

CAPACIDAD DE PROCESOS

DEFINICION

Las medidas para evaluar la capacidad del proceso, considerada como la habilidad de un proceso para producir productos dentro de las especificaciones del cliente.

CONTROL VS CAPACIDAD

Un proceso está bajo control si está operando consistentemente dentro de su variabilidad natural. Un proceso es capaz si produce "todos" los productos dentro de las especificaciones. Cuando el proceso está bajo control, no significa que el proceso también sea capaz.

Podría haber una situación en la que un proceso produzca un producto que sea uniformemente igual pero fuera de la especificación. El proceso estará entonces bajo control, pero no será capaz en absoluto. Por lo tanto, cuando sabemos que un proceso está bajo control, es necesaria una verificación adicional para verificar si el proceso también es capaz.

Si el proceso no es capaz, entonces se necesita más trabajo para lograr la capacidad. Tal trabajo se conoce como un "estudio de capacidad".

Existen medidas para evaluar cuantitativamente el grado en que un proceso es capaz; es decir, la medida en que la salida de un proceso cumple con la especificación. Tales medidas, que se conocen como "índices de capacidad de proceso".

Por ahora, debe enfatizarse que cuando un proceso se pone en control usando un gráfico de control, solo se realiza una parte del trabajo. Se debe realizar un estudio de capacidad para verificar si el proceso también cumple con las especificaciones.

Sin embargo, evaluar un proceso para determinar la capacidad cuando no tiene el control no tendría sentido. Porque un proceso que no está bajo control no tiene un comportamiento predecible y, por lo tanto, no tiene una capacidad predecible. Se debe realizar un estudio de capacidad solo después de que el proceso esté bajo control.

Lo más probable es que cuando el proceso haya sido controlado, la variabilidad sea lo suficientemente pequeña como para cumplir con las especificaciones del cliente por completo. La capacidad del proceso se evaluará utilizando los índices de capacidad C_p y / o C_{pk} .

Si la capacidad no es adecuada de acuerdo con los requisitos del cliente o los estándares internos de la organización, se deben realizar experimentos para explorar las variables del proceso y sus niveles para obtener la característica del producto en cuestión en el nivel deseado y los límites deseados de variabilidad.

HIPOTESIS DE TRABAJO

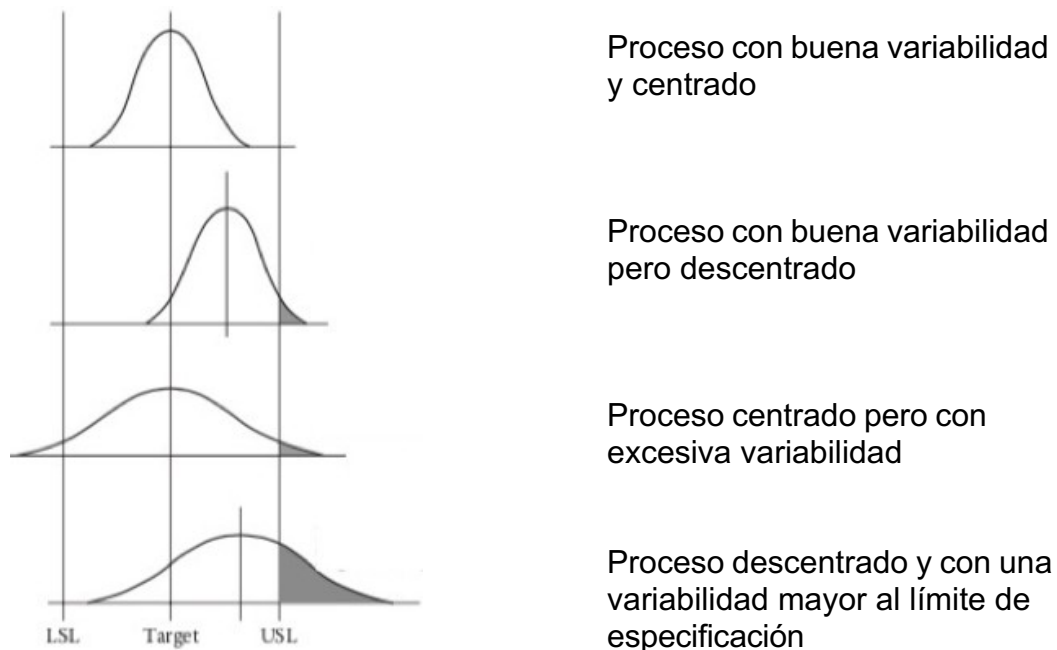
Antes de aplicar cualquier técnica estadística, es necesario establecer algunas hipótesis bajo las cuales se va a desarrollar el análisis.

