

Desarrollo de índices de capacidad de proceso para un perfil polinómico en una empresa de elaboración de salsas

Development of process capacity indexes for a polynomial profile in a sauce manufacturing company

Roberto Herrera Acosta, Stephanie Ruiz, Linda Salcedo

Universidad del Atlántico, Colombia

Resumen

Objetivo: Desarrollar los índices de capacidad de un proceso para un perfil polinómico en una empresa de elaboración de salsas, con lo que se pretende explicar los enfoques que se adquieren mediante la aplicación de un control estadístico para mejorar los procesos productivos, disminuyendo costos y ofreciendo productos competitivos en el mercado.

Metodología: La investigación utilizó técnicas de calidad, análisis, control de variables y características del producto, que aplicadas de manera combinada forman el control estadístico del proceso.

Resultados: Basado en los límites de especificaciones, se elaboró un perfil lineal para las variables independientes, estableciendo un mismo perfil lineal polinómico para correlacionar las variables de estudio (°brix y cloruro) en la elaboración de salsas para carnes.

Conclusiones: Este estudio ayuda a la toma de decisiones en una forma eficaz, ya que los ajustes a considerar en cada proceso establecen métodos, metas y un excepcional medio para verificar el comportamiento del sistema.

Palabras clave: Control, variable, proceso, °brix, cloruro, variabilidad.

Abstract

Objective: To develop the capacity indexes of a process for a polynomial profile in a sauce manufacturing company where it is intended to explain the approaches that are acquired through the application of a statistical control, to improve the productive processes, reducing costs and offering competitive products in the market.

Methodology: The research uses quality techniques, applying methods, analysis, control of variables and characteristics of the product, which applied in combination according to this research form the statistical control of the process.

Results: Based on the limits of specifications, a linear profile was elaborated for the independent variables, establishing a same polynomial linear profile to correlate the study variables (° brix and chloride) for the elaboration of sauces for meats.

Conclusions: This study aims to develop better control, which will help decision making in an effective way in terms of the adjustments to be considered in each process, establishing methods, goals and an exceptional means of verifying the behavior of the system.

Keywords: Control, variable, process, ° brix, chloride, variability

Open Access:

Recibido:

10 agosto de 2017

Aceptado:

5 diciembre de 2017

Correspondencia:

roberto jose herrera@gmail.com

stephanierulo@hotmail.com

linda.salcedo@hotmail.com

DOI

10.17081/invinno.6.2.3112



Introducción

En la actualidad las grandes industrias reconocen la necesidad de implementar, analizar e investigar sistemas y procesos que conlleven al cumplimiento de metas con relación a los productos ofrecidos en el mercado, en una búsqueda constante de mejoras en los procesos de producción para mantenerse competitivamente en dicho mercado.

Una estrategia que las empresas utilizan en este sentido es el control estadístico de la calidad, el cual es un método que se basa en la reducción sistemática de la variabilidad de aquellas características que más influyen en la calidad de los productos. Implementar el control estadístico de procesos permite a una empresa mejorar en concreto: la productividad, al hacer predecible el comportamiento de los procesos; la calidad de los productos, al reaccionar en tiempo real; satisfacer a los clientes al disminuir la variabilidad de los procesos; e investigar las causas de la variabilidad en los procesos debido a causas asignables.

Este trabajo tiene como objetivo aplicar el control estadístico a las variables °Brix y contenido de cloruro en una empresa de fabricación de salsas para carnes.

Para cumplir este propósito, se efectuó una recopilación de datos correspondientes a las variables que influyen en el sabor de la salsa para carne. Luego estos datos fueron tabulados en el software para la aplicación de las herramientas de control estadístico del proceso correspondiente.

Método

Para demostrar la aplicación del control estadístico de procesos se recolectaron datos históricos de dos variables de °Brix y Cloruro de una salsa para carne producida en una empresa situada en la costa atlántica colombiana que se dedica a la elaboración de productos alimenticios y a la maquila de marcas propias. El trabajo se realizó en tres (3) fases.

