

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de
Barcelona

Tesis doctoral

**ERRORES EN LA BÚSQUEDA DE CONDICIONES
ROBUSTAS. METODOLOGÍAS PARA EVITARLOS.**

Barcelona, Septiembre 2001

Autora

M. Lourdes Pozueta Fernández

Director

Dr. Xavier Tort-Martorell Llabrés
Departament d' Estadística i
Investigació Operativa
Universitat Politècnica de Catalunya

A Joseba y Nahia

Índice general

Índice general

| | |
|------------------------------|-------------|
| AGRADECIMIENTOS | XIII |
|------------------------------|-------------|

| | |
|---------------------|-------------|
| RESUMEN..... | XVII |
|---------------------|-------------|

| | |
|---|----------|
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS:: | 1 |
|---|----------|

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introducción y objetivos..... | 3 |
| 1.1 | Variabilidad funcional y producto robusto..... | 5 |
| 1.2 | Fases de diseño de un producto..... | 10 |
| 1.3 | Metodología propuesta por Taguchi | 11 |
| 1.3.1 | Selección de la característica de calidad a medir..... | 13 |
| 1.3.2 | Selección de los factores de control y factores ruido | 13 |
| 1.3.3 | Selección de la matriz de diseño..... | 14 |
| 1.3.4 | Selección de las métrica <i>S/R</i> y <i>Media</i> | 15 |
| 1.3.5 | Análisis y clasificación de los factores..... | 17 |
| 1.3.6 | Selección de las condiciones óptimas..... | 18 |
| 1.3.7 | Realización de experimentos confirmatorios..... | 18 |
| 1.4 | Evolución de la Metodología de Taguchi | 18 |
| 1.5 | Objetivos | 21 |

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE | 23 |
|--|-----------|

| | | |
|-------|--|----|
| 2 | Estado del arte | 25 |
| 2.1 | Selección de la métrica o “performance measure” | 26 |
| 2.1.1 | Métricas resumen..... | 27 |
| 2.1.2 | Métricas no-resumen | 33 |
| 2.1.3 | Conclusiones sobre el uso de métricas resumen y no-resumen | 36 |
| 2.2 | Selección de la matriz de diseño | 37 |
| 2.2.1 | Matriz producto y matriz ampliada | 38 |
| 2.2.2 | Alternativas a la Matriz Producto..... | 42 |
| 2.2.3 | Diseños no aleatorizados..... | 44 |
| 2.2.4 | Conclusiones sobre la selección de la Matriz de diseño..... | 49 |
| 2.3 | Análisis de datos y detección de efectos significativos..... | 50 |
| 2.3.1 | Selección de condiciones óptimas del modelo | 53 |
| 2.4 | Controversias | 56 |

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 3: CASOS CONTRADICTORIOS..... | 59 |
|---|-----------|

| | | |
|-------|---|----|
| 3 | Casos contradictorios | 61 |
| 3.1 | Caso 1: Diseño fraccionado de Resolución III | 62 |
| 3.1.1 | Análisis con métricas resumen | 63 |
| 3.1.2 | Análisis con métricas no-resumen..... | 67 |
| 3.1.3 | Comparación de los resultados obtenidos con los dos métodos de análisis | 75 |
| 3.2 | Caso 2: Diseño completo..... | 76 |
| 3.2.1 | Análisis con métricas resumen | 76 |
| 3.2.2 | Análisis con métricas no-resumen..... | 80 |
| 3.2.3 | Comparación de los resultados obtenidos con los dos métodos de análisis | 86 |
| 3.3 | Conclusiones | 87 |

