

LA CAPACIDAD DE PROCESOS COMO MÉTRICA DE CALIDAD PARA CARACTERÍSTICAS CUALITATIVAS.

Martha Lucía Pérez Urrego^[a], Juan Sebastián Peláez Zúñiga^[b], Andrés Carrión García^[c]
Universidad de Ibagué – Universidad Politécnica de Valencia España

^a Ingeniera Industrial; Dr. C.; Profesora Titular Universidad de Ibagué, lucia.perez@unibague.edu.co

^b Ingeniero Industrial; Asistente de Investigación Universidad de Ibagué, juansebas_006@hotmail.com

^c Ingeniero Industrial; Dr. C.; Profesor Titular Universidad Politécnica de Valencia – España, acarrion@eio.upv.es

Palabras clave: Capacidad, cualitativa, proceso

Resumen

La evaluación de la capacidad del proceso es una de las técnicas fundamentales para determinar la aptitud de un proceso para generar resultados o productos de excelencia libres de defectos. Tradicionalmente esta evaluación se ha realizado para características de calidad tipo variables; sin embargo el concepto de cumplimiento de requisitos va más allá, y tiene aplicación también en las características tipo atributo, con un componente cualitativo muy importante. Cada vez con mayor intensidad se vienen presentando procesos de servicio que recogen características cualitativas que no pueden ser evaluadas a través de instrumentos de medida, sino, que se acogen más a percepciones y evaluaciones subjetivas. En este sentido se cuenta con diversos indicadores y técnicas que pueden ser aplicadas a procesos en donde predominan las características cualitativas, con ese objetivo de medir el cumplimiento de requisitos.

La presente contribución plantea en primer lugar el propio concepto de capacidad de procesos en características de calidad tipo atributo, a partir de los conceptos de Gryna, Chua y Defeo (2007) y Montgomery (2004), entre otros. Se presentan después diferentes métodos para evaluación de capacidad de procesos en variables cualitativas abriendo en este campo nuevas aplicaciones de evaluación y mejoramiento para los procesos de servicio y los procesos de manufactura en donde intervienen atributos dándole a las Pymes, y a otras organizaciones, nuevas opciones de control y estandarización. Se revisan las metodologías y técnicas de evaluación de capacidad de los procesos y las aplicaciones de herramientas estadísticas y de calidad encaminadas al planteamiento de una metodología para el mejoramiento de la capacidad del proceso buscando un desempeño Seis Sigma.

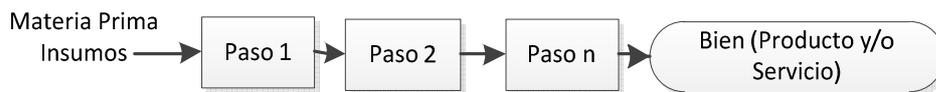
Se revisan los enfoques basados en la función de pérdida de Taguchi (p.e. Hsieh y Tong, 2006, o Taguchi, G., Chowdhury, S., y Wu, Y., 2005), los índices de capacidad de procesos para atributos

(p.e. Cuatrecasas, 2005), la medición de la capacidad del proceso por medio del nivel sigma (p.e. Schmidt and Lausbyn, 1997) o de rendimiento del proceso (p.e. Abramowitz y Stegm 1972), y se busca un enfoque integrado de los mismos.

1. Concepto de proceso

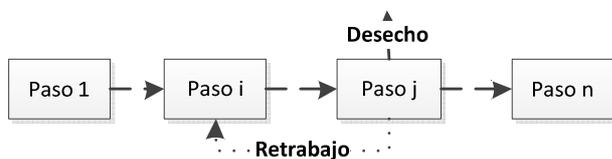
Según la Real Academia Española, un proceso, en una definición muy general, **“es la acción de avanzar o ir adelante, al paso del tiempo y al conjunto de etapas sucesivas advertidas de un fenómeno natural o de una operación artificial”**. (Real Academia Española, 2013). El desarrollo de los pasos de un proceso, tiene un fin determinado el cual es un **producto** que será entregado al cliente. Por otro lado se puede decir que un proceso **“es una secuencia de actividades mediante la cual se producen bienes (Productos y/o servicios)”** (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009). Y que puede ser representado de la siguiente manera:

Gráfica 1: Diagrama de un proceso



En el ámbito de la calidad es importante que cada paso o etapa sea eficiente, es decir, que no se generen retrabajos o desechos que hagan que el proceso saque productos defectuosos. Por tanto, un proceso que no genere defectos o inconformidades es un proceso capaz; es decir, tiene capacidad para funcionar de acuerdo con los requerimientos del cliente o en su defecto requerimientos de diseño.