- En primer lugar, vamos a suponer que la característica de calidad (variable aleatoria) es continua y de distribución normal.
- *En segundo lugar, consideraremos que el proceso está bajo control estadístico, es decir que la variabilidad se debe solamente a un sistema constante de causas aleatorias (No intervienen causas asignables).*

CAPACIDAD DE UN PROCESO CON SALIDA MEDIBLE

Cuando un proceso produce un resultado medible que puede suponerse que tiene una distribución normal, la condición del proceso puede describirse completamente mediante dos medidas: su media μ y su desviación estándar σ . Los μ y σ pueden estimarse a partir de los datos obtenidos de una muestra aleatoria (≥ 50) o de los datos recopilados para los gráficos de control. Si proviene de la fuente anterior, el promedio \bar{X} (techo) y la desviación estándar Sigma estimarán μ y σ , respectivamente. Entonces \bar{X} (doble techo) estimará μ , y $R(\text{techo})/d2$ estimará σ , donde $R(\text{techo})$ es la línea central del gráfico R y $d2$ es el factor de corrección sacado de tablas, que hace que el $R(\text{techo})$ sea imparcial estimador para σ .

Cuando se compara un proceso con un conjunto de especificaciones dado, hay varias situaciones posibles que podrían surgir, como se muestra en la Figura



A partir de dicha figura, se puede ver una evaluación cualitativa de si el proceso cumple o no con las especificaciones.

Si el proceso no cumple completamente con las especificaciones, podemos ver si es el exceso de variabilidad o la falta de centrado del proceso lo que está causando valores fuera de la especificación. A menudo, sin embargo, se desea una evaluación cuantitativa del grado en que un proceso cumple con la especificación. Por ejemplo, podemos querer comparar las capacidades de dos máquinas, o dos proveedores, o podemos establecer metas y monitorear el progreso con respecto a la capacidad mientras realizamos mejoras en los procesos.

Los índices de capacidad, que proporcionan medidas numéricas que cuantifican la capacidad de un proceso, se vuelven útiles.

Es necesario distinguir entre “Límites del proceso” y “Límites de especificación”.

Los límites del proceso (naturales) se aplican a muestras provenientes del proceso, y sirven para detectar cambios significativos en su comportamiento.

Los Límites de Especificación de un producto son fijados voluntariamente por el cliente, por el fabricante o por alguna norma.

INDICES DE CAPACIDAD C_p y C_{pk}

Índice de Capacidad de Proceso: Habilidad que tiene el proceso para cumplir consistentemente con los requerimientos exigidos por los clientes internos o externos. Cumplir con las especificaciones.

El índice C_p se define como:

$$C_p = \frac{\text{Variabilidad de la especificación}}{\text{Variabilidad del proceso}} = \frac{LSE - LIE}{6\sigma}$$

donde LSE y LIS son los límites de especificación superior e inferior, respectivamente, y σ es la desviación estándar del proceso.

El índice C_p simplemente compara la variabilidad natural en el proceso, que viene dada por 6σ en función de la distribución normal del proceso, con la variabilidad permitida en la especificación, que está dada por $(LSE - LIE)$.

Si el valor de C_p es 1.0, el proceso está dentro de las especificaciones. Para ser exactos, el 99.73% de la salida del proceso está dentro de las especificaciones. Si el valor es menor que 1.0, la variabilidad del proceso es mayor que la variabilidad permitida por las especificaciones y, por lo tanto, está produciendo rechazos; Si es mayor que 1.0, la variabilidad del proceso es menor que la variabilidad permitida en las especificaciones, por lo que casi todos los productos estarán dentro de las especificaciones.

En general, cuanto mayor es el valor de Cp, mejor es el proceso.

