

LA METODOLOGÍA DE TAGUCHI EN EL CONTROL ESTADÍSTICO DE LA CALIDAD

ALICIA B. HERNÁNDEZ – MARIA DE LA PAZ GUILLON – LILIANA A. GARCÍA
Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Bahía Blanca
Centro de Estudios de Calidad Total - Universidad Nacional del Sur
aliciahe@criba.edu.ar - mguillon@criba.edu.ar - lgarcia@uns.edu.ar

Fecha Recepción: Abril 2014 - Fecha Aceptación: Abril 2015

RESUMEN

Genichi Taguchi (Japón, 1924 - 2012), considerado uno de los gurúes de la calidad, realizó importantes contribuciones al Control Estadístico de la Calidad. Supo aplicar a las industrias métodos estadísticos poco difundidos en su momento, logrando la reducción de los costos y la mejora de la calidad en el diseño de productos y los procesos de fabricación. La filosofía de calidad de Taguchi se basa en la minimización de la variación alrededor del valor objetivo. Los elementos clave de la filosofía de Taguchi son la Función Pérdida de Calidad, la incorporación de los Arreglos Ortogonales al Diseño de Experimentos, el índice de Señal – Ruido y el índice de Capacidad de Procesos C_{pm} . En este trabajo se presentan y analizan estos elementos clave y en un ejemplo se muestran las ventajas del método de Taguchi en el Diseño de Experimentos. También se examina la potencia de los Arreglos Ortogonales mediante simulación y se compara la *performance* de los índices C_{pm} y C_{pk} para procesos normales y no normales.

PALABRAS CLAVE: Taguchi – Diseño de Experimentos – Arreglos Ortogonales – Función Pérdida de Calidad – Índice de Señal Ruido – Índice C_{pm} .

ABSTRACT

Genichi Taguchi (Japan, 1924 - 2012) is considered one of the gurus of quality. He made several important contributions to Statistical Quality Control. He applied statistical methods in industry little known at the time, achieving cost reduction and quality improvement in product design and manufacturing processes. The most important aspect of Taguchi's quality philosophy is the minimization of variation around the target value. Key elements of Taguchi's philosophy include: the Loss Function, the incorporation of Orthogonal Arrays in Design of Experiments, the Signal Noise Ratio and the Process Capability index C_{pm} . In this paper we discuss these key elements and advantages of Taguchi method in Design of Experiments are shown in an example. Also, the power of the Orthogonal Arrays is analyzed by simulation and the performance of the index C_{pm} and C_{pk} are compared for normal and non-normal processes.

KEYWORDS: Taguchi – Design of Experiments – Orthogonal Arrays – Loss Quality Function – Signal Noise Ratio – C_{pm} index.

1. INTRODUCCIÓN

La calidad de productos y servicios es en la actualidad un factor de interés en la mayor parte de las organizaciones. Para lograr la calidad deseada en un producto o servicio no basta con realizar inspecciones o pruebas finales; por el contrario, se debe actuar apropiadamente desde el diseño y a lo largo de los procesos de producción o de prestación, de manera tal que los resultados resulten de acuerdo con lo esperado. Pero en la realidad todo proceso es afectado por factores que no pueden ser controlados, generando así un producto o servicio de calidad variable. Es por ello que controlar la calidad en un producto o servicio es, en realidad, controlar la variabilidad del proceso que lo origina. Las organizaciones deben valerse de técnicas y herramientas que les permitan **identificar, medir, controlar y reducir la variación en los procesos, para** concretar así las acciones de mejora de la calidad apropiadas (Pande, Neuman y Cavanagh, 2004).

En general, las definiciones de calidad pueden dividirse en dos categorías. Una de ellas pone el énfasis en el cumplimiento de las especificaciones de los productos o servicios; a este grupo pertenecen las definiciones de Crosby (1979), Juran (2005) y Shewhart (1980). En la otra categoría se encuentran aquellas definiciones que basan la calidad en la satisfacción del cliente, independientemente del cumplimiento de los estándares de calidad fijados. Demming (2000), Feigenbaum (1967) e Ishikawa (1986) son los principales defensores de esta teoría.

El ingeniero japonés Genichi Taguchi planteó una visión completamente innovadora del concepto de calidad: *“La calidad es la pérdida que un producto causa a la sociedad después de haber sido entregado”*, Saderra y Jorba (1993). Esta definición es la primera que considera a la calidad como una pérdida, la que puede ser ocasionada tanto por las desviaciones en la característica de calidad como por los efectos secundarios del producto. A partir de esta manera de entender la calidad, Taguchi diseñó y aplicó un conjunto de métodos que permiten a las organizaciones mejorar sus estándares de calidad. Desarrolló una metodología propia para la mejora de la calidad y la reducción de los costos, conocida como “Métodos Taguchi”, que es marca registrada del *American Supplier Institute* de E.E.U.U (http://www.amsup.com/BIOS/g_taguchi.html) y que ha sido aplicada exitosamente en empresas de primera línea (si bien Taguchi define la calidad de un “producto”, cuando nos refiramos en este artículo a “producto”, entenderemos indistintamente producto o servicio).

2. CONTRIBUCIONES DE G. TAGUCHI AL CONTROL ESTADÍSTICO DE LA CALIDAD

Genichi Taguchi (Japón, 1924 - 2012) era ingeniero doctorado en ciencias, profesor de la Universidad Aoyama Gakuin de Tokio, integrante del *Institute of Statistical Mathematics* de Japón, consultor para empresas como *Toyota Motors* y *Fuji Films*. Fue miembro honorario de la *Japanese Society for Quality Control* y de la *American Society Quality* e integró la *Japan Society of Industrial Engineering* y la *Japanese Society of Applied Statistics*, entre otras instituciones científicas, Mascó (1996). Está considerado como uno de los artífices de la recuperación económica del Japón de la posguerra, ya que sus enseñanzas y la aplicación de sus métodos en las industrias de su país favorecieron la reducción de los costos de fabricación y la mejora de la calidad de los productos, posibilitando así la incorporación de nuevos mercados.

La filosofía de calidad de Taguchi se basa en tres conceptos fundamentales. En primer lugar, considera que el diseño en la fase inicial del producto es fundamental para lograr la calidad en el resultado final. Por otra parte, sostiene que la calidad de los productos mejora cuando se minimiza la variabilidad en torno al valor nominal u objetivo. Por último entiende a los costos de la no calidad como resultado del accionar de toda la organización en su conjunto y, en particular, como función de la variabilidad en los procesos. La visión de Taguchi se manifiesta en sus contribuciones más reconocidas a la mejora de la calidad, entre las que se destacan: la Función Pérdida de Calidad, la incorporación de los Arreglos Ortogonales en la implementación del Diseño de Experimentos, el índice de Señal / Ruido y el índice de Capacidad de Procesos C_{pm} . Constituyen herramientas valiosas del Control Estadístico de la Calidad para la identificación, **medición, control y reducción de la variación** de los procesos. A continuación se desarrollarán los aspectos más relevantes de cada una de ellas.