Gráfica2: Diagrama de un proceso (Pasos con retrabajo y desecho)



Fuente: (Abbas, Najafi, & Noorossama, 2012)

De acuerdo con lo anterior, La capacidad de proceso se define como el nivel de variación que hace que este cumpla o no, con el requerimiento establecido. Esta variabilidad está relacionada con las fluctuaciones naturales que existen en el proceso o variaciones inherentes a él. De acuerdo con esto Juran, en su libro *El Método Juran Análisis y planeación de la calidad*, establece que: **“La capacidad del proceso es la medición de la variación inherente del producto que es resultado de un proceso.”** (Gryna, Chua, & Defeo, 2007)

En el glosario de la calidad se define la capacidad de proceso como **“una medida estadística del proceso a la variabilidad inherente de una característica dada. La fórmula más ampliamente aceptada para la capacidad de proceso es de 6 sigma.”** (American Society for Quality, 2005) La variación estadística se identifica con la letra griega sigma, y la relación de esta a partir de seis sigma es con el objetivo de la filosofía de cero defectos en los procesos, que es aproximadamente 3,4 defectos por millón de oportunidades.

Esto quiere decir que la capacidad de proceso se refiere, al momento en que el proceso se encuentra libre de variación asignable y funciona con la variabilidad no asignable o variabilidad natural. A esta variación natural no se le asigna un factor que afecta el control como una mala materia prima, un operario inexperto, un procedimiento, una medición engorrosa, una maquinaria desajustada, o un medio ambiente impredecible. En resumen después de que las Seis m's (maquinaria, métodos, mano de obra, materia prima, medio ambiente y mediciones), se encuentren totalmente controladas, en el proceso se sigue presentando un cierto grado de variación, esta es la variación no asignable.

En el momento en que el concepto de capacidad de proceso se comienza a relacionar con la variación no asignable y con las especificaciones de un producto, se puede tomar la definición de Douglas Montgomery sobre capacidad de proceso como, **“La forma en que se compara la variabilidad inherente de un proceso con las especificaciones o requerimientos del producto.”** (Montgomery, 2004) Es a partir de la relación de estos, cuando se comienzan a determinar los **Índices de Capacidad de Proceso.**

Una manera de calcular la capacidad de proceso es por medio de **“los índices de capacidad, que vendrán determinados por los cocientes entre la variación natural del proceso y el nivel de variación especificada.”** (Universitat Oberta de Catalunya, 2012)

Los índices de capacidad de proceso, son la relación de los límites de especificación y la variación inherente del proceso. En si **“Los índices de capacidad de proceso relacionan la tolerancia natural del proceso y a las especificaciones de ingeniería. En la mayoría de las situaciones de control de calidad, la tolerancia natural se fija en términos 6 sigma, mientras que las especificaciones de ingeniería se fijan independientemente de los parámetros de la distribución.”** (Kocherlakota, 1992)

2. Capacidad de proceso en atributos

La medición de la capacidad de proceso es una técnica cuantitativa que usualmente ha sido aplicada usando los referentes de características de calidad cuantitativas o tipo variable. Para el caso de características de calidad tipo atributo se acude a una definición como la que se evidencia en el libro del Método Jurán Análisis y planeación de la calidad, en el capítulo de Operaciones: Sector servicios, en donde hace una aproximación de medir la capacidad de proceso en el sector de los servicios, cuando no se puede cuantificar (atributo) las necesidades del cliente, estos establecen que **“Según el enfoque Six Sigma, la capacidad del proceso puede describirse en unidades de sigma; por ejemplo, un proceso puede ubicarse en un nivel 4,8 sigma de un ideal de 6 sigma.”** (Gryna, Chua, & Defeo, 2007) Es decir que la capacidad de proceso se puede relacionar y medir por medio del nivel sigma.

Otra manera que establece la capacidad de proceso en atributos es cuando, Douglas Montgomery, dice que al no tener en cuenta las especificaciones de las características de calidad **“La capacidad de proceso puede expresarse como un porcentaje fuera de las especificaciones.”** (Montgomery, 2004) Este porcentaje que esta fuera de las especificaciones se puede considerar como la fracción defectuosa de las cartas de control P y NP.

De igual manera Escalante Vázquez, dice: **“Para el caso de las gráficas de control de atributos no se acostumbra aplicar los índices de capacidad, aunque se conocen las siguientes expresiones como una manera informal de “calcular” la capacidad.”** (Escalante Vázquez, 2005)

- Para Gráfica de control P: $(1-P) * 100\%$
- Para Gráfica de control np: $n - np/n * 100\%$
- Para Gráfica de control c: c
- Para Gráfica de control u: u

Este autor sugiere que para las gráficas P se debe utilizar el complemento de P que es 1-P, de igual manera para np. Para el caso de las gráficas de control C y U, la capacidad de proceso está dada por los promedios aritméticos que utiliza la graficas de control que son los valores de C y U respectivamente.

