

INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA ROBUSTA

Resumen

La Ingeniería Robusta es una de las herramientas para la mejora y creación de procesos y productos fiables que se ha mostrado más dinámica desde su definición por el Dr. **Taguchi** en Japón a comienzos de los años 80. Como superación de los anteriores métodos de diseño de experimentos, se ha convertido en un método ingenieril que cada vez está conociendo nuevos desarrollos. Damos aquí solamente una introducción básica que los interesados podrán ampliar en los documentos especializados.

Palabras clave: Procesos diseño, método, control

Abstract

*The Robust Engineering is a tool oriented to the improvement and design of reliable processes and products which has proved to be one of the most dynamic from its definition by Dr. **Taguchi** in Japan at the beginning of the 80's. It has transcended the previous experiments design methods and now it is really an engineering method with more new developments every day. We offer in the following text only a basic presentation of its theory, in order that the eventual users could enlarge their knowledge in the specialised papers.*

Keywords: Processes design, method, control

Preámbulo

La supervivencia de muchas empresas industriales españolas estará en pasar, a corto plazo, de simples fabricantes de productos cuyos diseños y requisitos, y, a veces, hasta los procesos, se les dan hechos, a ser creadores de sus propios productos y ofrecerlos a un mercado global con fuertes exigencias de competitividad. El diseño de productos en el campo de los bienes de equipo y, especialmente, en los bienes de consumo duradero, precisa, por un lado, un profundo conocimiento de los mercados y, por otro, que esos productos sean altamente fiables por su proceso de fabricación y durante su uso por los clientes finales.

Todos los ingenieros sabemos que un producto técnicamente bien diseñado y

Ignacio Fernández de Aguirre

Ingeniero Industrial
ASI Euskadi; Ingeniería de la Calidad, S.L.

Recibido: 25/4/06

Aceptado: 19/5/06



aceptado por unas pruebas con prototipos puede presentar durante su uso —y de hecho presenta— múltiples problemas: algunos derivados del propio envejecimiento, otros de condiciones de uso imprevistas y muchos, de las pequeñas diferencias que genera la fabricación seriada cuyos parámetros no somos capaces de controlar totalmente por razones técnicas unas veces o económicas otras.

Es a este aspecto al que se dirige la actividad básica de la Ingeniería Robusta: a conseguir productos cuyo diseño los haga menos sensibles a los diversos aspectos que no se puedan controlar y no precisamente extremando los niveles de exigencia en la calidad de las materias primas ni sobredimensionando los cálculos resistentes sino, al contrario, buscando mantener el menor costo y la mayor competitividad.

Los métodos de Ingeniería Robusta (IR), aplicados ampliamente en Japón y EEUU, con progresiva introducción en Europa, son hoy la base de muchos proyectos para componentes de Automoción y Aeronáutica, de equipos para Medicina, reproducción, imagen y sonido, periféricos de informática, Biotecnología, *software*, etc.

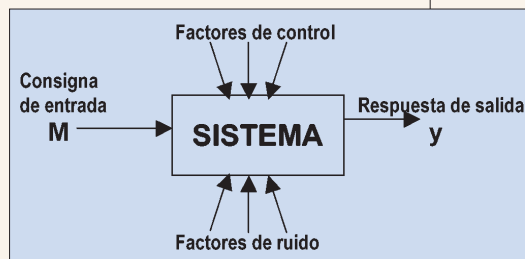
Conceptos básicos

La Ingeniería Robusta integra los conceptos de productos y procesos en el término genérico de sistemas, entendiendo por tales a los conjuntos de elementos relacionados o que interactúan y, dentro de ellos, se dirige a los sistemas abiertos, es decir a los que, recibiendo materiales o acciones del exterior, las transforman emitiendo otros materiales o actuaciones distintas. La optimización de sistemas será, por lo tanto, el objetivo primordial de esta metodología.