En la fase 1, se realizó una recopilación de datos de las variables de °Brix y contenido de Cloruro de la salsa para carnes, que fueron suministradas por el laboratorio de calidad de la empresa objeto de estudio, correspondientes a un histórico de nueve meses de información. En la fase 2, se tabularon los datos recopilados en una hoja de trabajo del software utilizado, para la posterior aplicación de las herramientas de control estadístico generadas con el fin de realizar diversos análisis y ejecutar las conclusiones del proceso. En la fase 3, se presentó la aplicación de las herramientas de control estadístico de proceso a la variable de °Brix y Cloruro, en específico, en esta fase se evaluaron intervalos de confianza, límites de tolerancia e índices de capacidad propuestos por Kane y Montgomery [1]

Enfocado en un comparativo de un perfil lineal [1], se realizó luego un perfil polinómico con el fin de determinar la eficiencia de este nuevo indicador respecto al lineal.

El presente estudio se puede clasificar según varios criterios de la siguiente manera:

•Según el tiempo de ocurrencia entre los hechos y el registro de los datos:

Es un estudio prospectivo, puesto que se recogen y analizan datos del presente y del pasado más reciente, con el fin de proponer mejoras hacia el futuro.

• Según el análisis y el alcance de los resultados:

Es un estudio descriptivo, porque se describen características fundamentales de fenómenos, situaciones o eventos observados en el objeto de estudio.

• Según los fines externos:

Es un estudio de investigación aplicada, debido a que no se persigue una utilización inmediata de los conocimientos y se confronta la teoría con la práctica.

Cabe mencionar que en este trabajo se llevaron a cabo varias entrevistas con los directivos y otros trabajadores de la empresa objeto del proyecto con el fin de recolectar y validar la información necesaria para su desarrollo.

Marco teórico

Índice de capacidad univariado

El primer índice de capacidad fue definido [2] mediante la siguiente ecuación:

$$cp = \frac{LES - LIE}{6\sigma} = (1)$$

Este índice fue diseñado para proveer una medida relativa de la magnitud de la variación total del proceso respecto de la variación permitida por especificación. Era deseable que este arrojara valores superiores a la unidad, ya que ello indicaría que el intervalo de variación natural del proceso es menor que la tolerancia especificada. Sin embargo, un aspecto desfavorable de este índice es que no toma en cuenta ninguna información relativa a la posición de la media del proceso respecto de las especificaciones. De este modo, es posible que en un proceso se obtenga un valor de C_p superior a la unidad, aun cuando el proceso no esté localizado estrictamente dentro del intervalo de especificación [2].

Para salvar la anterior deficiencia, se definieron varios índices alternativos que incluyen en su construcción medidas de divergencia respecto al centro nominal del proceso. Un ejemplo de estos es el índice, ya que, siempre que las especificaciones sean simétricas, captura tanto problemas en la variabilidad del proceso como problemas con el centrado respecto del objetivo especificado. Para especificaciones simétricas, el índice C_{pk} se define como [3]:

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{LES - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LEL}{3\sigma} \right\} (2)$$

Índice de capacidad multivariado

El índice de capacidad multivariado determina el ajuste de un producto a las especificaciones de diseño establecidas bajo el criterio del área de ingeniería. Generalmente, la evaluación de este indicador requiere que el supuesto de normalidad de cada una de las características de calidad monitoreadas se cumpla con parámetros conocidos, estimados en la Fase I de control, proceso de estabilización estadística [4].

Bothe [5] y Wierda [6] han desarrollado un índice de capacidad que evalúa características de calidad que intervienen en un proceso productivo, evidenciando en su propuesta el grado o proporción con que un producto puede cumplir integralmente con cada una de las especificaciones y requerimientos del mercado.

