

Diseño robusto

```
graph LR; A[Diseño robusto] --- B[Robustez]; A --- C[Factores de control, de ruido y señal]; A --- D[Arreglos ortogonales];
```

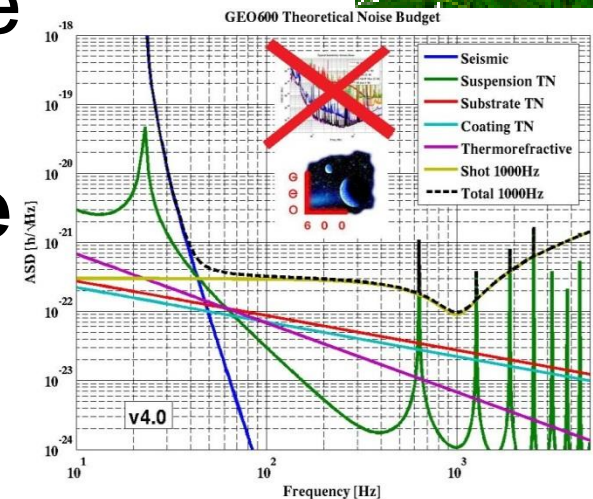
Robustez

**Factores de
control, de
ruido y señal**

**Arreglos
ortogonales**

Diseño Robusto

- ★ El objetivo del diseño robusto de parámetros es lograr productos y procesos robustos frente a las **causas de la variabilidad (ruidos)**.
- ★ Los “Efectos Ruidos” hacen que las características funcionales de los productos se **desvíen de sus valores óptimos** provocando costos de calidad.





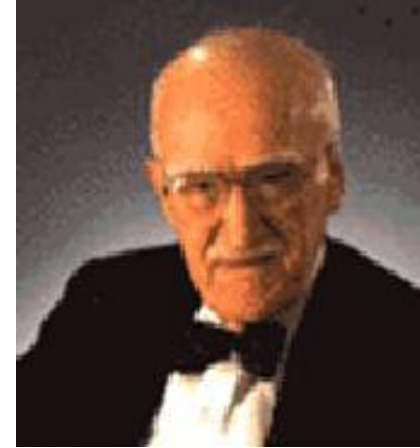
PHILIP CROSBY

14 pasos para administrar la calidad
CERO DEFECTOS



KAORU ISHIKAWA

DIAGRAMA DE CAUSA Y EFECTO
SIETE HERRAMIENTAS ESTADISTICAS BASICAS DEL CTC



JOSEPH M. JURAN
COSTOS DE CALIDAD



EDWARD DEMING

Padre de la TERCERA REVOLUCION INDUSTRIAL
O LA REVOLUCION DE LA CALIDAD

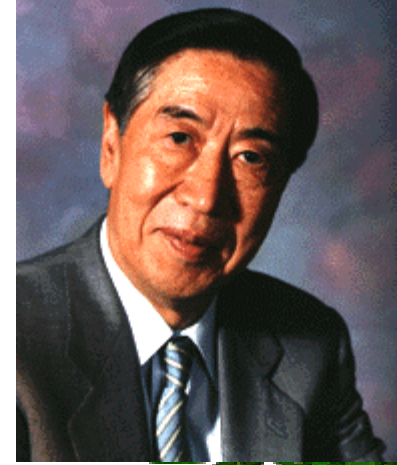


GENICHI TAGUCHI

CAPACIDAD DEL PROCESO y su metodología de
DISEÑO DE EXPERIMENTOS



- G. T. es el creador del "diseño robusto", el cual basa su estrategia para lograr la satisfacción del cliente, en exceder sus expectativas de calidad y de la función de perdida.



- Diseño Robusto.

- Implica **diseñar un producto que sobrepase las expectativas del cliente** en sus características mas importantes y ahorrar dinero en las que al cliente no le interesan.
- Implica **diseñar un proceso de producción capaz de fabricar el producto en todos sus rangos de variación normal**, dentro de las especificaciones del proceso.



- Es mas económico un diseño robusto del producto en las características importantes para el cliente, **que pagar los costos del control de procesos y las reclamaciones por fallas.**
- En el diseño robusto de un producto se minimiza su posibilidad de falla, buscando que **tenga mínima variación en las características de calidad** importantes para el cliente y en consecuencia **se minimiza el costo de calidad.**