Factores de control

Tal como se aprecia en la Fig. 1, esta representación se puede

Fig. 1. Representación del funcionamiento de un sistema $y = f(M)$



de aplicar a un producto unitario o compuesto que recibiendo una acción exterior nos responde con otra en la forma que deseamos recibir; por ejemplo, un manómetro tradicional que, recibiendo la presión de un fluido, nos responde con el giro de una aguja que representa el valor de dicha presión, o también un proceso de laminado, en el que se introducen llantos de material y dimensiones determinadas y obtenemos un producto diferente, fleje, cuyo espesor será distinto siempre pero que quisiéramos igual para un mismo objetivo. Sobre la operación de uno y otro sistema actuarán factores de dos tipos:

- Factores de control que dominamos y gobernamos para monitorizar la operación.

- Factores de *ruido*, imposibles, difíciles o costosos de gobernar, que originan perturbaciones en los resultados o en la buena marcha del sistema.

¿Cuál es la razón para calificar de *ruido* a los factores que inciden negativamente en nuestro sistema? Simplemente por similitud con los resultados obtenidos en el uso de aparatos de sonido en los que, junto con la señal emitida portadora de voz o música, se mezclan con mayor o menor intensidad ruidos indeseables que perturban la audición. Eso supone que, en todo sistema, de la energía introducida se deriva, además de la energía útil contenida en la respuesta, una energía perdida por ruido, culpable de desgastes, vibraciones, chirridos, emisiones, y demás síntomas de mal funcionamiento, y que para minimizar la incidencia de los factores de ruido se deberá, en todo caso, maximizar el rendimiento energético del sistema.

El concepto de relación señal/ruido (S/R) en acústica, representa el cociente entre la energía útil contenida en la salida del sistema y la perdida bajo forma de ruido. La generalización de este concepto a cualquier sistema, es una genial aportación del Dr. **Taguchi** y constituye la base de la IR. La calidad de un sistema viene dada por el cociente entre los efectos de-

seados realmente obtenidos y los indeseados; a esto llamaremos relación señal/ruido (S/R), y su expresión en términos energéticos sería el camino más seguro para abordar los objetivos de mejora.

El diseño ideal del proceso o del producto es evidentemente el que pueda combinar unos factores de control tales que sean capaces de minimizar la incidencia de los factores de ruido, maximizando la relación S/R, y ello al menor costo posible. Es lo que constituye el enfoque general o **dinámico** para la aplicación de la IR. El paso inicial necesario para abordar el robustecimiento de un sistema será, por lo tanto, definir la llamada función ideal del mismo. Conociendo la **función objetivo**, que es lo que el cliente desea en expresiones vulgares, se determinará en primer lugar su **función básica**, traducción de la anterior a conceptos técnicos, y de ésta la citada función ideal, expresión matemática y punto de partida de los trabajos de robustecimiento, del tipo $y = f(\mathbf{M})$, que, cuando adopta un carácter lineal partiendo del origen, sería $y = \mathbf{KxM}$.

La IR es una verdadera rama de la Ingeniería que no resulta posible exponer aquí en su totalidad. Sin embargo, en muchos casos prácticos, se pueden abordar los problemas con el enfoque más sencillo de la misma, el llamado estático, que utilizando también el concepto de relación S/R calculado partiendo de la función pérdida de calidad, también original del Dr. **Taguchi**, nos permite alcanzar aceptables resultados de robustecimiento especialmente para sistemas cuyas características funcionales o resultados obtenidos deban alcanzar resultados predeterminados.

La pérdida de calidad y la relación S/R en el enfoque estático

La definición oficial de Calidad (ISO 9000:2000) la considera como “grado en el que un conjunto de características cumple con los requisitos”. No resulta esto suficiente para el Dr. **Taguchi**, sino que la completa, añadiendo que constituye “la propiedad que evita pérdidas al fabricante, al usuario y a la sociedad en general desde que un sistema es creado hasta

que es eliminado”. La función pérdida de calidad será la que permita cuantificar las consecuencias de la misma.

En la Fig. 2 podemos apreciar lo que se ha venido entendiendo por Calidad en los ámbitos industriales para un producto cuyo criterio de calidad deba satisfacer un valor óptimo; pero resulta claro que no es lo mismo para ese producto situarse de forma permanente cerca de los límites admisibles que más próximo al valor óptimo: los resultados se apreciarán con su uso y la **pérdida de calidad** se inicia nada más apartarse de él. El Dr. **Taguchi** propone que, para un valor y del criterio de calidad medido, la función pérdida es:

$$L(y) = k(y - y_n)^2$$

donde k será una constante que depende de las gastos derivados de garantías, menor duración, peor funcionalidad u otras consecuencias del producto considerado. Esta pérdida vendría representada por una parábola, nula precisamente cuando el valor de y coincide con y_n .

