

***Capítulo 11:***

***Conclusiones***



## *11 Conclusiones*

Los productos y los procesos industriales se conciben o modifican partiendo de requisitos funcionales y económicos. Uno de los criterios a tener en cuenta y que va ligado tanto al aspecto funcional como al de rentabilidad económica es el de la “robustez”, es decir, la insensibilidad del funcionamiento ante diversas fuentes de variación no controlables.

La manera más eficaz de atacar este problema es desde la fase del diseño utilizando la experimentación con factores controlables y con aquellos factores ruido que se supone afectarán más a las características de calidad. A partir de los resultados de estos experimentos se seleccionan las condiciones en los factores de control más robustas al efecto de los factores ruido.

Los dos métodos más extendidos en la práctica industrial parten de diseños muy diferentes para, en un caso modelar la superficie asociada a la variabilidad transmitida por los factores ruido, y en el otro modelar la característica estudiada  $Y$ , incluyendo en el modelo los efectos de los factores ruido. Por este segundo método, tomando la parte del modelo asociada a los factores ruido, se puede estudiar el comportamiento de  $\sigma_z^2(Y)$ .

Es habitual decidirse por uno de estos métodos a partir del coste económico de los diseños que se necesitan para llevarlos a cabo, asumiendo que “en general” los dos métodos llevan a los mismo resultados. La sorpresa llega cuando se encuentran casos reales como los presentados en el capítulo 3 donde esto no es así.

Esta tesis tenía como objetivo descubrir causas de las diferencias que frecuentemente se encuentran al atacar los problemas de robustez por las dos vías de análisis. Hemos encontrado que en la práctica experimental es muy frecuente cometer tres tipos de errores que pueden explicar parte de las anteriores diferencias.

## 11.1 Incorrecto tratamiento de la superficie $\sigma_Z^2(Y)$

Hemos demostrado teóricamente, y mostrado de una manera gráfica, que la superficie  $\sigma_Z^2(Y)$  es cuadrática cuando la  $Y$  depende de forma lineal de las interacciones entre factores de control y factores ruido.

Esta superficie se puede aproximar en la región experimental determinada por un diseño  $2^{k-p}$  por polinomios de primer orden, sólo si la zona de mínima varianza está suficientemente alejada y los términos en el modelo para  $Y$  cumplen determinadas condiciones muy estrictas.

Cuando se parte de diseños  $2^{k-p}$  en los factores de control para aproximar  $\sigma_Z^2(Y)$  por métricas resumen se está procediendo de manera incorrecta ya que estos diseños no permiten estimar de una manera completa la superficie. impone  $X_i^2 = 1$ , también se está procediendo incorrectamente ya que las conclusiones sólo son válidas en las condiciones experimentales.

Las superficies estimadas en la mayoría de las situaciones prácticas sólo son válidas para comparar la variabilidad en las condiciones experimentales, no identifican adecuadamente la zona de mínima varianza y tienden a sobrestimar la variabilidad en la región experimental. Como consecuencia, si la zona de mínima varianza pasa por esta región se induce, erróneamente, a alejarse de la zona.

Además, si se trabaja con diseños  $2_{III}^{k-p}$  es fácil seleccionar incorrectamente los efectos significativos cuando la zona de mínima varianza pasa por el interior de la región experimental. En estas condiciones, el modelo teórico no contiene efectos de primer orden, los efectos cuadráticos puros no podrán ser estimados, y los efectos principales que estén confundidos con interacciones significativas se seleccionarán erróneamente.

### Recomendaciones:

- Cuando se vaya a trabajar modelando directamente la variabilidad transmitida por los factores ruido a partir de métricas resumen, se recomienda utilizar diseños de segundo orden en los factores de control. La experimentación también se puede llevar a cabo de forma secuencial: partiendo de diseños factoriales de Resolución IV con puntos centrales y completando el diseño en una segunda etapa si se detectase evidencia de curvatura;
- Si se deduce  $\sigma_Z^2(Y)$  a partir del modelo para  $Y$  mantener los términos  $X_i^2$  y hacer  $X_i^2 = 1$  sólo para estudiar las condiciones experimentales.

## 11.2 Errores en la selección del modelo para $Y$

Aunque el modelo para  $Y$  aporta información valiosa de cara a un entendimiento de las relaciones entre los factores  $X$ 's y  $Z$ 's es conocido que la aproximación que se obtiene de  $\sigma_Z^2(Y)$  a partir de este modelo es muy sensible al modelo estimado para  $Y$ .

Hemos planteado dos situaciones que ocurren con frecuencia y hemos demostrado que si se obtiene el modelo para  $Y$  siguiendo las pautas habituales, es fácil que no se recoja la variabilidad debida a otras fuentes de variación ajenas a los factores  $Z$ 's o se recoja de forma parcial la variabilidad provocada por los propios factores  $Z$ 's. Hemos demostrado que los criterios que se utilizan habitualmente para incluir términos en un modelo (t-test individuales, gráficos en PPN,...) no son válidos cuando se trata de seleccionar un modelo para  $Y$  a partir del cual se va a deducir un modelo para  $\sigma_Z^2(Y)$ . Así, si se siguen las pautas habituales es fácil dejar en la componente del error términos con poca contribución a la localización de la respuesta  $Y$  pero necesarios para explicar la varianza debida al ruido.

