

Optimización del diseño de una bomba reciprocante utilizando *diseño robusto*

Jorge Luis Bris Cabrera*

Resumen

El diseño de productos de alta calidad a bajo costo es un reto tecnológico y económico para el ingeniero. Una manera eficiente y sistemática de alcanzar dicho reto consiste en la aplicación de un método de optimización de diseño que abarque desempeño, calidad y costo. El método, denominado diseño robusto ha demostrado su efectividad en muchas áreas del diseño en ingeniería. En este artículo se discuten los conceptos básicos del diseño robusto y se detallará una aplicación práctica. La aplicación muestra cómo, con un número reducido de experimentos, se puede obtener información valiosa para reducir la variación del flujo en una bomba capaz de suministrar una sustancia a una rata constante de 10 ml/min.

Palabras claves: Diseño de experimentos, diseño robusto, flujo, bomba reciprocante.

Abstract

Designing high quality products at low cost is an economic and technological challenge to the engineer. A systematic and efficient way to meet this challenge is a method of design optimization for performance, quality, and cost. The method, called robust design, has been found effective in many areas of engineering design. In this paper, the basic concepts of robust design will be discussed and one application will be described in detail. The application illustrates how, with a very small number of experiments, highly valuable information can be obtained for reducing flow variation in a pump capable of delivering solution at a constant rate of 10 ml/min.

Key words: Design of experiments, robust design, flow, pump.

Fecha de recepción: Septiembre 1 de 1999

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del diseño en ingeniería, como parte fundamental en la Inves-

tigación y el Desarrollo (I&D), es producir planos, especificaciones y otra información relevante necesaria para fabricar productos y/o procesos que satisfagan las necesidades de los clientes. Los conocimientos de los fenómenos científicos y experiencias pasadas con diseño de productos y procesos similares son la base de la actividad del diseño

* Ingeniero Mecánico, Universidad del Norte; Minor en Gestión de Proyectos de Ingeniería de la misma universidad; candidato a M.Sc. en Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes. (E-mail: jbrix@guayacan.uninorte.edu.co).

en ingeniería. Sin embargo, se deben tomar decisiones relacionadas con el nuevo producto en particular, en aspectos como la arquitectura del producto, parámetros del diseño y del proceso de fabricación. Una gran cantidad de esfuerzo se consume en la conducción de los experimentos (ya sea experimentación física o por simulación) para generar la información necesaria para guiar la toma de decisiones. La eficiencia en la generación de tal información es la clave para satisfacer el mercado, manteniendo los costos de desarrollo y manufactura en niveles bajos, y logrando productos de alta calidad. El *diseño robusto* es una metodología para mejorar la productividad durante las fases de Investigación y Desarrollo para que productos de alta calidad puedan fabricarse rápidamente y a un bajo costo.

En 1980, Genichi Taguchi introdujo a la industria de Estados Unidos la metodología del diseño estadístico de experimentos aplicada al diseño de productos y procesos. Desde entonces, el diseño robusto ha recibido mucha atención de parte de los ingenieros de producción, estadistas y los profesionales de la calidad en muchas compañías[1].

2. ¿QUE ES LA CALIDAD?

Debido a la gran variedad de definiciones que encontramos de la palabra *calidad* [2,3,4], se requiere definirla en el sentido que será utilizada en este trabajo. Primero, definamos lo que se entiende por *calidad ideal*, la cual sirve de

referencia para medir *el nivel de calidad* de un producto. La calidad ideal que un cliente puede esperar consiste en que cada producto desempeñe sus funciones correctamente cada vez que el producto es usado, bajo cualquier condición de operación, y a través de toda su vida esperada sin ocasionar efectos laterales dañinos.

El siguiente ejemplo clarifica el concepto de calidad ideal. La gente compra automóviles para diferentes propósitos. Algunos, para impresionar a sus amigos, mientras que otros para facilitar la distribución de sus productos. Para satisfacer estos propósitos diferentes hay diferentes tipos de automóviles (deportivos, de lujo, utilitarios, etc.). Cualquiera que sea el tipo, el automóvil con calidad ideal es aquel que trabaja perfectamente cada vez que es usado (en días lluviosos, soleados, invierno), a través de su vida esperada (no sólo en el período de garantía), bajo cualquier condición de operación (sobre asfalto, concreto, carreteras destapadas), sin ocasionar efectos laterales dañinos (polución al ambiente, ruido).

