

# UNA REVISION CRITICA DE LA RAZON SEÑAL RUIDO USADA POR TAGUCHI

A critical review of the signal to noise methodology used in the Taguchi.

Eduardo Arturo Cruz Trejos<sup>1</sup>, Pedro Daniel Medina Varela<sup>2</sup>, Carlos Andrés Silva Diaz<sup>3</sup>.

Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

ecruz@utp.edu.co

pemedin@utp.edu.co

carlosasilva30@hotmail.com

**Resumen**— Este documento pretende revisar los inconvenientes y desventajas que se tienen con el diseño de experimentos en especial con las razones señal ruido de la metodología Taguchi, los cuales, según el estudio dificultan el diseño experimental haciendo de ella una experiencia dispendiosa.

**Palabras clave**— Calidad, Diseño de experimentos, Razón señal ruido, Taguchi.

**Abstract**— This paper aims to review the problems and disadvantages that need to design experiments in particular the reasons SNR Taguchi methodology, which according to the studies difficult experimental design making it an extravagant experience.

**Key Word** — Quality, Design of Experiments, Signal-to-Noise ratio, Taguchi.

## I. INTRODUCCIÓN

Un elemento fundamental en el sistema de producción actual es la Ingeniería de Calidad, serie de planteamientos para predecir y prevenir las dificultades y problemas, que podrían ocurrir en el mercado, después de que un producto se vende y es usado por el cliente bajo múltiples condiciones ambientales durante el periodo de vida planteado.

La contribución de Taguchi a los métodos de mejora de la calidad es sin duda excepcional. Sin embargo, existe cierta crítica de sus métodos de parte de algunos estadísticos occidentales de renombre, en particular. Box [1] quien al dar una discusión sobre Kackar [2], observa que los

procedimientos estadísticos de Taguchi son con frecuencia innecesariamente complicados e ineficientes.

## II. CONTENIDO

Taguchi hace una separación de los factores del proceso o producto en factores controlables y factores ruido. Los factores controlables son aquellas variables susceptibles de fijarse a niveles deseados durante el proceso. Los factores ruido son aquellos que influyen en el proceso pero que al no poderse controlar, por ser muy costoso o difícil, producen variabilidad.

El Método Taguchi es una metodología de varias etapas, a saber, (1) Diseño, (2) parámetros de diseño, y (3) Diseño de la Tolerancia.

Diseño de Sistemas: El enfoque del diseño de sistemas es en la determinación de los niveles adecuados de trabajo de factores de diseño.

Diseño de parámetros: el diseño de parámetros busca determinar los niveles de factores que producen el mejor rendimiento del producto

Tolerancia de diseño: La tolerancia es una manera de afinar los resultados del diseño de parámetros por endurecimiento de la tolerancia de los factores con influencia significativa sobre el producto

Un aspecto clave en el diseño de parámetros es el introducir los factores ruido en el diseño de experimentos para estudiar la relación que tienen con los factores controlables. Por lo tanto se asume que, aunque incontrolables en el sistema, los factores

<sup>1</sup> Ingeniero Mecánico, M. Sc.

<sup>2</sup> Ingeniero Industrial, M. Sc.

<sup>3</sup> Ingeniero Industrial, M. Sc.

ruido pueden controlarse para propósitos experimentales. Taguchi [3].

Bryne y Taguchi [4], distinguen entre dos tipos de factores: (I) los factores controlables que pueden ser libremente elegidos por el diseñador; y (ii) los factores de ruido que representan los factores incontrolables, tales como las condiciones ambientales.

La metodología de Taguchi enfatiza en:

Diseño Robusto: Es generar un producto lo menos variable posible ante cambios del entorno.

Minimización de la función de pérdida: es la minimización de la pérdida económica debido a las corridas en condiciones no-óptimas.

Maximización de la razón señal ruido: es el alcance de los mejores objetivos del proceso bajo las condiciones no controlables (ruido).

La idea central de encontrar los niveles de los factores controlables para reducir la variabilidad transmitida por variables de ruido (conseguir la robustez ante la presencia de los factores ruido) demanda la existencia de ciertas interacciones entre los factores ruido y los controlables.

Los diseños experimentales de Taguchi, están basados en arreglos ortogonales y se hicieron populares por el ingeniero Genichi Taguchi. Normalmente se identifican con un nombre como L8, que indica un arreglo con 8 corridas.

