

Ingeniería de calidad: optimización del proceso de mecanizado en una máquina de control numérico mediante el diseño de parámetros

*Mónica Bernabé Fernández**

(Recibido el 24 de julio de 2001)

Resumen

En este artículo se exponen los principales aportes del Dr. Taguchi en el área de la ingeniería de la calidad así como los principios y metodología del diseño de parámetros. El diseño de parámetros, donde se utiliza la relación señal—ruido dinámica, se ha aplicado para mejorar la robustez del mecanizado de acero en una máquina de control numérico. Los resultados obtenidos demuestran que esta herramienta resulta eficaz para mejorar la calidad a bajo costo.

----- *Palabras clave:* métodos Taguchi, diseño de parámetros, ingeniería de calidad.

Quality engineering: mechanizing process optimization in a numeric controlled machine by means of parameter design

Abstract

In this paper the main contributions of Dr Taguchi engineering of quality are presented as well as the principles and methodology of parameters design. Parameters design, where the dynamic noise signal relation is used, has been applied to improve the machining strength of steel in a numeric controlled machine. Results show that this tool is effective to improve quality at low cost.

----- *Key words:* Taguchi's method, parameters design, engineering of quality.

* Profesora Universidad del País Vasco. oepbefem@ehu.es.

Introducción

Actualmente, las empresas que quieran ser competitivas han de definir las estrategias y aplicar las metodologías adecuadas que les ayuden a colocar en el mercado productos de alta calidad a bajo costo en el menor plazo posible.

El énfasis de las actividades que se han desarrollado para la mejora de la calidad en las empresas ha ido cambiando durante las últimas décadas. En un principio se pensaba que los costos de la mala calidad se debían a las imperfecciones de fabricación, por tanto se hizo énfasis en las metodologías y herramientas que permitieran a los técnicos mejorar y controlar la calidad durante la fabricación. Las actividades de control de calidad se iniciaban con la inspección de productos terminados para prevenir expediciones defectuosas al mercado; posteriormente, se reveló más eficiente el vigilar los procesos de fabricación utilizando las técnicas de control estadístico. Sin embargo, se ha demostrado que la mala calidad percibida por el cliente se centra en aspectos que están fuertemente vinculados a las etapas del diseño de los productos y procesos de fabricación. Actualmente se sabe que cuanto más aguas arriba se establezcan acciones de mejora de calidad, más eficientes y rentables serán los resultados [1].

Una de las técnicas que se puede utilizar para lograr calidad a bajo costo, quizá la más potente y representativa, es la ingeniería de calidad desarrollada por el ingeniero japonés Genichi Taguchi. Estas técnicas que permitieron a la industria japonesa alcanzar una posición muy competitiva en el mercado mundial (especialmente en el sector del automóvil y electrónico), sólo fueron conocidas en occidente a partir del año 1982, fecha en la que la American Supplier Institute comenzó a aplicarlos en la industria occidental [2].

El objetivo de este artículo es exponer los métodos de Taguchi aplicados a la ingeniería de calidad así como las últimas tendencias que existen al respecto (utilización de la relación señal—ruido dinámica como el índice que evalúa la robustez de la función de un producto o proceso) y aplicación

a la mejora de calidad en el proceso de mecanizado de acero en una máquina de control numérico.

Contribuciones a la calidad

El Dr. Taguchi ha sido especialmente reconocido por sus tres grandes aportes en el ámbito de la calidad: la función de pérdida, la robustez y el diseño de parámetros [3].

La función de pérdida

Las filosofías y metodologías de Taguchi están estrechamente vinculadas con la idea de conseguir alta calidad al mínimo costo. La calidad, definida como la capacidad de satisfacer, superar o incumplir las expectativas de los clientes, se expresa en términos monetarios utilizando la función de pérdida.

