

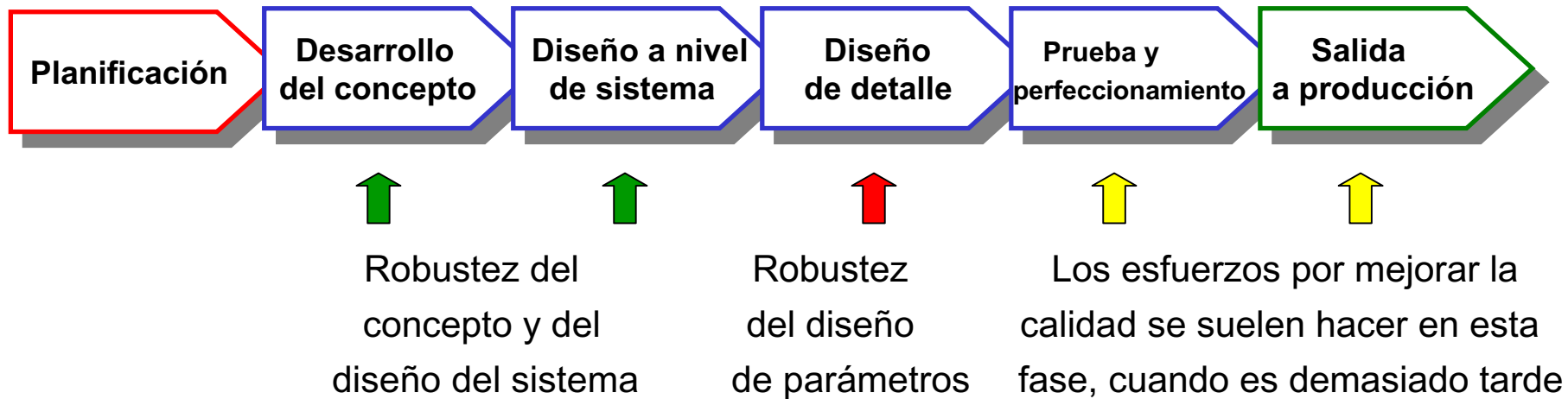
Diseño robusto:

Experimentación para obtener mejores productos

Prof. Steven D. Eppinger

MIT Sloan School of Management

El diseño robusto y la calidad en el proceso de desarrollo de producto



Objetivos de los experimentos diseñados

- Entender las relaciones entre los parámetros de diseño y el comportamiento del producto
- Entender los efectos de los factores de distorsión
- Reducir las variaciones del producto o del proceso

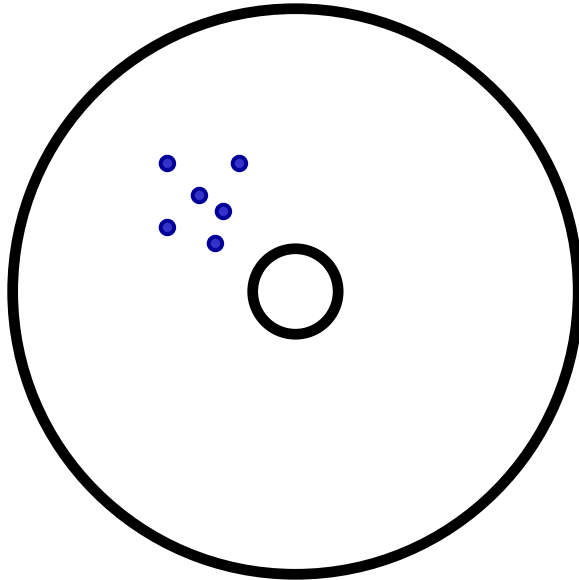
Diseños robustos

Un **producto o un proceso robusto** es aquél que funciona correctamente, aunque existan factores de distorsión.