2.1 Función pérdida de calidad

Como ya se señaló, Taguchi define a la calidad de un producto como la pérdida económica impuesta a la sociedad desde el momento en que el producto es lanzado al mercado. Estas pérdidas son función de la variación, es decir, de la desviación de la característica de calidad del producto respecto del valor nominal, por lo cual la mejora de un proceso debe orientarse no sólo a cumplir con las especificaciones, sino también a reducir su variabilidad alrededor del valor nominal m .

Para el análisis de las pérdidas debidas a la calidad, Taguchi desarrolló la Función Pérdida de Calidad, la cual se representa por una función cuadrática con vértice en el valor nominal m de la característica de calidad. Permite ver que, a medida que el valor de la característica de calidad se aleja de m , la calidad decae y, por lo tanto, las pérdidas aumentan, es decir, aun estando dentro de las especificaciones, los niveles de calidad de los productos pueden variar.

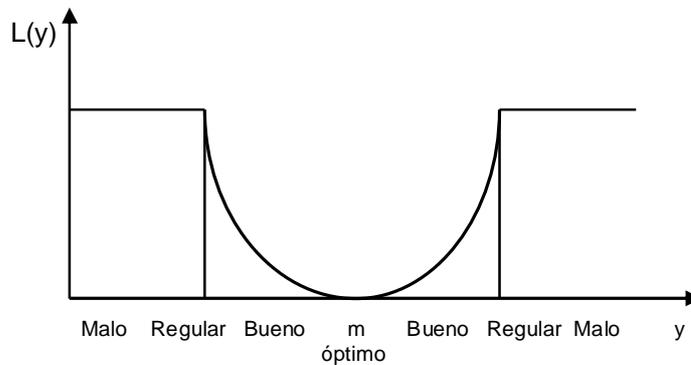


FIGURA 1. Criterio de la calidad según G. Taguchi.

Si se considera que y (eje horizontal) representa la medición de una característica de calidad de un producto en una escala continua y que $L(y)$ (eje vertical) representa la pérdida en valor monetario sufrida por el consumidor por recibir el producto desviado respecto del valor nominal m , la Función Pérdida de Calidad que Taguchi propone de manera general es:

$$L(y) = K(y - m)^2$$

donde K es una constante que se determina a partir del conocimiento de la pérdida producida en un valor y particular, Mascó (1996).

El interés se centra en obtener la pérdida promedio por unidad producida como indicador del desempeño del proceso dado que, como sostiene Taguchi, cuanto mayor es la pérdida promedio por unidad producida, menor es la calidad del producto. Para analizar la Función Pérdida y obtener la pérdida promedio por unidad producida se deben distinguir tres casos, según la característica de calidad en estudio:

- Debe alcanzar un valor nominal (Caso: *Nominal es el mejor*)
- Debe alcanzar el menor valor posible (Caso: *Menor es el mejor*)
- Debe alcanzar el mayor valor posible (Caso: *Mayor es el mejor*)

La pérdida promedio \bar{L} por unidad producida está dada en cada caso

por:

$$\bar{L} = K \times [\sigma^2 + (\mu - m)^2] = K \times \sigma^2 + K(\mu - m)^2 \quad (\text{Nominal es el mejor})$$

$$\bar{L} = K \times (\sigma^2 + \mu^2) \quad (\text{Menor es el mejor})$$

$$\bar{L} = \left(\frac{K}{\mu^2}\right) \times \left[1 + \frac{3 \times \sigma^2}{\mu^2}\right] \quad (\text{Mayor es el mejor})$$

Se observa que la pérdida promedio se reduce si el valor medio μ de la característica de calidad se acerca al valor nominal m (o, según el caso, se acerca a cero o aumenta) y si disminuye la variabilidad σ^2 de la característica de calidad. Es por esto que la pérdida promedio constituye un indicador

relevante del desempeño del proceso por la información que involucra sobre su media y su variación.

La pérdida promedio por unidad producida constituye el núcleo del pensamiento de Taguchi sobre la mejora de la calidad. En otras palabras, entiende que la mejora radica, por una parte, en el ajuste de la media, pero también en la reducción de la variabilidad. Basa su estrategia para el ajuste de la media en torno al valor nominal en la implementación del Diseño de Experimentos, y en el índice de Señal – Ruido para la reducción de la variabilidad.

2.2 Diseño de experimentos. Método de Taguchi

El Diseño de Experimentos es un procedimiento que se utiliza en aquellos procesos en los se desea determinar si una o más variables independientes (factores) tienen influencia sobre la media de una variable respuesta. Evalúa simultáneamente en una misma experimentación los efectos de los factores y sus interacciones; permite un análisis completo de los resultados experimentales (Romero Villafranca y Zúñica Ramajo, 2004), pudiéndose además obtener, para aquellos factores que tienen influencia sobre la media de la variable respuesta, el mejor nivel que la optimiza. De gran utilidad, es un método que puede resultar complejo a medida que se aumenta el número de factores. Fue introducido por Ronald Fisher en la década del 20 y aplicado originalmente en el ámbito agrícola.

Un aporte relevante de Taguchi al Diseño de Experimentos consistió en extender de manera práctica su aplicación al ámbito de la industria, simplificando considerablemente su complejidad. Recién en la década del 80 se hizo conocido el trabajo que al respecto Taguchi venía desarrollando en Japón desde mucho tiempo atrás. A partir de ello se dio un amplio debate sobre la eficiencia de su método y la comparación con el diseño clásico desarrollado por Fisher. Indirectamente esta discusión contribuyó a la difusión del Diseño de Experimentos y especialmente del método de Taguchi, ya que éste, a diferencia de lo que ocurre con el diseño clásico, no requiere ser un experto en el método para estar en condiciones de aplicarlo, Taguchi y Wu (2005).

Taguchi innovó y simplificó el Diseño de Experimentos con la introducción de las tablas conocidas como arreglos ortogonales (A.O.), que son una modificación de las matrices de Hadamard (matrices ortogonales $n \times n$). A través de un A.O. se determina de una manera estandarizada la combinación de los niveles de los factores que se probarán en cada ensayo. Los A.O. permiten examinar hasta un total de $n-1$ factores, siempre y cuando no se consideren las interacciones entre los mismos. Facilitan y, en algunos casos, reducen gran parte del esfuerzo del diseño experimental porque posibilitan evaluar simultáneamente numerosos factores con un número mínimo de ensayos, permitiendo así una disminución en los recursos necesarios para la experimentación.