Taguchi expresa las pérdidas de la calidad a través de la función de pérdida. Utiliza las series de expansión de Taylor y llega a relacionar, de una forma cuadrática, las pérdidas monetarias y los valores de las características y especificaciones funcionales del producto. La pérdida se expresa como una función cuadrática de la desviación del valor de la característica de calidad con respecto a su valor objetivo o deseado. Si este valor objetivo es de tipo nominal, la función pérdida adopta una forma parabólica (véase figura 1).

La pérdida de calidad relaciona los resultados obtenidos, expresados como desviaciones con respecto a los objetivos, con las pérdidas monetarias. De esta forma, se demuestra que la clave para conseguir alta calidad es disminuir la variabilidad de estos resultados, lo que implica reducir la pérdida de calidad [4].

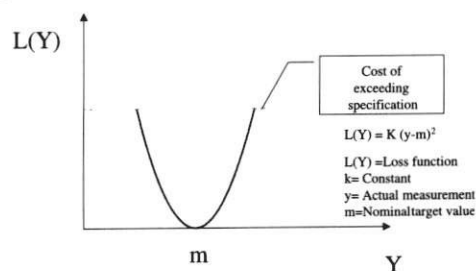


Figura 1 La función de pérdida

Robustez

La segunda gran contribución es el concepto de robustez. Se puede definir la robustez, desde la perspectiva de un producto o desde la perspectiva de un proceso, de la siguiente manera:

Producto. La capacidad del producto para cumplir, de manera consistente, con los objetivos del diseño, minimizando los efectos originados por cambios e influencias incontrolables en los componentes y en el uso del producto.

Proceso. La capacidad del proceso para fabricar, de manera consistente, productos de calidad, minimizando los efectos originados por cambios e influencias incontrolables de fabricación.

Para minimizar la pérdida se requiere, no sólo fabricar un producto en sus niveles óptimos, sino minimizar a la vez la variación en los valores de sus características funcionales. Los factores que afectan las características funcionales del producto son de dos tipos: factores de control y factores de ruido.

Los factores de control son todos aquellos que se pueden controlar fácilmente tales como, el tipo de material, el tiempo del ciclo o el tiempo de enfriamiento en un proceso de inyección. Los factores de ruido, por otro lado, son todas aquellas variables que son imposibles de controlar o bien su control resulta difícil o excesivamente costoso. Ejemplos de factores ruido pueden ser, las variaciones típicas de los procesos de fabricación tales como la no uniformidad de las materias primas, desviaciones ambientales con respecto al entorno del cliente y el deterioro o desgaste de los componentes a lo largo del tiempo.

Diseño de parámetros

La tercera gran contribución es el diseño de parámetros que se enmarca dentro de la ingeniería de calidad y es parte clave para la reducción de los costos.

La calidad de un producto es una labor de ingeniería. Esta es la idea clave del control de calidad fuera de línea del Dr. Taguchi, que extiende su

acción tanto al diseño del producto como al diseño de su proceso de fabricación. Existen tres etapas secuenciales para la optimización de la calidad: diseño de sistemas, diseño de parámetros, y diseño de tolerancias.

El diseño de sistemas es la etapa donde se aplican los conocimientos científicos y técnicos para el diseño y construcción del prototipo básico. Este prototipo tiene la configuración y los atributos del producto que va a ser objeto de análisis y desarrollo. Es posible que en esta etapa se consiga un diseño funcional pero lejos del óptimo en términos de calidad y costo.

En la siguiente etapa, el diseño de parámetros, se realiza una investigación que tiene por objeto identificar los niveles de los parámetros de diseño que optimizan los valores de las características funcionales y reducen su sensibilidad frente al ruido. Determinando la mejor combinación de los valores para los factores que son económicos de cambiar o controlar, se puede mejorar la calidad sin aumentar los costos.

