda disponible información estratégica adicional. Los efectos de las demoras y las deficiencias se vuelven evidentes. Entonces, la empresa se puede concentrar en reducir estos costos ocultos.

Con la nueva información que proporciona el costeo basado en las actividades, los directivos pueden tomar mejores decisiones acerca del diseño de productos, las mejoras a los procesos, los precios y la mezcla de productos. Entre otros beneficios se incluyen la facilidad para las actividades que buscan la mejora continua a fin de reducir los gastos de administración y la facilidad con que se determinan los costos relevantes. Por ejemplo, Caterpillar, Inc. Utilizó el costeo basado en las actividades para determinar el valor de los intangibles, como una mejor calidad y el tiempo más corto para llegar al mercado a fin de convencer al consejo de administración de que aprobara un esfuerzo de modernización con un valor de 2 000 millones de dólares. LTV incorporó el costeo basado en las actividades en su metodología integrada de administración de procesos. El departamento de contabilidad apoya al de manufactura y otros departamentos proporcionando información sobre los costos de los productos y las actividades operativas para evaluar el desempeño, identificar las deficiencias y evaluar los costos de calidad que surgen de las fallas externas e internas de los productos y requisitos de los clientes. El sistema ayuda a los directivos a integrar los requisitos de los clientes con las estrategias para mejorar los productos.

MEDICIÓN DE LAS GANANCIAS SOBRE LA CALIDAD

Los esfuerzos de calidad total deben llevar al logro de resultados sobresalientes en los negocios. Sin embargo, una iniciativa de calidad exitosa no garantiza el éxito financiero. (No obstante, muchos argumentan que, sin ella, una empresa está destinada a fracasar con el tiempo.) Muchas empresas no prestan suficiente atención a la recuperación financiera sobre las inversiones relacionadas con la calidad. La recuperación financiera no solamente muestra cuándo los esfuerzos van en dirección correcta, sino que también ayuda a identificar los cambios y mejoras que es necesario realizar para no seguir por el camino equivocado

durante mucho tiempo. Por ejemplo, el presidente de AT&T recibe un informe trimestral de cada unidad de negocios, que describe las mejoras en la calidad y sus respectivos impactos financieros.

Por tradición, la medición de las reducciones en los costos relacionados con la calidad a través del COQ era el método principal para documentar los beneficios de la calidad. Sin embargo, este enfoque sólo se concentra en la perspectiva interna de la calidad. En la actualidad, se presta mayor atención a la perspectiva externa y a la contabilidad en relación con los incrementos en los ingresos relacionados con una mejor calidad y la satisfacción del cliente. El equilibrio de los costos de calidad con los ingresos esperados se conoce como **recuperación sobre la calidad** (**ROQ**, por sus siglas en inglés). La ROQ se basa en cuatro principios importantes:

• *La.calidad es una inversión.* Por tanto, no es fundamentalmente diferente de las inversiones.en equipo o edificios.

• *Los esfuerzos de calidad deben ser financieramente responsables.* Esto se debe a que las empresas evalúan de esa manera otras inversiones, y los esfuerzos de calidad deben estar sujetos al mismo tipo de justificación financiera.

• Es *posible gastar demasiado en la calidad.* Es posible que los clientes no estén dispuestos a pagar los precios altos relacionados con los niveles de calidad más altos, o que los beneficios por las mejoras en los procesos no justifiquen el gasto.

• No *todos los gastos en la calidad tienen la misma validez.* Una mejora en el diseño del producto o la respuesta al cliente puede ser mucho más importante, desde el punto de vista estratégico, que mejorar la capacidad de un proceso menor en la planta de manufactura.

Las bases para este enfoque se derivan del modelo que relaciona la calidad y la rentabilidad mostradas, y que propone que la mejora en la calidad da lugar a mayor recuperación financiera a través de las mejoras en la satisfacción y lealtad de los clientes. A menudo se utilizan métodos estadísticos avanzados para estimar estos efectos y las implicaciones financieras. Pensar en la calidad como una inversión financieramente justificable es fundamental para la selección de proyectos en Six Sigma.

La ROQ se aplicó al evaluar un programa de entrenamiento para mejorar las habilidades de servicios al cliente del personal de Chase Manhattan Bank. Los resultados deseados del programa incluían la capacidad del personal para identificar el comportamiento que crea una experiencia positiva memorable para el cliente, analizar las interacciones con los clientes, identificar lo que quieren y entender la naturaleza de un cuidadoso servicio a clientes. Mediante el uso de un grupo de prueba y control, estimando el valor presente neto de la pérdida que se evitó al satisfacer a los clientes como resultado del programa de entrenamiento en 471 000 dólares, y comparando esta cifra con el valor presente neto de los costos de entrenamiento, 326 000 dólares, se calculó que la recuperación sobre la inversión era de 44.4 por ciento. Este análisis demostró que un programa de entrenamiento en todo el sistema sería productivo. Los resultados se comunicaron a los directivos del banco y la empresa siguió adelante con el programa de ampliación del entrenamiento. **”James R. Evans/ William M. Lindsay, Administración y Control de la Calidad, CENGAGE Learning.**

CALIDAD TOTAL EN LAS ORGANIZACIONES

Aunque Hyundai Motor Co. dominaba el mercado automotriz coreano, en el extranjero tenía mala reputación en cuanto a la calidad, con puertas que no cerraban bien, bastidores que hacían ruido y motores que entregaban aceleración deficiente. Y la empresa estaba perdiendo dinero. Cuando Chung Mong Koo se convirtió en el director ejecutivo en 1999, visitó la planta de Hyundai en Ulsan. Para sorpresa de sus empleados, quienes rara vez habían visto a un presidente del consejo, Chung se encaminó con paso firme hasta el área de producción y solicitó que lo dejaran ver debajo del cofre de un Sonata sedán. Lo que vio no le gustó: cables sueltos, una maraña de mangueras, pernos pintados de cuatro colores diferentes; el tipo de descuido que no se observaría en un automóvil japonés. En ese momento, Indicó al jefe de la planta que todos los tornillos y tuercas se pintaran de negro y ordenó a los trabajadores que no dejaran salir un auto de la planta hasta que todas sus partes estuvieran en perfecto orden. "Es preciso que regresen a lo básico. La única forma en que podemos sobrevivir es elevar la calidad hasta el nivel de Toyota", afirmó irritado. Además de invertir

mucho en investigación y desarrollo, creó el responsable principal de control de calidad, quien estudió los manuales de calidad de los fabricantes de automóviles estadounidenses y japoneses y elaboró uno para la compañía en el que se establecía con claridad quién era el responsable de cada paso de manufactura, qué resultado se requería y quién comprobaba y confirmaba los niveles de desempeño. El año siguiente, las ventas en Estados Unidos aumentaron 42 por ciento y, en 2004, Hyundaí saltó al segundo lugar en el J. D. Powers and Associates lnitial Quality Study, al parejo con Honda y detrás de Toyota. La calidad de Hyundai mejoró en 62 por ciento en 1998, que fue casi el doble del promedio en la industria.

En Estados Unidos la administración moderna de la calidad se inició en el sector de la manufactura y hoy día en muchos países en desarrollo, como Corea, la administración de la calidad está emergiendo fuertemente en ese mismo sector. Para la década de 1990, muchos fabricantes en Estados Unidos empezaron a prestar mayor atención a la calidad del servicio. Descubrieron que ésta es tan importante para conservar a los clientes como los productos tangibles que compran y centraron su atención en procesos de apoyo como entrada de pedidos, entregas y respuesta a las quejas. Las empresas dedicadas exclusivamente a los servicios empezaron a pensar en términos de "cero deserciones" y a investigar nuevas formas de fomentar la lealtad del cliente. Por ejemplo, un hospital en Detroit promete atender a los pacientes que lleguen a la sala de urgencias en 20 minutos o menos. Si no cumple con su promesa, la atención será gratuita. Frases publicitarias como "Haremos lo que sea necesario" y las garantías de servicio son la norma en el entorno competitivo actual. No obstante, muchos sectores de servicio, como las aerolíneas y las comunicaciones inalámbricas tienen problemas con la calidad. Hoy en día, el concepto de la calidad ha llegado más allá de sus orígenes en la manufactura y se ha vuelto un enfoque importante en la educación, el cuidado de la salud y las agencias gubernamentales. Los siguientes "Perfiles de la calidad" ofrecen dos ejemplos de administración de la calidad en la educación y el cuidado de la salud.

Para todos los tipos de organizaciones, la calidad es absolutamente vital para conservar los clientes, mantener la rentabilidad y aumentar la participación en el

mercado. En este capítulo se estudia el papel de la calidad en las organizaciones de manufactura y de servicios, grandes y pequeñas, incluidas la educación, el cuidado de la salud, organizaciones no lucrativas y el gobierno. Empezamos con la importancia de ver a las organizaciones como sistemas y a concentrarnos en el papel que desempeña cada componente de una organización en el logro de una alta calidad. Después, se presentan diversos ejemplos de esfuerzos hacia la calidad en estas organizaciones.

CALIDAD Y PENSAMIENTO SISTÉMICO

Un sistema de producción está compuesto de muchos subsistemas más pequeños que interactúan entre sí. Por ejemplo, un restaurante de McDonald' s es un sistema que incluye el subsistema tomador de pedidos y cajero, el subsistema parrilla y preparación de los alimentos, el subsistema del servicio en el auto, el subsistema de compras y el subsistema de capacitación. Estos subsistemas están vinculados como clientes internos y proveedores. De modo similar, toda organización está compuesta por diversas funciones individuales, las cuales a menudo son vistas como unidades independientes en un organigrama. Sin embargo, los administradores deben ver la organización como un todo y concentrarse en los importantes vínculos organizacionales entre estas funciones. Por ejemplo, considere los elementos de infraestructura de un sistema de calidad

total: Administración de relación con el cliente, liderazgo y planificación estratégica, administración de recursos humanos, administración de procesos y administración de la información y el conocimiento. La alta dirección debe enfocarse hacia las directrices estratégicas y los clientes; las estrategias deben estar vinculadas con los planes de recursos humanos y procesos importantes a fin de alinear eficazmente los recursos; los aspectos de recursos humanos, como capacitación y diseño del sistema de trabajo, deben apoyar los procesos que permiten la manufactura de los productos o prestación de los servicios; y la administración de la información y el conocimiento proveen los medios para obtener una retroalimentación útil que permite entender mejor la relación entre la estrategia y la ejecución, así como los medios para la mejora.

Russell Ackoff, reconocida autoridad en el pensamiento sistémico, explicó así la importancia de este pensamiento:

... una combinación de las mejores prácticas en cada una de las partes de un sistema tomada de manera independiente no produce el mejor sistema; es *posible que ni siquiera* se *obtenga uno adecuado. Una empresa que tiene* 12 *plantas, donde cada una de ellas produce las mismas variaciones del mismo tipo de bebida, dividió el proceso de producción en* 15 *pasos. Elaboró un diagrama donde* se *muestra cada fábrica (una columna) y cada uno de los* 15 *pasos (renglones). Luego, llevó a cabo un estudio para determinar el costo de cada paso en cada fábrica (estudio muy costoso), mediante el cual identificó, para cada paso, la fábrica con el menor costo. En cada una de las plantas, la empresa trató de reemplazar los pasos que no* se *lograban al menor costo con aquellos que* se *utilizaban en las instalaciones que sí lo lograban. De haber funcionado, cada fábrica produciría con pasos en los que* se *lograban los menores costos, ¡pero no funcionó! Los pasos que manejaban costos más bajos no funcionaron en conjunto y el resultado fue unos cuantos cambios insignificantes que no justificaron el costo del ejercicio.*

Ackoff concluyó que la administración debe enfocarse en las interacciones de partes y del sistema con otros sistemas y no en las acciones de partes tomadas por separado.

A medida que se analice la calidad en la manufactura, los servicios y otros sectores, piense en cuán importante es una perspectiva de sistemas para el logro de la calidad.

CALIDAD EN LA MANUFACTURA

Durante algún tiempo han existido en la manufactura sistemas de aseguramiento de la calidad bien diseñados. La transición hacia una organización impulsada por los clientes ha causado cambios fundamentales en las prácticas de manufactura, cambios que son evidentes sobre todo en áreas como diseño de productos, administración de recursos humanos y relaciones con los proveedores. Por

ejemplo, en las actividades de diseño de productos ahora se integran en forma estrecha operaciones de mercadotecnia, ingeniería y manufactura.

Las prácticas de recursos humanos se concentran en facultar a los empleados para que recopilen y analicen datos, tomen decisiones operativas cruciales y acepten la responsabilidad de las mejoras continuas, pasando así la responsabilidad de la calidad del departamento de control de calidad al piso de producción. Los proveedores se han convertido en socios en el diseño de productos y en los esfuerzos de manufactura. La industria automotriz apoyó muchos de estos esfuerzos en la década de 1980 cuando Ford, GM y Chrysler obligaron a su red de proveedores a mejorar la calidad.

Al hacerlo, los esfuerzos de calidad se llevaron a toda la cadena de suministro automotriz.

Entre los líderes en calidad ejemplares en el sector de manufactura se incluyen grandes empresas como Boeing, Medrad, Eastman Chemical Company, Motorola y Solar Turbines Incorporated; y empresas pequeñas como Stoner, Inc., Sunny Fresh Foods, KARLEE, Texas Nameplate Company, Trident Precision Manufacturing y The Barna Companies. A lo largo de este libro se describen las principales prácticas de éstas y otras empresas de manufactura sobresalientes.

Sistemas de manufactura

En la figura 3.12 se ilustra un sistema de manufactura representativo y las relaciones clave entre sus funciones. A continuación se describen los intereses de cada componente del sistema en relación con la calidad.

Mercadotecnia y ventas Milton Hershey, fundador de Hershey Foods Corporation, entendió la relación entre calidad y ventas. Hershey solía decir: "Denles calidad. Ésa es la mejor publicidad del mundo." Durante los primeros 68 años en que participó en el mundo de los negocios, Hershey Foods no tuvo necesidad alguna de anunciar sus productos en los medios masivos." La mercadotecnia y las ventas conllevan mucho más que el hecho de anunciarse y vender. En la actualidad, los empleados de mercadotecnia y ventas tienen

responsabilidades importantes en relación con la calidad. Estas responsabilidades incluyen conocer los productos y las características de los productos que los clientes desean, así como conocer los precios que los consumidores están dispuestos a pagar por ellos. Esta información permite a una empresa definir los productos adecuados al uso que se les dará y que pueden producirse dentro de las limitaciones tecnológicas y de presupuesto de la organización. Una investigación de mercado eficaz y la solicitud activa de retroalimentación del cliente son necesarias para desarrollar productos de calidad. Los vendedores pueden ayudar a obtener retroalimentación de los clientes acerca del desempeño de un producto y transmitirla a los diseñadores e ingenieros.

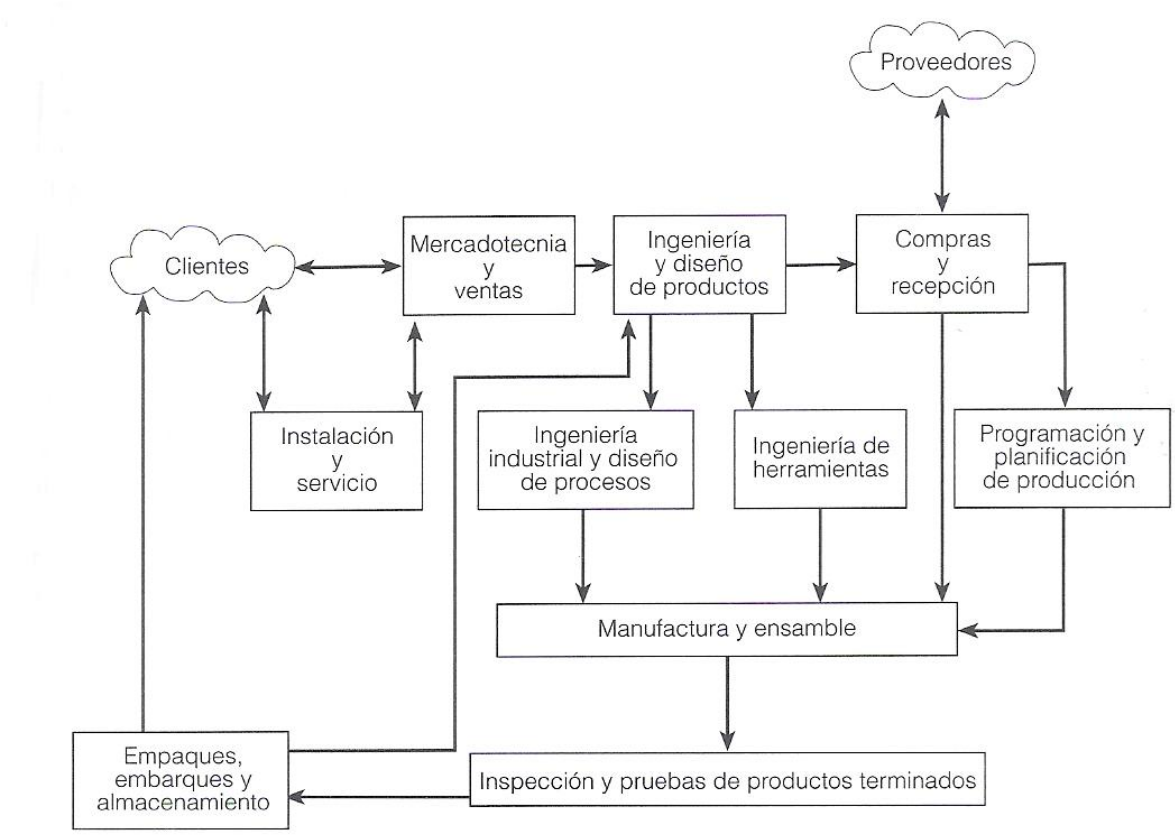


Figura 3.12 Relaciones funcionales en un sistema de manufactura representativo.

Asimismo, deben ayudar a asegurar que los clientes reciban el apoyo adecuado y se sientan totalmente satisfechos.

Ames Rubber Corporation, con sede en Hamburg, Nueva Jersey, produce rodillos de hule que se usan para alimentar papel, transferir tóner y aplicar el tóner en el papel en máquinas para oficina como copiadoras, impresoras y máquinas de escribir. Todos los productos se hacen sobre pedido según el diseño y las especificaciones del cliente. Sus garantías están entre las mejores en la industria e incluyen, en caso de que Ames no cumpla con las especificaciones, un reembolso de la parte de los costos de desarrollo que corresponde al cliente para partes prototipo. Los representantes de ventas prestan mucha atención a aspectos como el volumen de trabajo que un cliente, o un posible cliente, espera manejar; las características de producto que el cliente busca y los requisitos de costo, servicio y entrega del cliente. El departamento de ventas de Ames también lleva a cabo encuestas trimestrales sobre la satisfacción de los clientes y encuestas mensuales de contacto con el cliente. En las encuestas de satisfacción del cliente se recopilan datos en las áreas de productos, servicios, información y relaciones; en las encuestas de contacto con el cliente, que se manejan como conversaciones informales, se investigan la calidad, el costo, la entrega y el servicio. La empresa utiliza toda esta información para mejorar la satisfacción del cliente.

Ingeniería y diseño de productos. Los productos con ingeniería deficiente fracasan en el mercado porque no satisfacen los requisitos del cliente. Por otro lado, existe la posibilidad de que los productos con exceso de ingeniería, es decir, aquellos que exceden los requisitos del cliente, no encuentren un mercado rentable. Por ejemplo, a principios de la década de 1990, los fabricantes automotrices japoneses descubrieron que pocos clientes estaban dispuestos a pagar por algunas de las características de lujo que habían diseñado en sus autos como componentes estándar. El exceso en la ingeniería crea también una complacencia que da lugar a mala calidad. Los procesos de manufactura mal diseñados dan como resultado baja calidad o costos más altos. Un buen diseño ayuda a prevenir los defectos de manufactura y los errores de servicio. Además, evita llevar a cabo prácticas de inspección que no aumentan el valor y que dominan gran parte de la industria estadounidense.

Motorola, pone énfasis considerable en mejorar la calidad de manufactura a través de sus actividades de diseño de productos y procesos. Motorola establece una meta ambiciosa de *calidad Six Sigma* (nivel de calidad que representa no más de 3.4 defectos por millón de oportunidades) en cada proceso de la empresa. Para lograr esta meta, Motorola sabe que antes de fabricar un producto debe determinar cuáles son las características que van a satisfacer a los clientes (función de mercadotecnia); decidir si estas características se pueden lograr a través del diseño del producto, el proceso de manufactura o los materiales utilizados; desarrollar tolerancias de diseño que aseguren el desempeño exitoso del producto; realizar medidas para determinar variaciones de proceso a partir de especificaciones existentes; y, por último, afinar el diseño del producto, el proceso de manufactura o ambos, a fin de lograr los resultados deseados.

Compras y recepción La calidad de las partes y servicios adquiridos, así como la prontitud en su entrega son cruciales. El departamento de compras puede ayudar a una empresa a lograr la calidad si lleva a cabo lo siguiente:

• Elegir proveedores conscientes de la calidad.

• Asegurar que las órdenes de compra definan con claridad los requisitos de calidad que especifican la ingeniería y el diseño de productos.

• Vincular al personal técnico del comprador y el proveedor para diseñar productos y resolver problemas técnicos.

• Establecer relaciones de largo plazo con los proveedores basadas en la confianza.

• Proporcionar a los proveedores capacitación para el mejoramiento de la calidad.

• Informar a los proveedores cualquier problema que se presente con sus productos.

• Mantener una comunicación adecuada con los proveedores en relación con los requisitos de calidad y los cambios en el diseño.

El gerente de una planta estadounidense que abastecía material a un fabricante japonés de dispositivos semiconductores para aplicaciones electrónicas presentó un ejemplo de la conciencia en la calidad de clientes japoneses a un grupo de universitarios. El directivo estadounidense estaba orgulloso, y con razón, de tener el material de mejor calidad de este tipo disponible de cualquier proveedor de Estados Unidos, razón por la cual su compañía había sido elegida. Sin embargo, cuando la empresa japonesa sometió a pruebas el primer embarque de 9 millones de partes, se molestó mucho por la falta de calidad e informó a la empresa estadounidense que tendría que esforzarse o sería sustituida por un proveedor japonés. En la inspección se detectaron cinco partes defectuosas en el envío total!

El departamento de recepción de embarques es el vínculo entre compras y producción. Su función consiste en asegurar que los artículos entregados tengan la calidad especificada en el contrato de compra, tarea que realiza con base en diversas políticas de inspección y prueba. Si el material que llega es de alta calidad, no es necesario llevar a cabo inspecciones y pruebas extensivas. En la actualidad, muchas empresas piden a sus proveedores que ofrezcan pruebas de que sus procesos producen en forma consistente productos de una calidad específica y las compañías dan preferencia a aquellos que así lo hacen.

La calidad de los materiales y las partes que llegan se vuelve más importante conforme aumenta el uso de la automatización flexible. Muchas empresas estadounidenses han puesto en práctica el concepto de administración japonesa de la programación justo a tiempo *(just in time,* JIT). Esta programación requiere que los inventarios se reduzcan a un mínimo. A fin de mantener el ritmo de la producción, la calidad de los materiales debe ser alta porque no hay inventarios estabilizadores disponibles para evitar la inactividad. Por ejemplo, Motorola ofrece ayuda y capacitación extensa a sus proveedores a fin de mejorar sus capacidades y la calidad, pero a cambio espera resultados. A los proveedores se les evalúa de acuerdo con la calidad del producto entregado y la puntualidad de las entregas. Sólo conserva a los proveedores que cumplen con los requisitos de calidad superior de la empresa.

Programación y planificación de producción Un plan de producción especifica los requisitos de producción de corto y largo plazos para llenar los pedidos de los clientes y satisfacerla demanda anticipada. Los materiales, herramientas y equipo adecuados deben estar disponibles en el momento y lugar apropiados a fin de mantener un flujo continuo de producción. Se ha demostrado que los conceptos modernos de programación y planificación de la producción, como la programación JIT, dan lugar a mejoras en la calidad y ahorros en los costos.

Manufactura y ensamble. El papel de la manufactura y el ensamble para producir calidades asegurar que el producto esté hecho de manera correcta. Como se dijo antes, es obvio el vínculo con el diseño y la ingeniería de procesos; la manufactura no se puede llevar a cabo sin un buen diseño de producto y una tecnología de procesos adecuada. Sin embargo, una vez en producción, no se debe aceptar ningún defecto. Si ocurren es preciso hacer todos los esfuerzos necesarios para identificar sus causas y eliminados. La inspección de artículos defectuosos es costosa y representa una pérdida de tiempo.

Por ejemplo, Ames Rubber Corporation produce más de 17000 partes hechas a la medida por medio de una gran variedad de operaciones de manufactura, como fundición, extrusión, rocío y moldeo. Cada operación requiere de métodos y dispositivos de medición apropiados que permitan supervisar con detenimiento el proceso de manufactura. El equipo de medición y pruebas avanzado, como los dispositivos de medición láser, garantiza el control de procesos en línea. Todo el personal de manufactura de Ames debe entender la importancia y el uso de estadísticas para controlar los procesos. En cada paso de producción, operadores, inspectores y supervisores recopilan y evalúan datos sobre el desempeño. Esta práctica permite a Ames detectar de inmediato desviaciones de los procesos y realizar los ajustes necesarios.

Ingeniería de herramientas. La función de esta ingeniería es garantizar el diseño y mantenimiento de herramientas que se utilizan en la manufactura y la inspección. Las herramientas de manufactura desgastadas originan partes defectuosas y los dispositivos de medición mal calibrados proporcionan información errónea. Éstos y otros problemas con las herramientas dan lugar a

una mala calidad e ineficiencia. Los ingenieros de Ames Rubber emplean técnicas de análisis estadístico para evaluar la mecanización y el equipo y llevan a cabo estudios periódicos para asegurarse de que Ames sigue cumpliendo o excede los requisitos del producto. Si no es así, el resultado son desechos en exceso y altos costos.

Ingeniería industrial y diseño de proceso. El trabajo de los ingenieros industriales y los diseñad ores de proceso consiste en colaborar con los ingenieros de diseño de producto para desarrollar especificaciones reales. Además, deben seleccionar tecnologías, equipo y métodos de trabajo apropiados para fabricar productos de calidad. Por ejemplo, Nissan Motor Manufacturing tiene un sistema de pintura totalmente automatizado, en el cual los robots son programados para moverse junto con los autos. Como los robots siempre saben dónde está la carrocería, el robot se detendrá si la línea se detiene, pero el ciclo de pintura continúa hasta terminar como medio para lograr que la calidad de la pintura sea consistente. Los ingenieros industriales trabajan también en el diseño de instalaciones y en la distribución del equipo para lograr un flujo de producción sin problemas y reducir las probabilidades de que se dañen los productos. La ingeniería industrial como profesión ha estado incorporando los tipos de actividades que se enseñan con mayor frecuencia en las escuelas de administración.

Inspección y pruebas de productos terminados. Si la calidad se integra en el producto de manera apropiada, la inspección será innecesaria a menos que sea para propósitos de auditoría y pruebas de funcionamiento. Los componentes electrónicos, por ejemplo, se someten a intensas pruebas de "quemado" mediante las cuales se asegura una operación adecuada y se eliminan elementos de poca duración. En cualquier caso, la inspección se debe emplear como medio para recopilar información que es posible utilizar para mejorar la calidad y no sólo para eliminar los elementos defectuosos.

Empaque, embarques y almacenamiento Incluso los artículos de buena calidad que salen de la planta pueden estar etiquetados en forma incorrecta o sufrir algún

daño durante su transporte. El empaque, embarque y almacenamiento (que a menudo se conocen como actividades logísticas) son las funciones que protegen la calidad después de que se producen los bienes. La codificación y la fecha de caducidad exactas de los productos son importantes para su rastreo (por lo común para requisitos legales) y para los clientes.

Instalación y servicio Los productos deben ser usados de forma correcta para beneficiar al cliente. Los usuarios deben entender un producto y tener las indicaciones adecuadas para su correcta instalación y operación. Si ocurre algún problema, la satisfacción del cliente depende de un buen servicio postventa. En una empresa, los conductores de los camiones vieron la oportunidad de hacer algo más que entregar los materiales en los andenes de recepción. Donde las relaciones laborales lo permiten, hacen entregas en lugares específicos dentro de las plantas y ayudan a descargar, almacenar y contar el inventario. Muchas empresas especifican normas, para el servicio al cliente, similares a las dimensiones y tolerancias prescritas para bienes manufacturados. Por ejemplo, se espera que los socios lleguen a tiempo a todas las citas y contesten a los clientes sus llamadas telefónicas en un periodo establecido. Son responsables también de conocer y cumplir los reglamentos y normas de sus clientes, sobre todo los relacionados con los procedimientos de seguridad.

Actividades de apoyo a los negocios

Además de las funciones relacionadas directamente con la manufactura del producto, son necesarias ciertas actividades de apoyo para lograr la calidad. A continuación se realiza un análisis de algunas de ellas.

Finanzas y contabilidad La función de finanzas tiene la responsabilidad de obtener fondos, controlar su uso, analizar las oportunidades de inversión y garantizar que la operación de la empresa sea eficaz en relación con los costos y, de modo ideal, rentable. Las decisiones financieras afectan las compras de equipo de manufactura, las políticas de control de costos, las decisiones de precios por volumen y casi todas las áreas de la organización. Finanzas debe autorizar presupuesto suficiente para equipo, capacitación y otros medios de aseguramiento de la calidad. Los estudios financieros ayudan a exhibir los costos de tener una

mala calidad y las oportunidades para reducirla. Los datos de contabilidad son útiles para identificar áreas donde se requiera mejorar la calidad y llevar un seguimiento del progreso de los programas de mejora de la calidad. Además, las estrategias contables inapropiadas pueden ocultar la mala calidad.

El personal de finanzas y contabilidad que tiene contacto con los clientes puede influir de modo directo en el servicio que presta su empresa. En muchas de ellas, por ejemplo, los empleados grafican la exactitud de la facturación, el tiempo necesario para procesar las facturas y el tiempo requerido para el pago de cuentas. Además, aplican técnicas de mejoramiento de la calidad a fin de mejorar sus propias operaciones. Por ejemplo, el personal de finanzas de Motorola redujo de un mes a cuatro días el tiempo necesario para llevar a cabo el cierre contable.

Aseguramiento de la calidad Debido a que algunos gerentes carecen de la experiencia técnica requerida para aplicar las pruebas estadísticas o los análisis de datos necesarios, especialistas técnicos (por lo regular, en el "departamento de aseguramiento de la calidad") les ayudan en estas tareas. Los especialistas en aseguramiento de la calidad llevan a cabo estudios estadísticos especiales y análisis, y pueden ser asignados para trabajar con cualquiera de las funciones de manufactura o apoyo. Se debe recordar que el departamento de aseguramiento de la calidad de una empresa no puede garantizar la calidad en la organización. Su función consiste en ofrecer una guía y apoyar el esfuerzo total de la empresa hacia el logro de esta meta.

Servicios jurídicos. El departamento legal de una empresa intenta garantizar que ésta cumpla con las leyes y normas acerca de aspectos como etiquetado de productos, empaque, seguridad y transporte; diseña y redacta sus garantías en forma apropiada; cumple con los requisitos contractuales y dispone de procedimientos y documentación adecuados en caso de demandas por responsabilidades en su contra. El rápido incremento de las demandas ha convertido los servicios jurídicos en un aspecto importante del aseguramiento de la calidad.

Es evidente que la manufactura es un sistema complejo, el cual se puede considerar como una "cadena de clientes". Esta estrategia hace pensar que un

enfoque de la calidad promovido por el cliente debe contar con la participación de toda la empresa. En realidad, la calidad es responsabilidad de todos.

CALIDAD EN LOS SERVICIOS

Un servicio puede ser tan sencillo como manejar una queja o tan complejo como aprobar la hipoteca de una casa. El North American Industry Classification System (NAICS) describe a las organizaciones de servicio como aquellas que

... se dedican principalmente a prestar gran variedad de servicios a personas, negocios o *dependencias de gobierno y otras organizaciones. Se incluyen los hoteles y otros lugares de alojamiento, establecimientos que ofrecen servicios personales, de negocios, de reparación y diversión; los servicios de salud, jurídicos, de ingeniería y otros servicios profesionales; las instituciones educativas, las organizaciones que ofrecen membresías y otros servicios diversos.*

Esta clasificación de las organizaciones de servicios incluye todas aquellas que no son de manufactura, excepto los sectores industriales como el agrícola, minero y de la construcción. Por lo general, se incluye también en esta categoría empresas de bienes raíces, servicios financieros, ventas al detalle, transporte y servicios públicos.

Los negocios de servicios puros entregan productos intangibles. Como ejemplos se podría mencionar un despacho de abogados, cuyo producto es la asesoría legal y una clínica de salud, cuyo producto es el alivio y una mejor salud. Sin embargo, el servicio es un elemento clave para muchas empresas de manufactura tradicionales. Por ejemplo, fabricantes como IBM y Xerox ofrecen servicios de mantenimiento y asesoría, que quizá sean más importantes para el cliente que sus productos tangibles.

El sector de servicios creció con rapidez en la segunda mitad del siglo xx. En 1945,22.99 millones de personas trabajaban en sectores industriales de servicios y 18.5 millones en sectores de producción de bienes. Para mediados de 1997, 97.66 millones de empleados trabajaban en sectores de servicios, mientras que el número de empleados en los sectores de transformación sólo aumentó a 24.71 millones. En la actualidad, en Estados Unidos, más de 80 por ciento de los

trabajadores no agrícolas trabajan en servicios, y más de la mitad de los empleos en las industrias de manufactura se relacionan con los servicios. En la página Web del Bureau of Labor Statístics, en http://www.bls.gov / encontrará más información en relación con las estadísticas de mano de obra actuales de este tipo.

El sector de servicios empezó a reconocer la importancia de la calidad varios años después que el de manufactura. Este retraso se puede atribuir al hecho de que los sectores de servicios no enfrentaron la misma intensa competencia extranjera que los de manufactura. Otro factor es la elevada rotación en los empleos del sector de servicios que, por lo regular, son menos remunerados que los de manufactura, en particular los que requieren pocas habilidades. Los cambios constantes en el personal dificultan el establecimiento de una cultura para la mejora continua. Asimismo, la naturaleza de la calidad cambió de un enfoque en los defectos de los productos a lograr la satisfacción del cliente.

Algunas de las empresas sobresalientes en Estados Unidos en el sector servicios en cuanto a sus esfuerzos hacia el mejoramiento de la calidad son grandes organizaciones como DynMcDermott, Caterpillar Financial Services, FedEx y The Ritz-Carlton Hotel Company, L.L.c. y empresas pequeñas, como Custom Research Inc., Park Place Lexus y Pal's Sud den Service.

La importancia de la calidad en los servicios no se puede sobrevalorar. Estudios realizados muestran que las empresas pueden aumentar sus utilidades en casi 100 por ciento si retienen sólo 5 por ciento más de sus clientes que sus competidores. Esta notable diferencia se debe a que el costo de adquirir nuevos clientes es mucho más alto que los costos relacionados con conservarlos. Las empresas con clientes leales de mucho tiempo (incluso con costos unitarios más altos y menor participación en el mercado) superan financieramente a sus competidores, que presentan una rotación de clientes más elevada.

Las definiciones de calidad aplicables a los productos manufacturados se aplican también en el caso de los productos de servicio. La naturaleza del servicio implica que debe responder a las necesidades del cliente; es decir, el servicio debe "satisfacer o exceder las expectativas del cliente". Estas expectativas se deben traducir en estándares de desempeño y especificaciones similares a las normas de conformidad que rigen las actividades de manufactura. Por ejemplo, en un

restaurante de servicio rápido se esperaría que una comida completa se sirviera en 5minutos. Sin embargo, en un restaurante fino se tendría que esperar 10 a 15 minutos entre cada platillo y es posible que el servicio sea considerado deficiente si el tiempo entre platillos es muy corto.

Contrastes con la manufactura

La producción de servicios difiere de la manufactura en varios aspectos, y estas diferencias representan implicaciones importantes para la administración de la calidad. A continuación describimos las más significativas.

1. Con frecuencia es difícil identificar y medir las necesidades de los clientes y los estándares de desempeño, sobre todo porque los clientes definen cuáles son y cada cliente es diferente.
2. Por lo regular, la producción de servicios requiere un mayor grado de personalización que la manufactura. Médicos, abogados, vendedores de seguros y empleados de servicios de alimentación deben adaptar sus servicios a cada uno de sus clientes. En la manufactura, la meta es la uniformidad.
3. El resultado de muchos sistemas de servicios es intangible, mientras que la manufactura produce productos tangibles y visibles. La calidad de la manufactura se puede evaluar comparándola con las especificaciones de diseño de la empresa (por ejemplo, la profundidad de un corte debe ser de 0.125 pulgadas), pero la calidad del servicio sólo se puede medir comparándola con las expectativas subjetivas y nebulosas y las experiencias pasadas de los clientes. (¿Cuál es una "buena" experiencia de ventas?) Asimismo, el cliente puede "poseer y conservar" un producto fabricado, pero sólo recuerda el servicio. El fabricante puede retirar o reemplazar bienes manufacturados, pero un mal servicio solo se puede seguir mediante disculpas y reparaciones.
4. Los servicios se producen y consumen al mismo tiempo, mientras que los bienes manufacturados se producen antes de su consumo. Además, muchos servicios se deben llevar a cabo según la conveniencia del cliente. Por tanto, no es posible almacenados, catalogados o inspeccionados antes de su entrega, como en el caso de los productos manufacturados. También, es necesario prestar

mucha atención a la capacitación y la integración de la calidad en el servicio como medios de asegurar la calidad.

5. Por lo común, los clientes participan en el proceso de servicio y están presentes mientras se lleva a cabo, en tanto que la manufactura se realiza lejos del cliente. Por ejemplo, los clientes de un restaurante de servicio rápido hacen su pedido, llevan su comida a la mesa y se espera que limpien la mesa al terminar de comer.

6. Por lo general, en los servicios hay un trabajo intensivo, mientras que en la manufactura es de capital intensivo. La calidad de la interacción humana es un factor vital para los servicios que requieren contacto entre personas. Por ejemplo, la calidad del cuidado en un hospital depende en gran medida de las interacciones entre pacientes, enfermeras, médicos y otros empleados. Los bancos saben que la amabilidad de los cajeros es un factor clave para conservar a sus clientes. Por tanto, el comportamiento y la moral de los empleados de servicios son cruciales para ofrecer una experiencia de calidad.

7. Muchas organizaciones de servicios deben manejar gran cantidad de operaciones con sus clientes. Por ejemplo, en un determinado día de negocios, el Royal Bank of Canada procesa más de 5.5 millones de transacciones para 7.5 millones de clientes a través de 1 600 sucursales y más de 3 500 cajeros automáticos y FedEx maneja millones de envíos al día en todo el mundo. Estos volúmenes tan altos aumentan las probabilidades de error.

Los resultados de una encuesta realizada a mediados de la década de 1990 demostraron que en la mayor parte de las pequeñas empresas de servicios no había ninguna iniciativa de calidad total, y muchos entrevistados creían que las únicas características del servicio, según se describían, eran contrarias a la capacidad de definir la calidad y medida en forma clara y que es difícil entender y satisfacer las expectativas de los clientes porque éstos casi nunca completan una especificación formal del tipo, cantidad y calidad del servicio requerido. Estas creencias hacen pensar que muchas empresas de servicios no se han esforzado por entender bien la naturaleza de la calidad total y sus posibles beneficios, así como las formas en que se pone en práctica con eficacia.