Adicionando a lo anterior Gitlow, Levine y Popovich dicen que el **“Estudio de capacidad de proceso por atributos se refleja en términos de producción de la fracción defectuosa y los defectos por unidad de producción. Las herramientas principales que se utilizan en los estudios capacidad de proceso en atributos son las graficas de control por atributos.”** (Gitlow, Levine, & Popovich, 2006)

Siguiendo el mismo esquema de las cartas de control para atributos **“La capacidad de proceso se puede estimar en términos de errores o equivocaciones en lugar de la variabilidad de un parámetro del proceso”**. (Gryna, Chua, & Defeo, 2007) Las cartas de control para atributos, en especial **las cartas de control U y C**, se basan en la distribución de probabilidad de Poisson, esta tiene un parámetro lambda, λ = defecto por unidad o error por unidad. Entonces la capacidad de proceso se puede dar por:

$$\text{Capacidad de Proceso} = \frac{\text{Defecto}}{\text{Unidad física}}$$

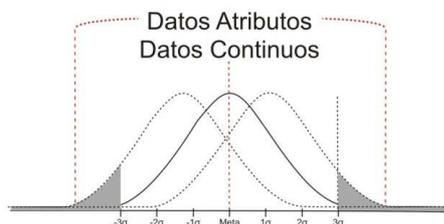
Entiéndase por unidad física un empleado, unidad de producción, producto, un proceso de servicio, entre otros. Donde la capacidad se puede dar en términos de:

- Errores por operario
- Defectos por unidad
- Defecto por producto
- Errores en una transacción bancaria

En resumen se tiene que la capacidad de proceso en atributos se puede dar en términos de nivel sigma, en fracción defectuosa o el complemento que es el rendimiento, errores o defectos.

Es por esto que es importante tener en cuenta la reducción de la variabilidad y también la reducción de la fracción no conforme en los procesos, compartiendo la afirmación de Pearn y Wu, que dice **“En la filosofía moderna de hoy en día la mejora en la calidad, se basa en la reducción de la desviación con respecto a un valor meta y es tan importante como la reducción de la fracción de unidades defectuosas**. (Pearn & Wu, Variables sampling plans with PPM fraction of defectives and process loss consideration, 2006) Es por eso que se establece que para un estudio de capacidad de proceso se deben de establecer estas dos maneras de medir la capacidad de proceso, en primera instancia reducir la variabilidad y por otro lado también la fracción de unidades defectuosas. Dicho de otra manera cuando se trabaja con datos cuantitativos lo ideal es que estos cumplan con un valor meta, mientras que para atributos el logro es que no se produzca unidades defectuosas. Esto se ilustra en la siguiente gráfica:

Gráfica 3: Capacidad de proceso en atributos y datos continuos.



3. Técnicas de Medición de Capacidad de procesos para atributos

Para trabajar la medición de la capacidad de procesos con características de calidad tipo atributo, se debe tener en cuenta que los valores que se pueden obtener en un atributo son dicotómicos (cuando sólo pueden adoptar un sólo valor sin jerarquía entre sí: hombre - mujer, positivo-negativo, presente-ausente), para el caso de la calidad es **producto bueno** o **malo**, este toma un valor, no los dos valores a la vez. En este sentido la evaluación de la calidad en atributos se hace a partir de los defectos y los productos o servicios defectuosos.

3.1 Técnicas para defectuosos

Para evaluar la capacidad de procesos en atributos, a partir de la identificación del número de defectuosos o la fracción defectuosa, se encuentran las siguientes técnicas:

- Índices de capacidad de procesos para atributos
- Índices de capacidad de proceso para datos cualitativos, a partir de la función de pérdida de calidad de Taguchi

3.1.1 Índices de Capacidad de proceso para atributos (Lluis Cuatrecasas)

Al igual que el manejo de los índices de capacidad de procesos en variables, se tiene que a partir de las gráficas de control por atributos, controladas estadísticamente, Lluis Cuatrecasas diseña indicadores, similares, a los de CP y CPK. (Cuatrecasas, 2005)

El enfoque de la medición de la capacidad de proceso en atributos generalmente se hace para los servicios, su calificación se basa en dos parámetros, **aceptación o no aceptación** del servicio. Teniendo en cuenta la ecuación de índice de capacidad de proceso, los límites de control para unidades defectuosas y el índice Cp; Cuatrecasas obtiene la ecuación para evaluar la capacidad de procesos en atributos así:

$$L. Superior = np + 3\sqrt{np\left(1 - \frac{np}{n}\right)}$$

$$L. Central = np$$

$$L. Inferior = n - 3\sqrt{np\left(1 - \frac{np}{n}\right)} \quad (1)$$

$$Cp = \frac{LS-LI}{6\sigma} \quad (2)$$

Partiendo de la ecuación (2), se tiene en cuenta que en atributos LI = 0, y teniendo en cuenta la desviación estándar de las cartas de control por atributos, se obtiene la ecuación (3) para el cálculo de Cp en atributos.

$$Cp = \frac{LS}{6\sqrt{np\left[1 - \frac{np}{n}\right]}} \quad (3)$$

Este índice de capacidad, de acuerdo al resultado que arroje se analiza e interpreta de la siguiente manera:

- CP < 1 Proceso no capaz
- CP = 1 Proceso justamente capaz
- CP > 1 Proceso capaz

En la medida en que este indicador se acerca a 2 es un proceso de nivel seis sigma.