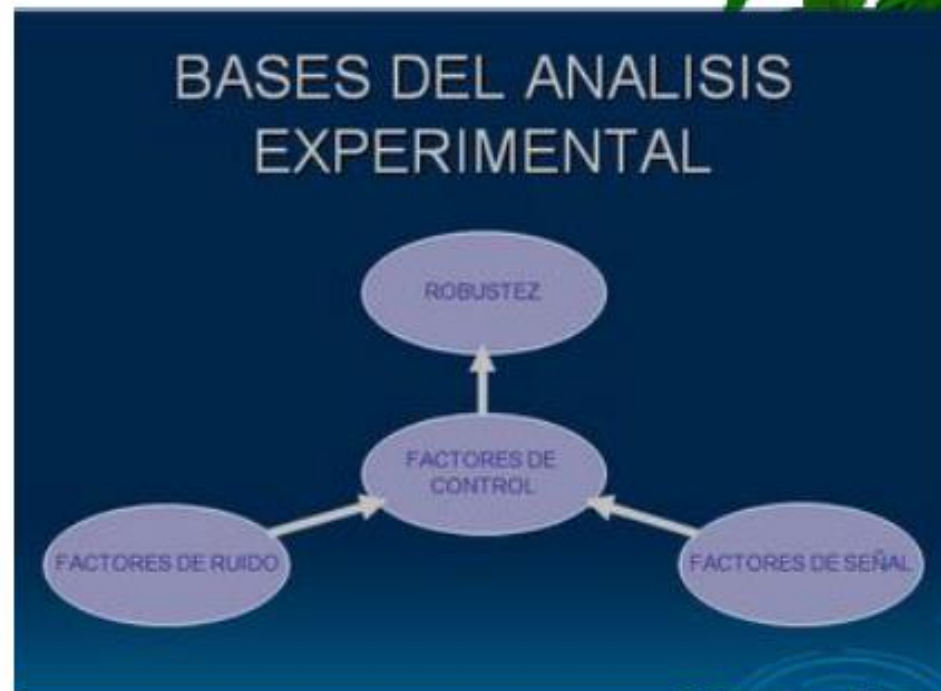


DISEÑO ROBUSTO

- Es la **determinación de los niveles de los parámetros o factores de proceso**, de tal forma que cada característica del producto se desempeñe con **variación mínima alrededor de su valor objetivo**.

CALIDAD según TAGUCHI

- Es la **pérdida** que un producto causa a la sociedad mientras se utiliza para los fines que fue hecho.



METODOLOGÍA TAGUCHI



| | TRADICIONAL | TAGUCHI |
|------------------------------|--|--|
| Filosofía | ➤ Enfoque en técnicas estadísticas, modelos matemáticos. | ➤ Diseño de parámetros, de tolerancias y del sistema como una meta. |
| Objetivo | ➤ Detectar las causas para poder cambiar las especificaciones. | ➤ Buscar la robustez con una reducción en el costo. |
| Etapas de manufactura | ➤ Posterior a la producción. | ➤ Para eliminar efectos de ruido y reducir la variación. |
| Método | ➤ Diseño de tolerancias, solución del problema, detección de causas, análisis de fallas. | ➤ Optimización del diseño de parámetros para evitar futuros problemas. |
| Diseño | ➤ Técnica multiestadísticas. | ➤ Arreglos ortogonales. ➤ Gráficas lineales. ➤ Diseño de arreglos internos y externos. |

METODOLOGÍA TAGUCHI



| | TRADICIONAL | TAGUCHI |
|----------------------|---|---|
| Interacciones | ➤ Trata multiestadísticas. | ➤ Minimiza las interacciones entre los factores de control. (Prefiere los efectos principales). |
| Diferencias técnicas | ➤ Énfasis en la prueba F. ➤ Distribución de variables. | ➤ Diseño de parámetros para ruidos (S/R). Uso de una función de pérdida en el diseño de tolerancias. Prefiere efectos principales. ➤ Énfasis en la selección de características con buena actividad. |

METODOLOGÍA TAGUCHI

FILOSOFÍA

1. Una disminución importante de la calidad de un producto es la pérdida total generada a la sociedad.
2. En una economía competitiva, el mejoramiento continuo de la calidad y la reducción de costos son necesarios para la supervivencia.
3. Un programa de mejoramiento continuo de calidad incluye la reducción incesante de las variaciones de las características del producto con respecto al objetivo.
4. La pérdida del consumidor, debida a las variaciones del comportamiento de un producto es, con frecuencia, aproximadamente proporcional al cuadrado de la desviación de la característica de su objetivo.



METODOLOGÍA TAGUCHI

FILOSOFÍA

5. La calidad y el costo final de un producto manufacturado son determinados en gran medida, por el diseño de ingeniería del producto y su proceso de manufactura.
6. La variación en el comportamiento de un producto o proceso se puede reducir aprovechando los efectos no lineales de los parámetros de las características.
7. La planeación de experimentos estadísticos se emplea para identificar los valores óptimos de parámetros en productos y procesos que permiten reducir la variabilidad.

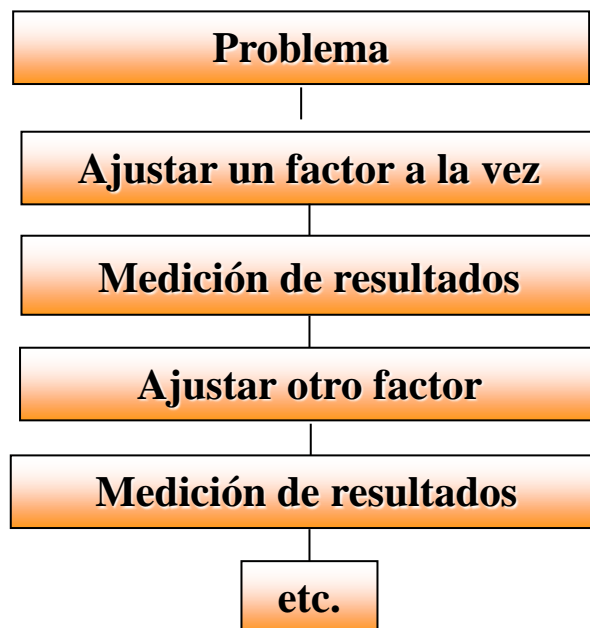


METODOLOGÍA TAGUCHI



Método tradicional para la solución de problemas “Un factor a la vez”