Componentes de la calidad del sistema de servicios

Muchas organizaciones de servicios, como líneas aéreas, bancos y hoteles tienen sistemas de calidad bien desarrollados. Estos sistemas empiezan con un compromiso hacia los clientes. Por ejemplo, Amazon.com ha iniciado muchas estrategias innovadoras para aumentar la satisfacción del cliente, que van desde el diseño de un sitio Web fácil de usar hasta el llenado rápido de pedidos.

La calidad del servicio se puede considerar desde una perspectiva análoga a la manufactura; por ejemplo, los estándares técnicos, corno los componentes de una habitación de hotel bien distribuida, la velocidad de una operación de servicio o la exactitud de la información. Sin embargo, es más difícil manejar características de calidad intangibles, porque casi siempre dependen del desempeño y comportamiento de los empleados. Desde luego, esta dependencia no implica que estos factores no sean importantes en la manufactura, pero tienen importancia especial en los servicios, así corno la tecnología de ingeniería la tiene en la manufactura.

Los dos motores más importantes de la calidad del servicio son las personas y la tecnología. Al discutir la selección de la revista *Fast Company* de las mejores compañías enfocadas al cliente, el editor John Byrne expresó:

¿Qué nos enseñan estas compañías y las personas que las manejan? Primero, los líderes deben ser campeones de la experiencia del cliente. Mediante ejemplo y énfasis, deben establecer altas expectativas para satisfacer a los clientes en sus organizaciones. Segundo, la empatía del empleado es lo que crea el servicio distintivo. No basta con poner una cara feliz. Nuestros campeones del cliente entienden que sus empleados deben conocer qué se siente estar del otro lado del mostrador. Y si bien, la tecnología es con frecuencia central para proveer una experiencia de cliente superior, se debe usar para beneficiar a los clientes, no sólo para reemplazar el elemento humano ... Fomentar la productividad y tratar bien a los clientes no son acciones mutuamente excluyentes:"

Empleados Los clientes evalúan un servicio sobre todo por la calidad del contacto humano. En una encuesta realizada por el *Wall Street Journal* se halló que las principales quejas de los estadounidenses en cuanto a los empleados de servicio

son en relación con el personal que realiza las entregas o los vendedores que nunca llegan cuando las personas se quedan en casa para esperarlos a la hora programada, los vendedores con información deficiente y los vendedores de mostrador que hablan por teléfono mientras atienden y dicen "Éste no es mi departamento", o bien, contestan de mala gana o no saben cómo funciona un producto.

Muchas empresas de servicios actúan según el lema: "Si cuidamos a nuestros empleados, ellos cuidarán de nuestros clientes." En FedEx, por ejemplo, el credo de la empresa se expresa de manera sencilla: personas, servicio, utilidades. Las posibles decisiones de la empresa se evalúan por sus efectos en los empleados (personas), sus clientes (servicio) y el desempeño financiero de la empresa (utilidades), en ese orden. FedEx tiene una filosofía de "no despidos" y su "procedimiento de trato justo garantizado" para solucionar los problemas de sus empleados se utiliza como modelo en otras empresas de distintos sectores. A los empleados se les motiva a ser innovadores y tornar decisiones que mejoren la calidad y los objetivos de satisfacción del cliente. Los trabajadores de primera línea pueden calificar para ascensos a puestos administrativos y la empresa tiene un programa de reconocimientos bien desarrollado para las contribuciones individuales y en equipo al desempeño de la empresa. La administración de FedEx establece metas cada vez más altas para el desempeño de calidad y para la satisfacción del cliente, e invierte mucho dinero en tecnología moderna y en la construcción de su reputación como un patrón excelente.

Por desgracia, en muchas empresas los empleados de primera línea (dependientes de mostrador, recepcionistas, el personal que realiza las entregas, etc., que son quienes tienen más contacto con los clientes) reciben el salario más bajo, un entrenamiento mínimo, tienen poca autoridad para tomar decisiones y poca responsabilidad (lo que se denomina "facultación"). Los empleados de servicios de alta calidad necesitan sistemas de incentivos que reconozcan los resultados en cuanto a la satisfacción del cliente y los comportamientos enfocados hacia éste, las habilidades y competencias apropiadas para realizar el trabajo y supervisores que actúen más como entrenadores y profesores que como administradores. La capacitación es muy importante, porque los empleados de

servicios necesitan ser hábiles para manejar toda interacción con el cliente, desde saludarlos hasta hacerles las preguntas correctas.

The Ritz-Carlton Hotel Company, L.L.c. es una empresa de servicios con un ejemplar enfoque en su personal. El lema de The Ritz-Carlton es "Somos damas y caballeros que sirven a damas y caballeros" y todos los empleados reciben el mismo trato que se da a los huéspedes. La atención de la empresa se centra en desarrollar una "fuerza laboral que esté capacitada y facultada de modo apropiado y trabaje con orgullo y alegría", asegurando así que todo mundo sabe lo que tiene que hacer, qué tan bien lo está haciendo y tiene la autoridad de realizar cualquier cambio necesario. Por ejemplo, la función de una camarera no es sólo hacer las camas, sino crear una experiencia memorable para el cliente. Cada hotel tiene un director de recursos humanos y un gerente de capacitación, quienes están apoyados por el líder de calidad del hotel. Cada área de trabajo tiene un capacitador departamental quien se encarga de entrenar y certificar a los empleados nuevos en su unidad. The Ritz-Carlton utiliza un instrumento altamente predictivo que denomina de "reclutamiento según los rasgos de carácter", a fin de determinar la aptitud de los candidatos para cada uno de los 120 puestos. Los empleados nuevos reciben orientación dos días, en la cual los directivos demuestran personalmente los métodos de la empresa e inducen sus valores. Tres semanas después, los gerentes supervisan la eficacia de la enseñanza y realizan una sesión de capacitación de seguimiento. Después, los empleados nuevos deben pasar pruebas por escrito y de demostración de habilidades con el fin de recibir un certificado en sus áreas de trabajo. Todos los días, en cada área de trabajo, cada supervisor de turno lleva a cabo una reunión de ajuste de la calidad y una sesión informativa. Los empleados reciben instrucción y entrenamiento continuos para actualizar sus habilidades y mejorar el desempeño, reforzar su propósito en el puesto y recibir reconocimientos por sus logros. A través de éstos y otros mecanismos, los empleados reciben más de 100 horas de educación de calidad dirigida a promover un compromiso con un servicio de primera, solucionar problemas, establecer objetivos y generar nuevas ideas. Los empleados son facultados para "mover cielo, mar y tierra a fin de satisfacer a un cliente", solicitar la ayuda de otros empleados para resolver un problema con

rapidez, gastar hasta 2 000 dólares para satisfacer a un invitado, decidir los términos de negocio de una venta, participar en el establecimiento de planes para su área de trabajo en particular y hablar con cualquier persona en la empresa acerca de cualquier problema. The Ritz-Carlton redujo su índice de rotación de personal de manera constante desde 1989 hasta alcanzar 30 por ciento en 1999, índice muy por debajo de la media del sector.

Tecnología de la información La tecnología de la información incorpora cómputo, comunicación, procesamiento de datos y otros medios para transformar datos en información útil. El uso inteligente de la tecnología de la información no sólo lleva a una mejora de la calidad y la productividad, sino también a la obtención de una ventaja competitiva, en particular cuando la tecnología se utiliza para servir mejor al cliente y para que éstos hagan negocios con la empresa en forma más sencilla.

Muchos sectores de servicios explotan la tecnología de la información para mejorar el servicio al cliente. Por ejemplo, los restaurantes usan terminales de computadora portátiles a fin de agilizar el proceso de pedido. Éste se transmite al instante a la cocina o al bar, donde aparece en pantalla y se imprime la cuenta del cliente. Además de ahorrar tiempo, estos sistemas aumentan la exactitud al estandarizar la toma de pedidos, facturación e inventarios y reducir la necesidad de escribir a mano. Las autorizaciones de crédito, que antes se hacían por teléfono y tardaban varios minutos, ahora se logran en segundos a través de sistemas de autorización computarizados. La computadora de bolsillo "SuperTracker" de FedEx explora los códigos de barras de los paquetes cada vez que éstos cambian de manos, desde que se recogen hasta que se entregan.

The Ritz-Carlton Hotel Company, L.L.c. explota la tecnología de la información para recordar cada uno de sus más de 800 000 clientes. Información sobre las preferencias de cada cliente, las dificultades previas, intereses personales y familiares y tarjetas de crédito que prefiere, se guarda en una base de datos a la cual tiene acceso cada hotel. Este sistema de perfil de huésped permite que cada cliente sea tratado de forma individual al dar a los empleados de recepción acceso inmediato a información sobre si el huésped fuma, si prefiere jabón neutro o perfumado y qué tipo de almohada le gusta.

Otro ejemplo es Fidelity Investments. Esta empresa recibe alrededor de 200 000 llamadas telefónicas al día, de las cuales más de dos terceras partes se manejan mediante un sistema de computadoras sin la intervención humana. Un sistema de conmutación computarizado vigila las cargas de llamadas en los cuatro centros telefónicos de Fidelity y las distribuye entre sus más de 2 000 representantes. Fidelity desarrolló una "estación de trabajo del futuro" que permite a sus representantes llamar a cualquier cuenta de cliente en la pantalla de sus terminales. Con esta capacidad, Fidelity podrá ofrecer a sus clientes información y servicios personalizados al segundo, al tiempo que mejora la productividad interna.

Sin duda alguna, el impacto más importante de la tecnología de la información para el servicio ha sido en el comercio electrónico. Los clientes pueden comprar casi cualquier producto; configurar, cotizar y ordenar sistemas de cómputo; y conducir automóviles en forma virtual y elegir entre miles de combinaciones de opciones a través de Internet desde la comodidad de su hogar. La tecnología de la información se puede utilizar para desarrollar y mejorar las relaciones con los clientes. Amazon.com, empresa a la que quizá muchos lectores han hecho algún pedido, ha sido extremadamente exitosa en esto. Provee amplia información acerca de productos; por ejemplo, revisiones del lector para ayudar a los clientes a evaluar libros; permite a los usuarios buscar en las librerías de libros usados ediciones que ya no se imprimen e incluso envía por correo electrónico cartas de agradecimiento un mes después de la compra.

Aunque la tecnología de la información reduce la intensidad de la mano de obra y aumenta la velocidad del servicio, tiene efectos adversos en otras dimensiones de la calidad. Algunas personas, entre ellas algunos clientes, dirán que la satisfacción disminuye cuando existe menor interacción personal. (¿Alguna vez se ha sentido molesto mientras navega entre los distintos menús de un sistema de respuesta automática por teléfono?) Así que los proveedores de servicios deben equilibrar los intereses de la calidad en conflicto.

ADMINISTRACIÓN DE PROCESOS

Netflix atrajo la atención en la industria de la renta de DVD al incluir en todos los DVD el archivo con una lista de más de 15 000 títulos que podían ser enviados por correo, sin fecha de vencimiento ni recargos. Netflix está en Worcester, Massachusetts en un antiguo almacén de zapatos, con más de 90 000 DVD pero no tenían catálogos. Cada mañana a las 8:00, el servicio postal (una alternativa increíblemente barata y rápida) dejaba cajas con miles de DVD devueltos de toda Nueva Inglaterra. En lugar de catalogar los títulos en ubicaciones fijas y recuperarlos para satisfacer los pedidos de los clientes, los operadores examinaban los discos devueltos y recopilaban datos, tal y como las computadoras en la oficina central de Netflix en San José, clasifican los nuevos pedidos. Después de comer, los trabajadores de Worcester reexaminaban cada disco en su inventario; con cada revisión procedían a enviar el disco, si el cliente lo deseaba o buscarlo después si no. La búsqueda posterior del disco era rápida, se le colocaba a un lado con otros discos. Los discos enviados, estaban envueltos y llevaban un par de etiquetas. Al salir, los discos pasan a través de una máquina de 40 pies de largo llamada "Omega", que organiza más de 20 000 pedidos por hora en cajas clasificadas por código postal. La búsqueda previa, le ahorra a Netflix de seis a siete centavos por DVD y proporciona un corto tiempo de embarque a los clientes.

Procesos efectivos de administración y diseño -tal como diseñar el producto, la recepción del pedido, su fabricación, distribución y servicio al cliente- a lo largo de la cadena de valor, son vitales para la satisfacción del cliente y del éxito competitivo. Actividades como la administración y el diseño de procesos, ayudan a prevenir errores y defectos, eliminando el desperdicio y la repetición y de ese modo a mejorar la calidad y el rendimiento de la empresa a través de pequeños ciclos de tiempo; a mejorar la flexibilidad y, en el caso de Netflix, a responder al cliente de manera rápida y consistente.

A Blanton Godfrey señala que muchas organizaciones están "destinadas al *fra*caso" es decir, sus procesos no están diseñados en forma adecuada ni alineados entre sí. Menciona otros ejemplos además de los problemas que

enfrentaron los e-detallista. *Uno* de ellos es la sobreprogramación en los aeropuertos. Durante el lapso entre las 4:15 y 4:30 P.M., están programadas 35 llegadas en Atlanta, aun cuando en óptimas condiciones climáticas el aeropuerto sólo puede manejar 25 en 15 minutos; con mal clima, *este* número baja a 17. Otra empresa celebró su contrato de ventas más alto en la historia solo para descubrir que todos los proveedores calificados para los materiales críticos trabajaban a toda su capacidad. Un tercer ejemplo es la falta de voluntad por parte de los de los departamentos para trabajar juntos. Por ejemplo, cuando los productos fallan en planta o mientras están en servicio, no se debe a que los diseñadores seleccionaran los componentes que sabían que fallarían; a menudo, cuentan con información insuficiente ac*e*rca de los problemas resultantes de sus elecciones. Tales problemas pueden ser mitigados por un buen proceso de administración. Deming y Juran observaron que la gran mayoría de los problemas de calidad se relacionan con los procesos; pocos son causados por los mismos empleados. En vez de ello, la administración es responsable de diseñar y mejorar en forma continua los procesos con los que trabajan las personas; en realidad, comparte la responsabilidad con la fuerza laboral. El expresidente de Texas Instruments Defense System & Electronics Group (ahora parte de Raytheon) tenía un letrero en su oficina que resumía estos conceptos: "Si no cambias el proceso, ¿por qué podrías esperar que cambien los resultados?"

Casi todas las empresas líderes consideran que la administración de procesos es una actividad de negocios fundamental AT&T, por ejemplo, basa su metodología en los siguientes principios:

• La mejora de la calidad de los procesos se enfoca hacia el proceso de extremo a extremo.

• La mentalidad de la calidad es de prevención y mejora continua.

• Todos manejan un proceso a cierto nivel y son clie7ntes y proveedores al mismo tiempo.

• Las necesidades del cliente guían la mejora de la calidad de los procesos.

• La acción correctiva se enfoca hacia la eliminación de la causa original del problema lugar de atender los síntomas.

• La simplificación de los procesos reduce las oportunidades de cometer errores y de reproceso.
• La mejora de la calidad es el resultado de una aplicación disciplinada y estructura da los principios de administración de calidad.

EL ALCANCE DE LA ADMINISTRACIÓN DE PROCESOS

En esencia, todo el trabajo en una organización se realiza mediante algún proceso. Los procesos comunes en las empresas incluyen adquisición de conocimientos sobre clientes y mercados, planeación estratégica, investigación y desarrollo, compras, desarrollo de nuevos productos o servicios, satisfacer los pedidos de los clientes, administración de la información, medición y análisis del desempeño y capacitación de los empleados, por nombrar sólo unos cuantos.

Los **procesos para la creación de valor** (que en ocasiones se conocen como *procesos centrales)* son los más importantes para "manejar el negocio" y mantener y lograr una ventaja competitiva continua. Dan lugar a la creación de productos servicios, son críticos para la satisfacción del cliente y tienen impacto significativo en los objetivos estratégicos de una organización. Por lo regular, los procesos que crean valor incluyen diseño, producción/ entrega y otros procesos críticos para la empresa. Los **procesos de diseño** comprenden todas las actividades que se realizan para incorporar los requisitos de los clientes, la tecnología nueva y el aprendizaje anterior en las especificaciones funcionales de producto (p. ej., un bien manufacturado o un servicio) y, por tanto, definen su adecuación para el uso. **Los procesos de producción/entrega** crean o entregan el producto real; algunos ejemplos son manufactura, ensamble, dispensar medicamentos, impartir una clase, etc. Estos procesos se deben diseñar para garantizar que el producto cumpla con las especificaciones (la definición de calidad en la manufactura) y también que se fabriquen de manera económica y con eficiencia. El diseño de productos tiene influencia importante en la eficiencia de la manufactura, así como en la flexibilidad de las estrategias de servicio y, por tanto, se debe coordinar con los procesos de producción/ entrega. El valor definitivo del producto y, por consiguiente, la calidad percibida por el consumidor, dependen de este tipo de procesos.

Los **procesos de soporte o apoyo** son los más importantes para los procesos que crean valor en una organización, los empleados y las operaciones cotidianas; ofrecen una infraestructura para los procesos que crean valor, pero, en general, no agregan valor directamente al producto o servicio. Un proceso que se considera creador de valor para una empresa (p. ej., un distribuidor de correo directo) puede considerarse un proceso de apoyo en otra (p. ej., un fabricante sobre pedido). En general, los procesos que crean valor se basan en las necesidades de los clientes externos, mientras que los de apoyo se basan en las necesidades de los clientes internos. Debido a que los procesos que crean valor sí lo agregan a los productos y servicios, necesitan de un nivel de atención más alto que los de apoyo.

Para muchas organizaciones, las cadenas de suministro están entre los procesos más importantes del negocio y pueden ser visualizadas abarcando muchos puntos de creación de valor y procesos de soporte, esto ayuda a las empresas a crear una ventaja competitiva en la entrega, flexibilidad y reducción de costos. Un reporte de AMR Research Inc., sugiere que las empresas que sobresalen en la operación de las cadenas de suministros también tienen un buen desempeño en otros indicadores de éxito financiero como un ejecutivo de AMR dijo, "…la cadena de valor se transforma en productividad y liderazgo en la participación de mercado …liderazgo en la cadena de suministro significa más que bajos costos y eficiencia, esto requiere una habilidad superior para adaptarse y responder a las variaciones en la demanda con productos y servicios novedosos." Una parte importante de la administración de la cadena de suministro es administrar las relaciones entre los proveedores (esto es, cómo los requerimientos a cumplir son comunicados y asegurados, con asistencia mutua y entrenamiento,etc.); esto es visto a menudo como un importante proceso de apoyo.

En la tabla 3.4 se muestran los procesos de creación de valor y sus requisitos definidos por Pal´s Sudden Service, una cadena regional de comida rápida del sureste de Estados Unidos. Sus procesos de apoyo incluyen contabilidad/ finanzas, recursos humanos, mantenimiento, sistemas de administración de información, pedidos e inventario. Otros procesos de apoyo críticos que dan lugar al éxito y al crecimiento de la empresa pueden ser investigación y desarrollo, adquisición de tecnología, administración de la cadena de distribución y

asociaciones con los proveedores, fusiones y adquisiciones, administración de proyectos o ventas y mercadotecnia. Estos procesos difieren en gran medida entre las organizaciones, dependiendo de la naturaleza de los productos y servicios, los requisitos de los clientes y el mercado, el enfoque global y otros factores. Por ejemplo, un hospital puede definir sus procesos clave de creación de valor como preadmisión, admisión, diagnóstico y tratamiento, alta y seguimiento; servicios de apoyo pueden incluir alimento dietético, servicios ambientales, tecnología de la información, archivos médicos, administración de materiales y operaciones de planta física.

Tabla 3.4 Procesos que crean valor para Pal´s Sudden Service

PROCESO	REQUISITOS PRINCIPALES
Toma de pedidos	Precisión, rapidez, amabilidad
Cocina	Temperatura apropiada
Ensamble de productos	Secuencia apropiada, sanidad, ingredientes y cantidades correctos, velocidad, temperatura apropiada, limpieza
Cobro de efectivo	Precisión, rapidez, amabilidad
Rebanado	Corte/tamaño, frescura/color
Preparación del guisado de chile con carne	Temperatura apropiada, cantidad, frescura
Preparación del Jamón/pollo	Temperatura apropiada, cantidad, frescura
Administración de la cadena de abastecimiento	Precio/costo, precisión del pedido
Adquisición de bienes raíces	Potencial de ventas, apego al presupuesto
Construcción	A tiempo, dentro del presupuesto
Mercadotecnia y publicidad	Mensaje claro, reconocimiento de la marca

El diseño de proceso empieza con su identificación y documentación. Los procesos generalmente abarcan las funciones tradicionales de la organización y para definirlos con precisión es necesario realizar cierta investigación y reflexión. La documentación de un proceso comprende la descripción de su realización. Es

posible que incluya el desarrollo de un diagrama de flujo de procesos y la redacción de los procedimientos operativos estándar e instrucciones de trabajo. Un buen diseño de procesos se enfoca hacia la prevención de la mala calidad al asegurar que los bienes y servicios cumplen con los requisitos de los clientes externos e internos, y que el proceso es capaz de lograr el nivel de desempeño necesario.

Una vez que el proceso es diseñado y operacional, debe ser controlado a partir de periodos cortos y mejorado sobre el largo plazo. La distinción entre el control y la mejora se ilustra en la figura 3.13. Cualquier indicador del desempeño de los procesos oscila en forma natural alrededor de un nivel promedio. Las condiciones anormales provocan una desviación inusual de este patrón. Eliminar las causas de estas condiciones anormales y mantener el nivel de desempeño es la esencia del control. Sin embargo, controlar un proceso que tiene muchas variaciones, puede resultar en detrimento de la satisfacción del cliente y el desempeño financiero. Por ejemplo, investigar sobre la industria aérea mostró que la falta de consistencia en el servicio (con respecto a los tiempos de arribo) tuvo un impacto definitivo en la insatisfacción del cliente. Se encontró que la consistencia en el proceso, era menos importante que el desempeño promedio en las firmas con mejor calificación, en las que las expectativas del cliente son altas. Así, mejorar puede significar llevar el desempeño promedio a un nuevo nivel o reducir la variación en torno al desempeño promedio común. Éstos son dos de los principales objetivos de Six Sigma.

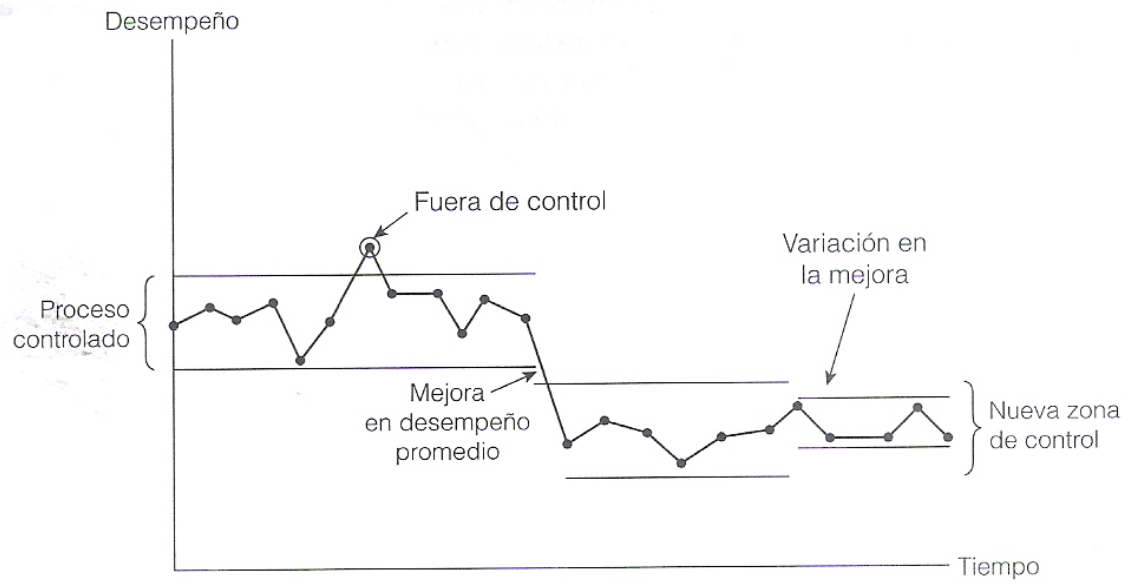


Figura 3.13 Control versus mejora

administración de procesos, éstos deben ser (1) repetibles y (2) medibles. La repetitividad significa que el proceso debe ser recurrente a través del tiempo

El ciclo puede ser largo, como ocurre con los procesos de desarrollo de productos o las solicitudes de registro de patentes; o puede ser corto, como en el caso de la operación de manufactura o un proceso de toma de pedidos. La medición ofrece la capacidad de capturar indicadores importantes de calidad y desempeño para revelar los patrones acerca del desempeño del proceso. Cada medición debe buscar un estándar o una meta con base en los requisitos del cliente. La conformidad con estas dos condiciones garantiza que es posible recopila: suficientes para revelar información útil para la evaluación y el control, así como el aprendizaje que da lugar a la mejora y la madurez.

Un gran número de compañías utilizan un marco integrado para la administración de procesos. Por ejemplo, Boeing desarrolló una administración basada en el proceso (PBM), estructurado en tres pasos: definición del proceso (diseño), medición del proceso (control) y mejoramiento del proceso. Observe que estos tres elementos de la administración de procesos - diseño, control y mejoramiento- están integrados dentro de esta estructura. El planteamiento comienza con la fase de diseño para definir el proceso y estableciendo los patrones métricos del cliente para la medición del desempeño. La fase de monitoreo controla las mediciones y

estabiliza el proceso para dirigirlo hacia el desempeño previsto. Finalmente, una fase de reforma establece metas de mejora, desarrollo y el plan de implementación y sus herramientas .Esta fase utiliza Six Sigma, herramientas esbeltas y otros métodos clásicos. Después de que se implementan las reformas, se regresa a la fase de control para monitorear la nueva mejora.

Por lo general, los principales procesos de apoyo y creación de valor se definen en el nivel organizacional; estas actividades requieren de la atención de la alta dirección. Cada proceso principal consiste en distintos subprocesos a cargo de los responsables de cada función o equipos multifuncionales. Por último, cada subproceso consiste en varias actividades específicas por parte de las personas en el nivel operativo. Boeing Airlift and Tanker (A&T) Programs desarrolló un "modelo de proceso empresarial" que considera todo el negocio como ocho grupos de procesos interconectados. Estos grupos principales van desde el liderazgo empresarial y el desarrollo de nuevos negocios hasta la producción y el apoyo a los productos después de su entrega. Cada familia comprende hasta 10 procesos principales que, a su vez, están formados por varios grupos de subprocesos de apoyo. A&T maneja las relaciones como "megaprocesos" que se extienden hasta los proveedores y clientes.

Las personas o grupos, conocidos como **dueños del proceso**, son responsables del desempeño del proceso y tienen la autoridad necesaria para manejarlo y mejorarlo. Los dueños de procesos son desde ejecutivos de alto nivel que manejan procesos multifuncionales hasta trabajadores que manejan celdas de producción o una operación de ensamble en la planta. La asignación de dueños de procesos asegura que una persona es responsable de manejar el proceso y optimizar su eficacia. Por ejemplo, los procesos que apoyan los procesos centrados en el aprendizaje, como el sistema escolarizado ganador del premio Baldrige –Community Consolidated School District 15- incluyen transportación, custodia, almacenes, infraestructura tecnológica y mantenimiento. Estos procesos están alineados con los procesos centrados en el aprendizaje para ayudar al estudiante a alcanzar sus metas de desempeño. Los dueños de este proceso recaban datos acerca de los requerimientos de los estudiantes y los accionistas a través de medios formales e informales, utilizando estos datos para diseñar,

implementar y evaluar los procesos que mejorarán la eficiencia organizacional y contribuirán en el aprendizaje del alumno.

Principales prácticas

La administración de procesos requiere de un esfuerzo disciplinado que comprende a todos los directivos y trabajadores en una organización. Las empresas reconocidas como líderes mundiales en calidad y satisfacción al cliente comparten algunas prácticas comunes.

1. *Definen y documentan importantes procesos de creación de valor y apoyo, y los administran con cuidado.* En muchas empresas se utiliza el ISO 9000 como base para definir y documentar los procesos clave. Branch-Smith Printing, por ejemplo, creó más de 40 diagramas de procesos como parte del proceso de conversión a ISO 9000. Corning Telecommunications Products Division (TDP) identificó y documentó más de 800 procesos en todas las áreas de negocios, de los cuales 50 están designados como "procesos de negocios de alto impacto" que requieren de un hincapié especial en los esfuerzos de mejora continua. Cada proceso de alto impacto es propiedad de un líder de negocios clave, quien lo administra.
2. *Convierten los requisitos del cliente en requisitos de diseño de productos y servicios desde las primeras etapas del proceso de diseño, tomando en cuenta los vínculos entre los requisitos de diseño de productos y los del proceso de manufactura* o *servicio, las capacidades de los proveedores y lo aspectos legales y ambientales.* Una de las preguntas fundamentales que hace SSMHealth Care durante las actividades de su proceso de diseño es: "¿Cuáles son los resultados que el cliente espera del proceso?" La revisión de los datos de la retroalimentación de pacientes/ clientes, la realización de encuestas especializadas o grupos de enfoque y la participación de los clientes en los equipos de diseño ayudan a responder esta pregunta. Las principales empresas coordinan los procesos de diseño y producción/ entrega AT&TTransmission Systems tiene un nuevo centro de presentación de productos que evalúa los diseños con base en las capacidades de manufactura, reconociendo que un buen diseño reduce el riesgo de defectos en la manufactura y aumenta la productividad. El centro de

investigación de ingeniería de Bell Laboratories apoya la introducción de nuevos procesos simulando el ambiente de manufactura necesario para evaluar nuevas tecnologías. Una política operativa desarrollada en Eastman Chemical motiva a los empleados a maximizar el valor del producto mediante la operación de un proceso en los niveles meta y no sólo dentro de los límites de las especificaciones; de esta forma, cumple mejor con los requisitos de diseño. Eastman Chemical también revisa los diseños en lo que se refiere a seguridad, confiabilidad, reducción de mermas al mínimo posicionamiento de patentes, información sobre toxicidad, riesgos para el ambiente, desecho de productos y otras necesidades del cliente. Asimismo, realiza un análisis de mercado de las habilidades de los proveedores clave para manejar los costos, obtener materiales, mantener la producción y realizar entregas confiables.

3. *Se aseguran de que la calidad esté integrada en sus productos y servicios y utilizan los enfoques; y herramientas cuantitativos y de ingeniería apropiados durante el proceso de desarrollo.* Eastman Chemical, por ejemplo, utiliza el modelado en laboratorio de los procesos, la simulación por computadora, el diseño estadístico de experimentos y la evaluación en las plantas de los clientes para calificar la calidad de sus productos antes de su manufactura. Texas Instruments ubica sus centros de diseño de manera estratégica en todas sus instalaciones. En estos centros se cuenta con experiencia y sistemas con gran capacidad para el diseño eléctrico y mecánico asistido por computadora, la ingeniería de sistemas y la manufactura, además de permitir la evaluación de las partes que tienen mejor historial de calidad, productividad, confiabilidad y otros requisitos especiales ingeniería. IBM en Rochester utiliza técnicas estadísticas para estudiar las prioridades y disyuntivas del cliente; valida esta información con consejos de clientes, encuestas de satisfacción y otras formas de retroalimentación; y mantiene un Software Partner Laboratory en el cual los clientes pueden certificar la conformidad con los requisitos y que los programas van a funcionar de manera correcta en sus sistemas.

4. *Administran el proceso de desarrollo de productos para mejorar la comunicación entre las funciones, reducir el tiempo de desarrollo de productos y asegurar la introducción sin problemas de los productos y servicios.* Para desarrollar nuevos productos o mejorar los ya existentes, Medrad utiliza su proceso integrado de desarrollo de producto para recolectar las ideas de los empleados, identificar las necesidades de los clientes, priorizar las iniciativas y transformarlas en especificaciones. En suma, el proceso dirige proactivamente el cumplimiento de las normas de seguridad del producto y asuntos ambientales; resultando en planes de atenuación del riesgo que diseñan factores de seguridad, salud y ambientales dentro de la producción y el proceso de entrega. Las principales empresas utilizan equipos multifuncionales para coordinar todas las fases de desarrollo de productos y reducir los tiempos de desarrollo. Boeing A&T tiene más de 100 equipos de producto integrados (EPI) que supervisan el diseño, la producción y la entrega de las más de 125000 partes y servicios de apoyo para los aviones C-17.AT&Testableció nueve equipos de expertos en cambios radicales (llamados equipos de excelencia en los procesos) que identifican las mejoras en los procesos para desarrollar los productos y lanzarlos al mercado con mayor rapidez. Establecen normas, procedimientos y capacitación, y entrenamiento para la comunicación entre todas las funciones, la cual evita que los problemas ocurran. En The Ritz-Carlton Hotel Company, L.L.c., los productos y servicios personalizado s de los hoteles, como juntas y eventos de banquetes, reciben toda la atención de los equipos multifuncionales de cada hotel. Estos equipos comprenden a todos los proveedores internos y externos, verifican las capacidades de producción y entrega antes de cada evento, critican las muestras y evalúan los resultados. A fin de asegurar el lanzamiento sin problemas de sus productos, Solar Turbines utiliza herramientas avanzadas de diseño computarizado y analíticas para garantizar la colaboración e intercambio de información entre manufactura y los proveedores clave. Otras herramientas, como los modelos de predicción

y la creación rápida de prototipos se utilizan para validar la función, el desempeño y la capacidad de manufactura.

5. *Definen los requisitos de desempeño para los proveedores, se aseguran* de *que* éstos se *cumplan y desarrollan relaciones de sociedad con los proveedores clave y sus organizaciones.* Corning TPD clasifica a sus proveedores de acuerdo con un nivel jerárquico: los proveedores de nivel 1 tienen impacto directo en la satisfacción del cliente; los de nivel 2 son importantes, pero no tienen un vínculo directo con la satisfacción del cliente; los de nivel 3 ofrece materias primas. Los proveedores del nivel 1 reciben el apoyo de equipos multifuncionales y se integran en las actividades de desarrollo. Armstrong lleva a cabo visitas a instalaciones y tiene una escala de cinco niveles para ayudar a los proveedores a entender su función en la tarea de cumplir con las expectativas de los clientes. STMicroelectronics desarrolló un plan anual de abastecimiento llamado Supplier Quality & Service Plan, que establece los objetivos para los proveedores y especifica de qué manera ST revisará su desempeño, compartirá la información y cumplirá con sus responsabilidades en la relación. Los convenios a largo plazo con los proveedores que se preocupan por la calidad permitió a Texas Nameplate Company prácticamente eliminar las inspecciones de los materiales que llegan. Estos proveedores que realizan "envíos directos al inventario" deben manejar productos sin defectos durante dos años por lo menos y cumplir todos los requisitos que se especifican en las órdenes de compra.
6. *Controlan la calidad y el desempeño operativo de los procesos clave y utilizan métodos sistemáticos para identificar las variaciones importantes en el desempeño operativo y en la calidad de la producción, determinar las causas principales, hacer correcciones y verificar los resultados.* Las principales empresas establecen medidas e indicadores para registrar la calidad y el desempeño operativo, y los utilizan como base para controlar los procesos y cumplir de manera consistente con las especificaciones y normas. Los indicadores clave que usa SSM Health Care para vigilar sus procesos se muestran en la tabla 3.5. Las evaluaciones diarias, semanales,

mensuales y trimestrales les dan la oportunidad de revisar y manejar estos indicadores e identificar formas de prevenir errores potenciales antes de que afecten al paciente. The Ritz-Carlton Hotel Company, L.L.c., tiene una política mediante la cual la primera persona que detecta un problema tiene la facultad para dejar sus obligaciones de rutina, investigar y corregir el problema de inmediato. Registrar el incidente y luego regresar a su rutina. Muchas empresas utilizan el control estadístico de procesos y los procesos formales de solución de problemas a fin de identificar, analizar y solucionar problemas de calidad. Graniterock, por ejemplo, fue la primera empresa en el sector industrial de los materiales de construcción en aplicar el control estadístico de procesos en la administración de la producción de agregados concreto y asfalto.

7. Mejoran *los procesos en forma continua para lograr mejor calidad, mejor tiempo del ciclo y mejor desempeño operativo en general.* Las principales empresas usan enfoques sistemáticos para analizar la información e identificar las mejoras. Branch-Smith Printing, por ejemplo, utiliza un sencillo proceso de mejora de la calidad (QIP, por sus siglas en inglés), que aparece en la figura 3.14**,** para evaluar y mejorar todos los procesos de producción y entrega mediante el uso de información sobre el desempeño y sobre quejas para establecer prioridades entre las oportunidades de mejorar los procesos. Las principales empresas utilizan técnicas probadas como análisis y simplificación de procesos y tecnologías avanzadas. El Commercial, Government, and Industrial Solutions Sector, de Motorola utiliza equipos de mejora continua que se reúnen con regularidad para evaluar y mejorar los procesos en forma proactiva. The Ritz-Carlton tiene ocho mecanismos dedicados exclusivamente a la mejora de la calidad en procesos, productos y servicios:

Tabla 3.5 Requisitos e indicadores de procesos en SSM Health Care

Proceso	Requisitos clave	Indicadores clave
Admisión		
Admisión/ registro	Puntualidad	• Tiempo de admisión de los pacientes a la atención médica • Preguntas sobre la oportunidad relativas a

		la tasa de registro/ admisión en las encuestas de satisfacción entre los pacientes

Evaluación

Evaluación de pacientes	Puntualidad	• % de historiales y exámenes físicos registrados 24 horas o antes de las cirugías • Evaluación del dolor a intervalos apropiados, por política del hospital
Servicios de radiología y laboratorio clínico	Precisión y puntualidad	• Resultados de control de calidad/tasas de repetición • Tiempo de entrega • Calificación al responder una encuesta de satisfacción entre el personal médico

Cuidado de la salud/tratamiento

Ofrecimiento de cuidado clínico	Capacidad de respuesta de las enfermeras, manejo del dolor, resultados clínicos exitosos	• Tasa de respuestas a preguntas de las encuestas de satisfacción entre pacientes y personal médico • Tiempo de espera para los analgésicos • % de pacientes CHF que recibieron indicaciones/ponderación del médico • % de pacientes con enfermedades cardiacas isquémicas dados de alta después de terapias probadas • Readmisiones no planeadas/regresos a urgencias o salas de operaciones • Mortalidad
Farmacia/uso de medicamentos	Exactitud	• Uso de abreviaturas peligrosas en los pedidos de medicamentos • Tasa de errores médicos o eventos adversos con los medicamentos que resultan de errores médicos
Servicios quirúrgicos/ anestesia	Habilidades profesionales, competencia/ comunicación	• Documentación clara del consentimiento informado para cirugías y aplicación de anestesia. • Mortalidad perioperatoria. • Tasa de infecciones en instalaciones quirúrgicas

Altas

Manejo de caos	Uso apropiado	• Duración promedio de la hospitalización • Negaciones de pago • Readmisiones no planeadas
Altas de la instalación de salud	Ayuda e instrucciones claras	• Instrucciones al darlo de alta registradas y entregadas al paciente • Calificación en la encuesta de satisfacción entre los pacientes

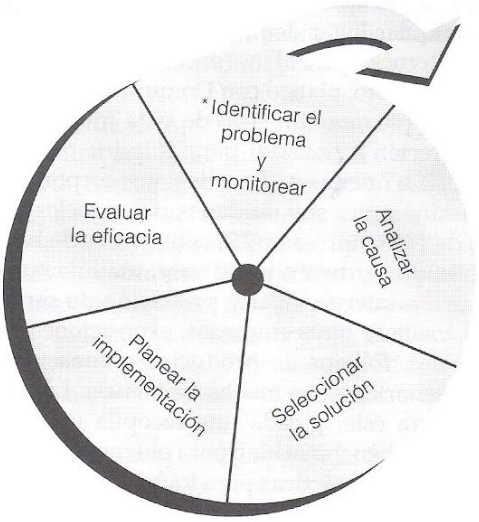


Figura 3.14 Proceso QIP en Branch-Smith Printing

Proceso de mejora para el arranque de los hoteles nuevos: un equipo multifuncional de toda la empresa que trabaja en conjunto para identificar y corregir áreas problemáticas.

