



Quaglino, Marta Beatriz

Lupachini, Evangelina

Pagura, José Alberto

Dianda, Daniela

Instituto de Investigaciones Teóricas y Aplicadas de la Escuela de Estadística

CAPACIDAD DE PROCESOS EN SITUACIONES NO CONVENCIONALES

I- INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la calidad, la estadística puede definirse como el arte de tomar decisiones acerca de un producto, basándose en el análisis de información objetiva. Por lo tanto, los métodos estadísticos desempeñan un rol vital en el aseguramiento de la calidad. Constituyen los medios principales para muestrear, probar y evaluar productos o servicios, utilizando información contenida en los procesos que los generan, con el fin de controlar y mejorar los procesos de producción. Un factor clave a considerar en las actividades de control y mejora de la calidad, es la variabilidad de las medidas que la definen, ya que ella identifica su uniformidad. Esta variabilidad de la característica de calidad puede ser considerada de dos formas distintas: la variabilidad natural o inherente, causada por pequeñas causas que por lo general son incontrolables denominadas *causas comunes o no asignables* de variación, y la variabilidad debida a *causas especiales, atribuibles o asignables* de variación.

Los estudios de *Capacidad de los Procesos* están diseñados para medir cuán bien se comporta un proceso, ya sea éste de producción o de servicios, con respecto a las especificaciones o requisitos de la organización y se determina a partir de la variabilidad total producida por causas aleatorias, observando la mínima variación que podría obtenerse después de que todas las causas atribuibles se eliminaran. De esta manera, la *Capacidad del Proceso* representa el "rendimiento" del mismo cuando éste opera en un "estado de control estadístico". Para evaluar si los procesos están en estado de control estadístico, deben utilizarse otros métodos conocidos como *Control Estadístico de Procesos (SPC)*, diseñados para conocer la variabilidad de los factores que integran el proceso y descubrir cambios adversos en el nivel medio de la calidad, lo cual permitirá para trabajar con procesos estables, previniendo las disconformidades y logrando una reducción de los costos.

Frecuentemente se cae en la confusión entre las dos palabras "c": *control* y *capacidad*. Sin embargo el término *Control de Procesos* se refiere a la "voz del proceso", por lo tanto se



necesitan sólo los datos del proceso para determinar si éste está o no en control estadístico. En este caso no se tienen en cuenta las especificaciones o requerimientos del cliente. Un proceso está bajo control estadístico si el rendimiento medido forma una distribución estable en el tiempo, es decir, con media y desviación estándar invariantes. Esto ocurrirá si las causas especiales se eliminan, de modo tal que sólo las causas aleatorias permanezcan. Sin embargo, que un proceso esté en control estadístico, no necesariamente significa que sea bueno. La bondad del proceso se mide a través de su *Capacidad*, comparando la "voz del proceso" con la "voz del cliente", lo cual se mide en términos de las especificaciones o requisitos.

Los métodos estadísticos clásicos evalúan la Capacidad de un Proceso a través de indicadores ampliamente conocidos, que requieren para su correcta interpretación, que las variables de calidad tengan un comportamiento aleatorio ajustado por una distribución Normal. Sin embargo en la práctica de las empresas, este hecho suele ser desconocido, lo cual puede derivar en conclusiones erróneas. En este trabajo, se aborda el estudio de algunas alternativas de análisis en caso de no verificarse los supuestos requeridos por los indicadores convencionales, que fueron aplicadas en una situación real de asesoramiento en temas de calidad a una empresa metalúrgica del Gran Rosario. Este asesoramiento fue llevado a cabo como actividad de Investigación aplicada dentro del Proyecto *Control Multivariado Estadístico de Procesos*, en el marco de un Convenio de Cooperación firmado entre una industria metalúrgica del sector productivo local y la Facultad y que también dio lugar a distintos trabajos de desarrollo y aplicación de estudios de calidad en situaciones no convencionales. (Quaglino, M., Pagura, J.A., Lupachini, E., Dianda, D. (2005, 2006, 2007), Barbiero, C.; Flury, M.I.; Pagura, J.; Quaglino, M.; Ruggieri, M. (2007), Quaglino, M.; Ruggieri, M. Barbiero, C.; Flury, M.I. (2008)).

II- ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE PROCESOS NO NORMALES

En años recientes, se han sugerido distintos procedimientos para realizar estudios de *Capacidad de Procesos* en poblaciones no normales (Boethe, D.R. (2002), Joglekar, A.M. (2003), Lamprechet, J. (2005), Kotz, S.; Johnson, N.L. (2002), Pearn, W.L. and Kotz, S. (2006)). Las propuestas se basan en distintos criterios, que pueden sintetizarse en:

- 1) Reemplazar la distribución desconocida por una distribución empírica o por una distribución conocida con tres o cuatro parámetros, que se compruebe que ajusta a la distribución empírica de la característica de calidad.
- 2) Utilizar alguna transformación de los datos de tal manera que la variable transformada exhiba en apariencia una distribución normal



- 3) Utilizar índices de capacidad de procesos específicos para el caso de distribuciones no normales.

La primera alternativa de análisis propuesta, se basa en la búsqueda de una distribución de probabilidad apropiada, que ajuste satisfactoriamente a los datos. Una vez elegida, ella debe utilizarse para calcular los cuantiles bajo consideración en la definición de los índices, teniendo en cuenta, por las propiedades estadísticas de estos estimadores, que las muestras deberán ser de tamaño relativamente grande. También es importante considerar que es probable que con otros modelos distintos al Normal se pierda la propiedad de simetría, en cuyo caso, será conveniente reemplazar la expresión de la media aritmética en el índice por la mediana. Para encontrar un modelo que ajuste adecuadamente a los datos propios, pueden utilizarse los *gráficos o diagramas probabilísticos*. Es necesario tener precaución al utilizar estos diagramas ya que si los datos no provienen de la distribución supuesta, las inferencias obtenidas acerca de la capacidad del proceso podrían estar equivocadas. Una desventaja de estos diagramas es que es posible que dos analistas arriben a distintas conclusiones utilizando los mismos datos. Por tal motivo, es más adecuado acompañar los diagramas de probabilidad con alguna prueba de bondad de ajuste, según una base estadística más formal (Montgomery, D. (2005), Lehmann, E.L. and D'Abbrera, H.J.M (2006)).

La segunda propuesta, en lugar de la búsqueda de una distribución que ajuste a los datos, recomienda utilizar datos transformados para conseguir normalidad, argumentando que los resultados son más simples de utilizar porque si se encuentra alguna transformación adecuada, la forma de construir el índice no cambiaría. Una estrategia muy difundida actualmente, en especial en temas de calidad, es la presentada por Box y Cox (1964). La misma propone un procedimiento sistematizado para identificar la transformación dentro una familia de funciones aplicable para cualquier variable respuesta positiva Y , a saber:

$$Y_{(\lambda)} = \begin{cases} \frac{Y^\lambda - 1}{\lambda}, & \text{para } \lambda \neq 0 \\ \ln Y, & \text{para } \lambda = 0 \end{cases}$$

Esta familia depende de un único parámetro λ , el cual es fácilmente estimado por el método de máxima verosimilitud.

La tercera alternativa planteada, propone directamente modificaciones en el índice (Chen y otros (2004), Pearn y Kotz (2006)). Por ejemplo, una propuesta de estas características para el caso de especificaciones bilaterales es la del índice C_{pc} de Luceño, que está construido para considerar tanto la localización como la dispersión del proceso y se define como:



$$C_{pc} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\frac{\pi}{2}}E|y-m|}, \text{ con } m = \frac{1}{2}(LSE + LIE).$$

La constante $6\sqrt{\frac{\pi}{2}} = 7.52$ utilizada en el denominador es una aproximación al 6σ que se utiliza en el caso en que la distribución es Normal y no depende de la normalidad de la característica de calidad evaluada. El intervalo de confianza para C_{pc} puede plantearse evaluando $|(Y - m)|$, cuyo valor esperado estimado es: $\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - m|$. El intervalo de confianza del $100(1-\alpha) \%$ para el índice C_{pc} está dado por:

$$\frac{\hat{C}_{pc}}{1 + t_{\alpha/2, n-1} \left(\frac{S_c}{c\sqrt{n}} \right)} \leq C_{pc} \leq \frac{\hat{C}_{pc}}{1 - t_{\alpha/2, n-1} \left(\frac{S_c}{c\sqrt{n}} \right)},$$

donde $t_{\alpha/2, n-1}$ es el cuantil $\alpha/2$ de la distribución t de Student con $n-1$ grados de libertad y

$$s_c^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (|y_i - m| - \bar{c})^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n |y_i - m|^2 - n\bar{c}^2 \right].$$

Estos intervalos de confianza son insensibles a desviaciones de la normalidad. Además, para tamaños de muestras grandes es posible obtener buenas aproximaciones del índice.

