

## Análisis de robustez de procesos para evaluar factibilidad de implementar control en línea

José Manuel Pizarro León<sup>1</sup>, Rey David Molina Arredondo<sup>1</sup>, Roberto Romero López<sup>1</sup>,  
Oscar Nuñez Ortega<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

### Resumen

El diseño de parámetros robustos presentado por Taguchi es una herramienta que ha sido ampliamente usada en la industria para mejorar la calidad, al reducir la variabilidad en los procesos y productos, aprovechando las interacciones entre los factores de control y los factores de ruido. En el presente artículo se presenta una breve descripción de los enfoques más importantes que se han presentado para mejorar la calidad de productos mediante el uso de diseño robusto.

**Palabras clave:** Diseño robusto, factores de ruido, control de calidad en línea, función de pérdida.

### Introducción

El uso del diseño de robustos es una técnica, propuesta por Taguchi para mejorar la calidad de productos para reducir su variabilidad, esta técnica se enfoca en hacer el proceso insensible a los factores de ruido. Los factores de ruido pueden ser factores ambientales tales como condiciones de temperatura, condiciones de la materia prima, deterioro, entre otros; y son las causantes de variación en el proceso (Besterfield, 2009, pág. 91)

El presente trabajo tiene como objetivo el de desarrollar una estrategia de control y un análisis de robustez para conocer la factibilidad de implementar dicha estrategia en una planta manufacturera en un proceso de manufactura desde el punto de vista económico (costo-beneficio). Y pretende que en la empresa donde se desarrolle el proyecto si es factible (desde el punto de

vista económico) el uso de estrategias de control. Los beneficios que proporciona esta estrategia de control son muchos, estableciendo un equilibrio en la determinación de los parámetros de un proceso en una empresa determinada reduciendo los costos de un proceso.

### Antecedentes

El desarrollo de las bases de los fundamentos del diseño robusto se debe al Dr. Genichi Taguchi científico japonés quien pasó gran parte de su vida profesional en la investigación para mejorar la calidad y de productos de manufactura. (Ranjit Roy, 2001, pág. 9) Gracias a sus investigaciones en los años 1950's y principios de los años 1960's. En reconocimiento a su labor de investigación y aplicación de dicho método recibió el premio Deming en cuatro oportunidades. Es uno de los premios más

prestigiados dentro del ámbito del área de calidad. En 1986 recibió La medalla Willard F. Rockwell por combinar métodos estadísticos y de ingeniería para lograr mejoramientos de manera muy rápida en costo y calidad mediante la optimización de diseño de producto y del proceso de manufactura. En 1990 recibió el listón azul por parte del emperador de Japón por su contribución en la industria y la medalla Shewhart por parte de la asociación Americana de Calidad en 1996. El Dr. Taguchi en 1997 fue electo miembro honorario de dicha asociación y tercer japonés en estar en el salón de la fama del área automotriz en Dearborn, Michigan. (Taguchi, Chowdhury, & Wu, Taguchi's Quality Engineering Handbook, 2005)

El método de diseño robusto puede ser aplicado a una gran variedad de áreas como son: la electrónica, la automotriz, la fotografía, la nanotecnología, la industria del calzado, la aeronáutica, entre muchas otras. El método de diseño robusto sigue en permanente evolución. La investigación activa en Estados Unidos, Japón y otros países se espera que la aplicación de este método y el método mismo se desarrolle ampliamente en las próximas décadas. (Phadke, 1989, págs. 2-3) Por ejemplo en la Universidad de Bagdad se ha utilizado el método de diseño de Taguchi junto con el método de redes artificiales neuronales para la solución de procesos de soldadura. (Abid Al-sanib, A Hamza, & Al-kazaz, 2010) Por otro lado, las compañías pioneras en Estados Unidos en aplicar la metodología Taguchi fueron: Bell Laboratories de AT&T, Ford y Xerox principalmente. (Bhote & Bhote, 2000, pág. 75)