Los clientes generalmente estipulan que el valor de Cp debe ser al menos 1.33 para asegurarse de que la variabilidad del proceso esté dentro de las especificaciones. Esto permite el hecho de que la mayoría de los procesos no permanecen en una ubicación central todo el tiempo y tienden a desplazarse alrededor del objetivo. El requisito de que Cp = 1.33 tiene por objeto garantizar que las unidades del producto permanecerán dentro de las especificaciones incluso cuando se produzca algún cambio (pequeño) en la media del proceso. El requisito de 1.33 también proporcionará un posible error causado por la variabilidad del muestreo en el valor de Cp calculado a partir de los datos de la muestra.

Al estimar Cp, debemos darnos cuenta de que, si el tamaño de la muestra es pequeño, la estimación no es confiable. Por lo tanto, es aconsejable estimar el índice de capacidad a partir de un tamaño de muestra de al menos 100, que es equivalente a 25 subgrupos de cuatro unidades cada uno si se usa un gráfico de control para monitorear el proceso. Si una muestra tan grande no está disponible, tenemos que recurrir a un intervalo de confianza para el índice Cp.

El índice Cp no puede reconocer la falta de centrado en el proceso; solo evalúa la variabilidad del proceso en comparación con la variabilidad de la especificación. Este inconveniente del índice Cp se rectifica en el siguiente índice de capacidad, Cpk, que se define como:

$$C_{pk} = \frac{\text{Distancia entre el centro del proceso y la especificación mas cercana}}{3\sigma}$$
$$= \frac{\text{Mínimo } [(LES - \mu), (\mu - LIE)]}{3\sigma}$$

Cuando el proceso no está centrado, es probable que un valor de proceso supere la especificación en el lado donde el centro de proceso está más cerca de una línea de especificación. Por lo tanto, al comparar la distancia de la especificación más cercana desde el centro del proceso con 3σ , el índice evalúa si los valores del proceso exceden la especificación en el lado donde es más probable que exceda.

Si el valor de Cpk es menor que 1.0, el proceso está produciendo valores fuera de la especificación. Cuanto mayor sea el valor de Cpk, mejor será el proceso para cumplir con las especificaciones.

Nuevamente, cuando usamos estimaciones para μ y σ en la fórmula anterior, solo obtenemos una estimación para Cpk. Tenemos que usar muestras grandes ($n \geq 100$) para minimizar la variabilidad del muestreo. Además, los clientes generalmente requieren un valor de al menos 1.33 para que Cpk, que cubra la posible deriva en el centro de procesos y prever posibles errores de muestreo.

El Cpk siempre es menor o igual que Cp. $Cpk = Cp$ cuando el proceso está centrado con respecto a las especificaciones. El valor de Cpk dará resultados erróneos, incluidos valores negativos si el centro del proceso está fuera de las líneas de especificación. Si el valor de Cpk es un valor negativo, significa que al centro de proceso le faltan totalmente las especificaciones.

Estos índices también se utilizan para:

- Seguir la capacidad de los procesos a lo largo del tiempo.
- Priorizar los procesos para proyectos de mejora.
- Certificar los procesos del proveedor.

Estos son los índices más populares entre los usuarios industriales. En este punto es importante tomar nota de algunas de las deficiencias de estos índices. Uno de ellos se relaciona con el supuesto de normalidad para el proceso. El 6σ , por ejemplo, en el denominador de la fórmula para Cp, para cuantificar la variabilidad en el proceso, es una característica de la distribución normal. Cuando el supuesto de distribución normal no se cumple, la evaluación de la capacidad de un proceso por estos índices puede conducir a errores graves. Se recomiendan otros métodos para esta situación.

Otro problema con estos índices es que solo se pueden usar donde hay especificaciones de dos lados. Aunque las especificaciones a dos caras son el tipo más común, existen procesos sujetos a especificaciones a una cara con requisitos tales como "cuanto más grande, mejor" o "cuanto más pequeño, mejor". El Cp y el Cpk no son adecuados para usar en estas situaciones, para estos casos existen los llamados índices de especificación única, que se verá mas adelante.