Proceso de evaluación del desempeño en general: el mecanismo para equipos de área de trabajo, que faculta a las personas que hacen un trabajo de desarrollo de los procedimientos y normas de desempeño de sus puestos de trabajo.

Red de calidad: mecanismo de aprobación entre compañeros de trabajo mediante el cual un empleado puede presentar una buena idea.

Equipo permanente para solución de problemas: un equipo de área de trabajo permanente que resuelve cualquier problema que éste seleccione.

Equipo para mejorar la calidad: equipos especiales que se forman para solucionar cualquier problema que identifican los empleados o los líderes.

Planeación estratégica de la calidad: equipos de área de trabajo formados anualmente que identifican su misión, los objetivos principales del proveedor y sus planes de acción, los objetivos y planes de acción internos y las revisiones del progreso.

Eficientizar los procesos: la evaluación anual, en los hoteles, de los procesos, productos y servicios que ya no son valiosos para el cliente.

Mejora de procesos: mecanismo de equipos para líderes corporativos, directivos y empleados a fin de mejorar los procesos más críticos.

8. *Innovan para lograr un desempeño único utilizando enfoques como benchmarking y reingeniería.* Caterpillar Financial Services respalda un ambiente de innovación y fue una de las primeras en esta industria en lanzar nuevas tecnologías incluyendo FinancExpress, una herramienta financiera en internet para empleados, usuarios y distribuidores; AccountExpress, un servicio Web con disponibilidad 24/7 que proporciona información a los clientes acerca de sus cuentas y CustomerExpress, un sistema que mejora la habilidad del CFSC para escuchar a sus usuarios, distribuidores y clientes, creando relaciones más sólidas entre ellos.

   El benchmarking es la búsqueda de mejores prácticas en cualquier compañía, cualquier industria en cualquier lugar del mundo. Como ejemplo de benchmarking, tenemos el caso de Graniterock que, al no encontrar alguna empresa que midiera las entregas a tiempo del concreto, platicó con Domino's Pizza, líder mundial en entrega a tiempo de un producto que tiene un ciclo de vida muy corto (característica que comparte con el concreto recién mezclado) para adquirir nuevas ideas, a fin de medir y mejorar sus procesos. AT&T tiene una base de datos corporativa para compartir la información de benchmarking entre sus unidades de negocios. La base de datos contiene información de más de 100 empresas y 250 actividades de benchmarking para procesos clave, como desarrollo de hardware y software, manufactura, planeación financiera y presupuestal, facturación internacional y prestación de servicios. AT&T obtiene estos datos de los clientes, visitas a otras empresas, exposiciones y publicaciones periódicas, sociedades profesionales, folletos de productos y consejeros externos. Pal's Sudden Service utiliza el benchmarking con mucha frecuencia. Los directivos buscan en forma continua candidatos para éste, y cada uno recopila una lista actualizada de sujetos potenciales. Pal's utiliza el

benchmarking para obtener comparaciones competitivas significativas, nuevas y mejores prácticas para lograr objetivos de desempeño más alto o nuevas directrices en la organización, así como para recordar en forma constante a toda la empresa que siempre es posible mejorar el desempeño. La reingeniería es el rediseño radical de los procesos de negocios para lograr mejoras significativas en el desempeño. Para ilustrar el concepto de reingeniería, Intel Corporation utilizaba un proceso de 91 pasos que costaba miles de dólares para comprar bolígrafos; ¡el mismo proceso para comprar montacargas! El proceso mejorado se redujo a ocho pasos. Al reconsiderar su propósito como empresa de servicios al detalle basada en el cliente, más que como una empresa de manufactura, Taco Bell eliminó la cocina de sus restaurantes. La carne y los frijoles se preparan fuera del restaurante en un comisariato y se recalientan en los restaurantes. Otros alimentos, como los tomates picados, las cebollas y las aceitunas, se preparan en otro lugar; esta innovación le ayudó a ahorrar alrededor de 11 millones de horas de trabajo y 7 millones de dólares al año en toda la cadena.

9. *Su plan asegura la continuidad de las operaciones aun en emergencias.* Con la incertidumbre que rodea a los eventos del mundo actual, que van desde posibles ataques terroristas hasta los mayores desastres naturales, las organizaciones requieren de procesos efectivos para tratar con emergencias. La misión de una organización debería ser guiada con énfasis hacia las necesidades y requerimientos de los clientes. Las organizaciones cuya misión es responder a emergencias tienen una alta necesidad de disposición al servicio, DynMcDermott, es un ejemplo. Para otras organizaciones, el estar preparados es una prerrogativa del negocio. La oficina global de control de operaciones de FedEx en Memphis, es el centro administrativo de la compañía en caso de emergencia. Su trabajo es asegurarse de que los aviones y camiones lleguen cuando se supone que deben hacerlo y tienen un respaldo de la causa cuando esto no se cumple. Cada día, FedEx debe lidiar con algún tipo de interrupción local. En el año 2004, tuvieron que activar su plan de contingencia después de 37

tormentas tropicales. FedEx realiza simulacros de desastre varias veces al año, tiene ocho contenedores con equipos para desastre cada uno con dos toneladas de suministros como combustible, equipo de comunicación, preparados en Memphis para ser desplegados con facilidad en caso de requerirse alguna reparación. Antes del golpe del huracán Katrina en el año 2005,FedEx colocó 30 000bolsas de hielo, 30 000 galones de agua y 85 generadores domésticos afuera de Baton Rouge y de Tallahassee que permitieron la rápida evacuación de sus empleados después de la tormenta.

DISEÑO DE PROCESOS PARA LA CALIDAD

El diseño de procesos que producen y ofrecen bienes y servicios tiene impacto significativo en el costo (y, por tanto, en la rentabilidad), flexibilidad (la capacidad de producir el tipo y la cantidad apropiada de productos conforme cambian la demanda y las preferencias del cliente) y calidad de la producción. Por ejemplo, para producir un nuevo reproductor muy pequeño de CD, Sony tuvo que desarrollar procesos de manufactura totalmente nuevos, porque ninguno de los procesos existentes permitía fabricar un producto tan pequeño y preciso como lo exigía el diseño. Los procesos estandarizados establecen consistencia en la producción. FedEx desarrolló un sistema inalámbrico de recopilación de datos que utiliza escáneres láser para manejar millones de paquetes al día a través de sus seis principales centros de distribución, con el que no sólo mejoró el servicio a clientes, sino que también ahorró en costos de mano de obra.

Sin embargo, es posible que los procesos estandarizados no cubran las necesidades de los diferentes segmentos de clientes. En la actualidad, muchas empresas utilizan una estrategia de *personalización general* en la que ofrecen productos diseñados *ex profeso* al gusto de cada cliente para cumplir las preferencias individuales a precios comparables con aquellos artículos que se producen de manera masiva.

Por ejemplo, los clientes de Lands' End pueden tomar la talla de una simple camiseta y pants en su casa y responder unas cuantas preguntas en el sitio Web

de la empresa. Entonces, utilizando una serie de algoritmos, Lands' End transforma la información en patrones personalizados que envía a alguno de los fabricantes contratados en Estados Unidos y el extranjero, donde las plantas cortan y cosen la prenda y la envían directamente al cliente. Los datos son almacenados en el sitio Web para repetir la entrada. Cerca del 40 por ciento de los clientes seleccionan prendas personalizadas aunque el costo sea mayor y el tiempo de entrega sea de tres a cuatro semanas. La personalización general requiere de cambios importantes en los procesos de manufactura tradicionales que se enfocan hacia productos personalizados hechos a mano o en productos estandarizados producidos en masa. Estos productos implican tecnologías de manufactura flexibles, sistemas justo a tiempo, tecnología de la información y hacen hincapié en la reducción del tiempo del ciclo.

El diseño de un proceso empieza con su dueño. El dueño del proceso puede ser una persona, un equipo, un departamento o un grupo multifuncional. Motorola sugiere un enfoque básico para el diseño de procesos:

1. Identificar el producto o servicio: ¿qué trabajo hago?

2. Identificar al cliente: ¿para quién es el trabajo?

3. Identificar al proveedor: ¿qué necesito y de quién lo obtengo?

4. Identificar el proceso: ¿qué pasos o tareas se realizan?, ¿cuáles son los insumos y productos de cada paso?

5. Hacer el proceso a-prueba-de-errores: ¿cómo puedo eliminar o simplificar las tareas" ¿qué dispositivos "poka-yoke" (es decir, a prueba de errores puedo utilizar?

6. Desarrollar medidas y controles, así como objetivos de mejora: ¿cómo evalúo el proceso" ¿cómo lo mejoro más?

Los pasos 1 a 3 se ocupan de preguntas como" ¿cuál es el propósito del proceso?", "¿de qué manera el proceso crea satisfacción en el cliente?" y "¿cuáles son los insumos y productos esenciales del proceso?" El paso 4 se concentra en

el diseño real del proceso mediante la definición de las tareas específicas para transformar los insumos en productos. El paso 5 se enfoca en hacer que el proceso sea eficiente y capaz de ofrecer alta calidad. El paso 6 asegura que el proceso se supervisa y controla en el nivel de desempeño requerido; esta supervisión comprende la recopilación de indicadores en el proceso y/o de retroalimentación continua con el cliente y en el uso de esta información para controlar y mejorar el proceso.

El diseño real del proceso es la especificación de cómo funciona el proceso. La primera etapa consiste en mencionar con detalle la secuencia de los pasos (actividades que agregan valor y tareas específicas) que se siguen en la fabricación de un producto o la prestación de un servicio, casi siempre representados en un diagrama de flujo. Esta representación gráfica ofrece un excelente dispositivo de comunicación para visualizar y entender el proceso. Los diagramas de flujo se pueden convertir en la base para las descripciones de puestos, los programas de capacitación y entrenamiento para los empleados y los indicadores del desempeño. Estos diagramas ayudan a los directivos en sus estimaciones de recursos humanos, sistemas de información y los requisitos de equipo e instalaciones; como herramientas de diseño, permiten a los directivos estudiar y analizar los procesos antes de su implementación a fin de mejorar la calidad y el desempeño *operativo*. La figura 3.15 *muestra el proceso tres pasos de servicio de The Ritz-Carlton.* Este proceso es altamente estructurado y define los procedimientos para anticipar y satisfacer las necesidades de los clientes. Todos los empleados que tienen contacto con los clientes están capacitados para seguir este proceso.

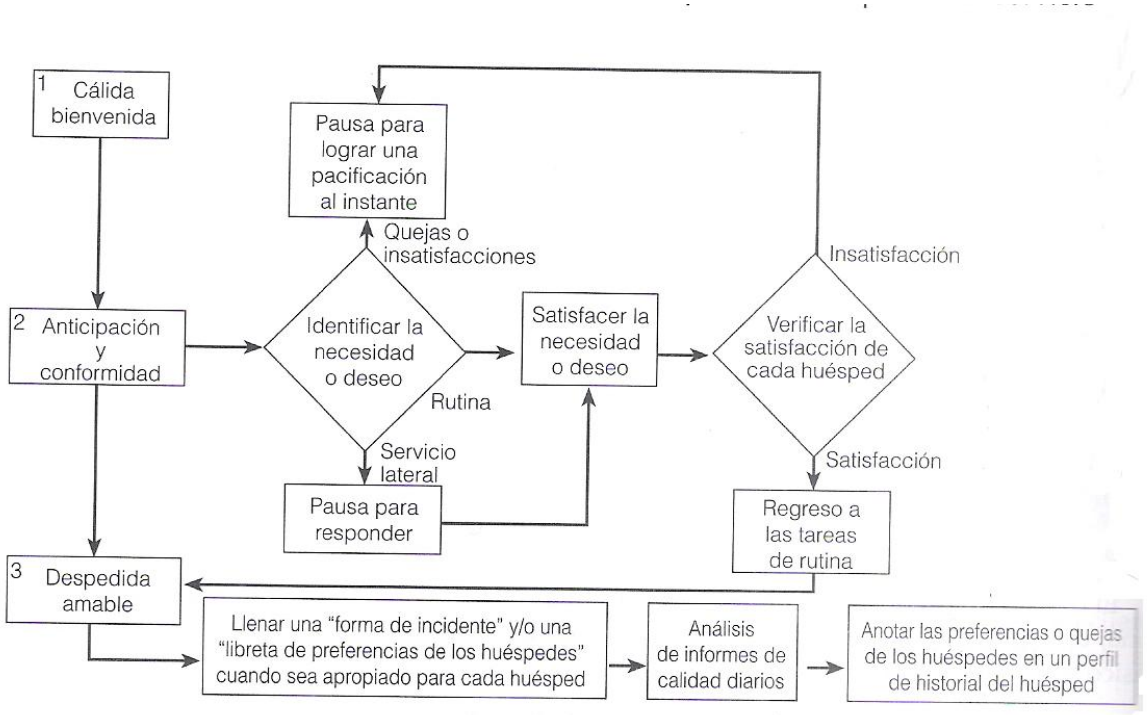


Figura 3.15 The Ritz-Carlton Hotel Company, L.L.C: proceso tres pasos de servicio

Consideraciones especiales en el diseño de procesos de servicio

Las diferencias fundamentales entre los procesos de manufactura y servicios merecen atención especial en el diseño de procesos. Este aspecto es muy importante, porque los procesos de apoyo son básicamente servicios. Algunos ejemplos comunes de procesos de servicios incluyen la preparación de una factura, tomar un pedido por teléfono, procesar una tarjeta de crédito y la salida del hotel. En primer lugar, los resultados de los procesos de servicios no están bien definidos, como en el caso de los productos manufacturados. Por ejemplo, aun cuando todos los bancos ofrecen bienes tangibles similares como cuentas de cheques, préstamos, cajeros automáticos, etc., el verdadero factor de diferenciación entre ellos es el servicio que prestan. En segundo lugar, la mayoría de los procesos de servicios comprenden una mayor interacción con el cliente, lo que a menudo facilita la identificación de sus necesidades y expectativas. Por otro lado, con frecuencia los clientes no pueden definir sus necesidades de servicios sin antes tener un punto de referencia o comparación.

Por ejemplo, los restaurantes de comida rápida diseñan sus procesos con gran detenimiento para ofrecer un alto grado de precisión y un tiempo de respuesta breve. Los nuevos sistemas de intercomunicación de manos libres, los mejores micrófonos que reducen el ruido ambiental en las cocinas y las pantallas que presentan la orden del cliente están enfocados hacia estos requisitos. En Wendy's, los cronómetros cuentan cada uno de los segmentos en el proceso de cumplimiento de un pedido para ayudar a los gerentes a identificar las áreas problemáticas. Los empleados de cocina utilizan audífonos para escuchar los pedidos en el momento en que se generan. Incluso el uso de fotografías en los tableros de pedidos del servicio en el automóvil facilita al cliente la selección de los platillos; una menor variedad significa que los pedidos se pueden atender con mayor rapidez.

A menudo, los procesos de servicios comprenden actividades internas y externas, factor que complica el diseño de calidad. Por ejemplo, en un banco, el servicio deficiente puede ser resultado de la forma en que los cajeros tratan a los clientes, así como de la mala calidad de las computadoras y el equipo de comunicación que está fuera del control de los cajeros. Las actividades internas se relacionan sobre todo con la eficiencia (calidad de la conformidad), mientras que las actividades externas (con la interacción directa con los clientes) requieren de atención hacia la eficacia (calidad del diseño). Con mucha frecuencia, los empleados que participan en las actividades internas no entienden de qué manera su desempeño afecta a los clientes que no ven. El éxito del proceso depende de que todos (los trabajadores que participan en las actividades externas e internas) entiendan que agregan valor para el cliente.

En esencia, el diseño de un servicio comprende determinar un equilibrio efectivo de estos componentes. El objetivo es prestar un servicio cuyos elementos sean internamente consistentes y estén dirigidos a cumplir las necesidades de un segmento de mercado meta específico. El hincapié exagerado o insuficiente en un componente da lugar a problemas y percepciones equivocadas por parte del cliente. Por ejemplo, el hincapié exagerado en los procedimientos puede dar como resultado un servicio oportuno y eficiente, pero también sugerir falta de

sensibilidad apatía hacia el cliente. El hincapié exagerado en el comportamiento puede dar lugar a un ambiente amable y personal a costa de un servicio lento, inconsistente o caótico. El hincapié exagerado en la opinión personal puede dar lugar a soluciones adecuadas a los problemas del cliente, pero también a un servicio lento, inconsistente e insensible.

Un enfoque útil para diseñar servicios eficientes consiste en reconocer primero que los servicios difieren en cuanto al grado de contacto e interacción con el cliente, la intensidad del trabajo y el grado de personalización. Por ejemplo, un ferrocarril es bajo en las tres dimensiones. Por otra parte, un servicio de diseño de interiores es alto en las tres. Un restaurante de comida rápida es alto en contacto con el cliente e intensidad del trabajo, pero bajo en personalización.

Los servicios que son bajos en las tres dimensiones de esta clasificación son más similares a las organizaciones de manufactura. El hincapié en la calidad se debe concentrar en las instalaciones físicas y los procedimientos; el comportamiento y la opinión profesional son relativamente poco importantes. Conforme aumentan el contacto y la interacción entre los clientes y el sistema de servicios, es necesario tomar en cuenta dos factores. En los servicios con intensidad de mano de obra baja es importante la impresión que el cliente tenga de las instalaciones físicas, los procesos y los procedimientos. Las organizaciones de servicio deben tener especial cuidado al elegir y mantener equipo confiable y fácil de usar. Con niveles más altos de contacto e interacción, el comportamiento apropiado del personal se vuelve cada vez más importante.

Conforme aumenta la intensidad de la mano de obra, las diferencias individuales adquieren mayor importancia; sin embargo, los elementos del comportamiento del personal y la opinión profesional siguen teniendo relativamente poca importancia, siempre y cuando los niveles de personalización, contacto e interacción permanezcan bajos. Conforme la personalización se incrementa, la opinión profesional se convierte en un factor cada vez más significativo en la percepción de la calidad del servicio por parte del cliente: En los servicios que son altos en las tres dimensiones, las instalaciones, el comportamiento y la opinión profesional deben estar equilibrados.

En los servicios, las normas de calidad toman el lugar de las tres dimensiones y las tolerancias que se aplican en la manufactura. Algunos ejemplos de normas establecidas por uno de los líderes en la industria de líneas aéreas, Swissair, incluyen:

• 90 por ciento de las llamadas se contestan en los primeros 30 segundos.

• 90 por ciento de los pasajeros se registran en los primeros 3 minutos de su llegada.

• El tiempo para recoger el equipaje es sólo de 10 minutos entre el primer y el último pasajero.

Sin embargo, las normas de servicios son más difíciles de definir y medir que las especificaciones de manufactura. Requieren de una investigación exhaustiva de las necesidades y actitudes del cliente acerca de la puntualidad, consistencia, precisión y otros requisitos de servicio. Aun cuando muchas especificaciones de productos desarrolladas para los productos fabricados se enfocan en alcanzar una meta específica, como la dimensión del producto, por lo general las metas específicas de servicio son "cuanto más pequeño, mejor". Por tanto, la verdadera norma de servicio es cero defectos. Y otras normas (como las de Swissair) se deben crear solamente como normas y metas específicas intermedias.

Al diseñar procesos de servicio de alta calidad, considere las siguientes preguntas.

• ¿Qué normas de servicio ya existen?

• ¿Cuáles de estas normas se han comunicado con claridad al personal de servicio?

• ¿Estas normas se han comunicado al público?

• ¿Qué normas requieren de un ajuste fino?

• ¿Cuál es el resultado final del servicio prestado? ¿Cuál es el resultado ideal?

• ¿Cuál es el tiempo de acceso máximo que un cliente debe tolerar sin sentirse incomodo?

• ¿Cuánto tiempo debe tomar el servicio en sí?

• ¿Cuál es el tiempo máximo de terminación del servicio antes de que la consideración del cliente sobre el servicio se afecte de manera negativa?

• ¿En qué punto empieza el servicio y qué indicador muestra la terminación del mismo?

• ¿Con cuántas personas diferentes debe tratar el consumidor para recibir el servicio?

• ¿Cuáles son los componentes esenciales del servicio? ¿Cuáles son los deseables? ¿Cuáles son los superfluos?

• ¿Qué componentes o aspectos del servicio se deben controlar con el fin de ofrecer un contacto de servicio de igual calidad en todas las ocasiones?

• ¿Qué componentes pueden cambiar de un contacto a otro, mientras se conserva un servicio total que cubra las normas?

• ¿Qué productos que afecten su desempeño de servicio proceden de fuentes externas a la organización?

Como puede ver, ¡el diseño de un proceso de servicio no es un ejercicio trivial!

UNIDAD 4

HERRAMIENTAS DE CALIDAD

Hoja de verificación (Obtención de datos)

Introducción

Un aspecto fundamental en la mejora de procesos es contar con información objetiva que facilite las acciones y decisiones basadas en datos. En las empresas, en ocasiones no hay información, no se sabe cómo ha evolucionado la calidad, la productividad, la magnitud de los problemas principales, las razones de las quejas de los clientes, etc. En otros casos, el problema no es la escasez de datos, por el contrario, abundan (reportes, informes, registros); el conflicto es que tales datos están archivados, se registraron demasiado tarde, se recabaron de manera inadecuada o, finalmente, no se analizaron ni se utilizan de modo sistemático para tomar decisiones. Por lo tanto, en ambos casos el problema es el mismo: no se tiene información para dirigir de forma objetiva y adecuada los esfuerzos y las actividades en una organización.

Por ejemplo, está el caso del área de seguridad e higiene en una empresa que registró y documentó todos los accidentes de los últimos tres años. Había datos sobre la hora, el día, el área en que habían ocurrido, así como el tipo de lesión de las personas involucradas. Sin embargo, no se sabía con precisión cuál era la evolución de la cantidad de accidentes por mes, el área más problemática, la clase de accidente más frecuente, el tipo de lesión con mayor incidencia, la hora y el día en los que se daban más los accidentes, etc., en otras palabras, se contaba con datos pero no se tenía información del problema que permitiera al personal dirigir mejor sus esfuerzos de prevención.

Cada día más las organizaciones indagan sobre la satisfacción del cliente y tratan de obtener retroalimentación de sus clientes, pero no siempre se registran de manera sistemática.

De lo anterior se desprende la necesidad de contar con métodos que faciliten la obtención y el análisis de datos, para que éstos se conviertan en información que se use de manera cotidiana en la toma de decisiones. Precisamente uno de tales métodos es la **hoja de verificación o de registro.**

Esta hoja es un formato creado para recolectar datos, de tal forma que su registro sea sencillo y sistemático. Una característica que debe reunir una buena hoja de verificación es que visualmente ofrezca un primer análisis que permita apreciar la magnitud y localización de los problemas principales. Algunas de las situaciones sobre las que resulta útil obtener datos a través de las hojas de verificación son las siguientes:

- Describir los resultados de operación o de inspección.
- Clasificar fallas, quejas o defectos detectados, con el propósito de identificar sus magnitudes, razones, tipos de fallas, áreas de donde proceden, etcétera.
- Confirmar posibles causas de problemas de calidad.
- Analizar o verificar operaciones y evaluar el efecto de los proyectos de mejora.

En las tablas 4.1 y 4.2 se muestran ejemplos de hojas de verificación. A este tipo de formatos se les conoce como **registro de las causas de los defectos.** Se recomienda al lector revisar estos formatos de registro de manera detallada, pues con ellos quedará claro que la finalidad de especificar distintos factores, como tipo de defecto, máquinas, turnos, departamento, tipo de producto o día, es detectar cuándo estos factores son la principal fuente o pista del problema, ya que si se detecta alguna tendencia especial en la hoja, es posible actuar con mayor rapidez y precisión, gracias a que se tiene localizado el sector o las condiciones que están generando el problema principal.

Como queda claro de las tablas indicadas antes, la hoja de verificación es un paso natural dentro de un análisis de Pareto y una estratificación, para recabar datos o confirmar pistas de búsqueda. Cada área de la empresa podría empezar a diseñar sus formatos de registro de tal forma que ayude a entender mejor la regularidad estadística de sus problemas. Por ejemplo, accidentes de trabajo, fallas en equipos y mantenimiento, fallas en trámites administrativos, quejas y atención a

clientes, razones de incumplimiento de plazos de entrega, ausentismo, inspección y supervisión de operaciones son problemas sobre los que se requiere información que es posible obtener mediante un buen diseño de una hoja de verificación.

Además de las hojas de verificación tipo causas de los defectos, como las que se presentaron, también existen la **hoja para distribución de procesos,** la **hoja para registro de defectos** y la **hoja para localización de defectos,** las cuales se describirán mediante los siguientes ejemplos.

Ejemplo 4.1 Hoja para distribución de procesos

En el proceso de purificación de agua, un aspecto importante en la calidad de la misma es la dureza por calcio. En un caso particular se establece 4.0 como valor ideal de esta variable, con una tolerancia de ±0.2.

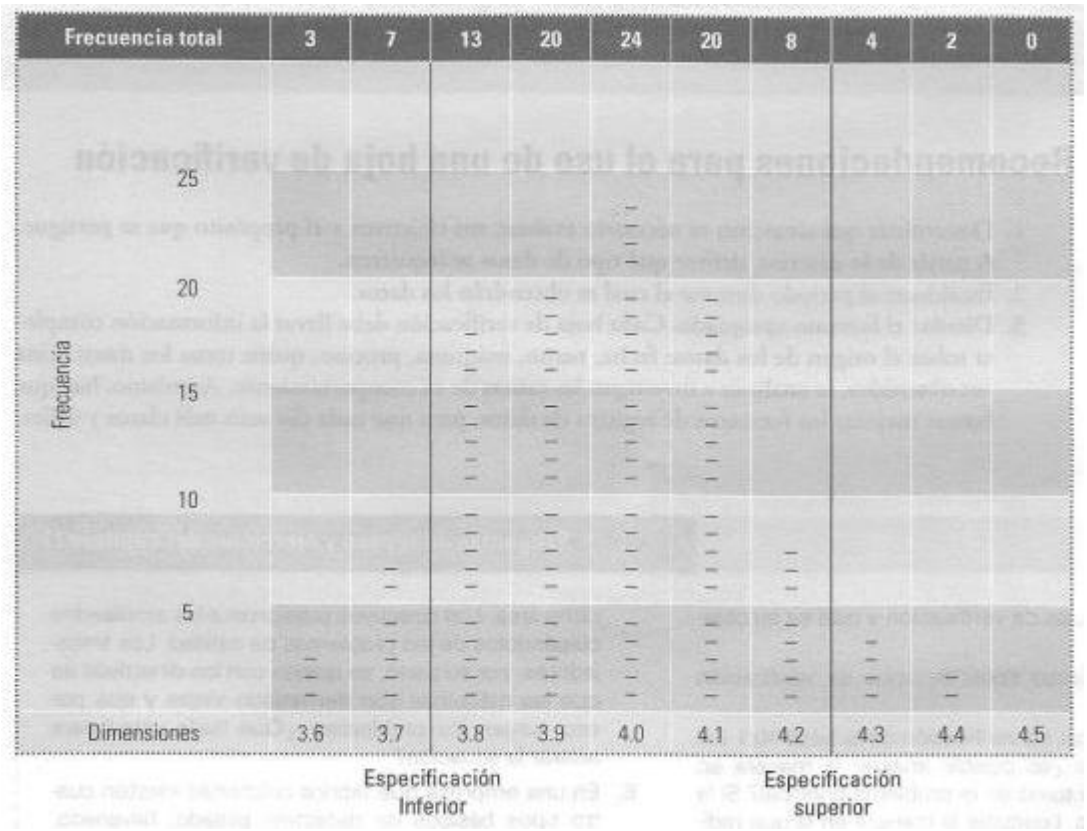
Al estar midiendo este tipo de variable continua para vigilar que su valor sea el adecuado, en ocasiones se obtienen los datos, se almacenen y posteriormente, en el mejor de los casos, se les hace algún tipo de análisis. Esto provoca que el análisis aparezca demasiado tarde, se olvide o se posponga indefinidamente.

Una forma de evitarlo sería usar una hoja de verificación para distribución de procesos como la que muestra la tabla 4.1. Por medio de ésta, es posible registrar la medición en el momento de obtenerla, lo cual reduce los errores de lectura y manejo de datos. Además, de un solo vistazo se puede apreciar el comportamiento de la variable con respecto a especificaciones. Este tipo de hoja de verificación es una especie de histograma "andante" que se obtiene en el momento y el lugar de los hechos por la gente que hace la medición. En particular, la tabla 4.1 describe un buen centrado de proceso, pero con mucha variabilidad.

Tabla 4.1 Hoja de verificación para distribución de procesos

Producto _____Fábrica _____Especificaciones _____

Sección _____ Grupo _____ Fecha _____



Ejemplo 4.2 Hoja para registro de defectos

La tabla 4.2 Ilustra una hoja de verificación para radiografías defectuosas en una clínica médica. Este tipo de hoja de registro es útil cuando es necesario registrar el tipo de problemas y la frecuencia con que se presentan. Tiene la ventaja de la oportunidad, ya que, al final de la jornada, de la semana o del mes, se aprecia inmediatamente qué tipo de problemas se presentaron con mayor frecuencia. Además, recuerda de manera objetiva y permanente a la dirección cuáles son los principales problemas, lo que puede estimular la generación de planes para reducirlos. Esta misma hoja de verificación serviría para evaluar el impacto de los planes de mejora.

Hoja de verificación 1

Producto_____Empresa_____Fecha_____Inspector_____

Tabla 4.2 Hoja de verificación para radiografías defectuosas

Defectuosa por	Frecuencia	Subtotal
Movida	𝍸 𝍸 𝍸 𝍸 ||||	24
Mordida	𝍸 |	6
Ángulo	𝍸 𝍸 𝍸 ||	17
Otros	||||	4
	Total	51

Ejemplo 4.3 Hoja para localización de las zonas con defectos

Este tipo de hoja se diseña de forma tal que permita identificar o localizar la zona del producto en la que ocurren los defectos. Por ejemplo, en la impresión de carteles puede resultar de utilidad saber en qué partes del cartel ocurren las manchas; en un producto metálico, el área en la que ocurre la porosidad y el problema de llenado. En ocasiones, esta hoja de verificación consiste en un dibujo o gráfica del producto en el cual se va registrando el defecto en la zona en la que ocurre. La idea de este tipo de hoja de registro, entonces, es localizar las zonas de fallas, de forma que sea fácil apreciar si en alguna de ellas predomina una falla determinada

Recomendaciones para el uso de una hoja de verificación

1. Determinar qué situación es necesario evaluar, sus objetivos y el propósito que se persigue. A partir de lo anterior, definir qué tipo de datos se requieren.
2. Establecer el periodo durante el cual se obtendrán los datos.
3. Diseñar el formato apropiado. Cada hoja de verificación debe llevar la información completa sobre el origen de los datos: fecha, turno, máquina, proceso, quién toma los datos. Una vez obtenidos, se analizan e investigan las

causas de su comportamiento. Asimismo, hay que buscar mejorar los formatos de registro de datos, para que cada día sean más claros y útiles.

Índices de capacidad de procesos

Introducción

Los procesos tienen variables de salida, los cuales, por lo general, deben cumplir con ciertas especificaciones para que sea posible considerar que tal proceso funciona de manera satisfactoria. Analizar **capacidad o habilidad de un proceso** consiste en conocer la amplitud de un proceso de la variación natural del proceso para una característica de calidad dada; esto permitirá saber en qué medida tal característica de calidad es satisfactoria. En este capítulo se analizan los índices de capacidad que, como su nombre lo indica, son mediciones especializadas en evaluar la capacidad, que permiten comparar procesos y detectar la necesidad de mejoras. Por la sencillez de los índices, en ocasiones se abusa de su práctica y no se consideran sus limitaciones, por lo que es muy importante conocerlos bien para hacer una interpretación correcta.

Procesos con doble especificación

En esta sección se supone que se tiene una característica de calidad de un producto o variable de salida de un proceso, del tipo valor nominal es mejor. Esto es que, para considerar que hay calidad, las mediciones deben ser iguales a cierto valor nominal o ideal (N), o al menos tienen que estar dentro de ciertas especificaciones inferiores (EI) y superior (ES).

Ejemplo 4.4

Una característica importante de los costales de fertilizante es que su peso debe ser de 50 kg. La especificación inferior para el peso es EI = 49 kg, y la superior es ES = 51. Se sabe que la media del peso es $\mu = 49.76$ y usando el rango medio se estima que la desviación estándar es $\sigma = 0.51$. Con base en esto se quiere saber en qué medida el proceso ha estado cumpliendo con especificaciones. Una

primera forma de averiguar esto es graficar la distribución del proceso, suponiendo una distribución normal, con μ = 49.76 y σ = 0.51. Esta distribución se muestra en la figura 4.1, de donde se descubre que el proceso no está centrado, ya que la media del proceso es menor que 50; además, hay mucha variación ya que la distribución no cabe dentro de especificaciones. En seguida se ve cómo las situaciones que se observan en la figura 4.1 son reflejadas por los índices de capacidad.

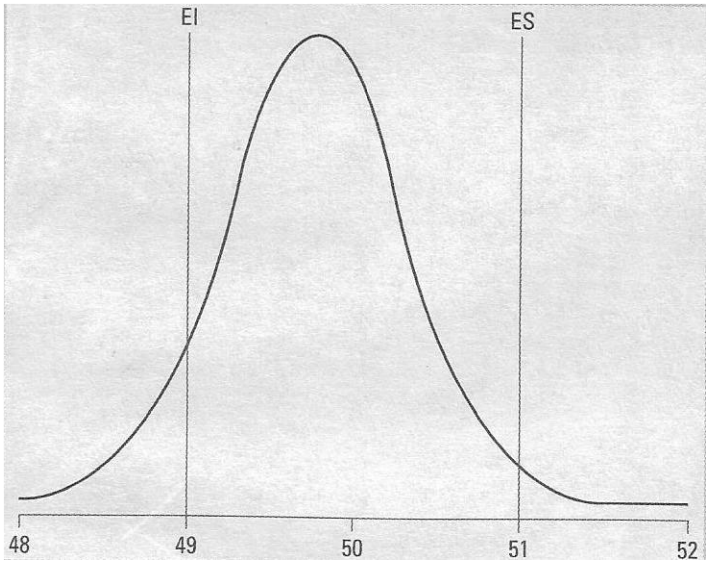


Figura 4.1 Capacidad del proceso del ejemplo 4.4

Índice C_p.

El índice de capacidad potencial del proceso, C_p. se define de la siguiente manera:

$$C_p = \frac{ES-EI}{6\sigma}$$

donde *a* representa la desviación estándar del proceso, *y* ES *y* EI son las especificaciones superior e inferior para la característica de calidad. Como se puede observar, el **índice** C_p. compara el ancho de las especificaciones o variación tolerada para el proceso con la amplitud de la variación real del proceso:

$C_{p.}$ = Variación tolerada

Variación real

Decimos que 6σ (seis veces la desviación estándar) es la variación real, debido a las propiedades de la distribución normal (vea el apéndice), en las que se afirma que entre $\mu \pm 3\sigma$ se encuentra 99.73% de los valores de una variable con distribución normal (incluso si no hay normalidad, [1] en $\mu \pm 3\sigma$ se encuentra un gran porcentaje de la distribución debido a la desigualdad de Chebyshev y la regla empírica.(que se puede consultar en el capítulo 8 del libro de Calidad y Productividad de Humberto Gutiérrez Pulido).

Interpretación del índice $C_{p.}$

Para que el proceso pueda considerarse potencialmente capaz de cumplir con especificaciones, se requiere que la variación real (natural) siempre sea menor que la variación tolerada. De aquí que lo deseable es que el índice *Cp.* sea mayor que 1, y si el valor del índice *Cp.* es menor que uno, es una evidencia de que no cumple con especificaciones. Para una mayor precisión en la interpretación, la tabla 9.1 presenta cinco categorías de procesos que dependen del valor del índice *Cp.,* suponiendo que el proceso está centrado. Ahí se ve que el *Cp.* debe ser mayor que 1.33, si se quiere tener un proceso bueno, pero debe ser mayor o igual que 2 si se quiere tener un proceso de clase mundial (calidad Seis Sigma). Además, en la tabla 4.3 se ha traducido el valor del índice en porcentaje de artículos que no cumplirían especificaciones y en la cantidad de artículos o panes defectuosas por cada millón producido (partes por millón, PPM). Una observación que se desprende de la tabla referida es que los valores del *Cp.* no son directamente iguales a un porcentaje de defectuosos.

Tabla 4.3 Valores del *C p.* y su interpretación.

Valor del índice C_p	Clase o categoría de proceso	Decisión (si el proceso está centrado)
$C_p \geq 2$	Clase mundial	Se tiene calidad Seis Sigma.
$C_p > 1.33$	1	Adecuado.
$1 < C_p \leq 1.33$	2	Parcialmente adecuado, requiere de un control estricto.
$0.67 < C_p \leq 1$	3	No adecuado para el trabajo. Un análisis del proceso es necesario. Requiere modificaciones serias para alcanzar una calidad satisfactoria.
$C_p \leq 0.67$	4	No adecuado para el trabajo. Requiere modificaciones muy serias.

Nota: Si el $C_{pk} < C_p$, entonces una vez que se centre el proceso se tendrá la clase de proceso que se indica.

En el caso del ejemplo 4.3, el índice *Cp.* está dado por:

$$c_p = \frac{51-49}{6(0.51)} = \frac{2}{3.06} = 0.65$$

La variación tolerada es de 2, y la variación real es mayor, ya que es de 3.06 (vea la figura 4.1). De acuerdo con la tabla 4.3, el proceso es de cuarta categoría, con una capacidad totalmente inadecuada y requiere modificaciones muy serias. En función de la tabla 4.4, se espera que si el proceso estuviera centrado entonces arrojaría casi 7% de costales fuera de especificaciones, que corresponde a 70 000 PPM, lo cual se considera muy inadecuado.

$$c_p = \frac{ES - EI}{P_{99.865} - P_{0.135}}$$

donde $P_{99.865}$ es el percentil99.865 de la distribución de la característica de calidad, y $P_{0.135}$ es el percentil 0.135. De esta manera, cualquiera que sea la distribución, entre estos percentiles se ubicará 99.73% de los valores de la característica de calidad.

Un aspecto a destacar es que la interpretación que se da en las tablas 4.3 y 4.4 se fundamenta en tres supuestos: que la característica de calidad se distribuye de modo normal, que el proceso es estable (está en control estadístico) y que se conoce la desviación estándar del proceso, es decir, la desviación estándar no es una estimación con base en una muestra. La violación de alguno de estos supuestos, sobre todo de los últimos dos, afecta sensiblemente la interpretación

de los índices. Más adelante se verá la interpretación de los índices cuando éstos se calculan (estiman) a partir de una muestra.

Si al analizar el proceso se encuentra que su capacidad no es compatible con las tolerancias, existen tres opciones: mejorar el proceso, cambiar las tolerancias o sufrir e inspeccionar 100 % de los productos. Por el contrario, si hay capacidad excesiva, ésta se puede aprovechar, por ejemplo, reasignando productos a máquinas menos precisas, acelerando el proceso y reduciendo la cantidad de inspección.