III- RESULTADOS

El análisis de Capacidad de Procesos que se presenta en este trabajo, se refiere a la variable de calidad: *tiempos de producción*. Si bien el estudio realizado en la empresa a través del Convenio mencionado fue muy amplio, sólo se presentan resultados parciales, que muestran el procedimiento de análisis aplicado en los estudios de Capacidad, los cuales no pudieron aplicar la metodología clásica, por no verificarse los supuestos requeridos. Por razones de confidencialidad, no se especifican detalles de nombres de artículos producidos ni de procesos considerados, sólo se indica que los tiempos estudiados corresponden a la producción de una pieza que requiere para su terminación, de cuatro sub-procesos que llamaremos A, B, C y D.

Como primer paso en todo estudio de Capacidad de Procesos, es necesario aplicar estrategias de control y verificar si los datos que se han obtenido corresponden a un período en el cual se operó sólo bajo causas comunes de variabilidad. A tal efecto, se aplicaron diagramas de control de Shewhart de medidas individuales y rango móvil (IMR) de los tiempos

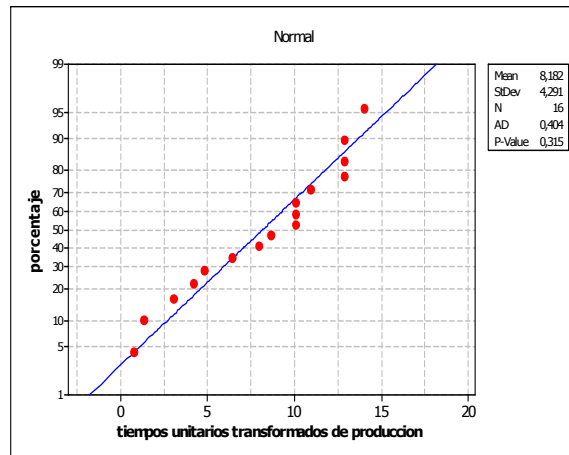


unitarios para cumplimentar cada uno de los subprocesos de fabricación de la pieza. En estos casos en que no se consideran subgrupos racionales, es aún más importante verificar que puede sustentarse razonablemente el supuesto de normalidad de la distribución subyacente de los datos. Se realizaron histogramas de los tiempos unitarios de producción para cada operación por separado, gráficos probabilísticos y pruebas de bondad de ajuste. En todos los casos primero se corroboró si era adecuado el modelo normal y en caso de ser rechazado se buscó otra distribución dentro de modelos razonables, que fueran flexibles. Se encontró que para dos sub-procesos era adecuado el modelo normal y para otros dos no. A continuación se muestran los resultados de los análisis correspondientes a uno de los subprocesos con variable de calidad no normal.

Para construir los diagramas de control en estos casos de no normalidad, podían seguirse distintas alternativas. Una de ellas era considerar límites probabilísticos definidos a través de la distribución ajustada para los datos, y la otra, buscar una transformación de los datos originales, que consiguiera la "normalización". Se aplicaron ambas estrategias para poder evidenciar sus ventajas, desventajas y similitudes en los resultados. Las conclusiones fueron las mismas, los procesos estaban bajo control. Sin embargo para una aplicación en planta se consideró preferible utilizar un gráfico de Shewhart estándar basado en límites normales. El proceso de búsqueda de la transformación fue realizado a través del método de Box-Cox, utilizando el recurso gráfico informático del software MINITAB, disponible en los laboratorios informáticos de la Facultad por un Convenio firmado con la Escuela de Estadística. La transformación seleccionada para los tiempos de este subproceso fue $Y^* = 1/Y^5$. Aplicando este cambio de variable a los tiempos necesarios para terminar el subproceso en una pieza, el test de Bondad de Ajuste a la normal de Anderson-Darling, no fue rechazado ($p=0,315$). Es importante observar que la transformación es del tipo "inversa", es decir transforma los valores más grandes de la variable en los más pequeños de la variable transformada. Este hecho es muy importante en la posterior interpretación del estudio de capacidad. La Figura I, muestra el gráfico probabilístico normal que evidencia la bondad del ajuste de dicha transformación.