En la metodología de Taguchi la parte experimental se realiza empleando un diseño ortogonal para los factores controlables, denominado arreglo interno, que es cruzado con otro diseño ortogonal para los factores ruido, llamado arreglo externo. Los niveles de los factores ruido en el arreglo externo se colocan por fila y no por columna. Cada fila en el arreglo interno junto con cada columna en el arreglo externo conforman las condiciones de cada uno de los experimentos que se realizan y los resultados de los se presentan en una matriz llamada arreglo cruzado.

Para ilustrar la estructura en que se suelen presentar estos arreglos, se muestran en la Figura 1 los datos correspondientes a un experimento que Miller, Sitter, Wu y Long [5], ellos la analizan para conocer la distorsión que tienen el engranaje y los piñones de la transmisión de un coche, durante un tratamiento de endurecimiento con calor. El estudio incluye cinco factores controlables y tres factores ruido.

	Z <sub>1</sub>	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1			
	Z <sub>2</sub>	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1			
	Z <sub>3</sub>	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1			
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>								
-1	-1	-1	-1	1	8,0	-0,5	-1,0	13,0	12,0	1,5	14,0	14,0
1	-1	-1	-1	-1	0,0	0,0	4,0	1,0	8,0	-4,0	-2,0	-0,5
-1	1	-1	-1	-1	-0,5	5,0	3,5	1,0	8,0	12,5	-1,0	3,0
1	1	-1	-1	1	4,5	-3,0	-2,0	-6,5	0,5	19,0	0,5	4,0
-1	-1	1	-1	-1	5,5	2,0	6,0	10,5	16,5	2,0	6,0	4,5
1	-1	1	-1	1	1,0	0,0	3,0	8,5	4,5	9,5	-1,0	4,5
-1	1	1	-1	1	3,0	13,5	6,0	-2,0	4,5	5,5	18,5	-1,5
1	1	1	-1	-1	4,5	-1,5	1,5	13,0	0,0	6,0	-2,0	19,5
-1	-1	-1	1	-1	5,0	-1,5	3,5	2,0	1,0	6,5	6,5	9,5
1	-1	-1	1	1	8,0	0,0	2,0	-1,0	2,0	4,0	8,5	-1,0
-1	1	-1	1	1	3,5	1,5	10,5	4,0	13,0	0,5	6,5	-0,5
1	1	-1	1	-1	1,0	-3,0	8,0	8,0	7,5	-1,0	7,5	-0,5
-1	-1	1	1	1	12,0	6,5	8,0	9,5	7,5	7,0	12,0	12,5
1	-1	1	1	-1	8,0	-3,0	13,5	-5,0	6,5	4,0	21,0	11,0
-1	1	1	1	-1	17,0	11,5	3,5	-4,0	7,0	5,0	15,5	6,0
1	1	1	1	1	14,0	9,5	-3,0	6,0	-1,5	10,5	8,0	1,5

Figura 1. Matriz ortogonal típica del método Taguchi.

Como es necesario efectuar 8 pruebas para cada fila del arreglo interno se necesitó de 16x8 = 128 experimentos. Este ejemplo ilustra uno de los aspectos duramente criticados de la metodología de Taguchi, el número en ocasiones excesivamente grande de pruebas que se tienen que realizar.

Muchos de los diseños que sugiere Taguchi, tanto para el arreglo interno como para el arreglo externo, son diseños factoriales altamente fraccionados, lo cual no permite obtener estimaciones de las interacción de los factores controlables. Para el análisis de los resultados Taguchi clasifica los distintos problemas de diseño de parámetros dependiendo del objetivo que se quiere obtener con la respuesta (minimizarla, maximizarla, u obtener un valor nominal) y dependiendo de la categoría calcula un índice, llamado cociente señal ruido.

El siguiente paso es identificar los factores señal ruido que pueden tener un impacto negativo en el sistema de rendimiento y calidad; los factores de ruido son los parámetros incontrolables o son demasiado caros para el control; los factores de ruido incluyen las variaciones en las condiciones de funcionamiento del medio ambiente, el deterioro de los componentes con el uso y variación en la respuesta entre los productos del mismo diseño con la misma entrada.

Después de los experimentos, el parámetro de la prueba óptima en el diseño del experimento debe ser determinado. Para analizar estos resultados, el método de Taguchi utiliza una medida estadística llamada señal-ruido (S/N) tomado de la teoría de control eléctrico (Phadke [6]).