Finalmente, el diseño de tolerancias se emplea si la reducción de la variabilidad conseguida en el diseño de parámetros resulta insuficiente. En esta etapa se reduce la amplitud de las tolerancias de todos aquellos parámetros de producto o del proceso cuya variación tiene un gran impacto en la variabilidad de las características funcionales del producto.

La experimentación en el diseño de parámetros

El plan de la experimentación

En el diseño robusto, el plan de la experimentación consta de dos partes: el arreglo interno (factores de control) y el arreglo externo (factores de ruido). Por cada una de las combinaciones de niveles de factores de control que aparecen en el arreglo interno, se realizan ensayos basándose en las condiciones de ruido establecidas en el arreglo externo. El resultado es una experimentación cruzada (véase figura 2).

Arreglo interno		Parámetros de ruido	Arreglo externo					
Parámetros de control			Humedad Deterioro	25% Nuevo	25% Viejo	75% Nuevo	75% Viejo	
Row	Temperatura	Tiempo	Presión	Material	Resultados			
					y11	y12	y13	y14
1	130 °C	Bajo	30 bar	A	y21	y22	y23	y24
2	130 °C	Bajo	50 bar	B	.	.	.	.
3	130 °C	Alto	50 bar	A	.	.	.	.
4	130 °C	Alto	30 bar	B	.	.	.	.
5	180 °C	Bajo	50 bar	A	.	.	.	.
6	180 °C	Bajo	30 bar	B	.	.	.	.
7	180 °C	Alto	30 bar	A	.	.	.	.
8	180 °C	Alto	50 bar	B	y81	y82	y83	y84

Figura 2 Ejemplo típico de un diseño robusto de experimentos

En el diseño de parámetros se utilizan arreglos ortogonales (AO) tanto para los arreglos internos como para los externos. Una gran ventaja del procedimiento de Taguchi es el uso de arreglos ortogonales que permite minimizar el número de ensayos o prototipos necesarios para la experimentación. La metodología del diseño factorial fue concebida por R. A. Fisher en 1920 y consistía en la experimentación y análisis estadístico de los resultados cuando se utilizaban todas las combinaciones posibles de las variables de control [5]. Un problema asociado a los diseños factoriales es el aumento exponencial de las experimentaciones necesarias cuando se añaden variables al diseño. El arreglo ortogonal es una fracción del diseño factorial donde, solamente, se tienen en cuenta ciertas combinaciones de los niveles de las variables de entrada, de tal forma que se optimiza la cantidad de información extraída utilizando un número menor de ensayos (véase tabla 1).

A pesar de que la controversia que existe sobre estos métodos se centra en el uso de los arreglos ortogonales, éstos no han sido ideados por Taguchi [6]. Todos los típicos diseños factoriales fraccionados $m^k \cdot p$ son arreglos ortogonales. Por

Tabla 1 Arreglos ortogonales más usuales

Arreglo ortogonal	Número de factores	Número de niveles por factor	Número de ensayos requeridos en el arreglo ortogonal	Número de ensayos en el clásico factorial completo
$L_8 (2^7)$	7	2	8	128
$L_9 (3^4)$	4	3	9	81
$L_{12} (2^{11})$	11	2	12	2.048
$L_{16} (2^{15})$	15	2	16	32.768
$L_{18} (2^1 \times 3^7)$	17	23	18	4.374

ejemplo, el OA_8 es un diseño factorial fraccionado 2^{7-4} , el OA_{16} es un diseño factorial 2^{15-11} y el OA_{12} es un diseño Plackett-Burman (Box, Bisgaard and Fung, 1988). No obstante, Taguchi ha simplificado su método para proyectos concretos, tabulando los arreglos estándar posibles y asignando gráficas lineales que ayudan a conocer la estructura del diseño [7]. En la tabla 2 se presenta una tabulación típica.

