

# TEMA 9: Desarrollo de la metodología de Taguchi

- 1 La filosofía de la calidad de Taguchi
- 2 Control de calidad *Off Line* y *On Line*
  - Calidad *Off Line*
  - Calidad *On Line*
- 3 Función de pérdida
- 4 Razones señal-ruido
- 5 Diseño de experimentos ortogonales
- 6 Diseños robustos: Factores controlables y factores de ruido
- 7 Limitaciones de la metodología de Taguchi

## 1. La filosofía de la calidad de Taguchi

El sistema de calidad propuesto en la metodología de Taguchi supone una revolución de los sistemas de calidad tradicionales, donde predominaba el uso de herramientas para el control *On Line*. El enfoque de Taguchi destaca la importancia del control de la calidad *Off Line* y, por tanto, de un diseño apropiado del producto y del proceso. Este enfoque se basa más en aspectos relacionados con la infraestructura de la calidad que en aspectos relacionados con la filosofía de empresa y estadística. Se utilizará fundamentalmente el diseño de experimentos como herramienta para fabricar productos más robustos y, por tanto, menos sensibles a los factores de ruido. Es decir, se reducen los efectos de la variabilidad sobre las características de la calidad del producto y del proceso. Inicialmente, la aplicación del diseño de experimentos estaba más dirigida a la optimización de los valores promedio de las características de la calidad sin tener en cuenta los efectos de la variación. La filosofía de la calidad de Taguchi se puede resumir en los siete puntos básicos siguientes (ver Kackar, 1986):

1. Un aspecto importante de la calidad del proceso manufacturado es la pérdida total ocasionada por dicho producto a la sociedad.
2. En una economía competitiva son necesarias una mejora continuada de la calidad y una reducción de los costos. Este punto marca una diferencia fundamental entre las políticas de Japón y Estados Unidos, puesto que las compañías americanas buscan fundamentalmente la nueva tecnología y la innovación (e.g. métodos para la mejora

del proceso y el producto), mientras que las compañías japonesas enfocan sus objetivos a una mejora gradual, empleando el diseño de experimentos para determinar los parámetros que permiten reducir los costos y mejorar la calidad. Se distinguen tres tipos de costos:

- Costos asociados al diseño del producto.
- Costos de manufacturación.
- Costos de operación.

Estos tres tipos de costos se pueden reducir mediante un uso apropiado del diseño de experimentos.

3. Un programa de mejora continuada de la calidad incluye una reducción constante de la variación de las características de la calidad en torno a los valores nominales o umbrales.
4. La pérdida ocasionada por la variabilidad en el proceso de fabricación del producto es proporcional al cuadrado de la desviación típica de la característica de la calidad estudiada respecto al valor nominal.
5. La calidad y el coste final del producto manufacturado dependen en gran medida del diseño efectuado para el producto y el proceso.
6. La variabilidad del proceso y del producto se puede reducir mediante el efecto no lineal de los parámetros del producto y del proceso sobre las características de la calidad.
7. Los diseños de experimentos estadísticos pueden ser utilizados para identificar el conjunto de parámetros del producto y del proceso que reducen la variación y, por tanto, mejoran la calidad, la productividad, la fiabilidad del proceso de manufacturación y sus resultados.

## **2. Control de calidad *Off Line* y *On Line***

Según se comentó en el primer tema, se distinguen dos aspectos en el estudio de la calidad de un producto: La calidad del diseño y la calidad de conformidad. En la nomenclatura adoptada por la metodología de Taguchi estos dos aspectos son referidos como calidad *Off Line* y calidad *On Line*, respectivamente.

La calidad *Off Line* está relacionada con los siguientes puntos:

- (i) Correcta identificación de necesidades y expectativas del cliente.
- (ii) Diseño de un producto que cubra las necesidades del cliente.

- (iii) Diseño de un producto cuyo proceso de manufacturación sea consistente y económico.
- (iv) Desarrollo de especificaciones, procedimientos y equipos de manufacturación que sean adecuados.