| | |
|--|---|
| CAPÍTULO 4: VARIABILIDAD CUANDO Y DEPENDE DE 1 FACTOR RUIDO: | |
| | ESTUDIO DE $V(Y)$ 91 |
| 4 | Variabilidad cuando Y depende de 1 factor ruido: Estudio de $V(Y)$ 93 |
| 4.1 | Estudio de $V(Y)$ para 1 factor ruido y 1 factor de control 95 |
| 4.1.1 | Ejemplos 98 |
| 4.2 | Estudio de $V(Y)$ para 1 factor ruido y 2 factores de control 100 |
| 4.2.1 | Ejemplos 102 |
| 4.3 | Conclusiones 108 |
| CAPÍTULO 5: VARIABILIDAD CUANDO Y DEPENDE DE 1 FACTOR RUIDO: | |
| | COMPARACIÓN ENTRE MÉTRICAS DE VARIABILIDAD 109 |
| 5 | Variabilidad cuando Y depende de 1 factor ruido: Comparación entre métricas de variabilidad 111 |
| 5.1 | Efectos significativos en cada métrica 112 |
| 5.1.1 | Condiciones bajo las cuales $\sigma_z(Y)$ se aproxima por planos 118 |
| 5.2 | Geometría de las superficies asociadas a la variabilidad 120 |
| 5.3 | Conclusiones 128 |
| CAPÍTULO 6: VARIABILIDAD CUANDO Y DEPENDE DE 2 FACTORES RUIDO 131 | |
| 6 | Variabilidad cuando Y depende de 2 factores ruido 133 |
| 6.1 | Expresión para la Varianza a partir del modelo para la respuesta Y 133 |
| 6.2 | Expresión de la superficie <i>Desv. Típica</i> (Y) como un plano 136 |
| 6.3 | Aproximaciones a la Varianza(Y) y Desv. Típica(Y) partiendo de diseños factoriales a 2 niveles 143 |
| 6.4 | Comparación entre las 3 expresiones de la Desv. Típica(Y) 153 |
| 6.5 | Conclusiones 156 |
| CAPÍTULO 7: VARIABILIDAD CUANDO Y DEPENDE DE “r” FACTORES RUIDO. | |
| | GENERALIZACIÓN: 163 |
| 7 | Variabilidad cuando Y depende de “r” factores ruido. Generalización 165 |
| 7.1 | Expresión para la Varianza a partir del modelo para la respuesta Y 165 |
| 7.2 | Expresión de la superficie <i>Desv. Típica</i> (Y) como un plano 169 |
| 7.3 | Aproximaciones a Varianza(Y) y Desv. Típica(Y) a partir de e diseños factoriales a 2 niveles 175 |
| 7.4 | Conclusiones generales 178 |
| CAPÍTULO 8: ESTIMACIÓN INADECUADA DE $V(Y)$ A PARTIR DE MÉTRICAS | |
| | NO-RESUMEN 181 |
| 8 | Estimación inadecuada de $V(Y)$ a partir de métricas no-resumen 183 |
| 8.1 | Presencia de factores ruido desconocidos W's afectando a la respuesta Y 185 |
| 8.1.1 | Sensibilidad de los 2 métodos de estimación ante la presencia de W's 187 |
| 8.1.2 | Relación entre los coeficientes del modelo para Y y las estimaciones de la variabilidad obtenidas por los dos métodos 189 |
| 8.1.3 | Estrategias a adoptar para detectar la presencia de los factores ruido W's cuando se trabaja con métricas no-resumen 191 |
| 8.2 | No selección de efectos asociados a la variabilidad en el modelo para la respuesta Y 194 |
| 8.2.1 | Sensibilidad de los 2 métodos de estimación ante presencia de efectos de pequeña magnitud asociados a factores ruido 196 |
| 8.2.2 | Contribución de los efectos de poca magnitud en el modelo para Y al modelo de la variabilidad 198 |
| 8.2.3 | Estrategias a adoptar para estimar adecuadamente la variabilidad con métricas no-resumen 200 |
| 8.3 | Utilización de otras métricas alternativas para estudiar la dispersión con métricas resumen 202 |