Genichi Taguchi realizó un gran esfuerzo para llevar a un terreno práctico el diseño experimental. Introdujo, además, conceptos revolucionarios que afectaron la forma de medir la calidad y su costo. Para Taguchi, la calidad, antes que por la satisfacción de especificaciones, debe medirse en términos de la así llamada *función de pérdida*, que establece la pérdida que la sociedad sufre como consecuencia de la mala calidad. Un producto de calidad es para el cliente aquél que cumple con las expectativas de *performance* o rendimiento cada vez que lo utiliza, sin fallas y en cualquier condición o circunstancia. Los productos que no cumplen con dichas expectativas causan pérdidas, tanto para los clientes y los productores, como para, eventualmente, el resto de la sociedad. (Evans & Lindsay, 2008, págs. 112-114)

Por esto, para Taguchi, la calidad debe medirse en función de la pérdida que causa. Mientras mayor es la pérdida que se produce, menor es la calidad. Pero, aunque en un sentido más exigente que en el concepto tradicional, las especificaciones también son clave para Taguchi, y calidad significa conformidad con las especificaciones. Apartarse de las especificaciones equivale a ocasionar al cliente y, en última instancia, a la sociedad, una pérdida (Guajardo Garza, 2008, págs. 76-80). Taguchi se apartó de la sabiduría convencional, que suponía que calidad equivalía a producir dentro de los márgenes de tolerancia, y postuló que el costo de la mala calidad se incrementa con el alejamiento del valor de diseño, produciendo una pérdida para el cuerpo social. (El-Haik & Mekki, 2008, págs. 357-

360) La función de pérdida vale cero cuando el desvío con respecto al parámetro objetivo es nulo y se incrementa cuadráticamente cuando los valores de los productos fabricados se acercan a los límites de tolerancia. En otras palabras, los productos cercanos a los límites de tolerancia son productos casi defectuosos y los gerentes deben trabajar para reducir la variabilidad de sus procesos de producción. La función de pérdida se define como:

$$L(y) = k(y - T)^2 \quad (1)$$

Dónde:

$L(y)$ : indica la pérdida (en unidades monetarias) que sufre la sociedad;

$k$ : es una constante específica de cada caso considerado;

$T$ : es un valor objetivo que la dimensión de interés debe tener ( $T$  mide la calidad nominal o de diseño);

$y$ : es el apartamiento que la dimensión de interés presenta con respecto al

Valor objetivo,  $T$ .

En contraste con el pensamiento tradicional sobre la calidad, que solo penaliza los valores de  $y$  que superan los límites de tolerancia, Taguchi considera que todo apartamiento del valor objetivo es un costo para la sociedad y como tal debe ser penalizado. (Wu & Wu, 2000, págs. 163-177)

### Planteamiento del Problema

En algunos procesos la característica de calidad se ve influenciada por condiciones

de ruido (desgaste, temperatura, humedad entre otros). Estos factores de ruido pueden ser modelados por algunas series de tiempo. Cuando esto sucede el diseño de parámetros suele ser deficiente. (Joseph, 2003, págs. 2-3) El diseño robusto de parámetros busca hacer un proceso insensible al ruido utilizando apropiadamente la selección de los niveles de control de los factores de ruido. Considerando el siguiente ejemplo, considerar el siguiente modelo:

$$y_t = 10 + 2x_1 - q_t - 0.5r_t + x_2r_t + \epsilon_t \quad (2)$$

Donde  $y$  es la salida en un periodo de tiempo,  $(x_1, x_2)$  son los factores de control y  $(q, r)$  son los factores de ruido y  $\epsilon$  es el error aleatorio causado por otros factores de ruido en un proceso. Para efectos de prácticos se consideran las variables  $q, r$ , y  $\epsilon$  independientes con media 0 y varianza 1. Suponer inicialmente que el proceso se ajusto a  $(x_1, x_2) = (0, -1)$  para alcanzar un valor objetivo promedio de 10 el cual genera una varianza de 4.25. La solución en el diseño de parámetros robusto es ajustar  $x_2$  a 0.5. Al efectuar este cambio podemos ver que el efecto de  $r$  en  $y$  es eliminada. Ya que la varianza en  $y$  se reduce a 2. Porque  $q$  no interactúa con  $x_1$  o con  $x_2$ , este acercamiento no puede reducir o eliminar las variaciones causadas por este factor de ruido. En tales casos el diseño de tolerancias es regularmente usado como un remedio de medición. Es claro que la solución del diseño robusto de parámetros trabaja solo y cuando existe un control de las iteraciones de ruido.