Cuando el desempeño real de un producto se desvía del desempeño objetivo, su calidad es considerada inferior. Tales desviaciones en el desempeño causan pérdidas al usuario del producto, al fabricante de éste y, en grados diferentes, al resto de la sociedad. Según Taguchi [5], *la calidad de un producto se mide en términos de la pérdida total que genera a la sociedad debido a la variación funcional y sus efectos laterales dañinos. A mayor pérdida, menor calidad.*

3. PRINCIPIOS DEL DISEÑO ROBUSTO

El ciclo de vida de un producto puede dividirse en dos partes principales: Antes y después de la venta al cliente. Todos los costos generados antes de la venta son cargados al costo unitario de manufactura, mientras que todos los costos incurridos después de la venta se traducen en pérdida de calidad del producto.

Cuantificar esta pérdida resulta difícil, dado que el mismo producto puede ser usado por diferentes clientes, para diferentes aplicaciones, bajo condiciones diferentes, etc. Es común medir la calidad en términos del porcentaje de unidades defectuosas. Esto implica que todos los productos que satisfacen las especificaciones (desviaciones permisibles a partir del objetivo) son igualmente buenos, mientras que los que no satisfacen dichas especificaciones son malos. En realidad, el producto cuya respuesta sea exactamente igual a la respuesta objetivo tendrá mejor desempeño. En la medida en que la respuesta se desvía del objetivo, la calidad es progresivamente menor. La función de pérdida de calidad cuadrática puede estimar con razonable exactitud la pérdida debido a una variación funcional en la mayoría de los casos. Para una descripción más amplia de los principios del diseño robusto, deben consultarse las referencias [6,7].

Fuentes de variación. En general, el desempeño de un producto está influen-

ciado por factores denominados *factores de ruido*, que son de tres clases:

1. *Externos.* Son factores ajenos al producto, tales como: Condiciones de carga, temperatura, humedad, voltaje de suministro, vibraciones de máquinas adyacentes, errores humanos en la operación del producto, etc.
2. *Imperfecciones de Manufactura.* La variación en los parámetros del producto de unidad a unidad son inevitables en un proceso de manufactura.
3. *Deterioro.* Cuando el producto es vendido, todas sus características funcionales pueden estar en el objetivo; pero en la medida en que el tiempo transcurre, las características de los componentes individuales pueden cambiar y conducir a problemas de desempeño del producto.

El principio fundamental del Diseño Robusto es mejorar la calidad minimizando el efecto de las causas de variación. Por lo tanto, es indispensable identificar los factores de ruido en cada proyecto.

Note que durante el diseño se puede robustecer al producto contra los tres tipos de factores de ruido descritos arriba, mientras que durante el diseño del proceso de manufactura y la fabricación real se puede reducir la variación, debido a las imperfecciones en la manufactura, pero tendrá un impacto menor

sobre la variación debido a los otros factores de ruido. Una vez el producto llega a las manos del cliente, el servicio de garantía es la única forma de solucionar los problemas de calidad. En síntesis, la mayor porción de responsabilidad en calidad y costo del producto recae sobre el equipo de diseño del producto y no en la organización de producción.

El problema de la optimización en el diseño. Un producto o proceso puede ser representado por un diagrama de bloque (figura 1), propuesto por Taguchi y Phadke [6]. El diagrama también puede representar un proceso de manufactura o aun un sistema de negocio. La respuesta es representada por y . Los factores que influyen en la respuesta pueden clasificarse en tres grupos:

1. *Factores de Señal (M)*: Son los factores introducidos por el usuario u operador para obtener el desempeño o función deseada.
2. *Factores de Control (z)*: Son parámetros de diseño del producto bajo la responsabilidad del diseñador. Cada factor de control puede tomar uno o más valores; los múltiples valores se llamarán «niveles».
3. *Factores de ruido (x)*: Son parámetros que no pueden ser controlados por el diseñador. Sólo se puede conocer su comportamiento estadístico, pero no su valor real.

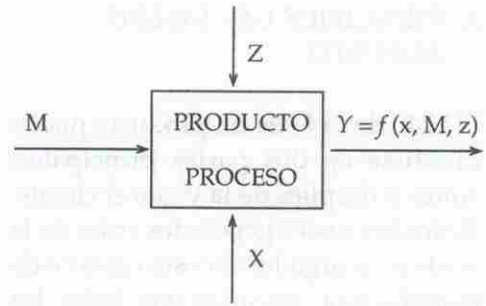


Figura 1. Diagrama de bloque de un producto o proceso: *Diagrama P*.