En el proceso que acompaña a la definición de la calidad *Off Line* hay dos etapas:

- (I) Diseño del producto.
- (II) Diseño del proceso.

En la etapa (I), un nuevo producto es elaborado, o bien un producto existente es modificado. El objetivo en esta etapa es, según se ha comentado anteriormente, crear un producto que cubra las necesidades del cliente y que haga sencillo el proceso de manufacturación. En la etapa (II), se crean los elementos necesarios para que el proceso de manufacturación permita la elaboración de productos con los requerimientos y especificaciones establecidos en la etapa anterior. Más concretamente, los puntos (i)-(iii) son considerados en la etapa *Off Line*-(I), mientras que el punto (iv) es considerado en la etapa *Off Line*-(II). En la metodología de Taguchi se distinguen tres etapas en el diseño de la calidad *Off Line*:

- Diseño del sistema.
- Diseño de los parámetros.
- Diseño de la tolerancia.

Taguchi (1986) establece dos etapas en el control de la calidad *On Line*:

- (I) Métodos de control de la calidad de la producción:
  - Proceso de diagnóstico y ajuste.
  - Predicción y corrección.
  - Medición y acción.
- (II) Relaciones con los clientes.

A continuación se describen las etapas señaladas en la metodología de Taguchi para el control de la calidad.

## 2.1. Calidad *Off Line*

En la etapa (I), es decir, en el diseño del producto, se considera en primer lugar el problema de diseño del sistema. Se aplica entonces el conocimiento científico para desarrollar un prototipo de diseño que cumpla los requerimientos del cliente. La selección inicial de materiales y de tecnología para el proceso de manufacturación son realizadas en esta fase. El principal objetivo en esta etapa es conseguir la mejor tecnología disponible para cubrir las necesidades del cliente al costo más bajo posible. Este último aspecto diferencia la metodología de Taguchi de la metodología Western, donde el objetivo prioritario es el uso de la última tecnología, aunque esto suponga aumentar los costos.

El siguiente paso es el diseño de los parámetros, determinando el conjunto óptimo de parámetros del producto. El objetivo aquí es minimizar los costos de manufacturación y de la vida del producto mediante minimización de la variación en la ejecución. Esto se consigue mediante la creación de diseños robustos, que no se ven afectados por los factores de ruido. Un factor de ruido es una fuente de variación incontrolable en las características funcionales del producto. En esta etapa de diseño de los parámetros se utiliza el diseño de experimentos para determinar el impacto de los factores controlables y no controlables (ruido) sobre las características del producto. El objetivo aquí es la selección de niveles de los factores controlables que permiten minimizar los efectos de los factores de ruido, haciendo el producto robusto frente a dichos factores.

Finalmente, en el diseño de las tolerancias se establecen los límites en torno al valor nominal o umbral establecido en la etapa anterior. El objetivo en esta etapa es definir o especificar unas tolerancias lo suficientemente amplias como para minimizar costos, pero manteniendo las características funcionales del producto dentro de las especificaciones.

En la etapa (II), es decir, en el diseño del proceso, se considera, en primer lugar, de forma paralela a la etapa anterior, el diseño del sistema, que consiste en la selección del proceso de manufacturación sobre la base del conocimiento del producto y de la tecnología de manufacturación de ese momento. El objetivo principal es especificar el uso de maquinaria existente y el proceso en la medida de lo posible.

En el diseño de los parámetros se determinan los niveles apropiados de los factores controlables que intervienen en el proceso de producción. El objetivo aquí es hacer el proceso robusto para minimizar los efectos de ruido sobre el proceso de producción y el producto acabado. El diseño de experimentos es utilizado durante este paso.

Finalmente, en el diseño de las tolerancias, se establecen las tolerancias para los parámetros del proceso, identificadas como críticas en el diseño durante el diseño de los parámetros. Si el diseño de los parámetros del proceso o del producto se ha realizado pobremente, es necesario, quizás, realizar un reajuste de tolerancias, o bien considerar materiales de elevado costo o equipos de alta calidad, lo que produce un incremento de los costos de manufacturación.