Tabla 4.4 Los índices $C_{p.}$, C_{pi}, Y C_{ps} en términos de la cantidad de piezas malas, bajo normalidad y proceso centrado en el caso de doble especificación.

Valor del índice (corto plazo)	Proceso con doble especificación (índice C_p)		Con referencia a una sola especificación (C_{pi}, C_{ps}, C_{pk})	
	% fuera de las dos especificaciones	Partes por millón fuera (PPM)	% fuera de una especificación	Partes por millón fuera (PPM)
0.2	54.8506	548506.130	27.4253	274253.065
0.3	36.8120	368120.183	18.4060	184060.092
0.4	23.0139	230139.463	11.5070	115069.732
0.5	13.3614	133614.458	6.6807	66807.229
0.6	7.1861	71860.531	3.5930	35930.266
0.7	3.5729	35728.715	1.7864	17864.357
0.8	1.6395	16395.058	0.8198	8197.529
0.9	0.6934	6934.046	0.3467	3467.023
1.0	0.2700	2699.934	0.1350	1349.967
1.1	0.0967	966.965	0.0483	483.483
1.2	0.0318	318.291	0.0159	159.146
1.3	0.0096	96.231	0.0048	48.116
1.4	0.0027	26.708	0.0013	13.354
1.5	0.0007	6.802	0.0003	3.401
1.6	0.0002	1.589	0.0001	0.794
1.7	0.0000	0.340	0.0000	0.170
1.8	0.0000	0.067	0.0000	0.033
1.9	0.0000	0.012	0.0000	0.006
2.0	0.0000	0.002	0.0000	0.001

Índices C_{pk} C_{pi} C_{ps}

El índice $C_{p.}$ estima la capacidad potencial del proceso para cumplir con especificaciones, pero una de sus desventajas es que no toma en cuenta el centrado del proceso, ya que en su fórmula para calcularlo no incluye la media del proceso μ. Una forma de corregir esto es evaluar por separado el cumplimiento de las especificaciones inferior y superior, a través del **índice de capacidad para la especificaci6n inferior** $(C_{pi.})$, y el **índice de capacidad para la superior** $(C_{ps.})$, que se calculan de la siguiente manera:

$$C_{pi} = \frac{\mu - EI}{3\sigma} \quad y \quad C_{ps.} = \frac{ES - \mu}{3\sigma}$$

Estos índices sí toman en cuenta μ y calculan la distancia de la media del proceso a una de las especificaciones, que representa la variación tolerada para el proceso de un solo lado de la media. A tal distancia se le divide entre *3a* porque sólo se está tomando en cuenta la mitad de la variación natural del proceso. Para interpretar los índices unilaterales se puede usar la tabla 4.4, que señala el porcentaje de producto que no cumple con especificaciones.
En el ejemplo 4.3, del peso de los costales, se tiene que:

$$C_{ps} = \frac{51 - 49.76}{3(0.51)} = \frac{1.24}{1.53} = 0.81$$

$$C_{pi} = \frac{49.76 - 49}{3(0.51)} = \frac{0.76}{1.53} = 0.50$$

Luego, como el índice para la especificación inferior, C_{pi} es el más pequeño y es menor que uno, entonces los mayores problemas están por la parte inferior (vea la figura 4.1). Si se usa la tabla 4.4, dado que C_{pi} = 0.50, entonces el porcentaje de producto que pesa menos que EI = 49 kg es 6.68%. Cabe notar que también en la especificación superior hay problemas, ya que C_{ps} = 0.81, por lo que el porcentaje de producto que pesa más de ES = 51 kg es 0.82%

(vea la tabla 4.4). Por su parte, el **índice de capacidad real del proceso** (C_{pk}) se puede ver como una versión corregida del C_p. que sí toma en cuenta el centrado del proceso. Para calcularlo hay varias formas equivalentes, una de las más comunes es la siguiente:

$$C_{pk} = \text{Mínimo}\left[\frac{\mu - EI}{3\sigma} \quad , \quad \frac{ES - \mu}{3\sigma}\right]$$

Como se puede apreciar, el índice C_{pk} es igual al valor más pequeño de entre C_{pi} y C_{ps}, es decir, el índice C_{pk} es igual al índice unilateral más pequeño, por lo que si el valor del C_{pk} es satisfactorio (mayor que 1.25), eso indicará que el proceso 'en realidad es capaz. Si $C_{pk} < 1$, entonces el proceso no cumple con por lo menos una de las especificaciones. Algunos elementos adicionales para la interpretación del índice C_{pk} son:

- El índice C_{pk} siempre será menor o igual que el índice C_p. Cuando sean muy próximos. eso
- indicará que la media del proceso está muy cerca del punto medio de las especificaciones,
- por lo que la capacidad potencial y real son similares.
- Si el valor del índice C_{pk} es mucho más pequeño que el C_p. esto indicará que la media del proceso está alejada del centro de las especificaciones. De esa manera. el índice C_{pk} estará indicando la capacidad real del proceso, y si se corrige el problema de descentrado, se alcanzará la capacidad potencial indicada por el índice C_p.
- Cuando el valor del C_{pk} sea mayor que 1.25 en un proceso ya existente, se considerará que se tiene un proceso con capacidad satisfactoria. Mientras que para procesos nuevos se pide un $C_{pk} > 1.45$.
- Es posible tener valores del *Cpk* iguales a cero o negativos, e indicarán

que la media del proceso está fuera de las especificaciones.

A partir del ejemplo 4.3, del peso de los costales, se tiene que:

$$Cpk = \text{Mínimo}\left[\frac{49.76 - 49}{3(0.51)}, \frac{51 - 49.76}{3(0.5\ 1)}\right] = \text{Mínimo}\left[\frac{0.76}{1.53}, \frac{1.24}{1.53}\right] = 0.5$$

Esto en términos generales indica una capacidad muy pobre. Por lo tanto, cierta proporción de costales no tiene un peso adecuado, como ya se había visto con los índices unilaterales y en la figura 4.1. Como el C_{pk} = 0.50 es menor que el $C_{p.}$ = 0.65, entonces existe un problema de centrado del proceso, como se vio en la figura 4.1, por lo que la primera recomendación de mejora para ese proceso sería que optimice su centrado, con lo cual alcanzaría su mejor potencial actual, que indica el valor del $C_{p.}$ = 0.65.

Índice *K*

Como se ha visto a través del ejemplo 4.3, un aspecto importante en el estudio de la capacidad de un proceso es evaluar si la distribución de la característica de calidad está centrada respecto a las especificaciones, por ello es útil calcular el **índice de centrado del proceso** (***K***), que se calcula de la siguiente manera:

$$K = \frac{\mu - N}{\frac{1}{2}(ES - EI)} \times 100$$

Como se aprecia, este indicador mide la diferencia entre la media del proceso, μ, y el valor objetivo o nominal, N (o *target),* para la correspondiente característica de calidad, y a esta diferencia la compara contra la mitad de la amplitud de las especificaciones. El hecho de multiplicar por 100 ayuda a tener una medida porcentual. La interpretación usual de los valores de K es la siguiente:

- Si el signo del valor de K es positivo, significa que la media del proceso es mayor que el valor nominal, y será negativo cuando $\mu < N$.

- Valores de *K* menores que 20% en términos absolutos se pueden considerar aceptables, pero a medida que el valor absoluto de *K* sea más grande que 20%, indica un proceso muy descentrado, lo que puede contribuir de manera significativa a que la capacidad del proceso para cumplir especificaciones sea baja.
- El valor nominal, *N,* es la calidad objetiva y óptima; cualquier desviación respecto a este valor lleva un detrimento en la calidad. Por ello, cuando un proceso esté descentrado de manera significativa, se deben hacer esfuerzos serios para centrarlo, lo que regularmente es más fácil que disminuir la variabilidad.

En el ejemplo 4.3 del peso de los costales, si se considera que el valor nominal *N*= 50 kg, entonces el índice *K* es:

$$K = \frac{49.76 - 50}{\frac{1}{2}(51 - 49)} \times \ 100 = -24\%$$

De esta forma, la media del proceso está desviada 24% a la izquierda del valor nominal, por lo que el centrado del proceso es inadecuado y esto contribuye de manera significativa a la baja capacidad del proceso para cumplir con la especificación inferior, como ya se había visto a través de la figura 4.1 y los anteriores índices de capacidad.

Procesos con sólo una especificación

Existen procesos cuyas variables de salida tienen sólo una especificación, ya sean variables del tipo entre más grande mejor, en las que lo que interesa es que sean mayores que cierto valor mínimo (EI), o variables del tipo entre más pequeña mejor, en las que lo que se quiere es que nunca excedan un cierto valor máximo (ES). Para evaluar la capacidad de estos procesos se utilizan los índices C_{pi} o $C_{ps.}$, que se vieron antes.

Ejemplo 4.4. Especificación inferior

En una armadora de autos, en el área de pintado, una característica de calidad es el espesor de la capa anti piedra en la zona trasera de los arcos de rueda que debe ser mínimo de 100 micras *(EI*= 100). Para asegurar el cumplimiento de esta especificación, se lleva una carta de control $\bar{X}$ - *R;* de la información proporcionada por esta carta se sabe que el proceso está en control estadístico y que μ = 105 y σ = 6 .5. En este caso no es posible calcular el índice C_{pi}, ya que sólo se cuenta con la especificación inferior; más bien, dado el tipo de variable, lo que se debe calcular es el índice para la especificación inferior C_{pi}, que, como ya se vio, está dado por:

$$C_{pi} = \frac{\mu - EI}{3\sigma} = \frac{105 - 100}{3(6.5)} = 0.256$$

lo que indica que la capacidad del proceso es muy mala. Esto se corrobora con la tabla 4.4, de la que se obtiene que el proceso genera entre 18.4 y 27.4 % de productos cuyo espesor de capa es menor que *EI*= 100. Ajustando a 22%, indica que se tienen 220 000 PPM (productos por cada millón) que no cumplen con dicha especificación.

Índice C_{pm} (Índice de Taguchi)

Los índices $C_{p.}$ y C_{pk} están pensados a partir de que lo importante para un proceso es reducir su variabilidad para cumplir con las especificaciones. Sin embargo, desde el punto de vista de G. Taguchi, cumplir con especificaciones no es sinónimo de buena calidad y la reducción de la variabilidad debe darse pero en torno al valor nominal (calidad óptima). Es decir, la mejora de un proceso según Taguchi debe estar orientada a reducir su variabilidad alrededor del valor nominal, *N,* y no sólo orientada a cumplir con especificaciones. En consecuencia de lo anterior, Taguchi (1986) propone que la capacidad del proceso se mida con el índice C_{pm} que está definido por:

$$C_{pm} = \frac{ES - ES}{6\tau}$$

donde τ (tau) está dada por:

$$\tau = \sqrt{\sigma^2 + (\mu - N)^2}$$

N es el valor nominal de la característica de calidad, y El y ES son las especificaciones inferior y superior. El valor de *N* generalmente es igual al punto medio de las especificaciones, es decir, *N* = 0.5 (ES + El). Note que el índice C_{pm} compara el ancho de las especificaciones con 6τ, pero *T* no sólo toma en cuenta la variabilidad del proceso, a través de σ^2, sino que también se preocupa por su centrado a través de $(\mu - N)^2$. De esta forma, si el proceso está centrado, es decir, si $\mu = N$, entonces el *Cp.* y el *Cpm* son iguales.
En el caso del ejemplo 4.3, sobre el peso de los costales:

$$C_{pm} = \frac{51 - 49}{\sqrt{6\ 0.51^2 + (49.76-50)^2}} = \frac{2}{3.38} = 0.59$$

Interpretación. Cuando el índice C_{pm} es menor que 1, eso indica que el proceso no cumple con especificaciones, ya sea por problemas de centrado o por exceso de variabilidad. Por lo que en el caso de los costales no se cumple con especificaciones y, como se aprecia en la figura 4.1, se debe tanto a exceso de variación como a que el proceso está descentrado.
Por el contrario, cuando el índice C_{pm} es mayor que uno, entonces eso querrá decir que el proceso cumple con especificaciones y, en particular, que la media del proceso está dentro de la tercera parte media de la banda de las especificaciones. Si C_{pm} es mayor que 1.33, entonces el proceso cumple con especificaciones, pero además la media del proceso está dentro de la quinta parte media del rango de especificaciones. En el caso del ejemplo 4.4, la quinta parte media de la banda de especificaciones es 50± (1/5).

Estimación de los índices mediante una muestra (estimación por intervalo)

Para calcular los índices de capacidad e interpretarlos se necesita conocer la media, μ, y la desviación estándar, σ, del proceso con una buena aproximación. Sin embargo, no siempre se conocen estos parámetros, por lo que en esas situaciones será necesario utilizar datos muéstrales y estimar estos índices por intervalo. Sea $x_1, x_2, \ldots x_n,$ una muestra aleatoria del proceso, y $\bar{x}$ y S la media y la desviación estándar de tal muestra. Si los índices se estiman usando $\bar{x}$ y S en lugar de μ y σ, respectivamente, entonces la estimación puntual de los índices estará dada por:

$$\hat{C}_p = \frac{ES - EI}{6S}$$

$$\hat{C}_{pi} = \frac{\bar{x} - EI}{3S}$$

$$\hat{C}_{pk} = \frac{ES - \bar{x}}{3S}$$

$$\hat{C}_{pk} = \text{Mínimo}\,(C_{pi}, C_{ps})$$

$$C_{pm} = \frac{ES - EI}{\sqrt{S^2 + (\bar{x} - N)^2}}$$

y si la muestra es pequeña, de unas cuantas decenas (menor que 80, por ejemplo), es incorrecto comparar los valores estimados con los valores mínimos recomendados para los índices. También es erróneo interpretar los valores estimados de los índices como en la tabla 4.3, ya que los valores mínimos son para los verdaderos índices, o índices poblacionales, y no para su estimación muestral. Si los índices son estimados con base en muestras pequeñas, entonces un valor grande de un índice muestral no necesariamente

implica que se tiene una buena capacidad de proceso. Lo contrario también es verdad: un valor pequeño del índice estimado no necesariamente implica mala capacidad del proceso.

Por lo anterior, lo que debe hacerse es una estimación por intervalo (vea Gutiérrez Pulido y de la Vara, 2009), en la cual se toma en cuenta el error estándar de su correspondiente estimador muestra! (vea Kushler y Hurley, 1992). De forma específica, los intervalos de confianza para $C_{p.}$, C_{pk} y C_{pm} están dados por:

$$\hat{C}_p \pm Z_{\alpha/2} = \frac{\hat{C}_p}{\sqrt{2\,(n-1)}}$$

$$\hat{C}_{pk} \pm Z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{C}^2_{pk}}{2\,(n-1)} + \frac{1}{9n}}$$

$$\hat{C}pm \pm Z_{\alpha/2} \frac{\hat{C}pm}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\frac{1}{2} + \frac{(\bar{x}-N)^2}{S^2}}{\left[1 + \frac{(\bar{x}-N)^2}{S^2}\right]}}$$

donde n es el tamaño de muestra y $Z_{\alpha/2}$ es el percentil de la distribución normal que determina la confianza de la estimación (si se quiere trabajar con 95% de confianza , el valor de $Z_{\alpha/2}$ es 1.96). De esta manera, el verdadero valor del índice de capacidad del proceso se encontrará entre el intervalo obtenido con las expresiones anteriores, con la confianza deseada.

Ejemplo 4.5

Supongamos que una característica de calidad tiene especificaciones de 50 ± 1. Para tener una primera idea de la capacidad del proceso para cumplir con esta especificación, se obtiene una muestra aleatoria de 40 unidades producidas por el proceso. De las mediciones de esas 40 unidades se obtiene que la media y la desviación estándar para la muestra son: X= 50.15 y S= 0.289. Con estos valores se estiman puntualmente los índices:

$\hat{C}_p = \frac{51 - 49}{6(0.289)} = 1.15$

$\hat{C}_{pk} = \text{Min}\left(\frac{50.15 - 49}{3(0.289)}, \frac{51 - 50.15}{3(0.289)} \right) = \text{Min}(1.33, 0.98) = 0.98$

$$\hat{C}_{pm} = \frac{51 - 49}{\sqrt{(0.289)^2 + (50.15 - 50)^2}} = 1.02^2$$

Para tener una idea del valor de los índices poblacionales del proceso, se calcula un intervalo de confianza a 95%:

C_p: $1.15 \pm 1.96 \frac{1.15}{\sqrt{2(40-1)}} = 1.15 \pm 0.26$

C_{pk}: $0.98 \pm 1.96 \sqrt{\frac{(0.98)^2}{2(40-1)} + \frac{1}{9(40)}} = 0.98 \pm 0.24$

$$Cpm: 1.02 \pm 1.96 \frac{1.02}{\sqrt{40}} \sqrt{\frac{\frac{1}{2} + \frac{(50.15 - 50)^2}{(0.289)^2}}{\left[1 + \frac{(50.15 - 50)^2}{(0.289)^2}\right]}} = 1.02 \pm 0.22$$

El 0.26, el 0.24 y el 0.22 en las anteriores ecuaciones son los errores de estimación para cada índice. De esta manera, con una confianza de 95%, el verdadero valor del índice C_p está entre 0.89 y 1.41; el de C_{pk} se localiza entre 0.74 y 1.22, y el de C_{pm} entre 0.80 y 1.24. Por lo tanto, con base en la muestra sería riesgoso afirmar que el proceso es potencialmente capaz, ya que el valor real del C_p podría ser de hasta 0.89; pero también sería riesgoso afirmar que es malo, ya que el verdadero valor del C_p podría ser 1.41. Lo mismo se puede decir respecto a la capacidad real, ya que lo mismo puede ser mala C_{pk} = 0.74, C_{pm} = 0.80) que buena (C_{pk} = 1.22, C_{pm} = 1.24). Para reducir esta incertidumbre y el error de estimación, es necesario medir más piezas (incrementar el tamaño de la muestra)

Cartas o diagramas de control

Introducción

Son un instrumento indispensable para monitorear y controlar adecuadamente los procesos.

Administración por reacción y las cartas de control

El mundo se caracteriza por su variabilidad; por ejemplo, en el trayecto a la escuela o al trabajo no siempre se hace el mismo tiempo, el porcentaje de artículos defectuosos de lote a lote es variable, la capacitación y habilidad entre los trabajadores no es idéntica, cada diente es diferente. En las organizaciones, continuamente se observan cambios (variación), por ejemplo, de una semana a otra pueden presentarse cambios en las ventas o en el desempeño de los procesos. En este contexto, uno de los aspectos críticos en la administración de cualquier organización es decidir ante qué tipo de cambios se debe actuar oportunamente antes de que las cosas vayan peor. También es igualmente importante saber en forma adecuada y oportuna si las acciones que se están ejecutando cumplen sus objetivos.

Enfrentar estos dos aspectos críticos no es sencillo, porque por un lado siempre hay variación y, por otro, una de las principales fallas de los directivos en una organización es que administran por reacción, de acuerdo con el resultado anterior y sin conocimiento de la variabilidad; lo que lleva a que mucho del trabajo sea reactivo y se atienda con acciones como juntas de trabajo, llamadas de atención, regaños, nuevas reglas e indicaciones, etc. Cuando se trabaja en forma reactiva, se termina actuando ante las muchas cosas urgentes y se dejan de lado los asuntos que, aunque no son urgentes, son los realmente importantes **(vea la tabla 1.1del capítulo 1).** El trabajo de la administración por reacción se parece más a la de un bombero, que va de un lado a otro, tratando de apagar los incendios.

A continuación se ilustra, a través del experimento del embudo ideado por el Dr. Nelson, el efecto que tiene el hecho de reaccionar sin conocimiento de la variabilidad.

Ejemplo 4.6 Experimento del embudo

Material. Un embudo cualquiera, una o varias canicas del mismo tamaño que puedan pasar por el embudo con facilidad, dos plumones o marcadores y una cartulina de al menos 50 x 50 cm.

Experimento. Consiste en poner la cartulina sobre una mesa o en el piso y marcarla con un pequeño círculo al centro. Se dejarán caer las canicas a través del embudo con objeto de que den en el "blanco" (el círculo que se marcó en la cartulina).

Paso 1. Una persona debe sostener fijamente el embudo a una altura aproximada de un metro a partir de donde está la cartulina, de tal forma que el embudo quede al centro y en dirección vertical al blanco. Una vez iniciado el experimento no se podrá mover el embudo. Fijo éste, otra persona debe dejar caer una a una las canicas en el embudo hasta completar 50 lanzamientos (al dejar caer la canica, ésta debe deslizarse por la superficie del embudo). Una persona más, con uno de los plumones, deberá marcar con un punto visible el lugar de la cartulina donde va cayendo cada una de las canicas.

Después de lanzar 50 veces una canica o 50 canicas, la cartulina va a tener una apariencia similar a la de la figura 4.2. A partir de ésta se puede apreciar que los resultados han sido muy malos: en muy pocas ocasiones se le dio al blanco, en muy pocas ocasiones se le dio al blanco.

La canica se dirigió hacia cualquier lado, algunas veces cerca del blanco y en otras bastante lejos de este.

Tal vez los malos resultados se deban a que, una vez fijado el embudo, no se pudo corregir su posición. Para tratar de superar esta situación se realiza un segundo paso del experimento.

Paso 2. Con la misma cartulina del paso 1, nuevamente se dejan caer una a una las 50 canicas y el lugar donde caen se marca con una cruz. Pero ahora, en cada caída de una canica, quien detiene el embudo debe moverlo para que la siguiente canica sí dé en el blanco, de tal forma que si la canica cayó 5 cm a la derecha del blanco, entonces el embudo debe moverse 5 cm a la izquierda para compensar el error.

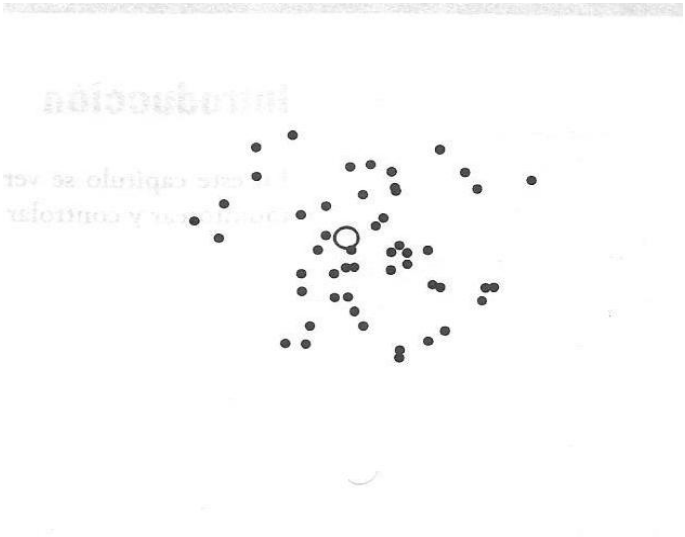


Figura 4.2 Experimento del embudo, resultado del paso 1

Los resultados obtenidos en este segundo paso deben ser similares a los que se muestran en la figura 4.3, en la cual se observa que los resultados fueron aún peores a los logrados en el paso 1. Si al que detiene el embudo se le pagara por ajustar el embudo, entonces se le estaría remunerando por empeorar las cosas.

Lo que se pasó por alto en las modificaciones de la segunda parte del experimento es ignorar que la variabilidad observada en la figura 4.2 no se debía a que el embudo estuviera mal centrado, sino a una variabilidad natural causada por el sistema (diámetro del embudo, tamaño de la canica, forma de dejar caer la canica, etc.). Así, si lo que se quiere es reducir la variabilidad en torno al blanco, lo que se debe hacer es modificar las causas que la provocan. Por ejemplo, algunos cambios en el experimento que reducirían la variabilidad serían:

- Aumentar el tamaño de la canica.
- Cambiar la forma de dejar caer la canica al embudo: en lugar de deslizarla, dejarla caer directamente a su tubo
- Reducir el diámetro del tubo del embudo.
- Disminuir la distancia del embudo a la cartulina.

Lo que se hizo en el paso 2 con el embudo para tratar de disminuir la variabilidad es un claro ejemplo del efecto que tiene administrar según el

resultado anterior o administrar por reacción, que por lo general empeora los problemas. A continuación se presenta otro ejemplo.

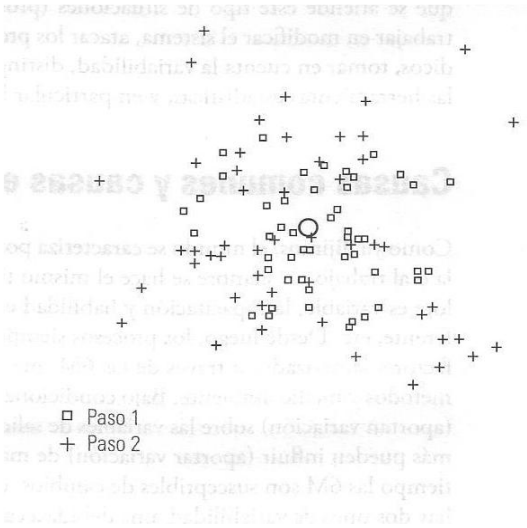


Figura 4.3 Experimento del embudo, resultado de los pasos 1 y 2.

Ejemplo 4.7 Administrar un proceso por reacción

El cobre fundido se expulsa a través de un orificio. Un obrero tiene la tarea de producir lingotes que pesen 25 kg. El peso de cada lingote hecho aparece ante él de manera automática. Para hacer el siguiente lingote, la persona abre o cierra una llave, dependiendo de si el lingote anterior pesó más o menos 25 kg.
El objetivo de este método de trabajo es producir uniformidad pero, al igual que en el paso 2 del experimento del embudo, lo único que produce es desigualdad, aunque ni el obrero ni su jefe lo sepan. Por lo tanto, se está pagando al obrero para empeorar las cosas.
Lo que se podría hacer para producir uniformidad es dejar de administra r por reacción y conocer la variabilidad natural del proceso mediante la aplicación de una carta de control, ya que gracias a ella se podrían detectar las situaciones o causas especiales que afectan el funcionamiento del proceso. La carta de control es un punto de partida para trabajar en las causas de fondo que alteran el proceso.
Las situaciones de administrar sin conocer la variabilidad, que se han ilustrado en los ejemplos 4.6 y 4.7, son frecuentes en la gestión de las organizaciones. Algunos ejemplos de ello son:

- Ajustes al proceso cuando se sale de especificaciones.
- Ajustes al proceso según el resultado anterior.
- La reacción de enojo o reclamo a los trabajadores ante la queja de un cliente o ante cualquier problema de calidad.
- Reacción según las cifras del periodo anterior (la típica reunión para analizar los resultados de la semana anterior, sin análisis de tendencias).
- Reunión urgente de ejecutivos para corregir los problemas que se han presentado.
- Reemplazo de un trabajador capacitado por otro en sucesión.
- Reacciones ante las cifras diarias.

El problema en este tipo de reacciones no son las reacciones en sí, sino la forma de hacerlo: se atienden los aspectos superficiales, se corrigen los efectos y no las causas; además, no se conduce a la ejecución o revisión de un plan de mejora, no se parte de un análisis objetivo de los antecedentes del problema y se ignora la variabilidad que tiene el proceso o sistema.
De lo antes expuesto se concluye que tiene que pensarse en buscar cómo cambiar la forma en que se atiende este tipo de situaciones (problemas); por ejemplo, ser más objetivos, ir al fondo, trabajar en modificar el sistema, atacar los problemas con proyectos y no con ocurrencias, ser metódicos, tomar en cuenta la variabilidad, distinguir entre cambios especiales y comunes. En todo esto las herramientas estadísticas, y en particular las cartas de control, juegan un papel primordial.

Causas comunes y causas especiales de variación

Como ya dijimos, el mundo se caracteriza por su variabilidad; por ejemplo, en el trayecto a la escuela o al trabajo no siempre se hace el mismo tiempo, el porcentaje de artículos defectuosos de lote a lote es variable, la capacitación y habilidad entre los trabajadores no es idéntica, cada cliente es diferente, etc. Desde luego, los procesos siempre tienen variación, ya que en él intervienen

diferentes factores sintetizados a través de las 6M: materiales, maquinaria, medición, mano de obra (gente), métodos y medio ambiente. Bajo condiciones normales o comunes de trabajo, todas las M influyen (aportan variación) sobre las variables de salida del proceso, en forma natural o inherente, pero además pueden influir (aportar variación) de manera especial o fuera de lo común, ya que a través del tiempo las 6M son susceptibles de cambios, desajustes, desgastes, errores, descuidos, fallas, etc. Así, hay dos tipos de variabilidad: una debida a causas comunes y la otra a causas especiales o atribuibles. Resulta fundamental distinguir en forma eficiente entre ambos tipos de variación, para así tomar las medidas adecuadas en cada caso.

La variación por causas comunes (o por azar) es aquella que permanece día a día, lote a lote; la aportan en forma natural las actuales condiciones de las 6M. Esta variación es inherente a las actuales características del proceso y es resultado de la acumulación y combinación de diferentes causas difíciles de identificar y eliminar, debido a que son inherentes al sistema y porque la contribución individual de cada causa es pequeña; no obstante, a largo plazo representan la mayor oportunidad de mejora.

La variación por causas especiales (o atribuibles) es generada por situaciones o circunstancias especiales que no están permanentemente en el proceso. Por ejemplo, la falla ocasionada por el mal funcionamiento de una pieza de la máquina, el empleo de materiales no habituales o el descuido no frecuente de un operario. Las causas especiales, por su naturaleza relativamente discreta, a menudo pueden ser identificadas y eliminadas si se cuenta con los conocimientos y condiciones para ello.

Se dice que un proceso que trabaja sólo con causas comunes de variación está en control estadístico o es estable, porque su variación a través del tiempo es predecible. Independientemente de que su variabilidad sea mucha o poca, el desempeño del proceso es predecible sobre el futuro inmediato, en el sentido de que su tendencia central y la amplitud de su variación se espera que se mantengan al menos en el corto plazo. Un proceso en el que están presentes causas especiales de variación se dice que está fuera de control estadístico (o que simplemente es inestable). Este tipo de procesos son impredecibles sobre el futuro inmediato porque en cualquier momento pueden aparecer de nuevo

esas situaciones que tienen un efecto especial sobre la tendencia central o sobre la variabilidad.

No distinguir entre estos dos tipos de variabilidad lleva a cometer dos errores en la actuación sobre los procesos. Error 1: reaccionar ante un cambio o variación (efecto o problema) como si pro- viniera de una causa especial, cuando en realidad surge de algo más profundo en el proceso, como las causas comunes de variación. Error 2: tratar un efecto o cambio como si proviniera de causas comunes de variación, cuando en realidad se debe a una causa especial.

Cada uno de estos dos errores causa pérdida. Se puede evitar uno u otro, pero no ambos. No es posible reducir a cero ambos errores. Lo mejor que se puede hacer es tratar de cometer rara vez ambos, y para ello Walter Shewhart ideó las cartas de control en 1924.

Ejemplo 4.8 Error I y II

Una línea de producción está sacando desperfectos o mellas en las latas. Si tal desperfecto lo provoca un desgaste natural relativamente menor en la maquinaria (causa especial), los trabajadores o los técnicos pueden reducirlo o eliminarlo ajustando o reemplazando las partes afectadas del equipo. Si, en cambio, las latas salen melladas porque la administración está comprando hojalata de menor calidad (causa común) quizás en un esfuerzo por reducir costos, entonces no hay nada que los operarios puedan hacer por el problema. Sólo la administración tiene facultad para cambiar la política de compras.

Si en este caso se controla por reacción, no por conocimiento de la variabilidad, es natural que cuando la línea de montaje arroja una lata defectuosa, la "reacción visceral" lleva al operario a ajustar la maquinaria. En caso de que el problema resida en el material y no en la máquina, el ajuste puede descomponer el sistema y, por lo tanto, empeorar las cosas, lo cual llevará a nuevos y más graves problemas. Mientras tanto, la verdadera fuente del inconveniente (el material) pasaría inadvertida. Éste es un ejemplo de las pérdidas que causa el error 1.

Estos errores son comunes en todos los niveles jerárquicos de una empresa, ya que es frecuente que estén relacionados con hábitos de acción y dirección. El error 2 tiene que ver con la falta de acción oportuna y previsora para detectar

rápido la presencia de una causa especial; más bien, las acciones llegan hasta que los problemas provocan crisis, hasta que estalla el incendio. El error 1 tiene que ver con la sobrerreacción: actuar en forma visceral e inmediatamente ante los cambios, en lugar de actuar y decidir en forma objetiva con el conocimiento de la variabilidad de los procesos y de los sistemas.

Elementos básicos de una carta de control

El objetivo básico de una **carta de control** es observar y analizar el comportamiento de un proceso a través del tiempo. Esto permitirá distinguir las variaciones por causas comunes de las debidas a causas especiales (atribuibles), lo que ayudará a caracterizar el funcionamiento del proceso y así decidir las mejores acciones de control y de mejora.

La figura 4.4 muestra una carta de control típica, la cual se compone básicamente de tres líneas paralelas, comúnmente horizontales, que rematan a la izquierda en una escala numérica en las unidades del estadístico *w,* que se grafica en la carta. En la parte inferior, paralela a las líneas hay un eje que sirve para identificar la procedencia de los datos. En caso de que este eje sea una escala cronológica, entonces los puntos consecutivos se unen con una línea recta para indicar el orden en el que ha ocurrido cada dato.

La línea central de una carta de control representa el *promedio del estadístico* que se está graficando, cuando el proceso se encuentra en control estadístico. Las otras dos líneas se llaman **límites de control**, superior e inferior, y están en una posición tal que, cuando el proceso está en control estadístico, hay una alta probabilidad de que prácticamente todos los valores del estadístico (pun tos) caigan dentro de los límites. De esta manera, si codos los puntos están dentro de los límites, entonces se supone que el proceso está en control estadístico. Por el contrario, si al menos un punto está fuera de los límites de control, entonces esto es una señal de que pasó algo especial y es necesario investigar su causa. En general, los límites de control son estimaciones de la amplitud de la variación del estadístico (promedio, rangos, etc.) que se grafica en la carta.

Lo que se observa en una carta de control no sólo es que un punto caiga fuera de los límites de control, sino también cualquier formación o patrón de puntos que tenga muy poca probabilidad de ocurrir en condiciones "normales", lo cual será una señal de alerta de posibles cambios debidos a causas especiales.

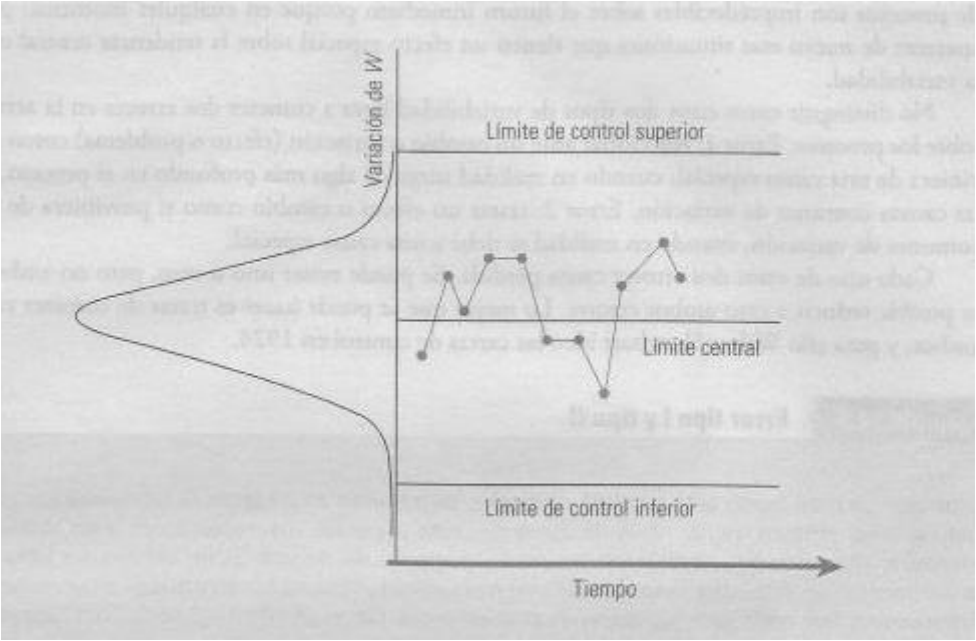


Figura 4.4 Idea y Elemento de una carta de control

Límites de control

La ubicación de los límites de control en una carta es un aspecto fundamental, ya que si éstos se ubican demasiado alejados de la línea central entonces será más difícil detectar los cambios en el proceso, mientras que si se ubican demasiado estrechos se incrementará el error tipo 1 (declarar un cambio cuando no lo hay).

Para calcular los límites de control se debe proceder de tal forma que, bajo condiciones de control estadístico, el estadístico que se grafica en la carta tenga una alta probabilidad de caer dentro de tales límites. Por lo tanto, una forma de proceder es encontrar la distribución de probabilidades del estadístico, estimar sus parámetros y ubicar los límites de manera que un alto porcentaje de la distribución esté dentro de ellos (vea Gutiérrez Pulido y de la Vara, 2009); esta forma de proceder se conoce como **límites de probabilidad.**

Una forma más sencilla y usual se obtiene a partir de la relación entre la media y la desviación estándar de una variable, que para el caso de una variable con distribución normal con media μ, desviación estándar σ, y bajo condiciones de control estadístico, se tiene que entre $\mu - 3\sigma$ y $\mu + 3\sigma$ se encuentra 99.73% de los posibles valores que toma tal variable (vea el apéndice). En caso de que no se tenga distribución normal, pero exista una distribución unimodal y con una forma no muy distinta a la normal, entonces se aplica la regla empírica o la extensión del teorema de Chebyshev. Bajo estas condiciones, se presenta a continuación un modelo general para una carta de control.

Sea w el estadístico que se va a graficar en la carta y supongamos que su media es μ_w y su desviación estándar σ_w, entonces el límite de control inferior (LCI), la línea central y el límite de control superior (LCS) están dados por:

$$LCI = \mu_w - 3\sigma_w$$

$$\text{Línea central} = \mu_w$$

$$LCS = \mu_w + 3\sigma_w$$

Con estos límites y bajo condiciones de control estadístico se tendrá alta probabilidad de que los valores de w estén dentro de ellos. En particular, si w tiene distribución normal, tal probabilidad será de 0.9973, con lo que se espera que bajo condiciones de control sólo 27 puntos de 10 000 caigan fuera de los límites. Este tipo de cartas de control fueron originalmente propuestas por Walter A Shewhart, por lo que se les conoce como **cartas de control tipo Shewhart.**

La forma de estimar la media y la desviación estándar de w a partir de las observaciones del proceso dependerá del tipo de estadístico que sea w, ya sea un promedio, un rango o un porcentaje.

Esto se verá en las siguientes secciones.

Tipos de cartas de control

Existen dos tipos generales de cartas de control: para variables y para atributos. Las cartas de con- trol para variables se aplican a características de

calidad de tipo continuo, que intuitivamente son aquellas que requieren un instrumento de medición (peso s, volúmenes, voltajes, longitudes, resistencias, temperaturas, humedad, etcétera).

Las cartas de control para variables tipo Shewhart más usuales son:

- $\bar{X}$ (de medias),
- *R* (de rangos).
- *S* (de desviaciones estándar) y
- X (de medidas individuales).

Estas formas distintas de llamarle a una carta de control se deben al correspondiente estadístico que se representa en la carta, y por medio de la cual se busca analizar una característica importante de un producto o un proceso.

Existen características de calidad de un producto que no son evaluadas con un instrumento de medición en una escala continua o al menos en una escala numérica. En estos casos, el producto se juzga como conforme o no conforme, dependiendo de si posee ciertos atributos; o también al producto se le podrá contar el número de defectos o no conformidades que tiene. Este tipo de características de calidad son monitoreadas a través de las cartas de control para atributos:

- *p* (proporción o fracción de artículos defectuosos),
- *np* (número de unidades defectuosas),
- *c* (número de defectos) y
- *u* (número promedio de defectos por unidad).