Una estrategia de costo-beneficio será utilizar el diseño de parámetros robusto para hacer de un proceso tan robusto como sea posible y posteriormente utilizar un sistema de control o diseño de tolerancias para aún más mejorar el proceso.

Sin embargo, el uso de estrategias de control ocasiona un costo adicional y aumenta el costo unitario de manufactura. Las empresas manufactureras deberán de tener un criterio en base a un estudio de robustez para saber cuándo es conveniente introducir esta técnica de control. Es decir; antes y después de implementar el diseño robusto cuantificar la reducción de la variabilidad y poder estimar de manera monetaria el costo-beneficio de la implementación de técnicas de control.

### **Objetivos**

Desarrollar una estrategia de control y un análisis de robustez para conocer la factibilidad de implementar dicha estrategia en una planta manufacturera en un proceso de manufactura desde el punto de vista económico (costo-beneficio).

Desarrollar un método de control para reducir la variabilidad en un proceso y posteriormente concluir si este método es factible implementarlo después de medir el costo beneficio que este método puede generar a la empresa.

### **Hipótesis**

Con base a la utilización de la metodología Taguchi en el desarrollo (desde el punto de vista económico) el uso de estrategias de control nos permitirá disminuir la

variabilidad y costo en un proceso de manufactura.

El análisis bayesiano nos permitirá incluir la incertidumbre en los parámetros y el cálculo de la probabilidad de obtener valores del cuadrado medio de la desviación menor a una cantidad de criterio específica.

### **Preguntas de Investigación**

¿Cómo definir un criterio o parámetro de referencia acorde a las probabilidades de reducir cierta cantidad de variabilidad en un proceso?

¿Cómo medir la probabilidad de obtener un MSD bajo con cada estrategia?

¿Qué tan grande deberá ser esta diferencia de probabilidad?

### **Justificación**

El presente trabajo va a permitir a la empresa reducir la variabilidad a través de estrategias de control para obtener un beneficio en la reducción del costo. En la actualidad la importancia de reducir los costos ha sido un tema en el que se han dedicado grandes esfuerzos. A pesar de que este trabajo es un tema estudiado, los beneficios que proporciona esta estrategia de control son muchos, estableciendo un equilibrio en la determinación de los parámetros de un proceso. Los beneficios que se obtienen son:

1. Reducción de costos para la empresa.
2. Reducción de paros de producción por falsas alarmas.

3. Reducción de artículos defectuosos que pueden llegar al consumidor.
4. Mejora del servicio al cliente e incremento de la confianza en la empresa.

Esta es la razón que nos lleva a realizar el presente estudio.

## Alcance y Delimitación

El alcance de esta investigación es el de presentar una propuesta mediante un estudio que permita hacer un análisis-beneficio desde el punto de vista económico utilizando estrategias de control y de robustez.

## Marco Teórico

En la siguiente sección se presentarán las fases teóricas que sustentan la presente investigación.

### Importancia del diseño robusto

Para Taguchi, es posible incorporar la calidad en los productos desde su diseño, sin aumentar su costo; los problemas deben eliminarse en el laboratorio de diseño, no en la fábrica o en el campo. Según esta perspectiva, es necesario diseñar productos robustos que toleren variaciones en el proceso de producción y durante el servicio de mantenimiento. (Chung Weng, Yang, & Elsherbini, 2007) Los métodos estadísticos deben seleccionar los factores importantes que afectan el diseño. Taguchi establece su metodología para:

1. Diseñar productos y procesos robustos a las condiciones ambientales;
2. Diseñar y desarrollar productos robustos a la variación en sus componentes;
3. Minimizar la variación alrededor de un valor objetivo.