Otro inconveniente de estos índices es la suposición implícita en su uso de que la pérdida derivada de un proceso es cero siempre que el proceso permanezca dentro de la especificación y las pérdidas salten a un nivel muy alto e inaceptable tan pronto como el proceso comience a caer fuera de la especificación.

La pérdida de un proceso es cero solo cuando el proceso se mantiene en el objetivo, y a medida que el centro del proceso se desvía del objetivo, las pérdidas aumentan parabólicamente, como lo sugiere la función de pérdida de Taguchi.

Taguchi ha propuesto otro índice, Cpm, como una mejora en los dos índices anteriores como respuesta a esta crítica.

CAPACIDAD DE UN PROCESO CON SALIDA DE ATRIBUTO

Cuando la salida de un proceso es un atributo, los requisitos de capacidad se especifican en términos del número máximo de defectos que se tolerarán en la salida del proceso. Las especificaciones tales como "no más del 1% defectuoso", "no más de 10 errores por 1000 oportunidades" o "no más de 50 partes por millón (ppm) de defensa" se usan comúnmente. Si se utilizan gráficos de control de atributos para controlar un proceso, entonces la capacidad del proceso puede leerse directamente desde los gráficos. La línea central del gráfico np proporciona la proporción promedio de defectos en el proceso. Esta cantidad se pueden comparar con las capacidades requeridas por el cliente o los objetivos de capacidad establecidos por el productor.

Vemos que la capacidad de un proceso con salida de atributo se mide de manera diferente a la capacidad de un proceso con salida medible. Tal falta de medidas uniformes de capacidad aplicables a los resultados medibles y de atributos dio lugar a la creación de medidas de capacidad en "número de sigmas" por parte de los estadísticos de Motorola en 1992. Propusieron medir la capacidad de un proceso por la distancia a la que se ubican las especificaciones desde el centro del proceso medido en número de desviaciones estándar (σ) del proceso. Para procesos con resultados medibles, que se puede suponer que son normales, se puede calcular si se conocen o estiman la media y la desviación estándar. Para procesos que producen salida de atributos, la capacidad se expresa como el número de sigmas de un proceso normal que produce la misma proporción de defectos que el proceso en cuestión.

Supongamos que un proceso produce un 2% de defectos. Primero encontramos el proceso normal que produce un 2% de defectos.

Se puede demostrar (usando las tablas normales) que un proceso normal que tiene especificaciones de 2.327σ en cada lado produce un total de 2% de defectos. Entonces, el proceso de atributo que produce 2% de defectos tiene capacidad 2.327σ .

ÍNDICE DE CAPACIDAD DE TAGUCHI

Presentamos otro índice C_{pm} , que se considera que tiene algunas propiedades superiores en comparación con las de C_p y C_{pk} .

$$C_{pm} = \frac{ES - EI}{6\tau} \rightarrow C_{pm} = \frac{ES - EI}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - N)^2}}$$

El índice de Taguchi (C_{pm}), según la expresión, analiza los límites establecidos por la tolerancia y la variación natural del proceso, pero se diferencia de los otros índices de capacidad, porque contiene en su fórmula el valor nominal N , con $N = (LSE + LIE)/2$, lo que se puede traducir, según Taguchi en el sentido que la mejora de un proceso debe estar enfocada a disminuir su variación con respecto al valor nominal, y no solo a tener en cuenta las especificaciones técnicas del producto.

Los rangos a través de los cuales se puede interpretar el índice de Taguchi son:

$C_{pm} < 1$: el proceso no cumple con las especificaciones.

$C_{pm} > 1$: el proceso cumple con las especificaciones.

$C_{pm} > 1,33$: el proceso cumple con las especificaciones, y la μ está cerca de las especificaciones.

El índice C_{pm} se considera de segunda generación dado que es una ampliación del índice C_p y representa el enfoque de Taguchi acerca de la mejora de la calidad. Es decir, no alcanza con estar dentro del intervalo de especificación sino que también se debe saber qué tan buenas son por su proximidad al valor nominal.