Sin embargo, la aproximación a  $\sigma_Z^2(Y)$  por métricas resumen se comporta mejor en el sentido de que tiene más facilidad para recoger cualquier fuente de variación, sea conocida o desconocida.

Por lo tanto,  $\sigma_Z^2(Y)$  a partir del modelo de  $Y$  recoge parcialmente la variabilidad transmitida por los factores ruido considerados y  $\sigma_Z^2(Y)$  por métricas resumen recoge mejor la variabilidad transmitida por estos factores ruido y además recoge otras fuentes de variación desconocidas. Esto provoca que se puedan encontrar diferencias entre los resultados de los dos métodos.

En el capítulo 8 hemos descrito una estrategia que recomendamos utilizar cuando se vaya a analizar  $\sigma_Z^2(Y)$  a partir del modelo para  $Y$  y que permite mejorar el que se obtendría por los procedimientos habituales.

### 11.3 Errores en la identificación de condiciones robustas

Cuando se trabaja con el modelo de  $Y$ , la selección de las condiciones robustas se realiza principalmente a partir de gráficos de interacciones entre factores de control y factores ruido. En cambio, cuando se trabaja con métricas resumen ( $\sigma^2(Y)$ ) se estudia los efectos de los factores de control sobre esas métricas.

Hemos detectado que en el análisis de datos experimentales frecuentemente se cometen 2 tipos de errores al seleccionar las condiciones robustas:

#### **1er error: No detección de condiciones robustas cuando en realidad existen**

Este error se produce indistintamente en los dos tipos de análisis. Ocurre cuando la superficie teórica está centrada en la región experimental y el análisis se limita a las condiciones experimentales.

#### **2º error: Selección incorrecta de condiciones robustas.**

Este error se produce al buscar condiciones robustas a partir de los gráficos de interacciones entre los factores de control y los factores ruido, y ocurre al tratar individualmente cada uno de esos gráficos, tanto cuando dos factores (o más) de control interaccionan con el mismo factor ruido, como cuando dos (o más) factores ruido interaccionan con el mismo factor de control.

#### **Recomendaciones:**

- Si se desea evaluar la variabilidad en toda la región experimental se ha de obtener un modelo para  $\sigma_Z^2(Y)$  de segundo orden;
- La selección de las condiciones robustas a un factor ruido se ha de realizar a partir de un gráfico que incluya este factor y todos los factores de control con los que interacciona;
- Las condiciones robustas individuales para cada factor ruido no tienen por qué ser condiciones robustas globales. Por ello, si existen factores de control en común, para la selección de las condiciones robustas globales se han de agrupar los gráficos anteriores.

## 11.4 Aproximación a $\sigma^2(Y)$ por métricas resumen o métricas no-resumen

Creemos que para conseguir una buena aproximación a  $\sigma_Z^2(Y)$  que recoja la curvatura de la superficie y las diversas fuentes de variación existentes hay que partir de matrices producto con más de 2 niveles en los factores de control y por lo tanto apoyamos las ideas originales de G. Taguchi (aunque nunca las hemos visto justificadas de forma rigurosa). Una crítica habitual es que estas matrices necesitan un gran número de condiciones experimentales, por ello recomendamos que se explote adecuadamente la naturaleza secuencial de la experimentación y se utilicen diseños cuadráticos en aquellas etapas que así lo requieran. (La experimentación a partir de matrices producto siempre permite estimar un modelo para Y que puede ser utilizado para analizar cada factor ruido por separado).

Si el estudio se realiza a partir de un modelo para Y se han de implementar las pautas de actuación recogidas a lo largo de esta tesis de cara a no cometer errores al estimar el modelo para  $\sigma_Z^2(Y)$  o al seleccionar las condiciones robustas.

## 11.5 Otras líneas de investigación

En general el número total de condiciones experimentales necesarias para llevar a cabo la aproximación a  $\sigma^2(Y)$  por uno u otro método es muy diferente (en general las aproximaciones por métricas no-resumen requieren menos condiciones experimentales) y es una de las causas que determinan la elección del método.

Sin embargo en la mayoría de las situaciones prácticas no tiene sentido comparar los diseños teniendo en cuenta sólo el número total de condiciones experimentales, ya que el coste total de la experimentación no tiene porqué ser proporcional al número de experimentos ya que:

- Los experimentos no son homogéneas en cuanto a coste;
- El coste depende del orden de ejecución de los experimentación y éste no tiene porqué ser totalmente aleatorio (split-plot, strip-plot).

Este es un campo que ha sido parcialmente investigado por algunos autores (Jones (1990), Wu y Hamada (2000) y Bisgaard (2000)) pero creemos que tiene mas posibilidades.

En este sentido, las aportaciones de esta tesis respecto a los posibles errores al utilizar los dos métodos de análisis pueden ayudar a definir diseños que minimicen a un tiempo el coste de la experimentación y las posibilidades de error en la interpretación de los resultados.

Además de las líneas indicadas, pensamos que profundizar y ampliar las causas de errores aquí apuntadas hasta llegar a entender bajo qué circunstancias es preferible uno de los dos métodos.

Otra línea de investigación que queda abierta es la de analizar los datos de un experimento ejecutado a partir de una única matriz como si se tratara de varios bloques conteniendo cada uno de ellos matrices producto (en el capítulo 2 se ha presentado un ejemplo).

En esta tesis hemos recogido algunos errores que se cometen en el estudio de los problemas de robustez. Seguro que hay más y por ello animamos a los investigadores que profundicen sobre estos temas y los divulguen.