La respuesta puede representarse como una función que depende de los tres factores mencionados: $y = f(x, M, z)$

Conceptualmente, la función f consta de dos partes: $g(M, z)$, la cual es deseable y predecible, y $e(x, M, z)$, la cual es impredecible y menos deseable. Entonces, $y = g(M, z) + e(x, M, z)$.

En el caso en que deseamos una relación lineal entre y y M , g debe ser una función lineal de M . Todos los términos no lineales y los efectos de las variables de ruido estarán incluidos en e .

La optimización del diseño consiste en encontrar los niveles adecuados de los factores de control para maximizar la parte predecible y simultáneamente minimizar la parte impredecible. Esto está acompañado de un criterio de optimización denominado *relación señal-ruido (S/N)*. Como resultado, la variabilidad de las características funcionales o respuesta se minimiza. Existe una gran variedad de problemas de diseño.

Para una clasificación de los problemas de diseño y la selección de las relaciones S/N, véase la referencia [8].

4. DISEÑO ROBUSTO DE UNA BOMBA

El diseño ofrece la primera y mejor oportunidad para reducir variaciones durante el desempeño de un producto. Para ilustrar las estrategias y herramientas requeridas, considere la tarea de diseñar una nueva bomba. Se requiere una bomba que sea capaz de suministrar una solución determinada a un flujo constante de 10 ml/min. De acuerdo con la información suministrada por el cliente, el flujo podría variar entre 9 y 11 ml/min. El primer paso consiste en desarrollar un diseño conceptual general del sistema. En este caso, se decide usar un pistón para impulsar la solución. Este diseño requiere de un motor acoplado al pistón y dos válvulas para controlar el flujo.

Se necesita determinar todos los factores que afectan la rata de flujo. Hay tres factores obvios: El radio del pistón (R), la longitud de la carrera del pistón (L) y la velocidad del motor (S). Otro posible factor es la cantidad de solución retenida en el sistema de válvulas (B). Hay otros factores que pueden ser tenidos en cuenta, como la viscosidad de la solución. Pero, para propósitos de este trabajo, se limitará el estudio a los primeros cuatro factores, los cuales se denominan «variables de entrada», mientras que la rata de flujo se denomina «variable de salida».

4.1. Factores y niveles de control

Anteriormente se seleccionaron los factores que controlan la rata de flujo de la bomba. En la siguiente tabla se muestran los factores con 3 niveles de control bajo los cuales se realiza la experimentación. Se trabaja con tres niveles lo más amplios posibles, con el fin de poder evaluar las tendencias entre el rango seleccionado. Con dos niveles, los comportamientos resultantes sólo se podrán interpretar como lineales

Tabla 1. Factores y niveles de control

FACTORES DE CONTROL	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
Radio del pistón (in.), R	0.05	0.15	0.30
Longitud de la carrera (in.), L	0.3	0.5	0.7
Velocidad del motor (rpm), S	20	40	60
Acumulación de solución (ml), B	0.02	0.05	0.08

4.2. Función que se va a optimizar

La variable que se va a optimizar es la rata de flujo. Se pretende acercarla lo más posible a un valor fijo de 10 ml/min. En este caso, la función que se optimizarás: $\eta = 10 \text{Log}_{10}(\mu^2/\sigma^2)$ donde: $\mu = (1/n) \sum y_i$; $\sigma^2 = (1/n-1) \sum (y_i - \mu)^2$

Al maximizar la función η se logra minimizar la desviación estándar σ^2 de la rata de flujo, por tanto, se minimiza la pérdida de calidad en el diseño de la bomba.

4.3. Matriz experimental

De acuerdo con el número de factores de control que se va a trabajar y al número de niveles de prueba, se selecciona la matriz ortogonal $L_9 (3^4)$, que permite trabajar con 4 factores de control y 3 niveles de prueba para cada uno. Para mayor información sobre selección de matrices experimentales, véase la referencia [8].

La tabla 2 indica la secuencia en la que se deben desarrollar los 9 experimentos para lograr la optimización del diseño de la bomba. Por ejemplo, para el experimento 1 se trabaja con los niveles 1 para todos los factores, así: R = 0,05 in.; L = 0,3 in.; S = 20 rpm; B = 0,02 ml.