C_p y C_{pk} refieren al porcentaje de elementos fuera de especificación, mientras que C_{pm} refiere a la calidad global de los mismos. La elección del índice a emplear es, en definitiva, una decisión estratégica, ya que ella exhibe el concepto de calidad para la empresa. Taguchi se enfoca en la reducción de la variación en relación con un valor objetivo y no en la reducción de la variabilidad sólo para cumplir con las especificaciones, por lo cual el índice C_{pm} resulta apropiado para medir la calidad de un proceso, teniendo en cuenta lo que se entiende en la actualidad por calidad.

COMPARACIÓN ENTRE C_p , C_{pk} y C_{pm}

El valor de C_{pm} se vuelve más y más pequeño a medida que la media del proceso se aleja del objetivo, y maximizar el valor de la C_{pm} equivale a minimizar la distancia de la media del proceso desde el objetivo, y así minimizar la función de pérdida. El valor de la C_{pm} también aumenta cuando la variabilidad del proceso, la variabilidad sobre la media disminuye. Por lo tanto, una disminución en la variabilidad o una disminución en la distancia entre el centro del proceso y el objetivo aumentará el valor de C_{pm} .

Si el proceso está centrado, es decir, el centro del proceso μ es igual al objetivo N , que está en el punto medio de los límites de especificación, entonces $C_p = C_{pk} = C_{pm}$. Si el proceso no está centrado, entonces C_{pm} y C_{pk} serán diferentes de C_p , y ambos serán más pequeños que C_p . El C_{pk} y el C_{pm} evalúan la falta de centrado de un proceso además de la variabilidad, aunque siguen enfoques diferentes.

Lo primero a tener en cuenta es que C_{pm} nunca tendrá un valor negativo, mientras que C_{pk} puede asumir valores negativos si el centro del proceso está fuera de los límites de especificación. En segundo lugar, C_{pk} se calcula a partir de los límites de especificación, y existe una suposición implícita de que el objetivo está en el centro de las especificaciones. Por otro lado, el cálculo de C_{pm} no usa los límites de especificación, sino que usa un valor específico para el objetivo. Si el objetivo está en el centro de las especificaciones, como sucede en la mayoría de los casos, entonces C_{pm} y C_{pk} son comparables. Ambos índices disminuirán en valor cuando la variabilidad del proceso aumente o cuando la media del proceso se aleje del objetivo.

Cuando el objetivo no cae en el centro de las especificaciones, estos dos índices se comportan de manera totalmente diferente.

PROCESOS CON SÓLO UNA ESPECIFICACIÓN

Existen procesos cuyas variables de salida tienen una sola especificación, ya sea que se trate de variables del tipo entre más grande mejor, donde lo que interesa es que sean mayores a cierto valor mínimo (EI); o de variables del tipo entre más pequeña mejor, donde lo que se quiere es que nunca excedan cierto valor máximo (ES).

En estos casos, donde sólo se tiene una especificación, se debe tener cuidado de no caer en la mala práctica de fijar de manera artificial una especificación inferior, ya que con frecuencia eso distorsiona el diagnóstico que se realiza acerca del proceso. Lo adecuado es no imponerle más exigencias al proceso de las que sean realmente necesarias para la calidad. Por ello, lo correcto es evaluar el proceso sólo con la especificación superior.

Por ejemplo en las plantas de tratamiento de aguas residuales, una forma de medir la eficacia del tratamiento biológico aerobio, es mediante los sólidos suspendidos totales (SST), ya que la alta concentración impedirá volver a usarla.

En una planta, en particular, se tiene que los SST no deben ser mayores a $LSE = 30$ para considerar que el proceso fue satisfactorio. Por lo tanto, esta variable es del tipo “entre más pequeña mejor”. De acuerdo con datos históricos, se tiene que la media y la desviación estándar de SST son $\mu = 10.2$ y $\sigma = 5.1$. En este caso no es posible calcular el índice C_p , ya que sólo se cuenta con la especificación superior. Más bien, dado el tipo de variable, lo que se debe calcular es el índice para la especificación superior C_{ps} , que, como ya se vio, está dado por:

$$C_{ps} = (30-10.2)/3*5.1 = 1.29$$

que se considera adecuado al menos que se tenga una exigencia aún mayor.