Meta: Ajustar el Sistema para que los resultados queden dentro de los límites de especificación

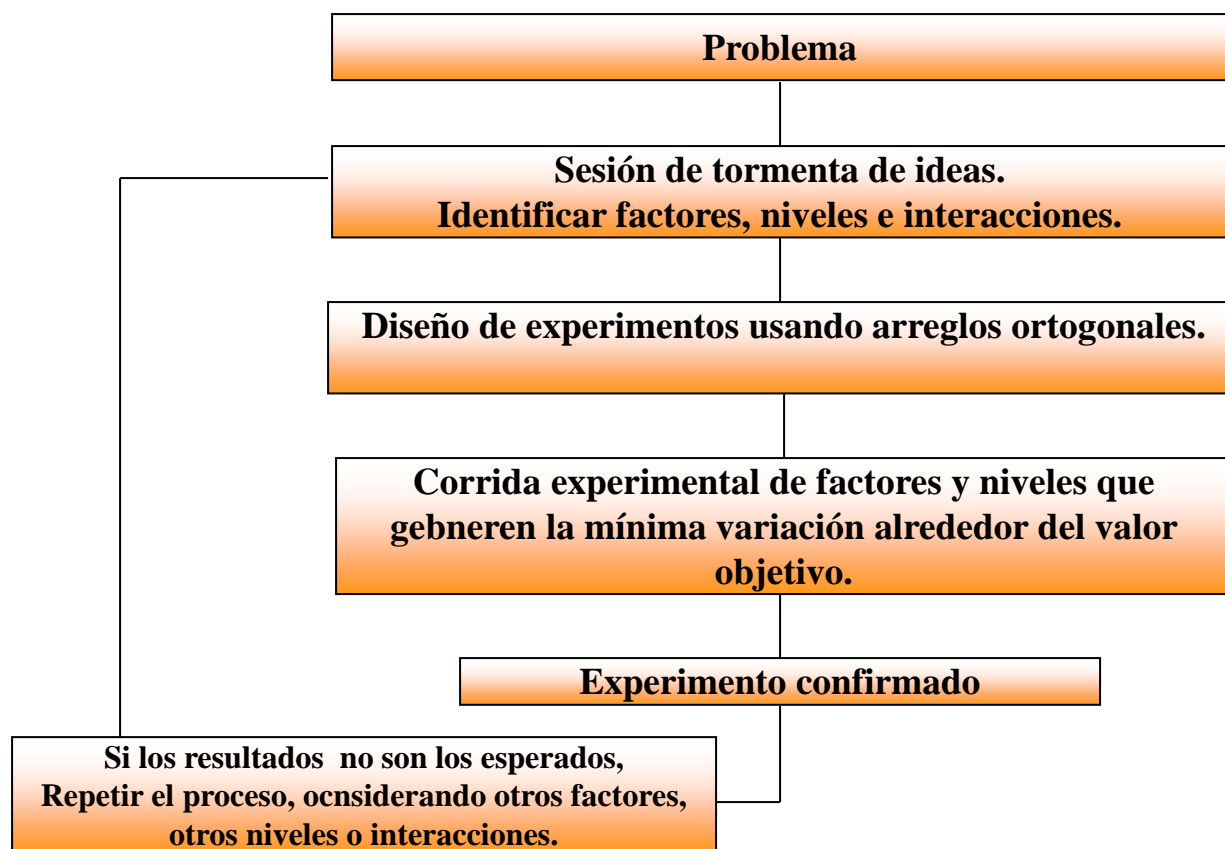


METODOLOGÍA TAGUCHI



Diseño de Parámetros para la solución de problemas.

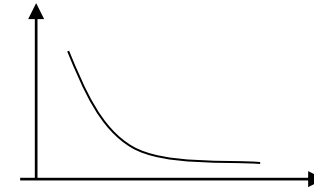
Meta: Ajustar el proceso o producto para que posea una mínima variación alrededor del valor objetivo.



“METODOS TAGUCHI”

- A. FUNCIÓN PERDIDA.** Lograr un efectivo método de representar la pérdida debido a la desviación de la característica de calidad.

Función pérdida: MAYOR ES MEJOR.