| | | |
|---|---|-----|
| 8.4 | Conclusiones | 204 |
| CAPÍTULO 9: CAUSA DE LAS CONTROVERSIAS ENCONTRADAS EN LOS CASOS DEL CAPÍTULO 3 | | |
| 209 | | |
| 9 | Causa de las controversias encontradas en los casos del capítulo 3 | 211 |
| 9.1 | Caso 1: Diseño fraccionado de Resolución III | 211 |
| 9.2 | Caso 2: Diseño completo | 217 |
| CAPÍTULO 10: SELECCIÓN DE CONDICIONES ROBUSTAS: ERRORES A EVITAR | | |
| 227 | | |
| 10 | Selección de condiciones robustas: Errores a evitar | 229 |
| 10.1 | Modelos para estudiar el efecto de los factores ruido | 229 |
| 10.2 | Selección de condiciones robustas con $r = 1$ y $k = 1$ | 232 |
| 10.3 | Selección de condiciones robustas con $r = 1$ y $k = 2$. Generalización para $r = 1$ | 235 |
| 10.4 | Selección de condiciones robustas con varios factores ruido | 243 |
| 10.5 | Conclusiones | 252 |
| CAPÍTULO 11: CONCLUSIONES | | |
| 255 | | |
| 11 | Conclusiones | 257 |
| 11.1 | Incorrecto tratamiento de la superficie $\sigma_z^2(Y)$ | 258 |
| 11.2 | Errores en la selección del modelo para Y | 259 |
| 11.3 | Errores en la identificación de condiciones robustas | 260 |
| 11.4 | Aproximación a $\sigma^2(Y)$ por métricas resumen o métricas no-resumen | 261 |
| 11.5 | Otras líneas de investigación | 261 |
| CAPÍTULO 12: BIBLIOGRAFÍA: | | |
| 263 | | |
| 12 | Bibliografía | 265 |

