

Capítulo 1:

Introducción y objetivos

1 Introducción y objetivos

Acabamos de entrar en un nuevo milenio y el escenario que rodea a las empresas es muy diferente del que existía hace tan sólo 20 años: Los usuarios esperan que los productos cubran un mayor número de prestaciones; el aumento de la oferta y los avances tecnológicos hacen que el nivel de calidad de los productos sea cada vez mayor; como consecuencia de la globalización de los mercados las condiciones de uso de los productos son muy diversas (climas diversos, costumbres diferentes, ...) y, sin embargo, se espera un buen funcionamiento bajo cualquiera de estas condiciones.

Como consecuencia de este escenario los productos son cada vez más complejos, y la tarea de diseñarlos y fabricarlos es cada vez más difícil haciéndose necesaria en la fase del diseño la presencia de técnicos con un alto nivel de conocimiento tecnológico especializado, así como de líderes, con un conocimiento profundo y global del producto, que coordinen las diferentes especialidades. Por otra parte para asegurar elevados índices de calidad en estos productos tan complejos se requiere que las tasas de fallo de las componentes que las integran han de ser prácticamente nulas.

El diseño del proceso de fabricación también resulta extremadamente complicado ya que el número de procesos involucrados es muy numeroso y el producto acumula la variabilidad de cada uno de los subprocesos. Como consecuencia, hay un alto coste de no-calidad debido a rechazos por no cumplir las especificaciones finales o por no cumplir algunas de las tolerancias intermedias. Este coste de no calidad es estudiado en profundidad en el programa de mejora “Seis Sigma” (Breyfogle (1999), Harry et al. (2000) y Pande et al. (2000) entre otros).

Para mantenerse en el mercado hay que encontrar una solución teórica al concepto de producto que espera la sociedad y que a la vez sea rentable desde un punto de vista de negocio. Es decir, entre todos los prototipos cumpliendo las especificaciones requeridas por los usuarios finales, se ha de encontrar aquel que presente mejor comportamiento en producción.

Por lo tanto, las empresas han de adoptar estrategias que les permitan sobrevivir en estos escenarios tan complejos y manteniendo su objetivo de hacer negocio. Estas estrategias han de contemplar diseñar y comparar productos teniendo en cuenta:

- El cumplimiento de las especificaciones funcionales requeridas;

- El comportamiento del producto ante condiciones variables de producción, entorno de uso, características de los usuarios, ... etc.

Es fácil encontrar en el entorno que nos rodea ejemplos de productos a los que se les demanda altas prestaciones y que sean a su vez robustos o insensibles al entorno en que son utilizados:

- Teléfonos móviles con múltiples funciones: comunicadores de voz, comunicadores de mensajes electrónicos, funciones agenda, ...etc., y que mantengan estas funciones independientemente de dónde se encuentren emisor y receptor (túnel, ascensor, montaña, calle, ...etc.);
- Tapicerías para vehículos, resistentes al desgaste, con independencia de las variaciones en cuanto a humedad y horas de sol del lugar geográfico donde se utilicen;
- Software que pueda ser utilizado en cualquier plataforma, exportable a los diferentes programas, que admita trabajar con ficheros grandes, que se pueda transportar por la red y que pueda ser leído bajo diferentes sistemas operativos.

La manera tradicional de enfocar el desarrollo de un producto es secuencial:

- Primero, entre los prototipos iniciales que cumplen los requerimientos funcionales se selecciona uno a partir de un estudio de los costes asociados a su fabricación;
- A continuación se pasa a diseñar el proceso de fabricación intentando que este aporte la mínima variabilidad al producto (invirtiendo en máquinas capaces, permitiendo estrechos márgenes de tolerancias a las componentes, controlando el proceso, restringiendo las condiciones de uso final del producto, ...etc.).

Esta estrategia acaba siendo muy cara ya que se llega a tomar acciones costosísimas (y en muchos de los casos sin éxito) con tal de reducir el comportamiento variable del producto. Cuanto más complejo es el producto, y cuanto más diverso es el mercado, más sentido tiene optimizar los dos apartados a la vez: Se ha de diseñar un producto robusto desde el comienzo teniendo en cuenta el proceso que lo va a fabricar y el usuario al que va a llegar.

Aunque el problema de reducir la variabilidad entre productos o entre características de calidad no es un tema nuevo, sí que lo es el modo de abordar el tema propuesto en los 80 por el ingeniero Genichi Taguchi. Tradicionalmente, la manera de atacar el problema era mediante una recogida de datos del proceso que permitiera realizar un ANOVA respecto a los factores que habían cambiado: Tipo de máquina, proveedor, ...etc. En general en estos estudios se hace un gran esfuerzo de recogida de

datos en relación a los pocos factores que se estudian, y casi siempre estos factores están fijados en situaciones habituales de trabajo, por lo que se llega a identificar mejoras, pero todavía con una variabilidad de salida muy amplia. Podríamos decir que con el método tradicional se intenta “descomponer la variabilidad total en sus fuentes para llegar a conocer aquella parte del proceso que contribuye más y por lo tanto hacia donde se han de dirigir los esfuerzos de mejora”. Tippett (1935) y Daniels (1938) publicaron dos de los artículos más antiguos en esta línea y ambos provienen de empresas textiles. En ellos se plantea la búsqueda de condiciones de fabricación que ofrezcan una calidad de salida de las fibras lo más homogénea posible.

Como alternativa al método tradicional, Taguchi plantea experimentar, provocar escenarios, y lo hace desde un punto de vista científico y objetivo: En lugar de simplemente observar la variabilidad en las condiciones habituales de trabajo, propone:

- La realización de pruebas experimentales seleccionadas de una manera muy peculiar;
- El uso de un indicador (S/R) que permitirá seleccionar las condiciones óptimas del diseño, es decir, las condiciones bajo las cuales la variabilidad en el comportamiento del producto o pro eso se reduce drásticamente.