Estudiamos estas cartas más adelante. Además de las anteriores existe una gran variedad de cartas de control que en general pretenden mejorar el desempeño de alguna de las cartas tradicionales. Algunas de las propuestas están orientadas a detectar pequeños cambios, como la CUSUM y la EWMA (vea Gutiérrez y de la Vara, 2009).

Carta de control *X- $\bar{R}$*

Existen muchos procesos industriales que, puede decirse, son de tipo "masivo", en el sentido de que producen muchos artículos, partes o componentes durante un lapso de tiempo pequeño. Por ejemplo: líneas de ensamble, máquinas empacadoras, procesos de llenado, operaciones de soldadura en una línea de producción, moldeo de piezas de plástico , torneado de una pieza metálica, el corte de una tira en pedazos pequeños, etc. Algunos de estos procesos harán miles de operaciones por día, mientras que otros efectuarán varias decenas o centenas. En ambos casos se está ame un proceso masivo. Si además las variables de salida de interés son de tipo continuo, entonces estamos ante el campo ideal de aplicación de las **cartas de control *$\bar{X}$ -R.***

La idea es la siguiente: imaginemos que a la salida del proceso fluyen (uno a uno o por lores) las piezas resultantes del proceso; cada determinado tiempo o cantidad de piezas se toma un número pequeño de estas (subgrupo) a las que se les medirá una o más características de calidad. Con las mediciones de cada subgrupo se calculará la media y el rango, de modo que cada periodo de tiempo (media hora, por ejemplo) se tendrá una media y un rango muestra! que aportarán información sobre la tendencia central y la variabilidad del proceso, respectivamente. Con la carta $\bar{X}$ se analiza la variación entre las medias de los subgrupos, para así detectar cambios en la media del proceso, como los que se muestran en la figura 4.5. Con la carta *R,* en cambio, se analiza la variación entre los rangos de los subgrupos, lo que permite detectar cambios en la amplitud o magnitud de la variación del proceso, como se ilustra en la figura 4.6

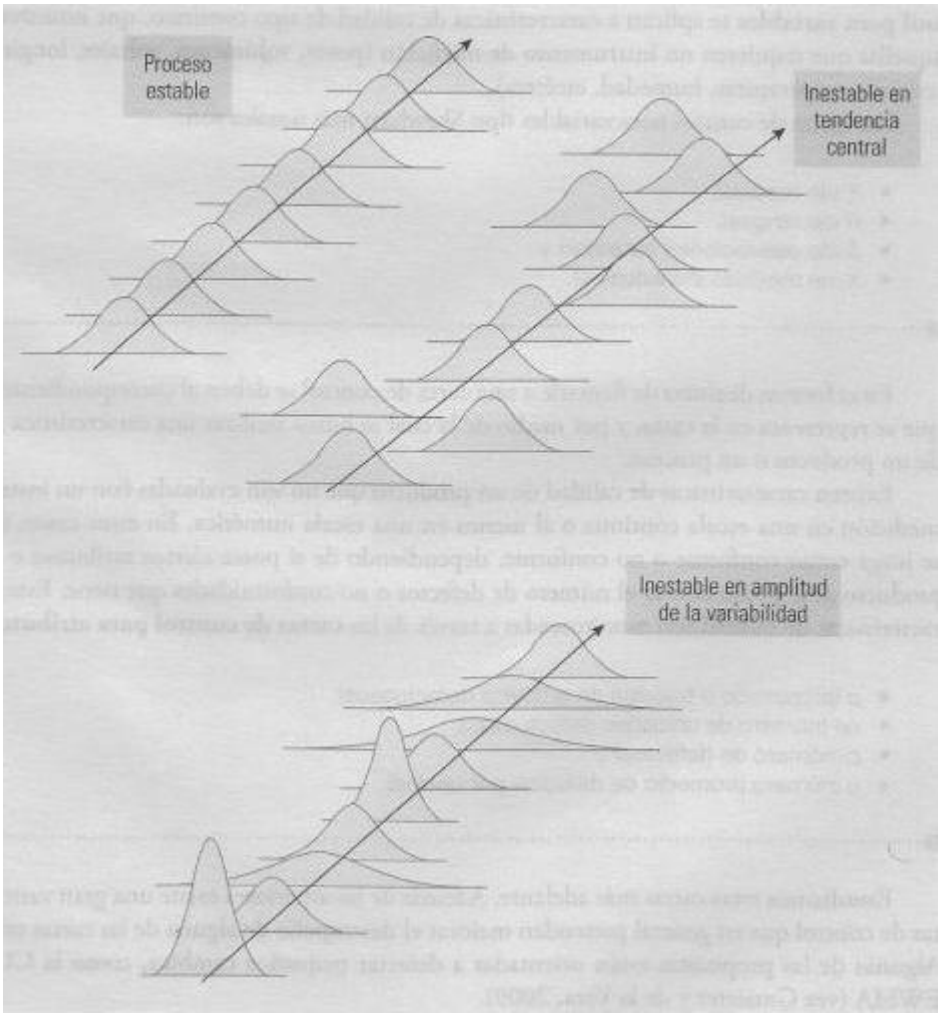


Figura 4.5 La carta $\bar{X}$ detecta cambios significativos en la media del proceso. Cuando la campana se desplaza, la carta lo reconoce mediante un punto fuera de sus límites.

Figura 4.6 La carta R detecta cambios significativos en la amplitud de la dispersión, por ejemplo la variabilidad aumenta (campana más amplia) la carta R lo detecta por uno o más puntos fuera de su LCS.

Ejemplo 4.9 Monitoreo y control del peso de un producto

En una empresa que elabora agroquímicos, una característica importante de los costales de fertilizantes es su peso, que debe ser de 50 kg, con una tolerancia de ±1, por lo que la especificación inferior EI = 49 kg, y la superior ES= 51 kg. Para monitorear el comportamiento del proceso de envasado se usa una carta de control $\bar{X}$ -R. Para hacer un estudio inicial del desempeño del proceso de envasado, primero es necesario pesar costales que de alguna

manera reflejen el comportamiento del proceso de llenado en un lapso de tiempo suficientemente representativo, por ejemplo, tres días, una semana o un mes. En el ejemplo, se decide pesar cada hora una muestra de cuatro costales que se llenaron consecutivamente. Los datos obtenidos en tres días se muestran en la tabla 4.5, en la que se incluye la media y el rango de cada muestra o subgrupo. Lo que sigue es analizar con la carta X cómo estuvieron variando las medias de los subgrupos y con la carta *R* la manera que variaron los rangos. Esto se hace enseguida.

Tabla 4.5 Peso de los costales de fertilizante

Muestra o subgrupo	Peso de los costales (kg)				Media	Rango
1	50.2	49.9	49.0	50.1	49.80	1.2
2	50.3	50.2	50.0	49.3	49.95	1.0
3	49.8	50.0	50.0	49.7	49.88	0.3
4	50.0	49.4	50.1	50.5	50.00	1.1
5	50.2	49.8	49.1	49.9	49.75	1.1
6	49.2	50.7	49.1	49.8	49.70	1.6
7	49.6	49.9	49.5	49.9	49.73	0.4
8	50.2	49.8	49.5	50.6	50.03	1.1
9	50.1	49.3	49.0	49.3	49.43	1.1
10	50.8	49.6	49.8	50.4	50.15	1.2
11	50.7	48.8	49.7	50.1	49.83	1.9
12	50.3	49.6	49.4	49.3	49.65	1.0
13	49.3	49.3	49.2	50.5	49.58	1.3
14	50.2	50.5	50.2	50.9	50.45	0.7
15	48.8	50.2	49.5	49.6	49.53	1.4
16	50.9	49.5	49.3	49.9	49.90	1.6
17	49.7	48.8	49.6	49.5	49.40	0.9
18	49.4	49.3	49.4	50.2	49.58	0.9
19	49.9	49.7	49.9	49.1	49.65	0.8
20	49.7	49.2	49.4	49.7	49.50	0.5
21	50.6	49.6	49.6	49.9	49.93	1.0
22	49.9	49.9	50.0	49.7	49.88	0.3
23	49.6	50.2	49.9	48.7	49.60	1.5
24	49.6	48.9	50.2	49.0	49.43	1.3
					$\bar{\bar{X}} = 49.76$	$\bar{R} = 1.05$

Límites de control de la carta X

Como se ha señalado, los límites de control de las cartas tipo Shewhart están determinados por la media y la desviación estándar del estadístico *w* que se

grafica en la carta, mediante la expresión $\mu_w \pm 3\sigma_{-x}$ En el caso de la carta de medias el estadístico *w* es la media de los subgrupos, $\bar{X}$, por lo que los límites están dados por

$\mu_{\bar{x}} \pm 3\sigma_x$

donde μ_x significa la media de las medias, y σ_x la desviación estándar de las medias, que en un estudio inicial se estiman de la siguiente manera:

$\mu_x = \bar{\bar{x}}$ y $\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$

donde $\bar{\bar{X}}$ es la media de las medias de los subgrupos, σ la desviación estándar del proceso, que indica qué tan variables son las mediciones individuales, y *n* es el tamaño de subgrupo. Como por lo general en un estudio inicial no se conoce σ, ésta puede estimarse de dos formas principalmente. Una es calculando la desviación estándar, *S,* de los 96 datos de la tabla 4.5, con lo cual se incluye la variabilidad entre muestras y dentro de muestras. La otra manera de estimar σ es más apropiada para la carta $\bar{X}$ y parte de sólo considerar la variabilidad dentro de muestras, a través los rangos de los subgrupos, y la estimación está dada por

$$\sigma \approx \frac{\bar{R}}{d_2}$$

Donde $\bar{R}$ es la media de los rangos de los subgrupos y d_2 es una constante que depende de *n,* el tamaño de subgrupo o muestra. En el apéndice se dan varios valores de d_2 para distintos valores de *n.* De esta manera, 3 veces la desviación estándar de las medias se estima con

$$3\sigma_{\bar{x}} = 3\left(\frac{\bar{R}/d_2}{\sqrt{n}}\right) = \frac{3}{d_2\sqrt{n}}\bar{R} = A_2\bar{R}$$

Como se observa, se ha introducido la constante A_2 para simplificar los cálculos. Esta constante está tabulada en el apéndice y depende del tamaño del subgrupo *n.* Con base en lo anterior, los límites de control para una carta de control $\bar{X}$, en un estudio inicial, se obtienen de la siguiente manera

$$LCS = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R}$$

Línea central = $\bar{\bar{X}}$

$$LCI = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}$$

Cuando ya se conocen la media, *μ,* y la desviación estándar del proceso, *σ,* entonces estos límites para la carta de medias están dados por:

$$LCS = \mu + 3\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Línea central = μ

$$LCI = \mu - 3\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

En el caso de los datos de la tabla 4.5, correspondientes al peso de los costales de fertilizante, se está haciendo un estudio inicial, por ello si tomamos en cuenta que $\bar{\bar{X}}$ = 49.76, $\bar{R}$ = 1.05, y para n = 4, A_2 = 0.729; entonces

LCS = 49.76 + (0.729) (1.05) = 50.526

Línea central = 49.76

LCI = 49.76 – (0.729) (1.05) = 48.996

La carta correspondiente se muestra en la figura 4.7 A partir de ésta, se aprecia que el peso de los costales está bajo control estadístico en cuanto a la tendencia central, con lo que es posible afirmar que el peso de los costales fluctúa de manera estable alrededor de 49.76 kg. Así, la variación que se observa en las medias de los subgrupos se debe a que son muestras pequeñas y a la variación que comúnmente tiene el proceso, por lo que no se hizo presente ningún cambio ocasionado por una situación o causa especial.

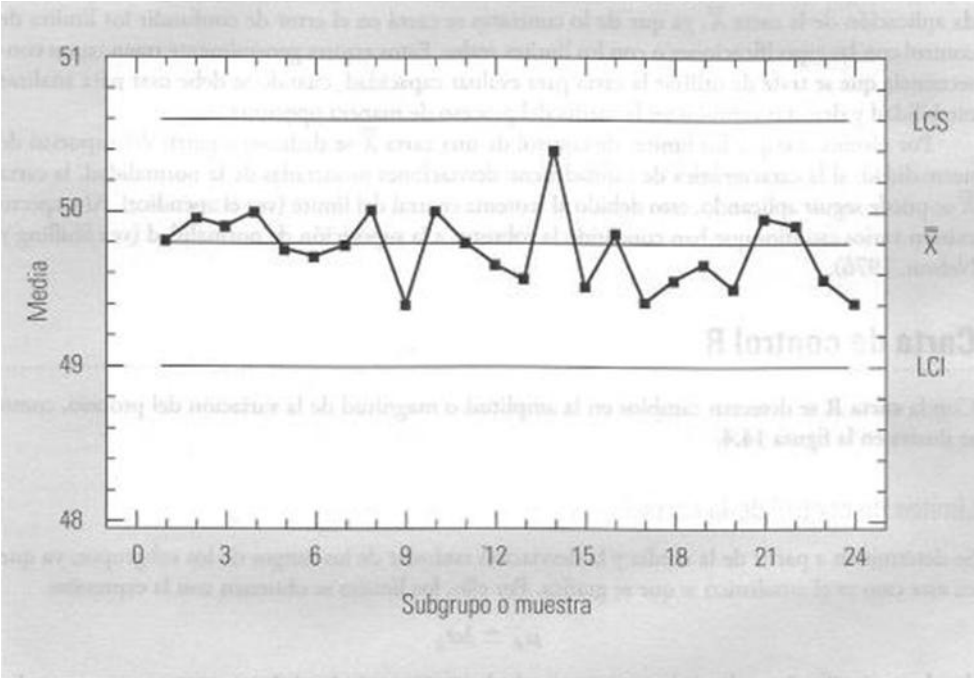


Figura 4.7 Carta de medias para el peso de los costales

Interpretación de los límites de control en una carta $\overline{X}$:

Estos límites reflejan la variación esperada para las medias muestrales de tamaño *n,* mientras el proceso no tenga cambios importantes. Por ejemplo, en el caso del peso de los costales de fertilizantes, se espera que el peso promedio de cuatro costales varíe de 48.996 a 50.526 kg. De esta manera, estos límites se utilizan para detectar cambios en la media del proceso y para evaluar su estabilidad. De ninguna manera se deben emplear para evaluar la capacidad, puesto que estos límites de control, calculados con información del proceso, no son los de especificaciones o tolerancias que se fijaron de antemano.

Los límites de control en una carta de medias tampoco son igual a los límites reales o naturales del proceso, estos últimos están dados por:

Límite real superior = $\mu + 3\sigma$

Límite real inferior = $\mu - 3\sigma$

y reflejan la variación esperada para las mediciones individuales (el peso de los costales) y no para la media de *n* costales. De hecho, si se compara la fórmula

(2) para los límites de control de la carta $\overline{X}$ con la fórmula anterior para calcular los límites reales, se ve que coinciden sólo cuando el tamaño de subgrupo es igual a 1 *(n* = 1). Así, los límites reales para el peso de los costales se pueden obtener estimando la desviación estándar del proceso, *σ,* a través del método de rangos:

$$\sigma \approx \frac{\overline{R}}{d_2} = \frac{1.05}{2.059} = 0.51$$

luego los límites reales son: 49.76 ± 3(0.51); con LRI = 48.23 y LRS = 51.29. Así, se espera que el peso de cada costal en lo individual varíe de 48.23 a 51.29 kg, que por cierto excede las especificaciones (EI = 49, ES = 51) y, por lo tanto, el proceso es incapaz, como puede verse también con el índice *CP* = 2/(6 X 0.51) = 0.65. Además, el proceso está considerablemente descentrado, ya que la media del proceso 49.76 está un tanto lejos de 50.

La interpretación correcta de los límites de control es de especial relevancia para una adecuada aplicación de la carta $\overline{X}$ ya que de lo contrario se caerá en el error de confundir los límites de control con las especificaciones o con los límites reales. Estos errores generalmente traen como consecuencia que se trate de utilizar la carta para evaluar capacidad, cuando se debe usar para analizar estabilidad y detectar cambios en la media del proceso de manera oportuna.

Por último, aunque los límites de control de una carta $\overline{X}$ se deducen a partir del supuesto de normalidad, si la característica de calidad tiene desviaciones moderadas de la normalidad, la carta $\overline{X}$ se puede seguir aplicando, esto debido al teorema central del límite (vea el apéndice). Al respecto existen varios estudios que han concluido la robustez a la suposición de normalidad (vea Shilling y Nelson, 1976).

Carta de control R

Con la **carta R** se detectan cambios en la amplitud o magnitud de la variación del proceso, como se ilustra en la figura 4.8

Límites de control de la carta R

Se determinan a partir de la media y la desviación estándar de los rangos de los subgrupos, ya que en este caso es el estadístico *w* que se grafica. Por ello, los límites se obtienen con la expresión:

$\mu_R = \pm 3\sigma_R$

donde μ_R significa la media de los rangos, y σ_R la desviación estándar de los rangos, que en un estudio inicial se estiman de la siguiente manera:

$$\mu_R = \bar{R} \quad \text{y} \quad \sigma_R = d_3\sigma \approx d_3\left(\frac{\bar{R}}{d_2}\right)$$

donde $\bar{R}$ es la media de los rangos de los subgrupos, σ la desviación estándar del proceso, d_3, es una constante que depende del tamaño del subgrupo, que está tabulada en el apéndice. Y como por lo general en un estudio inicial no se conoce σ, ésta puede estimarse a través de $\bar{R}/d_2$, como ya lo habíamos explicado. En forma explícita, los límites de control para la carta R se calculan con:

$$LCI = \bar{R} - 3d_3\left(\frac{\bar{R}}{d_2}\right) = \left[1 - 3\left(\frac{d_3}{d_2}\right)\right]\bar{R} = D_3\bar{R}$$

Línea central = $\bar{R}$

$$LCS = \bar{R} + 3d_3\left(\frac{\bar{R}}{d_2}\right) = \left[1 + 3\left(\frac{d_3}{d_2}\right)\right]\bar{R} = D_4\bar{R}$$

Donde se han introducido las constantes D3 y *D4* para simplificar los cálculos y están tabuladas en el apéndice para diferentes tamaños de subgrupo, *n.* Si se aplican estas fórmulas al ejemplo 4.9 del peso de los costales, se tiene que los límites de control para la carta R están dados por

LCS = 2.282 X 1.05 = 2.3963

Línea central = 1.05

LCI= 0 x 1.05 =O,

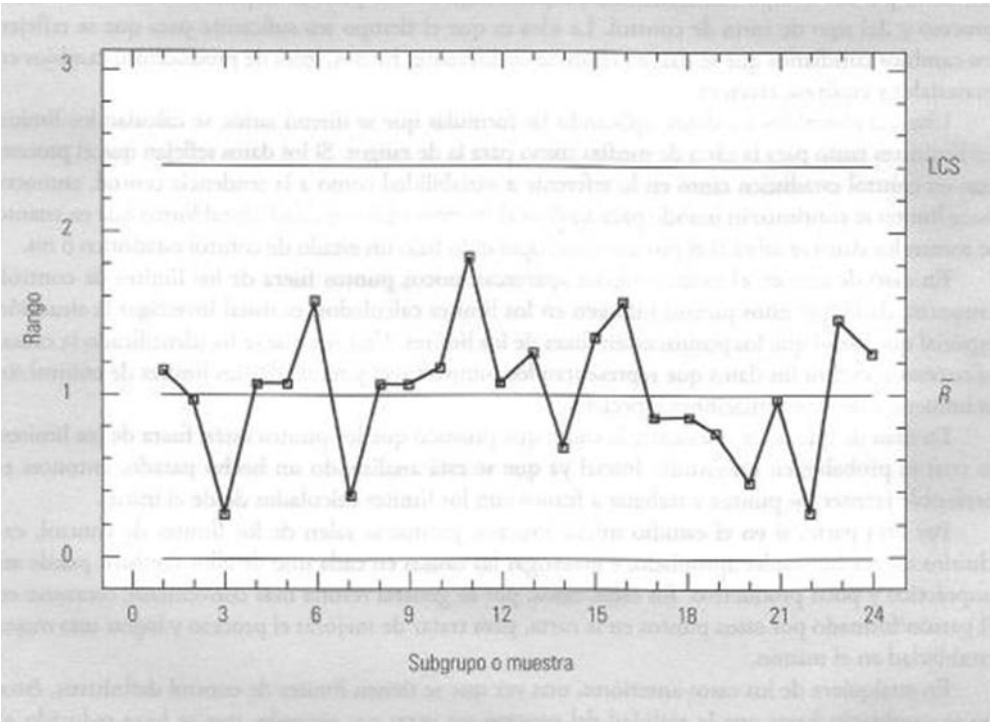


Figura 4.8 Carta de rangos para el peso de los costales

ya que del apéndice D_4 = 2.282 y D_3 = 0, para n = 4. La correspondiente carta R se muestra en la figura 4.8, en la que se observa que no hay puntos fuera de los límites y, además, el comportamiento de los puntos no sigue ningún patrón especial, por lo tanto, el proceso de envasado de los costales ha estado funcionando de manera estable en cuanto a la amplitud de su variación y no ha pasado algo como lo de la figura 4.8. Luego, la variación que se observa en los rangos muestrales se debe a que el tamaño de subgrupo o muestra es pequeño y a la variación que comúnmente tiene el proceso, por lo que no se hizo presente ningún cambio ocasionado por una situación o causa especial.

Interpretación de los límites de control en una carta R

Los límites en una cana R indican la variación esperada para los rangos muestrales de tamaño *n,* mientras el proceso no tenga un cambio significativo. Por ejemplo, en el caso del peso de los costales, se espera que los rangos de los subgrupos de 4 costales varíen de cero a 2.3963 kg. Estos límites se utilizan para detectar cambios en la amplitud o magnitud de la variación del

proceso y para ver qué tan estable permanece a lo largo del tiempo, pero por ningún motivo se deben emplear para evaluar la capacidad.
De esta manera, dado que la carta R ha mostrado que la variabilidad del peso de los costales es estable y que la carta de medias no detectó ninguna situación o causa especial que haya afectado la tendencia central del proceso, entonces los límites de control encontrados para ambas cartas se pueden usar a futuro para analizar el proceso de envasado directamente en la línea de producción.

Estado del proceso en cuanto a capacidad y estabilidad

Ya se ha comentado, en la interpretación de los límites de la carta $\bar{\bar{x}}$, el hecho de que sus límites de control no son equivalentes a las especificaciones o tolerancias de la característica de calidad. Por ello, dos asuntos diferentes de un proceso son su estabilidad, que se evalúa con las cartas de control, y su capacidad para cumplir especificaciones, que se evalúa con los índices de capacidad. En el caso del peso de los costales, a partir de las figuras 4.7 y 4.8 se concluye que el proceso es estable (o que está en control estadístico). Pero como se vio que el $C_P = 0.65 < 1$, entonces el proceso es incapaz de cumplir especificaciones. Por lo tanto, el proceso correspondiente es establemente incapaz (establemente malo) y se deben hacer análisis para detectar fuentes de variación que permanentemente estén en el proceso, como exceso de variación en materiales, en gente o en alguna de las 6M.

Límites de control de la carta $\bar{X}$- R y su revisión futura

Para tener por primera vez límites de control para un proceso que se monitoreará con una carta $\bar{X}$- R, es necesario hacer un estudio inicial, en el que se tomen datos del proceso que reflejen su comportamiento por un tiempo suficientemente representativo. Este periodo depende de la velocidad del proceso y del tipo de carta de control. La idea es que el tiempo sea suficiente para que se reflejen los cambios cotidianos que se dan en el proceso: diferentes turnos, lotes de producción, cambios en materiales y equipos, etcétera.

Una vez obtenidos los datos, aplicando las fórmulas que se dieron antes, se calculan los límites preliminares tanto para la carta de medias como para la de rangos. Si los datos reflejan que el proceso está en control estadístico tanto en lo referente a variabilidad como a la tendencia central, entonces estos límites se continuarán usando para analizar el proceso en tiempo real, de tal forma que en cuanto se tomen los datos se sabrá si el proceso sigue operando bajo un estado de control estadístico o no.

En caso de que en el estudio inicial aparezcan pocos pun tos fuera de los límites de control, entonces, dado que estos puntos influyen en los límites calculados, es usual investigar la situación especial que causó que los puntos estén fuera de los límites. Una vez que se ha identificado la causa, es necesario excluir los datos que representan los puntos fuera y recalcular los límites de control sin la influencia de estas situaciones especiales.

En caso de que no se encuentre la causa que provocó que los puntos estén fuera de los límites, lo cual es probable en un estudio inicial ya que se está analizando un hecho pasado, entonces es preferible retener los puntos y trabajar a futuro con los límites calculados desde el inicio.

Por otra parte, si en el estudio inicial muchos puntos se salen de los límites de control, excluirlos tal vez no resulte apropiado, e investigar las causas en cada uno de ellos también puede ser impráctico y poco productivo. En estos casos, por lo general resulta más conveniente centrarse en el patrón formado por estos puntos en la carta, para tratar de mejorar el proceso y lograr una mejor estabilidad en el mismo.

En cualquiera de los casos anteriores, una vez que se tienen límites de control definitivos, éstos no se cambiarán hasta que la realidad del proceso sea otra; por ejemplo, que se haya reducido su variabilidad de manera significativa o mejorado el centrado del proceso. En ocasiones, en algunas empresas se acostumbra revisar o recalcular periódicamente los límites; en estos casos, se debe ser cuidadoso al imitar esta práctica, ya que si el periodo es muy corto, tal vez no se detecten ciertos cambios o tendencias que se estén registrando en las cartas. Por ejemplo, una semana es un periodo muy corto para recalcular los límites de control. En algunos procesos sí se justifica el hecho de recalcular los límites, por ejemplo, cuando se da mantenimiento o se ajustan ciertos procesos. En todo caso, se debe tener muy claro el propósito.

La práctica en algunas empresas de sustituir los límites de control por límites de especificaciones se debe evitar a toda costa, sobre todo en la carta de medias. Además, en ocasiones la línea central de una carta de medias se sustituye por un valor objetivo o deseado, lo cual también se debe evitar, pues aunque en algunas ocasiones puede justificarse, en general, cuando se hace esto, la carta de control pierde su propósito. Lo anterior se ilustra mediante el ejemplo 4.10

Ejemplo 4.10 Estudio inicial y establecimiento de límites

En una fábrica de bolsas de hule (o plástico) un aspecto importante de la calidad es la dimensión de las bolsas. En una fase del proceso, máquinas de cierto tipo deben cortar automáticamente las bolsas a una medida ideal de 30 cm con una tolerancia de $\pm$ 0.5 cm. Para asegurarse de que las dimensiones de las bolsas son las correctas. "de vez en cuando" el operador mide una bolsa y dependiendo de tal medida decide ajustar o no la máquina. Estas mediciones, además de que no son sistemáticas, no se registran.

Esta forma de controlar la calidad no es adecuada, porque generalmente conduce a administrar por reacción, como en los ejemplos 4.6 y 4.7. Tal forma de proceder es reactiva, correctiva, no sistemática y muchas veces tardía, y lo deseable es tener métodos de control oportunos y preventivos. Por ello se decide implementar una carta de control $\overline{X} - R$. Para muestrear, se toman cinco bolsas consecutivas cada hora y media. Los datos obtenidos en cuatro días aparecen en la tabla 4.6. De acuerdo con ellos, los límites para la carta de rangos son los siguientes:

$$\text{LCI} = D_3\overline{R} = 0 \times 0.3818 = 0$$

$$\text{Línea central} = \overline{R} = 0.3818$$

$$\text{LCS} = D_4\overline{R} = 2.115 \times 0.3818 = 0.807$$

mientras que los límites de la carta $\overline{\overline{X}}$ son:

LCS = $\overline{\overline{X}}$ + $A_2\overline{R}$ = 29.98 + (0.577 x 0.3818) = 30.02

Línea central = $\overline{\overline{X}}$ = 29.98

LCS = $\overline{\overline{X}}$ + $A_2\overline{R}$ = 29.98 + (0.577 x 0.3818) = 29.76

Las constantes para el cálculo de los límites de control se obtuvieron del apéndice, tomando *n* = 5. Las figuras 4.9 y 4.10 muestran las cartas de rangos y de medias, respectivamente. En la carta R se aprecia que la máquina que hace los cortes de las bolsas estuvo bajo control estadístico en cuanto a variabilidad, ya que no hubo puntos fuera de los límites y no se dio ningún patrón especial. El rango de las muestras de tamaño cinco que se tomaron durante cuatro días estuvo fluctuando de manera estable entre cero y 0.807 cm.

Mientras la carta de medias refleja que el proceso no estuvo en control estadístico en cuanto a la tendencia central, ya que los puntos correspondientes a las muestras 12 y 18 se salieron del límite inferior de la carta $\overline{\overline{X}}$, adicional a ello no se presentó ningún patrón. Por lo tanto, en el entorno del momento en el que se tomaron estas muestras la máquina funcionó bajo una causa especial, de tal forma que estuvo cortando bolsas más pequeñas de lo que ordinariamente suele hacerlo.

Para decidir qué límites de control se usarán para analizar los datos futuros, lo primero que se debe hacer es investigar qué es lo que estuvo ocurriendo, de manera especial, cuando se tomaron las muestras 12 y 18. Sí se encuentran las causas se eliminan estas muestras, y con el resto de datos se recalculan los límites de control definitivos; pero si no se encuentran, entonces los límites ya calculados se usarán como definitivos.

Las personas que estaban haciendo este estudio inicial en la máquina de corte se dieron cuenta de que las muestras 12 y 18 coinciden con el inicio del tercer

Tabla 4.7 Longitud de las bolsas de hule

Muestra	Longitud de las bolsas (cm)					Media	Rango
1	30.3	30.2	29.9	30.3	30.1	30.16	0.4
2	30.0	30.1	29.9	29.8	30.1	29.98	0.3
3	30.0	30.1	30.2	29.8	30.0	30.02	0.4
4	29.7	30.1	29.8	30.0	30.0	29.98	0.4
5	30.0	29.8	30.0	29.9	30.1	29.96	0.3
6	30.1	30.2	30.3	30.0	29.9	30.10	0.4
7	30.3	30.0	29.9	29.7	29.9	29.96	0.6
8	30.2	29.9	30.0	30.0	30.1	30.04	0.3
9	29.9	30.2	30.0	29.9	30.0	30.00	0.3
10	29.6	30.1	29.9	30.0	30.0	29.92	0.5
11	30.3	29.8	30.0	30.1	30.0	30.4	0.5
12	29.5	29.6	29.8	29.6	30.0	29.70	0.5
13	30.1	29.9	30.3	29.9	30.2	30.08	0.4
14	29.8	29.9	30.0	29.9	29.7	29.86	0.3
15	29.9	30.3	29.9	29.9	30.5	30.10	0.6
16	29.9	30.1	30.2	30.2	30.1	30.10	0.3
17	30.1	30.1	29.9	30.1	29.9	30.02	0.2
18	29.7	29.5	30.0	29.6	29.7	29.70	0.5
19	30.2	30.0	30.0	29.9	30.0	30.02	0.3
20	30.1	30.0	30.1	29.9	29.8	29.98	0.3
21	29.9	30.1	29.9	30.2	30.0	30.02	0.3
22	30.0	29.9	29.7	30.0	29.8	29.88	0.3
						$\bar{\bar{X}} = 29.98$	$\bar{R} = 0.3818$

y cuarto días. En particular, en este último día se cree que la causa especial está asociada con un nuevo lote de materia prima, por lo que deciden sólo excluir la muestra 18. De esta manera, se elimina la muestra 18 y se recalculan los límites de control. Por lo tanto, los límites a usar a futuro para la carta de medias son:

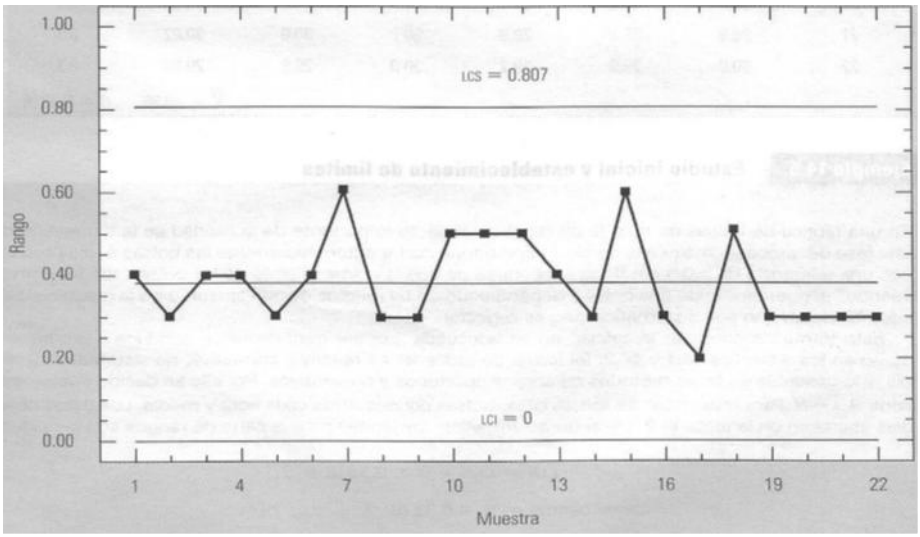


Figura 4.9 Carta de rangos para la longitud de las bolsas de hule

LCI = 29.776

Línea central = 29.993

LCS = 30.210

Mientras que los límites definitivos para la carta de rangos son:

LCI = 0

Línea central = 0.376

LCS = 0.795

Estos límites se usarán hasta que haya un cambio permanente en la máquina, tal como un aumento o reducción de la variabilidad. Su uso adecuado podrá ayudar a identificar las situaciones que hicieron que la máquina estuviera fuera de control estadístico en cuanto a la tendencia central. También ayudará a evitar ajustes innecesarios y a prevenir la ocurrencia de situaciones que empeoren el desempeño de la máquina.

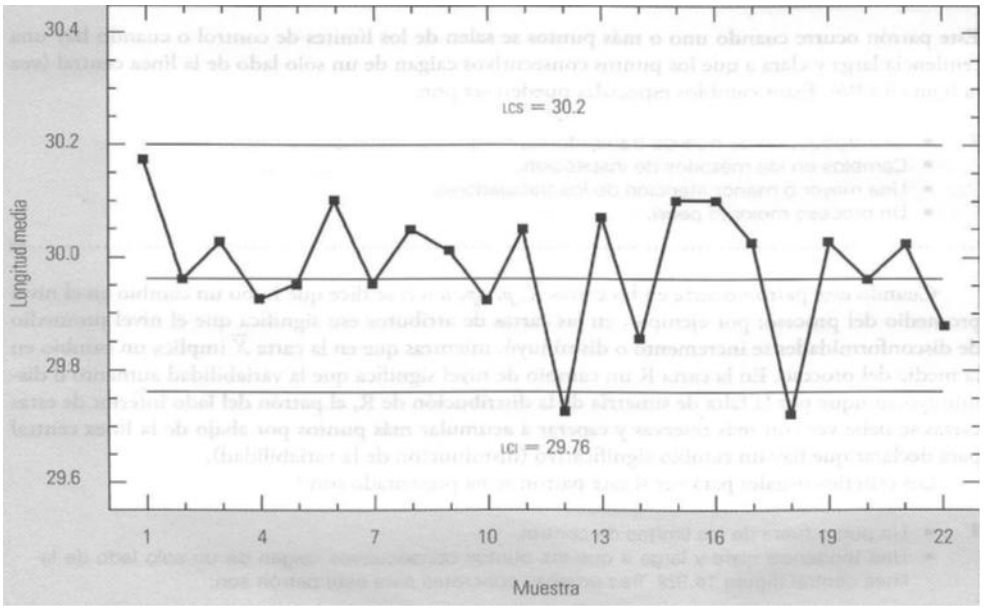


Figura 4.10 Carta de medias para la longitud de las bolsas de hule.

Interpretación de las cartas de control y las causas de la inestabilidad

Como se comentó, una señal de que se ha detectado una causa especial de variación (o señal de un cambio especial en el proceso) se manifiesta cuando un punto cae fuera de los límites de control o cuando los puntos graficados en la carta siguen un comportamiento no aleatorio (por ejemplo, una tendencia a aumentar, un movimiento cíclico, etc.). Para facilitar la identificación de patrones no aleatorios, lo primero que se hace es dividir la carta de control en seis zonas o bandas iguales, cada una con una amplitud similar a una desviación estándar del estadístico *w* que se grafica (vea la figura 4.11*a*).

En seguida se presentarán cinco patrones para el comportamiento de los puntos en una carta, los cuales indicarán que el proceso está funcionando con causas especiales de variación. Esto ayudará a identificar cuándo un proceso es inestable y el tipo de causas que ocasionan la correspondiente inestabilidad. De entrada podemos decir que un proceso muy inestable es sinónimo de un proceso con pobre estandarización , en el que probablemente haya cambios continuos o mucha variación atribuible a materiales, mediciones, diferencias en las condiciones de operación de la maquinaria y desajustes, distintos criterios y capacitación de operarios, etcétera.

Para detectar cada patrón no aleatorio se dan algunas pruebas estadísticas, que se derivaron bajo el supuesto de normalidad e independencia entre y dentro de subgrupos, por lo que de no cumplirse, las pruebas deben tomarse

con reservas. Si dos muestras consecutivas de una carta no son independientes, entonces una alternativa para lograr la independencia es ampliar la frecuencia de muestreo, por ejemplo, si se hace cada 20 minutos, ampliarla a cada 40 o más minutos; otra alternativa es utilizar una carta de control para datos autocorrelacionados (vea Montgomery, 2005).

Patrón 1. Desplazamientos o cambios en el nivel del proceso

Este patrón ocurre cuando uno o más puntos se salen de los límites de control o cuando hay una tendencia larga y clara a que los puntos consecutivos caigan de un sólo lado de la línea central (vea la figura 4.11*b*). Estos cambios especiales pueden ser por:

- La introducción n de nuevos trabajadores, máquinas, materiales o métodos.
- Cambios en los métodos de inspección.
- Una mayor o menor atención de los trabajadores.
- Un proceso mejor (o peor).

Cuando este patrón ocurre en las cartas $\bar{X}$, *p, np, u* o *e,* se dice que hubo un cambio en el nivel promedio del proceso; por ejemplo, en las cartas de atributos eso significa que el nivel promedio de disconformidades se incrementó o disminuyó, mientras que en la carta $\bar{X}$ implica un cambio en la media del proceso. En la carta R un cambio de nivel significa que la variabilidad aumentó o disminuyó, aunque por la falta de simetría de la distribución de R, el patrón del lado inferior de estas cartas se debe ver con más reservas y esperar a acumular más puntos por abajo de la línea central para declarar que hay un cambio significativo (disminución de la variabilidad).

Los criterios usuales para ver si este patrón se ha presentado son:

- Un punto fuera de los límites de control.
- Una tendencia clara y larga a que los puntos consecutivos caigan de un solo lado de la línea central (figura 4.11b).Tres pruebas concretas para este patrón son:
  a) ocho o más puntos consecutivos de un sólo lado de la línea central;
  b) al menos 10 de 11 puntos consecutivos caen de un mismo lado de la línea central, y

c) por lo menos 12 de 14 puntos consecutivos ocurren por un mismo lado de la línea central.