Basado en la proporción de cumplimiento de cada una de las características del proceso, el índice de capacidad para múltiples características se obtiene de la siguiente forma, donde ST_{pk} denota el valor de la j -ésima característica para $j: 1, 2, \dots, N$, p es el número de características y f es la distribución normal estándar:

$$S_{pk}^T = \frac{1}{3} \phi^{-1} \left[\frac{[\sum_{j=1}^p (2\phi(3S_{pk}) - 1) + 1]}{2} \right] \quad (3)$$

Desarrollo de índices de capacidad de proceso funcional para un perfil lineal simple

Según Nematí [1], al usar $C_p(x)$ como el índice de capacidad del proceso del perfil lineal simple, es posible evaluar la capacidad del proceso en cada nivel de la variable explicativa X ; capacidad que propone información detallada. Sin embargo, es necesario tener un valor único del índice de capacidad del proceso para un perfil lineal simple en todos los rangos de la variable explicativa para dar un juicio general al respecto. Para este propósito, se recomienda utilizar el área limitada entre $USL_y(x)$ y $LSL_y(x)$ para calcular $USL_y(x)$ y $LSL_y(x)$ así como el área limitada entre $UNTL_y(x)$ y $LNTL_y(x)$ para calcular $UNTL_y(x)$ y $LNTL_y(x)$. Por lo tanto, se propone la siguiente ecuación para determinar un valor único para el C_p de un perfil lineal simple:

$$C_p(L) = \frac{\int_{x_1}^{x_2} [USL_y(x) - LSL_y(x)] dx}{\int_{x_1}^{x_2} [UNTL_y(x) - LNTRL_y(x)] dx} \quad (4)$$

Los límites de proceso $UNTL_y(x)$ y $LNTL_y(x)$ para el caso polinómico se obtienen de la siguiente forma:

$$UNTL_y(x) = \mu + 3\sigma = ax^2 + bx + c + 3\sigma \quad (5)$$

$$LNTL_y(x) = \mu - 3\sigma = ax^2 + bx + c - 3\sigma \quad (6)$$

Donde μ es la ecuación que define las variables y σ es la raíz del cuadrado medio del error.

Los límites de especificación $USL_y(x)$ y $LSL_y(x)$ se obtienen de los intervalos de confianza, modificando la propuesta [1] para el caso polinómico, de la siguiente forma:

$$USL_y(x) = a_{0u} + a_{1u}x + a_{2u}x^2 \quad (7)$$

$$LSL_y(x) = a_{0l} + a_{1l}x + a_{2l}x^2 \quad (8)$$

El cálculo del Cpk para un perfil lineal simple se calcula de la siguiente manera:

$$Cpk = \min \left\{ \frac{\int_{x_1}^{x_2} [USL_y(x) - \mu_y(x)] dx}{\int_{x_1}^{x_2} [UNTL_y(x) - \mu_y(x)] dx}, \frac{\int_{x_1}^{x_2} [\mu_y(x) - LSL_y(x)] dx}{\int_{x_1}^{x_2} [\mu_y(x) - LNTL_y(x)] dx} \right\} \quad (9)$$

Antecedentes

La globalización ha impactado fuertemente los mercados mundiales, formando consumidores más analistas y exigentes. Debido a esto, en los últimos veinte años las empresas se han preocupado por ofrecer productos de alta calidad, lo que implica no solo el cumplimiento de todas las especificaciones requeridas por el diseño, sino también las necesidades demandadas por los clientes; solo así pueden ofrecer productos robustos con el propósito de fidelizarlos, además de lograr un éxito económico y mantener el producto a largo plazo en el mercado. Esta meta requiere que las empresas implementen herramientas de mejoramiento como el control estadístico de procesos en las áreas de la producción, y de esta manera, ofrecer productos realmente competitivos [4].

Algunos autores de gestión de calidad y control estadístico de calidad, tales como Genichi Taguchi, Edwards Deming, Kaoru Ishikawa, Walter Andrew Shewhart, entre otros destacados, coinciden en la necesidad de usar técnicas estadísticas que proporcionen un real estimativo del grado de cumplimiento de los requisitos y especificaciones. Para cubrir esta necesidad, existe un conjunto de técnicas estadísticas que, aplicadas en forma conjunta, estructuran lo que se conoce como el Control Estadístico del Proceso (CEP). Entre estas herramientas se encuentran la medición de los índices de capacidad de procesos [4].