Este enfoque del problema marcarán un hito en el desarrollo de la estadística industrial.

Creemos importante dedicar unos apartados a la presentación clásica que se realiza del origen conceptual del método de Taguchi por la belleza de la construcción y por la gran importancia extra-estadística que tiene lo que en ello se dice.

1.1 Variabilidad funcional y producto robusto

El tema de la variabilidad está muy presente en el entorno industrial aunque muchas veces el consumidor final no lo perciba, bien por no plantearse una comparación entre productos, o por no comparar cuantitativamente un mismo producto sometido a situaciones diferentes. ¿A qué usuario se le ocurre solicitar una comparativa de consumos entre varios coches del mismo modelo?. El consumidor “asume” que el coche que compra cumple exactamente con los requisitos de la ficha técnica y, sin embargo, esto no es cierto. Por ejemplo, si tomamos como característica de calidad el consumo:

- Existe variabilidad entre el consumo de distintos coches de un mismo modelo;
- La distancia que recorre un coche determinado con 5 litros de carburante es variable y depende del tipo de vía, tipo de carburante, condiciones atmosféricas, ...;

- El consumo de un coche va aumentando a lo largo de su vida.

Las empresas tienen un gran interés en llegar a obtener productos que ofrezcan buenas prestaciones y que estas sean poco sensibles a variaciones en el entorno de fabricación o uso. Para lograr este objetivo se ha de entender el origen de las causas que afectan al funcionamiento de los productos y procesos, y se ha de determinar las acciones a llevar a cabo para optimizarlas.

Tomamos de Kackar (1985) la Tabla 1.1 donde se muestra una representación sencilla del escenario que envuelve el desarrollo de un producto. En esta tabla aparecen por un lado las etapas en el proceso de su elaboración y por otra las causas (o “factores ruido”) que provocan que los productos se comporten de una manera variable; además la tabla señala la fase del desarrollo donde es posible atacar a estas causas.

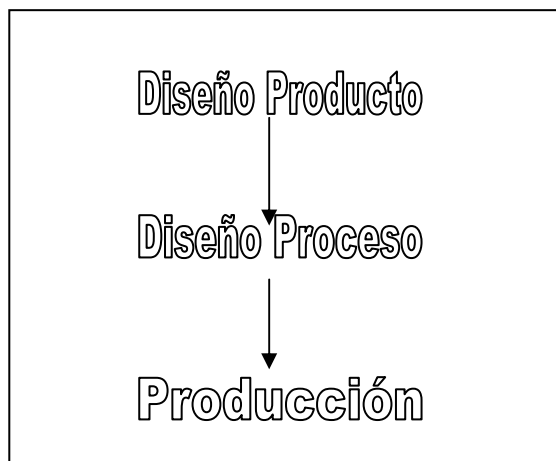


Figura 1.1 Diseño de un producto. Fases secuenciales

Cuando se trata de desarrollar un producto, sobre todo si éste es un producto nuevo, se pueden distinguir 3 fases consecutivas expuestas en la Figura 1.1:

- Primero se diseña el producto: Se concibe y materializa el producto con las prestaciones que tendrá;
- A continuación se diseña el proceso: Se determina cómo se va a llevar a cabo la fabricación en serie del producto;
- Por último se pasa a la etapa de producción: Se lleva a cabo la elaboración de los productos diseñados en la primera etapa con los métodos propuestos en la segunda.

En cuanto a las causas que afectan al funcionamiento del producto, podemos distinguir tres causas principales:

- Causas Externas o Ruido Externo. Aparecen una vez el producto está en manos del cliente: variaciones de temperatura o humedad, polución, vibraciones,...;
- Causas Internas o Ruido Interno. Son intrínsecas al producto debidas al envejecimiento, deterioro, fatiga, ...;
- Causas de Producción. Estas causas aparecen durante el proceso productivo afectando a los productos salientes: algunas provocan crisis (errores humanos, paradas de máquina, fallos en operaciones, ...) otras determinan la capacidad del proceso (variaciones en materias primas, mantenimiento, ...).

Como resultado de la presencia de estas causas, tenemos productos que presentan variabilidad. Se denominan productos robustos a aquellos que han sido diseñados de tal forma que mantienen sus características de calidad con un mínimo nivel de variabilidad cuando están sometidos a todo tipo de ruido.

Tabla 1.1 Etapas en el desarrollo de un producto

Fases del Desarrollo de un Producto	CAUSAS DE VARIABILIDAD (Factores Ruido)		
	Externas (Ambiente)	Internas (Deterioro)	Producción (Fabricación)
Diseño del Producto	O _{DOE}	O _{DOE}	O _{DOE}
Diseño del Proceso	X	X	O _{DOE}
Proceso de Producción	X	X	O _{SPC}

O= Contramedida posible X = Imposibilidad de contramedidas

Veamos las acciones o contramedidas que se pueden llevar a cabo dependiendo de la fase en que se encuentre el desarrollo de un producto.

Cuando el producto está en producción, las crisis o problemas propios de esta fase pueden dar lugar a productos muy diferentes. Si estas son frecuentes conviene utilizar una herramienta estadística, el Control Estadístico de Procesos (SPC), que permite gestionar la información con la finalidad de detectar la aparición de crisis de una manera rápida y ayudar en la identificación de las causas de los problemas. Con una utilización continuada de esta herramienta se eliminan las crisis.