## 2.2. Calidad *On Line*

En la metodología de Taguchi se distinguen tres vías para el control de la calidad *On Line*:

- *Diagnóstico y ajuste del proceso*: El proceso es examinado en intervalos regulares de tiempo; ajustes y correcciones son efectuados según las necesidades que surgen.
- *Predicción y corrección*: Un parámetro cuantitativo o numérico del proceso se mide en intervalos regulares de tiempo. Los datos son utilizados para proyectar tendencias en el proceso. En el caso en que el proceso se encuentra demasiado alejado de los valores umbrales o nominales, el proceso es reajustado para corregir la situación. Este método se conoce con el nombre de control *feedback* o *feedforward*.
- *Medición y acción*: Consiste en el control de la calidad mediante inspección. Cada unidad manufacturada es inspeccionada. Las unidades defectuosas son reparadas o eliminadas. Este procedimiento de control de la calidad es el más caro, puesto que no previene defectos ni tampoco identifica todas las unidades defectuosas.

*Relaciones con los clientes*: Servicios a clientes pueden ofrecer la reparación o el reemplazamiento de productos defectuosos, o bien la compensación de pérdidas.

Se puede actuar sobre los tres tipos de factores de ruido que se consideran en la metodología de Taguchi, es decir, factores de ruido externo, interno y unidad a unidad, en diferentes etapas del proceso, no sólo en el diseño de los parámetros asociado al control de la calidad *Off Line*. Por ejemplo, se puede actuar sobre los tres tipos de ruido en el diseño del producto, en las etapas de diseño del sistema y de diseño de los parámetros. En el diseño de las tolerancias sólo se puede actuar sobre factores de ruido interno y unidad a unidad. Sobre estos últimos factores de ruido también se puede actuar desde la fase de diseño del proceso. Con el control de la calidad *On Line* también se puede actuar sobre los factores de ruido unidad a unidad.

## 3. Función de pérdida

La calidad del producto ha sido medida usualmente mediante comparación de características críticas del producto con especificaciones de fabricación establecidas para el producto. Las especificaciones sobre el producto son importantes. Sin embargo, en la actualidad hay un interés creciente por el desarrollo de técnicas que permitan el control de características del proceso que determinan la calidad del producto final. El objetivo final es reducir la variabilidad del proceso y conseguir que las características de la calidad se encuentren lo más cercanas posibles a los valores umbrales. Las especificaciones en el proceso de fabricación suelen venir dadas en términos de la cantidad de variabilidad que

puede ser tolerada en las características del producto y del proceso. Normalmente suelen ser expresadas en términos de:

- Un valor estándar o umbral.
- Límites de tolerancia bilaterales (naturales o especificados).
- Valores umbrales con un rango de tolerancia (naturales o especificados).
- Límites de tolerancia unilaterales (superiores o inferiores).

Según nos alejamos del valor umbral la pérdida aumenta. Por tanto, en el diseño de una función de pérdida se ha de considerar una función cuyo mínimo se encuentre en el valor umbral u objetivo y cuyos valores aumenten progresivamente según nos alejamos de dicho valor. En particular, es deseable un incremento de la velocidad de crecimiento de los valores de la función de pérdida a partir de los puntos definidos por los límites de tolerancia (e.g. asíntotas verticales situadas sobre los límites de tolerancia). La función de pérdida puede ser simétrica o asimétrica.

En la metodología de Taguchi se utiliza una función de pérdida  $L$  cuadrática, según se vio en el Tema 1. La pérdida esperada para la característica aleatoria  $X$  de la calidad con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$  viene dada por

$$E[L] = kE[X - T]^2 = k[\sigma^2 + (\mu - T)^2]. \quad (1)$$

Según este modelo, la pérdida es causada por la variabilidad de la característica estudiada y por el sesgo. Por tanto, para reducir la pérdida se debe actuar sobre la variabilidad del proceso y sobre la desviación del valor medio de la característica de la calidad estudiada respecto al valor nominal. Este argumento será utilizado también, en la próxima sección, para justificar el uso de la razón señal-ruido en la fase de diseño de los parámetros.