● **Medidas de la relación SN:**

- ☒ *Las expresiones de la relación SN se deducen a partir de la función cuadrática de pérdida.*
- ☒ *3 de ellas se consideran estándar y ampliamente aplicables.*
- ☒ *Situaciones:*

- **1.- Cuando el valor nominal es lo mejor:**

$$SN_1 = 10 \cdot \log \left(\frac{\bar{y}}{S^2} \right)$$

- **2.- Cuando lo mejor es una respuesta grande**

$$SN_2 = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

n es el número de experimentos de los factores de ruido

- **3.- Cuando lo mejor es una respuesta pequeña**

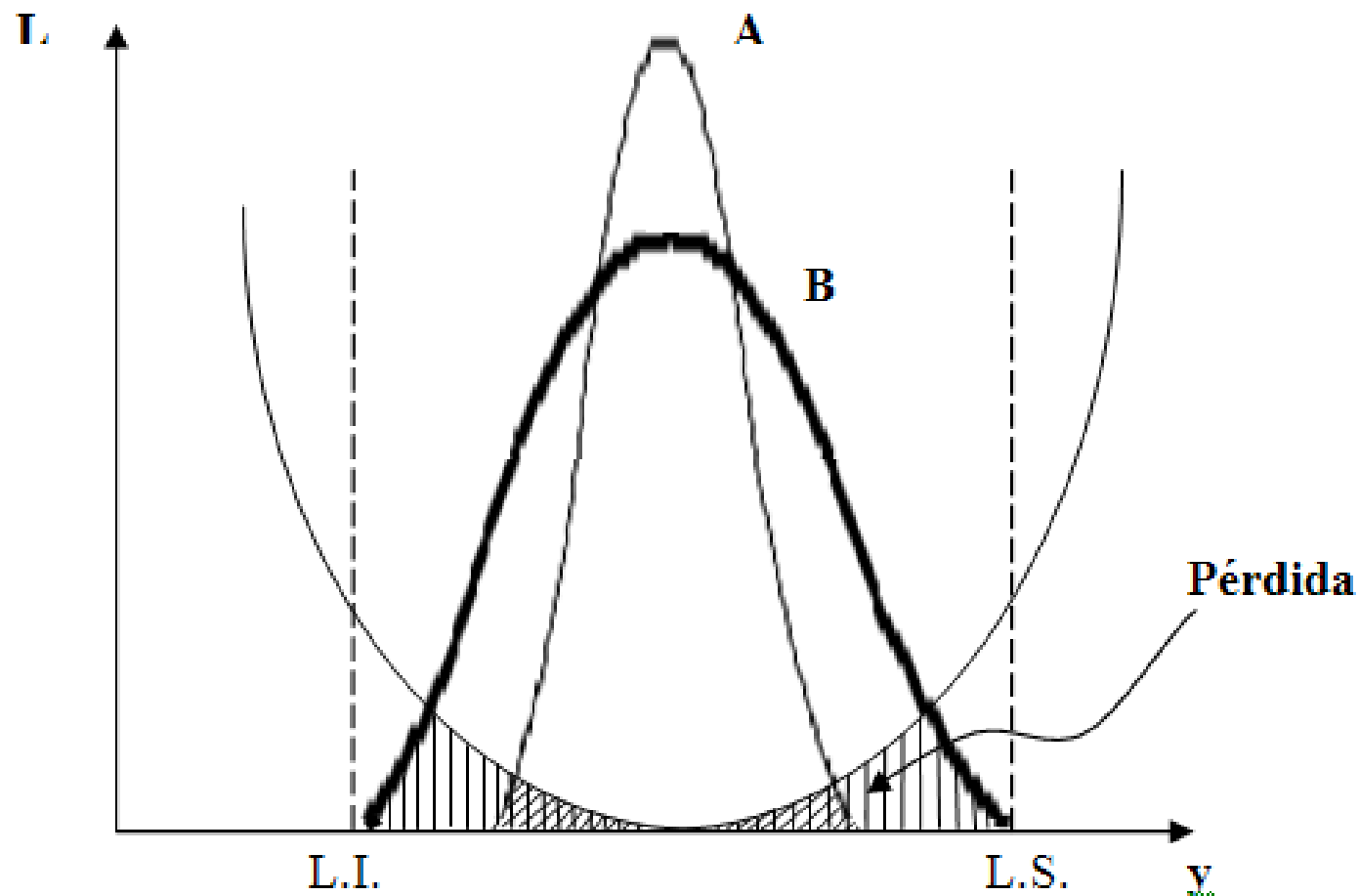
$$SN_3 = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

n es el número de experimentos de los factores de ruido

QUALITY LOSS FUNCTION



FIGURA 15: INTERPRETACIÓN DE LA PÉRDIDA



A: Menor pérdida.