Ahora bien, los procesos sin crisis también presentan variabilidad, la variabilidad que se denomina aleatoria o capacidad del proceso. Si el proceso en ausencia de crisis no es capaz de cumplir con las tolerancias establecidas, se ha de optar por acciones costosas para lograr: Controlar las condiciones ambientales de la fábrica, invertir en máquinas y proveedores mejores, ajustar más las tolerancias de las componentes o

subprocesos (muchas veces a niveles imposibles de cumplir con la tecnología con la que se trabaja), modificar el diseño del producto o proceso (muy difícil de realizar cuando se está en producción), inspeccionar el producto saliente para separar el producto no apto, ...etc.

Por lo tanto, si en producción no se modifica el proceso, sólo se puede actuar contra la variabilidad debida a las causas asignables de variabilidad y la herramienta estadística más adecuada para utilizar es el SPC.

En la etapa de diseño del proceso se pueden lograr que los procesos de producción sean capaces si se tiene en cuenta los “factores ruido de producción”. Es decir, teniendo en cuenta las condiciones de trabajo que pueden afectar a la calidad del producto (oscilaciones de temperatura de la empresa, tipo de máquinas en el mercado, los proveedores,...) se puede lograr diseñar procesos más capaces. Una herramienta que puede ayudar en la búsqueda de los parámetros óptimos del proceso es el Diseño de Experimentos.

Ocurre con mucha frecuencia, que si los técnicos que trabajan en el diseño del proceso no han participado en el diseño del producto, ahora aparecerán muchas propuestas de modificaciones del diseño del producto para que los procesos sean capaces y menos costosos, pero ya será tarde. En general sólo se admitirán pequeñas modificaciones del diseño actual (sobre todo no se tocarán las modificaciones que puedan alterar la funcionalidad del producto) y siempre y cuando los procedimientos de aceptación de las modificaciones “lleguen a tiempo” y no se pierdan en la burocracia interna de la empresa. Una herramienta interesante en esta fase es el QFD o “*Quality Function Deployment*”, (Marsh (1991)).

La fase de diseño del producto es la fase más importante de las tres de cara a elaborar una “estrategia completa” para atacar la variabilidad que presentarán los productos a lo largo de su vida; desde la fabricación hasta su muerte. En esta etapa se ha de trabajar con causas de todo tipo con tal de elaborar un producto que sea robusto desde su inicio. Como veremos más adelante una de las herramientas que más se utiliza es de nuevo el Diseño de Experimentos pero a un nivel más avanzado.

Resumiendo, es posible fabricar productos con altas prestaciones y robustos en sus funciones sin tener que realizar esfuerzos económicos extras si se concibe el producto robusto desde su comienzo. Esta filosofía ha de ir acompañada de:

- Política de Codesarrollo con todas las partes implicadas:
 - En el ámbito interno de la empresa: Han de participar Ingeniería de Producto, Ingeniería de Proceso y Fabricación;
 - A nivel de proveedores: Los conocimientos especializados que poseen son de gran ayuda tanto de cara a obtener los valores nominales objetivos como para diseñar un producto robusto;

- Clientes: Se ha de conocer no sólo los requerimientos funcionales, además se han de analizar las condiciones de utilización en los distintos mercados.
- Metodología de trabajo adecuada, y en línea con lo que se denomina “Ingeniería de la Calidad”. Esta metodología comprende estrategias encaminadas a causar cambios deseables en una situación pobremente conocida, disponiendo de recursos limitados y utilizando una heurística propia de la disciplina.

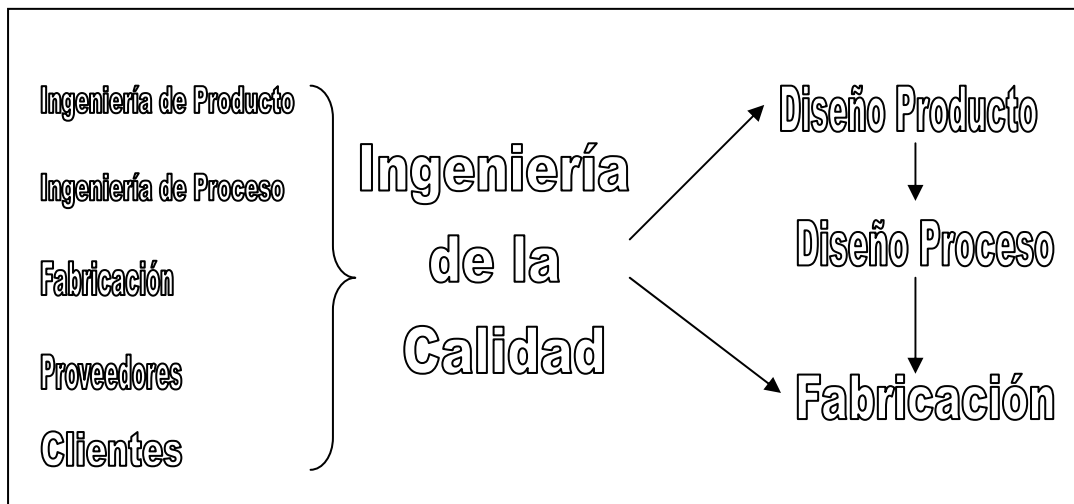


Figura 1.2 Diseño de un producto robusto

Esta manera de trabajar la representamos en la Figura 1.2. Todas las partes implicadas intervienen desde el principio y de esta manera los aspectos más críticos del diseño del producto, del diseño del proceso y de la fabricación se atacan al comienzo. Probablemente esta manera de trabajar consume más tiempo y recursos en su etapa inicial que el método convencional, pero a largo plazo es más rentable ya que se eliminan costes de no calidad, re-diseño, ..., que con el método clásico aparecen en etapas posteriores. Además, diseñando de esta manera se obtiene un producto robusto desde sus inicios, es decir, no se obtiene por modificaciones de un diseño inicial que responde a otros parámetros.