Índice figuras

| Número y título de la figura | No. de página |
|--|---------------|
| Figura 1.1 Diseño de un producto. Fases secuenciales | 6 |
| Figura 1.2 Diseño de un producto robusto | 9 |
| Figura 3.1. Gráfico en papel probabilístico normal de los efectos sobre la <i>media</i> | 64 |
| Figura 3.2. Gráfico en PPN de los efectos para S/R , s , $\log(s)$ y s^2 | 66 |
| Figura 3.3. Gráfico en PPN de los efectos sobre la respuesta Y | 68 |
| Figura 3.4. Gráfico de las interacciones CN y EN | 70 |
| Figura 3.5. Interacciones entre el factor ruido M y los factores B, C, D y E | 71 |
| Figura 3.6. Relación entre el factor ruido N y los factores de control C y E | 71 |
| Figura 3.7. Relación entre el factor ruido M y los factores de control B, C, D y E (los valores con un punto grueso son las condiciones en que B está situado a nivel “-“) | 72 |
| Figura 3.8. Efecto del factor ruido M en cada condición de los factores C, D, E y B (los valores con un punto grueso, son las condiciones en que B está situado a nivel “-“) | 72 |
| Figura 3.9. Varianza transmitida a la respuesta por los factores ruido M y N (estimación indirecta) | 74 |
| Figura 3.10. Gráfico en papel probabilístico normal de los efectos sobre la <i>media</i> | 77 |
| Figura 3.11. Interacción entre los factores A y B | 77 |
| Figura 3.12. Gráfico en PPN de los efectos para S/R , s , $\log(s)$ y s^2 | 78 |
| Figura 3.13. Representación de los efectos significativos para S/R y <i>desviación típica</i> | 79 |
| Figura 3.14. Gráfico en PPN de los efectos sobre la respuesta Y | 80 |
| Figura 3.15. Efecto de los factores ruido T y R en la respuesta Y (modelo reducido) | 82 |
| Figura 3.16. Efecto de los factores ruido T y R en la respuesta Y a partir del modelo ampliado | 83 |
| Figura 3.17. Efecto de los factores ruido T y R en cada condición de los factores de control | 84 |
| Figura 3.18. Varianza transmitida a Y por los factores ruido T y R en cada condición de los factores de control | 85 |
| Figura 3.19. Gráfico en PPN de los residuos para los modelos de S/R , s , $\log(s)$ y s^2 | 88 |
| Figura 3.20. Gráfico en PPN de los residuos para los modelos de S/R , s , $\log(s)$ y s^2 | 89 |
| Figura 4.1. Representación teórica de $V_Z(Y)$ (en rojo) y aproximación por polinomios de primer grado (en verde) con $Y = \theta Z + \delta XZ$ | 99 |
| Figura 4.2. Representación de la superficie $V_Z(Y)$ con $Y = 4Z + 1 X_1Z + 1 X_2Z$ | 103 |
| (Q: superficie teórica; L: aproximación por un polinomio sin términos cuadráticos puros) | 103 |
| Figura 4.3. Representación de $V_Z(Y)$ con $Y = 2Z + 1 X_1Z + 1 X_2Z$ | 104 |
| (Q: superficie teórica; L: aproximación por un polinomio sin términos cuadráticos puros) | 104 |
| Figura 4.4. Representación de $V_Z(Y)$ con $Y = 0Z + 1 X_1Z + 1 X_2Z$ | 105 |
| (Q: superficie teórica; L: aproximación por un polinomio sin términos cuadráticos puros) | 105 |
| Figura 4.5. Representación de $V_Z(Y)$ con $Y = 2Z + 5 X_1Z + 1 X_2Z$ | 106 |
| (Q: superficie teórica; L: aproximación por un polinomio sin términos cuadráticos puros) | 106 |
| Figura 4.6. Representación de $V_Z(Y)$ con $Y = 0Z + 5 X_1Z + 1 X_2Z$ | 107 |
| (Q: superficie teórica; L: aproximación por un polinomio sin términos cuadráticos puros) | 107 |
| Figura 5.1 Representación de $\sigma_Z^2(Y)$ y $\sigma_Z(Y)$ a partir de polinomios de segundo orden con (“Q”) y sin (“L”) términos cuadráticos puros. $Y = X_1Z + X_2Z$ | 123 |
| Figura 5.2 Representación de $\sigma_Z^2(Y)$ y $\sigma_Z(Y)$ a partir de polinomios de segundo orden con (“Q”) y sin (“L”) términos cuadráticos puros. $Y = Z + X_1Z + X_2Z$ | 124 |
| Figura 2.2 (Continuación) Representación de $\log(\sigma_Z)$ a partir de polinomios de segundo orden con (“Q”) y sin (“L”) términos cuadráticos puros. $Y = Z + X_1Z + X_2Z$ | 125 |
| Figura 5.3 Representación de $\sigma_Z^2(Y)$ a partir de polinomios de segundo orden con (“Q”) y sin (“L”) términos cuadráticos puros. $Y = 2Z + X_1Z + X_2Z$ | 126 |