4.4. Resultados de la experimentación

La tabla 3 presenta los resultados obtenidos para la rata de flujo en cada uno de los 9 experimentos realizados bajo las condiciones establecidas en el ítem anterior. Cada experimento se realizó tres veces, lo cual significa que se tiene un total de 27 resultados.

Tabla 2. Matriz experimental

Experimento N°	Factor 1 Radio del Pistón (R)	Factor 2 Longitud de la carrera (L)	Factor 3 Velocidad del motor (S)	Factor 4 Acumulación de sol. (B)
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

Tabla 3. Ratas de flujo obtenidas en la experimentación

Experimento	Rata 1	Rata 2	Rata 3	Promedio	Función η
1	8.3	9.5	8.6	8.80	22.98 dB
2	14.2	13.8	15.8	14.60	22.79 dB
3	11.6	10.8	10.2	10.87	23.79 dB
4	9.6	9.4	9.5	9.50	39.56 dB
5	3.5	5.6	4.7	4.60	12.80 dB
6	2.1	4.5	3.4	3.33	8.86 dB
7	12.5	11.5	10.9	11.63	23.16 dB
8	9.9	8.5	9.3	9.23	22.38 dB
9	16.5	14.5	13.7	14.90	20.28 dB

La figura 2 muestra el efecto de cada uno de los factores de control sobre la rata de flujo y la función objetivo que se va a maximizar η . Cada gráfica presenta 3 puntos que corresponden a cada uno de los niveles trabajos en la experimentación.

Se observa que el radio del pistón (R) y la velocidad del motor (S) son los factores que ejercen mayor influencia sobre la rata de flujo que entrega la bomba.

Cuando el radio del pistón es 0,05 o 0,30 in., se observa un aumento tanto en la rata de flujo como en la función η . Con un R = 0,15 in., la función η disminuye pero la rata de flujo se acerca más al valor deseado de 10 ml/min.

La longitud de carrera no afecta la rata de flujo, dado que la gráfica se muestra casi horizontal; sin embargo, se observa que con un L = 0,3 in., la función η toma un valor máximo.

El factor velocidad del motor muestra un comportamiento inverso al radio del pistón. Para S = 40 rpm se maximiza η , pero la rata de flujo es superior a la deseada. Con valores de S de 20 o 60 rpm. se obtiene un flujo más cercano al objetivo de 10 ml/min., pero η disminuye, lo que significa una mayor desviación estándar o pérdida de calidad.

La acumulación de flujo no ejerce mayor influencia en la rata de flujo; sin embargo, un nivel de B = 0,08 ml maximiza la función η .

4.5. Discusión

Hay varias alternativas para seleccionar los niveles adecuados para cada uno de los factores de control que gobiernan la rata de flujo. En la siguiente tabla se muestran los resultados esperados para cada una de las alternativas.

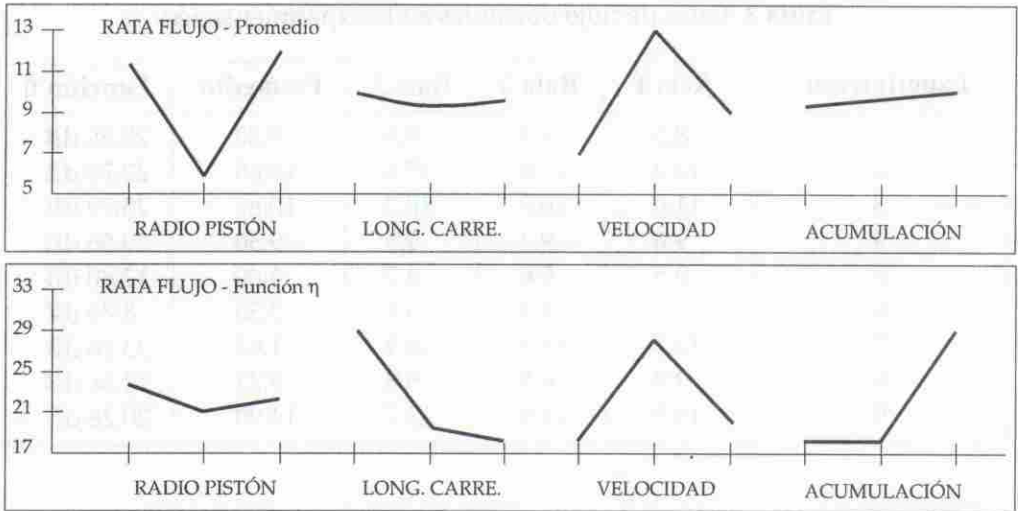


Figura 2. Efecto de los factores de control sobre la rata de flujo de la bomba.