La política de co-desarrollo implica la existencia de buenos líderes de proyectos y el entendimiento de los requisitos del cliente (final o local). Para optimizar localmente el producto cada parte del proceso ha de conocer las necesidades de las siguientes fases que van a hacer uso de su producto. Además, el líder ha de tener una visión general de todas las fases para optimizar globalmente el producto.

Hemos visto hasta ahora que la etapa inicial de diseño del producto es la etapa principal y antes de pasar a presentar las herramientas estadísticas utilizadas en esta etapa presentaremos a grandes rasgos las actividades que se llevan a cabo.

1.2 Fases de diseño de un producto

Para presentar las fases de diseño de un producto utilizaremos la división utilizada por Taguchi (1986), el cual distingue tres:

- Diseño Primario: consiste en el diseño conceptual o funcional del producto para responder a una necesidad del mercado;
- Diseño Secundario o diseño de Parámetros: consiste en la determinación de los valores nominales óptimos que garanticen las características de calidad del producto;
- Diseño terciario o diseño de Tolerancias: se asegura la variabilidad del producto atacando a la variabilidad de los componentes. Esta etapa es económicamente costosa y sólo se recurre a ella cuando la variabilidad final del diseño secundario es excesiva.

Como resultado del Diseño Primario se llega a la definición de un producto con una serie de funciones objetivo a cumplir, pero no se tiene todavía físicamente el producto.

En la segunda fase se ha de conseguir un prototipo por métodos no convencionales, métodos que podríamos llamar “artesanales”. Este prototipo ha de cumplir los requisitos y prestaciones tan exigentes que comentábamos al comienzo de este capítulo, y sin embargo su concepción se va a realizar de una manera aislada del lugar donde se producirá en serie (muchas veces no existe todavía) o del lugar donde en un futuro será utilizado. Es fácil hacerse una idea de lo complicada que es esta etapa debido a:

- Los objetivos ambiciosos que en general se plantean, y
- El alto grado de desconocimiento existente de todo el tema.

Las dos circunstancias anteriores obligan a experimentar, es decir, a crear o provocar escenarios para aprender del comportamiento de las distintas funciones del producto ante diferentes condiciones de los parámetros. Esta experimentación requiere una metodología que permita conseguir de una manera eficiente el objetivo de seleccionar aquellas condiciones óptimas de los parámetros que proporcionen un producto, cuyas características de calidad están lo más cerca posible de los valores nominales definidos, siendo robusto a causas de variabilidad externas, internas y de producción.

1.3 Metodología propuesta por Taguchi

El trabajo práctico del ingeniero Genichi Taguchi en esta área se remonta a los años 50 aunque las primeras publicaciones en japonés surgen 20 años más tarde, Taguchi (1976), (1977) y (1978). La introducción de sus métodos en Occidente ocurre entre 1980 y 1985 con las dos Mohonk Conferences organizadas por la Quality Assurance Center de AT&T Bell Labs y, es un miembro de este comité, Raghu N. Kacker (1985) quién comienza la divulgación de estas técnicas en publicaciones americanas. Así, al método estadístico utilizado dentro de la metodología propuesta se le comenzó a llamar “Método de Taguchi”, aunque el mismo autor no es partidario de esta denominación, ya que incorpora técnicas estadísticas utilizadas anteriormente.

Taguchi populariza el concepto de “producto robusto” mencionado en apartados anteriores, desarrollando con esta finalidad lo que Pignatiello y Ramberg (1987) denominan:

- Una estrategia;
- Una táctica.

Dentro de su estrategia está la de medir la calidad de un producto a través de la función de pérdidas, es decir, a través las pérdidas que origina a la sociedad el hecho de que un producto presente un valor funcional distinto al valor nominal para el cual esté diseñado; por lo tanto se incorpora un nuevo concepto, la variabilidad, a la medición de la calidad, y además con criterios económicos.

Aunque Taguchi trabaja con problemas de ingeniería de diferente tipo, el trabajo que desarrollamos en esta tesis está relacionado con los problemas que se denominan “estáticos” por tener la característica de calidad Y un valor objetivo fijo “ τ ”. Para este tipo de problemas, una de las funciones de pérdidas, $L(y, \tau)$, más utilizada es la que toma la forma de la expresión (1.1).

$$L(y, \tau) = k(y - \tau)^2 \quad (1.1)$$

Así, el objetivo final en el diseño de un producto o proceso es el de encontrar niveles operativos donde la variable Y se pueda mantener tan cerca como se pueda del valor objetivo “ τ ” y además, siendo insensible a las causas de variabilidad o factores ruido, Z 's, mencionados en apartados anteriores. Es decir, se han de seleccionar aquellos niveles de los factores controlables X 's que minimicen la pérdida esperada causada por problemas de lejanía al valor objetivo y por problemas de variabilidad. La expresión (1.2) refleja la forma que toma el valor esperado de la función de pérdidas, bajo el efecto de los factores ruido, valorada en las condiciones de los factores de control.

$$E_z[L(y,t)] = kE_z(y - \tau)^2 = k(\sigma^2 + (\mu - \tau)^2) \quad \text{donde } E(Y) = \mu ; \quad V(Y) = \sigma^2 \quad (1.2)$$

Taguchi además propone que para minimizar la expresión anterior, primero se han de diseñar productos-procesos que han de ser robustos a la variabilidad (minimizar σ^2) y más tarde se han de ajustar los parámetros apropiados para lograr el objetivo o “target” (minimizar $\mu - \tau$). Estas ideas, que no son de naturaleza primordialmente estadística, iban en contra de la estrategia que se utilizaba hasta ese momento por las empresas, ya que en general el esfuerzo iba encaminado a conseguir prototipos que alcanzaran el óptimo y más tarde se intentaba hacerlos robustos.