| Figura 5.4 Representación de $\sigma_Z^2(Y)$ y $\log(\sigma_Z)$ a partir de polinomios de segundo orden con (“Q”) y sin (“L”) términos cuadráticos puros. $Y = 4Z + X_1Z + X_2Z$ | 127 |
| Figura 6.1 Comparación entre $\sigma_Z^2(Y)$ y $\sigma_Z(Y)$ para dos modelos diferentes de Y | 142 |
| Figura 6.2 Representación gráfica de $\sigma_Z^2(Y)$ y $\sigma_Z(Y)$ | 147 |
| $Y = X_1Z_1 + X_1Z_2 + X_2Z_1 + X_2Z_2$ | 147 |
| Figura 6.3 Representación gráfica de $\sigma_Z^2(Y)$ y $\sigma_Z(Y)$ | 148 |
| $Y = X_1Z_1 + 3 X_1Z_2 + 2 X_2Z_1 + 4 X_2Z_2$ | 148 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.4 Representación gráfica de $\sigma_Z^2(Y)$ y $\sigma_Z(Y)$ | 149 |
| $Y = 6 Z_1 - 3 Z_2 - 2 X_1 Z_1 + X_1 Z_2 + 4 X_2 Z_1 - 2 X_2 Z_2$ | 149 |
| Figura 6.5 Representación gráfica de $\sigma_Z^2(Y)$ y $\sigma_Z(Y)$ | 150 |
| $Y = 4 Z_1 + 4 Z_2 + X_1 Z_1 + 2 X_1 Z_2 + X_2 Z_1 + 2 X_2 Z_2$ | 150 |
| Figura 6.6 Representación gráfica de $\sigma_Z^2(Y)$ y $\sigma_Z(Y)$ | 151 |
| $Y = 3 Z_1 + Z_2 + X_1 Z_1 + 2 X_2 Z_1 + X_2 Z_2$ | 151 |
| Figura 6.7 Representación gráfica de $\sigma_Z^2(Y)$ y $\sigma_Z(Y)$ | 152 |
| $Y = - Z_1 - 2 Z_2 + 2 X_1 Z_1 + 3 X_1 Z_2 + X_2 Z_1 + X_2 Z_2$ | 152 |
| a) $Y = X_1 Z_1 + X_1 Z_2 + X_2 Z_1 + X_2 Z_2$ (ver Figura 6.2)..... | 155 |
| c) $Y = 3 Z_1 + Z_2 + X_1 Z_1 + 2 X_2 Z_1 + X_2 Z_2$. (ver Figura 6.7) | 155 |
| Figura 6.8 Representación gráfica de los contornos comunes a las superficies: $\sqrt{\sigma_Z^2}$ teórica y las aproximaciones por medio de “Q” y “L” | 155 |
| Figura 6.9 Representación gráfica de $\sigma_Z^2(Y)$ con los ejes de simetría | 161 |
| Figura 6.10 Representación gráfica de $\sigma_Z^2(Y)$ con los ejes de simetría | 162 |
| $Y = - Z_1 - 2 Z_2 + 2 X_1 Z_1 + 3 X_1 Z_2 + X_2 Z_1 + X_2 Z_2$ | 162 |
| Figura 9.1. Gráfico en PPN de los efectos sobre $U_i = e_i^2$ para el caso 1 | 215 |
| Figura 9.2. Efectos en el modelo ampliado para Y ordenados por magnitud | 216 |
| Figura 9.3. Gráfico en PPN de los efectos sobre Y | 218 |
| Figura 9.4. Varianza muestral debida a los factores ruido T y R en las condiciones de los factores A, B y C | 220 |
| Figura 9.5. Gráfico de los coeficientes del modelo para $\sigma^2(Y)$ estimado por métricas no resumen a partir del modelo completo para Y | 221 |
| Figura 9.6. Gráfico en PPN de los efectos sobre $U_i = e_i^2$ par ael caso 2 | 225 |
| Figura 10.1 Izqda.: Interacción AT para los distintos modelos de Y . Dcha.: En trazo continuo la aproximación a $\sigma^2(Y)$ y en trazo discontinuo la superficie teórica $\sigma^2(Y)$ | 233 |
| (los ptos. redondo y cuadrado representan a la c. robusta elegida y la condición teórica)..... | 233 |
| Figura 10.2 Estudio de las condiciones robustas por los dos métodos de análisis y condiciones teóricas. Modelo: $Y=AT+BT$ | 237 |
| Figura 10.3 Estudio de las condiciones robustas por los dos métodos de análisis y condiciones teóricas. Modelo: $Y=T+AT+BT$ | 238 |
| Figura 10.4 Estudio de las condiciones robustas por los dos métodos de análisis y condiciones teóricas. Modelo: $Y=2T+AT+3BT$ | 239 |
| Figura 10.5 Estudio de las condiciones robustas por los dos métodos de análisis y condiciones teóricas. Modelo: $Y= 2T + AT+ BT$ | 240 |
| Figura 10.6 Estudio de las condiciones robustas por los dos métodos de análisis y condiciones teóricas. Modelo: $Y = 15 T + 6 AT + BT$ | 241 |
| Figura 10.7 Estudio de las condiciones robustas por los dos métodos de análisis y condiciones teóricas. Modelo: $Y = TA + TB + RA - RB$ | 247 |
| Figura 10.8 Estudio de las condiciones robustas por los dos métodos de análisis y condiciones teóricas. Modelo: $Y = TA + TB + 2R +RA + RB$ | 248 |
| Figura 10.9 Estudio de las condiciones robustas por los dos métodos de análisis y condiciones teóricas. Modelo: $Y = TA + TB + 2R - RA + RB$ | 249 |
| Figura 10.10 Estudio de las condiciones robustas por los dos métodos de análisis y condiciones teóricas. Modelo: $Y = 2T + TA - TB +2R - RA + RB$ | 250 |
| Figura 10.11 Estudio de las condiciones robustas por los dos métodos de análisis y condiciones teóricas. Modelo: $Y = 3T + TA + TB +5R + 2RA + RB$ | 251 |