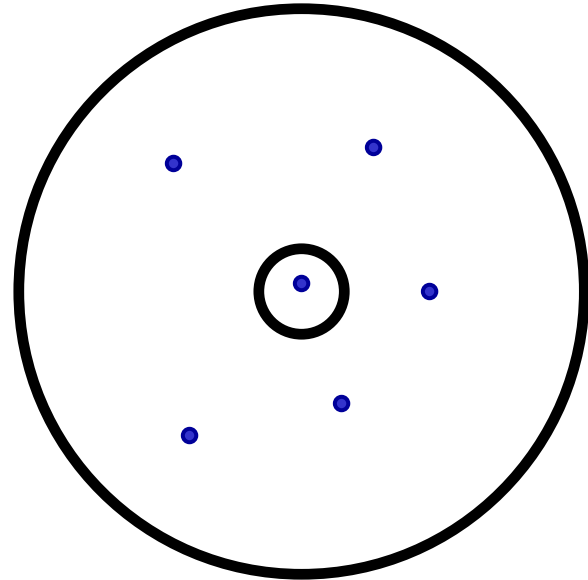
Algunos factores de distorsión son:

- variaciones en los parámetros
- cambios ambientales
- condiciones de funcionamiento
- variaciones en la fabricación

¿Quién es mejor tirador?

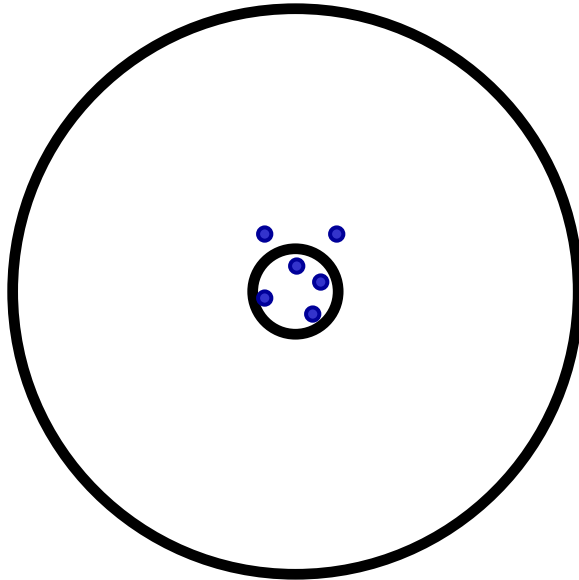


Sam



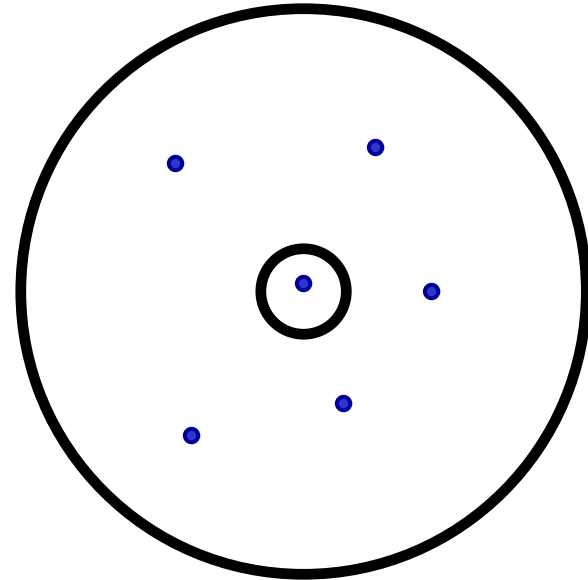
John

¿Quién es mejor tirador?



Sam

A Sam le basta
con ajustar la mira.