La táctica para llevar a cabo esta idea comprende una serie de fases consecutivas claramente definidas y que comprenden la utilización de herramientas estadísticas:

- Selección de la característica de interés Y ;
- Selección de los factores de control, X 's, y factores ruido, Z 's, que potencialmente afectan a Y ;
- Experimentación según un diseño determinado (matriz producto);
- Selección de una métrica S/R ;
- Análisis de S/R y la *Media*. Clasificación de los factores significativos en dos grupos:
 - Factores “ X_d ” que afectan a la dispersión medida a través de S/R ;
 - Factores “ X_a ” que afectan a la localización, $E(Y)$, pero no a S/R ;
- Minimización de la función de pérdidas en dos pasos:
 - Paso 1: Seleccionar los niveles de los factores “ X_d ” que maximizan S/R ignorando la localización de la respuesta;
 - Paso 2: Seleccionar los niveles de los factores “ X_a ” para ajustar le *Media* al valor nominal con los niveles de “ X_d ” fijados como en el paso 1.

Esta táctica revoluciona la manera de abordar el problema de diseño de productos o procesos ya que incluye los factores ruido en la experimentación y realiza un análisis de los resultados muy peculiar utilizando una métrica, los ratios “señal ruido” (S/R), que definiremos en el apartado (1.3.4).

A continuación presentaremos de una manera más amplia cada uno de estos apartados.

1.3.1 Selección de la característica de calidad a medir

Dada una función de interés, se ha de seleccionar de entre las posibles características cuantificables asociadas a esta función, aquella con la que se trabajará durante la experimentación y que denominaremos Y .

No vamos a entrar a desarrollar, a pesar de la gran importancia del tema, los aspectos a considerar a la hora de seleccionar la característica a medir.

El libro de Wu y Wu (1996) trata este importante tema recogiendo aspectos de gran importancia de cara a la interpretación posterior de los resultados como el de la identificación de la función de calidad de interés y no uno de los innumerables síntomas que se pueden presentar. Así, si los clientes perciben ruidos, vibraciones,...etc. no deseables en los productos, no se trata de medir estas características sino la “función de calidad” que mejorándola anulará estas malas sensaciones.

En general se tiende a tomar características afectadas de un modo lineal por los factores a estudio; por lo tanto se tiene en cuenta el valor esperado de la función, su localización, y en menor medida la dispersión que esta característica presenta en presencia de factores ruido ya que este hecho es menos conocido. Como veremos a lo largo de este trabajo de investigación, la verdadera relación entre la característica Y y los factores a estudio afectan al éxito de la metodología de diseño robusto.

1.3.2 Selección de los factores de control y factores ruido

Taguchi aporta una táctica novedosa en la experimentación ya que introduce en ella los factores ruido o causas de variabilidad mencionadas en el apartado 1.1. Así, se ha de distinguir entre dos tipos de factores:

- Factores de Control (X 's): Se denomina así a los factores que se cree pueden afectar a la característica de calidad y cuyos valores pueden ser alterados a voluntad, tanto durante la experimentación como en el futuro cuando el producto se esté fabricando o utilizando;
- Factores ruido (Z 's): Son factores que pueden afectar a la característica de calidad pero que no pueden ser alterados a voluntad durante la vida del producto o durante el proceso de fabricación, pero si mientras se llevan a cabo las pruebas experimentales. Estos factores sin embargo pueden ser controlados mientras se hacen las pruebas experimentales. Estos factores, por el hecho de

afectar a Y y no estar fijados durante la vida de un producto provocan variabilidad en la respuesta.

Así, la relación entre Y y los factores de control y ruido a estudio puede ser expresada a través de determinada función “ g ” desconocida resultante de la proyección de la función teórica “ f ” que recoge a todos los factores que afectan a Y .

$$Y = f(X, Z, W)$$

$$Y = g(X, Z) + \varepsilon \tag{1.3}$$

X = F. de Control seleccionados ; Z = F. Ruido seleccionados;

W = Factores no seleccionados

Interesa encontrar condiciones de los factores de control que den lugar a un valor mínimo de cierta función de pérdidas. Es decir, si se toma como función de pérdidas la definida en (1.1), Y ha de estar cerca de su valor óptimo y ha de ser insensible a variaciones de los factores ruido.

Los factores W no seleccionados podrían influir notablemente en el logro de ambos objetivos. En particular, si W incluye a factores ruido cuyo efecto puede ser contrarrestado con los factores X 's a estudio, esta información pasa desapercibida a no ser que quede registrada en la componente ε .

1.3.3 Selección de la matriz de diseño

De los diseños que propone Taguchi, el más difundido consiste en una serie de condiciones experimentales definidas por lo que se denomina “Matriz producto”. Esta matriz se obtiene como producto cartesiano de dos matrices: una para los factores de control y otra para los factores de ruido (“inner array” y “outer array” respectivamente en la nomenclatura de Taguchi). Así, cada condición experimental de los factores de control es sometida a las mismas condiciones de los factores ruido, condiciones que son determinadas por la “outer array”.