## 4. Razones señal-ruido

Tradicionalmente, mediante técnicas de diseño de experimentos se han evaluado los efectos de factores sobre la calidad de una característica. En el caso de una sola realización para cada experimento, se combinan los diferentes valores de la respuesta observados en cada realización de los experimentos, definidos en la matriz del diseño, para obtener una estimación de los efectos principales y de sus interacciones. Cuando se consideran réplicas de la variable respuesta en cada combinación de los niveles de los factores, la variación del error también puede ser estimada; el análisis se define en términos de los valores medios muestrales obtenidos de las réplicas.

Sin embargo, cuando se introduce la función de pérdida (en particular, cuando se considera la formulación (1)), se hace patente la necesidad de combinar el estudio de

la respuesta media con la variabilidad, es decir, definir una medida que recoja ambos aspectos. Esta medida es referida por Taguchi como razón señal-ruido. Esta terminología proviene del lenguaje utilizado en ingeniería, donde la media de la variable respuesta representa la señal y la variación  $\sigma^2$  representa el ruido. Se pueden definir diferentes medidas de razón señal-ruido, dependiendo del objetivo del estudio. Las más frecuentes son:

- (i) *Aproximación a un valor nominal.* La pérdida se incrementa según la característica  $X$  de la calidad estudiada se aleja del valor nominal.
- (ii) *Aproximación al valor más pequeño.* El valor nominal es cero y la característica de la calidad es no negativa. La pérdida disminuye según la característica de la calidad se aproxima a cero.
- (iii) *Aproximación al valor más grande.* El valor nominal es infinito y la característica de la calidad es no negativa. La pérdida disminuye cuando la característica de la calidad crece.

En el caso (i), se considera un factor o parámetro de ajuste que elimine el sesgo de la variable respuesta o característica de la calidad estudiada. Los parámetros de ajuste son factores controlables sobre los que se puede actuar. En algunos casos, se pueden determinar parámetros de ajuste que modifiquen la media sin afectar a la varianza. Mediante el uso de dicho parámetros, se consigue eliminar el sesgo o reducirlo considerablemente. La pérdida media (1) viene dada entonces en términos de  $k\sigma^2$  y el objetivo será minimizar o reducir la variabilidad. Para este objetivo Taguchi propone la razón señal-ruido

$$SN = -10 \log_{10}(S),$$

siendo  $S$  la desviación típica muestral calculada a partir de  $n$  réplicas obtenidas para una combinación determinada de los niveles de los factores. El objetivo de minimizar  $S$  es equivalente a maximizar  $-10 \log_{10}(S)$ . En otras ocasiones, los parámetros de ajuste afectan a la media  $\mu$  junto a  $\sigma^2$  de forma que el coeficiente de variación (CV)  $\sigma/\mu$  permanece constante. En términos de CV, la pérdida media (1) se puede reescribir como

$$EL = k [(CV)^2 \mu^2 + (\mu - T)^2].$$

Se seleccionan entonces los niveles de los parámetros de ajuste que permiten aproximar o hacer coincidir  $\mu$  con el valor nominal. Entonces,

$$EL = k(CV)^2 T^2.$$

A partir de esta expresión se estudian otros factores o parámetros controlables con el objetivo de minimizar CV. Para este objetivo se considera la razón señal-ruido:

$$SN = -10 \log_{10} \left( \frac{\bar{y}^2}{S^2} \right),$$

donde  $\bar{y}$  y  $S^2$  denotan respectivamente la media y la cuasivarianza muestrales de una muestra de la variable respuesta para una combinación de los niveles de los factores o parámetros considerados.