Tabla 2 Arreglo ortogonal L9

	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

En este arreglo, las columnas son mutuamente ortogonales. Esto significa que, por cada par de columnas, se encuentran todas las combinaciones posibles de los niveles en un mismo número de veces. En este arreglo existen cuatro factores A, B, C y D, cada uno de ellos a tres niveles. Este arreglo se denomina diseño L9, el 9 indica el número de filas, combinaciones o prototipos por ensayar bajo los niveles de los factores indicados en cada fila de la tabla.

Con el uso del arreglo externo, para introducir ruido en la experimentación, se pueden estimar las interacciones entre cada parámetro de control o interacciones entre ellos y cada parámetro de ruido.

El análisis de los datos

El análisis convencional que se realiza con los datos de un experimento diseñado es el análisis sobre el valor medio de la respuesta. Taguchi enfatiza en la importancia de ampliar este análisis con uno que se centre en la variación de la respuesta. Para facilitar este último análisis utiliza la relación S/R. Podemos expresar, de una manera sencilla, la relación S/R como el cociente entre el valor medio (señal) y la desviación estándar (ruido); esta relación está directamente relacionada con la función de pérdida. Si bien

existen varias formulaciones diferentes para la S/R, generalmente se utilizan tres consideradas como estándar en función del tipo de la característica de calidad: “mayor es mejor”, “menor es mejor” o “nominal es mejor”. Las relaciones S/R se calculan para cada una de las condiciones experimentales de control e independientemente de cuál sea el tipo de característica de calidad, las transformaciones que se realizan sobre los datos experimentales son tales que la relación S/R se interpreta siempre como mayor es mejor.

Existen varias formas de realizar este análisis. A pesar de que la forma habitual es realizar un análisis estadístico de la varianza (ANOVA) y plantear el test F para determinar qué factores son estadísticamente significativos, Taguchi recomienda el análisis de los valores medios. Este análisis comprende el cálculo de los gráficos de los efectos y la identificación visual de los factores significativos.

Finalmente, Taguchi recomienda realizar un experimento confirmatorio para comprobar, no sólo la validación de la experimentación sino también, la reproductibilidad de las conclusiones.

Diseño de parámetros con respuesta dinámica

Actualmente la aplicación de estos métodos en la industria se está realizando bajo el enfoque que Taguchi llama “Robust Technology Development” [8]. Se trata de optimizar una función genérica para una gama de productos en vez de una característica específica para un producto en concreto [9]. El producto o proceso de fabricación se plantea como un sistema dinámico. En el caso concreto de un proceso de fabricación, se piensa en un específico valor de entrada que permita obtener un valor deseado de salida. A medida que los inputs cambian, los valores de salida lo harán en magnitudes predecibles. Desde este punto de vista, el proceso es un sistema dinámico con una señal o entrada y una salida o respuesta que es el resul-

tado de esta señal. Por ejemplo, en el proceso de mecanización por control numérico, una función genérica sería la capacidad de producir piezas con las dimensiones requeridas (véase figura 3). La entrada o señal para este sistema sería la dimensión programada y la salida la dimensión real del producto mecanizado.

El análisis consta de dos etapas (véase figura 3). En un primer lugar, se trata de encontrar los niveles de los parámetros que reducen la variabilidad funcional (maximización de la relación S/R dinámica), y en segundo lugar determinar los factores que teniendo un efecto significativo en la sensibilidad (ajuste de Beta), no lo tengan en la relación S/R. Modificando los valores de estos factores se puede conseguir, en caso que sea necesario, desplazar Beta hacia el valor ideal [10].

Mejora de la robustez en el proceso de mecanizado por CN

Se trata de optimizar el fresado de las caras superficiales de placas rectangulares de acero. El objetivo es mejorar la robustez de este proceso específico de mecanizado cuando se utiliza una fresadora de control numérico:

- Sin incrementar los costos.
- Manteniendo la capacidad de fabricar las placas con las dimensiones programadas.
- Fabricando placas con diferentes geometrías.
- Utilizando aceros de diferente dureza.