Índice tablas

| Número y título de la tabla | No. de página |
|--|---------------|
| Tabla 1.1 Etapas en el desarrollo de un producto..... | 7 |
| 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 | 15 |
| Tabla 2.1 Matriz producto. Diseño 2^{3-1} con C=AB para los factores de control y 2^2 para los factores de ruido | 39 |
| Tabla 2.2 Matriz ampliada 2^{5-1} para 3 factores de control y 2 de ruido obtenida a partir de la matriz producto en la Tabla 2.1 | 40 |
| Tabla 2.3 Matriz ampliada 2^{5-1} para 3 factores de control y 2 de ruido. S=ABCR..... | 40 |
| Tabla 2.4 Matriz ampliada 2^{5-1} S=ABCR representada como una matriz producto | 41 |
| Tabla 2.5 Diseño totalmente aleatorizado a partir de la matriz producto en Tabla 2.1 | 46 |
| Tabla 2.6 Diseño <i>split-plot</i> a partir de la matriz en Tabla 2.1. Plot: F. de control | 46 |
| Tabla 2.7 Diseño <i>split-plot</i> a partir de la matriz en Tabla 2.1. Plot: f. ruido | 47 |
| Tabla 2.8 Diseño <i>strip-plot</i> a partir de la matriz en Tabla 2.1..... | 48 |
| Tabla 2.9 Comparación de movimientos en las condiciones de control, M_c , y ruido, M_r , para los distintos diseños así como la eficiencia en la estimación..... | 49 |
| Tabla 2.10 Estimación del grado de significación de los efectos | 51 |
| Tabla 3.1 Generadores y confusiones en la matriz producto $2^{7-4} \times 2^{3-1}$ | 63 |
| Tabla 3.2 Resultados del experimento de Engel (1992). Resumen de la información a lo largo de las condiciones de ruido..... | 64 |
| Tabla 3.3 Estimación de los coeficientes del modelo para la <i>media</i> | 65 |
| Tabla 3.4 Estimación de los modelos para S/R , s , $\log(s)$ y s^2 | 66 |
| Tabla 3.5 Generadores y confusiones en la matriz ampliada 2^{10-5} | 67 |
| Tabla 3.6 Estimación del modelo para la respuesta Y | 69 |
| Tabla 3.7 Resultados del experimento de los neumáticos. Resumen de la información a lo largo de las condiciones de ruido..... | 76 |
| Tabla 3.8 Estimación de los coeficientes del modelo para la <i>media</i> | 78 |
| Tabla 3.9 Estimación de los modelos para S/R , s , $\log(s)$ y s^2 | 79 |
| Tabla 3.10 Estimación del modelo para la respuesta Y | 81 |
| Tabla 5.1 Modelos para el análisis del comportamiento de $\sigma_Z^2(Y)$, $\sigma_Z(Y)$ y $\log(\sigma_Z)$ | 112 |
| Tabla 5.2 Valores de las respuestas para los 5 modelos y medidas de variabilidad..... | 114 |
| Tabla 5.3 Estimación de los modelos para $\sigma_Z^2(Y)$, $\sigma_Z(Y)$ y $\log(\sigma_Z)$ a partir de polinomios de segundo orden..... | 115 |
| Tabla 5.4 Efectos significativos para los modelos asociados a la variabilidad | 116 |
| Tabla 5.5 Valor de la expresión " $\theta + \delta_1 X_1 + \delta_2 X_2$ " para los 4 ejemplos de la Tabla 5.1 | 119 |
| Tabla 6.1 Descripción de los ejemplos estudiados..... | 144 |
| Tabla 6.2 Estimación de $\sigma_Z^2(Y)$ y $\sigma_Z(Y)$ a partir de polinomios de segundo orden "Q" y "L". (Para "Q", entre paréntesis aparecen los coeficientes estandarizados) | 145 |
| Tabla 9.1 Modelo para $U_i = e_i^2$ en el caso 1 | 215 |
| Tabla 9.2 Coeficientes del modelo para Y asociados a la variabilidad..... | 220 |
| Tabla 9.3 Modelo para $U_i = e_i^2$ en el caso 2 | 225 |
| Tabla 10.1 Descripción de los ejemplos estudiados para $k = 1$ y $r = 1$ | 232 |
| Tabla 10.2 Descripción de los ejemplos estudiados para $k = 2$ y $r = 1$ | 236 |
| Tabla 10.3 Descripción de los ejemplos estudiados para $k = 2$ y $r = 2$ | 244 |

Agradecimientos

Agradecimientos

Esta tesis ha supuesto para mí más que la conclusión de una etapa en mi trayectoria investigadora. He conseguido llevar a un entorno práctico dentro de la Estadística Industrial la labor investigadora llevada a cabo durante los últimos años dentro de esta disciplina en un momento muy especial en mi entorno personal. Por la doble satisfacción que estos hechos me producen, estoy muy agradecida a todas las personas que me han apoyado en estos proyectos.