Ahora veamos un ejemplo de variable entre más grande mejor, en una armadora de autos, en el área de pintado, una característica de calidad es el espesor de la capa antipiedra en la zona trasera de los guardabarros, que debe tener un espesor mínimo de 100 micras ($LIE = 100$). A partir de la carta de control de medias y rango que se lleva normalmente para monitorear el espesor, se sabe que $\mu = 105$ y $\sigma = 6.5$. Dado el tipo de variables lo que se debe aplicar es el índice C_{pi} para evaluar la capacidad del proceso para cumplir con la especificación inferior. Como ya se había visto, este índice está dado por:

$$C_{pi} = (105-100) / 3*6.5 = 0.256$$

que es un valor demasiado pequeño, por lo que el proceso es incapaz de cumplir con la especificación inferior, por lo que es necesario hacer esfuerzos muy serios para mejorar ese proceso.

GRAFICOS DE CAPACIDAD

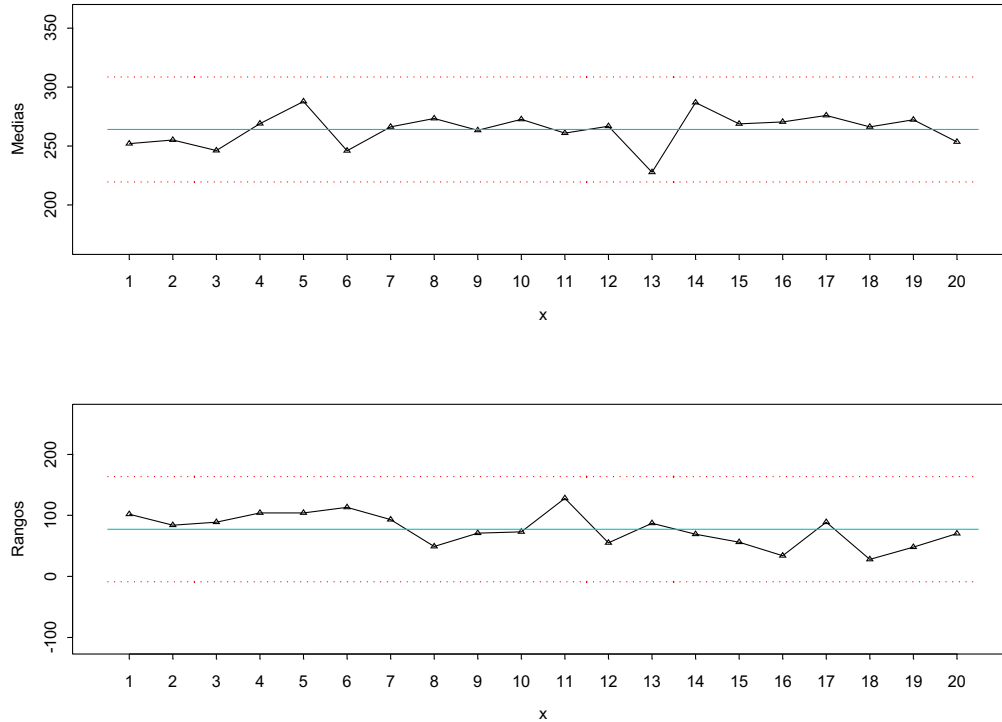
El gráfico de capacidad de proceso, como su nombre lo indica, tiene el propósito de determinar la capacidad de un proceso dado, por lo tanto, su capacidad para cumplir con lo esperado. La capacidad general del proceso está definida por el paso del cuello de botella, que puede abordarse mediante aspectos como la reducción del tiempo de cambio y la reducción del tiempo del ciclo de la máquina y / o del operador.

Gráficamente, evaluamos la capacidad del proceso trazando los límites de especificación del proceso en un histograma de las observaciones. Si el histograma cae dentro de los límites de especificación, entonces el proceso es capaz.

Aparte del cálculo matemático de los índices de capacidad el histograma es una herramienta de gran utilidad para visualizar la capacidad del proceso y su centrado.

Caso Práctico 1

Se tienen datos sobre la resistencia a la presión interna de botellas para gaseosas en 20 muestras de 5 observaciones cada una. Los gráficos de control correspondientes Pueden verse a continuación.



Las especificaciones para el proceso establecen que la resistencia debe ser superior a 200, y no se establecen valores máximos.