La relación S/N desarrollado por el Dr. Taguchi es una medida de rendimiento para elegir niveles de control mejores que hacer frente al ruido (Bryne y Taguchi [4] y Phadke [6]). La relación S/ N tiene en cuenta tanto la media y la variabilidad. En su forma más simple, la relación S/N es la proporción de la media (señal) a la desviación estándar (ruido). La ecuación de la relación S / N depende del criterio de la característica de calidad que se quiere optimizar. Aunque hay muchos diferentes posibles en las relaciones S / N, tres de ellos son considerados estándar y son de aplicación general en las siguientes situaciones (Bryne y Taguchi [4] y Phadke [6]).

- *El mayor es mejor: característica de calidad (Ejemplo: fuerza, rendimiento).*

- *El más pequeño es mejor: característica de calidad (Ejemplo: contaminación),*

- *Nominal es mejor: característica de calidad (Ejemplo: dimensión).*

Sea cual sea el tipo de característica de calidad o costo, las transformaciones son de tal manera que la relación  $S/N$  siempre se interpreta de la misma manera: cuanto mayor sea la relación  $S/N$  el resultado será mejor.

Taguchi recomienda analizar la variación usando una relación apropiada  $(S/N)=Z$  que depende de las respuestas y, eligiendo la combinación de parámetros que maximicen este cociente, tomando los factores de control que mayor "efecto" tienen cuando  $Z$  es la respuesta experimental, para controlar el ruido de las variables no controlables. Así mismo, sugiere analizar la respuesta media y para cada corrida en el arreglo interno, elegir los factores de mayor efecto en esta respuesta, que no hayan sido usados para controlar el ruido, para lograr el objetivo deseado. La determinación de los efectos es efectuada utilizando gráficas de medias e interacciones simples.

Las relaciones señal-a-ruido  $Z$  son derivadas de la función de pérdida cuadrática<sup>2</sup> y tres de ellas son consideradas "estándar" de acuerdo a tres posibles objetivos:

$$\text{Nominal es mejor} \quad (S/N)_N = -10 \log \left( \frac{\bar{y}^2}{s^2} \right)$$

$$\text{Mayor es mejor} \quad (S/N)_L = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum \frac{1}{y^2} \right)$$

$$\text{Menor es mejor} \quad (S/N)_S = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum y^2 \right)$$

Nótese que estas razones están expresadas en una escala de decibels y por ello utilizan logaritmos base 10. Salvo cuestiones ingenieriles no hay otra razón de peso para no haber elegido logaritmos naturales o de cualquier otra base.

Taguchi afirma que en cada caso, la selección de los niveles de los factores de control que maximicen la razón  $S/N$  garantiza una variabilidad mínima y por tanto una mayor robustez contra las variables no controlables.

#### Criticas a la razón señal/ruido como respuesta

El entusiasmo despertado en los Estados Unidos por las prácticas de calidad japonesas a principios de los años 80 y las dos conferencias, organizadas por la Quality Assurance Center de los AT&T Bell Labs, fueron la base para que las

ideas de Taguchi se dieran a conocer en la comunidad estadística occidental. A la par de su creciente uso en la industria surgieron las críticas, algunas de ellas tan intrascendentes como la originalidad de la idea de robustez o si los diseños ortogonales empleados por Taguchi son los diseños clásicos de Plackett y Burman presentados en 1946 [7]. A partir de entonces las críticas han venido acompañadas de propuestas alternativas, desde estrategias experimentales hasta formas de analizar los datos, entre ellas cabe destacar el uso de transformaciones, Box [8].

Ryan [9], provee una discusión detallada y una revisión de las limitaciones de los métodos de Taguchi incluyendo la selección de las razones  $S/N$ , la elección de los arreglos ortogonales, optimización, etc. El recomienda que un diseño discriminante de algún tipo se aplique con el propósito de eliminar factores que no son importantes. Afirma que para seleccionar factores es mejor usar factoriales fraccionados (en vez de los arreglos ortogonales sugeridos por Taguchi). Para la optimización de todas las medidas de desempeño tales como los cocientes  $S/N$ , Ryan [9] recomienda el uso de procedimientos de optimización matemáticos como programación no lineal.

Analícemos en primer lugar la razón nominal es mejor.

$$(S/N)_N = -10 \log \left( \frac{\bar{y}^2}{s^2} \right)$$

Taguchi sugiere que es mejor trabajar con  $(S/N)_N$  en vez de la varianza directamente, ya que en muchos casos la media y la desviación estándar de los procesos están relacionadas. Así propone, como comentamos anteriormente, hallar primero los factores de control que influyen "mayormente" y fijarlos para que maximicen la razón  $(S/N)_N$ . Después determinar los factores que tienen un efecto significativo en la media, pero no en la razón  $(S/N)_N$ .