Para el caso del índice Cpk que es el índice de capacidad real de un proceso, este tiene en cuenta el centrado del proceso, además es un ajuste del índice Cp, se tiene que la ecuación del índice Cpk es:

$$Cp_k = MIN \left[\frac{LS - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LI}{3\sigma} \right] \quad (4)$$

A partir de las ecuaciones de las gráficas de control por atributos np o ecuación (1), el parámetro σ de la gráfica de control NP = $\sqrt{np(1 - \frac{np}{n})}$ y el parámetro $\mu = np$, de la ecuación (4) del índice Cpk, se reemplaza los parámetros y se obtiene la ecuación de índice de capacidad de proceso de CPk para medición de la capacidad de procesos en atributos:

$$Cp_k = MIN \left[\frac{LS - np}{3 * \sqrt{np * [1 - \frac{np}{n}]}}, \frac{np - LI}{3 * \sqrt{np * [1 - \frac{np}{n}]}} \right] \quad (5)$$

Para la mayoría de los casos LI=0, que es un valor ideal del proceso (Calidad seis sigma), también recordar que LS es el valor aceptable de defectos del proceso.

3.1.2 Índices de capacidad de proceso para datos cualitativos, a partir de la función de pérdida de calidad de Taguchi (Hsieh y Tong)

Esta técnica surgió de relacionar los índices de capacidad de proceso (CPI) con la teoría de la función de la pérdida de la calidad de Taguchi. (Hsieh & Tong, 2006) Antes de comenzar con el desarrollo matemático para obtener los índices de capacidad de proceso, es importante aclarar que el límite de especificación que se utiliza para datos cualitativos es unilateral y la meta es producir cero defectos.

La función cuadrática de pérdida de calidad de Taguchi, está dada por:

$$L(y) = k(y - T)^2 \quad (6)$$

La calidad perdida esperada está dada por:

$$QL(y) = E[L(y)] = E[k(y - T)^2]$$

$$QL(y) = E[k(y - \mu + \mu - T)^2] \quad (7)$$

Donde $(y - \mu)^2 = \sigma^2$, por lo tanto se obtiene:

$$QL(y) = [k((\mu - T)^2 + \sigma^2)] \quad (8) \text{ (Taguchi, Chowdhury, \& Wu, 2005)}$$

Donde:

y = corresponde a los datos

T = denota el valor objetivo o valor nominal

k = denota la constante de la pérdida de la calidad cuando el proceso se encuentra dentro de la tolerancia permisible

μ = denota la media del proceso

σ = denota la desviación del proceso

Cumpliendo con el colorario de que: **“Para los datos cualitativos, la situación objetivo es de cero defectos (T = 0), es decir que no se presente disconformidades.”** (Hsieh & Tong, 2006) Por lo tanto teniendo esta condición de la ecuación (8), queda:

$$QL(y) = [k(\mu^2 + \sigma^2)] \quad (9)$$

Teniendo en cuenta que la medición de la capacidad de proceso en variables está dada por el cociente entre las especificaciones del cliente y la variación del proceso; Según la teoría de Taguchi esto sería la pérdida de calidad del cliente, permisible sobre la pérdida de calidad real. Por lo tanto el índice de capacidad de proceso (CPI) para atributos se puede generalizar en la siguiente expresión:

$$CPI = \frac{\text{Calidad permisible}}{\text{Calidad real}}$$

$$CPI = \frac{QL(\theta_c)}{QL(\theta)} \quad (10)$$

Donde

θ_c : Especificaciones del cliente

θ : Calidad actual del proceso

Una de las distribuciones de probabilidad que siguen los defectuosos está dada por la distribución binomial esta tiene como parámetros, $\mu = p$ y $\sigma^2 = p(1-p)$, remplazando se obtiene:

$$CPI = \frac{QL(\theta_c)}{QL(\theta)} = \frac{k[p_c^2 + p_c(1 - p_c)]}{k[p^2 + p(1 - p)]}$$

$$CPI = \frac{QL(\theta_c)}{QL(\theta)} = \frac{k[p_c^2 + (p_c - p_c^2)]}{k[p^2 + (p - p^2)]} \quad (11)$$

Donde finalmente se obtiene que la capacidad del proceso es la relación de la fracción defectuosa que esta el cliente dispuesto a recibir con respecto a la fracción defectuosa del proceso y está definida por la siguiente expresión:

$$CPI = \frac{p_c}{p} \quad (12) \text{ (Hsieh \& Tong, 2006)}$$

3.2 Técnicas para defectos

Las técnicas para evaluar la capacidad de procesos teniendo en cuenta los defectos están compuesta por, las métricas seis sigma las cuales son defecto por unidad (DPU), defecto por oportunidades (DPO), Defectos por millón de unidades (DPMU), Defectos por millón de oportunidades (DPMO), rendimiento del proceso (Yield) y el Nivel sigma del proceso (Z). Todas estas métricas tienen en común que salen a partir de los defectos que se evidencia en las características de calidad.