- Proceso bajo CE, la variabilidad:

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{77,3}{2,326} = 33,23$$

y la localización del proceso como

$$\mu = \bar{\bar{X}} = 264,06$$

- Así pues:

$$C_{pk} = \frac{\mu - LIT}{3\sigma} = \frac{264,06 - 200}{3 \cdot 33,23} = 0,64$$

Caso práctico 2

Una compañía fabrica un químico costoso. El peso neto del paquete tiene un valor mínimo de especificación de 25 lb. Las líneas centrales de los gráficos de control para X-barra y R son, respectivamente, 26.0 y 1.4. Estos límites están basados en 20 muestras de tamaño 5. Todos los puntos están dentro de los límites de control en ambos gráficos. (Para $n = 5$, $A_2 = 0.577$, $d_2 = 2.326$)

¿Proceso es capaz de cumplir con las especificaciones?

El químico se vende en lotes de 1000 paquetes. ¿Cuántos paquetes defectuosos tendrán cada lote en promedio?

Datos del problema:

- LIE = 25 lb
- $m = 20$
- $n = 5$
- $A_2 = 0.577$
- $d_2 = 2.326$
- $\bar{X} = 26$
- $\bar{R} = 1.4$

Entonces:

$$a) \sigma = (\bar{R}) / d_2 = 1.4 / 2.326 = 0.601$$

$$C_{pk} = \frac{\text{Media} - \text{LIE}}{3s} = \frac{(26 - 25)}{(3 * 0.601)} = 0.55 \Rightarrow \text{No es capaz}$$

$$b) P(x < 25) = P(Z < (25 - 26) / 0.601) = \Phi(1.6638)$$

Cada lote tendrá $\Phi(1.6638) * 1000$ paquetes defectuosos

Casos Práctico Resueltos en Clase:

Caso Práctico 3

La característica importante de los sacos de fertilizantes es que su peso debe ser de 50 kg.

La especificación inferior para su peso es de 49 kg y la superior es de 51 kg, de datos anteriores tomados se tiene que la media de peso es de 49.76 kg y del rango medio se estima que la desviación estándar es de 0.51.

Con esta información calcule en qué medida el proceso cumple con las especificaciones.

Caso práctico 4

Pura Energía S. A. es una empresa que se dedica a la fabricación de productos energéticos para atletas de alto rendimiento.

Entre muchos de los productos que fabrica la empresa se tiene un nuevo producto con un gran potencial, una barra energética baja en grasas pero de muy buen sabor.

Entre las especificaciones de la barra energética, se debe de tener altos contenidos de carbohidratos (alrededor de 45 gramos), una cantidad moderada de proteínas (alrededor de 10 gramos) y un bajo contenido de grasas.

Actualmente la especificación de la cantidad de grasas que debe de llevar la barra es de 0.75 ± 0.25 gramos. El Gerente de Calidad, desea controlar el proceso de fabricación de este nuevo producto por lo que ya tiene varios días de aplicar gráficas de control sobre el proceso.

A continuación, se presentan los datos resumidos de 30 observaciones, cada una con un tamaño de muestra de cuatro unidades tomada cada 15 minutos.

- Calcule C_p , C_{pk} y C_{pm} .
- ¿Cuál es el estado del proceso y cuáles son sus recomendaciones?

Muestra	1	2	3	4	5
Promedio	0.732	0.755	0.759	0.727	0.724
Rango	0.116	0.259	0.171	0.221	0.119
Muestra	6	7	8	9	10
Promedio	0.705	0.735	0.748	0.710	0.732
Rango	0.143	0.274	0.162	0.132	0.179
Muestra	11	12	13	14	15
Promedio	0.748	0.768	0.733	0.783	0.692
Rango	0.163	0.250	0.349	0.158	0.103
Muestra	16	17	18	19	20
Promedio	0.753	0.781	0.834	0.776	0.792
Rango	0.168	0.105	0.094	0.326	0.059
Muestra	21	22	23	24	25
Promedio	0.780	0.793	0.777	0.801	0.810
Rango	0.204	0.134	0.104	0.272	0.053
Muestra	26	27	28	29	30
Promedio	0.788	0.820	0.780	0.804	0.830
Rango	0.170	0.122	0.181	0.152	0.075