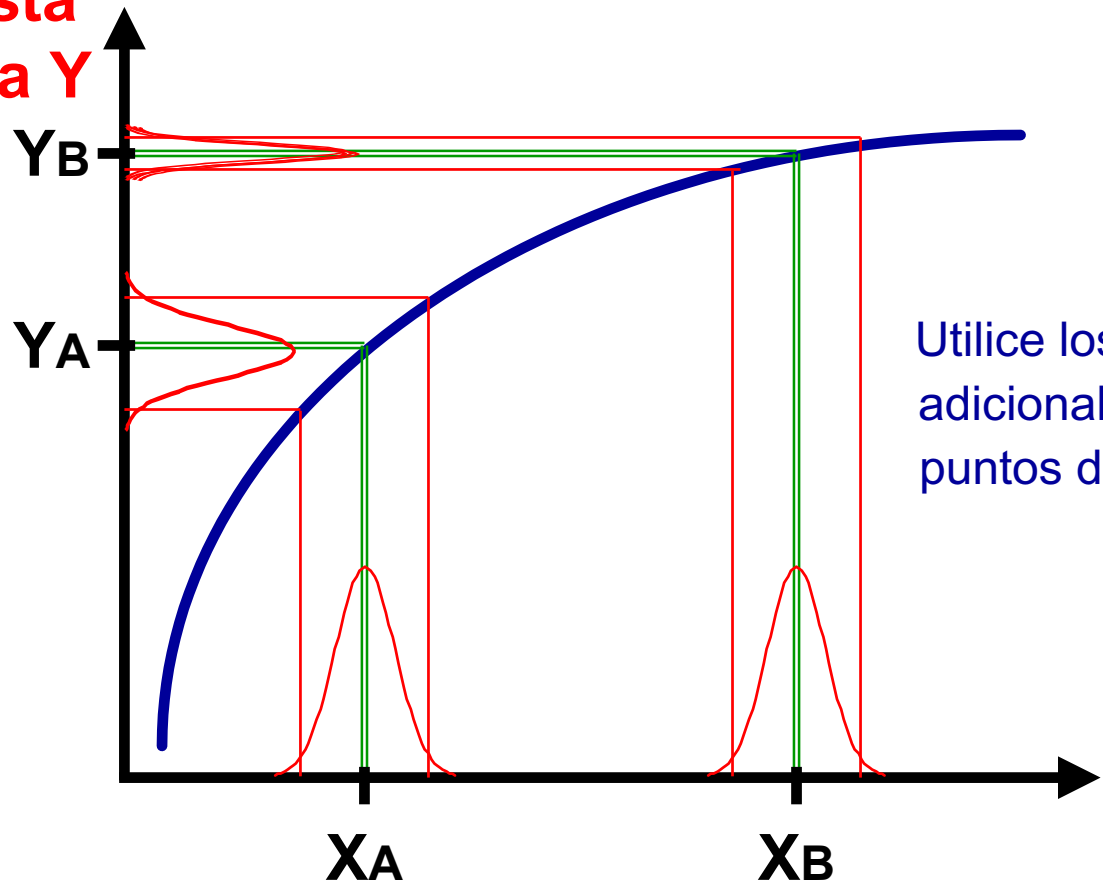


John

John necesita
mucho más práctica.

Cómo sacar partido a la no-linearidad

Respuesta de salida Y



Utilice los “grados de libertad” adicionales para hallar puntos de referencia robustos

Parámetro de entrada X

Procedimiento de diseño de parámetros

Paso 1: diagrama P

- Paso 1: Selección de los controles,
la respuesta y los factores de distorsión
adecuados para la exploración experimental.
- parámetros de datos de entrada controlables.
 - respuesta al rendimiento cuantificable .
 - factores de distorsión no controlables.

El diagrama "P"

Factores de distorsión
no controlables



Respuesta
al rendimiento
cuantificable



Parámetros de datos
de entrada controlables

Ejemplo: mezcla para bizcocho

- **Parámetros de datos de entrada controlables**
 - Ingredientes de la receta
(cantidad de huevos, harina y chocolate)
 - Instrucciones (mezclar, poner al horno, enfriar)
 - Material (boles, sartenes, horno)
- **Factores de distorsión no controlables**
 - Calidad de los ingredientes (tamaño de los huevos, tipo de aceite)
 - Seguir las instrucciones (medidas, tiempo de mezcla)
 - Variaciones del material (forma de la sartén, temperatura del horno)
- **Respuesta al rendimiento cuantificable**
 - Prueba del producto por los clientes
 - Dulzura, jugosidad, consistencia

Procedimiento de diseño de parámetros

Paso 2: función objetiva

Paso 2: definición de la función objetiva (de la respuesta) que se va a optimizar.

- maximizar el rendimiento deseado
- minimizar las variaciones
- pérdida cuadrática
- ratio señal / distorsión

Tipos de funciones objetivas

Cuanto más grande mejor

p. ej. rendimiento

$$f(y) = y^2$$

Cuanto más pequeña mejor

p. ej. varianza

$$f(y) = 1/y^2$$

Nominal / Mejor

p. ej. objetivo

$$f(y) = 1/(y-t)^2$$

Señal / Distorsión

p. ej. intercambio

$$f(y) = 10\log[\mu^2/\sigma^2]$$

Procedimiento de diseño de parámetros

Paso 3: plan del experimento

Paso 3: planificar pruebas experimentales para obtener los efectos deseados.

- Emplear diseños de factoriales totales o fraccionadas para identificar las interacciones.
- Emplear una línea ortogonal para identificar los efectos principales con un mínimo de pruebas.
- Emplear líneas internas y externas para observar los efectos de los factores de distorsión.