Las matrices son seleccionadas a partir de unas tablas de diseños o “orthogonal arrays” Taguchi (1987). Para diseños a dos niveles en los factores de control y en los factores ruido, la matriz producto resultante es en la mayoría de los casos equivalente a una matriz $2^{k-p} \times 2^{r-q}$ de las definidas por Box et al. (1988). Taguchi acostumbra a trabajar con más frecuencia de lo habitual con diseños a más de dos niveles, hecho, que como veremos a lo largo de esta tesis, es necesario si se desea analizar la transmisión de la variabilidad por los factores ruido.

En la Tabla 1.2 se ha incluido una matriz producto que incluye a 3 factores de control, A, B y C y dos factores ruido, R y S. Hay cuatro condiciones experimentales distintas en los factores de control y cada una de ellas se somete a otras tantas de los factores ruido. Notar que las condiciones de ruido son las mismas para cada condición de los factores de control (en este caso las 4 condiciones que permite un diseño completo en los 2 factores ruido). En total se realizan 16 pruebas experimentales.

Taguchi en general no menciona el orden de realización de las pruebas aspecto que como veremos más adelante es de vital importancia a la hora de seleccionar un diseño. En general se asume que el diseño se ejecuta en orden totalmente aleatorizado.

Tabla 1.2 Matriz producto. Diseño 2^{3-1} con C=AB para los factores de control y 2^2 para los factores de ruido

			R	-1	1	-1	1
A	B	C	S	-1	-1	1	1
-1	-1	1		x	x	x	x
1	-1	-1		x	x	x	x
-1	1	-1		x	x	x	x
1	1	1		x	x	x	x

1.3.4 Selección de las métrica *S/R* y *Media*

La relación *S/R* es un índice que históricamente ha sido utilizado en la industria de la comunicación para evaluar sus sistemas. Por ejemplo en un aparato de radio la relación *S/R* indica el ratio entre la señal intencionada (la parte útil) y el ruido (la parte nociva de la señal), para medir la calidad cuando el aparato está funcionando: Una radio de mala calidad es ruidosa a alto volumen y en cambio un aparato de alta fidelidad emite poco ruido.

Tradicionalmente, la investigación de un producto o proceso se dirige en primer término a la consecución de un objetivo definido (o valor de la señal) y se tiene en cuenta más tarde, en general cuando el producto ya está en el mercado, los problemas de variabilidad (o nivel de ruido).

En ingeniería de calidad, el concepto de *S/R* ha sido adaptado por Taguchi para evaluar, en la etapa de diseño de parámetros, la calidad de un producto o proceso teniendo en cuenta los dos conceptos: La señal y el ruido que emiten. De esta manera, si cada fila de la matriz producto es considerada como un prototipo diferente, *S/R*, estimada a partir de las observaciones y_{ij} a lo largo de las condiciones de ruido, da una medida de calidad de cada uno de ellos.

Para problemas estáticos, es decir, problemas donde *Y* tiene un objetivo fijo, Taguchi clasifica los problemas en tres grupos dependiendo de la naturaleza del objetivo. Para cada

tipo de situación la estimación de S/R se realiza de manera diferente pero en los tres casos el objetivo final del investigador es maximizar S/R .

Partiendo de un diseño $2^{k-p} \times 2^{r-q}$; con k factores de control y r factores ruido, las tres situaciones son:

- Objetivo de Y : cuanto más pequeña mejor. En tal caso se ha de maximizar la función definida por:

$$S/R_i = -10 \log \frac{\sum_{j=1}^{n_r} y_{ij}^2}{n} \quad i=1, \dots, n_c ; j=1, \dots, n_r ; 2^{k-p} = n_c ; 2^{r-q} = n_r \quad (1.4)$$

- Objetivo de Y : cuanto más grande mejor. En tal caso se ha de maximizar la función definida por:

$$S/R_i = -10 \log \frac{\sum_{j=1}^{n_r} (1/y_{ij})^2}{n} \quad i=1, \dots, n_c ; j=1, \dots, n_r ; 2^{k-p} = n_c ; 2^{r-q} = n_r \quad (1.5)$$

- Objetivo de Y : alcanzar un valor nominal determinado. En tal caso se ha de maximizar la función definida por:

$$S/R_i = 10 \log \frac{y_i^{-2}}{s_i^2} \quad i=1, \dots, n_c ; j=1, \dots, n_r ; 2^{k-p} = n_c ; 2^{r-q} = n_r \quad (1.6)$$

En la mayoría de las veces, relación S/R se utiliza junto a la *Media* de la respuesta en cada condición experimental en los factores de control debido a que interesa conocer el comportamiento de la localización:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_r} y_{ij}}{n} \quad i=1, \dots, n_c ; j=1, \dots, n_r ; 2^{k-p} = n_c ; 2^{r-q} = n_r \quad (1.7)$$

S/R y *Media* han sido estimadas para cada condición de los factores de control resumiendo la información a lo largo de las condiciones de ruido. Para optimizar estas funciones se aproxima la relación subyacente con modelos lineales de primer orden a los que se les añade los términos cruzados de segundo orden,

$$S/R = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i X_i + \sum_{i \neq j=1}^k \hat{\beta}_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad i, j = 1, \dots, n_k \quad \varepsilon - iid -> N(0, \sigma_1) \quad (1.8)$$

$$\bar{Y} = \hat{\beta}_0^* + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i^* X_i + \sum_{i \neq j=1}^k \hat{\beta}_{ij}^* X_i X_j + \varepsilon^* \quad i, j = 1, \dots, n_k \quad \varepsilon^* - iid - > N(0, \sigma_2) \quad (1.9)$$

Como veremos más adelante, Taguchi propone minimizar el valor esperado de la función de pérdidas definida en la ecuación (1.2) en dos pasos: Maximizando *S/R* en un primer paso y ajustando la *Media* en un segundo.