Sin embargo si se observa que:

$$(S/N)_N = -10 \log \left( \frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) = 10 \log(\bar{y}^2) - 10 \log(s^2)$$

Si la media se fija un valor objetivo estimado por  $\bar{y}$ , entonces minimizar  $(S/N)_N$  equivale a minimizar  $\log(s^2)$ . A parte esto, que implica cálculos más simples, también permite una comprensión más clara de las relaciones factoriales con la variabilidad del proceso y por tanto del proceso en  $s_i$ . Además si se minimiza directamente el  $\log(s^2)$ , se elimina el riesgo de obtener conclusiones erróneas a partir de la maximización de  $(S/N)_N$ , en caso de que alguno de los factores manipulados desplace la media hacia arriba en vez de empujar  $s^2$  hacia abajo.

De lo anterior puede deducirse que, probablemente, en muchas ocasiones sea más seguro trabajar con la varianza o su logaritmo directamente que con la razón señal-ruido sugerida por Taguchi.

Las Razones  $(S/N)_L$  y  $(S/N)_S$  son aun más conflictivas.

Por ejemplo para la razón

$$(S/N)_S = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum y^2\right)$$

Taguchi parte de una función de pérdida cuadrática con  $y$  no negativa (parábola) de la forma.

$$L = C \frac{1}{n} \sum y^2$$

con  $C$  constante. Luego su logaritmo está dado por:

$$\log(L) = \log(C) + \log\left(\frac{1}{n} \sum y^2\right)$$

y por lo tanto  $(S/N)_S = 10\log(C) - 10\log(L)$ , de modo que al maximizar  $(S/N)_S$ , se minimizará  $\log(L)$ . Sin embargo es fácil demostrar que:

$$\frac{1}{n} \sum y^2 = \bar{y}^2 + \left(\frac{n-1}{n}\right) S^2$$

Por lo tanto el uso de  $(S/N)_S$  como variable de respuesta confunde los efectos de localización y de dispersión, resultando inconveniente para hacer inferencias adecuadas. Algo similar ocurre con  $(S/N)_L$ . Finalmente  $(S/N)_S$  y  $(S/N)_L$  incluyen a  $y^2$  y  $1/y^2$ , lo que las hace muy sensibles a residuos inusitados o a valores de respuesta cercanos a cero.

Por lo anterior debemos concluir que el uso de las razones de señal-ruido propuestas por Taguchi, si bien no pueden ser descartadas siempre, si deben ser utilizadas con suma precaución en el análisis de datos experimentales. En los diseños tradicionales las transformaciones que se han de aplicar a las respuestas, son efectuadas de acuerdo a una serie de evidencias estadísticas y teóricas, lo que permite elegir la transformación más adecuada a cada caso.

Así como hay un reconocimiento prácticamente general a las principales contribuciones de Taguchi, también hay críticas bastante extendidas, siendo las más comunes las atribuidas al número excesivo de condiciones experimentales, al no considerar las interacciones entre factores controlables, al uso de cocientes señal ruido ineficientes, al celo excesivo en el proceso de optimización y a los análisis en ocasiones erróneos.

Si se ha hecho un gran esfuerzo experimental al usar el arreglo cruzado, obteniendo en ocasiones un número excesivo de observaciones, se considera que es un desperdicio el colapsar los datos en un cociente  $S/R$ , en

ocasiones con grandes pérdidas de información para el análisis. Por ejemplo, ignorar el efecto que tienen los factores en la respuesta y privar de un conocimiento más amplio del desempeño del proceso.

Box y Jones [10] tajantemente dice que no se puede defender lógicamente la necesidad de experimentar para conocer cuales factores tienen efecto principal significativo, asumiendo al mismo tiempo que se sabe cuales factores son los que tienen interacciones.

Si se ha hecho un gran esfuerzo experimental al usar el arreglo cruzado, obteniendo en ocasiones un número excesivo de observaciones, se considera que es un desperdicio el colapsar los datos en un cociente  $S/R$ , en ocasiones con grandes pérdidas de información para el análisis. Por ejemplo, ignorar el efecto que tienen los factores en la respuesta y privar de un conocimiento más amplio del desempeño del proceso.