Estos índices han sido utilizados en la industria manufacturera para proporcionar medidas numéricas sobre el potencial de un proceso y su rendimiento [6]. En forma continua, aun se utilizan en el sector productivo colombiano los índices de capacidad univariados, es decir, la evaluación del cumplimiento de una de las características de calidad del producto. Hace más de cincuenta años se recurre a este indicador; por el contrario, los indicadores multivariantes de procesos, con los que se realiza una medición simultánea de varias características de calidad del producto, son relativamente novedosos y escasamente aplicados en el sector productivo.

Justamente, en el marco de este último escenario, algunos autores [7-8] presentaron un índice de capacidad de proceso S_{pmk} que combina los beneficios de los índices S_{pk} de [9] y S_{pm} de [10]. Este índice S_{pmk} también tiene la ventaja de que posibilita al usuario observar si la varianza del proceso se incrementa o si el promedio del proceso se desvía de su valor objetivo T . Este índice es considerado el de mayor utilidad hasta el momento en los procesos con especificaciones de tipo bilateral. Se ha evidenciado, por ejemplo, que un estimador S_{pmk} asintóticamente insesgado, como también en condiciones generales, converge a una distribución normal $N \sim (0, s^2_{pmk})$ [8].

Los índices de capacidad multivariantes o multivariados aparecieron en la literatura de control de calidad desde la década de 1990. Durante este periodo, las propuestas planteadas asumieron en su mayoría normalidad multivariante en la información para el cálculo del índice de capacidad, como una generalización de sus análogos univariantes. Hay autores que revisaron en detalle tres métodos multivariantes [11, 12-14]. Pero, en general presentaron tanto un índice de capacidad S_p multivariante y un índice multivariante con valor objetivo S_{pmk} (M_{Sp} y M_{Spm}) [12] y formularon un índice de capacidad multivariante en una aplicación de cajas de proceso en donde el hiperrectángulo es el área de las especificaciones de diseño. En este caso, se reconoció la necesidad de evaluar las medidas de capacidad multivariante [14], basándose en un índice multivariante de tres componente [4]

Resultados

En esta investigación se desea conocer el índice de capacidad del proceso proponiendo la aplicación de una regresión polinomial a partir de una modificación a la propuesta planteada por R. Nemati et al, quienes aplicaron una regresión lineal [1].

Como ya se ha reiterado, se tomaron datos de una empresa de alimentos que fabrica salsa para carnes. Las variables objeto de estudio fueron ° Brix y Cloruro, mostrados en la Tabla 1, cuyas especificaciones son °Brix 29,0 – 32,0 y Cloruro 2,30 - 2,80

Estas variables se tomaron porque determinan las características fisicoquímicas del producto final y los datos fueron recolectados en un periodo de 9 meses.

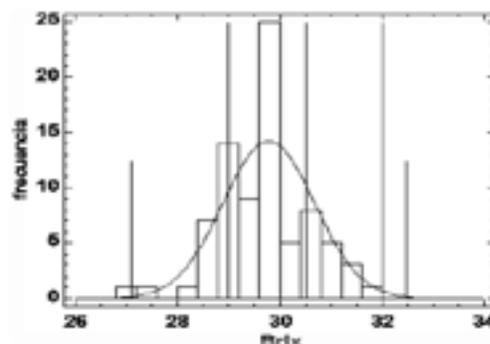
Tabla 1. Mediciones parciales codificadas de las variables °Brix y Cloruro históricas

No.	°Brix	Cloruro	No.	°Brix	Cloruro
1	29,8	2,61	41	28,8	2,32
2	29,2	2,46	42	30	2,32
3	29,3	2,46	43	28,5	2,46
4	30,2	2,46	44	29	2,61
5	29,9	2,61	45	28,4	2,61
6	29,9	2,48	46	29,3	2,6
7	29	2,46	47	27,2	2,6
8	30	2,61	48	30	2,6
9	29,7	2,75	49	30,3	2,61
10	29,9	2,36	50	30	2,6
11	29,2	2,46	51	29,9	2,59
12	31,5	2,46	52	28,5	2,61
13	29,2	2,46	53	29,5	2,6
14	30,6	2,46	54	31,5	2,61
15	29,8	2,32	55	29,4	2,61