En el caso de un conjunto de elementos del mismo producto, la función pérdida se transformaría en:

$$L(y) = k[s^2 + (\bar{y} - y_n)^2],$$

siendo ahora $\bar{y}$ el valor medio del criterio de calidad medido y s el valor estadístico de la dispersión del conjunto, normalmente la desviación estándar muestral (s_{n-1}).

Si, al realizar un conjunto de productos con un proceso gobernado por unos factores de control determinados, no obtenemos los mismos resultados de la característica considerada como criterio de calidad, será precisamente por la acción de los factores de ruido presentes en el proceso. El desempeño del proceso se medirá calculando la citada relación señal/ruido (S/R), que se deriva, lógicamente, de la función de pérdida.

Por similitud con la medida de intensidades sonoras, el valor de la relación señal/ruido (S/R) para un conjunto de productos con un criterio de calidad mensurable que tenga asignado un valor central (*nominal es mejor*), al que resulta óptimo ajustar su consecución, se calcula con la fórmula:

$$S/N \text{ (dB)} = 10 \log [(\bar{y}/s)^2 - 1/n]$$

Este indicador, al igual que el representativo de la intensidad sonora (decibelio) carece de dimensión y la combinación de factores de control que consiga su optimización, será aquella que logre la menor dispersión posible en el valor de la característica de

calidad considerada. Cuando, como criterio de calidad, corresponda minimizar un valor, por ejemplo desgastes o consumos se denominará *menor es mejor* y, si es maximizarlo, por ejemplo fuerzas de cohesión o rendimientos, *mayor es mejor*. Para cada caso existen las fórmulas correspondientes que nos facilitan el cálculo de la relación S/R.

Las matrices de ensayos

En muy pocas ocasiones, el análisis teórico es suficiente para lograr resultados fiables y entonces la validación de un diseño de producto o de proceso debe ser reforzada a través de los ensayos pertinentes, y es tradicional la utilización del método “prueba y error”, con el que vamos corrigiendo los resultados basándonos en nuestros conocimientos tecnológicos. Se han desarrollado varias propuestas para aportar orden y sistemática a estos ensayos, que, si los factores de control son varios, pueden llegar a ser muy numerosos. De todas esas teorías orientadas al Diseño Organizado de Experimentos (DOE), la IR utiliza la llamada de matrices de experimentos fraccionarios **Taguchi**, más brevemente conocida por matrices ortogonales, que consiguen, de una forma reducida y sencilla, resultados suficientemente representativos de la influencia de cada factor de control, minimizando el número de los ensayos.

Para facilitar la aplicación de las matrices ortogonales, se dispone de una colección estándar de 33 matrices básicas, acompañadas, cuando procede, de sus tablas triangulares y gráficos lineales que facilitan su uso. Dependiendo de los factores de control disponibles, de los niveles a los que deseamos ensayarlos y de sus eventuales interacciones, se escoge la matriz estándar de experimentos a realizar o se la modifica adecuadamente. En el caso que ilustra este trabajo se presenta la matriz elegida para su resolución, en la que puede apreciarse su estructura y operatividad.

Además, habrá que tener en cuenta los factores de ruido durante la experimentación. Para ello existen varias estrategias según las circunstancias objetivo y según nuestro conocimiento previo de sus efectos. La preferida es repetir experimentos bajo “escenarios” de ruido distinto, pero, cuando no somos capaces de diseñar estos “escenarios” con seguridad, queda la alternativa del *ruido inherente*, que consiste en tener un número suficiente de resultados de cada experimento, por ejemplo fabricar bastantes elementos en cada uno, para dar ocasión al ruido de manifestarse espontáneamente.