En los últimos años se advierte un renovado interés por el Diseño de Experimentos de Taguchi como método alternativo al Diseño de Experimentos clásico, evidenciado en numerosas publicaciones en diversas áreas de la industria (Taguchi y Wu, 2005). Por ejemplo, con sólo nueve ensayos (cuatro factores a tres niveles cada uno) y tres réplicas se optimizó un proceso de pulido de piezas de fundición (Mukherjee y Pradip, 2006), mientras que para realizar un diseño clásico saturado hubieran sido necesarios 81 ensayos con sus respectivas réplicas. Si se hubiera optado por realizar un diseño factorial fraccionario clásico, el número de ensayos hubiera sido menor que 81, pero el hecho de trabajar con generadores independientes para factores con tres niveles aumenta la complejidad de la resolución del problema, haciendo más difícil la implementación (Montgomery, 1991); no sucede lo mismo al utilizar el método de Taguchi, ya que el procedimiento para resolver un diseño factorial fraccionario es similar al que se utiliza para un diseño factorial saturado (Taguchi y Wu, 2005). También se aplicó el Diseño de Experimentos de Taguchi en investigaciones en la industria del acero (Aslan y Camuşcu, 2006) y en la optimización de los procesos de purificación de minerales en regiones de Angora con amoníacos (Moghaddam y Sarraf-Mamoory, 2007). En la industria textil se aplicó para purificar aguas residuales (Oguz, Keskinler, Çelik y Zeynep, 2006), realizándose un diseño mixto con siete factores a tres niveles y uno a dos niveles, con 18 ensayos y una réplica; en este caso para aplicar el diseño clásico saturado se hubieran necesitado 4374 ensayos. Para un diseño mixto fraccionario clásico los *software* especializados, como por ejemplo Statgraphics, no presentan posibilidades de resolución. Se utilizó además el Diseño de Experimentos para determinar la *performance* de las máquinas de precisión ante la baja de tensión eléctrica Tzeng *et al.* (2006).

En Hernández (2012) se aplicó el método de Taguchi para optimizar un proceso de digestión anaeróbica mediante el cual una maltería de la ciudad de Bahía Blanca trataba sus desechos orgánicos industriales. Se utilizó un A.O. modificado para contener un factor a cuatro niveles y cuatro factores a dos niveles, con sólo 8 ensayos y dos réplicas para cada uno de ellos. De haberse empleado el Diseño de Experimentos clásico se hubieran necesitado 64 ensayos, además de las réplicas.

Las aplicaciones presentadas muestran claramente ventajas operativas del método de Taguchi respecto del Diseño de Experimentos clásico. Por una parte, los diseños para factores con dos y tres niveles o diseños mixtos tienen la misma forma de análisis; por otra parte, sólo se incorporan al modelo aquellas interacciones que los expertos en el tema consideran que pueden influir en la variable respuesta (diseño confundido), disminuyendo así el número de ensayos a realizar. Esta manera de tratar las interacciones se justifica por la diferencia conceptual entre ambos métodos: mientras que el método de Taguchi supone que aquellos que implementan el diseño de experimentos tienen conocimiento práctico sobre el problema en cuestión, el diseño clásico supone que no hay conocimiento sobre el mismo (Wu y Wu, 1997). Si bien dentro del método clásico también existe la posibilidad de disminuir el número de ensayos mediante el diseño factorial

fraccionario, su implementación, a partir de la elección de generadores independientes, es compleja y requiere un conocimiento estadístico profundo.

El método de Taguchi logra resolver problemas de Diseño de Experimentos de manera práctica. La utilización del diseño clásico implica en general destinar mayores recursos a la experimentación (mayor número de unidades experimentales, más personal involucrado, más tiempo, incluso puede llegar a requerirse un lugar especial para la experimentación al haber más réplicas, esfuerzos para mantener de manera homogénea las condiciones de experimentación, entre otros). El método de Taguchi en algunos casos constituye el único camino posible que tienen las empresas para llevar a cabo una experimentación.

2.2.1 Ejemplo de arreglo ortogonal

Un ejemplo de A.O. para factores a dos niveles es el llamado A.O. L4, a través del cual se pueden evaluar dos factores a dos niveles y su interacción, o tres factores sin interacciones:

TABLA 1. Arreglo ortogonal L4

	Factor	Factor	Factor o Interacción	Datos
Ensayo 1	1	1	1	
Ensayo 2	1	2	2	
Ensayo 3	2	1	2	
Ensayo 4	2	2	1	

Si se consideran dos factores, **A** y **B**, con nivel 1: bajo y nivel 2: alto, el A.O. L4 determina la manera ordenada de realizar los ensayos:

Ensayo 1: A_{Bajo}, B_{Bajo}

Ensayo 2: A_{Bajo}, B_{Alto}

Ensayo 3: A_{Alto}, B_{Bajo}

Ensayo 4: A_{Alto}, B_{Alto}

En el caso de tener tres factores: **A**, **B** y **C**, el A.O. L4 establece los siguientes ensayos:

Ensayo 1: A_{Bajo}, B_{Bajo}, C_{Bajo}

Ensayo 2: A_{Bajo}, B_{Alto}, C_{Alto}

Ensayo 3: A_{Alto}, B_{Bajo}, C_{Alto}

Ensayo 4: A_{Alto}, B_{Alto}, C_{Bajo}

2.2.2 Potencia de los arreglos ortogonales

El método de Taguchi no sería viable si no se tuviese seguridad en sus conclusiones. La confiabilidad en los resultados que se obtienen a través del Diseño de Experimentos propuesto por Taguchi está dada por la potencia de los A.O., es decir, la potencia de los ANOVA (*ANalysis Of Variance*).

En este trabajo, para cuantificar la potencia de los A.O. más comunes para dos y tres niveles y determinar el número de repeticiones más conveniente que asegure mayor potencia en la prueba, se utilizó el método de simulación Monte Carlo. Se calculó la potencia para los arreglos ortogonales L4, L8 y L16 con dos y tres repeticiones.