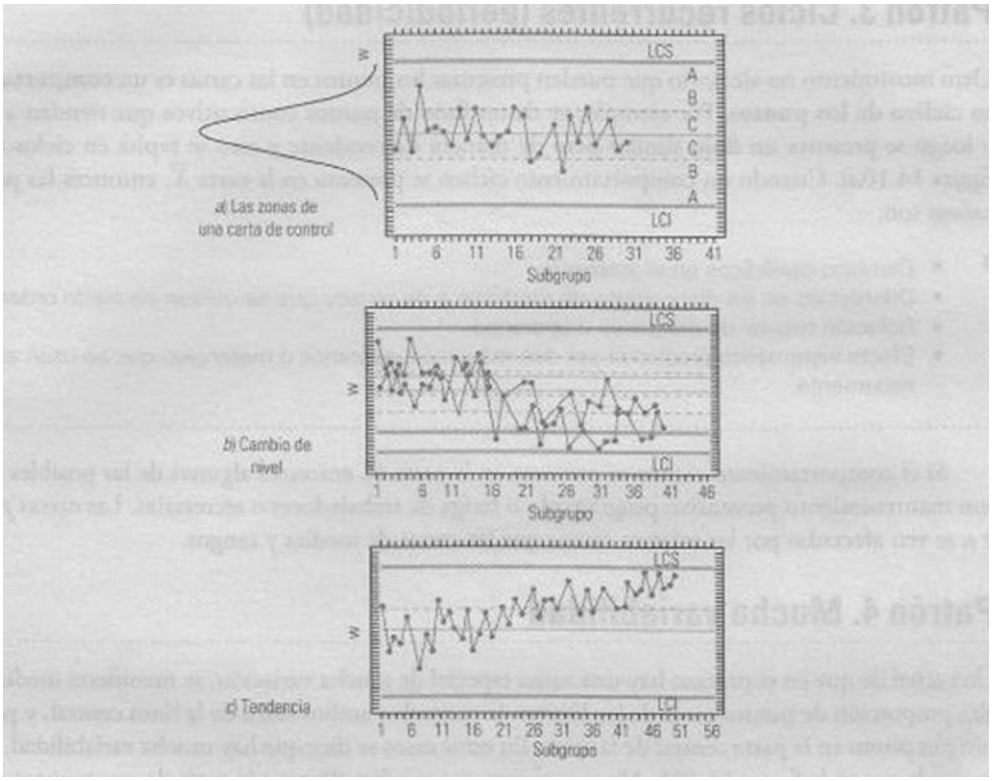


Figura 4.11 Zonas de una carta de control y dos patrones no aleatorios que indican cuando algo especial está ocurriendo en el proceso.

Patrón 2. Tendencias en el nivel del proceso

Este patrón consiste en una tendencia a incrementarse (o disminuirse) los valores de los puntos en la carta, como se aprecia en la figura 4.11*c*. Una tendencia ascendente o descendente bien definida y larga se puede deber a algunas de las siguientes causas especiales:

- El deterioro o desajuste gradual del equipo de producción.
- Desgaste de las herramientas de corte.
- Acumulación de productos de desperdicio en las tuberías.
- Calentamiento de máquinas.
- Cambios graduales en las condiciones del medio ambiente.

Estas causas se reflejan prácticamente en todas las cartas excepto en la R, cuyas tendencias son raras, pero cuando se dan, puede deberse a la mejora o decrecimiento de la habilidad de un operario, fatiga de éste (la tendencia se repetirá en cada turno) o al cambio gradual en la homogeneidad de la materia

prima. Para determinar si existe una tendencia en el proceso, se siguen estos criterios:

- Seis o más puntos consecutivos ascendentes (o descendentes).
- Un movimiento de muchos puntos hacia arriba (o hacia abajo) de la carta de control, aunque no todos los puntos vayan en ascenso (o descenso). En la figura 4.11*c* se muestra una tendencia creciente de los puntos, que es demasiado larga para considerarse que es ocasionada por variaciones aleatorias, por lo que más bien es señal de que algo especial (desplazamiento) está ocurriendo en el proceso correspondiente. En ocasiones pueden presentarse aparentes tendencias causadas por variaciones naturales y del muestreo del proceso, por eso la tendencia debe ser larga para considerarla especial. Cuando se presente una tendencia y se dude si es especial, hay que estar alerta para ver si efectivamente está ocurriendo algo inusual en el proceso.

Patrón 3. Ciclos recurrentes (periodicidad)

Otro movimiento no aleatorio que pueden presentar los puntos en las cartas es un comportamiento cíclico de los puntos. Por ejemplo, se da un flujo de puntos consecutivos que tienden a crecer y luego se presenta un flujo similar pero de manera descendente y esto se repite en ciclos (vea la figura 4.12*a).* Cuando un comportamiento cíclico se presenta en la carta *X,* entonces las posibles causas son:

- Cambios periódicos en el ambiente.
- Diferencias en los dispositivos de medición o de prueba que se utilizan en cierto orden.
- Rotación regular de máquinas u operarios.
- Efecto sistemático producido por dos máquinas, operarios o materiales que se usan alternadamente.

Si el comportamiento cíclico se presenta en la carta R, entonces algunas de las posibles causas son mantenimiento preventivo programado o fatiga de trabajadores o secretarias. Las cartas *p, np, e* y *u* se ven afectadas por las mismas causas que las cartas de medias y rangos.

Patrón 4. Mucha variabilidad

Una señal de que en el proceso hay una causa especial de mucha variación, se manifiesta mediante la alta proporción de puntos cerca de los límites de control, a ambos lados de la línea central, y pocos o ningún punto en la parte central de la carta. En estos casos se dice que hay mucha variabilidad, como se puede ver en la figura 4.12*b*. Algunas causas que pueden afectar a la carta de esta manera son:

- Sobrecontrol o ajustes innecesarios en el proceso.
- Diferencias sistemáticas en la calidad del material o en los métodos de prueba.
- Control de dos o más procesos en la misma carta con diferentes promedios.

Las cartas R, por su parte, se pueden ver afectadas por la mezcla de materiales de calidades bastante diferentes, diversos trabajadores utilizando la misma carta R (uno más hábil que el otro) y daros de procesos operando bajo distintas condiciones graficados en la misma carta. Los criterios para detectar la alta proporción de puntos cerca o fuera de los límites son las siguientes:

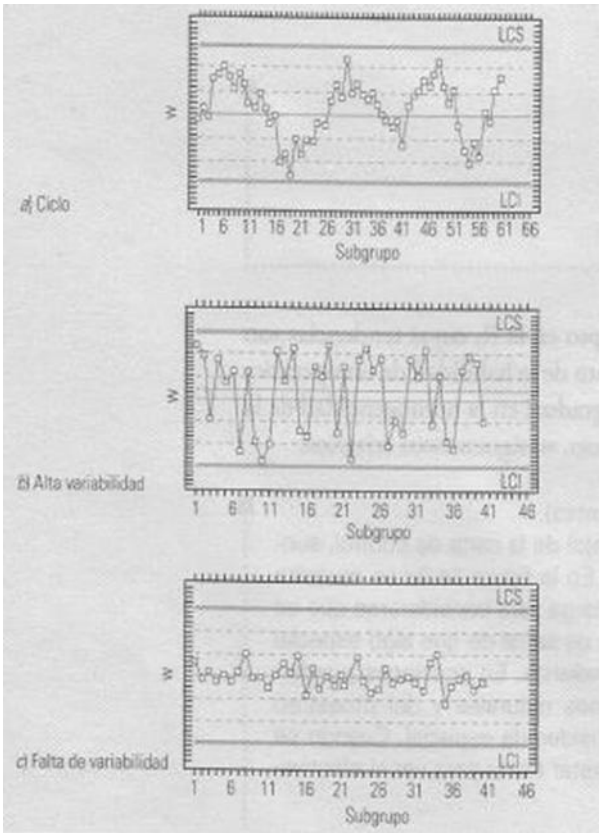


Figura 4.12 Otros patrones no aleatorios

- Ocho puntos consecutivos a ambos lados de la línea central con ninguno en la zona C.
- Una imagen similar a la mostrada en la figura 4.12b.

Patrón 5. Falta de variabilidad
(Estatificación)

Una señal de que hay algo especial en el proceso es que prácticamente todos los puntos se concentren en la parte central de la carta, es decir, que los puntos reflejen poca variabilidad o estatificación, como se aprecia en la figura 412c.Algunas de las causas que pueden afectar a todas las cartas de control de esta manera son:

- Equivocación en el cálculo de los límites de control
- Agrupamiento en una misma muestra a datos provenientes de universos con medias bastantes diferentes, que al combinarse se compensan unos con otros.
- "Cuchareo" de los resultados.
- Carta de control inapropiada para el estadístico graficado.

Para detectar falta de variabilidad se tienen los siguientes criterios:

- Quince puntos consecutivos en la zona C, arriba o abajo de la línea central.
- Una imagen similar a la mostrada en la figura 4.12c.

Cuando alguno de los parrones anteriores se presenta en una carta, es señal de que en el proceso hay una situación especial (proceso inestable o fuera de control estadístico), que causa que los puntos no estén variando aleatoriamente dentro de la carta. Esto no significa que no se pueda seguir produciendo con él, sino que el proceso trabaja con variaciones debidas a alguna causa específica (material heterogéneo, cambios de operadores, diferencias significativas entre máquinas, desgaste o calentamiento de equipo, etc.). Por lo tanto, en caso de presentarse alguno de los patrones anteriores, es necesario tener como práctica buscar de inmediato las causas para conocer mejor el proceso (saber qué lo afecta) y tomar las medidas correctivas y preventivas apropiadas.

Es frecuente encontrar empresas en las que la aplicación e interpretación de las cartas de control es muy deficiente, y cuando en ellas se presenta uno de los patrones anteriores, no se hace nada y entonces las carcas pierden mucho de su potencial. Frases como las siguientes: "El proceso dio un brinco tal día, pero ya regresó a su nivel normal", "de tal a tal día hubo una tendencia, pero las cosas regresaron a la normalidad ", "el proceso tiene un comportamiento cíclico, pero se está cumpliendo con especificaciones", implican que las cartas de control se usan como bitácora. Pero una carta de control "no es una bitácora de proceso". En todos los casos anteriores se desperdició una oportunidad (una señal estadística) para conocer y mejorar la estandarización del proceso.

Carta de individuales

La **carta de individuales** es un diagrama para variables de tipo continuo, pero en lugar de aplicarse a procesos semimasivos o masivos, como la carta $\bar{X} - R$, se aplica a procesos lentos, en los cuales para obtener una medición de la variable bajo análisis se requieren periodos relativamente largos. Ejemplos de este tipo de procesos son:

- Procesos químicos que trabajan por lotes.
- Industria de bebidas alcohólicas, en las que deben pasar desde una hasta más de 100 horas para obtener los resultados de los procesos de fermentación y destilación.
- Procesos en los que las mediciones cercanas sólo difieren por el error de medición. Por ejemplo, temperaturas en procesos, humedad relativa en el medio ambiente, etcétera.
- Algunas variables administrativas, cuyas mediciones se obtienen cada día, cada semana o más. Por ejemplo: mediciones de productividad, de desperdicio, de consumo de agua, electricidad, combustibles, etcétera

En estos casos, la mejor alternativa es usar una carta de individuales, en la que cada medición particular de la variable que se quiere analizar se registra en una carta.

Para determinar los límites de control se procede igual que en los casos anteriores, mediante la estimación de la media y la desviación estándar del estadístico *w* que se grafica en la carta, que en este caso es directamente la

medición individual de la variable *X* Por ello, los límites se obtienen con la expresión $\mu_x \pm 3\sigma_x$. Donde μ_x y σ_x son la media y la desviación estándar del proceso, respectivamente. Es decir, los límites de control en este *caso* coinciden por definición con los límites reales. En un estudio inicial, estos parámetros se estiman de la siguiente manera:

$$\mu_x = X \text{ y } \sigma_x = \frac{\overline{R}}{d_2} = \frac{\overline{R}}{1.128}$$

donde $\overline{X}$ es la media de las mediciones de los subgrupos y $\overline{R}$ es la media de los rangos móviles de orden dos (rango entre dos observaciones sucesivas en el proceso, vea el ejemplo 4.11). Al dividir el rango promedio entre la constante d_2 se obtiene una estimación de la desviación estándar del proceso, σ. Además, como en este caso, el rango móvil es de orden dos, entonces el valor den para determinar d_2 será $n = 2$; por tanto, de acuerdo con el apéndice, cuando $n = 2$, $d_2 = 1.128$. De lo anterior se concluye que los límites de control para una carta de individuales están dados por:

$$\overline{X} \pm 3\left(\frac{\overline{R}}{1.128}\right)$$

Ejemplo 4.11 Control de temperatura de un proceso

En una empresa se hacen impresiones en láminas de acero, que posteriormente se convierten en recipientes de productos de otras empresas. Un aspecto importante a vigilar en dicha impresión es la temperatura de "horneada" que, entre otras cosas, adhiere y seca la pintura una vez que ésta se imprimió. En una fase particular de la horneada se tiene que la temperatura de cierto horno debe ser 125°C, con una tolerancia de $\pm$5°C. Si no se cumple con tal rango de temperatura, entonces se presentan problemas en la calidad final de la impresión.

Para controlar de manera adecuada tal característica de proceso se usa una carta de control, y evidentemente aquí no tiene sentido tomar una muestra de tamaño cuatro, ya que si se miden las temperaturas del horno de manera

consecutiva, entonces éstas serán prácticamente las mismas; y si las mediciones no se hacen de manera consecutiva y se hacen, por ejemplo, cada hora, entonces habrá que esperar cuatro horas para graficar un punto en la carta de control y así analizar el proceso. De este modo resulta más práctico hacer, periódicamente, una medición de la temperatura en el horno, y en cuanto se obtiene el dato graficarlo en la carta. Es decir, resulta más práctico llevar una carta de control para individuales.

En la tabla 4.8 se muestran las temperaturas obtenidas en tres días, midiendo la temperatura en el horno cada hora. La segunda columna en dicha tabla representa los rangos entre temperaturas consecutivas. Los límites de control para la carta de individuales son los siguientes:

LCS = 126.97 + (3 X 2.287/1.128) = 133.05

Línea central = 126.97

LCI = 126.97- (3 X 2.287/1.128) = 120.97.

Tabla 4.8 Datos del ejemplo 4.11

Muestra	Temperatura en el horno	Rango móvil	Muestra	Temperatura en el horno	Rango móvil
1	125.1		13	126.4	1.6
2	127.5	2.4	14	128.3	1.9
3	122.7	4.8	15	129.5	1.2
4	126.4	3.7	16	128.1	1.4
5	125.5	0.9	17	125.1	3.0
6	130.5	5.0	18	128.5	3.4
7	127.3	3.2	19	125.0	3.5
8	127.5	0.2	20	126.3	1.3
9	127.3	0.2	21	126.5	0.2
10	123.0	4.3	22	127.9	1.4
11	123.5	0.5	23	129.5	1.6
12	128.0	4.5	24	131.9	2.4
				$\bar{X}$ = 126.97	$\bar{R}$ = 2.287

La carta de control obtenida se muestra en la figura 4.13, en la cual, no hay puntos tuera de los límites de control. Sin embargo, en las últimas mediciones de temperatura aparece una tendencia, ya que hay seis puntos consecutivos de manera ascendente. De esta forma, alguna causa especial provocó una

tendencia a que la temperatura se incrementara en el último día, por lo que se debe actuar de inmediato para identificarla, lo cual permite prevenir problemas más graves en la impresión de las láminas de acero.

Los responsables del proceso identificaron tal tendencia como una señal de que ya era necesario el mantenimiento periódico que se le da al horno. También en la misma carta se aprecia que el proceso estuvo ligeramente descentrado, ya que la temperatura promedio fue de 126.9JCC, y no de 125° como se desea; esto también pudo ser causa de la necesidad de mantenimiento. La decisión que se tomó fue dar mantenimiento al horno y volver a tomar datos para establecer los nuevos límites de control.

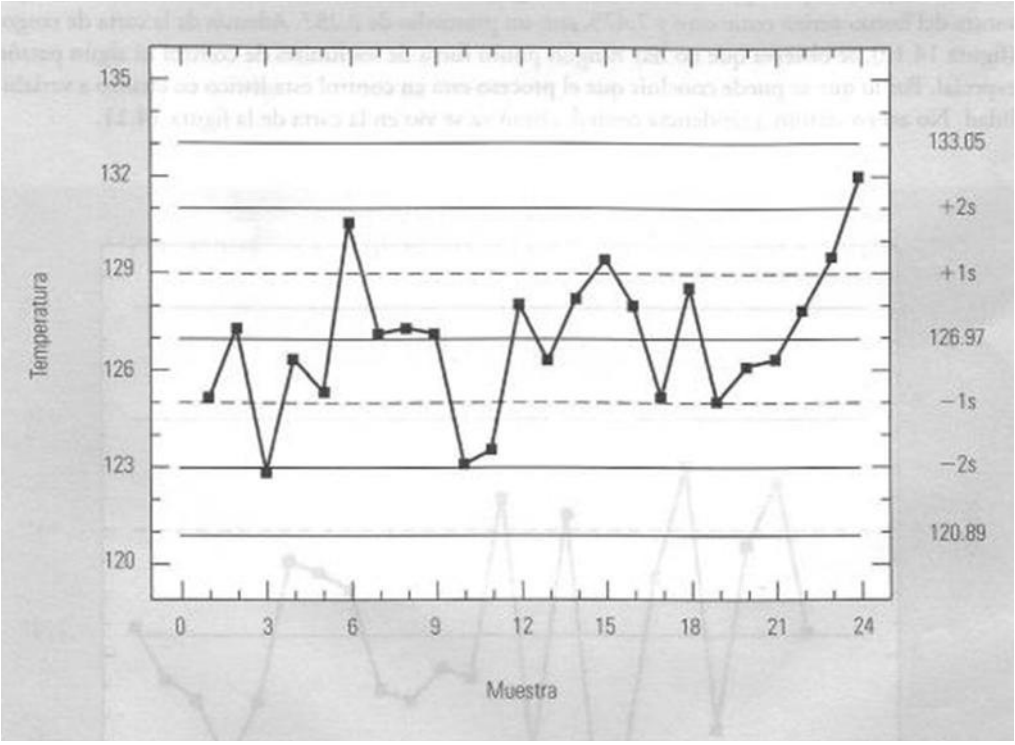


Figura 4.13 Carta de individuales para la temperatura en el horno.

Aunque insistimos que la capacidad de un proceso debe evaluarse mediante índices de capacidad y otras herramientas, es necesario destacar que en el caso particular de la carta de individuales es posible tener una evaluación visual de la capacidad, ya que los límites de esta carta coinciden con los límites naturales del proceso. Por ejemplo, en el caso de la temperatura del horno del ejemplo 4.11, se tiene que el límite de control superior *(LCS* = 133.05) está

fuera de la especificación superior *(ES*= 130), por lo que el proceso está operando con temperaturas ligeramente mayores que las toleradas.

Carta de rangos móviles

La carta de rangos móviles se ha usado como complemento a la carta de individual es y grafica el rango móvil de orden dos para detectar cambios en la dispersión del proceso. Aunque estudios recientes han demostrado que la carta de individuales es suficientemente robusta para detectar cambios tanto en la media como en la dispersión del proceso. Por ello, hay una tendencia a sólo utilizar la carta de individuales. De cualquier forma, con propósitos ilustrativos, en la figura 4.14 se ha graficado la carta de rangos móviles de orden dos para el caso del ejemplo 4.11. Los límites de con- trol se obtienen de la misma forma que una carta de rangos, sólo que en este caso las constantes D_3 y D_4 se obtienen usando el tamaño de subgrupo n = 2, ya que cada rango se obtiene de dos datos (las mediciones consecutivas). Por lo tanto, de acuerdo con los datos de la tabla 4.9, los límites de esta carta están dados por:

Límite de control inferior = $D_3\bar{R}$ = O X 2.287 = *O*

Línea central = $\bar{R}$ = 2.287

Límite de control superior= D_4 X $\bar{R}$ = 3.2686 X 2.287 = 7.475

Por lo que se espera que las diferencias (rangos) entre dos mediciones consecutivas de la temperatura del horno varíen entre cero y 7.475, con un promedio de 2.287. Además de la carta de rangos (figura 4.14), se observa que no hay ningún punto fuera de los límites de control ni algún patrón especial. Por lo que se puede concluir que el proceso está en control estadístico en cuanto a variabilidad. No así en cuanto a tendencia central, como ya se vio en la carta de la figura 4.13

Por otra parte, en cuanto a la aplicación de las pruebas para detectar causas especiales de variación que se vieron en la lección anterior, la variable que se grafica en la carta de individuales debe tener una distribución similar a la

norma. En caso de no ser así y si no se verifican las probabilidades específicas de falsas alarmas, entonces las pruebas que se deben aplicar con cuidado y reservas son las de cambio de nivel.

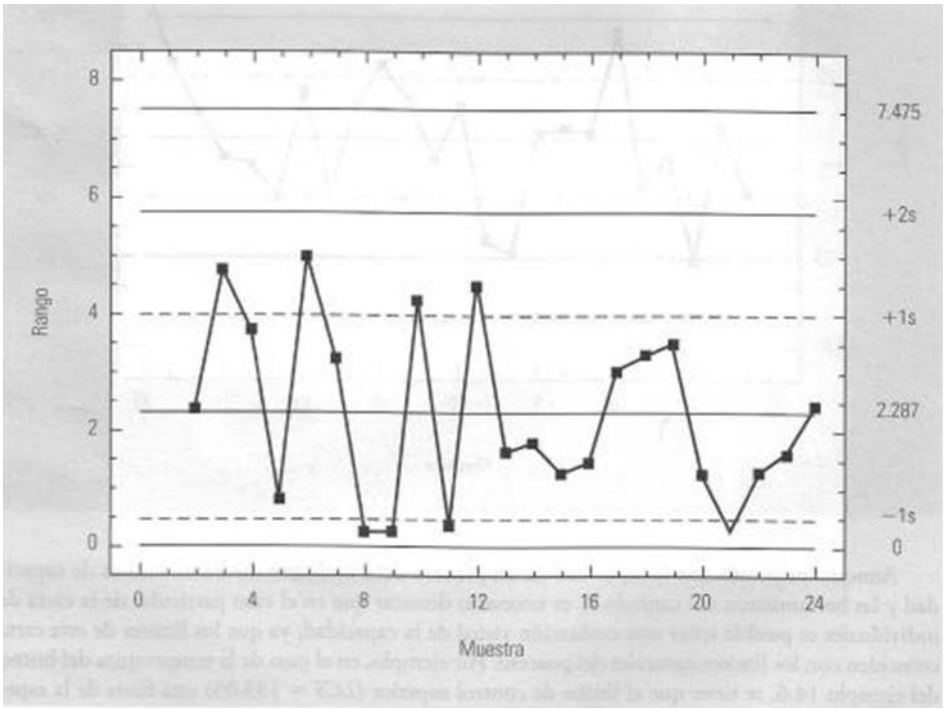


Figura 4.14 Carta de rangos móviles para la temperatura

Cartas *p* y *np*

Existen muchas características de calidad tipo *pasa* y *no pasa*, en las que, de acuerdo con éstas, un producto es juzgado como defectuoso o no defectuoso, dependiendo de si posee ciertos atributos. En estos casos, a un producto que no reúne ciertos atributos no se le permite pasar a la siguiente etapa del proceso y se le espera denominándolo artículo defectuoso. También se acostumbra a llamar a estos productos como no conformes.

Carta p (proporción de artículos defectuosos)

En esta carta analiza las variaciones en la fracción o proporción de artículos defectuosos por muestra o subgrupo. Se utiliza mucho para reportar la proporción (o porcentaje) de productos defectuosos en un proceso. En la carta *p* se toma una muestra o subgrupo de n_i artículos, que puede ser la totalidad o

una parte de las piezas de un pedido, un lote, un embarque o cierta producción. Se revisa cada uno de estos n_i artículos y si de ellos se encuentra d_i defectuosos, entonces en la carta *p* se grafica la proporción p_i de artículos defectuosos.

$P_i = d_i / n_i$

Para calcular los límites de control, se parte del supuesto de que la cantidad de piezas defectuosas por subgrupo sigue una distribución binominal (vea el apéndice) y a partir de esto se aplica el mismo esquema general, que señala que los límites están dados por $\mu_w + 3\sigma_w$. Por lo tanto, en el caso que nos ocupa: $w = p_i$. Así, de acuerdo con la distribución binominal, se sabe que la media y la desviación estándar de una proporción están dada, respectivamente por:

$$\mu_p = \overline{p} \quad \text{y} \quad \sigma_p = \sqrt{\frac{\overline{p}(1-\overline{p})}{n}}$$

Donde *n* es el tamaño de subgrupo y *p* es la porción promedio de artículos defectuosos en el proceso. De acuerdo con esto, los límites de control de la carta p con el tamaño del subgrupo constante están dados por:

$\sqrt{\frac{\overline{p}(1-\overline{p})}{n}}$ Límite de control superior = $\overline{p}$ + 3

Línea central = $\overline{p}$

$\sqrt{\frac{\overline{p}(1-\overline{p})}{n}}$ Límite de control inferior = $\overline{p}$ + 3

Cuando el tamaño de subgrupo *n* no se mantiene constante a lo largo de las muestras, se tienen dos alternativas: usar el tamaño promedio de subgrupo *n* en lugar de *n*, o construir una carta de control con límites variables, que comentaremos más adelante. Si el promedio del proceso medio a través de *p*

es desconocido, entonces será necesario estimarlo por medio de un estudio inicial.

Ejemplo 4.12

En una empresa del ramo metal-mecánico se fabrican válvulas. Después del proceso de fundición se hace una inspección y las piezas que no cumplen con ciertas características se rechazan. Las razones por las que pueden rechazarse son diversas: piezas incompletas, porosas, mal formadas, etc. Para evaluar la variabilidad y la magnitud de la proporción de piezas defectuosas en el proceso de fundición se decide implementar una carta *p.*

Muestra o lote	Tamaño de lote, n_i	Artículos defectuosos d_i	Proporción p_i
1	300	15	0.05
2	300	12	0.04
3	300	15	0.05
4	300	7	0.02
5	330	16	0.05
6	300	6	0.02
7	300	18	0.06
8	280	10	0.04
9	290	9	0.03
10	300	25	0.08
11	300	9	0.03
12	300	4	0.01
13	300	7	0.02
14	300	9	0.03
15	305	5	0.02
16	295	15	0.05
17	300	19	0.06
18	300	7	0.02
19	300	12	0.04
20	300	10	0.03
21	300	4	0.01
	$\bar{n} = 300$		$\bar{p} = 0.0362$

Tabla 4.10 Válvulas defectuosas en el proceso de fundición

El proceso de fundición se hace por lotes. La tabla 4.10 muestra los datos obtenidos durante una semana para cierto tipo de válvulas. Aunque regularmente el tamaño de lote es fijo, n = 300, en ocasiones, por diferentes motivos, en algunos lotes se hacen unas cuantas piezas de más o de menos,

como se aprecia en la tabla 4.10. Para calcular los límites se usará el tamaño de muestra (lote) promedio. De la tabla 4.10 se obtiene que el número total de piezas inspeccionados fue de 6 300 y, de éstas, 234 se consideraron defectuosas, por lo que la proporción promedio de piezas defectuosos está dada por

$$p = \frac{\text{Total de defectuosos}}{\text{Total de inspeccionados}} = \frac{234}{6300} = 0.0371$$

y como

$$n = \frac{\text{Total de inspeccionados}}{\text{Total de subgrupos}} = \frac{6300}{21} = 300$$

entonces los límites de control están dados por

$$LCS = 0.0371 + 3\sqrt{\frac{0.0371(1-0-0371)}{300}} = 0.0699$$

Línea central = 0.0371

$$LCS = 0.0371 - 3\sqrt{\frac{0.0371(1-0-0371)}{300}} = 0.0044$$

la carta *p* con estos límites se muestra en la figura 4.15. En ésta se aprecia que el proceso de fundición no estuvo en control estadístico, ya que en el lote 10 se dio una proporción de artículos defectuosos mayor que el límite superior. De aquí que en la fabricación de tal lote hubo alguna situación especial que causó una proporción de artículos defectuosos anormalmente grande. Tal causa debe ser identificada para que en el futuro no se vuelva a presentar.

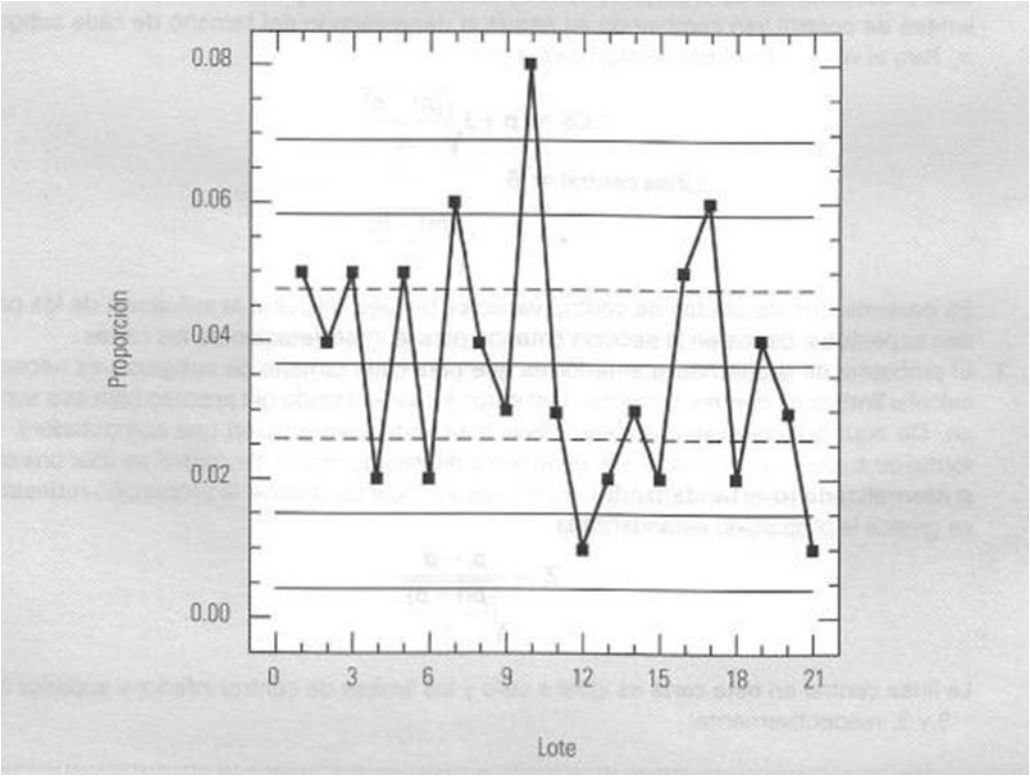


Figura 4.15 Carta p con límite promedio para fundición

Interpretación de los límites de control de la carta *p*

Un aspecto importante en el uso de cualquier carta es la interpretación de sus límites. En este caso, los de la figura 4.15 muestran que la proporción de artículos defectuosos, en tal tipo de lotes de 300 piezas, fluctúa ordinariamente entre 0.0044 y 0.0699, con un promedio de 0.0371. Por lo ramo, mientras no haya un cambio en el proceso se espera que se siga dando esa proporción de defectuosos, que normalmente se podría considerar alta.

Carta l00p. En ocasiones resulta más intuitivo para la administración el uso de porcentajes en lugar de proporciones; en estos casos, se multiplica por 100 roda la escala de la carta *p* y *se* obtiene lo que suele identificarse como carta l00p, en la que en lugar de registrarse la proporción de artículos defectuosos se registra el porcentaje. De esta manera, la interpretación de los límites de control para el problema de fundición sería: el porcentaje de artículos defectuosos, en tal tipo de lores de 300 piezas, fluctúa ordinariamente entre 0.44% y 6.99%, con un promedio de 3.71%.

Carta *p* con límites variables

En ocasiones, en ciertos procesos en los que se aplica una carta *p,* el tamaño de subgrupo n_i, es muy variable debido a que está asociado a tamaños de lotes o debido a alguna otra circunstancia que vuelve impráctico trabajar con el mismo tamaño de subgrupo como referencia. El problema en estos casos es que los límites de control dependen del valor *de* n_i, ya que un número pequeño de éste hace que los límites sean más amplios *y* viceversa: un valor grande de n_i, hace que los límites de la carta *p* sean más estrechos. Para atender esta situación de n_i, variable se tienen las tres alternativas siguientes:

1. Utilizar tamaño de subgrupo promedio para calcular los límites de control, como se ilustró en el ejemplo 4.12. Esta alternativa se recomienda cuando la variación entre los tamaños de subgrupo no es demasiada (menor que 20% es aceptable). En el caso del ejemplo 4.12, los tamaños de subgrupo varían de 280 a 330, con un promedio de 300, por lo que la discrepancia entre el mínimo y el promedio es (1-(280 / 300)) X 100 = 6.67%, mientras que la existente entre el máximo y el promedio es ((330/300)- 1) X 100 = 10%. De manera que en este caso es adecuado usar límites con tamaño de subgrupo promedio.
2. Cuando la alternativa anterior no es aplicable o cuando se quieren conservar las características probabilísticas de la carta de control, se utiliza **la carta *p* con límites variables**, cuyos límites de control van cambiando su amplitud dependiendo del tamaño de cada subgrupo n_i, . Para el valor n_i, los límites están dados por

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

LCS = p + 3
–

Línea central = $\bar{p}$

LCI = $\bar{p}$ - 3

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

Es evidente que los límites de control variables pueden dificultar la aplicación de los patrones especiales, dados en la sección anterior, para la interpretación de las cartas.

3. El problema de la alternativa anterior es que para cada tamaño de subgrupo es necesario calcular límites de control, y con base en éstos juzgar el estado del proceso para ese subgrupo. De aquí que sea recomendable llevar esta carta apoyados en una computadora. Una forma de superar la situación anterior de tener diferentes límites de control es usar una carta *p* normalizada (o estandarizada) , en la cual, en lugar de graficar la proporción muestra! g, se grafica la proporción estandarizada

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

La línea central en esta carta es igual a cero y los límites de control inferior y superior son -3 y 3, respectivamente.

Límites variables p ara el ejemplo 4.12. Para calcular los límites para cada muestra de los datos de la tabla 4.10 se sustituye cada tamaño de muestra, n_i, en la fórmula para calcular los límites. De esta manera, los lotes que tienen tamaño *n;* = 300 tendrán los mismos límites que la carta de la figura 4.15, mientras que para los lotes que tienen otro tamaño será necesario calcular sus propios límites; por ejemplo, en el caso del lote 5, con tamaño 330, los límites son:

$$LCS = 0.0371 + 3\sqrt{\frac{0.0371(1-0-0371)}{330}} = 0.0683$$

Línea central = 0.0371

$$LCS = 0.0371 - 3\sqrt{\frac{0.0371(1-0-0371)}{330}} = 0.00589$$

Con el mismo procedimiento se calcula el resto de los límites para los demás tamaños de muestra, después de lo cual se obtiene la figura 4.16. Como se aprecia en tal carta, cuando el tamaño de muestra es más grande, los límites

son más estrechos. La carta de la figura 4.16 tiene una gran similitud con la carta con límites promedio, debido a que los tamaños muestrales no discrepan mucho entre sí.

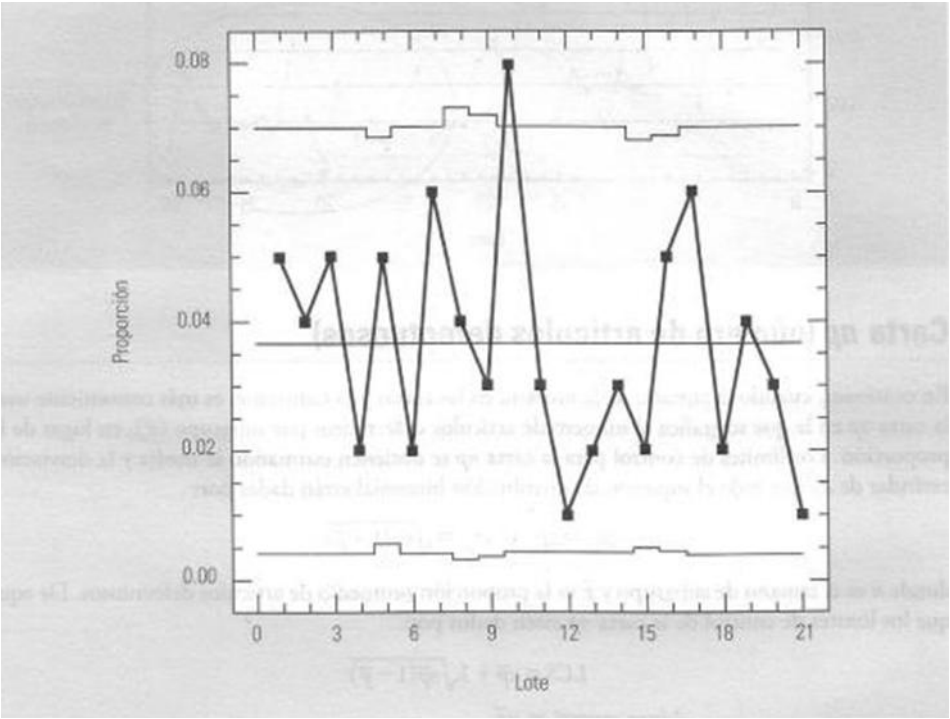


Figura 4.16 Carta P con límites variables para fundición

Ejemplo 4.13 Uso de una carta *p* para evaluar mejoras

Dado que el nivel promedio de defectos del proceso del ejemplo 4.12 se consideró demasiado alto, se decidió realizar un proyecto de mejora siguiendo el ciclo PHVA. Después de aplicar las soluciones propuestas para reducir la proporción de piezas defectuosas, se tiene la siguiente proporción de defectuosos en 19 lotes de tamaño 300 cada uno:

0.013, 0.010, 0.030, 0.020, 0.007. 0.017, 0.010, 0.027, 0.000, 0.017, 0.040, 0.013, 0.017, 0.013, 0.017, 0.013, 0.020, 0.030, 0.007

Por lo que es necesario evaluar si las soluciones propuestas dieron resultado. Una forma directa de hacer esto es graficando estas proporciones en la misma carta *p* de la figura 4.15. Esto se muestra en la figura 4.17, de donde queda claro que las modificaciones dieron resultado, ya que a partir del lote 22, de un total de 19 puntos, 18 están por debajo de la línea central. Por lo tanto, se cumplen todas las pruebas para declarar un cambio de nivel del proceso (vea

la figura 4.12}. De hecho, para declarar que las mejoras dieron resultado, con los primeros ocho lotes producidos después de los cambios se habría tenido la evidencia de la mejora del proceso, ya que se cumpliría el criterio de: ocho o más puntos consecutivos de un sólo lado de la línea central (vea la figura 4.12).

Nuevos límites. Dado que después del proyecto el proceso mejoró, se tiene una nueva realidad para el mismo y, por lo tanto, es necesario recalcular los límites de control. Para ello, se consideran sólo los datos después de la mejora y se tiene que p = 0.0168, y como n = 300, los nuevos límites de control son: LCS = 0.039 1 y LCI = 0.0.