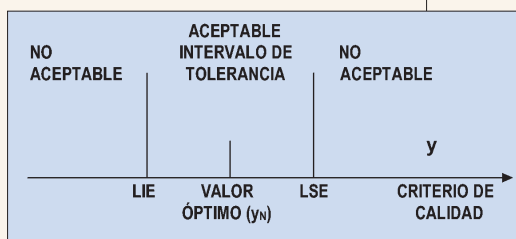


Fig. 2. Representación clásica del concepto de Calidad

Caso práctico

Para una mejor comprensión de la teoría precedente, vamos a presentar un caso práctico de posible resolución a través de lo que hemos denominado enfoque *estático*, cuyo objetivo es conseguir un valor central predeterminado (*nominal es mejor*) y cuyos factores de ruido no pueden ser localizados ni valorados claramente, siendo considerados como *ruido inherente*. Se trata de optimizar un proceso automático de fabricación en el que se producen láminas cuyo espesor se requiere de $100 \mu \pm 30 \mu$. El proceso dispone de siete factores de control, cuyo descripción no hace al caso, que hemos simbolizado de la A a la G y hemos determinado para cada uno de ellos dos posibles niveles de actuación que representamos por 1 y 2, de forma que, a través de la IR seamos capaces de conocer la combinación de factores que minimicen la incidencia de los ruidos apreciados en el proceso que determinan su variabilidad y la posición del valor medio real obtenido. Estos niveles estarán definidos por la práctica actual, las experiencias pasadas y/o las herramientas de mejora utilizables.

La colección de matrices ortogonales preconiza para los ensayos a realizar con siete factores de control a dos niveles la matriz denominada L_8 , que supone la ejecución de ocho ensayos, cada uno con una determinada combinación de factores. Por las características citadas de ser un proceso automatizado, se ha decidido efectuar 100 láminas por ensayo y medir el valor de la dimensión en una muestra de cinco de ellas, a razón de una por cada 20 elaboradas.

En la Fig. 4 apreciamos el plan de ensayos preconizado por la matriz aplicada en este caso. Su interpretación es así: para el ensayo nº 1, trabajaremos con todos

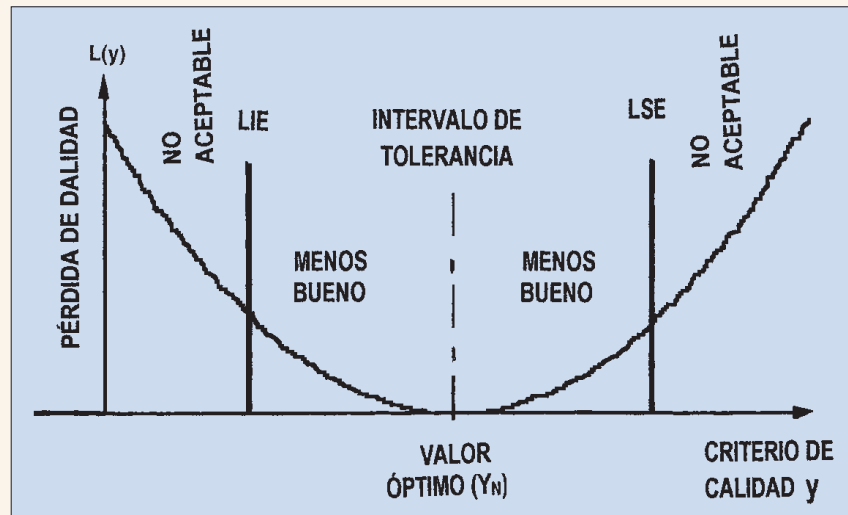


Fig. 3. Representación de la función de pérdida $L(y)$ para un criterio de calidad con valor centrado

los factores en el nivel 1, para el nº 2, con los factores A, B y C en el nivel 1 mientras que D, E, F y G estarán en el nivel 2, etc. En la Fig. 5 se dan los resultados de las mediciones realizadas en las cinco láminas muestreadas, calculando con ellas su media, su dispersión $s(s_{n-1})$ y la relación señal/ruido $[S/N(\text{dB})]$, aplicando la fórmula antes indicada.