De los anteriores indicadores, los más nombrados en los proyectos Seis Sigma son el de defectos por millón de oportunidades (DPMO) y el nivel sigma (Z), es por eso que la relación de que un proceso con un nivel Seis Sigma tiene 3,4 defectos por millón de oportunidades. Debido a esto los procesos se miden en términos de sigma y DPMO.

Conocido el nivel sigma del proceso se divide por tres y a partir de esto se obtiene el índice de capacidad de proceso (Cp), así que un proceso con un nivel Seis Sigma tiene un Cp de 2.00. (DMAIC Tools, 2013) La ecuación, muestra la relación:

$$I. \text{ de Cap. de Proceso } (Cp) = \frac{\text{Nivel Sigma del Proceso}}{3}$$

Aunque esto es una forma de llegar a la medición de la capacidad de proceso en atributos en términos de resultado, ya que da un valor similar a la medición de la capacidad de proceso en variables. Pero en esta ecuación no se relaciona los límites de especificación con el sigma del proceso, sino que es un resultado que se tiene para comparar la medición de la capacidad de proceso, más no el principal objetivo de la medición de la capacidad de proceso que es relacionar las especificaciones con la variación del proceso.

3.2.1 Las Métricas Seis Sigma para atributos

Las métricas Seis Sigma emplean a los defectos del proceso para sacar indicadores que miden la calidad de un proceso y tienen un fácil cálculo e interpretación.

Tabla 1: Métricas de Seis Sigma

Nombre de la métrica	Ecuación de Calculo	Descripción
Defectos por Unidad (DPU)	$DPU = \frac{D}{N}$	Toma el número de defectos que se observaron en las unidades producidas e inspeccionadas, permite saber cual es el promedio de defectos por unidad de producción.
Defectos por oportunidad (DPO)	$DPO = \frac{D}{N * O}$	Toma el número de defectos que se obtienen del proceso, sobre las oportunidades que son propensas de fallar durante el proceso de producción.
Defectos Por Millón de Oportunidades DPMO	$DPMO = \frac{D}{N * O} * 10^6$	Esta métrica es un complemento de la DPO y DPU en el caso de que la unidad tenga una sola oportunidad. Se obtiene al multiplicar las anteriores por un millón.
Defectos por Millón de Unidades DPMU	$DPMU = \frac{D}{N} * 10^6$	Se obtiene al multiplicar a DPU por un millón. Se utiliza cuando un producto solamente tiene una característica de calidad.

Fuente: (Correa, 2003), (Escalante Vázquez, 2005)

D= Numero de defectos

N=Número de unidades producidas

O= Oportunidades de presentar defectos en la unidad

3.2.2 Métricas de Rendimiento (Yield)

Las anteriores métricas de Seis Sigma se basaron en los defectos presentados en las unidades o en las oportunidades de acuerdo a la métrica a utilizar. Para el caso de las métricas de rendimiento, estas se basan en los productos que salen buenos o que están libres de defectos, esta métrica se representa en términos porcentuales y también se llama la fracción conforme del proceso. Las métricas de rendimiento se clasifican en cuatro, las cuales son:

- Rendimiento Tradicional (Yield)
- Rendimiento a la primera vez (FTY)
- Continuidad de salida sin fallos (Rolled Throughput Yield RTY)
- Rendimiento Normalizado (Normalized Yield)

Según Aleu González estas **“métricas que se manejan en seis sigma, las cuales, cuando se usan de forma conjunta pueden mostrar las ineficiencias de un proceso o compañía.”** (Aleu González, 2003) A continuación se muestra una breve descripción de las métricas de rendimiento:

Tabla 2: Métricas de rendimiento

Nombre de la métrica	Ecuación de Calculo	Descripción
Rendimiento tradicional (Y)	$Y = \frac{Out}{in} = \frac{in - Scrap}{in}$ $Y = 1 - \frac{Scrap}{in}$ <p>Donde: Out: Salidas</p>	Es una perspectiva engañosa que oculta el impacto de la inspección y retrabajo.

	In: Entradas Scrap: defectos	
Rendimiento a la primera vez (FTY)	$FTY = \frac{in - scrap - rework}{in}$ Donde: In: Entradas Scrap: defectos	Muestra la probabilidad de que un elemento pasa a través de un proceso con éxito la primera vez. Incluye los efectos de inspección, retrabajo y desperdicio.
Continuidad de salida sin Fallos (RTY)	$RTY = \prod_{i=1}^n FTY_i$	El rendimiento combinado total de una corriente de proceso. Le indica la probabilidad de que un elemento pasa a través de todos los pasos del proceso con éxito la primera vez.
Rendimiento Normalizado (NRTY)	$NRTY = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n FTY_i}$	Es la probabilidad promedio por cada paso de todo el proceso para producir cero productos defectuosos.