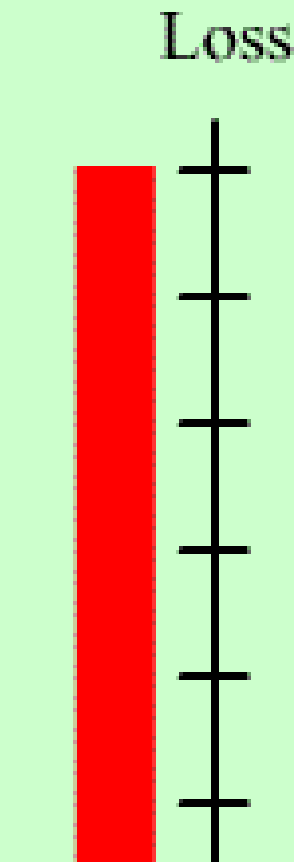
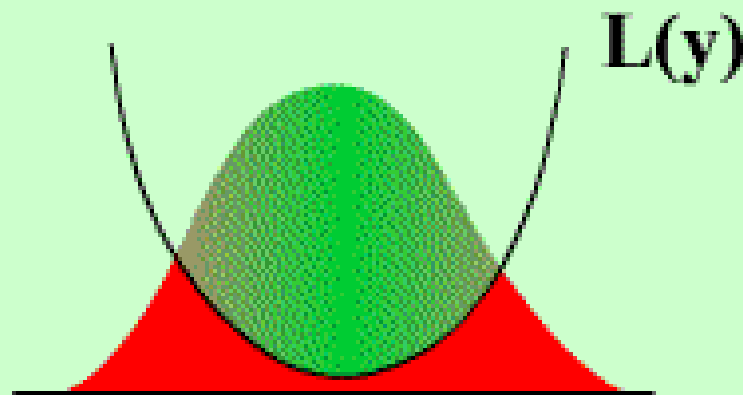
B: Mayor pérdida.

Fuente: Montgomery (2002).

TAGUCHI LOSS FUNCTION

$$L(y) = k(y-m)^2$$



The loss due to performance variation is proportional to the square of the deviation of the performance characteristic from its nominal value.



“METODOS TAGUCHI”

B. ARREGLOS ORTOGONALES.

- Es una herramienta ingenieril que simplifica y en algunos casos elimina gran parte de los esfuerzos de diseño estadístico.
- **Es una forma de examinar simultáneamente muchos factores a bajo costo.**
- Los arreglos ortogonales son herramientas que permiten al ingeniero evaluar **qué tan robustos son los diseños** del proceso y del producto con respecto a los factores de ruido.
- **Los Ings NO necesitan convertirse en especialistas en estadística para aplicar los diseños de experimentos.**



| n | A | B | C | D | E | F | G | H |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 7 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 |
| 8 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| 9 | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| 12 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| 13 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 14 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| 16 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 17 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 18 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 |



| Arreglo L_4 (fracción 2^{3-1}) | | | |
|-------------------------------------|-----------------|---|---|
| Núm. de corrida | Núm. de columna | | |
| | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 2 |
| 3 | 2 | 1 | 2 |
| 4 | 2 | 2 | 1 |
| 2 factores: columnas 1 y 2. | | | |
| 3 factores: las tres columnas. | | | |

$2^3 = 8$

| Arreglo L_9 (3^{4-2}) | | | | |
|----------------------------------|-----------------|---|---|---|
| Núm. de corrida | Núm. de columna | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 |
| 2 factores: columnas 1, 2. | | | | |
| 3 factores: columnas 1, 2, 3. | | | | |
| 4 factores: columnas 1, 2, 3, 4. | | | | |

$3^4 = 81$

| Arreglo L_8 (fracción 2^{7-4}) | | | | | | | |
|--|-----------------|---|---|---|---|---|---|
| Núm. de corrida | Núm. de columna | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| 2 factores: columnas 1, 2. | | | | | | | |
| 3 factores: columnas 1, 2, 4. | | | | | | | |
| 4 factores: columnas 1, 2, 4, 7. | | | | | | | |
| 5 factores: columnas 1, 2, 4, 7, 6. | | | | | | | |
| 6 factores: columnas 1, 2, 4, 7, 6, 5. | | | | | | | |
| 7 factores: las siete columnas. | | | | | | | |

$2^7 = 128$



Arreglo L_{12} (Plackett-Burman para $k = 11$)

| Núm. de corrida | Núm. de columna | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 6 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 7 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 8 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 9 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 10 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| 11 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 12 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 |

Se asignan los k factores a las primeras k columnas ($4 < k < 11$).

$$2^4 = 16$$

$$2^{11} = 2048$$

Arreglo L_{18} ($2 \times 3^{7-5}$)

| Núm. de corrida | Núm. de columna | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 7 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 |
| 8 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| 9 | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| 12 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| 13 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 14 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| 16 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 17 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 18 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 |

1 factor con dos niveles se asignan a la columna 1.
Los factores con tres niveles se asignan a las columnas restantes: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.

$$2 \times 3^7 = 4374$$

Figura 9.6 Arreglos ortogonales más frecuentes.



CUADRO 7: FACTORES Y SUS NIVELES CONSIDERADOS EN UN EXPERIMENTO DE ENSAMBLE DE LA VÁLVULA DE VACÍO.



| FACTORES | NIVELES | |
|---|-------------------|-------------------|
| A. MATERIAL DE LA CARCASA | A1 = M-270 | A2 = M-90 |
| B. TEMPERATURA DE LA PISTOLA DE CALEFACCION | B1 = 410 °F | B2 = AMBIENTE |
| C. TIEMPO DE CORRIDA DEL FRENO | C1 = NORMAL | C2 = MÁS RÁPIDO |
| D. DISEÑO DEL ENCAJE | D1 = EXISTENTE | D2 = NUEVO. |
| E. TIEMPO DE PERMANENCIA EN LA MESA | E1 = 2,7 segundos | E2 = 2,2 segundos |
| F. PRESION DEL FRENO | F1 = 60 libras | F2 = 80 libras |
| G. SOLDADURA ESPECIAL | G1 = CON | G2 = SIN |



Fuente: Montgomery (2002).