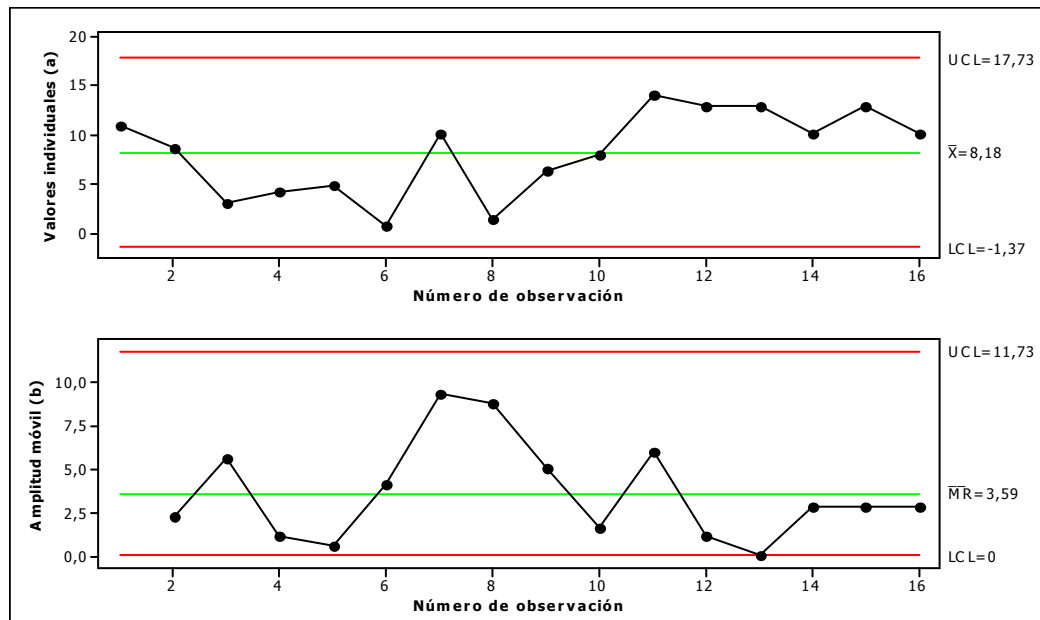


Figura I: Diagrama de probabilidad normal para los tiempos transformados



La Figura II presenta los diagramas de control IMR, en el período de producción estudiado, considerando los tiempos unitarios transformados. Los mismos no muestran anomalías.

Figura II: Gráfico IMR de observaciones individuales transformadas de tiempos de producción



Dado que los datos están bajo control estadístico, se concluye que no existen causas atribuibles de variación. Luego de verificar esta condición en el proceso (que hubiera sido diferente si no se tenía en cuenta que los datos originales no eran ajustados por una distribución normal), se encaró la evaluación de los *Indices de Capacidad*. A partir de ellos, se pue-



de establecer si el proceso es capaz o no de producir piezas dentro de los tiempos especificados. Es decir, se puede evidenciar la aptitud del proceso de producir piezas que cumplan con los requerimientos sobre los tiempos de producción. En el caso particular de este estudio, se especifica sólo un límite superior, ya que el interés se centra en que los tiempos no excedan un valor preestablecido. Por tal razón el análisis de capacidad que se realiza (en éste y en todos los subprocesos) es unilateral. El límite de especificación superior utilizado fue definido por la empresa. Para el proceso cuyos resultados se muestran, el tiempo de producción máximo tolerado por la empresa es de 0,86 minutos por pieza. La alternativa elegida para construir el Índice de Capacidad frente a la no normalidad de la variable fue nuevamente, utilizar el clásico Índice C_{pu} basado en cuantiles, aplicado sobre los datos transformados según el modelo de Box-Cox. El Índice de Capacidad estimado con estos datos fue $\hat{C}_{pu} = 0,46$ y el intervalo del 95% de confianza arroja un límite inferior para el verdadero Índice (C_{PU}) de 0,27. Este subproceso por lo tanto, está produciendo unidades en tiempos mayores al especificado por la empresa. En términos del rendimiento del proceso, se obtuvo un 8,25% de unidades por millón fuera de especificación.

En el apartado anterior se expuso la posibilidad de construir un índice específico para variables no normales, que considere la distribución ajustada a los tiempos de producción reales, que este caso había resultado una distribución de Weibull de tres parámetros. La estimación del índice probabilístico C_{pu} , resultó $\hat{C}_{pu} = 0,26$, lo cual indicaría un porcentaje de 9,69% piezas por millón fuera de especificación.

Ambas metodologías, adecuadas para variables no Normales, arrojaron resultados similares, que abrieron la oportunidad de acciones de mejora.