Un factor es significativo si al cambiar sus niveles se produce un cambio en la variable respuesta. Para probar la potencia de los A.O. se fijó un factor y un nivel para el mismo. Dado que la variable respuesta asociada sigue una distribución normal con media μ y varianza σ^2 , para el otro nivel del factor se consideró que la variable respuesta asociada también es una variable normal, pero cuya media está aumentada en un número determinado de desvíos estándar respecto al valor μ , manteniendo la varianza. Con estas dos distribuciones se generaron dos o tres números al azar para cada uno de los ensayos (según el número de réplicas con el que se deseaba hacer el análisis), que simularon los resultados del experimento. Con estos resultados se realizó el ANOVA correspondiente. La simulación se repitió 10000 veces y un contador acumuló, ante cada prueba, si el efecto del factor fue o no significativo. El cociente entre el número de veces que fue significativo y el número total de simulaciones dio por resultado la potencia de la prueba. Los resultados (en porcentaje) se presentan en la siguiente tabla:

TABLA 2. Potencia de los A.O. L4, L8 y L16

Arreglo	Repeticiones	Desplazamiento de Medias en Desvíos Estándar						
		0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
L4	2	5	9	19	38	57	74	88
	3	5	11	32	61	85	96	99
L8	1	5	9	19	36	57	75	88
	2	5	15	42	74	94	99	99
L16	3	5	21	64	93	99	99	99
	1	5	15	45	79	95	99	99
	2	5	27	75	98	99	99	99
	3	5	38	92	99	99	99	99

Como se puede observar, cuando no hay desplazamientos la potencia de los A.O. es del 5%, que es el nivel de significación que se eligió para la prueba, y a medida que aumenta el número de réplicas por ensayo, la potencia de la prueba aumenta, llegando en la mayoría de los casos a ser mayor al 90%, es decir, se trata de pruebas confiables.

Para determinar la potencia de un A.O. L9 se fijó para uno de los niveles del factor una variable respuesta con distribución normal con media μ y varianza σ^2 ; y para los otros dos niveles del factor la media de la variable respuesta se desplazó en diferentes números de desvíos estándar. En la siguiente tabla se muestra la potencia (en porcentaje) del A.O. para distintos desplazamientos (por ejemplo, un desplazamiento de 0.5/1 significa que la media para un nivel se ubica en $\mu + 0.5\sigma$ y para el otro nivel, en $\mu + 1\sigma$).

TABLA 3. Potencia del A.O. L9

Arreglo	Rep.	Desplazamiento de Medias en Desvíos Estándar								
		0/0	0/0.5	0.5 /1	1/1	0.5/1.5	1/1.5	½	0.5 /2	0.5 / 2.5
L9	1	5	8	13	16	24	25	39	40	60
	2	5	11	25	29	51	50	76	78	94
	3	5	16	38	51	76	76	94	96	99
	4	5	19	52	66	89	87	99	99	99

Los resultados que se obtienen son similares a los observados anteriormente para los A.O. L2, L4 y L8, lo que confirma la confiabilidad del A.O. L9.

En la actualidad los procesos de producción de bienes y de prestación de servicios tienden a ser cada vez más complejos por el mayor conocimiento que se tiene de ellos, la incorporación de nuevas tecnologías, la necesidad de emplear eficientemente los recursos de las organizaciones y la presencia de mercados altamente competitivos con clientes exigentes, entre otras razones. El Diseño de Experimentos, como herramienta para la mejora de los procesos, refleja esa complejidad, la que se traduce en el aumento del número de factores y sus niveles a evaluar. En este sentido, el método de Taguchi ofrece una forma de trabajo confiable y útil para el ajuste de la media de los procesos y, por ende, para la mejora de la calidad de los mismos, evidenciada en la potencia de los A.O. y en numerosas aplicaciones en diversos campos de la industria y los negocios.

2.3 Índice de señal-ruido

La variabilidad en las características de calidad de un proceso se produce por tres motivos: por el propio diseño del proceso, por el accionar de factores que no pueden ser controlados o porque los niveles de los factores no se mantienen constantes a lo largo del proceso de producción (Prat Bartés, Tort-Martorell Llabrés, Grima Cintas y Pozueta Fernández, 2000). Como ya se señaló, Taguchi basa su estrategia para la reducción de la variabilidad en el índice de Señal – Ruido. Éste se calcula a partir de los resultados experimentales y permite, a través de un ANOVA, determinar los factores e interacciones que tienen influencia en la variabilidad del proceso, pudiéndose, además, obtener para estos factores el mejor nivel que hace robusto el proceso, es decir, el nivel que minimiza la variabilidad. El índice de Señal – Ruido se designa como S/R y su unidad de medida es el decibel (db).

Según la característica de calidad en estudio, el índice de Señal – Ruido se calcula como, Mascó (1996):

- Caso *Menor es el mejor*: $S/R = -10 \log \left(\frac{y_1^2 + \dots + y_n^2}{n} \right)$
- Caso *Mayor es el Mejor*: $S/R = -10 \times \log \left(\frac{\frac{1}{y_1} + \dots + \frac{1}{y_n}}{n} \right)$
- Caso *Nominal es el Mejor*: $S/R = 10 \times \log \left(\frac{SQM + Ve}{Ve} \right)$

donde:

y_i : i-ésimo dato

n: tamaño de la muestra

V_e : varianza del error

$$SQ_M = \frac{1}{n} \times (\sum_{i=1}^n y_i)^2$$

Cuando la variabilidad se produce por el propio diseño del proceso, Taguchi emplea para planificar la experimentación el método de Repeticiones Simples, que mide la variabilidad del proceso a través de las réplicas de los ensayos. Cuando se produce por el accionar de factores de ruido (factores cuyos niveles no son establecidos por el investigador), Taguchi utiliza los arreglos Interno/Externo, los que son una combinación de dos A.O., en uno de los cuales (arreglo interno) se colocan los factores de control (factores cuyos niveles son establecidos por el experimentador) y en el otro, (arreglo externo), los factores de ruido. Si, en cambio, la variabilidad se debe a que los niveles de los factores de control no se mantienen constantes a lo largo del proceso, Taguchi emplea el Arreglo Alternativo Interno/Externo, que - de manera análoga al arreglo Interno/Externo - combina un arreglo interno donde se colocan los factores de control, y uno externo, donde se ubican sólo los factores de control cuyos niveles no se mantienen constantes. Una vez planificada y concretada la experimentación, con los resultados obtenidos se calcula el índice S/R para cada ensayo; con ellos se realiza un ANOVA que determina cuáles de los factores contenidos en el arreglo interno son significativos, es decir, cuáles son los factores de control que afectan la variabilidad de la característica de calidad.

Además de la diferencia señalada en el punto 2.2 respecto del tratamiento de las interacciones, la utilización del índice S/R para detectar aquellos factores que influyen sobre la variabilidad del proceso, también distingue al método de Taguchi del Diseño de Experimentos clásico. El índice S/R fue un concepto cuestionado en su momento, incluso discutido en un famoso panel de catedráticos (Vijayan y Nair Murray, 1992), (entre los que se encontraba D. Montgomery), quienes consideraron que los factores de ruido podían incorporarse al análisis estándar, no siendo necesario recurrir al índice S/R. Incorporando dentro del diseño clásico a los factores de ruido, el número de ensayos es mayor, aunque, paradójicamente, el número de réplicas con que se analizan los resultados es menor al que se utilizaría con el índice S/R, lo que disminuye la potencia de los resultados, como se vio en la sección 2.2.2.