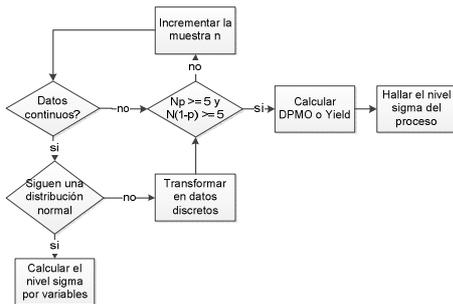
Fuente: (Correa, 2003), (Gygi, DeCarlo, & Williams, 2005)

3.2.3 Nivel Sigma del proceso

Según Kumar, Crocker y Chitra definen el nivel sigma como, **“una medida de defectos en el proceso. A mayor Nivel Sigma indica que el proceso resultan menos defectos, mientras que un menor Nivel Sigma significa una mayor tasa de defectos. Nivel Sigma de calidad puede utilizarse para propósito y la evaluación comparativa de ayuda para medir la calidad del proceso.”** (Kumar, Crocker, & Chitra, 2006)

Se considera que el nivel sigma se convierte en una métrica que mide la capacidad de proceso, según correa **“El parámetro sigma es un parámetro universal y se basa en la probabilidad de ocurrencia de los defectos; viene a remplazar a los índices de capacidad actuales de los procesos de producción Cp y Cpk.”** (Correa, 2003)

Una manera de calcular el nivel sigma para datos cualitativos o discretos se muestra en el siguiente diagrama de flujo.:



Gráfica 4: Método del calculo del nivel Sigma Fuente: (John, Meran, Roenpage, & Staudter, 2008)

El cálculo del nivel sigma para datos cuantitativos se realiza por medio del valor z de la distribución normal estándar, por medio del área de aceptación de las especificaciones del proceso, en el caso de que los datos no sean normales, estos se convierten en datos discretos, las distribuciones

discretas más utilizadas son la Binomial y la de Poisson, la condición de que $np \geq 5$, es una aproximación de datos discretos a datos normales, a partir de esto se pueden calcular las métricas de Defectos por millón de Oportunidades (DPMO) y/o el Rendimiento (Yield) del proceso, y luego con el valor de estas dos métricas se halla el nivel sigma, en este apartado se mostrara como se calcula, las cuales son:

- Nivel Sigma por medio de DPMO, por Schmidt and Lausbyn (1997)
- Nivel Sigma por medio del rendimiento, por Abramowitz y Stegm (1972)
- Nivel sigma, por medio de las tablas de la normal.

Nivel Sigma de Calidad por medio de DPMO (Schmidt y Lausbyn)

Esta ecuación es planteada en Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar, para hallar el nivel sigma a partir de las partes por millón (PPM) o por los defectos por millón de oportunidades (DPMO). (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma, 2009) La fuente es del libro de Schmidt y Lausbyn, Understanding industrial designer experiments. Donde se define por la siguiente expresión:

$$Z_c = 0,8406 + \sqrt{29,37 - 2,221 * \ln (DPMO)}$$

(13) (Schmidt & Lausbyn, 1997)

La relación que tiene el nivel sigma con las partes por millón por medio de la ecuación de Schmidt y Lausbyn, se evidencia en la siguiente tabla:

Tabla 3: Defecto por millón de oportunidades relacionadas con el nivel de sigma

DPMO	Calidad en Sigma
542000	1
308700	2
66807	3
6210	4
233	5
3,4	6

Hay que tener en cuenta que para un valor mayor a 553.365 DPMO la raíz de la (13) es negativa por lo tanto es indeterminado, es por eso que se recomienda buscar en la tabla de la norma o por medio del software de Excel.

También se puede obtener la relación contraria que es despejando de la ecuación a DPMO, y teniendo el valor sigma (Z_c), se obtiene a DPMO.

$$DPMO = \exp \left[\frac{29,37 - (Z_c - 0,8406)^2}{2,221} \right]$$

Nivel Sigma de Calidad por medio del Rendimiento (Abramowitz y Stegm)

Esta técnica está planteada en el libro de Kumar, Crocker y Chitra en la página 60-61 para hallar el nivel sigma a partir del rendimiento del proceso. (Kumar, Crocker, & Chitra, 2006) Esta técnica se base es en una aproximación polinómica para calcular el valor Z de la distribución normal estándar. (Abramowitz & Stegun, 1972) Debido a que los autores del libro donde se extrajo la teoría afirman que el ***“El nivel Sigma es nada más que el valor Z de la distribución normal estándar, bajo el supuesto de que la media del proceso cambia alrededor 1,50 desviaciones estándar.”***

La principal variable de la técnica es el rendimiento, esta es la fracción conforme del proceso es decir el producto libre de defectos, por ser una fracción se representa de manera porcentual. En el desarrollo de la técnica se tomara como **Y**. Teniendo ha **Y** se calcula a **P** utilizando la siguiente relación matemática:

$$P = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{Y}{100}\right)^2} \right)}$$

Ecuación 14 (Abramowitz & Stegun, 1972)

Donde Y debe de tomar valores de 0 a 100, es decir si es Y es un 80%(0,8) se toma un valor de 80 para la Ecuación 14 . Luego de obtener el valor de P se halla el nivel sigma por la siguiente expresión:

$$Nivel\ Sigma = 1,5 + \left(P - \frac{C_0 + C_1P + C_2P^2}{1 + d_1P + d_2P^2 + d_3P^3} \right)$$