La función ideal es $Y = \beta M$. Donde $\beta = 1$ es la pendiente de la recta de mejor ajuste entre la dimensión real Y (mm), y la dimensión programada M (mm) (véase figura 3).

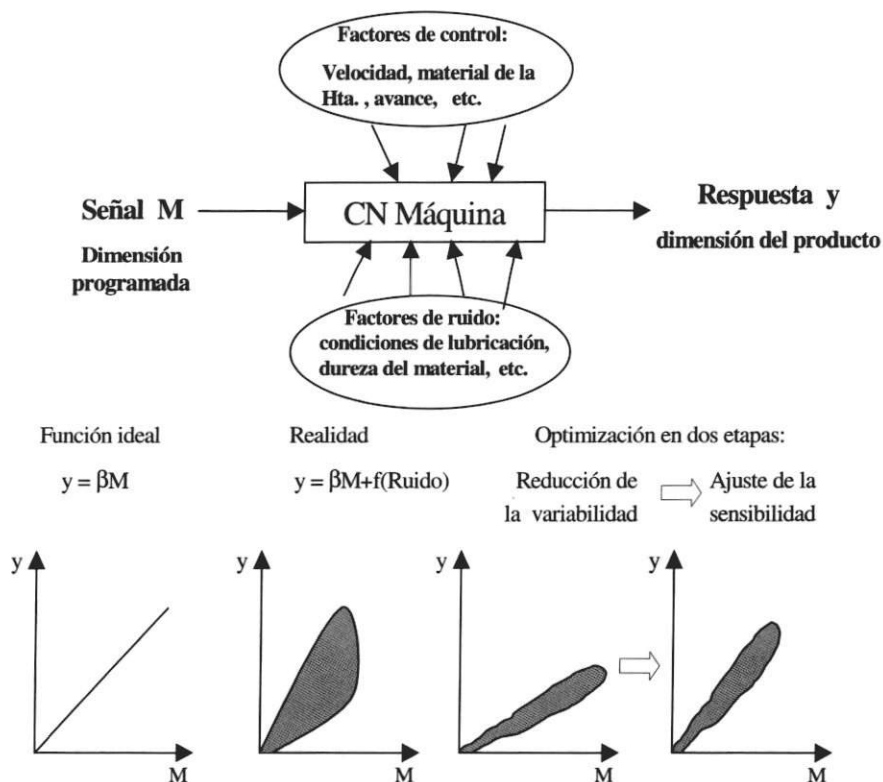


Figura 3 Sistema de mecanizado CN. Optimización en dos etapas

Factor de señal, factores de control y factores de ruido

Como la compañía quería aplicar los resultados, no sólo para una determinada placa en concreto, sino para una gama de productos actuales y futuros, se diseñó una pieza test que fuera sencilla de medir. Se fijaron las coordenadas en 10 puntos de esta pieza (p_1, p_2, \dots, p_{10}) y los niveles de la señal que se utilizaron fueron los valores programados de veinte distancias entre ellos ($M_1 = p_1 - p_2, M_2 = p_1 - p_5, \dots, M_{20} = p_9 - p_{10}$). Los factores de control y de ruido que se usaron están reflejados en la tabla 3.

Diseño experimental, Layout y análisis de los datos

La empresa decidió contemplar en la experimentación ocho factores de control uno de ellos a dos niveles y el resto a tres niveles. Se usó la configuración L_{18} para el arreglo interno.

La relación S/R y la sensibilidad de cada una de las dieciocho secuencias de combinacio-

nes, se calcularon con todos sus datos correspondientes usando las ecuaciones de Taguchi [11]. En la figura 4 se muestra esquema de la experimentación y las respuestas S/R y sensibilidad.

Una vez realizados estos cálculos, se procedió al análisis de los datos determinando los efectos de cada uno de los factores de control sobre la salida o respuesta (véase figura 5).