La visión acerca de la mejora de la calidad de Taguchi es integral: no sólo propone un método para optimizar la media de los procesos, sino también brinda un método para disminuir la variabilidad presente en todo proceso. En ambos casos se trata de métodos eficientes, cuya relativa baja complejidad facilita su implementación.

2.3.1. Ejemplo de aplicación de un arreglo alterno/interno

El siguiente ejemplo (Hernández, 2012) muestra cómo la utilización del método de Taguchi posibilita obtener las mismas conclusiones que con el Diseño de Experimentos clásico, pero con un número menor de ensayos y mayor potencia en los resultados.

Sea un proceso con tres factores de control **A**, **B** y **C** y dos factores de ruido **M** y **N**, todos a dos niveles, para el cual se desean determinar los factores que tienen influencia sobre su media y su variabilidad. Si se realizara el diseño clásico, incorporando al diseño los dos factores de ruido junto con los tres de control, se tendría un diseño con cinco factores a dos niveles para evaluar la media del proceso. Si se consideraran dos réplicas para cada ensayo (cantidad mínima para realizar el ANOVA), se deberían efectuar 64 ensayos para evaluar los efectos de los factores e interacciones. Utilizando un Arreglo Interno/Externo, el diseño a realizar es el que se muestra a continuación, en el que los datos y_{ij} son el resultado de la experimentación combinando los niveles de los factores de acuerdo con la fila i y la columna j :

TABLA 4. Arreglo Interno/Externo

Factores de control								Factores de ruido				
								NM	1	2	2	1
Ensayo								N	1	2	1	2
								M	1	1	2	2
								Datos				
1	1	1	1	1	1	1	1	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	
2	1	1	1	2	2	2	2	y_{21}	y_{22}	y_{23}	y_{24}	
3	1	2	2	1	1	2	2	y_{31}	y_{32}	y_{33}	y_{34}	
4	1	2	2	2	2	1	1	y_{41}	y_{42}	y_{43}	y_{44}	
5	2	1	2	1	2	1	2	y_{51}	y_{52}	y_{53}	y_{54}	
6	2	1	2	2	1	2	1	y_{61}	y_{62}	y_{63}	y_{64}	
7	2	2	1	1	2	2	1	y_{71}	y_{72}	y_{73}	y_{74}	
8	2	2	1	2	1	1	2	y_{81}	y_{82}	y_{83}	y_{84}	

De esta manera, con 32 ensayos (la mitad de los requeridos para el diseño clásico), pueden evaluarse los efectos de los factores **A**, **B**, **C** y sus interacciones con cuatro réplicas, considerando únicamente el arreglo interno:

TABLA 5. Arreglo Interno con los factores de control

Ensayo	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	Datos			
1	1	1	1	1	1	1	1	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}
2	1	1	1	2	2	2	2	y_{21}	y_{22}	y_{23}	y_{24}
3	1	2	2	1	1	2	2	y_{31}	y_{32}	y_{33}	y_{34}
4	1	2	2	2	2	1	1	y_{41}	y_{42}	y_{43}	y_{44}
5	2	1	2	1	2	1	2	y_{51}	y_{52}	y_{53}	y_{54}
6	2	1	2	2	1	2	1	y_{61}	y_{62}	y_{63}	y_{64}
7	2	2	1	1	2	2	1	y_{71}	y_{72}	y_{73}	y_{74}
8	2	2	1	2	1	1	2	y_{81}	y_{82}	y_{83}	y_{84}

Así mismo, considerando únicamente el Arreglo Externo, pueden evaluarse el efecto de los factores **M**, **N** y su interacción con ocho réplicas:

TABLA 6. Arreglo Externo con los factores de ruido

Ensayo	M	N	MN	Datos							
				Y ₁₁	Y ₂₁	Y ₃₁	Y ₄₁	Y ₅₁	Y ₆₁	Y ₇₁	Y ₈₁
1	1	1	1	Y ₁₁	Y ₂₁	Y ₃₁	Y ₄₁	Y ₅₁	Y ₆₁	Y ₇₁	Y ₈₁
2	1	2	2	Y ₁₂	Y ₂₂	Y ₃₂	Y ₄₂	Y ₅₂	Y ₆₂	Y ₇₂	Y ₈₂
3	2	1	2	Y ₁₃	Y ₂₃	Y ₃₃	Y ₄₃	Y ₅₃	Y ₆₃	Y ₇₃	Y ₈₃
4	2	2	1	Y ₁₄	Y ₂₄	Y ₃₄	Y ₄₄	Y ₅₄	Y ₆₄	Y ₇₄	Y ₈₄

De igual manera, combinando ambos arreglos, las interacciones entre los factores **A** y **M**, **A** y **N**, **B** y **M**, **B** y **N**, **C** y **M** y **C** y **N** se evalúan con 8 réplicas. La siguiente tabla muestra cómo podría evaluarse la interacción entre **A** y **N**:

TABLA 7. A.O. con factores de control y factores de ruido

Ensayo	A	N	AN	Datos							
				Y ₁₁	Y ₁₂	Y ₂₁	Y ₂₂	Y ₃₁	Y ₃₂	Y ₄₁	Y ₄₂
1	1	1	1	Y ₁₁	Y ₁₂	Y ₂₁	Y ₂₂	Y ₃₁	Y ₃₂	Y ₄₁	Y ₄₂
2	1	2	2	Y ₁₃	Y ₁₄	Y ₂₃	Y ₂₄	Y ₃₃	Y ₃₄	Y ₄₃	Y ₄₄
3	2	1	2	Y ₅₁	Y ₅₂	Y ₆₁	Y ₆₂	Y ₇₁	Y ₇₂	Y ₈₁	Y ₈₂
4	2	2	1	Y ₅₃	Y ₅₄	Y ₆₃	Y ₆₄	Y ₇₃	Y ₇₄	Y ₈₃	Y ₈₄

Como se puede observar, todos los ANOVA se realizan con cuatro u ocho réplicas, a diferencia del método clásico que se realiza con dos réplicas, lo que aumenta la potencia de la prueba para determinar los factores significativos para la media.