Ecuación 15 (Abramowitz & Stegun, 1972)

Donde;

- $C_0=2,515517$
- $C_1=0,802853$
- $C_2=0,010328$
- $d_1=1,43278$
- $d_2=0,189269$
- $d_3=0,001308$

3.2.4 Capacidad de Proceso por medio del DPU

Los defectos por unidad (DPU) tienen una relación con el valor del parámetro λ de la distribución de Poisson. Debido a que tienen la misma unidad de medida (Defecto/Unidad), o como lo define Issa Bass, **“En este caso, la probabilidad de encontrar defectos en una unidad sigue una distribución de Poisson debido a que los defectos pueden ocurrir al azar a lo largo de un intervalo que se puede subdividir en sub-intervalos independientes”**. (Bass, 2007) Se tiene la función de probabilidad de Poisson:

$$P(x, \lambda) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}$$

En el caso que se conozca el valor de DPU, es decir que $DPU = \lambda$, la ecuación anterior se puede sobrescribir de la siguiente manera:

$$P(x, DPU) = \frac{DPU^x e^{-DPU}}{x!}$$

(Bass, 2007)

Siguiendo con la metodología de Bass para buscar esta relación, se dice que **“El objetivo de un fabricante es producir productos libres de defectos. La probabilidad de producir sin defectos (cero defectos) será”**, a partir de esta afirmación se obtiene la siguiente ecuación:

$$P(X = 0) = \frac{DPU^0 e^{-DPU}}{0!}$$

Donde $DPU^0=1$ y $0!=1$, se tiene:

$$P(X = 0) = e^{-DPU}$$

La anterior es la probabilidad de que una unidad pase libre de defectos, que una unidad pase libre de defectos se conoce como rendimiento de proceso o Yield, este se representa por la letra **Y**, debido a esta relación se obtiene

$$Y = e^{-DPU}$$

(16)(Bass, 2007)

Una vez demostrada esta relación se tiene los siguientes pasos para medir la capacidad de un proceso:

1. Cuando se tenga un estudio de graficas de control U (Véase en Graficas de control para disconformidades por unidad), en este se obtiene el promedio de defectos por unidad ($DPU=U$).
2. Cuando se tenga el proceso controlado estadísticamente, se aplica la ecuación **(16)**, donde se relaciona el DPU con el rendimiento del proceso o Yield.
3. Luego de obtener el rendimiento del proceso o Yield se halla el nivel sigma.

4. Luego el nivel sigma es dividido por tres y ahí se obtiene el índice de capacidad de proceso (Cp)

3.2.5 Capacidad de proceso por medio de Software Estadístico

La capacidad de procesos para atributos puede ser calculada a través del software estadístico Minitab y del macro de Excel llamado XL sigma.

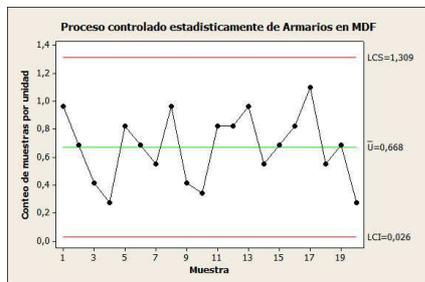
En el software Minitab el análisis de capacidad de procesos se hace a partir del trabajo con las distribuciones binomial y de Poisson, llegando a establecer las métricas PPM Y DPU y el nivel sigma del proceso.

En el caso de trabajar con el macro de Excel, este permite calcular las métricas DPU, DPMO, YIELD y el nivel sigma del proceso.

4. Aplicación del cálculo de la capacidad de procesos por medio del DPU

En La siguiente Gráfica 5: Carta de control U, carta de control de un proceso que se monitorea por medio de una carta de control de disconformidades por unidad (grafica U), el proceso se encuentra controlado estadísticamente debido a que los defectos que se presentan están dados por variabilidad no asignable es decir, a los defectos no se le puede asumir a una causa en especial.

Gráfica 5: Carta de control U



Debido a que los defectos por unidad que se presenta en el proceso en promedio son de 0,668, este valor se toma como DPU de la ecuación (16), por lo tanto se tiene:

$$Y = e^{-DPU}$$

$$Y = e^{-0,668}$$

$$Y = 0,5127$$

Teniendo el rendimiento del proceso que es de 51,27% se puede obtener el nivel sigma del proceso reemplazando el rendimiento en la ecuación siguiente:

$$P = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\left(1 - \frac{Y}{100}\right)^2}\right)} = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\left(1 - \frac{51,27}{100}\right)^2}\right)} = 1,20$$

Luego

$$\text{Nivel Sigma} = 1,5 + \left(P - \frac{C_0 + C_1P + C_2P^2}{1 + d_1P + d_2P^2 + d_3P^3} \right)$$

$$NS = 1,5 + \left(1,20 - \frac{2,52 + 0,8 * 1,2 + 0,01 * 1,2^2}{1 + 1,43 * 1,2 + 0,18 * 1,2^2 + 0,001 * 1,2^3} \right)$$

$$\text{Nivel Sigma} = 1,53$$

La capacidad de proceso se obtiene dividiendo el nivel sigma en tres.