En el caso (ii),

$$EL = EX^2,$$

siendo  $X$  la característica de la calidad estudiada y, por tanto, se utiliza la aproximación

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2$$

para la definición de la razón señal ruido, que viene dada por

$$SN = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right).$$

Finalmente, en el caso (iii), se considera la aproximación anterior en términos de la variable  $1/X$ , puesto que maximizar  $X$  equivale a minimizar  $1/X$ , y, por tanto, se define la razón señal-ruido

$$SN = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right).$$

## 5. Diseño de experimentos ortogonales

Para el estudio de los factores que afectan a un producto o proceso, Taguchi se basa en un conjunto pequeño de matrices del diseño. Estas matrices definen diseños ortogonales, es decir, sus columnas son ortogonales. Los diseños factoriales  $2^k$  son un ejemplo de diseños ortogonales. Taguchi utiliza los valores 1 y 2 para denotar los niveles bajo y alto, respectivamente, en lugar de la notación usual  $\pm$ , puesto que considera la posibilidad de más de dos niveles en cada factor. En la metodología de Taguchi se consideran diseños ortogonales fraccionarios, es decir, se reduce el número de filas de la matriz del diseño mediante identificación de factores principales y de factores de interacción. Esto permite una mayor viabilidad del estudio de tratamientos. Por ejemplo, para el diseño  $2^7$  de 7 factores con dos niveles, Taguchi considera la siguiente matriz de diseño:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}.$$



Esta matriz es referida como matriz del diseño  $L_8$ . Tiene siete columnas ortogonales y ocho filas, en contraste con los  $2^7 = 128$  experimentos que constituirían la matriz del diseño de un diseño factorial completo de siete factores con dos niveles. Esta matriz  $L_8$  puede ser utilizada también para el estudio de un número inferior de factores, cuando no se asignan a algunas de las columnas factores principales (según se ha visto en el tema anterior). Con un conjunto relativamente pequeño de diseños, Taguchi proporciona un catálogo reducido de modelos que permiten abordar un número relativamente alto de experimentos en ingeniería. Por ejemplo, Taguchi considera los siguientes diseños ortogonales fraccionarios con dos niveles:  $L_4, L_8, L_{12}, L_{16}, L_{32}$  y  $L_{64}$ . El listado de diseños con tres niveles incluye;  $L_9, L_{18}, L_{27}$  y  $L_{81}$ . En general, un diseño  $L_N$  está definido mediante una matriz del diseño con  $N$  filas y permite considerar hasta  $N - 1$  factores.

Intuitivamente, cuando se reduce el número de filas de la matriz del diseño asociada, por ejemplo, a un diseño factorial  $2^k$ , se produce una pérdida que se refleja en:

- La pérdida de capacidad para estimar las interacciones entre factores.
- La pérdida de capacidad para estimar algunos de los efectos principales.

Taguchi proporciona reglas gráficas para cada matriz del diseño utilizada en su catálogo. Específicamente, en los gráficos que propone, los nodos son asignados a factores principales y los segmentos que unen dos nodos son asignados a los factores de interacción correspondientes.

*Selección de un diseño ortogonal.* Para seleccionar un diseño ortogonal se utiliza el siguiente método. Notemos primero que un diseño  $L_N$  tiene asociados  $N - 1$  grados de libertad. Entonces, un diseño apropiado para el desarrollo de un estudio es el más pequeño cuyos grados de libertad están justo por encima de los grados de libertad asociados con todos los factores e interacciones. El proceso de selección se puede resumir en los siguientes puntos:

1. Cada factor con  $k$  niveles tiene  $k - 1$  grados de libertad.
2. Los grados de libertad para un factor de interacción doble son el producto de los grados de libertad de los factores principales que lo definen.
3. Los grados de libertad requeridos para todos los factores principales e interacciones se suman para obtener el total de grados de libertad  $d.f._{\text{total}}$  requeridos en el desarrollo del experimento.
4. Se selecciona el  $L_N$  más pequeño para el cual  $N - 1 \geq d.f._{\text{total}}$  y que puede acomodar a los factores e interacciones que intervienen en el experimento.

En algunos casos, el estudio requiere combinaciones de factores principales e interacciones que impiden que el diseño seleccionado en el punto 4 sea apropiado y, por tanto, se

tenga que considerar el siguiente  $L_N$  en magnitud. Por ejemplo, este hecho se da cuando se incluye un número elevado de factores de interacción en el estudio. Para resolver este problema también se puede desarrollar un análisis preliminar de los factores de interacción que son realmente significativos.