CUADRO 8: ARREGLO ORTOGONAL $L_8(2^7)$.

| 7 FACTORES - 2 NIVELES CADA UNO 8 COMBINACIONES DE EXPERIMENTOS | | | | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---|
| EXP. N° | A 1 | B 2 | C 3 | D 4 | E 5 | F 6 | G 7 | RESULTADO FUERZA DE SALIDA |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | RESULT.1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | RESULT.2 |
| 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | RESULT.3 |
| 4 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | RESULT.4 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | RESULT.5 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | RESULT.6 |
| 7 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | RESULT.7 |
| 8 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | RESULT.8 |

Fuente: Elaboración Propia.

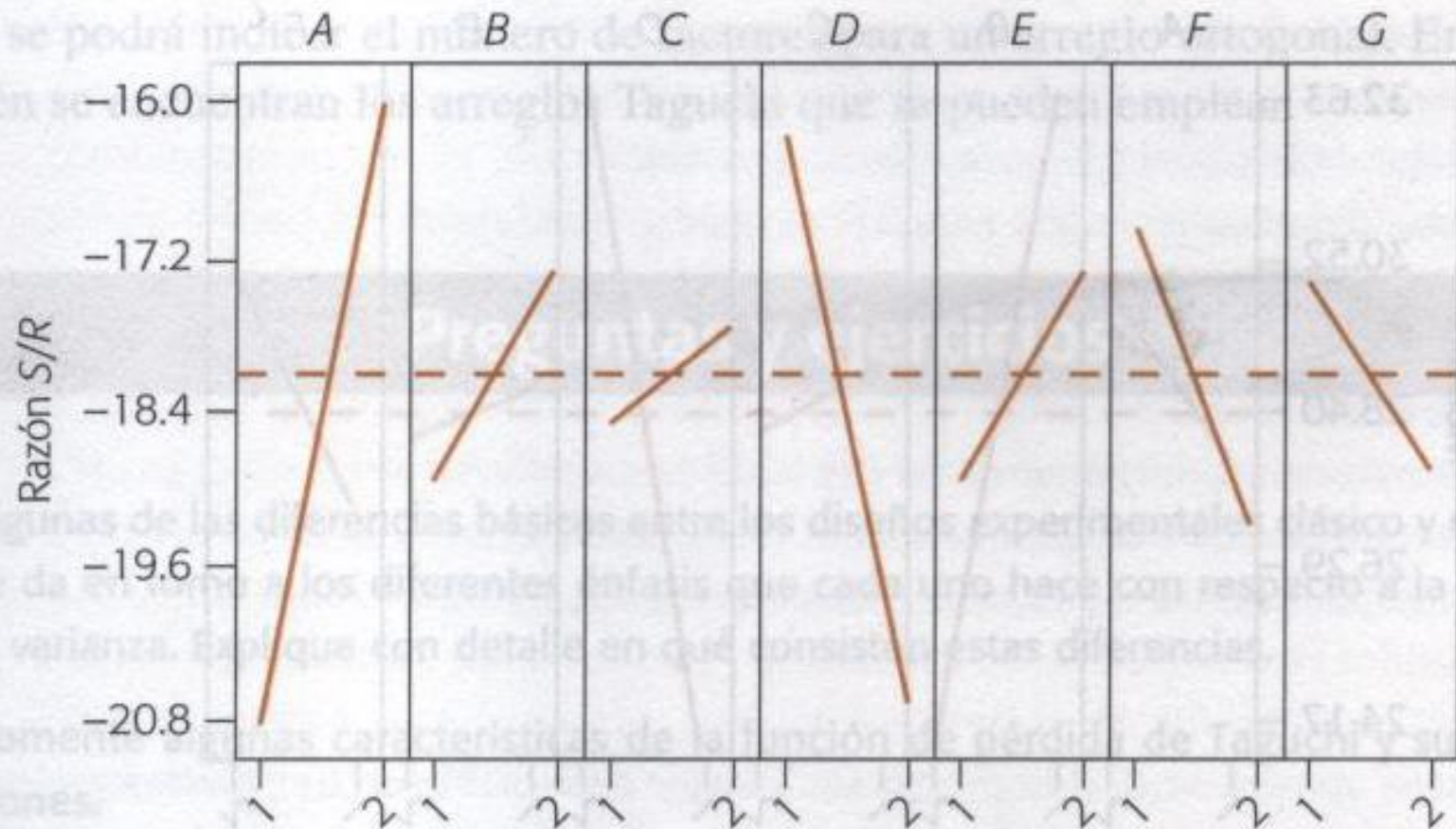
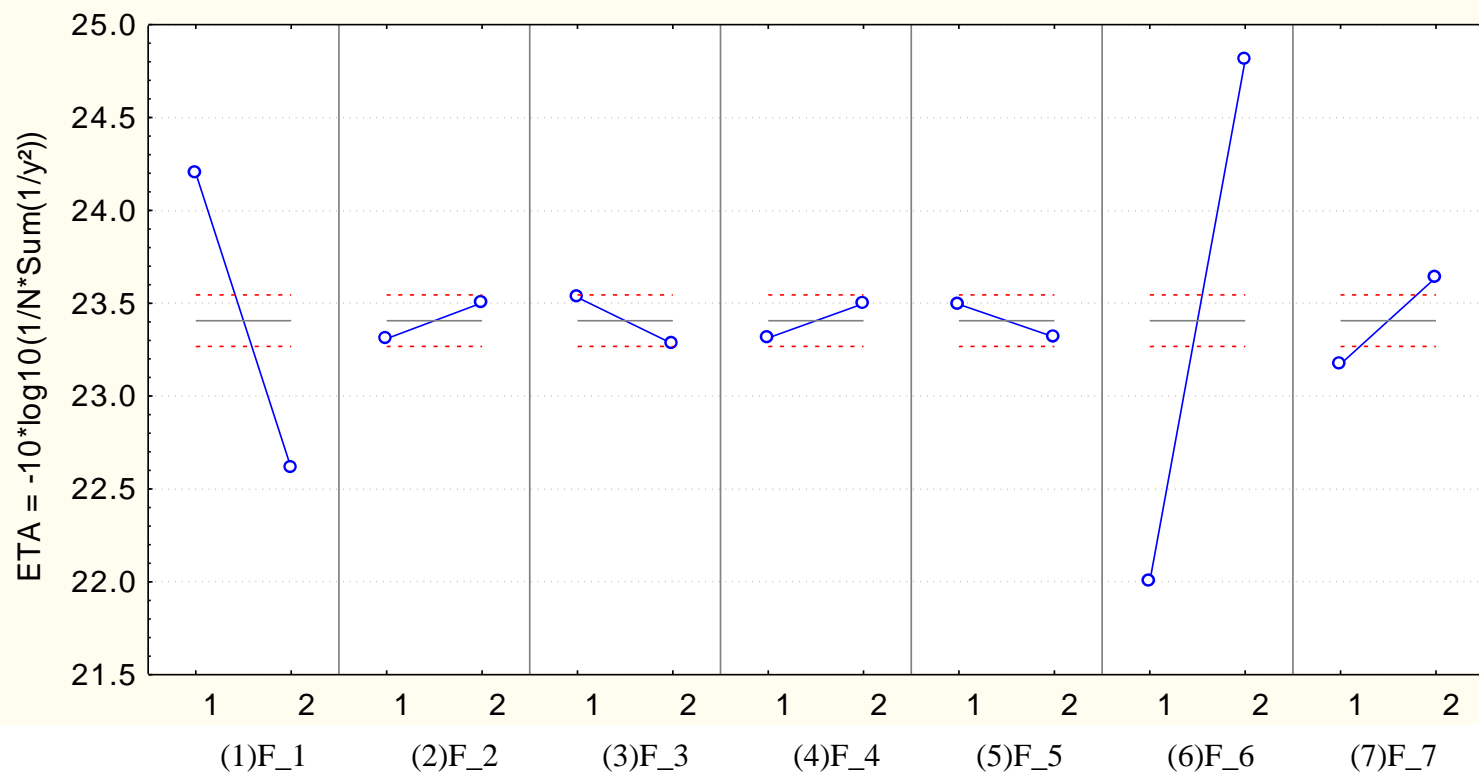