La ingeniería de la calidad de Taguchi combina métodos estadísticos y de

ingeniería para optimizar los procesos de diseño y fabricación de modo que aumente la calidad y se reduzcan los costos de los productos. El diseño de experimentos juega un papel esencial en el enfoque de Taguchi, pues ayuda a identificar los factores que más intervienen en la generación de problemas de calidad o, alternativamente, los factores que más contribuyen a lograr resultados positivos. A lo largo de este proceso, se fortalece la cooperación entre diversos niveles y áreas de la empresa. (Roy, 1990, págs. 7-14)

### Conceptos

a) La Robustez es la característica de un producto cuando es insensible a los efectos de fuentes de variación (ruido).

b) Los factores de ruido (FR) son las causas que hacen que una característica funcional se desvíe de su objetivo. Existen varios tipos de “ruido”:

1. FR Externo (se representa fuera del producto, como la temperatura del día, el error humano, las fluctuaciones de voltaje, entre otros).

2. FR Entre-productos (relacionado con la variación inherente del proceso).
3. FR Deterioración (es la variación interna, expresada como, por ejemplo, la diferencia en vida de un producto).

La variación puede reducirse a través de eliminar la causa, o evitar que sea fuente de variación afecte al producto. (Escalante Vazquez, 2003, pág. 379)

c) La variación observada en las respuestas de un proceso se basa fundamentalmente en la característica de un producto final, está influenciada por muchos subsistemas distintos pudiendo estar cada subsistema a su vez compuesto por otros subsistemas. Cada uno de estos subsistemas está formado como ya hemos visto por un entorno, unas entradas, un proceso y una respuesta. Estas respuestas están influidas por muchos factores distintos. (Vilar Barrio, 1999, pág. 21)

Fundamentalmente, las cinco fuentes más importantes de variación son las siguientes:

- Hombres: experiencia, motivación, formación, instrucción.
- Máquinas: edad, calidad, estado de mantenimiento.
- Materiales: características dimensionales, físicas, heterogeneidad.
- Métodos: efectividad, rendimiento.
- Entorno: presión, temperatura, humedad, vibraciones.

### *El enfoque de Taguchi*

Taguchi presenta tres etapas en el diseño de un producto o de un proceso (William T. Truscott Ph.D., 2003, págs. 109-116) :

1. Diseño del sistema
2. Diseño de los parámetros y
3. Diseño de las tolerancias.

En el diseño del sistema se determina la configuración básica de los componentes. Por ejemplo, en una línea de acondicionamiento de comprimidos, el diseño del sistema incluye la determinación de los materiales y el diseño del sistema de líneas que realizarán el empaque, con todos sus componentes. En el diseño de los parámetros, se determinan los niveles o valores de los factores controlables (parámetros de diseño, como la presión aplicada) para minimizar el efecto de los factores incontrolables en las características del producto terminado, es decir, en nuestro ejemplo, los comprimidos envasados, con su prospecto y caja. Finalmente, el diseño de las tolerancias apunta a reducir la varianza en las características del producto terminado cuando la reducción lograda en el diseño de los parámetros no es suficiente. (Sleeper, 2006, págs. 685-704)

El diseño experimental debería aplicarse fundamentalmente al diseño de los parámetros y al diseño de las tolerancias. Fue un logro de Taguchi el haber destacado la importancia de aplicar el diseño experimental en las etapas upstream del proceso de creación, fabricación y puesta en el mercado de un nuevo producto. También es clave en su enfoque (aunque no haya sido

inventado por él) el concepto de robustez; un producto es robusto cuando se comporta bien aún en condiciones no controlables.

#### *Métodos recomendados por Taguchi*

Para llevar a la práctica sus conceptos, Taguchi recomienda métodos que se apartan parcialmente de los usados en el diseño de experimentos clásico; la terminología que utiliza también es algo distinta. (Taguchi & Jugulum, *The Mahalanobis-Taguchi Strategy*, 2002, págs. 8-10). En primer lugar, Taguchi divide los factores de un experimento en factores controlables y factores incontrolables, o ruido. Según la metodología de diseño de los parámetros, Taguchi recomienda seleccionar dos diseños experimentales, uno para los factores controlables y otro para el ruido. En general, estos diseños son del tipo ortogonal, descrito anteriormente. Los diseños se combinan en el layout del diseño de los parámetros, un esquema de dos componentes:

-Arreglo de los factores controlables (arreglo interior);

-Arreglo de los factores no controlables (arreglo exterior).