## 6. Diseños robustos: Factores controlables y factores de ruido

El objetivo primordial de un diseño robusto es identificar el conjunto de parámetros o factores que proporcionan al producto o al proceso la capacidad de ser ‘insensibles’ o invariantes frente a cambios en las condiciones de operación medio-ambientales. Una vía para reducir los efectos de factores externos sobre el producto (i.e. el medio-ambiente operativo) es incluir una lista de condiciones de operatividad recomendadas. Sin embargo, esta vía no siempre es aconsejable, puesto que algunas condiciones medio-ambientales no pueden ser modificadas, y en otros casos no es deseable incluir una lista demasiado larga de restricciones sobre las condiciones de funcionamiento, puesto que la tolerancia de un producto frente a cambios medio-ambientales es también una medida de su calidad.

Para conseguir que productos y procesos sean robustos se requiere un estudio activo de los factores medio-ambientales. Taguchi incorpora el estudio de factores medio-ambientales en la fase del diseño de los parámetros. Más concretamente, propone construir dos matrices del diseño ortogonales: Una para los parámetros del diseño o factores controlables y otra para los factores de ruido o factores no controlables. El procedimiento para estudiar los factores de ruido es el mismo que el procedimiento empleado para el estudio de los parámetros del diseño (factores controlables). Se seleccionan los factores de ruido que deben ser considerados, definiendo entonces un diseño ortogonal apropiado para estos factores. Para los parámetros del diseño, Taguchi considera una matriz que se conoce como *matriz del diseño interno*, mientras que para el diseño de los factores de ruido se considera otra matriz que se refiere como *matriz del diseño externo*. Cada combinación de los niveles de los factores de ruido determina unas condiciones medio-ambientales para cada combinación de los niveles de los factores controlables asociados a la *matriz del diseño interno*. Cada fila de la matriz del diseño interno lleva asociado entonces un conjunto de  $m$  medidas, donde  $m$  representa el número de filas de la matriz del diseño externo. Cada conjunto de  $m$  medidas se combina entonces en términos de una razón señal-ruido apropiada, de acuerdo con los objetivos del estudio.

## 7. Limitaciones de la metodología de Taguchi

La metodología planteada por Taguchi ha ocasionado también bastante controversia desde su introducción en Estados Unidos. Las críticas esenciales se formulan en relación con aspectos estadísticos más que con su filosofía de medir la calidad en función de la pérdida que un producto ocasiona a la sociedad y de crear diseños robustos.

Una de las críticas se basa en la confusión de efectos que se produce en los diseños ortogonales fraccionarios que utiliza. Debido al elevado número de factores en relación con el número de tríadas, los tratamientos dados por las diferentes combinaciones de factores no se pueden estudiar en profundidad. Además, los diseños que propone no son siempre óptimos, si bien existen otros diseños del mismo tamaño que permiten la estimación del mismo número de factores sin confundir efectos de factores principales con efectos de factores de interacción doble.

Otro inconveniente de esta metodología es que las razones señal-ruido utilizadas no siempre proporcionan los resultados deseados. En algunos casos se puede comprobar que no hacen eficiente el uso de datos experimentales.

A pesar de los inconvenientes señalados, la filosofía de Taguchi ha tenido una fuerte influencia en el uso de la técnica de diseño de experimentos en el ámbito de la teoría de la calidad. Quizás una de las razones del seguimiento de esta metodología es que proporciona un ‘libro de recetas’ donde se ofrece un conjunto reducido de diseños, entre los que se realiza la selección. El procedimiento de selección se hace entonces bastante sencillo, así como la asignación de factores a columnas de la matriz del diseño elegida. Los grafos que representan las combinaciones de los factores principales y de los factores de interacción doble son bastante simples, facilitándose la determinación óptima de niveles de los factores. Aunque las herramientas o los elementos estadísticos utilizados en la metodología de Taguchi no son óptimos, suponen un gran avance en la mejora de la calidad y en la aplicación de las técnicas de diseño de experimentos en este contexto.