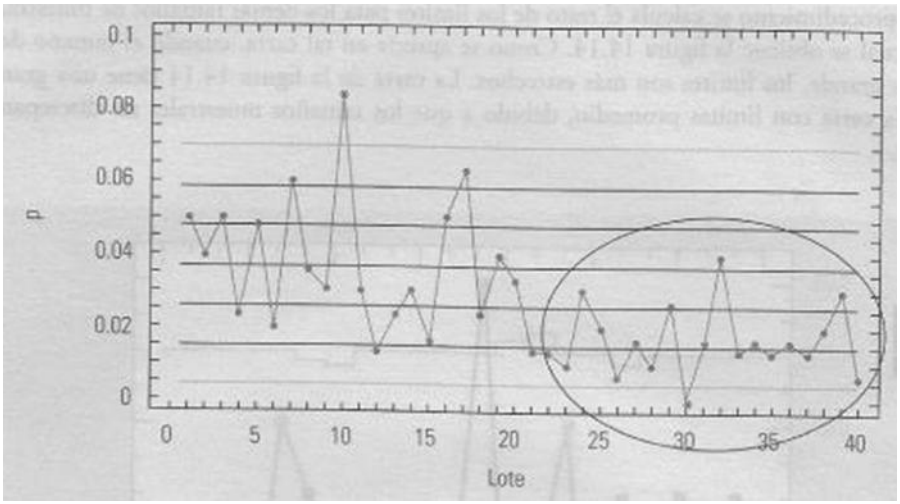


Figura 4.17 Carta P para evaluar los efectos del proyecto de mejora

Carta *np* (número de artículos defectuosos)

En ocasiones, cuando el tamaño de la muestra en las cartas p es constante, es más conveniente usar la carta np en la que se grafica el número de artículos defectuosos por subgrupo (d_i), en lugar de la proporción. Los límites de control para la carta np se obtienen estimando la media y la desviación estándar de d_i, que bajo el supuesto de distribución binomial están dadas por:

$\mu_{di} = np$ y $\sigma_{di} = \sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$,

donde n es el tamaño de subgrupo y pes la proporción promedio de artículos defectuosos. De aquí que los límites de control de la carta np estén dados por

$$LCS = n\bar{p} + 3\sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$$

$$Línea \quad central = n\bar{p}$$

$$LCI = n\bar{p} - 3\sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$$

Ejemplo 4.14

Del análisis de los datos de inspecciones y pruebas finales de un producto ensamblado, se ha detectado, a través de una estratificación y un análisis de Pareto, que la causa principal por la que los artículos salen defectuosos está relacionada con los problemas en un componente en particular: el componente W. Se decide, entonces, analizar más de cerca el proceso que produce tal componente. Para ello, de cada lote de componentes W se inspecciona una muestra den= 120. Los datos obtenidos en 20 lotes consecutivos se muestran en la tabla 4.11. El análisis de estos datos se hace directamente al registrar la cantidad de artículos defectuosos por muestra, sin necesidad de calcular la proporción, es decir, se estudian con una carta *np.* Para obtener sus límites, primero se estima *p,* que se obtiene de dividir el total de artículos defectuosos (183) entre el total de piezas inspeccionadas (2 400; son 20 muestras de 120 piezas cada una), es decir

$$\bar{p} = \frac{183}{120 \times 20} = 0.076$$

Con lo que los límites de control están dados por:

$$LCS = 120 \times (0.076) + 3\sqrt{120 \times 0.076(1-0.076)} = 17.87$$

Línea central = 120 X (0.076) = 9.15

$$LCS = 120 \times (0.076) - 3\sqrt{120 \times 0.076(1-0.076)} = 0.43$$

La carta *np* resultante se muestra en la figura 4.18, en la que se aprecia que el proceso no funcionó de manera estable, ya que el número de piezas defectuosas en la muestra del lote 12 es mayor que el límite superior, mientras que en la muestra del lote 16 es menor que el límite inferior. De aquí que se tenga una evidencia objetiva para afirmar que en la fabricación del lote 12 se

hizo presente una causa o situación especial que normalmente no está presente en el proceso y que lo empeoró seriamente, mientras que en el lote 16 ocurrió una causa especial que mejoró el desempeño del proceso de fabricación de componentes W. Se debe tratar de localizar ambas causas, a fin de prevenir la primera y fomentar la segunda.

Tabla 4.11 artículos defectuosos para componente W

Lote	Artículos defectuosos en la muestra	Lote	Artículos defectuosos en la muestra
1	9	11	10
2	6	12	20
3	10	13	12
4	8	14	10
5	5	15	10
6	5	16	0
7	14	17	13
8	12	18	5
9	9	19	6
10	8	20	11
			Total = 183

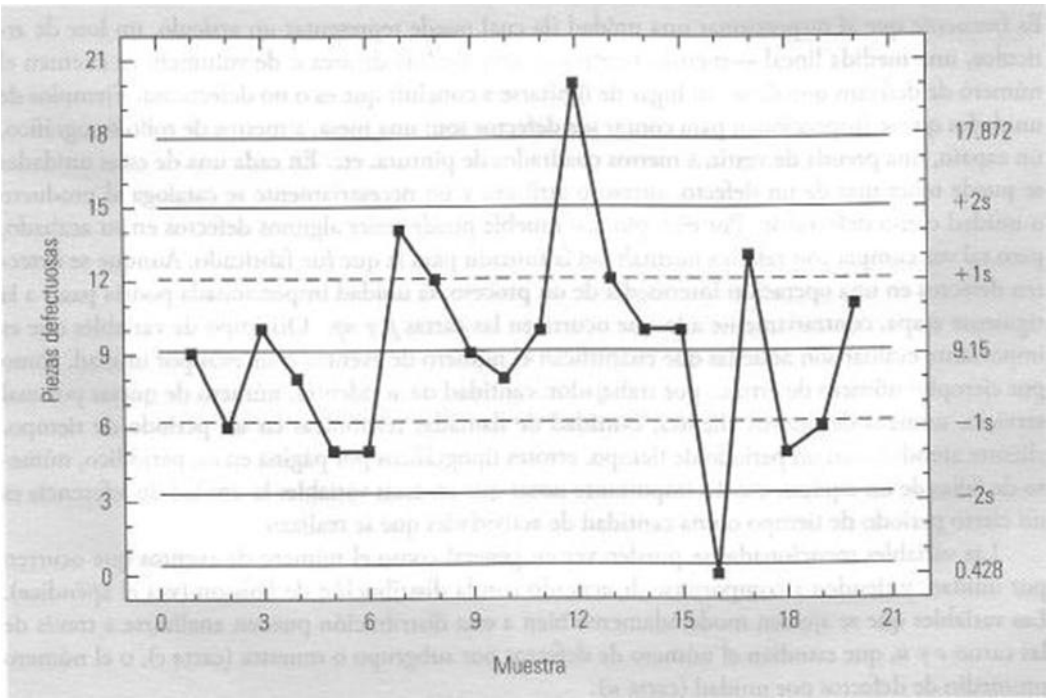


Figura 4.18 Carta np para los componentes W

En ocasiones, en un estudio inicial como el que se hizo en el ejemplo 4.14, es difícil localizar las causas especiales, si es que las hubo, ya que ocurrieron en

el pasado. Sin embargo, una vez que se establecen los límites de control y en la carta se grafica la cantidad de piezas defectuosas en el momento inmediato en el que se obtienen, será más fácil localizar las causas especiales que ocurran, ya que se analizará el proceso en tiempo presente. Los límites de control que se usarán a futuro en la carta *np* para los componentes W pueden ser los mismos que se obtuvieron, pues éstos están afectados por un punto máximo y otro mínimo, por lo que de alguna manera se compensan, además de que no se encontraron las causas especiales.

Interpretación de los límites de control de la carta *np*

Los límites de la carta *np* indican qué tanto varía la cantidad esperada de piezas defectuosas por cada *n* artículos inspeccionados. Por ello, en el caso del ejemplo 4.14 se espera que de cada muestra de 120 componentes inspeccionados, el número de rechazados varíe entre 0.43 y 17.87, con un promedio de 9.15.

Hacemos énfasis en el hecho de que estos límites reflejan la realidad del proceso de acuerdo con la manera en la que se muestrea, lo que hace que la carta ayude a detectar la presencia de causas especiales que afectan el proceso. Sin embargo, aunque se identifiquen y se eliminen tal tipo de causas y se logre tener un proceso estable, la cantidad de piezas defectuosas aún será demasiado grande, como se aprecia en la interpretación de los límites. Por ello, será necesario generar acciones para disminuir la cantidad de piezas defectuosas.

Algo que es importante destacar es la relación entre la carta *p* y la *np,* ya que esencialmente son las mismas, salvo un cambio de escala. Por ejemplo, para convertir la carta *np* de la figura 4.18 en una carta *p,* basta dividir la escala entre el tamaño de la muestra (120). De aquí que cuando se quieren controlar los artículos defectuosos de un proceso y se toman muestras de tamaño constante, el criterio para elegir entre una carta *p* y una *np* es según se prefiera entre la proporción de artículos defectuosos o el número de éstos.

Cartas *c* y *u* (para defectos)

Es frecuente que al inspeccionar una unidad (la cual puede representar un artículo, un lote de artículos, una medida lineal ----metros, tiempo----, una medid a de área o de volumen) se cuenten el número de defectos que tiene, en lugar de limitarse a concluir que es o no defectuosa. Ejemplos de unidades que se inspeccionan para contar sus defectos son: una mesa, *x* metros de rollo fotográfico, un zapato, una prenda de vestir, *x* metros cuadrados de pintura, etc. En cada una de estas unidades se puede tener más de un defecto, suceso o atributo y no necesariamente se cataloga al producto o unidad como defectuoso. Por ejemplo, un mueble puede tener algunos defectos en su acabado, pero tal vez cumpla con relativa normalidad la función para la que fue fabricado. Aunque se detecten defectos en una operación intermedia de un proceso, la unidad inspeccionada podría pasar a la siguiente etapa, contrariamente a lo que ocurre en las cartas *p* y *np.* Otro tipo de variables que es importante evaluar son aquellas que cuantifican el número de eventos o sucesos por unidad, como por ejemplo: número de errores por trabajador, cantidad de accidentes, número de quejas por mal servicio, número de nuevo s dientes, cantidad de llamadas telefónicas en un periodo de tiempo, clientes atendidos en un periodo de tiempo, errores tipográficos por página en un periódico, número de fallas de un equipo, etc. Es importante notar que en estas variables la unidad de referencia es un cierto periodo de tiempo o una cantidad de actividades que se realizan.

Las variables mencionadas se pueden ver en general como el número de eventos que ocurren por unidad, y tienden a comportarse de acuerdo con la distribución de Poisson (vea el apéndice). Las variables que se ajusten moderadamente bien a esta distribución pueden analizarse a través de las cartas *c* y *u,* que estudian el número de defectos por subgrupo o muestra (carta *c),* o el número promedio de defectos por unidad (carta *u)*

Carta c (número de defectos)

El objetivo de la **carta c** es analizar la variabilidad del número de defectos por subgrupo, cuando el tamaño de subgrupo se mantiene constante. En esta carta

se grafica c_i, que es igual al número de defectos o eventos en el i-ésimo subgrupo (muestra). Los límites de control se obtienen suponiendo que el estadístico c_i, sigue una distribución de Poisson, por lo tanto, las estimaciones de la media y la desviación estándar de este estadístico están dadas por:

$\mu_{ci} = \bar{c} =$ *Total de defectos*
Total de subgrupos

$\sigma_{ci} = \sqrt{\bar{c}}$

por lo que los límites de control de la carta e se obtienen con las expresiones

LCS $= \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}$
Línea central $= \bar{c}$
LCI $= \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}$

Ejemplo 4.15

En una empresa que elabora productos agroquímicos se tiene el problema de intoxicación de los trabajadores debido al contacto con agentes tóxicos. Para evaluar el número de obreros intoxicados por mes en los últimos dos años, se recurre a los registros de la enfermería de la empresa. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 4.12; se obtiene que el número promedio de intoxicados por mes es:

$$\bar{c} = \frac{86}{18} = 4.78$$

por lo que los límites de control de la carta *C* están dados por:

$$LCS = 4.78 + 3\sqrt{4.78} = 11.34$$

Línea central = 4.78

$$LCI = 4.78 - 3\sqrt{4.78} = -1.78$$

Observe que el *LCI* resulta negativo, pero como no puede haber cantidades negativas de intoxicados, entonces el límite inferior se iguala a cero. La carta

obtenida se muestra en la figura 4.19. A partir de ella se aprecia que en el mes 12 hubo una situación especial que causó un alto número de intoxicados, más de los que ordinariamente se esperarían. Al recurrir a los expedientes de la enfermería, se encontró que ese punto fuera de los límites ocurrió cuan- do se introdujo por primera vez cierto tóxico, y que no se les dieron las instrucciones adecuadas a los trabajadores. Localizada la causa, para fijar los límites de control definitivos se eliminó el dato correspondiente al mes 12 y entonces los límites de control a usarse en el futuro son:

Línea central = 4.35, *LCI* = 0 y *LCS* = 10.61

Tabla 4.13 Datos del ejemplo 4.15

Mes	Intoxicados C_i	Mes	Intoxicados C_i	Mes	Intoxicados C_i
1	6	7	3	13	5
2	5	8	7	14	4
3	4	9	5	15	7
4	4	10	7	16	2
5	1	11	5	17	4
6	3	12	12	18	2
					$\bar{c} = 4.78$

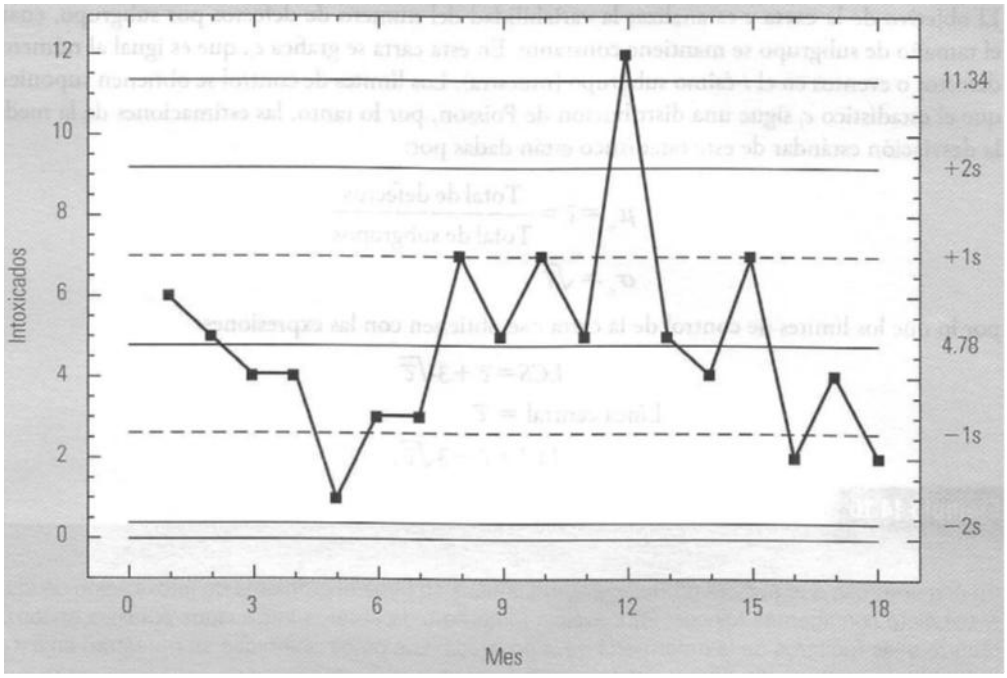


Figura 4.19 Carta C para el número de obreros intoxicados por mes

Interpretación de los límites de control de la carta *c*

Los límites de una carta *e* reflejan la variación esperada para el número de eventos por subgrupo. De aquí que para el caso del ejemplo 4.15, los límites a usarse en el futuro son: línea central = 4.35, *LCI* = 0 y *LCS* = 10.61, entonces se espera que el número de trabajadores intoxicado s por mes fluctúe entre cero y 10.61, con un promedio de 4.35. Es evidente que estas cantidades son altas, por lo que se requiere un plan de acción que reduzca esta problemática. Por lo tanto, una forma natural de empezar sería estratificando el problema, es decir, localizando el área, trabajadores o agentes químicos en los que se presentan mayores problemas.

El hecho de representar a través de una carta de control este tipo de variables no sólo ayudará a detectar situaciones anormales que en lo futuro se deben prevenir, sino que además provoca en la administración una mayor conciencia de la magnitud e importancia del problema; además de que será muy fácil evaluar el impacto de las acciones de mejora.

La carta *c* es aplicable donde el tamaño del subgrupo (muestra) puede verse como constante; por ejemplo, una semana, una pieza, 100 artículos, un metro de tela o cualquier otra cantidad que se considere unidad, pero siempre debe permanecer constan te. Cuando no permanece constante se aplica la carta *u.*

Carta *u* (número promedio de defectos por unidad)

Cuando se quiere monitorear una variable del tipo que se comentó al inicio de esta sección (con distribución Poisson), pero el tamaño de subgrupo no es constante se usa la carta *u.* En ella se analiza la variación del número promedio de defectos por artículo o unidad, en lugar del total de defectos en el subgrupo. De esta manera, para cada subgrupo se grafica:

$$u_i = \frac{c_i}{n_i}$$

donde C_i es la cantidad de defectos en el subgrupo *i* y *n;* es el tamaño del subgrupo *i.* Para calcular los límites es necesario estimar la media y la

desviación estándar del estadístico u_i que, en el supuesto de que C_i sigue una distribución Poisson, resultan ser:

$$\mu_w = \bar{u} = \frac{Total\ de\ defectos}{total\ de\ artículos inspeccionados}$$

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{\bar{u}}{n}},$$

donde *n* es el tamaño de subgrupo. De esta manera los límites de control en la carta *u* están dados por:

$$LCS = \bar{u} + 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$$

Línea central = $\bar{u}$

$$LCS = \bar{u} - 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$$

Cuando *n* no es el mismo en todos los subgrupos, entonces *n* se sustituye por el tamaño promedio de subgrupo, $\bar{n}$. Otra alternativa es obtener una carta con límites variables, en la que para cada subgrupo se calculan sus límites en función del tamaño de subgrupo n_i y con estos límites se evalúa el proceso para tal subgrupo.

Ejemplo 4.16

En la tabla 4.14 se presenta el número de defectos observados en las muestras (subgrupos) de 241otes consecutivos de circuitos electrónicos. El número de circuitos inspeccionados en cada lote es variable. Es claro que la columna del número de defectos por muestra *C;* no se debe analizar con una carta *e* porque está influido por el número de circuitos: entre más circuitos es natural esperar más defectos. Por ello, es mejor analizar el número promedio de defectos por unidad (circuito) u_i, mediante la carta *u.* Para calcular los límites de control, a partir de la tabla 4.14, se tiene que:

$u = \frac{549}{525} = 1.04$

Como el tamaño de subgrupo o muestra es variable, se tienen dos alternativas: usar el tamaño de subgrupo promedio o construir una carta con límites variables. Se harán ambas. El tamaño de subgrupo promedio se obtiene dividiendo el total de unidades inspeccionadas (525) entre el número de subgrupos (24); de esta manera *n* = 21.875. Con esto tenemos que los límites de control son:

$$LCS = 1.04 + 3\sqrt{\frac{1.04}{21.875}} = 1.69$$

Línea central = 1.04

$$LCS = 1.04 - 3\sqrt{\frac{1.04}{21.875}} = 0.38$$

La correspondiente carta *u* se muestra en la figura 4.20, en la cual se observa que el proceso estuvo fuera de control estadístico, ya que en el lote 21 el número promedio de defectos por circuito se sale del límite de control superior. Por lo tanto, en la fabricación de tal lote ocurrió alguna causa especial que empeoró la calidad de los circuitos. Se debe identificar tal causa para evitarla en el futuro. Además del punto fuera de los límites, no hay ningún patrón no aleatorio.

Interpretación de los límites de control en la carta *u*

En la carta *u* se grafica el número promedio de defectos por unidad. Por ejemplo, en el caso de las piezas electrónicas, como se ha insistido, los límites de control para analizar el proceso en el futuro pueden ser los ya obtenidos, o los recalculados una vez que se elimine el punto fuera de los límites. En este proceso se optó por usar los límites calculados inicialmente, por lo que se espera que, en los lotes similares en tamaño y características a los de la tabla 4.14, el número promedio de defectos por circuito fluctúe de manera aleatoria entre 0.38 y 1.69, con una media de 1.04.

Tabla 4.14 Defectos en los circuitos electrónicos

Lote	Tamaño de muestra, n_i	Total de defectos, c_i	Número promedio de defectos por circuito, u_i
1	20	17	0.9
2	20	24	1.2
3	20	16	0.8
4	20	26	1.3
5	15	15	1.0
6	15	15	1.0
7	15	20	1.3
8	25	18	0.7
9	25	26	1.0
10	25	10	0.4
11	25	25	1.0
12	30	21	0.7
13	30	40	1.3
14	30	24	0.8
15	30	46	1.5
16	30	32	1.1
17	30	30	1.0
18	30	34	1.1
19	15	11	0.7
20	15	14	0.9
21	15	30	2.0
22	15	17	1.1
23	15	18	1.2
24	15	20	1.3
	Total = 525	Total = 549	$\bar{u} = 1.04$

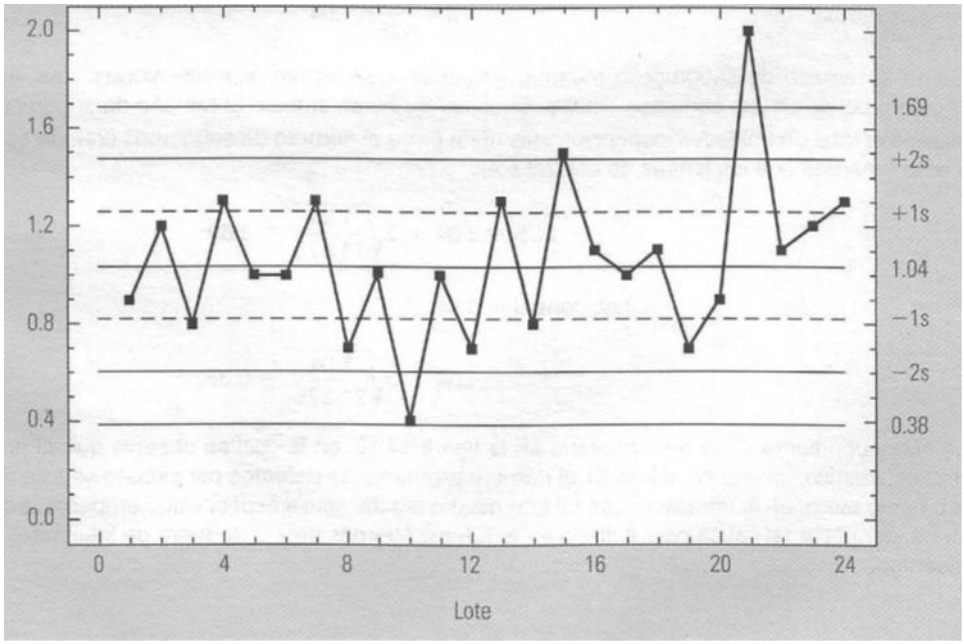


Figura 4.20 Carta *u* para defectos en circuitos (limites promedio).

Carta *u* con límites variables

Para construir una carta *u* con límites variables para los datos de la tabla 4.14, se deben calcular límites de control para cada tamaño de subgrupo. Por ejemplo, cuando se tiene tamaño de muestra de 25, los límites para tales lotes son:

$$LCS = 1.04 + 3\sqrt{\frac{1.04}{25}} = 1.65$$

$$LCS = 1.04 - 3\sqrt{\frac{1.04}{25}} = 0.43$$

Al calcular tantos límites como tamaños de muestra distintos, se obtiene la carta *u* de la figura 4.21. La línea central es la misma, independientemente del tamaño de subgrupo. En la carta se observa que, además del punto correspondiente al lote 21, también el del10 aparece fuera de con- trol, aunque este último por el límite inferior. De esta manera, en la fabricación del lote 10 ocurrió algo especial que mejoró el desempeño del proceso. Nótese que en la carta con límites promedio de la figura 4.20 no se había detectado esto, aunque tal punto sí estaba muy cerca del límite inferior. Además, la amplitud de los distintos límites en la carta *u* es apreciablemente diferente, esto se debe a que la discrepancia entre algunos tamaños de muestra respecto al tamaño promedio es grande en términos relativos; por ejemplo, entre 30 y 21.8 es de 37% ((30/21.8)- 1).

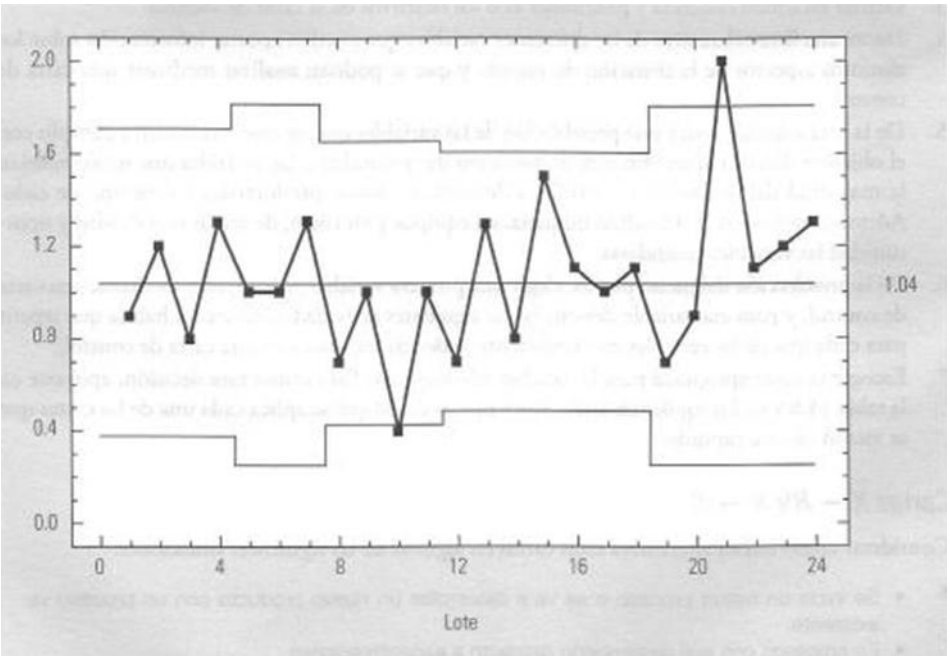


Figura 4.21 Carta *u* para defectos en circuitos (límites de variables).

La ventaja de utilizar límites promedio es que, al ser sólo un par de límites, no se necesitan estar calculando para cada punto y se tiene una perspectiva e interpretación más directa. Su desventaja es que en ocasiones no detecta cambios, o puede ser que registre un cambio cuando en realidad no ocurrió. Una buena alternativa es usar límites promedio cuando los tamaños muestrales no discrepen mucho entre sí.

Carta *u* estandarizada

Otra alternativa a usar cuando los tamaños de subgrupo de una carta *u* son muy distintos entre sí es construir una **carta *u* estandarizada**, en la cual, en lugar de graficar u_i, se grafica la siguiente variable estandarizada:

$$z_i = \frac{u_i - \bar{u}}{\sqrt{\bar{u}/n_i}}$$

La variable Z_i sigue aproximadamente una distribución normal estándar ($\mu = 0$, $\sigma^2 = 1$), por lo que la línea central en esta carta es igual a cero y los límites de control inferior y superior son -3 y 3, respectivamente.

Implementación y operación de una carta de control

Una carta de control es útil en la medida en la que atienda una necesidad percibida por los responsables del proceso y, desde luego, dependerá de qué tan bien se implemente y se utilice.

1. Describir la problemática o situación que se percibe en el área en la que se tiene la idea de implementar una carta de control.
2. Explicar con detalle por qué cree que la carta de control sería de alguna utilidad para evaluar, entender y mejorar la situación de interés.
3. Definir en forma concreta y preliminar el o los objetivos de la carta de control.
4. Hacer una lista exhaustiva de las diferentes variables que pueden aportar información sobre los distintos aspectos de la situación de interés, y que se podrían analizar mediante una carta de control.

5. De la lista anterior, hacer una preselección de las variables que, se cree, ayudarían a cumplir con el objetivo descrito antes. En esta preselección dar prioridad a las variables que mejor reflejan la magnitud del problema, en términos de calidad, costos, productividad o tiempo de ciclo. Además, considerar la dificultad humana, en equipos y en costo, de medir con calidad y oportunidad las variables candidatas.
6. De la preselección del inciso previo, elegir una primera variable para analizar mediante una carta de control, y para esa variable desarrollar las siguientes actividades, las cuales habría que repetir para cada una de las variables que finalmente se decida estudiar con una carta de control.
7. Escoger la carta apropiada para la variable seleccionada. Para tomar esta decisión, apoyarse en la tabla 4.15.

Cartas $\bar{X}$ - R y $\bar{X}$ - S

Considerar como buena alternativa estas cartas en algunas de las siguientes situaciones:

- Se inicia un nuevo proceso o se va a desarrollar un nuevo producto con un proceso ya existente.
- En procesos con mal desempeño respecto a especificaciones.
- Actualmente se mide la variable, pero se conoce poco de la misma.
- Se quieren definir o redefinir especificaciones para una característica de calidad.
- Ya se han usado cartas de atributos, pero el proceso es muy inestable y/o su capacidad sigue siendo mala. En ese caso es mejor una carta para variables continuas ya que éstas aportan más información sobre el desempeño del proceso.
- Se pretende reducir la cantidad de inspección.
- Procesos en los que hay desgastes o desajustes naturales, y que es necesario compensarlos de alguna manera apropiada.
- Tiene que demostrarse continuamente (a clientes o la gerencia) que el proceso es estable y capaz.

Cartas *p, np, c* o *u*

Considerar como alternativa una de estas cartas en algunas de las siguientes situaciones:

- La variable candidata es de atributos y no se tiene información sobre su estabilidad y su capacidad.
- El proceso consiste en operaciones complejas de ensamble y la calidad del producto se mide en términos de la ocurrencia de defectos, o con criterios del tipo pasa o no pasa.
- Es necesario que el proceso sea estable y capaz, pero no se pueden obtener mediciones de tipo continuo.
- Se requiere tener información sobre la evolución del desempeño global del proceso.

Carta de individuales

Las situaciones en las que es adecuado optar por esta carta son las mismas que para las cartas $\bar{X}$ – ***R*** *o* $\bar{X}$- ***S****,* pero el proceso es lento y tiene las características que se señalan la tabla 4.15

Tabla 4.15a Elementos para la selección de una carta de control de atributos

Carta	Propósito	Uso	Tamaño de subgrupo, *n*	Consideraciones adicionales
Proporción de defectuosos (*p*)	Analizar la proporción de artículos defectuosos por subgrupo (unidades rechazadas / unidades inspeccionadas). Se supone una distribución binomial.	Por lo general es utilizada para reportar resultados en puntos de inspección, en los que una o más características de calidad son evaluadas, y en función de esto se acepta o se rechaza el artículo.	El valor de *n* puede ser constante o variable, pero suficientemente grande para tener una alta probabilidad de que en cada subgrupo se detecte por lo menos una pieza defectuosa. Esto se logra tomando a *n* tal que $n > 9\left[\frac{(1-\bar{p})}{\bar{p}}\right]$.	No es adecuada si *n* es mucho más pequeño que lo recomendado. Para *n* muy grande, de uno o varios miles, los límites de control estarán muy estrechos y es mejor graficar p_i en una carta de individuales. Si *n* es muy variable, se debe utilizar una carta estandarizada o una con límites variables.
Número de defectuosos (*np*)	Monitorea el número de unidades defectuosas por subgrupo (número de artículos rechazados por cada muestra inspeccionada). Se supone una distribución binomial.	Se aplica en la misma situación que la carta *p*, pero con el tamaño de subgrupo constante. Es más fácil graficar los puntos en la carta, al estar trabajando con números enteros.	El valor de *n* debe ser constante, y en cuanto a su tamaño, se aplican los mismos criterios que la carta *p*.	Aplican las dos primeras observaciones para la carta *p*. Cuando *n* crece la sensibilidad o potencia de la carta para detectar cambios es mayor.

Tabla 4.15 a (continuación)

Carta	Propósito	Uso	Tamaño de subgrupo, n	Consideraciones adicionales
Número de defectos por subgrupo (c)	Analiza el número de defectos por subgrupo o unidad, que puede ser un artículo o un lote, una medida de longitud o de tiempo, una medida de área o volumen. Se supone una distribución de Poisson.	Uno de sus usos es en puntos de inspección, en los que se busca localizar uno o más tipos de defectos relativamente menores, de tal forma que, aunque se encuentren defectos, el artículo no se rechaza. También se usa para variables como número de quejas, de errores, de paros, de clientes, etc.	El tamaño de subgrupo o unidad es constante. De ser posible se elige de forma tal que el número promedio de defectos por subgrupo (línea central) sea mayor que nueve.	Si en cada subgrupo se esperan cero o muy pocos defectos, mucho menos que nueve, usualmente la carta no es eficaz. En esos casos, buscar incrementar el tamaño de subgrupo o buscar otras alternativas.
Número promedio de defectos por unidad (u)	Monitorea el número promedio de defectos por artículo o unidad inspeccionada. Se supone una distribución de Poisson.	Igual que la carta c, pero aquí se prefiere analizar el número promedio de defectos por artículo o unidad, en lugar del número de defectos por subgrupo.	El tamaño de subgrupo puede ser constante o variable, pero siempre está conformado por varias unidades de referencia o artículos. Buscar que n cumpla con $n > \frac{9}{\bar{u}}$.	Si n es mucho menor que el número recomendado, la carta u no suele ser útil. En esos casos, buscar incrementar n o utilizar otra carta de control.

Tabla 4.15b Elementos para la selección de una carta de control para variables

Carta	Propósito	Uso	Tamaño de subgrupo, n	Consideraciones adicionales
De medias ($\bar{X}$)	Analiza las medias de subgrupos, como una forma de detectar cambios en el promedio del proceso. Aunque la carta está inspirada en la distribución normal, funciona bien para otras distribuciones debido al teorema central del límite.	Procesos masivos (de mediano a alto volumen), en los que en un corto tiempo se producen varios artículos y/o mediciones.	$n > 3$ A medida que n crece, la carta detecta incluso pequeños cambios en el promedio del proceso. Por esto generalmente un tamaño de n menor que 10 es suficiente para detectar cambios moderados y grandes, que son los de mayor interés en la práctica.	Los límites de control indican dónde se espera que varíen las medias de los subgrupos, por lo que no indican dónde varían las mediciones individuales, y no tienen nada que ver con las especificaciones.
Rangos (R)	Analiza los rangos de los subgrupos como una estrategia para detectar cambios en la amplitud de la variación del proceso. La falta de normalidad afecta un poco a la carta.	Usada conjuntamente con la carta $\bar{X}$ cuando $n < 11$, por lo que se aplica al mismo tipo de proceso que tal carta.	$3 < n < 11$. A medida que n crece, es capaz de detectar cambios más pequeños en la amplitud de la dispersión del proceso.	Es importante utilizarla junto con una carta $\bar{X}$. De los criterios para cambios de nivel, sólo utilizar el de puntos fuera de los límites.

Tabla 4.15 b (continuación)

Carta	Propósito	Uso	Tamaño de subgrupo, n	Consideraciones adicionales
Desviación estándar (S)	Analiza la desviación estándar que se calcula para cada subgrupo, como una estrategia para detectar cambios en la amplitud de la variación del proceso. La falta de normalidad afecta un poco a la carta.	Usada conjuntamente con la carta $\bar{X}$ cuando $n > 10$, por lo que se aplica al mismo tipo de proceso que tal carta.	$n > 10$. Dado el tamaño de subgrupo recomendado, usarla sólo cuando se quieran detectar incluso cambios pequeños en la dispersión del proceso y se esté dispuesto a atender estos cambios.	Dado que tanto la carta $\bar{X}$ como ésta tienen una mayor sensibilidad cuando n crece, usarlas cuando se quiera y se esté dispuesto a tener un control estricto sobre el proceso. De los criterios para cambios de nivel, sólo utilizar el de puntos fuera de los límites.
Individuales (X)	Analiza cada medición individual del proceso y le detecta cambios grandes principalmente, tanto en la media como en la amplitud de la dispersión. Si la distribución no es normal, la carta se puede ver un poco afectada.	Procesos de bajo volumen, en los que se requiere un tiempo considerable (de una a más horas) para obtener un resultado o una medición. O cuando mediciones cercanas en el tiempo sólo difieren por error de medición.	Por propósito $n = 1$.	Si en estos procesos es importante detectar cambios más pequeños y medianos, se recomienda utilizar otra carta más sensible (la EWMA o CUSUM).

8. Pensar en el subagrupamiento. Cada punto en una carta representa un subgrupo o muestra de artículos. La selección de los elementos que constituirán cada subgrupo debe ser de manera que si están presentes causas especiales, éstas aparezcan como diferencias entre subgrupos *y* no como diferencias entre los elementos que forman el subgrupo. En otras palabras, se debe buscar que el subgrupo sea tan homogéneo como sea posible. Por ejemplo, si un proceso utiliza varias máquinas, sería mejor tomar un subgrupo de cada máquina, en lugar de que los elementos de un subgrupo estén conformados por artículos de varias de ellas, porque las diferencias entre máquinas podría ser una causa especial de variación. De esta manera, para obtener las cartas de control, el muestreo aleatorio no es necesariamente el procedimiento de muestreo apropia- do. La esencia del subagrupamiento es opuesta a la aleatorización. Así, el subgrupo o muestra debe formarse procurando cierta homogeneidad , entendiendo ésta como que los elementos del subgrupo se hayan fabricado bajo las circunstancias más parecidas posibles; por ejemplo, que provengan de la misma línea, lote, área, oficina , máquina, operador o material. Hay ocasiones en las que algunas posibles fuentes de variabilidad de las que no se espera mucho impacto podrían incluirse dentro del mismo subgrupo, pero las fuentes que pueden tener mucha influencia deben repartirse en

subgrupos distintos o incluso separarse en varias cartas de control. Por ello, antes que todo hay que razonar el subagrupamiento.

9. Decidir la forma de selección de los elementos del subgrupo. Para especificar la forma operativa en la que se elegirán los elementos del subgrupo, cuando éste lo constituyen más de un artículo, optar por uno de los siguientes procedimientos:
    - *Método del instante.* Consiste en conformar el subgrupo con productos hechos en un instante de tiempo tan pequeño como sea posible. Por ejemplo, un subgrupo lo constituye cierta cantidad de piezas producidas de manera consecutiva o seleccionadas de entre una tanda (horneada, tiro de moldeo) de artículos producidos bajo las mismas circunstancias; el siguiente subgrupo se selecciona de manera similar después de que pasa cierto tiempo (media hora, una hora o más, dependiendo de la frecuencia que se crea conveniente).
    - *Método del periodo. Este procedimiento consiste en seleccionar los artículos del subgrupo de entre las partes producidas en un periodo de producción (turno, lote), de esta manera el subgrupo es representativo de toda la producción de dicho periodo. Por ejemplo, un inspector asiste cada dos horas a cierta zona del proceso y elige aleatoriamente determinada cantidad de piezas de entre las que se produjeron desde la última vez que fue.*

El método del instante es el que se usa más, debido a que con él se logran subgrupos más homogéneos y porque proporciona una referencia más específica del tiempo en el que se produjeron las piezas, lo que es útil para localizar las causas especiales de variación. Además, permite reaccionar con mayor oportunidad y exactitud. La ventaja del método del periodo es que proporciona mejor información sobre la calidad, no así sobre la variabilidad. En general, el método del periodo se usa cuando, debido a las circunstancias particulares del proceso, no se puede utilizar el otro método.

10. Elegir tamaño y frecuencia de muestreo. Para el tamaño de subgrupo recurrir a las recomendaciones que se han dado en la tabla 4.15. En cuanto a la frecuencia del muestreo, hay pocos criterios que lo rijan, pero debe ser suficiente para detectar el tipo de cambios que se desea identificar: si el espaciamiento entre los subgrupos es demasiado grande,

durante ese intervalo pueden ocurrir cambios importantes en el proceso que la carta no registrará. Pero si es demasiado frecuente, entonces, además de más esfuerzo y mayores costos de medición, tal vez no se puedan atender adecuadamente todas las señales de la carta de control. Por ejemplo, es muy raro que un subgrupo se tome cada cinco minutos, más bien se suele espaciar cada media hora o más. De hecho, en algunos casos, una vez que se elige el subgrupo, automáticamente se determina la frecuencia. En general, se prefiere n muestras pequeñas con más frecuencia, que muestras grandes con poca frecuencia. Por ejemplo, entre cinco piezas cada media hora y 20 piezas cada dos horas, en la práctica se prefiere lo primero.

