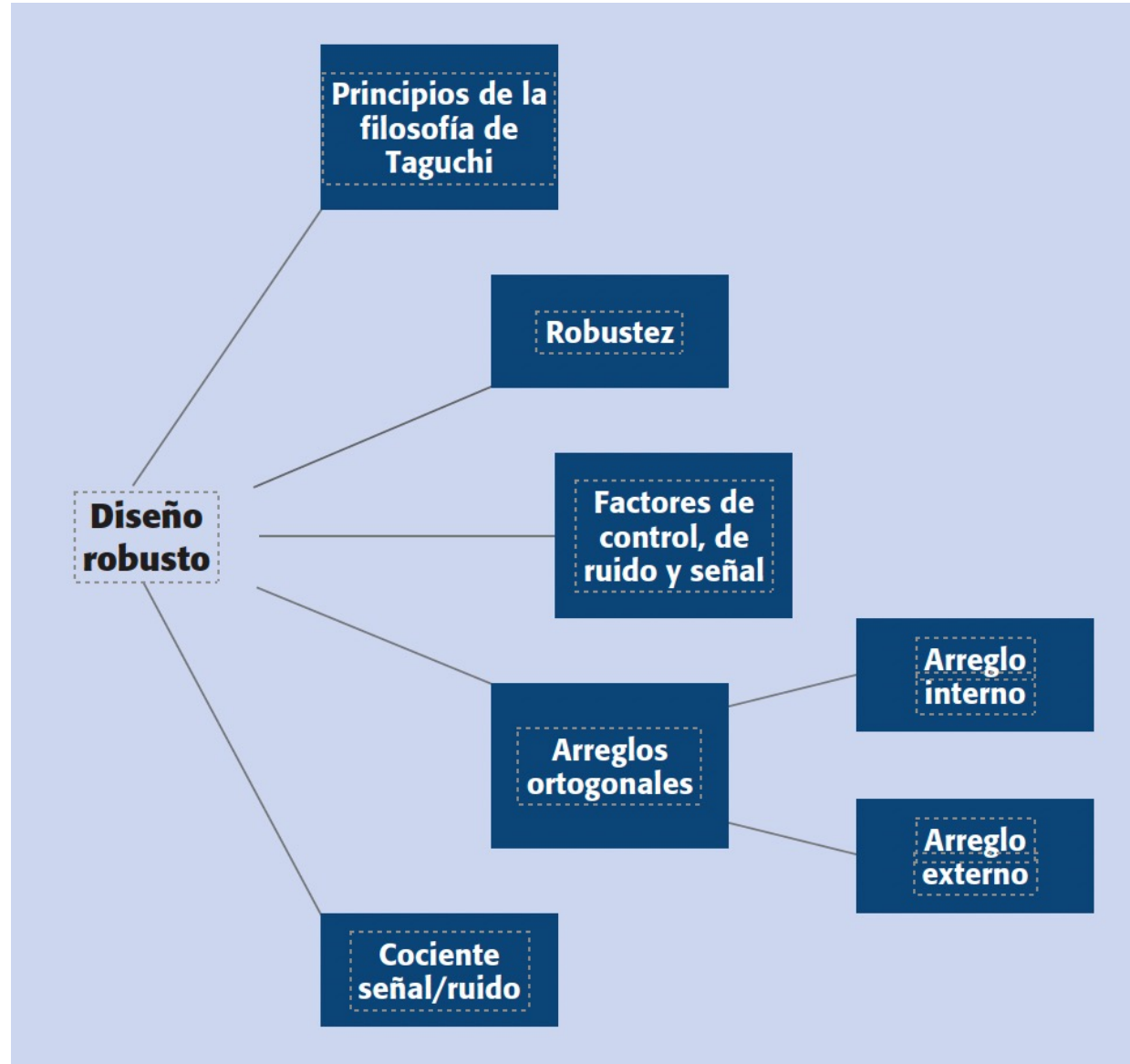


DISEÑOS ROBUSTOS (TAGUCHI)



El **diseño robusto** tiene su origen en las ideas del ingeniero japonés Genichi Taguchi, quien desarrolló su propia filosofía y métodos de ingeniería de la calidad desde la década de 1950.

Un **diseño robusto** es un experimento en el cual existen **factores de ruido** (no controlables), considerados de manera explícita o implícita, cuyo efecto se pretende minimizar de forma indirecta (o sea sin controlarlo directamente), a fin de encontrar la combinación de niveles de los factores de proceso que sí se pueden controlar, y en donde el efecto de dichos factores de ruido es mínimo.

Ejemplo 1. Consideremos una copiadora. Al momento de sacar copias, el usuario desea que la máquina funcione bien sin importar el tipo de papel usado, ni la humedad ambiental, por mencionar sólo dos factores de ruido que el fabricante de las copadoras no puede controlar. Si la máquina trabaja bien en esas condiciones es posible afirmar que es robusta al papel y a la humedad ambiental.