Diseño del experimento: factorial total

- Partimos de un n° de k factores, con n niveles cada uno.
- Se prueban todas las combinaciones de los factores.
- El número de experimentos es igual a n^k .
- Aunque, por lo general, el número de experimentos es muy alto, podemos desvelar todas las interacciones.

Expt #	Param A	Param B
1	A1	B1
2	A1	B2
3	A1	B3
4	A2	B1
5	A2	B2
6	A2	B3
7	A3	B1
8	A3	B2
9	A3	B3

2 factores, 3 niveles cada uno

$$n^k = 3^2 = 9 \text{ pruebas}$$

4 factores, 3 niveles cada uno

$$n^k = 3^4 = 81 \text{ pruebas}$$

Diseño del experimento: un factor cada vez

- Tenemos un nº k de factores, con n niveles cada uno.
- Se prueban todos los niveles de cada factor dejando los demás en el nivel nominal.
- El número de experimentos será $nk+1$.
- PERO este diseño del experimento no es equilibrado.

Expt #	Param A	Param B	Param C	Param D
1	A2	B2	C2	D2
2	A1	B2	C2	D2
3	A3	B2	C2	D2
4	A2	B1	C2	D2
5	A2	B3	C2	D2
6	A2	B2	C1	D2
7	A2	B2	C3	D2
8	A2	B2	C2	D1
9	A2	B2	C2	D3

4 factores, 2 niveles cada uno:

$$nk+1 =$$

$$2 \times 4 + 1 = 9 \text{ pruebas}$$

Diseño del experimento: línea ortogonal

- Tenemos un n^o k de factores, con n niveles cada uno .
- Se prueban todos los niveles de cada factor equilibradamente.
- El número de experimentos será una secuencia de $1+k(n-1)$.
- Este sería el diseño de menor equilibrio del experimento.
- PERO los efectos e interacciones principales se confunden entre sí.

Expt #	Param A	Param B	Param C	Param D
1	A1	B1	C1	D1
2	A1	B2	C2	D2
3	A1	B3	C3	D3
4	A2	B1	C2	D3
5	A2	B2	C3	D1
6	A2	B3	C1	D2
7	A3	B1	C3	D2
8	A3	B2	C1	D3
9	A3	B3	C2	D1

4 factores, 3 niveles cada uno:

$$1+k(n-1) =$$

$$1+4(3-1) = 9 \text{ pruebas}$$

Utilización de líneas internas y externas

- Se provocan los mismos niveles de distorsión para cada combinación de controles de modo equilibrado.

3 factores, 2 niveles cada uno:
línea interior L9 para controles

3 factores, 2 niveles cada uno:
línea exterior L4 para distorsión

A1	B1	C1	D1
A1	B2	C2	D2
A1	B3	C3	D3
A2	B1	C2	D3
A2	B2	C3	D1
A2	B3	C1	D2
A3	B1	C3	D2
A3	B2	C1	D3
A3	B3	C2	D1

E1	E1	E2	E2
F1	F2	F1	F2
G2	G1	G2	G1

interior x exterior =
L9 x L4 =
36 pruebas

Procedimiento de diseño de parámetros

Paso 4: prueba del experimento

Paso 4: realización del experimento.

- Variación de los parámetros de datos de entrada y de distorsión
- Registro de la respuesta de datos de salida
- Cálculo de la función objetiva

Experimento del avión de papel

Exp.	Peso	Alerón	Morro	Ala	Pruebas	Media	Des.Est.	Señal/Dist.
1	A1	B1	C1	D1				
2	A1	B2	C2	D2				
3	A1	B3	C3	D3				
4	A2	B1	C2	D3				
5	A2	B2	C3	D1				
6	A2	B3	C1	D2				
7	A3	B1	C3	D2				
8	A3	B2	C1	D3				
9	A3	B3	C2	D1				