Profundizando en estos cuadros podemos fácilmente conocer la influencia que cada nivel de cada factor ha tenido en la obtención de esos resultados. Por ejemplo, el factor A en su nivel 1 habrá obtenido:

- Para la media:
- Para la relación señal ruido: $\overline{S/R}$
- $\overline{(A1)} = [7,28+10,22+7,52+6,32]/4 = 7,84$.
- Con un efecto sobre su media general de: $\overline{S/R(A1)} - \overline{S/R} = 7,84 - 9,15 = -1,31$.
- Para la media: $\overline{A1} = [77+112+115+130]/4 = 108,5 \mu$ Con un efecto sobre su

media general de: $\overline{A1} - \overline{T} = 108,5 - 108 = 0,5 \mu$

Efectuando este cálculo para todos los factores y niveles, obtendremos el cuadro general de efectos representado en la Fig. 6, y sobre él podremos proceder a realizar la elección de la combinación de factores y niveles que mejor se acerque a los objetivos deseados.

Es evidente que, si lo deseable es maximizar el valor de la relación $S/R(\text{dB})$, elegiremos la combinación que sume los efectos positivos sobre ella, es decir A2-B1-C2-D2-E2-F1-G2, con lo que alcanzaremos una relación $S/R(\text{dB}) = 14,1$, superior a la obtenida en todas las combinaciones de los experimentos. Sin embargo, de ese modo, la media de los valores previsibles en la producción se sitúa en $121,5 \mu$, lejos de las 100μ nominales que pretendemos. Por eso buscamos algún factor que, sin afectar de forma notable la relación señal/ruido, nos facilite acercarnos al valor objetivo; y éste puede ser el pasar del C2 al C1 en una combinación final de A2-B1-C1-D2-E2-F1-G2.

Con este cambio, el valor previsible de la relación $S/R(\text{dB}) = 13,96$, es también superior al de todos los experimentos y el valor medio previsible para la dimensión objetivo es $99,5 \mu$. Podemos, incluso, calcular a la inversa el valor que tendría la dispersión en este caso:

$$S/N(\text{dB}) = 10 \log [(y^*/s)^2 - 1/n];$$

$$13,96 = 10 \log [(99,5/s)^2 - 1/4]$$

de donde $s = 19,84 \mu$, inferior a todas las dispersiones de muestras obtenidas en los experimentos. Es importante efectuar estos cálculos teóricos antes de proceder a la confirmación experimental ya que siempre aparecerán algunas diferencias y la naturaleza cuantitativa y cualitativa de esas diferencias nos darán una informa-

Ensayo Nº	Factores de control						
	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Fig. 4. Matriz de experimentos L_8 para siete factores de control en dos niveles

Ensayo Nº	Valores medidos en μ							Relación S/R(dB)
	M1	M2	M3	M4	M5	MEDIA	s	
1	110	50	50	115	60	77	32,71	7,28
2	140	80	130	140	70	112	34,21	10,22
3	160	65	115	165	70	115	47,57	7,52
4	195	70	125	190	70	130	61,37	6,32
5	120	120	110	120	70	108	21,68	13,91
6	160	80	125	170	80	123	42,66	9,09
7	115	65	110	170	65	105	43,45	7,51
8	115	70	125	90	70	94	25,35	11,32
						$\bar{T}^* = 108$		$\bar{S/R}^* = 9,15$

Fig. 5. Resultados de las mediciones y valor de las medias y S/R en cada ensayo y global

ción valiosa para evaluar la reproducibilidad futura de la solución teórica y orientación para posibles investigaciones adicionales. Por otra parte, con el colectivo de productos obtenidos en la confirmación experimental, utilizando su valor medio y la desviación típicas, junto con las tolerancias requeridas, es posible calcular la nueva capacidad preliminar del proceso, Pp o Ppk según proceda.

Aunque, por razones de espacio no lo presentamos aquí, la elección de una combinación óptima se ayuda visualmente con los gráficos ya comentados, representativos del cuadro de efectos y es posible complementarla con los análisis económicos pertinentes conociendo la incidencia en los costos del proceso que pueden tener los distintos niveles de los factores utilizados: como en todos nuestros trabajos de ingeniería, el compromiso justificado es siempre de vital importancia.