Además, se puede efectuar con los 32 ensayos el análisis de la S/R, que permite determinar los factores que afectan a la variación:

TABLA 8. Arreglo Interno con el índice S/R

Ensayo	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	Datos				S/R
								Y ₁₁	Y ₁₂	Y ₁₃	Y ₁₄	
1	1	1	1	1	1	1	1	Y ₁₁	Y ₁₂	Y ₁₃	Y ₁₄	S ₁
2	1	1	1	2	2	2	2	Y ₂₁	Y ₂₂	Y ₂₃	Y ₂₄	S ₂
3	1	2	2	1	1	2	2	Y ₃₁	Y ₃₂	Y ₃₃	Y ₃₄	S ₃
4	1	2	2	2	2	1	1	Y ₄₁	Y ₄₂	Y ₄₃	Y ₄₄	S ₄
5	2	1	2	1	2	1	2	Y ₅₁	Y ₅₂	Y ₅₃	Y ₅₄	S ₅
6	2	1	2	2	1	2	1	Y ₆₁	Y ₆₂	Y ₆₃	Y ₆₄	S ₆
7	2	2	1	1	2	2	1	Y ₇₁	Y ₇₂	Y ₇₃	Y ₇₄	S ₇
8	2	2	1	2	1	1	2	Y ₈₁	Y ₈₂	Y ₈₃	Y ₈₄	S ₈

Este ejemplo permite observar que con mucho menor esfuerzo en la experimentación (32 ensayos en lugar de 64) que con el Diseño de Experimentos clásico, los resultados que se obtienen mediante la aplicación del método de Taguchi son completos, en el sentido de que se pueden determinar los factores que afectan a la media y a la variación de la característica de calidad.

2.4 Índice de capacidad de procesos C_{pm}

La calidad final de un producto comienza desde el momento mismo en que es diseñado y prosigue con la implementación y control del proceso que lo lleva a cabo. Cuando la variabilidad de los procesos sólo está afectada por causas aleatorias, es decir, el proceso está bajo control estadístico, tiene sentido medir su capacidad para producir unidades dentro de las especificaciones, Montgomery (1991).

Los índices más convencionales para cuantificar la capacidad de un proceso son los índices C_p y C_{pk} , que calculan la capacidad como el cociente entre las especificaciones de diseño y la variación natural del proceso. La aplicación de estos índices presupone que los procesos a los cuales se aplican tienen característica de calidad con distribución de probabilidad normal.

Para una característica de calidad con especificaciones bilaterales, la capacidad de un proceso centrado en el valor nominal y que opera bajo control estadístico, se mide por medio del índice C_p como:

$$C_p = \frac{LSE-LIE}{6\sigma}$$

donde LSE es el límite superior de especificación, LIE es el límite inferior de especificación y σ es la desviación estándar del proceso.

Si el proceso se desplaza de su centro se recurre al índice C_{pk} que tiene en cuenta, además de la variabilidad, la media μ del proceso:

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right\}$$

A mayor valor de C_p ó C_{pk} , menos porcentaje de la producción estará fuera de especificación. En la práctica, se suele considerar que el valor mínimo aceptable para los índices de capacidad es 1.33, lo que equivale a 6.3 artículos fuera de especificación cada 100000.

Los índices C_p y C_{pk} son considerados índices de capacidad de primera generación, pues se basan en la filosofía clásica del control estadístico de procesos. De acuerdo con ella, todas las medidas resultantes en el intervalo de tolerancia son consideradas "buenas", sin tener en cuenta su proximidad a los límites de especificación.

Taguchi, a partir de la función pérdida y de la pérdida promedio, desarrolla una alternativa a los índices de capacidad de procesos de primera generación: el índice C_{pm} , que mide mejor que el C_{pk} el centrado del proceso y la variabilidad. Se define como:

$$C_{pm} = \frac{LSE-LIE}{6\tau} \quad \text{siendo } \tau = \sqrt{\sigma^2 + (\mu-m)^2}$$

El índice C_{pm} considera las desviaciones del valor objetivo a manera de pérdida cuadrática. Su definición tiene en cuenta la variación total del

proceso alrededor del valor nominal a través de τ , considerando tanto la variabilidad σ^2 del proceso como su descentrado $(\mu - m)^2$. Es decir, pena tanto la dispersión del proceso como su alejamiento del valor nominal. Para el índice C_{pm} también acepta como valor razonable 1.33 (Boyles, 1991).

El índice C_{pm} se considera de segunda generación dado que es una ampliación del índice C_p y representa el enfoque de Taguchi acerca de la mejora de la calidad. Es decir, las medidas no sólo deben ser “buenas” por estar dentro del intervalo de especificación sino que también se debe saber qué tan buenas son por su proximidad al valor nominal. C_p y C_{pk} refieren al porcentaje de elementos fuera de especificación, mientras que C_{pm} refiere a la calidad global de los mismos. La elección del índice a emplear es, en definitiva, una decisión estratégica, ya que ella exhibe el concepto de calidad para la empresa. Taguchi se enfoca en la reducción de la variación en relación con un valor objetivo y no en la reducción de la variabilidad sólo para cumplir con las especificaciones, por lo cual el índice C_{pm} resulta apropiado para medir la calidad de un proceso, teniendo en cuenta lo que se entiende en la actualidad por calidad (asq.org/glossary.q.html, consulta en línea: 06/10/2014).

2.4.1 Comparación de la *performance* de los índices C_{pm} y C_{pk}

2.4.1.1 Procesos Normales

Con el propósito de demostrar que el índice C_{pm} tiene mejor *performance* para detectar procesos no capaces que el índice C_{pk} , se simuló procesos normales con diferentes corrimientos de su media μ respecto al valor nominal y distintos desvíos estándar σ . Se fijó el valor nominal en 0 y los límites de especificación en ± 3 . Como en procesos reales los parámetros μ y σ son desconocidos, no pueden calcularse los valores verdaderos de los índices sino que, en realidad, se obtienen valores estimados de ellos a partir de las estimaciones de μ y σ . En esta simulación se estimaron μ y σ mediante \bar{X} y $\frac{R}{d_2}$, que son las estimaciones empleadas para construir las gráficas de control necesarias para determinar si el proceso está bajo control estadístico (Prat Bartés *et al.*, 2000). Se seleccionaron aleatoriamente 25 muestras de tamaño 4 para cada población normal generada a partir de diferentes valores de los parámetros μ y σ y luego se calcularon los índices C_{pk} y C_{pm} estimados. Cada proceso se simuló 10000 veces y se contabilizó el número de veces en que cada índice fue menor que 1.33, considerando que estos casos corresponden a procesos no capaces. Los resultados se presentan a continuación:

TABLA 9. Comparación de la *performance* de los índices C_{pm} y C_{pk} en procesos normales