Como comentario final de este punto diremos que aunque es importante el tamaño y frecuencia de muestreo, es más importante que la carta se utilice de forma sistemática para detectar cambios de manera oportuna en el proceso y que además se interprete de manera correcta.

11. Estandarizar la toma de datos. Definir con precisión y claridad la manera en la que se van a tomar los datos y asegurarse de que los instrumentos de medición y prueba sean adecuados, que los criterios para los inspectores estén bien definidos, que los formatos de recolección de datos sean sencillos y entendibles, y que el lugar en el que se tomarán los datos sea el mejor. Esto es de primera importancia, ya que en ocasiones las señales de fuera de control se pueden deber a variaciones en los criterios de inspección o a problemas con los instrumentos de medición y prueba.
12. Determinar límites de control y su revisión futura. Colectar la información correspondiente a por lo menos 20 a 30 subgrupos y calcular los límites preliminares de la carta correspondiente (estudio inicial). Si los datos reflejan que el proceso es estable (en control estadístico), entonces estos límites se seguirán usando para analizar el proceso en el presente y en el futuro. Una vez establecidos los límites de control, para analizar si el proceso opera de manera estable ya no será necesario esperarse a tener por lo menos 20 puntos en la carta, sino que en el momento de obtener el subgrupo se podrá saber si el punto cae fuera de los límites de control o si ha ocurrido algún otro patrón no aleatorio.

En caso de que en el estudio inicial aparezcan pocos puntos fuera de los límites de control, se procede a investigar la situación especial que causó que los puntos se salieran de los límites. Una vez que se ha identificado la causa y se hayan tomado las contramedidas adecuadas, esos puntos se excluyen y se recalculan los límites de control a usar en el futuro, que necesariamente serán más estrechos.

En caso que no se encuentre la causa que provocó que los puntos se salieran de los límites, situación más probable en un estudio inicial al estar analizando hechos pasados , es preferible retener los puntos y trabajar a futuro con los límites calculados desde el inicio, aunque también se podría optar por eliminar los puntos y recalcular los límites.

Por otra parte, si en el estudio inicial muchos puntos se salen de los límites de control, excluirlos no es apropiado e investigar las causas en cada uno de ellos también resultará impráctico y será un trabajo poco productivo. En estos casos, se debe revisar si la forma en la que se calcularon los límites es la correcta y, en general, se debe seguir la estrategia de mejora sugerida en el capítulo 15 (calidad y productividad, Humberto Gutiérrez Pulido)para procesos inestables.

En cualquiera de los casos anteriores, una vez que se tienen límites de control definitivos para usarse en el futuro, éstos no se cambiarán hasta que la realidad del proceso sea otra, por ejemplo: que haya reducido su variabilidad significativamente o mejorado el centrado del pro- ceso. En ocasiones, en algunas empresas se acostumbra revisar o recalcular en forma periódica los límites, pero se debe ser cuidadoso de imitar esta práctica, ya que si el periodo entre revisiones es muy corto, puede ocurrir que no se detecten ciertos cambios o tendencias que se estén registrando en las cartas. Por ejemplo, una semana es un periodo muy corto para recalcular los límites de control. En algunos procesos se justifica recalcular los límites cuando se da cierto tipo de mantenimiento mayor, o cuando se le hacen cambios al proceso, etc.; en codo caso debe haber claridad del porqué después de estos cambios se espera que el proceso opere en forma diferente respecto a la variable que se analiza con la carta de control.

La práctica en algunas empresas de sustituir los límites de control por especificaciones o metas de calidad se debe evitar a toda costa. En ocasiones, la línea central de una carta de medias se sustituye por un valor objetivo o

deseado, lo que también se debe evitar, porque aunque en algunas ocasiones puede justificarse, en general cuando se hace esto, la carta de control pierde su propósito y potencial.

13. Asegurarse de la cooperación. Es necesario que se involucre a quienes están relacionados con la problemática que pretende atender la carta de control. Es indispensable explicar los objetivos de la carta y la situación que prevalece actualmente (etapas 1 y 2); además, es muy importante capacitar sobre lo que va a detectar la carta y cómo va ayudar a realizar mejor el trabajo. En otras palabras, el desarrollo de esta fase es una buena oportunidad para practicar el trabajo en equipo y para fortalecer la corresponsabilidad por la calidad y la empresa.
14. Entrenar a usuarios. Con base en las etapas 6, 7 y 8, entrenar a quienes van a usar la carta de control: cada cuánto y cómo van a tomar los datos en el registro de puntos en la carta de control, en la documentación de las cartas y en todos aquellos pasos que se seguirán para la operación de la carta.
15. Analizar los resultados. Asegurarse de que la carta se interprete correctamente, que se utilice para detectar causas especiales de variación, que ayude a fundamentar acciones de mejora, etc. Es importante definir quién interpretará la carta y los pasos a seguir cuando se detecte una causa especial de variación, sea un cambio de nivel, una tendencia, etcétera.
16. Asegurarse de su efectividad. Se debe tener cuidado que el llenado de los puntos en la carta de control no se haga una rutina más, en la que no se toma ningún tipo de acción. Es indispensable revisar periódicamente si la carta cumple con el propósito para el que se implementó, si se usa e interpreta en forma correcta y si la problemática se ha reducido.
17. Mantener el interés y modificar la carta. Tomar acciones para que la carta no se use mecánicamente, sino que sea un instrumento vivo, útil y que recibe atención. Para ello se puede involucrar cada vez más a los usuarios de las cartas en la corresponsabilidad de la calidad, asignar responsabilidades, modificar la carta: su lugar, la frecuencia y el tamaño de muestreo. Se puede cambiar su naturaleza de acuerdo con los resultados obtenidos, por ejemplo, si ya se logró que el proceso sea

estable y capaz, entonces ahora el propósito de la carta debe ser preventivo para que las mejoras logradas sean irreversibles.

18. Eliminar la carta. Cuando una carta ha cumplido su propósito, por ejemplo, el problema se eliminó o en general la carta ya no tiene razón de ser, entonces es el momento de pensar en eliminarla y sustituirla por una alternativa acorde con las nuevas circunstancias. Por ejemplo, si dio resultado, entonces se puede pensar en medidas de aseguramiento, como muestreo periódico, inspección o una carta que resulte más económica y adecuada a las nuevas circunstancias. ***"Humberto Gutiérrez Pulido, Control Total y Productividad, Mc Graw Hill"***

"Cartas CUSUM y EWMA: detección oportuna de cambios pequeños

Una desventaja de las cartas de control tradicionales (tipo Shewhart), es que no son rápidas para detectar "cambios pequeños" en el proceso, donde un cambio de nivel se considera pequeño si es menor a 1.5 veces la desviación estándar de la media o error estándar (<1.5 σ_x). Por ejemplo, la carta de medias que es interpretada sólo con la regla 1 (un punto fuera de los límites) tardaría 43.89 puntos en promedio en detectar un cambio de magnitud 1. Se tardaría 71.5 puntos en promedio en detectar un cambio de 0.8 σ_x Este desempeño de la carta tradicional es lento en comparación con las cartas que se presentan en esta sección, las cuales son capaces de detectar brincos de magnitudes .8 σ_x y 1σ_x al menos cuatro veces más rápido.

• La forma tradicional de medir la velocidad con la que una carta de control detecta un cambio es a través del *ARL,* que es el número de puntos que en promedio es necesario graficar en la carta para que ésta detecte un cambio dado. Bajo control estadístico, el *ARL* = 1/*p,* donde *p* es igual a la probabilidad de que los puntos caigan fuera de los límites de control, que en el caso de la carta de medias y bajo el supuesto de normalidad *p* = 0.0027, Y entonces *ARL* = 370.4. De esta forma, bajo control estadístico se espera que de cada 370.4 puntos graficados en la carta de medias uno caiga fuera de los límites de

control, a pesar de que no haya ocurrido un cambio; es decir, se espera que la carta de medias envíe una falsa alarma cada 370.4 puntos en promedio.

En este caso, p = 0.0027 es la probabilidad de error tipo 1, y representa el riesgo que se asume de que un punto se salga de los límites de control sin que haya ocurrido ningún cambio en el proceso.

Una manera de mejorar el desempeño de la carta tipo Shewhart en la detección de brincos pequeños es mediante la aplicación de las llamadas *reglas adicionales de cambio de nivel*. Sin embargo, este proceder conlleva riesgos, ya que se incrementa la proporción de falsas alarmas, 10 cual genera, entre otras cosas, que la credibilidad de la herramienta resulte afectada. Por ejemplo, utilizar de manera simultánea las cuatro reglas de cambio de nivel lleva a tener una falsa alarma cada 91.75 puntos graficados en promedio, que es la cuarta parte de 370.4.

Por 10 tanto, si en la empresa ya se aplican satisfactoriamente las cartas tipo Shewhart pero además se desea contar con herramientas que detecten de manera más oportuna los brincos o cambios pequeños en el proceso, pero que al mismo tiempo no incrementen de forma considerable las señales falsas, las alternativas más apropiadas son las cartas CUSUM y EWMA.

Es importante señalar que en la práctica es más importante detectar los cambios grandes que los pequeños, y para la detección de los primeros la carta tradicional es mejor que la CUSUM y la EWMA. Para brincos mayores a 2.5 σ_x es mejor la carta tipo Shewhart. Por ello, en los procesos que interesa realizar un monitoreo cercano para detectar cualquier cambio de nivel se recomienda aplicar una de las parejas de cartas de control: *Shewhart-CUSUM* o *Shewhart-EWMA.* Con la primera se detectan los cambios grandes y con la segunda se detectan los cambios pequeños.

La diferencia fundamental entre estas cartas con respecto a la carta tradicional es la manera en que ponderan los datos. En la figura 4.22 se muestra cómo en los estadísticos graficados en las cartas CUSUM, EWMA y Shewhart se toma en cuenta la información recabada hasta un tiempo de inspección *t.* Se observa que la carta tradicional no tiene memoria y sólo se considera la información obtenida en el tiempo *t,* mientras que las cartas CUSUM y EWMA toman en cuenta toda la información, dándole algún peso a las muestras observadas en los tiempos anteriores al *t.* Esto se verá con detalle a continuación.

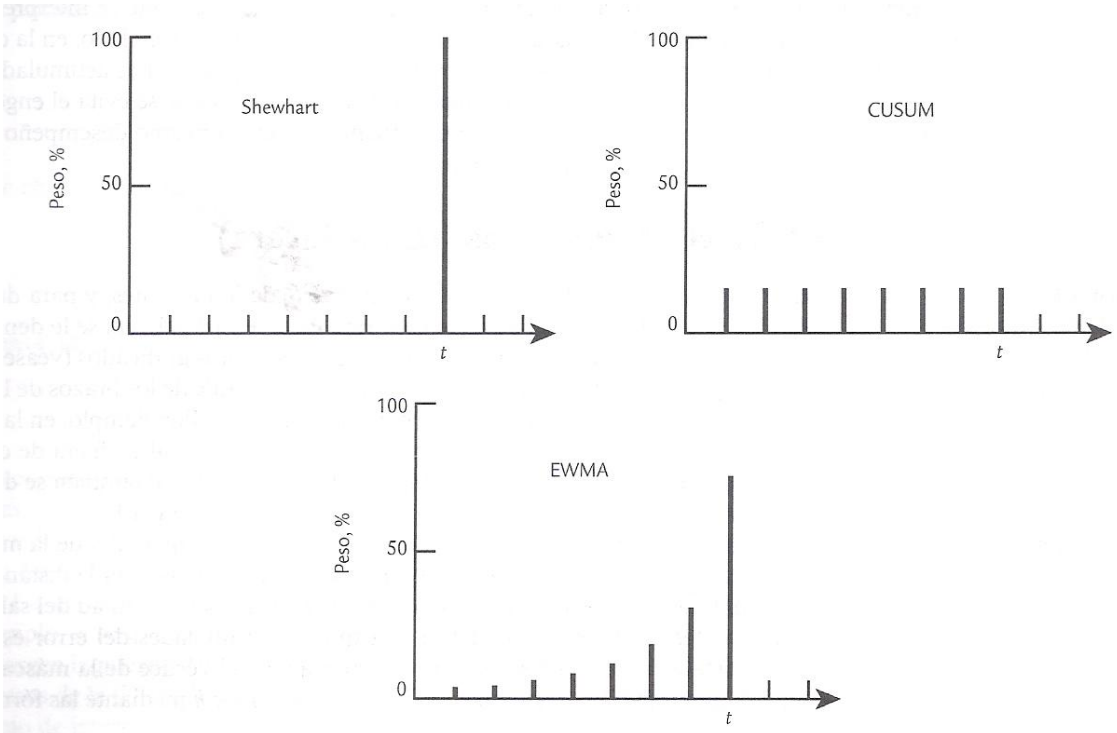


Figura 4.22 Ponderación al tiempo *t* de la información en las cartas Shewhart, CUSUM y EWMA

Carta CUSUM

Esta carta fue propuesta por Page (1954), y el nombre de CUSUM se debe a que es una carta en la cual se grafica la suma acumulada de las desviaciones con respecto a la media global (si el proceso está centrado, se podrían considerar las desviaciones con respecto al valor nominal de la característica de interés). Sean $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, ..., X_m$ las medias observadas en *m* subgrupos y sea $\hat{\mu}$ la media global estimada. Entonces, en los primeros *m* puntos de inspección sobre la carta CUSUM se grafican las sumas acumuladas:

$$S_1 = (\bar{X}_1 - \hat{\mu})$$
$$S_2 = (\bar{X}_1 - \hat{\mu}) + (\bar{X}_2 - \hat{\mu})$$
$$S_3 = (\bar{X}_1 - \hat{\mu}) + (\bar{X}_2 - \hat{\mu}) + (\bar{X}_3 - \hat{\mu})$$
$$\vdots \qquad\qquad \vdots$$
$$S_m = (\bar{X}_1 - \hat{\mu}) + (\bar{X}_2 - \hat{\mu}) + (\bar{X}_3 - \hat{\mu}) + \cdots + (\bar{X}_m - \hat{\mu}) = \sum_{i=1} (\bar{X}_i - \hat{\mu})$$

Mientras el proceso se mantenga en control estadístico centrado sobre $\hat{\mu}$, los

valores de estas sumas acumuladas oscilarán alrededor de cero. Nótese que la suma S_m pondera por igual a todas las medias observadas hasta ese momento, incluyendo la del subgrupo *m,* de ahí se deriva la figura 4.22. Esto hace que si el proceso se va modificando poco a poco o cambia a una nueva media, las sumas acumuladas sean bastante sensibles para detectar el cambio rápidamente, en particular si éste tiene una magnitud de alrededor de $1\sigma_{\bar{x}}$.En general, la CUSUM detecta con más rapidez que la carta $\bar{X}$ tradicional los cambios de nivel de magnitudes entre *O.2*<$\sigma_{\bar{x}}$ y *2*<$\sigma_{\bar{x}}$.

Existen dos maneras de construir esta carta: la *CUSUM de dos lados,* que se interpreta con un dispositivo especial llamado "máscara" y la *CUSUM tabular* o de un sólo lado, en la cual se consideran de manera separada las sumas acumuladas por arriba y las sumas acumuladas por abajo. La CUSUM tabular es la más recomendada en la práctica, ya que se evita el engorroso diseño de la máscara; sin embargo, ambos procedimientos tienen el mismo desempeño y menor dificultad si se utiliza un software apropiado.

CUSUM de dos lados (con máscara)

En este tipo de CUSUM se grafican las sumas S_i definidas antes, y para detectar cambios se usa una especie de cono en forma de la letra *V,* al cual se le denomina *máscara* y se coloca de manera horizontal sobre los puntos graficados (véase figura 4.23). Si algún punto anterior al punto de colocación se sale de los brazos de la máscara, el proceso se encuentra fuera de control estadístico. Por ejemplo, en la figura 4.23, al colocar la máscara en el punto 10 se detecta una señal de fuera de control porque el punto 8 se sale del brazo superior. Note que la señal también se detectaría al colocar la máscara en cualquier punto a partir del punto 10.

Como se observa en la figura 4.23, los parámetros fundamentales de la máscara son el intervalo de decisión *h* y el valor de referencia *k.* Donde *h* es la distancia entre el punto de colocación y los brazos de la máscara, y *k* es la mitad del salto que interesa detectar. Ambos parámetros se expresan en unidades del error estándar

$\sigma_{\bar{x}}$. La distancia guía *d* entre el punto de colocación, el vértice de la máscara y el ángulo *e* (4.23) se relaciona con los parámetros *k* y *h* mediante las fórmulas:

$$d = \frac{h}{k} \text{ y } \theta = \arctan\left(\frac{k}{2}\right) = \arctan\left(\frac{h}{2d}\right)$$

donde el 2 sale del hecho de que la escala horizontal está en unidades de $2\sigma_{\bar{x}}$ y es necesario reescalar a unidades de $\sigma_{\bar{x}}$ para realizar los cálculos. Los valores que toman los parámetros de la máscara determinan el desempeño de la herramienta en cuanto a su potencia para detectar cambios de nivel en el proceso.

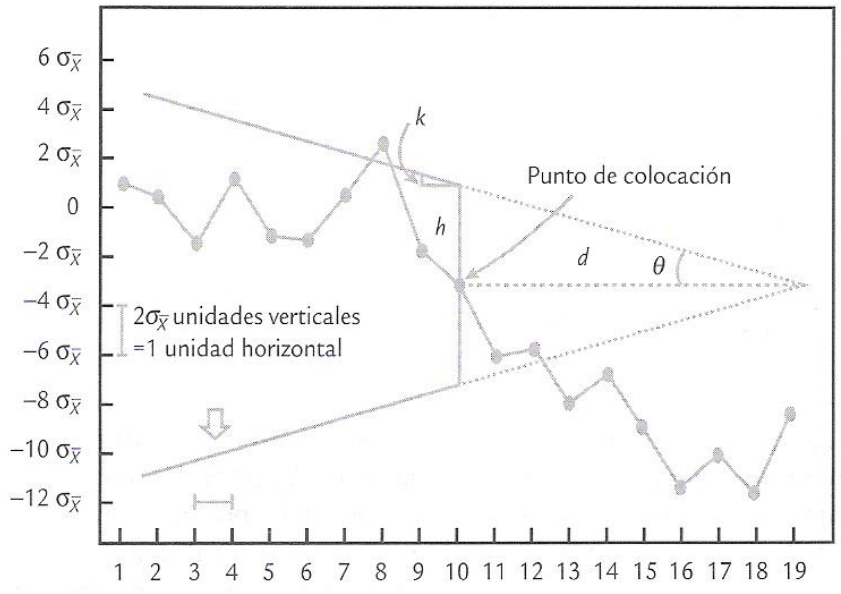


Figura 4.23 Máscara V y sus parámetros básicos.

Los parámetros *d* y *k* se relacionan con los riesgos tipo I *(α)* y tipo II (β) mediante la fórmula:

$$d = \frac{1}{2k^2} \text{In}\left(\frac{1-\beta}{\alpha}\right)$$

Si se considera al error *β* pequeño (< 1%), entonces *d* se simplifica a

$$d = \frac{-1}{2k^2} \text{In}\,(\alpha)$$

De esta última relación se puede poner el riesgo *a* en función de *d* y *k* como,

$$\alpha = \exp(-2dk^2)$$

Al conocer dos de los parámetros del conjunto *{α, e, d, h, k}* es posible deducir los tres restantes.

Los valores típicos que se recomienda son *h* = 5 Y *k* = 0.5, ya que son apropiados cuando interesa detectar un cambio de magnitud de un error estándar $(1\sigma_{\bar{x}})$, con un *ARLo* en control de 465. La selección de los parámetros de la carta se puede hacer con la ayuda de la tabla 4.16 .

Por ejemplo, si se quiere detectar un cambio de nivel de magnitud $1\sigma_{\bar{x}}$, se elige el valor δ = 1 en el margen izquierdo y el *ARLo* deseado en la parte superior. Al considerar el *ARLo* = 300, los parámetros de la CUSUM requerida son *d*= 9.0, *k*= 0.5 y *h* = *dk*= 4.5, con la cual se detectaría el cambio de interés en 9.4 puntos en promedio.

La tabla 4.16 está limitada a unos cuantos valores del *ARLo,* así como a unos cuantos cambios de nivel de interés *(δ);* sin embargo, por medio de un software estadístico es posible diseñar una carta CUSUM más apegada a los

Tabla 4.16 Diseño de la carta CUSUM

		ARL_0 (EN CONTROL)					
δ		50	100	200	300	400	500
0.25	*k*	0.125			0.195		0.248
	d	47.6			46.2		37.4
	L(0.25)	28.3			74.0		94.0
0.50	*k*	0.25	0.28	0.29	0.28	0.28	0.27
	d	17.5	18.2	21.4	24.7	27.3	29.6
	L(0.50)	15.8	19.0	24.0	26.7	29.0	30.0
0.75	*k*	0.375	0.375	0.375	0.375	0.375	0.375
	d	9.2	11.3	13.8	15.0	16.2	16.8
	L(0.75)	8.9	11.0	13.4	14.5	15.7	16.5
1.0	*k*	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	d	5.7	6.9	8.2	9.0	9.6	10.0
	L(1.0)	6.1	7.4	8.7	9.4	10.0	10.5
1.5	*k*	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
	d	2.7	3.3	3.9	4.3	4.5	4.7
	L(1.5)	3.4	4.0	4.6	5.0	5.2	5.4
2.0	*k*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	d	1.5	1.9	2.2	2.4	2.5	2.7
	L(2.0)	2.26	2.63	2.96	3.15	3.3	3.4

δ = Brinco a detectar en unidades del error estándar
$L(\delta) = ARL_0$ cuando el proceso se ha movido δ errores estandar

deseos del usuario. Por ejemplo, para tener el *ARLo* = 370.4 recomendado en la carta tradicional y suponiendo que interesa detectar un cambio de magnitud $1\sigma_{\bar{x}}$, los parámetros de la CUSUM deben ser *h* = 4.78 y *k* = 0.5.

Ejemplo 4.17

Una máquina automática llena paquetes de harina con un peso nominal de 80 onzas. Interesa monitorear esta máquina para detectar cambios pequeños de magnitud 0.15 onzas. Por medio de información histórica se sabe que la desviación estándar del peso de los paquetes es 0.2 onzas. Cada media hora se sacan en forma aleatoria cuatro paquetes y se pesan. Las medias y rangos de las últimas 20 muestras son:

Muestra 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

Media 79.9 79.9 79.9 80.1 79.9 80.0 79.9 80.0 80.3 79.9 79.9 80.0 80.0 80.0 80.2 80.2 80.3 80.1 80.1 80.2

Rango 0.35 0.43 0.63 0.50 0.50 0.18 0.45 0.36 0.65 0.23 0.50 0.23 0.56 0.15 0.33 0.62 0.34 0.33 0.45 0.47

En la figura 4.24 se presenta la carta *X* para estos datos, donde se observa un proceso en control estadístico en el que sólo se aplica la regla 1. Si además se aplicara la regla "4 de 5 puntos más allá de la zona C (1 desviación estándar de la media)" los últimos cuatro puntos mandarían una señal de fuera de control. La carta CUSUM con máscara V para el peso de los paquetes se muestra en la figura 4.25. En ésta, se aprecia la señal de cambio de nivel con la máscara colocada en el punto 17 en adelante.

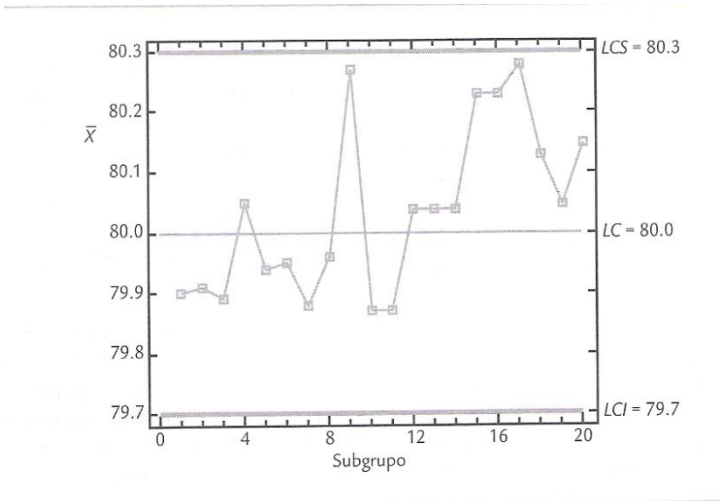


Figura 4.24 Carta de medias para el peso de los paquetes

Además de que algunos puntos caen afuera de los brazos de la máscara, se observa una tendencia ascendente muy marcada a partir del punto 15, lo cual ayuda a identificar la causa especial del cambio.

Los detalles de cómo se obtiene la carta CUSUM de la figura 4.25 se comentan enseguida. Dado que el error estándar histórico es $\sigma_{\bar{x}} = 0.2/\sqrt{4} = 0.1$, e interesa detectar un cambio de 0.15 onzas, entonces este cambio equivale a δ = 1.5 unidades del error estándar. Así, de la tabla 4.16, con δ = 1.5 y *ARLo* = 400, se lee que *d* = 4.5, *k* = 0.75 y *h* = (0.75)(4.5) = 3.37. Nótese que, en efecto, en la figura 4.25 la distancia guía es cercana a *d* = 4.5, Y la distancia vertical del punto de colocación a los brazos es aproximadamente *h* = 3.37. Sin embargo, no se cumple el escalamiento recomendado de dos errores estándar (Statgraphics no trabaja con dicho escalamiento) por unidad en el eje horizontal, lo cual implica que el ángulo no es de arctan *(0.7512)* = 20.55°, sino mayor, pero la gráfica funciona de manera adecuada. En este caso particular, para que el ángulo fuera 20.55° sería necesario estirar la máscara en el sentido horizontal hasta que dos unidades verticales tengan el tamaño de una unidad horizontal.

Para obtener la CUSUM de la figura 4.25 en el software *Statgraphics,* se declara el brinco a detectar expresado en unidades de la desviación estándar del proceso que es *o* = 0.2, es decir, en este ejemplo se declara *k* = 0.15/0.2 = 0.75 en el campo correspondiente; además, es necesario declarar el riesgo *α* expresado en porcentaje, el cual se obtiene haciendo los cálculos exp $(-2dk^2)$ = exp(-2 x 4.5 x $.75^2$) = 0.00632 que en porcentaje es igual a 0.632%. En estos cálculos se supone un riesgo *β* pequeño (menor que 1%).

CUSUM tabular (de un sólo lado)

La idea de la *CUSUM tabular* es evitar el uso de la máscara para detectar cambios, como se explicó antes. La CUSUM tubular consiste en construir una tabla en la cual se acumulan de manera separada las desviaciones hacia arriba y hacia abajo de la media del proceso μ_0 Para ello, en el punto *i* dichas sumas se definen como:

$$S_H(i) = \text{máx}\left[0, \overline{X}_i - (\mu_0 + K) + S_H(i-1)\right]$$
$$S_L(i) = \text{máx}\left[0, (\mu_0 - K) - \overline{X}_i + S_L(i-1)\right]$$

con $S_H(O) = O$ y $S_L(O) = O$. El parámetro K es el valor de referencia y corresponde a la mitad del cambio de nivel que interesa detectar expresado en las unidades originales, es decir, $K = k\sigma_{\bar{x}}$

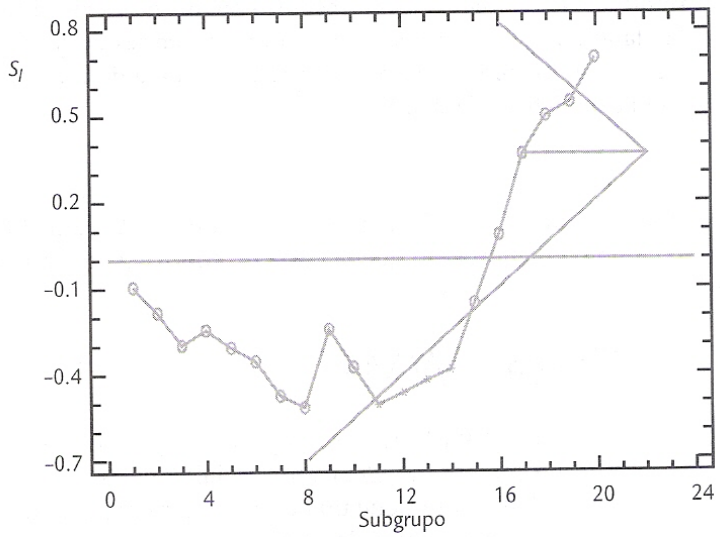


Figura 4.25 CUSUM con máscara para el peso de los paquetes

El criterio para decidir que el proceso está fuera de control es que alguna de las sumas rebase el intervalo de decisión dado por *H,* donde $H = h\sigma_{\bar{x}}$.Observe que las sumas anteriores sólo acumulan cuando la media observada se aleja de la media del proceso más allá de *K.* Cuando no acumulan al menos esta cantidad asumen el valor cero.

Los números N_H y N_L en la tabla 4.17, que cuentan los puntos consecutivos donde las sumas se mantienen distintas de cero, son útiles para estimar la nueva media del proceso una vez que se sale de control. Tal estimación se hace mediante una de las siguientes fórmulas:

$$\hat{\mu} = \mu_0 + K + \frac{S_H(i)}{N_H}, \quad \text{si } S_H(i) > H$$
$$\hat{\mu} = \mu_0 - K - \frac{S_L(i)}{N_L}, \quad \text{si } S_L(i) > H$$

Ejemplo 4.18

Para aplicar la CUSUM tabular al ejemplo de los paquetes de harina (ejemplo 4.17), tenemos que la media del proceso es igual al valor nominal μ_0 = 80 onzas, el error estándar histórico es igual a $\sigma_{\bar{x}}$ = 0.1, el cambio de nivel de interés es δ = 1.5, y con la tabla 4.16 se encontró que el valor de referencia es *k* = 0.75 y el intervalo de decisión es *h* = 3.37. Al expresar estos parámetros en las unidades originales se tiene que *k* = (0.75)(0.1) = 0.075 y que *h* = (3.37)(0.1) = 0.34. De manera que la suma por arriba *[S_H(i)]* acumula sólo cuando la media observada al tiempo *i* es mayor que *(μ_0 + K)* = 80.075 y la suma por abajo *[S_L (i)]* acumula sólo cuando la media observada, el tiempo *i,* es menor que *(μ_0 - K)* = 79.925.

En la tabla 4.17 se muestran las sumas acumuladas para el ejemplo. En los primeros ocho puntos la suma *S_H(i)* se mantiene en cero, puesto que todas las medias son inferiores a 80.075. En cambio, en los primeros tres puntos la suma *S_L(i)* sí acumula, dado que las tres primeras medias son inferiores a 79.925, y hasta el tercer punto se ha acumulado una desviación hacia debajo de 0.075.

Pero en el cuarto punto se observa 80.05, que al restarlo de 79.925 (= 80 - 0.075) da una diferencia negativa de -0.125, que nulifica lo que se acumuló hasta la suma anterior, por lo que la suma acumulada vuelve a ser igual a cero. Las columnas N_H y N_L van contando el número de puntos consecutivos en los que las sumas correspondientes se mantienen diferentes de cero. Por último, en la tabla 4.17 note que a partir del punto 15 la suma por arriba comienza a acumular hasta salirse del intervalo de decisión *H* = 0.34 justo en el punto 17, lo cual indica que el proceso está fuera de control. Aunque la representación tabular de esta CUSUM es suficiente para tomar una decisión con respecto al control del proceso, en la figura 4.26 se muestra la representación gráfica de las sumas parciales. Los puntos en la gráfica son las medias observadas y las sumas acumuladas por arriba y por abajo se representan con una barra en forma de *T* Cuando estas barras superan los "límites de control" dados por *H,* se detecta una señal de fuera de control.

Así, tanto la carta CUSUM con máscara, como la CUSUM tabular, fueron capaces de detectar un cambio en el proceso que la carta de control $\bar{X}$ no reconoció.

Tabla 4.17 CUSUM tabular para el ejemplo 4.18

#	$\bar{X}_i$	$S_H(i)$	N_H	$S_L(i)$	N_L
1	79.90	0.0	0	0.025	1
2	79.91	0.0	0	0.04	2
3	79.89	0.0	0	0.075	3
4	80.05	0.0	0	0.0	0
5	79.94	0.0	0	0.0	0
6	79.95	0.0	0	0.0	0
7	79.88	0.0	0	0.045	1
8	79.96	0.0	0	0.01	2
9	80.27	0.195	1	0.0	0
10	79.87	0.0	0	0.055	1
11	79.87	0.0	0	0.11	2
12	80.04	0.0	0	0.0	0
13	80.04	0.0	0	0.0	0
14	80.04	0.0	0	0.0	0
15	80.23	0.155	1	0.0	0
16	80.23	0.31	2	0.0	0
17	80.28	*0.515	3	0.0	0
18	80.13	*0.57	4	0.0	0
19	80.05	*0.545	5	0.0	0
20	80.15	*0.62	6	0.0	0

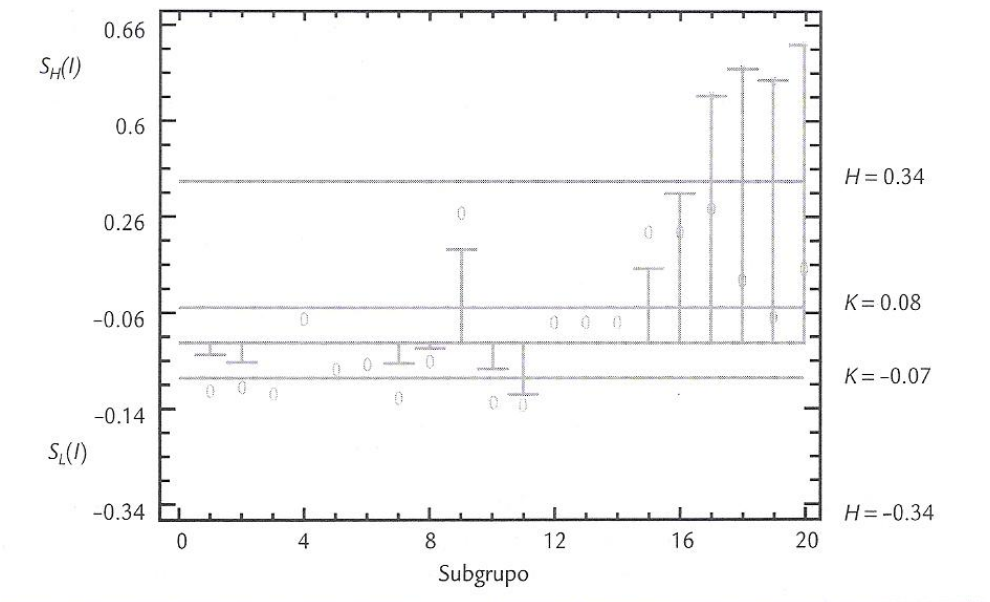


Figura 4.26 Representación de la CUSUM tabular

Carta EWMA

La *carta EWMA* (por sus siglas en inglés: *Exponentially Weighted Moving-Avarage,* "promedios móviles exponencialmente ponderados" fue propuesta por

Roberts (1959). Esta carta tiene un desempeño muy parecido a la CUSUM en la detección de pequeños cambios de nivel del proceso, con la ventaja de que es más fácil construir. El estadístico EWMA, que se grafica al tiempo *t* en la carta, por la fórmula recursiva:

$$Z_t = \lambda X_t + (1-\lambda)Z_{t-1}$$

donde $Z_o = \bar{x}$ que coincide con el valor nominal si el proceso está centrado, y $0< \lambda \leq 1$. Por ejemplo, hasta Z_3, las tres primeras sumas estarían dadas por:

$$Z_1 = \lambda \bar{x}_1 + (1-\lambda)Z_0$$
$$Z_2 = \lambda \bar{x}_2 + (1-\lambda)Z_1 = \lambda \bar{x}_2 + (1-\lambda)[\lambda \bar{x}_1 + (1-\lambda)Z_0] = \lambda \bar{x}_2 + \lambda(1-\lambda)\bar{x}_1 + (1-\lambda)^2 Z_0$$
$$Z_3 = \lambda \bar{x}_3 + (1-\lambda)Z_2 = \lambda \bar{x}_2 + (1-\lambda)[\lambda \bar{x}_2 + (1-\lambda)Z_1] = \lambda \bar{x}_3 + \lambda(1-\lambda)\bar{x}_2 + \lambda(1-\lambda)^2 \bar{x}_1 + (1-\lambda)^3 Z_0$$

A partir de esto, es claro que el parámetro A determina la profundidad de la memoria o la EWMA: mientras más cerca esté de cero es mayor el peso de los datos históricos, es decir recuerda más el pasado. Mientras que si está más cerca de uno, tiene más influencia la última media observada y el pasado tiene menos paso. De tal forma que cuando λ = 1 sería equivalente a la carta de medias tradicional, que no da ningún peso a la información anterior a un p dado. La experiencia ha mostrado que lo adecuado es que $0.1 \leq \lambda \leq 0.3$, y el valor 0.2 es el

típico.

La varianza del estadístico Z_t, está dada por:

$$\mathrm{Var}(Z_t) = \frac{\sigma^2}{n}\left(\frac{\lambda}{2-\lambda}\right)\left[1-(1-\lambda)^{2t}\right],$$

donde n es el tamaño del subgrupo. De aquí que los límites en el punto o subgrupo t están dadas por:

$$LCS = Z_0 + 3\hat{\sigma}\sqrt{\left(\frac{\lambda}{n(2-\lambda}\right)\left[1-(1-\lambda)^{2t}\right]}$$

$$LCI = Z_0 - 3\hat{\sigma}\sqrt{\left(\frac{\lambda}{n(2-\lambda}\right)\left[1-(1-\lambda)^{2t}\right]}$$

Como en las expresiones anteriores, el término $\left[1-(1-\lambda)^2\right]$ tiende a 1 cuando *t* se incrementa, de manera que la varianza de Z_t se va incrementando y con ello los límites de control de la carta EWMA se van abriendo en los primeros puntos hasta estabilizarse en:

$$LCS = Z_0 + 3\hat{\sigma}\sqrt{\frac{\lambda}{n(2-\lambda)}}$$

$$LCI = Z_0 - 3\hat{\sigma}\sqrt{\frac{\lambda}{n(2-\lambda)}}$$

"Humberto Gutiérrez Pulido/ Román de la Vara Salazar, Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma, Mc Graw Hill"

BIBLIOGRAFÍA

1. Gutiérrez Pulido Humberto. Calidad total y productividad. Ed McGraw Hill. Tercera Edición. México, 2010.

2. R.E. Walpole, R.H. Myers. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Editorial Interamericana

3. Evans, James R., y Lindsay William. *Administración y control de la calidad.* Editorial CENGAGE Learning.

4. Humberto Cantú Delgado. *Desarrollo de una Cultura de Calidad*, Ed Mc Graw Hill.

5. Humberto Gutiérrez Pulido/ Román de la Vara Salazar. *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma*. Ed Mc Graw Hill.

6. Dale H. Besterfield. *Control de Calidad*. Ed.Prentice Hall.

7. Douglas C. Montgomery/George C. Runger. *Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería*. Ed. Mc Graw Hill