Tabla 4. Alternativas de selección de niveles de control

Alternativa	R (in)	L (in)	S (rpm)	B (ml)	Rata Flujo (ml/min)	h (dB)
1	0,05	0,3	40	0,08	15,11	42,34
2	0,15	0,3	40	0,08	9,50	39,56
3	0,05	0,3	60	0,08	11,14	34,71
4	0,30	0,7	20	0,08	9,46	20,70
5	0,30	0,5	60	0,05	11,13	13,92

La *alternativa 1* es la que ofrece mayor valor para la función η , lo que significa que minimiza la pérdida de calidad del producto, pero la rata de flujo está por encima del valor máximo permitido de 11 ml/min estipulado por el cliente.

La *alternativa 2* sacrifica su nivel de calidad en pos de lograr una rata de flujo muy cercana a la solicitada. La

diferencia con la alternativa anterior es que el radio del pistón se aumentó de 0,05 a 0,15 in. Esto trae como consecuencia un mayor tamaño de la bomba y, por ende, un mayor costo de fabricación.

La *alternativa 4* muestra una rata de flujo similar a la alternativa 2; sin embargo, la función h sufre una disminución

casi del 50%, lo cual elevará la pérdida de calidad en la bomba.

Las *alternativas 3 y 5* tienen ratas de flujo similares, pero un poco superiores al límite superior establecido previamente.

Conclusiones

De la discusión anterior se puede concluir que la *alternativa 2* es la más conveniente, dado que presenta una rata de flujo de 9,50 ml/min (respetando el rango de aceptación establecido por el cliente) y lleva a la función η a un nivel alto de 39,56 dB. En los cálculos realizados en este trabajo se estima un error del 0,87%.

La alternativa seleccionada coincide, en los niveles de control, con el experimento 4. En la tabla de resultados se puede observar que para este experimento la rata de flujo presentó muy poca desviación estándar, lo cual ratifica las ventajas de esta combinación de niveles en los factores de control.

Se ha logrado optimizar el diseño de una bomba con sólo realizar 9 experimentos. Si se utiliza el método tradicional de prueba y error, se necesitarían 81 experimentos para poder realizar todas las combinaciones posibles entre los 4 factores de control y sus 3 niveles de prueba respectivos. La aplicación del diseño robusto representa, en este caso, una disminución del 89% en la cantidad de experimentos requeridos. Es notable la cantidad de tiempo y dinero que se

ahorra con la implementación de este método durante las fases de Investigación y Desarrollo de un diseño.

Referencias

- [1] PHADKE, M.S., KACKAR, R.N., SPEENY, D.V. and GRIECO, M.J. «Off-line quality control in integrated circuit fabrication using experimental design». *The Bell System Technical Journal*, N° 62, 1983, p. 1273-1309.
- [2] JURAN, J. M. *Quality Control Handbook*. New York: McGraw Hill Book, 1979.
- [3] DEMING, W. E. *Quality, Productivity, and Competitive Position*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study, 1982.
- [4] FEIGENBAUM, A. V. *Total Quality Control*, 3rd Edition. New York: McGraw-Hill Book, 1983.
- [5] TAGUCHI, G. *Introduction to Quality Engineering*. Asian Productivity Organization, 1986.
- [6] TAGUCHI, G., PHADKE, M. S. «Quality Engineering through Design Optimization», Conference Record, GLOBECOM 84 Meeting, IEEE Communications Society. Atlanta, November 1984, p. 1106-1113.
- [7] PHADKE, M.S. «Quality Engineering using Design Experiments», *Proceedings of the American Statistical Association*, Section on Statistical Education. Cincinnati, August, 1982, p. 11-20.
- [8] PHADKE, M.S. «Quality Engineering using Robust Design», *AT&T Bell Laboratories*. New Jersey, Prentice-Hall, 1989.
- [9] COX, N. D. *How to Perform Statistical Tolerance Analysis*. Milwaukee: ASQC Quality Press, 1986.
- [10] EVANS, D. H. «Statistical Tolerancing: The State of the Art». *Journal of Quality Technology* 7 (1): 1-12. 1975.
- [11] TAYLOR, W. A. *Optimization and Variation Reduction in Quality*. New York: McGraw-Hill, 1991.