1.3.5 Análisis y clasificación de los factores

Los resultados se analizan mediante tablas de análisis de la varianza, ANOVA, donde la estimación del error aleatorio se realiza acumulando los efectos que aportan menos de un 5% a la variabilidad total o bien por un método secuencial como el que sigue:

- Etapa 1: Tomar como primera estimación del error aleatorio MSE_1 la suma de cuadrados del efecto más pequeño;
- Etapa 2: Comparar el MSE del segundo efecto más pequeño con este MSE_1 . Si son similares se juntan y se obtiene MSE_2 , y así sucesivamente hasta que surge el primer efecto significativo. Aquí se para y se toma el MSE^* resultante;
- Última etapa: Todos los efectos que quedan superan MSE^* y por lo tanto son significativos.

Una vez realizado el análisis de *S/R* y la *Media* los factores *X*'s se clasifican en tres grupos:

- Factores “ X_d ” o factores asociados a la dispersión: Son aquellos factores que aparecen significativos en el modelo para *S/R*, independientemente que también lo sean en el modelo para la *Media*. Es decir, son factores de control que transmiten de manera diferente la variabilidad medida como *S/R*.
- Factores “ X_a ” o factores asociados a la localización: Son aquellos que sólo tienen un efecto significativo sobre el nivel de la respuesta estimado a partir de la *Media*. Con estos factores se intentará llevar a la respuesta hacia el nivel deseado.
- Factores que no afectan ni a *S/R* ni a la *Media*: Estos factores se utilizarán para otros fines diferentes a la optimización de *Y*.

1.3.6 Selección de las condiciones óptimas

En general se necesita de una función de pérdidas para valorar conjuntamente este problema multirespuesta aunque en la mayoría de casos prácticos las condiciones óptimas para los factores de control se seleccionan en dos pasos:

- Paso 1: Seleccionar los niveles de los factores “ X_d ” que maximizan S/R ignorando la *Media*;
- Paso 2: Manteniendo los niveles de los factores “ X_d ” fijados como en el paso 1, seleccionar los niveles de los factores “ X_a ” para llevar la *Media* al valor deseado.

Para la selección de los niveles se ayudan de gráficos en los que se representan los efectos significativos.

1.3.7 Realización de experimentos confirmatorios

Antes de dar definitivamente por bueno el resultado obtenido, Taguchi propone la realización de una serie de experimentos para confirmar que en las condiciones seleccionadas el comportamiento de Y es el esperado. En caso de obtener grandes discrepancias se debería de volver hacia atrás en búsqueda de posibles errores de interpretación o de análisis.

1.4 Evolución de la Metodología de Taguchi

Las primeras publicaciones en USA de lo que hemos denominado “táctica” de Taguchi estaban rodeadas de mucho misticismo y nadie se atrevía a criticarlas ya que en un principio no se llegaba a entender el lenguaje utilizado y tampoco quedaban suficientemente justificados los métodos estadísticos y analíticos empleados.

Uno de los primeros artículos en Occidente sobre la metodología utilizada por Taguchi se debe a Kackar (1985), quien desde AT&T Bell Laboratories publica un artículo de gran valor en aquella época intentando aclarar los aspectos oscuros de la metodología. Este artículo viene acompañado por un panel de autores que participan en la discusión recogiéndose un sentimiento común de reconocimiento general a la importancia de las aportaciones conceptuales y metodológicas de Taguchi para la mejora de la calidad en la industria y una necesidad de mejorar muchos de los aspectos del método. Así, G. Box escribe: “*This country presently faces a very serious economic challenge, particullary from Japan. Clearly, our response must be no just to do as well as our competition; we must do better; and we can*”. Algunos autores, Box, Easterling, Freund, Lucas, Pignatiello y Ramberg entre otros, mencionan los aspectos más críticos

del método desde un punto de vista estadístico: los diseños son muy limitados, no se puede generalizar el uso de la función S/R , el lenguaje es poco entendible, ..., aunque sin llegar a profundizar en el tema.

Unos años más tarde, Leon, Shoemaker y Kackar (1987), también de AT&T Bell Laboratories, y Box (1988) publican dos artículos muy especializados en torno a la métrica utilizada por Taguchi. Los aspectos más importantes de estos artículos serán comentados en el siguiente capítulo.

A partir de estas fechas, las publicaciones se suceden a un ritmo vertiginoso y en la mayoría de los casos con aportaciones de mejora a las técnicas estadísticas del método de Taguchi. Una vez más, un miembro de AT&T Bell Laboratories, Nair (1992), lleva la iniciativa de editar un panel de discusión donde se recogen los aspectos más relevantes del estado de la cuestión del tema hasta la fecha. En este panel participan miembros de reconocido prestigio de las principales instituciones del país: (B. Abraham y J. MacKay de la University of Waterloo, George Box de la University of Wisconsin, Raghu N. Kackar del National Institute of Standards and Technology, Thomas J. Lorenzen de General Motors Research Laboratories, James M. Lucas de Du Pont Quality Management and Technology Center, Raymond H. Myers y G. Geoffrey Vining de Virginia Polytechnic Institute y de State University y University of Florida, John A. Nelder del Imperial College de Londres, Madhav S. Phadke de Phadke Associates, Inc., Jerome Sacks y William J. Welch del National Institute of Statistical Sciences and University of Waterloo, Anne C. Shoemaker y Kwok L. Tsui de AT&T Bell Laboratories y Georgia Institute of Technology, Shin Taguchi de American Supplier Institute, Inc y C. F. Jeff Wu de la University of Waterloo.