Media	Desvío	C_{pm} real	C_{pk} Real	Número de $\widehat{C}_{pm} < 1.33$	Número de $\widehat{C}_{pk} < 1.33$
0	0.5	2	2	0	0
	0.25	4	4	0	0
	0.125	8	8	0	0
1	0.5	0.89	1.33	9909	0
	0.25	0.97	2.66	8740	0
	0.125	0.99	5.33	6706	0
1.5	0.5	0.63	1	10000	23
	0.25	0.65	2	10000	0
	0.125	0.66	4	10000	0
2	0.5	0.485	0.667	10000	4792
	0.25	0.496	1.333	10000	0
	0.125	0.499	2.667	10000	0
2.5	0.5	0.392	0.33	10000	9982
	0.25	0.398	0.66	10000	0
	0.125	0.399	2.667	10000	0

Por ejemplo, para un proceso con media $\mu = 1$ y $\sigma = 0.5$, los índices reales son $C_{pm} = 0.89$ (que señala un proceso no capaz) y $C_{pk} = 1.33$ (que indica un proceso capaz). De las 10000 simulaciones para esos valores de los parámetros, en 9909 \widehat{C}_{pm} resultó menor que 1.33, es decir, en 9909 casos detectó la falta de capacidad del proceso, mientras que \widehat{C}_{pk} siempre indicó un proceso capaz, es decir, \widehat{C}_{pk} nunca pudo detectar un corrimiento de la media en dos desvíos estándar respecto del valor nominal.

Como es de esperar, cuando el proceso está centrado ambos índices tienen igual *performance*. Cuanto mayor es el desplazamiento de la media respecto al valor nominal, mayor diferencia se observa en la *performance* de los índices para detectar procesos no capaces. C_{pm} pena no solamente la variabilidad sino también el desplazamiento de la media del proceso, y aunque disminuya el desvío estándar, el valor del índice no mejora considerablemente. Esto no ocurre con C_{pk} , que aumenta su valor al disminuir el desvío.

En los casos en que los desvíos son pequeños, se puede observar que los índices C_{pk} estimados a partir de las simulaciones determinan que los procesos son capaces, sin tener en cuenta el desplazamiento de la media del proceso. Incluso, cuando la media se desplaza más de dos unidades respecto al valor nominal y estando a sólo una unidad del límite superior de especificación, se puede concluir del valor de \widehat{C}_{pk} que se estaría en presencia de un proceso capaz (para $\sigma = 0.25$) o de calidad Seis Sigmas (para $\sigma = 0.125$). En cambio, para la totalidad de las simulaciones, en estos casos \widehat{C}_{pm} exhibe correctamente la realidad de los procesos.

2.4.1.2 Procesos no normales

Para analizar el comportamiento de los índices de capacidad ante la falta de normalidad, se supuso que la característica de calidad a monitorear se ajusta a una distribución de probabilidad Weibull con dos parámetros λ (escala) y k (forma). Se eligió esta distribución porque en la práctica refleja el comportamiento de muchos procesos industriales. Además, de acuerdo con los valores que se fijan para sus parámetros, engloba otras familias de distribuciones de probabilidad como la exponencial y la normal.

Análogamente a lo realizado para el caso de procesos normales, se simularon procesos Weibull con diferentes valores de los parámetros k y λ . Para cada proceso con parámetros λ y k , se fijaron los límites de especificación en 0 y L, de manera tal que $P(X>L) = 0.00006$ (lo que asegura procesos capaces), y el valor objetivo se estableció en el centro del intervalo (0;L), lo que equivale en procesos normales a valores de índices de capacidad de 1.33. Para estimar los valores μ y σ del proceso se seleccionaron aleatoriamente de cada población Weibull con parámetros λ y k , 25 muestras de tamaño 4. Cada proceso se simuló 10000 veces y se contabilizó el número de veces en que los índices \widehat{C}_{pm} y \widehat{C}_{pk} fueron menores que 1.33. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

TABLA 10. Comparación de la performance de los índices C_{pm} y C_{pk} en procesos no normales

Parámetros de la distr. Weibull	$\widehat{C}_{pm} < 1.33$	$\widehat{C}_{pk} < 1.33$
$\lambda = 0.25; k = 1$	10000	10000
$\lambda = 0.25; k = 2$	10000	10000
$\lambda = 0.75; k = 1$	10000	10000
$\lambda = 0.75; k = 2$	10000	10000
$\lambda = 1; k = 0.5$	10000	10000
$\lambda = 1; k = 1$	10000	10000
$\lambda = 1; k = 1.5$	10000	10000
$\lambda = 1; k = 3.66$	9792	9864
$\lambda = 2; k = 3.8$	9794	9873
$\lambda = 1; k = 5$	9986	9959

Se observa que, a pesar de que los procesos simulados son capaces, prácticamente en todos los casos las simulaciones arrojan como resultados valores de índices menores a 1.33. Sólo en los casos en que los procesos Weibull se aproximan a una distribución normal ($3 < k < 4$) se registran algunas pocas simulaciones (menos del 3%) en las que los índices detectan procesos capaces. Además, si bien \widehat{C}_{pm} muestra una mejor *performance* que \widehat{C}_{pk} para detectar procesos capaces, esta diferencia (menor al 1%) no es significativa en la práctica. Es decir, las simulaciones confirman que, cuando los procesos distan de ser normales, C_{pm} presenta la misma dificultad que C_{pk} para detectar la capacidad de procesos.

3. CONCLUSIONES

Las contribuciones de Taguchi al Control Estadístico de la Calidad justifican ampliamente que sea considerado uno de los gurúes de la calidad.

Con la Función Pérdida de Calidad generó en su momento un cambio en la manera de entender y medir la calidad, pues orientó los esfuerzos para la mejora de la calidad en el ajuste de la media y la reducción de la variabilidad de los procesos simultáneamente, concepto que se sostiene en la actualidad.

Incorporó el Diseño de Experimentos de manera práctica al ámbito de la industria, simplificando considerablemente su aplicación a través de los Arreglos Ortogonales, con los cuales se obtienen resultados confiables, como quedó evidenciado en las simulaciones realizadas en este trabajo para medir su potencia.

Es notable la practicidad del método de Taguchi como alternativa al Diseño de Experimentos clásico cuando los diseños involucran factores a tres niveles, o incluso factores con niveles múltiples, ya que su tratamiento es similar al que se realiza para los factores a dos niveles, lo que implica una gran ventaja operativa. Estas son situaciones frecuentes en la actualidad, donde los procesos de producción de bienes y de prestación de servicios tienden a ser cada vez más complejos, provocando que el número de factores a analizar aumente, así como también el número de niveles para ellos.

Taguchi basó su estrategia para la reducción de la variabilidad presente en todo proceso en un método estadístico simple pero efectivo como el índice de Señal-Ruido. En este sentido, la incorporación de los arreglos Interno/Externo permite evaluar simultáneamente factores de control y de ruido con un número menor de ensayos que el necesario para el Diseño de Experimentos clásico y mayor potencia en los resultados obtenidos, como se mostró en el ejemplo de aplicación.