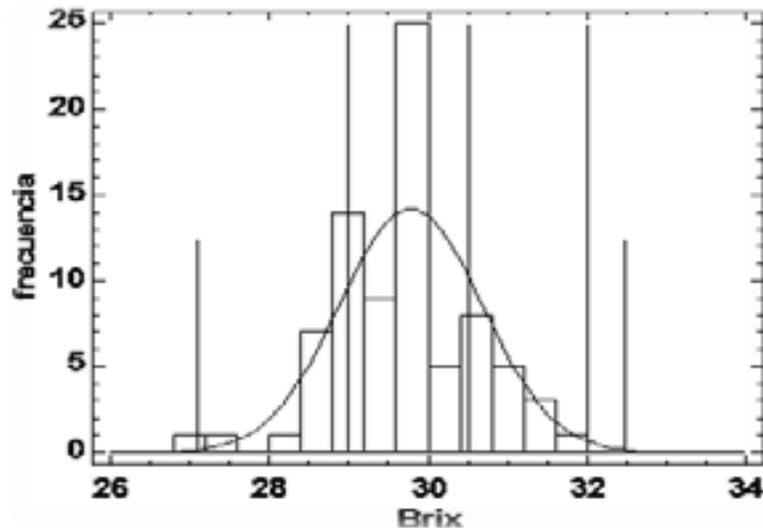
Análisis de índice de capacidad univariado

Inicialmente, se determinaron los índices de capacidad univariados tradicionales, ecuación (1), para cada variable de forma independiente como se observa en las Figuras 1 y 2, obteniendo C_p variable °Brix: 0,59 y un C_p de la variable Cloruro: 0,77.

Figura 1. Índice de capacidad para la variable Brix
 $C_p = 0,59$



Fuente: Software estadístico.

Figura 2. Índice de capacidad para la variable Brix $C_p = 0.77$ 

Fuente: Software estadístico.

Al aplicar el índice de capacidad de forma independiente, se encuentra que por ser menor de 1, el proceso no cumple las especificaciones para ninguna de las 2 variables.

Pero, a pesar de que los resultados obtenidos hasta este punto indican que las variables no cumplen las especificaciones; en el campo de proceso esto es diferente, ya que las variables objeto de estudio cumplen las especificaciones estipuladas por la empresa objeto de estudio.

Análisis de índice de capacidad multivariado

Para calcular el índice de capacidad multivariado se tomó la propuesta de Bothe D. [5] y Wierda [6], efectuando el cálculo de la ecuación (3) se obtiene un valor de 0,2690, lo que indica que, por ser menor de 1, el proceso no cumple las especificaciones.

Análisis de índice de capacidad para un perfil polinómico

Las variables tienen una relación fuerte con un R_{cuadrado} de 0.951771, lo que garantiza una alta correspondencia entre las mismas.

La ecuación del modelo polinómico ajustado para el caso de estudio es $\text{Brix} = 26,948 + 1,66607 \cdot \text{Cloruro} - 0,218416 \cdot \text{Cloruro}^2$.

Se calculó el índice de capacidad multivariante modificando la propuesta de R. Nematy et al por un modelo polinómico que se denota como C_{pP} . Para tal fin se determinaron los límites de especificación superior e inferior del proceso (USL y LSL), y los límites de proceso superior e inferior (UNTL y LNLT). Así, los límites USL y LSL se obtienen con los intervalos de confianza del proceso, los cuales son:

Tabla 2. Intervalos de confianza

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
CONSTANTE	26,948	1,08723	24,7831	29,113
Cloruro	1,66607	0,493219	0,683946	2,6482
Cloruro^2	-0,218416	0,0287842	-0,275733	-0,1611

Fuente: Software estadístico.

De este modo se obtuvieron las ecuaciones $USL=29,113+2,6482x-0,1611x^2$ y $LSL=24,7831+0,683946x-0,275733x^2$, donde μ es la ecuación de la variable Y , y σ es la raíz del cuadrado medio del error, es decir, 0,9251.

Las ecuaciones de los límites del proceso, ecuaciones (5) y (6), evaluadas en la información son respectivamente: para el límite superior e inferior $UNTL=29,723+1,66607x-0,218416x^2$ y $LNTL=24,172+1,66607x-0,218416x^2$.