Para el análisis de datos, Taguchi (Taguchi, *Engineering Methods to Optimize Costs*, 1987, págs. 143-183) recomienda evaluar en el arreglo interior la respuesta promedio de cada corrida del experimento y analizar la variación de los resultados con un ratio señal-ruido apropiado. Estas relaciones se derivan de la función de pérdida cuadrática

presentada anteriormente. Se consideran óptimos los niveles de los factores que maximicen un ratio señal-ruido adecuado. Estos ratios difieren según que el objetivo del experimento sea reducir la variabilidad alrededor de un valor objetivo determinado, o producir un efecto resultante lo mayor posible, o, inversamente, producir el menor efecto posible. (Taguchi, *Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Costs*, 1987)

En definitiva, el objetivo principal de la ingeniería en general es alcanzar mejoras de rendimiento sostenibles ante cualquier condición *downstream* (Ver Figura 1). Esto es lo que se llama robustez. Quizás uno de los mayores desafíos para Taguchi consista en cómo medir la robustez ya que, solo si logramos hacerlo, podremos desarrollar tecnologías "a prueba de ruido". Taguchi mide la robustez con el ratio señal-ruido. Mientras más robusta es una tecnología, más fuerte es la señal que emite contra cualquier ruido externo que trate de inhibir la fuerza de la señal.

Para Taguchi, el uso de las relaciones señal-ruido elimina en general la necesidad de examinar las interacciones entre los factores controlables y los factores de ruido, si bien el examen de estas interacciones puede ocasionalmente mejorar la comprensión de los procesos estudiados. Finalmente, dado que los arreglos no siempre se corren completos, por razones de economía, es posible realizar experimentos confirmatorios. (Ross, 1996, págs. 203-213)

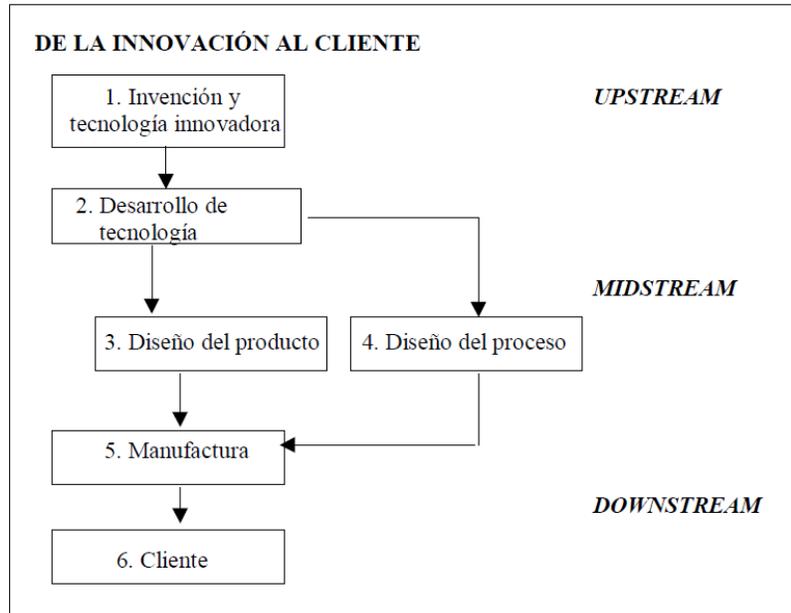


Figura 1. Esquema de actividades de una empresa desde la invención del producto hasta su llegada al mercado. Fuente: Adaptado de (Ealey, 1992).