Después de la anterior recopilación, la proliferación de artículos en revistas especializadas o de divulgación en revistas empresariales, libros con títulos claramente enfocados al tema, tesis doctorales dirigidas por los más prestigiosos estadísticos, cursos en universidades o empresas,...etc., ha continuado. Todo esto no es más que una prueba del gran interés que ha tenido el tema tanto en el ámbito industrial como en el académico.

La Metodología que inicialmente propuso Taguchi ha evolucionado dando lugar a gran cantidad de publicaciones sobre aspectos a mejorar, aunque siguen existiendo temas críticos donde no se adopta una postura universal. Estos temas se podrían agrupar en cuatro áreas:

- Métrica a utilizar;
- Diseño a seleccionar;
- Análisis de la información;
- Selección de las condiciones óptimas.

En ocasiones, las mejoras teóricas propuestas en alguna de las cuatro áreas anteriores suponen la utilización de métodos sofisticados que no suponen ninguna mejora significativa en entornos de trabajo como los que nos encontramos en la mayoría de las situaciones prácticas (pocas condiciones experimentales, mediciones sin réplicas, personal no experto en estadística, ...etc.).

Sin embargo, existen propuestas interesantes que han sido adaptadas e introducidas en la práctica con notable éxito:

- La utilización de métricas más sencillas que la propia S/R : s^2 , s o $\log(s)$ por ejemplo;
- La selección de la matriz de diseño a partir de una única matriz que contiene tanto a los factores de control como a los de ruido y que implica la realización de un número más reducido de condiciones experimentales;
- La aproximación al estudio de las condiciones robustas a partir de un modelo de localización en lugar de un modelo de dispersión; para ello se ha de obtener previamente un modelo para la respuesta Y que incluya tanto a los factores de control como a los factores ruido;
- ...etc.

El tema que más nos interesa está relacionado con el tercer punto anterior. Desearíamos saber más sobre las ventajas e inconvenientes, si existen, de los dos métodos de estudiar la variabilidad provocada por los factores ruido, el método que se apoya en modelos de dispersión o el método que se apoya en modelos de localización.

Los resultados de aplicar las dos propuestas en la práctica pueden ser comparados si el diseño de partida se ha ejecutado en forma de matriz producto. Hemos comprobado con un número muy limitado de ejemplos que en la mayoría de casos se llegan a resultados muy similares, pero hemos encontrado ejemplos, dos de ellos presentados de una forma extensa en el capítulo 3, donde los resultados son muy diferentes.

1.5 Objetivos

Las discrepancias encontradas al analizar de dos formas diferentes los resultados de un experimento ejecutado a partir de una matriz producto fueron la semilla del trabajo de investigación que hemos llevado a cabo. La investigación ha abarcado diferentes aspectos con tal de acercarnos a los objetivos principales de esta tesis que son:

- Entender las diferencias entre modelar directamente la variabilidad o estudiarla a partir de modelos de localización;
- Obtener pautas de actuación que ayuden a seleccionar diseños en cada caso;
- Obtener pautas de actuación que ayuden a seleccionar condiciones robustas en cada caso.

La tesis la hemos estructurado de la siguiente forma:

El capítulo 2 presenta el estado del arte. No se pretende realizar una recopilación exhaustiva, sino más bien presentar aquellos aspectos que podrían justificar los métodos que actualmente se utilizan en la práctica habitual de la Estadística Industrial.

En el capítulo 3 presentamos dos casos publicados en revistas científicas, en los que al analizar por las dos vías mencionadas anteriormente los datos del diseño se obtienen resultados totalmente diferentes. La explicación de las causas de estas diferencias se podrá encontrar más adelante en el capítulo 9. Los 2 casos anteriores dan lugar a un estudio más profundo y general del comportamiento de la superficie de respuesta asociada a la *Variabilidad* cuando se asume que la relación teórica entre la respuesta Y y los factores de control y ruido puede ser aproximada por modelos lineales sencillos.

El capítulo 4 está dedicado al estudio de la superficie $V(Y)$ cuando sólo hay un único factor ruido afectando a la respuesta Y . En este capítulo se compara la superficie teórica con la obtenida por aproximaciones a partir de diseños factoriales a dos niveles realizándose un esfuerzo en plasmar las diferencias de una manera gráfica.

Continuando con modelos para Y conteniendo un único factor ruido, en el capítulo 5 se comparan los modelos para las métricas *varianza*, *desv. típica* y *log (desv. típica)*. La comparación se establece en relación a los efectos que aparecen significativos en cada modelo y la geometría de cada superficie.

El capítulo 6 extiende el trabajo anterior a modelos para Y conteniendo a 2 factores ruido interaccionando con factores de control generalizándose el problema en el capítulo 7. A partir de los resultados obtenidos en estos capítulos se define la naturaleza de las superficies asociadas a la variabilidad, y se establecen pautas de cara a seleccionar diseños que permitan aproximar dichas superficies cuando se trabaja

directamente con la variabilidad (con las que denominamos “métricas resumen”). Asimismo se aportan reflexiones sobre las consecuencias de realizar estos estudios a partir de diseños factoriales a dos niveles.

En el capítulo 8 se presentan dos situaciones que pueden darse con frecuencia en la práctica cuando se analiza la variabilidad provocada por los factores ruido a partir de métricas de localización, y que pueden dar lugar a una interpretación incorrecta de la superficie. En este capítulo se incluyen estrategias o pautas a seguir de cara a evitar situaciones similares.

En el capítulo 10 se presentan los métodos más utilizados a la hora de seleccionar las condiciones robustas con una exposición muy clara de estrategias de selección erróneas muy habituales. Acaba el capítulo recomendando pautas de trabajo para llevar a cabo correctamente este tema.

Finalmente, en el capítulo 11 presentamos un resumen de las conclusiones generales de este trabajo.