Procedimiento de diseño de parámetros

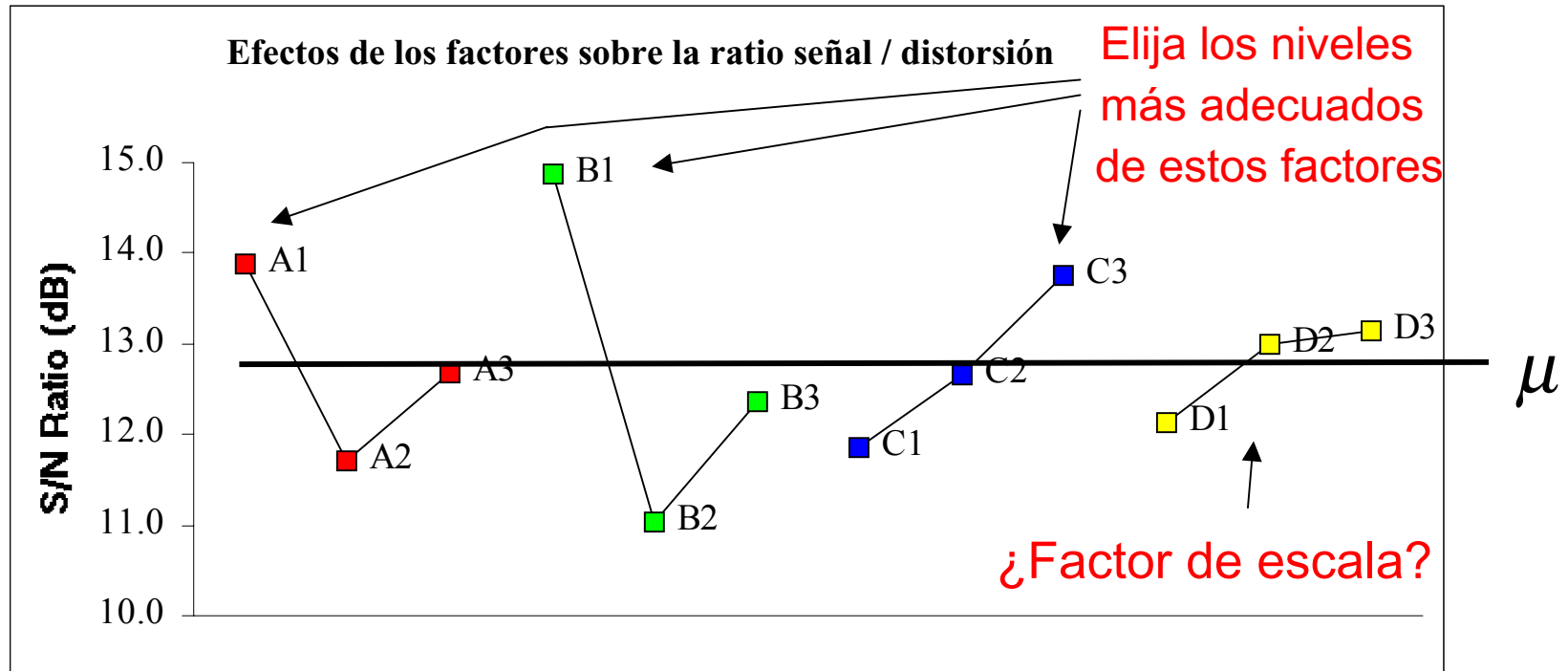
Paso 5: realización del análisis

Paso 5: análisis de las medias.

- Cálculo del valor medio de la función objetiva correspondiente a cada definición de parámetros.
- Identificación de los parámetros que reducen los efectos de la distorsión y de los que se pueden emplear para graduar la respuesta (optimización de dos pasos).

Análisis de las medias (ANOM)

- Determinación del efecto medio del nivel de cada factor.



Pronóstico de la respuesta:

$$E[\eta(A_i, B_j, C_k, D_l)] = \mu + a_i + b_j + c_k + d_l$$

Procedimiento de diseño de parámetros

Paso 6: selección de los puntos de referencia

Paso 6: selección de los puntos de referencia de los parámetros.