Enseguida, se calcula el índice de capacidad del proceso teniendo en cuenta las especificaciones de la variable Cloruro de la empresa, las cuales son (2,3-2,8) y basados en la ecuación (4), se modifica a un modelo lineal polinómico:

$$CpP = \frac{\int_{2,3}^{2,8} [29,113 + 2,6482x - 0,1611x^2 - 24,7831 - 0,683946x + 0,275733x^2] dx}{\int_{2,3}^{2,8} [29,723 + 1,66607x - 0,218416x^2 - 24,172 - 1,66607x + 0,218416x^2] dx}$$

Luego, efectuando los cálculos correspondientes a la anterior razón, se obtuvo un índice de capacidad con perfil polinómico de $CpP=1,816$, lo que indica que el proceso cumple satisfactoriamente con las especificaciones establecidas.

A continuación, se calculó el $CpkP$, ecuación (9), con el fin de identificar hacia dónde se encuentra desplazado el proceso.

$$CpkP = \min \left(\frac{\int_{2,3}^{2,8} [29,113 + 2,6482x - 0,1611x^2 - 26,948 - 1,66607x + 0,218416x^2] dx}{\int_{2,3}^{2,8} [29,723 + 1,66607x - 0,218416x^2 - 26,948 - 1,66607x + 0,218416x^2] dx}, \frac{\int_{2,3}^{2,8} [26,948 + 1,66607x - 0,218416x^2 - 24,7831 - 0,683946x + 0,275733x^2] dx}{\int_{2,3}^{2,8} [26,948 + 1,66607x - 0,218416x^2 - 24,172 - 1,66607x + 0,218416x^2] dx} \right)$$

Los valores de los indicadores de centramiento $C_{pk} = \min\{1,816, 1,814\}$, indican un proceso centrado.

El trabajo continuó con las estimaciones del indicador en línea, seleccionando información para un periodo a corto plazo, que arrojó los siguientes resultados de los límites del proceso $UNTL = 136,14 - 83,5325x + 16,7249x^2$ Y $LNTL = 130,068 - 83,5325x + 16,7249x^2$.

Con todo ello se procedió a calcular el Índice de capacidad del proceso, así:

$$\hat{C}_{pP} = \frac{\int_{2,3}^{2,8} [29,113 + 2,6482x - 0,1611x^2 - 24,7831 - 0,683946x + 0,275733x^2] dx}{\int_{2,3}^{2,8} [136,14 - 83,5325x + 16,7249x^2 - 130,068 + 83,5325x - 16,7249x^2] dx}$$

La estimación del índice polinómico en línea fue de $C_{pP} = 1,66$, lo cual sugiere que el proceso cumple las especificaciones. No obstante, comparado con el índice calculado con los datos en la fase I, se observa una ligera disminución de la calidad. Aunque se cumple con los requerimientos de diseño, ello implica una alerta que debe generar acciones correctivas y preventivas inmediatas. De igual manera, se determina el índice de capacidad de centramiento C_{pkP} , ecuación (4), con el fin de identificar hacia donde se encuentra desplazado el proceso con los datos nuevos.

$$C_{pkP} = \min \left\{ \frac{\int_{2,3}^{2,8} [29,113 + 2,6482x - 0,1611x^2 - 133,104 + 83,5325x - 16,7249x^2] dx}{\int_{2,3}^{2,8} [136,14 - 83,5325x + 16,7249x^2 - 133,104 + 83,5325x - 16,7249x^2] dx}, \frac{\int_{2,3}^{2,8} [133,104 - 83,5325x + 16,7249x^2 - 24,7831 - 0,683946x + 0,275733x^2] dx}{\int_{2,3}^{2,8} [133,104 - 83,5325x + 16,7249x^2 - 130,068 + 83,5325x - 16,7249x^2] dx} \right\}$$

El resultado final obtenido es $C_{pkP} = \min\{1,85, 1,47\}$, lo que implica $C_{pkP} = 1,47$, es decir, que el proceso se encuentra sesgado hacia el límite de especificación inferior.