$$I. de Cap. de Proceso (Cp) = \frac{\text{Nivel Sigma del Proceso}}{3}$$

$$\text{Indice de Capacidad de Proceso (Cp)} = \frac{1,53}{3}$$

$$Cp = 0,51$$

5. Conclusiones

A pesar de que la capacidad de procesos tradicionalmente se ha calculado para variables, ayudando a identificar puntos de mejora en los procesos, se encuentra que también es posible hacerlo con datos tipo atributos permitiendo encontrar nuevos procedimientos de análisis y evaluación que conllevan al diseño de estrategias de mejoramiento para estos procesos en los que las características de calidad relevantes son de tipo atributo.

El estudio de los diferentes autores que plantean el tema de capacidad de procesos para datos cualitativos ha permitido reconocer técnicas poco conocidas, confirmar el uso y la eficacia de la filosofía seis sigma e identificar diferentes conceptualizaciones alrededor de los atributos que le permiten a algunos autores proponer sus diferentes metodologías en las que no todas se identifican con el concepto tradicional de capacidad de proceso.

Se encuentra que al definir técnicas para evaluar la capacidad de procesos para atributos o datos cualitativos es necesario realizar aproximaciones a la distribución normal para encontrar respuestas significativas de capacidad.

El contar con técnicas de evaluación de capacidad de procesos para datos cualitativos representa un aporte significativo en el estudio de los procesos de servicios, que en la actualidad representan un porcentaje alto en el medio empresarial.

Así como en el estudio de las técnicas de análisis de características cualitativas, que se dividen en técnicas para los defectos y para los defectuosos; los análisis de capacidad para este tipo de procesos también pueden clasificarse de acuerdo con defectos y defectuosos.

Es posible realizar los cálculos de capacidad de proceso por medio del software estadísticos, sin embargo, el desconocimiento de los conceptos aplicables a los atributos no permite una interpretación coherente en los resultados presentados por estos software.

5. Referencias

Abromovitz, M., & Stegun, I. A. (1972). *Handbook of Mathematical Functions*. New York: Dover.

Aleu González, F. G. (2003). *Seis Sigma para Gerentes y Directores*. Libros en Red: España.

Bass, I. (2007). *Six Sigma Statistics wit Excel and Minitab*. Estados Unidos: Mc Graw Hill.

Calderon, E. P. (2009). *Mejora de Procesos en una imprenta que realiza trabajos de impresión OFFSET empleando Six Sigma*. Lima: Pontificia Universidad Católica de Perú .

Correa, N. (2003). 6 Sigma Nuevo paradigma para medir la calidad . *Mundo Mitutoyo*, 5-8.

Cuatrecasas, L. (2005). *Gestión Integral de la Calidad Implatación, Control y Certificación*. España: Ediciones Gestión 2000.

DMAIC Tools. (01 de 01 de 2013). *DMAIC Tools*. Recuperado el 28 de 01 de 2013, de DMAIC Tools: <http://www.dmaictools.com/dmaic-measure/sigma-conversion-chart>

Gryna F., Chua R. & DeFeo J. (2007). *Método Juran. Análisis y planeación de la calidad*. México: McGraw-Hill Interamericana

Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2009). *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma*. Mexico D.F.: McGraw-Hill.

Gygi, C., DeCarlo, N., & Williams, B. (2005). *Six Sigma for Dummies*. United States: Wiley Publishing, Inc.

Con formato: Fuente:
(Predeterminado) +Cuerpo, 11 pto,
Inglés (Estados Unidos)

- Hsieh, K.-L., & Tong, L.-I. (2006). Incorporating process capability index and quality loss function into analyzing the process capability for qualitative data. *Advanced Manufacturing Technology*, 1217-1222.
- John, A., Meran, R., Roenpage, O., & Staudter, C. (2008). *Six Sigma + Lean Toolset*. Berlin - Alemania: Springer.
- Kumar, U. D., Crocker, J., & Chitra, T. (2006). *Reliability and Six Sigma*. United States of America: Springer.
- Minitab Statistical Software. (21 de Enero de 2009). *Minitab.com*. Recuperado el 3 de Abril de 2013, de Minitab.com: <http://www.minitab.com/support/documentation/Answers/Poisson%20rate.pdf>
- Schmidt, S. R., & Launsby, R. G. (1997). *Understanding industrial designed experiments*. Estados Unidos: Air Academy Press.
- Sigma XL. (01 de 01 de 2013). *Sigma XL*. Recuperado el 29 de 01 de 2013, de Sigma XL: <http://www.sigmaxl.com/ProcessSigma.shtml>
- Taguchi, G., Chowdhury, S., & Wu, Y. (2005). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. United States of America: Wiley.
- Valls Figueroa, W., & Alonso Suárez, A. C. (s.f.). Procedimiento para la mejora del servicio basado en la metodología Seis Sigma. *Universidad de Matanzas*, 11-12.