Tuve una gran suerte de conocer a Clemente Campos cuando, él como profesor y yo como alumna, participábamos en el Claustro de la Universidad de Zaragoza. Su dedicación a la Ingeniería despertó en mí un gran interés y él hizo lo imposible para que volviera a la Universidad una vez acabados los estudios. Muchísimas gracias Clemente, y muchas gracias también a J. L. Pelegrín por sus enseñanzas dentro y fuera de la Universidad.

Me siento dichosa de haber conocido a Albert Prat desde el comienzo de mi dedicación a la Estadística Industrial. Le agradezco enormemente el apoyo que siempre he recibido en momentos clave de mi vida profesional y personal. Su manera especial de ver la Estadística y la vida siempre será para mí un modelo a seguir.

A mi Director Xavier Tort-Martorell le debo que esta etapa investigadora haya acabado con éxito, gracias a la elección de un tema de investigación tan práctico, y a su esfuerzo para dirigirme. Espero seguir disfrutando de su profesionalidad y amistad

A todos mis compañeros de la Sección en la ETSEIB les agradezco que me haya sentido tan cómoda entre ellos.

No puedo olvidarme de mis colegas en la empresa LUCAS Diesel. Menciono a Eduard Aymami y a Gaspar Pujolasos en representación de todos y todas las personas con las que conviví durante más de 5 años trabajando en equipos. Esta experiencia siempre la tendré en cuenta tanto a la hora de investigar sobre aplicaciones prácticas de la Estadística en un entorno industrial, como a la hora de tratar con personas de distintos niveles dentro de este entorno.

Por último, agradezco el apoyo de mi familia. A mis padres por apoyarme a ciegas llevados por su fe en mis proyectos. A Jesús que me haya acompañado tantos años en tareas tan poco gratas para él.

A todos, muchas gracias.

Resumen

Resumen

El problema de encontrar condiciones robustas frente al efecto de factores no controlables es un tema de gran interés práctico, tanto cuando se trata de productos, ya que es una característica demandada por el mercado, como cuando se trata de procesos, ya que facilita enormemente su control.

Existen básicamente dos métodos para estudiar el problema:

El método propuesto por G. Taguchi a comienzos de los 80's en el que los diseños son a base de matrices producto y las condiciones robustas se hallan analizando una métrica directamente relacionada con la variabilidad, por ejemplo la varianza.

Un método alternativo es el que parte de una matriz, en general con menos experimentos, que permite estimar un modelo para la respuesta Y en función de los factores de control y ruido, y estudia las condiciones robustas a partir de las interacciones entre ambos.

Aunque en un principio cabría esperar resultados muy similares analizando un mismo problema por las dos vías, es conocido desde hace algún tiempo que las conclusiones pueden llegar a ser muy dispares. En el capítulo 3 presentamos dos ejemplos que así lo confirman. El objetivo de esta tesis es hallar las causas de estas diferencias.

En los capítulos 4, 5, 6 y 7 presentamos la naturaleza de las superficies asociadas a la variabilidad provocada por factores ruido. Hemos demostrado que independientemente de que la métrica utilizada sea $\chi^2(\sigma(Y))$ o $lo(\sigma(Y))$ las superficies difícilmente podrán ser aproximadas por polinomios de primer orden en los factores de control. Se llega por lo tanto a la conclusión de que las estrategias habitualmente utilizadas en la práctica no pueden conducir a un buen conocimiento de estas superficies. Por ejemplo, no es adecuado utilizar, en los factores de control, ni diseños 2^{k-p} sin puntos centrales, ni diseños de Resolución III.

En el capítulo 8 se estudian los errores en la estimación de $\sigma^2(Y)$, cuando la aproximación se lleva a cabo a partir del modelo de Y , que se producen en dos situaciones. La primera está relacionada con la existencia de factores ruido no incluidos en la experimentación, y la segunda tiene que ver con una deficiente identificación de la relación de Y con los factores ruido incluidos en la experimentación.

Por último, en el capítulo 10, se ha investigado sobre los errores más comunes a la hora de seleccionar las condiciones robustas a partir de gráficos.

Una vez halladas y analizadas las causas de las discrepancias entre los dos métodos de análisis y tipificados los errores más frecuentes producidos en cada uno de ellos, se dan recomendaciones sobre el camino a seguir para evitarlos.