*Método de la respuesta de superficie dual.*

En el caso de la Metodología de Superficie de Respuesta se ha demostrado que es una técnica muy utilizada en los diferentes campos de la investigación, (Montgomery, 2001, pág. 492) en los años 1950's y 1960's Box y sus colegas (Myers, Montgomery, & Anderson-Cook, 2009) desarrollaron varias herramientas para el análisis del diseño experimental cuyo término se denomina metodología de superficie dual. Este método fue muy utilizado sobre todo en las áreas de industria química, alimenticia y textil. El método de respuesta Dual es una combinación entre el Diseño de Parámetros Robustos propuesto por Taguchi y el Método de superficie de respuesta propuesto por Box al inicio de los años 50 del siglo pasado, este método fue inicialmente presentado por (Myers & Vining, 1990) como una alternativa al método Taguchi y consiste en modelar de

manera separada la media y la desviación estándar, para después encontrar los niveles de las variables de control que den como resultado un valor deseado de la media y con una variación pequeña. (Molina Arredondo & García Alcaráz, 2012) La Metodología de Superficies de Respuesta (RSM) (Myers, Montgomery, & Anderson-Cook, 2009) es un conjunto de técnicas matemáticas utilizadas en el tratamiento de problemas en los que una respuesta de interés está influida por varios factores de carácter cuantitativo. El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta y, a continuación, determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos. El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta. (Allen, 2006, págs. 325-326)

### *Ajustes estadísticos de procesos en línea.*

La diferencia entre diseño de parámetros e ingeniería de calidad en línea es que en el diseño de parámetros, los parámetros de un proceso son ajustados a ciertos niveles para que la variabilidad se reduzca. El diseño de parámetros es usado durante la manufactura para modificar las condiciones de la manufactura y así reducir la variabilidad. Pero, en la aplicación de los procesos en línea es diferente. Un cierto nivel de un parámetro en particular es modificado en un

cierto periodo de tiempo dependiendo de la situación de manufactura para ajustar el nivel de calidad a un valor objetivo. Cuando existe gran influencia de los factores de ruido en el proceso, el uso de diseño de parámetros por si solo puede no ser efectivo y una estrategia de control en línea puede ser usado para compensar el efecto del ruido. Esta estrategia de control consiste en hacer ajustes de las variables de control en línea para eliminar la tendencia entre la salida y un valor final. (El-Haik & Roy, 2005, págs. 313-315).

## **Materiales y Método**

Los materiales a utilizar son:

Software R Project para aplicación Estadística y Gráficos desarrollado por Lucent Technologies. Material de apoyo. (Cano, Moguerza, & Redchuk, 2012)

Software Minitab para aplicación Estadística y Gráficos de la compañía Minitab Inc<sup>®</sup>. Material de apoyo. (Henderson, 2011)

En lo que se refiere al método, se propone lo siguiente:

1. Identificación de factores de ruido, de control y característica de calidad.

2. Cálculo de la función de pérdida.
3. Efecto de ruido y de control.
4. Estimación de los parámetros de modelo de series de tiempo para los factores de ruido.
5. Desarrollo de estrategia de control.
6. Cálculo de la probabilidad de cumplir con la tolerancia con control en línea y sin control en línea.
7. Desarrollo del criterio de decisión (Costo beneficio).
8. Conclusiones.

## **Resultados**

El modelo desarrollado de estrategia de control y de robustez va a permitir si es el adecuado para la toma de decisión si es factible la implementación del mismo. Esto dependerá de los resultados obtenidos

basándose en la hipótesis establecida anteriormente y preguntas de investigación si realmente se encontraron soluciones para dichas preguntas.