Conclusiones

Utilizando los métodos básicos de la IR, hemos expuesto, en el caso práctico utilizado, los pasos a dar para encontrar la combinación de factores de control que obtenga los mejores resultados posible

(media) y minimice la influencia de los factores de ruido (dispersión) en un proceso productivo que buscaba una sola característica con valor central predeterminado (nominal es mejor), y sin haber establecido un escenario definido de ruidos (**ruido inherente**), todo ello considerado bajo la perspectiva de un **enfoque estático**. Con este mismo enfoque puede abordarse la optimización simultánea de más de una característica, así como cuando se plantean los casos de mayor es mejor o menor es mejor, tanto con ruido inherente como con escenarios previstos del ruido. También, en caso de ser conocidas, la IR proporciona medios para considerar las eventuales interacciones entre los propios factores de control.

Los interesados en conocer los desarrollos matemáticos para la obtención de la fórmula de cálculo de la relación S/R (dB) utilizada en este enfoque, para el resto de los casos estáticos y del completo enfoque dinámico, con todas sus posibilidades, lo puede hacer en la breve literatura citada al final del artículo. La aparente complicación de los cálculos matemáticos se simplifica actualmente por la existencia de softwares sencillos en

los que, introduciendo los datos tomados en los experimentos, se procesan y obtienen las informaciones necesarias para la elección de combinaciones y para confirmar la bondad de las decisiones adoptadas.

Un desarrollo completo de la IR del Dr. **Taguchi** comprende no sólo la extensión del enfoque estático a los citados casos de menor es mejor o mayor es mejor, sino sobre todo al conjunto del **enfoque dinámico**. Éste es necesario en particular cuando se trata de abordar la optimización de sistemas (procesos o productos), cuya función objetivo comprenda:

- Aparatos de medida y captadores de todo tipo.

- Sistemas automatizados de control y regulación.

- Sistemas no automáticos que deban proporcionar un valor predeterminado, pero que se desee variar a voluntad, que corresponda al valor de entrada o que utilice materiales y componentes variables.

Más allá aun de la Ingeniería Robusta, los métodos del Dr. **Taguchi** se prolongan en el denominado Desarrollo de Tecnología Robusta, que, basado en los mismos principios, es capaz de optimizar el diseño del proceso capaz de realizar similares operaciones a distintos productos o de los productos que formen una familia de solamente distintas características dimensionales o funcionales.

Vías de consulta y Bibliografía

El Dr. Taguchi es director ejecutivo del **American Supplier Institute** (EEUU), (www.amsup.com y www.asiusa.com), siendo la dirección del sitio de su rama en España www.asispain.com.

Existe una asociación de expertos en Ingeniería Robusta (**Internacional Society of Robust Engineering Professionals**) cuya página web (<http://isrep.com/login.aspx>) sólo es accesible a sus Miembros.

Textos:

- TAGUCHI G, CHOWDURY S & WU Y. *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. John Wiley & Sons, Inc.

- ALEXIS J. & P. *Pratique industrielle des plans d'expériences*. AFNOR.

- WU Y. & A. *Diseño robusto utilizando los métodos Taguchi*. Díaz de Santos.

- **American Supplier Institute, S.A.** *Diseño de parámetros*. Manual para Formación

- Autores diversos. *ASI Symposium Proceedings*. Ponencias presentadas en los Simposios anuales del **American Supplier Institute** (EEUU). ■

Factor	Efecto sobre S/R(dB)				Primera elección			Segunda elección		
	Efecto sobre la media		Efecto sobre la media		Factor	S/R	Media	Factor	S/R	Media
	Niveles 1	Niveles 2	Niveles 1	Niveles 2						
A	-1,31	1,31	0,5	-0,5	A2	1,31	-0,5	A2	1,31	-0,5
B	0,98	-0,98	-3	3	B1	0,98	-3	B1	0,98	-3
C	-0,07	0,07	-11	11	C2	0,07	11	C1	-0,07	-11
D	-0,09	0,09	-6,75	6,75	D2	0,09	6,75	D2	0,09	6,75
E	-0,35	0,35	-5,75	5,75	E2	0,35	5,75	E2	0,35	5,75
F	0,56	-0,56	-5,75	5,75	F1	0,56	-5,75	F1	0,56	-5,75
G	-1,59	1,59	0,75	-0,75	G2	1,59	-0,75	G2	1,59	-0,75
Efectos globales sobre los valores medios de						4,95	13,5		4,81	-8,5
Valores previsibles						14,1	121,5		13,96	99,5

Fig. 6. Cuadro general de efectos y selección de combinaciones apropiadas