Box [10], critica severamente los cocientes  $S/R$ , considerando los criterios de relevancia, eficiencia, robustez y transformación de datos. Muestra por ejemplo que el cociente  $S/R$  "cuanto mayor es mejor" puede confundir los efectos de localización con los de dispersión; que bajo el supuesto de datos normales, independientes e idénticamente distribuidos este cociente es ineficiente como medida de localización si se le compara con la media muestral y que no es excepcionalmente robusto en presencia de datos atípicos.

Un aspecto delicado en el uso del cociente  $S/R$  se basa en el supuesto de que el factor de ajuste tiene un efecto multiplicativo en la respuesta; como el supuesto no se puede garantizar Box [8], propone como alternativa evaluar un rango de transformaciones y hacer el análisis en términos de la transformación, lo cual da una gran simplificación.

Un defecto, conceptualmente más general, que hace al uso del relación  $S/R$  estriba en que se invierte el proceso normal de seleccionar primero el modelo y a partir de sus parámetros estimados elaborar para la predicción cantidades que incluyan su incertidumbre. La razón empírica para no crear primero las métricas resume en que el modelado para ellas suele ser más complicado que el de la respuesta básica. Si se consigue un modelo más preciso se logra una optimización más confiable y finalmente un mejor diseño del producto o proceso. Es más fácil que el ingeniero tenga conocimientos previos para modelar directamente la respuesta de interés que para modelar el cociente  $S/R$ .

### III. CONCLUSIONES

Son innegables las aportaciones que ha hecho la metodología de Taguchi a la mejora de la calidad: con su innovador concepto de diseño robusto de parámetros, su énfasis en la variabilidad presente en productos y procesos, la orientación que da a la disminución de esta en la fase de diseño, con su idea de diseñar

para modelar de manera simultánea la media y la variabilidad, el introducir sistemáticamente los factores ruido en los diseños experimentales para conocer las relaciones que tienen con los factores controlables, la difusión del importante papel que tienen los estudios de robustez en el diseño de los productos y procesos industriales, fomentando y expandiendo adicionalmente el empleo de los diseños experimentales y reduciendo la separación existente entre ingeniería y estadística.

Más polémicos son los defectos que se le encuentran a su metodología, como son: el número excesivo de condiciones experimentales, el no considerar las interacciones entre factores controlables, el uso de cocientes señal ruido ineficientes, el celo excesivo en el proceso de optimización y los análisis en ocasiones erróneos.

Estas críticas han dado lugar a interesantes y valiosas aportaciones, desde nuevos planes experimentales hasta métodos de identificación de factores, algunas de estas aportaciones adecuan métodos estadísticos ya existentes, como los diseños en parcelas divididas (split-plot), la metodología de superficie de respuestas y los planes experimentales óptimos, otras son aportaciones que han ampliado la metodología estadística, como las medidas del desempeño que son independientes del ajuste y los estudios de efectos sobre la dispersión.

#### REFERENCIAS

- [1] G.E.P. Box, "Discussion on Kackar's (1985) article", *Journal of Quality Technology*, vol. 17, No 4, pp.189-190, Oct. 1985.
- [2] R.N Kackar., "Off-line Quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Method", *Journal of Quality Technology*, vol 17, pp.176-188. Oct. 1985.
- [3] G. Taguchi, Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes, Asian Productivity Organization, NY, 1986.
- [4] D.M. Byrne y S. Taguchi, "The Taguchi Approach to Parameter Design", *Quality Progress*, Diciembre, 1987.
- [5] A. Miller, R. Sitter, C. F. J. Wu y D. Long "Are large Taguchi-style experiments necessary? A reanalysis of gear and pinion data", *Quality Engineering*, 6, pp 21-37.1993.
- [6] M.S. Phadke, Quality engineering using robust design. Prentice Hall, 1989.
- [7] R.L. Plackett, y J.P. Burman, "The design of optimum multifactorial experiments", *Biometrika*, 33, pp 305 - 325. 1946.
- [8] G. Box, "Signal-to-Noise Ratios, Performance Criteria, and Transformations," *Technometrics*, Vol. 30, No 1, pp. 1-17. Feb. 1988.
- [9] T.P. Ryan, *Statistical Methods for Quality Improvement*, John Wiley & Sons, New York, NY. 1989.
- [10] G. E. P Box y S. Jones. "Split-plot designs for robust experimentation", *Journal of Applied Statistics*, Vol 19 No (1), pp. 3-25. 1992