La optimización se realizó en dos etapas:

1ª. etapa: Maximización de la S/R al fijar los siguientes niveles (combinación óptima): A1 B1 C3 D3 E2 F3 G1 H1.

2ª. etapa: Ajuste de la sensibilidad (β). Debido a que el valor de la sensibilidad para esta combinación óptima fue de 0,9953, el nivel de la señal se ajustó programando la dimensión de la siguiente manera:

$$M = Y/\beta = Y/0,9953 = 1,00472 Y$$

Las predicciones y los resultados confirmatorios se muestran en la tabla 4.

Tabla 3 Factores de control y de ruido

		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
	A: Dirección de trabajo de la htaa	Arriba	Abajo	
	B: Velocidad de corte	Más lento	Normal	Más rápido
	C: Avance	Más lento	Normal	Más duro
Control F	D: Material de la herramienta	Más blando	Normal	Más rápido
	E: Long. Voladizo de la herramienta	Más pequeño	Normal	Mayor
	F: Ángulo de desprendimiento axial	Más pequeño	Normal	Mayor
	G: Ángulo de desprendimiento radial	Más pequeño	Normal	Más elevado
	H: Profundidad de pasada	Más bajo	Normal	Más elevado
Ruido F	N: Dureza del material	Blando	Duro	

Nº	A	B	C	D	E	F	G	H	M1	M2	M20	S/R (Db)	Sensibilidad (β)
									N1	N1	N1		
									N2	N2	N2		
1	1	1	1	1	1	1	1	1				38,10	0,97668
2	1	1	2	2	2	2	2	2				36,70	0,99576
3	1	1	3	3	3	3	3	3				41,40	1,00078
4	1	2	1	1	2	2	3	3				13,60	1,00044
5	1	2	2	2	3	3	1	1				43,80	0,99999
6	1	2	3	3	1	1	2	2				42,02	1,00023
7	1	3	1	2	1	3	2	3				24,90	1,00890
8	1	3	2	3	2	1	3	1				46,90	0,99870
9	1	3	3	1	3	2	1	2				19,18	1,00897
10	2	1	1	3	3	2	2	1				41,30	1,00348
11	2	1	2	1	1	3	3	2				31,80	1,00012
12	2	1	3	2	2	1	1	3				35,80	1,00023
13	2	2	1	2	3	1	3	2				13,70	1,00034
14	2	2	2	3	1	2	1	3				28,90	0,99865
15	2	2	3	1	2	3	2	1				42,52	1,00054
16	2	3	1	3	2	3	1	2				40,09	0,99999
17	2	3	2	1	3	1	2	3				17,30	1,00045
18	2	3	3	2	1	2	3	1				34,60	0,99997

Datos experimentales
20 x 2 x 18 = 720 puntos experimentales

Figura 4 Esquema y datos de la experimentación

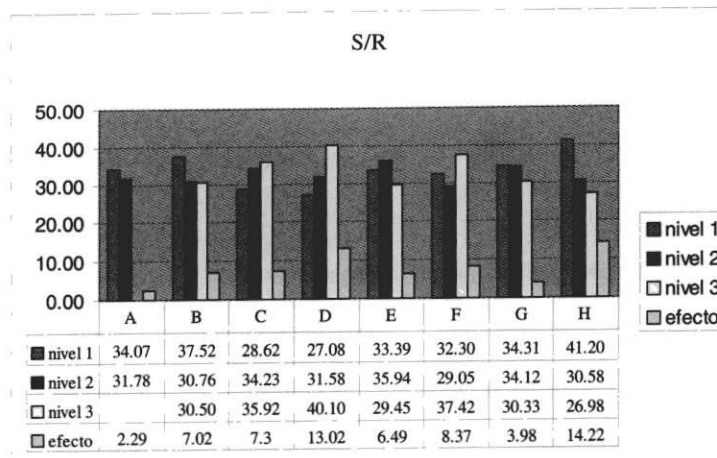


Figura 5 Tabla y gráfico de la respuesta S/R

Tabla 4 Resultado del ensayo confirmatorio

	Predicción		Confirmación	
	S/N	β	S/N	β
Inicial	29,867	1,00353	30,50	1,00098
Óptimo	66,014	0,99530	65,23	0,99670
Ganancia	36,147		34,73	