## Referencias

- Abid Al-sanib, P., A Hamza, M., & Al-kazaz, A. (2010). *TAGUCHI EXPERIMENTAL DESIGN AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK SOLUTION OF STUD ARC WELDING PROCESS*. Baghdad university, Mechanical Eng. Dept. Baghdad: Journal of Engineering College of engineering .
- Allen, T. T. (2006). *Introduction to Engineering Statistics and Six Sigma*. Colombus, OH 43210-1271, USA: Springer-Verlag London Limited.
- Besterfield, D. (2009). *Control de Calidad* (Octava Edición ed.). 53519, Naucalpan de Juárez, Estado de México: Pearson Prentice Hill.
- Bhote, K., & Bhote, A. (2000). *World Class Quality Using Design of Experiments to Make It Happen* (SECOND EDITION ed.). 1601 Broadway, New York, NY 10019: American Management Association.
- Cano, E., Moguerza, J., & Redchuk, A. (2012). *Six Sigma with R Statistical Engineering for Process Improvement*. New York 2012: Springer New York Heidelberg Dordrecht London.
- Chung Weng, W., Yang, F., & Elsherbeni, A. (2007). *Electromagnetics and Antenna Optimization Using Taguchi's Method*. Arizona State University: Morgan & Claypool Publishers.
- Ealey, L. (1992). *The Methods of a quality Master: An interview with Genichi Taguchi, Father of Quality Engineering*. United States: The McKinsey Journal.
- El-Haik, B. S., & Mekki, K. S. (2008). *MEDICAL DEVICE DESIGN FOR SIX SIGMA*. United States of America: JOHN WILEY & SONS, INC.
- El-Haik, B., & Roy, D. M. (2005). *SERVICE DESIGN FOR SIX SIGMA A Road Map for Excellence*. Hoboken, New Jersey, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Escalante Vazquez, E. (2003). *Seis-Sigma: metodología y técnicas*. México: Limusa.
- Evans, J., & Lindsay, W. (2008). *Administración y Control de la Calidad* (Septima ed.). Médico D. F.: Cengage Learning.
- Guajardo Garza, E. (2008). *Administración de la calidad total*. México: Pax.
- Henderson, G. R. (2011). *Six Sigma Quality Improvement with Minitab* (Second Edition ed.). United Kingdom, United Kingdom: A John Wiley & Sons, Ltd., Publication.
- Joseph, V. R. (2003). *Robust Parameter Design*. Atlanta, GA 30332-0205: Georgia Institute of Technology.
- Molina Arredondo, D. D., & García Alcaráz, D. L. (2012). *Visión General del Diseño de Parámetros Robustos en Línea y Fuera de Línea*. Celaya: CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACION.
- Montgomery, D. C. (2001). *Design and Analysis of Experiments*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Myers, & Vining. (1990). *Combining taguchi and response surface philosophies: A dual response*. United States: Journal of Quality Technology.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2009). *Response Surface Methodology* (Third Edition ed.). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Phadke, M. (1989). *Quality Engineering Using Robust Design*. New Jersey: Prentice Hall.
- Ranjit Roy, P. D. (2001). *Design of experiments Using the Taguchi Approach*. Toronto: John Wiley & Sons, Inc.
- Ross, P. (1996). *Taguchi Techniques for Quality Engineering* (Second Edition ed.). N.Y., Printed in Singapore, United states: McGraw-Hill.

Roy, R. K. (1990). *A Primer on the Taguchi Method*. New York: Van Nostrand Reinhold International Company Limited.

Sleeper, A. (2006). *Design for Six Sigma 59 Tools for Diagnosing and Solving*. Fort Collins, Colorado: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Taguchi, G. (1987). *System of Experimental Design* (Vol. II). (L. W. Tung, Trad.) Dearborn, Michigan, United States of America: Quality Resources a Division of the Kraus Organization Limited.

Taguchi, G. (1987). *System Of Experimental Design* (Vol. I). (I. American Supplier Institute, Ed., & L. W. Tung, Trad.) Dearborn, Michigan, United States of America: Quality Resources a Division of the Kraus Organization Limited.

Taguchi, G., & Jugulum, R. (2002). *The Mahalanobis-Taguchi Strategy*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Taguchi, G., Chowdhury, S., & Wu, Y. (2005). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. New Jersey, United States of America.: John Wiley & Sons, Inc.

Vilar Barrio, J. F. (1999). *Cómo mejorar los procesos en su empresa*. México: Fundación Confemental.

William T. Truscott Ph.D., B. (. (2003). *Six Sigma: Continual Improvement for Businesses A Practical Guide*. Burlington, MA 01803: Butterworth-Heinemann.

Wu, Y., & Wu, A. (2000). *Taguchi Methods for Robust Design*. New York, New York, United states: ASMEPRESS.