El índice de capacidad de procesos C_{pm} propuesto por Taguchi representa su enfoque acerca de la mejora de la calidad, dado que tiene en cuenta tanto la dispersión del proceso como su alejamiento del valor nominal, por lo cual resulta apropiado para medir la calidad de un proceso, teniendo en cuenta los estándares actuales de calidad. A través de simulaciones en este trabajo se exhibió la mayor sensibilidad de este índice respecto de los índices de capacidad de primera generación, para detectar la falta de capacidad de procesos normales. Se mostraron también las consecuencias de la no verificación del supuesto de normalidad en la implementación de los índices de capacidad C_{pm} y C_{pk} .

Consideramos, a partir de lo expuesto en este trabajo, que las contribuciones de Taguchi al Control Estadístico de la Calidad han favorecido el desarrollo de la investigación orientada a la mejora de la calidad en la empresa y su utilidad sigue vigente en la actualidad.

4. REFERENCIAS

ASLAN, E.; CAMUŞCU, N. (2006): "DESIGN OPTIMIZATION OF CUTTING PARAMETERS WHEN TURNING HARDENED AISI 4140 STEEL (63 HRC)

WITH AL₂O₃+TiCN MIXED CERAMIC TOOL". Materials & Design. Vol. 28, Issues 5. ISSN: 0261-3069.

BOYLES, R. (1991): "THE TAGUCHI CAPABILITY INDEX". Journal of Quality Technology. Vol 23, 17-26.

CROSBY, P. (1979): "QUALITY IS FREE". New York. Mc Graw Hill. ISBN: 0-07-014512-1.

DEMING, W. E. (2000): "FUERA DE LA CRISIS". Massachusetts. Editorial MIT. ISBN: 0-262-54115-7.

FEIGENBAUM, A. (1967): "CONTROL TOTAL DE LA CALIDAD". México. Editorial CECSA.

HERNÁNDEZ, A. (2012): "APLICACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS, MÉTODO DE TAGUCHI, A UN PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA". Trabajo de titulación (Magister en Estadística Aplicada). Universidad Nacional del Comahue. 175 pág.

ISHIKAWA, K. (1986): "¿QUÉ ES EL CONTROL TOTAL DE LA CALIDAD? EL MODELO JAPONÉS". Bogotá. Grupo Editorial NORMA. ISBN: 958-04-7040-5.

JURAN, J. (2005): "MANUAL DE CONTROL DE CALIDAD". Barcelona. Reverté S.A. ISBN: 84-291-2652-X.

MASCÓ, R. (1996): "MANUAL PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE TAGUCHI EN LA INGENIERÍA DE CALIDAD Y EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS INDUSTRIALES". Rosario, Argentina. UNR Editora. ISBN: 950-673-131-4.

MOGHADDAM, J.; SARRAF-MAMOORY, R. (2007): "PURIFICATION OF ZINC AMMONIACAL LEACHING SOLUTION BY CEMENTATION: DETERMINATION OF OPTIMUM PROCESS CONDITIONS WITH EXPERIMENTAL DESIGN BY TAGUCHI'S METHOD". Separation and Purification Technology. ISSN: 1383-5866.

MONTGOMERY, D. (1991): "DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS". México. Grupo Editorial Iberoamérica. ISBN: 968-7270-79-9.

MONTGOMERY, D. (1991): "CONTROL ESTADÍSTICO DE LA CALIDAD". México. Grupo Editorial Iberoamérica. ISBN: 968-7270-79-9.

MUKHERJEE, I.; PRADIP, K. (2006): "A REVIEW OF OPTIMIZATION TECHNIQUES IN METAL CUTTING PROCESSES". Computer & Industrial Engineering. Vol. 50, Issues 1-2, 15-34. ISSN: 0360-8352.

OGUZ, E.; KESKINLER, B.; ÇELIK, C.; ZEYNEP, C (2006): "DETERMINATION OF THE OPTIMUM CONDITIONS IN THE REMOVAL OF BOMAPLEX RED CR-L DYE FROM THE TEXTILE WASTEWATER USING O₃, H₂O₂, HCO₃⁻ AND PAC". Journal of Hazardous Materials. Volume 131, Issues 1-3, 17: 66-72. ISSN: 0304-3894.

PANDE, P.; NEUMAN, R.; CAVANAGH, R. (2004): "LAS CLAVES PRACTICAS DE SEIS SIGMA. UNA GUIA DIRIGIDA A LOS EQUIPOS DE MEJORA DE PROCESOS". Madrid. McGraw Hill. ISBN: 84-481-4037-0.

PRAT BARTÉS, A.; TORT-MARTORELL LLABRÉS, X.; GRIMA CINTAS, P.; POZUETA FERNÁNDEZ, L. (2000): "MÉTODOS ESTADÍSTICOS. CONTROL Y MEJORA DE LA CALIDAD". Barcelona. Alfaomega Grupo Editor. ISBN: 84-8301-222-7.

ROMERO VILAFRANCA, R.; ZÚNICA RAMAJO, L. (2004): "MÉTODOS ESTADÍSTICOS EN INGENIERÍA". Valencia. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. ISBN: 84-9705-727-9.

SADERRA, I.; JORBA, L. (1993): "EL SECRETO DE LA CALIDAD JAPONESA". Barcelona. Editorial Marcombo S.A. ISBN: 84-267-0913-3.

SHEWHART, W. (1980): "CONTROL ECONÓMICO DE LA CALIDAD EN MANUFACTURA". E.E.U.U. American Society for Quality Control. ISBN: 0-87389-070.

TAGUCHI, G.; WU. (2005): "TAGUCHI'S QUALITY ENGINEERING HANDBOOK". New Jersey. John Wiley and Sons. ISBN: 047-141-334-8.

TZENG CHEN; FU-CHEN. (2006): "MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF HIGH-SPEED ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PROCESS USING A TAGUCHI FUZZY-BASED APPROACH". Materials & Design. Vol 38, Issues 4, 1159 – 1168. ISSN: 0261-3069.

VIJAYAN, N.; NAIR MURRAY, N. (1992): "TAGUCHI PARAMETER DESIGN: A PANEL DISCUSSION". Technometrics, Vol 34, (2): 127-161.

WU, Y.; WU, A. (1997): "DISEÑO ROBUSTO UTILIZANDO LOS MÉTODOS DE TAGUCHI". Madrid. Ediciones Díaz de Santos. ISBN: 84-7978-305-2.

http://www.amsup.com/BIOS/g_taguchi.html (consulta en línea: 06/10/2014).

http://asq.org/about-asq/who-we-are/bio_taguchi.html (consulta en línea: 06/10/14). asq.org/glossary.q.html (consulta en línea: 06/10/2014).