Figura 9.8 Gráficas de efectos para la variable señal/ruido (S/R), ejemplo del pigmento.

: VALORES SEÑAL/RUÍDO (ETA) DE CADA FACTOR EVALUADA PARA MAXIMIZAR LA RETENCIÓN DE ÁCIDO ASCÓRBICO, APLICANDO TAGUCHI $L_8(2^7)$.

Average Eta by Factor Levels
 Mean=23.4059 Sigma=1.69922 MS Error=.019291 df=8
 (Dashed line indicates ± 2 *Standard Error)



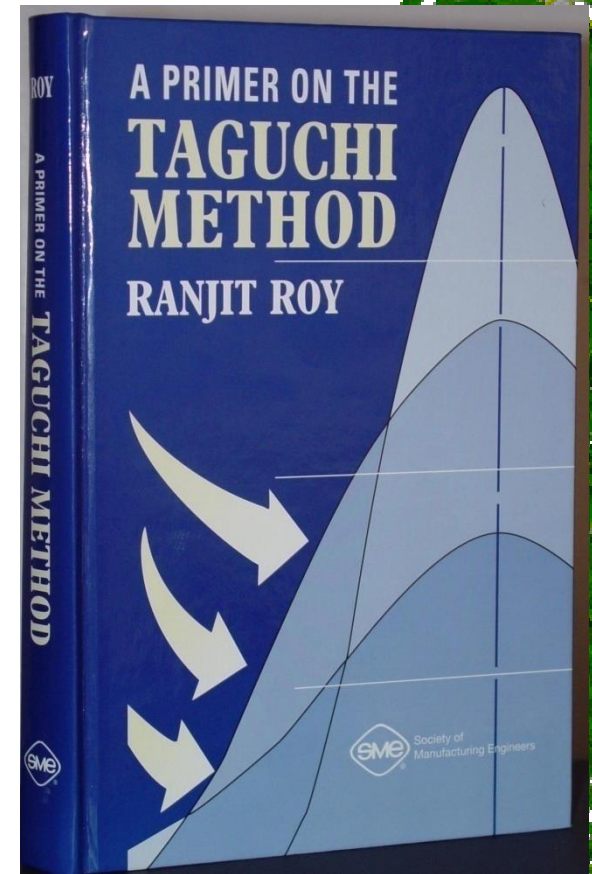
Donde:

- F_1: pH del Almíbar.
- F_2: Tiempo de Descerado.
- F_3: Temperatura del Descerado.
- F_4: Grados Brix del Almíbar.
- F_5: Concentración del NaOH.
- F_6: Temperatura del Tratamiento Térmico.
- F_7: Interacción pH-Tratamiento Térmico.

“METODOS TAGUCHI”

C. DISEÑO DE PARÁMETROS.

- El objetivo del DP de un proceso es que el producto sea **Funcional**, exhiba un **Alto Nivel de Performance** y sea **Sensitivo al mínimo a los “Ruidos”**.
- El diseño de parámetros examina las interacciones entre factores de control y factores de ruido con el objeto de lograr la robustez.



***Otros criterios
útiles en el análisis
de diseños
experimentales***



- ★ Los DE: Diseños factoriales fraccionados 2^{k-p} y Diseño de Plackett-Burman emplean dos niveles en cada factor, lo cual tiene que ver con el hecho de que **sólo interesa detectar el efecto principal de cada factor.**



- ★ Sin embargo, una vez superada la etapa de cribado es importante **aumentar estos arreglos con repeticiones al centro** a fin de **detectar la presencia de curvatura o falta de ajuste del modelo;**
- ★ Las repeticiones al centro **también proporcionan más grados de libertad para el error aleatorio.**



- ★ En la medida de que se estudian más factores, **se tienen menos grados de libertad** para estudiar interacciones;
- ★ Sin embargo, los diseños robustos de Taguchi **no hacen énfasis en el estudio de las interacciones**, prefiere saturar lo más posible los arreglos y analizar **sólo los efectos principales de cada factor**.



- ★ En experimentos **altamente fraccionados**, por ejemplo 2^{7-4}_{III} , tiene un total de siete grados de libertad, que se “gastan” en estimar **sólo a los efectos principales**, y quedan cero grados de libertad para el error en el ANOVA.
- ★ De aquí la necesidad de **recorrir al diagrama de Pareto** y al gráfico de Daniel como **paso previo** antes de intentar un análisis de varianza.



- ★ Se menciona la conveniencia de interpretar un ANOVA **con al menos 8 grados de libertad en el error**, condición que a veces es difícil de cumplir, por ejemplo cuando por razones económicas el **experimento se corre sin las réplicas suficientes**.
- ★ Un ejemplo es correr el **factorial 2^3** sin réplicas: se tienen 7 grados de libertad totales, por lo que **es imposible construir un análisis de varianza** con grados de libertad suficientes para el error.



★ **Cuatro o cinco repeticiones al centro agregarían esa cantidad de grados de libertad para el error,**

★ Además de proveer de un estimador puro (independiente de los efectos estimados) de la varianza en dicho punto.



Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|------------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Regresión | 3 | 2.70739 | 0.9025 | * | * |
| Predictor1 | 1 | 0.89775 | 0.8978 | * | * |
| Predictor2 | 1 | 0.69795 | 0.6979 | * | * |
| Predictor3 | 1 | 0.56777 | 0.5678 | * | * |
| Error | 0 | 0.00000 | * | | |
| Total | 3 | 2.70739 | | | |

- ★ El R^2_{aj} del modelo en el ANOVA preliminar.
- ★ Cuando se van eliminando efectos **que no son significativos**, el estadístico R^2_{aj} crece.
- ★ En el momento en que se elimina un efecto y **este estadístico decrece 3% o más**, significa que posiblemente ese efecto **no debe excluirse**.



- ★ Nótese que se requieren **al menos dos repeticiones** ($n \geq 2$) para **calcular el cuadrado medio del error**, puesto que la *SCE* tiene 0 grados de libertad cuando $n = 1$.
- ★ Entonces **se recomienda correr los diseño factoriales, con al menos dos réplicas** para contar con suficientes grados de libertad para el error.
- ★ También recordemos que mientras **menor sea el “valor- p ”** para un efecto, significa que éste tiene **mayor influencia sobre la variable de respuesta**.



- ★ Además, **cuando se tienen varias repeticiones**, estas permiten estimar directamente **un buen cuadrado medio del error**.
- ★ Las **repeticiones auténticas** permiten tener un **mejor estimador del error** y **mejorar sensiblemente el análisis de varianza**.