IV- CONSIDERACIONES FINALES

Los procesos de mejora continua de calidad en una organización se fundamentan en el abordar los problemas desde un punto de vista racional y científico, que permita aprovechar toda la información que se genera en los distintos procesos. Entre otras actividades, este enfoque implica definir y medir las características de calidad, compararlas con las especificaciones o requisitos y tomar acciones correctivas apropiadas cuando existe una discrepancia entre el funcionamiento real y el esperado. Entre los métodos ampliamente utilizados para analizar, evaluar y mejorar el rendimiento de los procesos de producción o de servicios, está el Control Estadístico de Procesos, el cual puede ser acompañado por estudios de Capacidad. Un supuesto fuerte que fundamenta la implementación de los estudios más



divulgados de Capacidad es que la característica de calidad evaluada se comporte estocásticamente según una distribución Normal. Sin embargo, en general en las empresas que utilizan técnicas de control de calidad, se adoptan una serie de gráficos e índices estándares sin verificar si estos supuestos pueden admitirse. Si los supuestos no son adecuados, las conclusiones a las que se arribe serán erróneas.

A lo largo de todo el trabajo se ha delineado cómo llevar a cabo un estudio de Capacidad de Procesos teniendo en cuenta todas las consideraciones estadísticas importantes para que sus conclusiones sean válidas. En cuanto al trabajo realizado en la empresa se destaca que fue posible concientizar acerca de lo imprescindible de contar con información precisa y confiable para obtener resultados que reflejen la realidad de los procesos. Sobre la problemática de los tiempos de producción, donde la variable de calidad no satisfacía los requerimientos habituales, pudo identificarse aplicando técnicas adecuadas, que debían realizarse acciones de mejora para que los procesos fueran capaces de cumplir con las especificaciones, si es que las mismas están ajustadas a la realidad. Por último se resalta la importancia de de la interacción universidad-empresa productiva, ya que el asesoramiento profesional especializado, les permitió contar con resultados no hubieran podido ser generados solamente por el personal interno y a la vez la problemática de la empresa impulsó el avance en temas metodológicos estadísticos de calidad.

IV- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Boethe, D.R. (2002) *Comments on "Process Capability Indices-A review 1992-2000"* by Johnson and Kotz. *Journal of Quality Technology*, 34, 45-50
- Barbiero,C.; Flury,M.I.; Pagura,J.; Quaglino,M.; Ruggieri,M. (2007) *"MEWMA strategies for multivariate control of production times"*. International Statistical Institute-Book of Abstract.
- Box, G. E. P.; Cox D. R. (1964) *"An Analysis of Transformations"*. *Journal of the Royal Statistics Society*, Series B (Methodological), 26, N°2, 211-252.
- Joglekar,A.M. (2003) *"Statistical Methods for Six Sigma. In R&D and Manufacturing"*. Wiley Interscience.
- Kotz, S.; Johnson, N.L. (2002) *"Process Capability Indices- A review, 1992-2000 . (With discussion)*. *Journal of Quality Technology*, 34, 32-37
- Lamprechet,J. (2005). *"Applied data Analysis for Process Improvement"*. ASQ Quality Press.
- Lehmann, E.L. and D'Abbrera, H.J.M (2006) *"Nonparametrics: Statistical Methods Based on Ranks"*. Springer.
- Montgomery, D.C. (2005). *"Introduction to Statistical Quality Control"*. Editorial Wiley.



Pearn, W.L.; Kotz, S. (2006). *"Encyclopedia and Handbook of Process Capability Indices"*. Editorial World Scientific.

Quaglino, M., Pagura, J.A., Lupachini, E., Dianda, D. (2005) *"Métodos estadísticos aplicados para la mejora de procesos. Experiencia en una PYME del gran Rosario"*. Actas XI Jornadas de Investigación en la FCEyE.

Quaglino, M., Pagura, J.A., Lupachini, E., Dianda, D. (2006) *"Estudio estadístico sobre tiempos de producción."* Informe de investigación. FCEyE

Quaglino, M., Pagura, J.A., Lupachini, E., Dianda, D. (2007) *"Estudios estadísticos para la mejora de tiempos de proceso"*. Actas 12º Encuentro Argentino de Mejora Continua. Sociedad Argentina pro-mejoramiento continuo (SAMECO).

Quaglino, M.; Ruggieri, M.; Flury, M.I.; Barbiero, C. (2008) *"Una experiencia de interrelación entre la Universidad e Industrias del Sector productivo Local"*. Actas 8º Congreso Internacional Retos y Expectativas de la Universidad, Nayarit, México.

Ramberg, J.S. (2002) *Comments on "Process Capability Indices -A review 1992-2000"* by Johnson and Kotz. *Journal of Quality Technology*, 34, 45-50