Conclusiones

Al realizar el cálculo del índice de capacidad univariado para las variables de forma independiente resultó que ninguna de las dos cumple con las especificaciones. Posteriormente, se realizó un índice de capacidad multivariado, obteniendo el mismo resultado; no obstante, al aplicar una regresión polinomial se halla que los datos tienen buena correlación. Por este motivo, se procedió a calcular el índice de capacidad con un perfil polinomial, lo que arrojó resultados satisfactorios, indicando que esta técnica resulta más eficiente para el cálculo del índice de capacidad [15 - 16].

Cabe anotar que en la fase de control se encontró que el proceso cumple las especificaciones, pero comparándolo con el índice de capacidad de los datos históricos desmejoró. Esto se debe a que las máquinas aún no se les había efectuado el mantenimiento preventivo. En el mes de octubre hubo un incremento de la producción, lo que generó una extensión en la jornada de trabajo y modificación de turnos, provocando nuevas contrataciones a operarios con poca experiencia y conocimiento.

Referencias bibliográficas

1. R. Nemat Keshtelia, R. Baradaran Kazemzadeha, A. Amiri and R. Noorossana "Developing functional process capability indices for simple linear profile", *Scientia Iranica, Sharif University of Technology*, vol. 21, n. 23, pp. 1044- 1050, 2014.
2. D. Dianda, M. Quaglino, J. Pagura, M. Castro "Efecto del error de medición en índices de capacidad de procesos", *Saberes*, vol. 8, n. 2, pp. 91-110, 2016.
3. V.E. Kane, "Process capability indices", *Journal of Quality Technology*, vol. 34, pp. 1-19, 1986.
4. A. Verbel, R. Herrera, K. Maestre. "Aplicación de nuevas propuestas multivariantes para medir la capacidad de un proceso", *Ingeniare*, No. 21, pp. 31-42, 2016.
5. D. Bothe, "A Capability study for an entire product", *Rev. ASQC Quality Control Transactions*, Vol. 46, pp. 921-925, 1991.
6. S. J. Wierda, "Multivariate statistical process control—recent results and directions for future research", *Rev. Stat. Neerl*, Vol. 48, n. 2, pp. 147-168, 1994.
7. W.L. Pearn, S. Kotz y N.L. Johnson, "Distributional and inferential properties of process capability indices", *Rev. Journal of Quality Technology*, Vol. 24, n. 4, pp. 216-233, 1992.
8. S.M. Chen y N.F. Hsu, "The asymptotic distribution of the process capability index", *Rev. Communications in Statistics: Theory and Methods*, Vol. 24, n. 5, pp. 1279-1291, 1995.
9. V.E. Kane, "Process capability indices", *J. Qual. Technol*, vol.18, n. 1, pp. 41-52, 1986.
10. LK. Chan, S.W. Cheng y F.A. Spiring, "A new measure of process capability", *Rev. Journal of Quality Technology*, Vol. 20, n°. 3, pp. 162-175, 1988
11. C.H. Wang, "Constructing multivariate process capability indices for short-run production", *Rev. Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 26, pp. 1306-1311, 2005.
12. Taam, W., Subbaiah, P. y Liddy, J. W, "A note on multivariate capability indices", *Journal of Applied Statistics*, vol. 20, n°. 3, pp. 339-351, 1993.
13. H. Chen, "A multivariate process capability index over a rectangular solid zone", *Rev. Statistica Sinica*, Vol. 4, n. 2, pp. 749-758, 1994.
14. H. Shahriari, N. F. Hubele y F.P. Lawrence, "A multivariate process

capability vector", Proceedings of the 4th Industrial Engineering Research Conference, vol. 1, pp. 304-309, 1995.

15. 2. P.A. Sánchez, F. Ceballos y G. Sánchez-Torres, "Análisis del proceso productivo de una empresa de confecciones: modelación y simulación", *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 25, n°. 2, 2015. DOI: 10.18359/rcin.1436

16. H. G. Hernandez Palma, D. Sierra Martinez y D. Cardona, "Enfoque basado en procesos como estrategia de dirección para las empresas de transformación", *Saber, Ciencia y Libertas*, vol. 11, n°. 1, 2016.