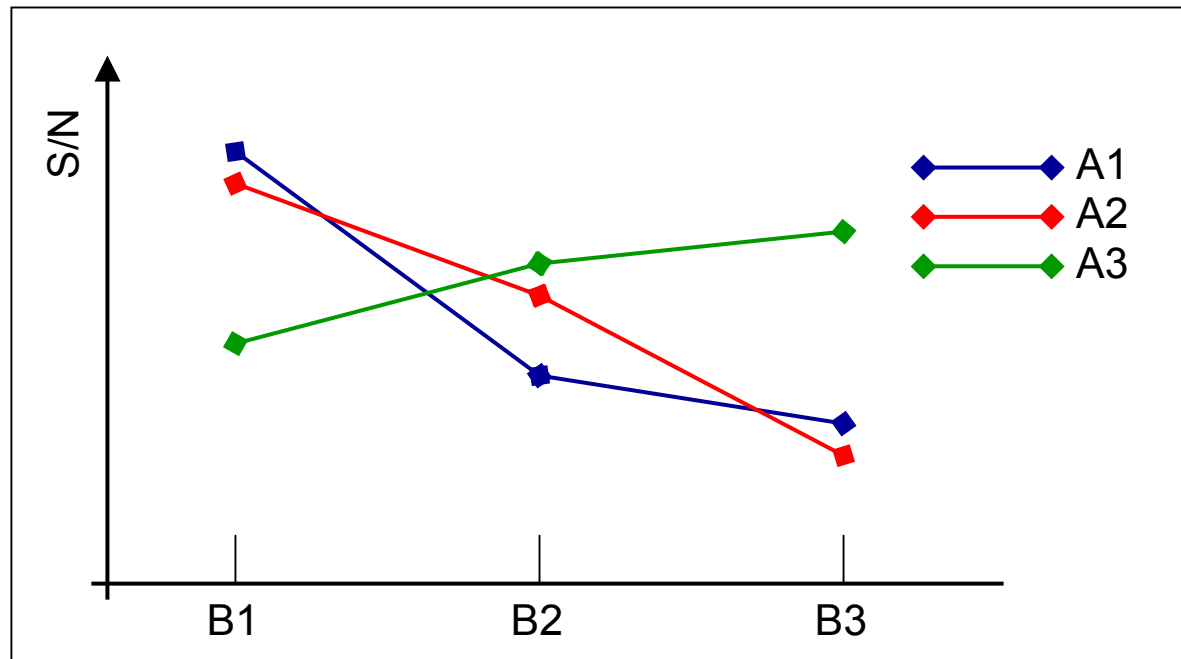
- Seleccione los puntos de referencia de los parámetros para maximizar o minimizar la función objetiva.
- Tenga mucho cuidado al introducir las variaciones. (Aplique el análisis de medias a la varianza para captar la variación de forma explícita).

Usos avanzados:

- Experimentos de comprobación.
- Fijación de parámetros de escala para ajustar la respuesta.
- Aplicación de iteraciones para cálculo del punto óptimo.
- Uso de fracciones más altas para hallar los efectos de las iteraciones.
- Prueba de factores adicionales de control y distorsión.

Confusión entre interacciones

- Normalmente, la respuesta viene marcada por los efectos principales. PERO en ocasiones las interacciones tienen importancia, por lo general cuando la prueba de comprobación falla.
- Para analizar las interacciones conviene que el diseño del experimento incluya factoriales fraccionadas.



Otro enfoque del diseño del experimento: factor adaptativo individualizado

- Partimos de un n^0 k de factores, con n niveles cada uno.
- Inicio en niveles nominales.
- Se prueba cada nivel de cada uno de los factores de manera individual, manteniendo los anteriores en el mejor nivel existente.
- El número de experimentos es $nk+1$.
- Al tratarse de un diseño de experimento no equilibrado es conveniente, por lo general, detenerlo en las primeras fases.
- Es útil establecer una secuencia encabezada por los efectos más fuertes.
- Normalmente funciona bien cuando existen interacciones.

Exp	Param A	Param B	Param C	Param D	Respuesta
1	A2	B2	C2	D2	5,95
2	A1	B2	C2	D2	5,63
3	A3	B2	C2	D2	6,22
4	A3	B1	C2	D2	6,70
5	A3	B3	C2	D2	6,58
6	A3	B1	C1	D2	4,85
7	A3	B1	C3	D2	5,69
8	A3	B1	C2	D1	6,60
9	A3	B1	C2	D3	6,98

4 factores, 2 niveles cada uno:

$$nk+1 =$$

$$2 \times 4 + 1 = 9 \text{ pruebas}$$

Ref: próximo documento
por Dan Frey

Conceptos clave del diseño robusto

- Las variaciones afectan negativamente a la calidad
- Optimización en dos pasos
- Experimentos con matrices (líneas ortogonales)
- Inducción de desviaciones (línea exterior o repetición)
- Análisis de datos y pronósticos
- Interacciones y comprobación

Referencias

- Taguchi, Genichi y Clausing, Don
“Robust Quality”
Harvard Business Review, enero-febrero 1990.
- Byrne, Diane M. y Taguchi, Shin
“The Taguchi Approach to Parameter Design”
Quality Progress, diciembre 1987.
- Phadke, Madhav S.
Quality Engineering Using Robust Design
Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1989.
- Ross, Phillip J.
Taguchi Techniques for Quality Engineering
McGraw-Hill, New York, 1988.