Conclusiones

En este artículo se ha explicado la filosofía de Taguchi dentro del enfoque de calidad. Se ha constatado que los métodos de Taguchi permiten a los técnicos encontrar los valores óptimos de los parámetros del diseño a través de la investigación sobre la variabilidad o, más específicamente, sobre la sensibilidad de estos parámetros con respecto a los factores que causan dicha variabilidad. La idea es reducir la variabilidad sin incrementar los costos. En lugar de eliminar las causas de la variación, lo que resultaría excesivamente caro, se minimizan los efectos de estas causas. Estos métodos se han aplicado para garantizar la capacidad de mecanización de piezas de acero en las dimensiones programadas y bajo diferentes condiciones de dureza en el acero empleado. Como resultado del estudio se redujo la desviación típica de los resultados y se eliminó el efecto del ruido. Los resultados de este estudio se pueden aplicar también para otras piezas de la misma gama o gamas similares fabricadas en el mismo centro de mecanización. El uso de la respuesta dinámica y la fabricación de una pieza test han resultado medidas efectivas para el desarrollo de la tecnología robusta.

Referencias

1. American Supplier Institute (1984): *Proceedings of the First Supplier Symposium on Taguchi Methods*. April. ASI.
2. American Supplier Institute (1999): *Proceedings of the 17th Supplier Symposium on Taguchi Method*. October. ASI.
3. Box, G.E.P., S. Bisgaard, And C.A. Fung (1988): "An Explanation and Critique of Taguchi's Contributions to Quality Engineering" *Quality and Reliability Engineering International*. Vol. 4. No. 2. 21-123.
4. Bylinsky, G. (1998): "How to bring better products faster" *Fortune*, Industrial Management & Technology. November 23. 238 B-T.
5. Guerrero, J.L. (1999): "Multivariate exponential families and the Taguchi loss function" *Inform.-Sci.*, Vol. 115. No. 1-4, 187-199.
6. Irianto, D. (1998): "Loss of society derived from utility and cost function" *Omega*. Vol. 26. No. 5, 671-677.
7. Jugulum, R., And M. Sefik (1998): "Building a robust manufacturing strategy" *Computers and Industrial Engineering*. Vol. 35, No. 1-2, 229-232.
8. Madison, J. (1996): *Cnc Machining ,Handbook: Basic Theory, Production Data, and Machining Procedures*, Press Inc.
9. Nair, V.N. (1992): "Taguchi's parameter design: a panel discussion" *Technometrics*. Vol. 34. No. 2, 127-161.
10. Peace, G.S. (1993): "Orthogonal Arrays, Degrees of Freedom, Linear Graphs" in *Taguchi Methods a Hands-On Approach*, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 114-166.
11. Peace, G.S. (1993): "Conceptual Background" in *Taguchi Methods a Hands-On Approach*, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1-12.
12. Raktoc, B.L., A. Hedayat, A., And W.T. Federer (1981): *Factorial Designs*, John Wiley, New York.
13. Taguchi, G., S. Chowdhury, and S. Taguchi (1999): *Robust Engineering*. McGraw-Hill.
14. Wu Y. And A. Wu (1997-a): "Tipos básicos de relaciones S/R dinámicas para variables continuas" in *Diseño robusto utilizando los métodos Taguchi*, Ediciones Díaz de Santos, Madrid, 43-69.
15. Wu Y. And A. Wu (1997-b): "Desarrollo de tecnología robusta" in *Diseño Robusto utilizando los Métodos Taguchi*. Ediciones Díaz de Santos. Madrid. 259-271.