Ejemplo 2. Si pensamos en una tostadora de pan, al usuario le gustaría que fuera robusta a la marca de pan, a la humedad ambiental, a la temperatura ambiental, a las variaciones en las dimensiones del pan, etc. Se desea seleccionar el grado de tostado y observar que, efectivamente, el pan salga con el color deseado, en toda su superficie y por ambos lados.

EJEMPLO 3

En una fábrica de dulces se tenía el problema de que la **plasticidad del caramelo** era altamente dependiente de la temperatura ambiental, de manera que cuando hacía mucho calor se escurría sobre las manos del consumidor final. Entonces, el problema era formular un dulce robusto a la temperatura ambiental. Se encontró, mediante un experimento robusto, una nueva formulación de caramelo más resistente a los cambios de temperatura.

El **diseño robusto** se enfoca a la fabricación de productos y procesos robustos.

Tener un proceso robusto significa que éste funcione bien aunque varíen una serie de factores (de ruido) que no se pueden controlar, como variables ambientales (temperatura, humedad, etc.), cansancio de los operadores, cambios de turno y de lotes, variaciones no controlables en variables de proceso, acumulación de suciedad, etcétera.

Factores de control, de ruido y de señal

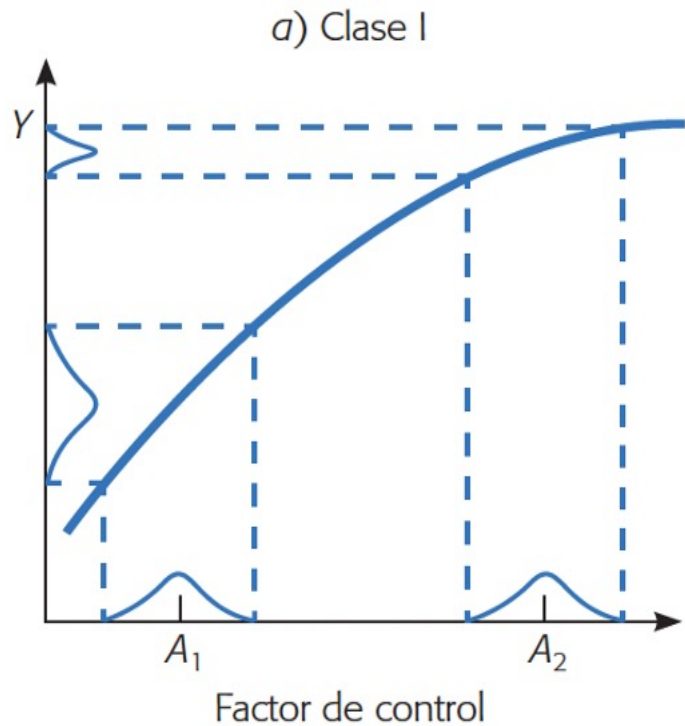
En un proceso existen básicamente dos tipos de factores: **controlables y no controlables (o de ruido)**. Por lo regular, los factores de estudio son controlables. Sin embargo, en diseño robusto es conveniente tener una clasificación más detallada del tipo de factores controlables que pueden influenciar el proceso, en cuanto a su efecto sobre la media y la variabilidad de la respuesta de interés. Se distinguen cuatro tipos de factores, a saber:

I. Afecta la media y la variabilidad.

II. Afecta sólo la variabilidad.

III. Afecta sólo la media.

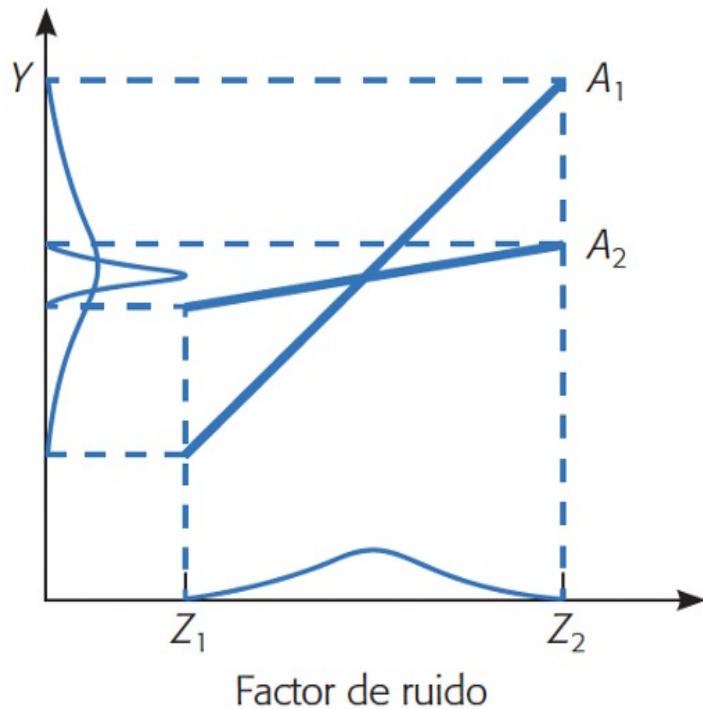
IV. No afecta la media ni la variabilidad.



El factor clase I:

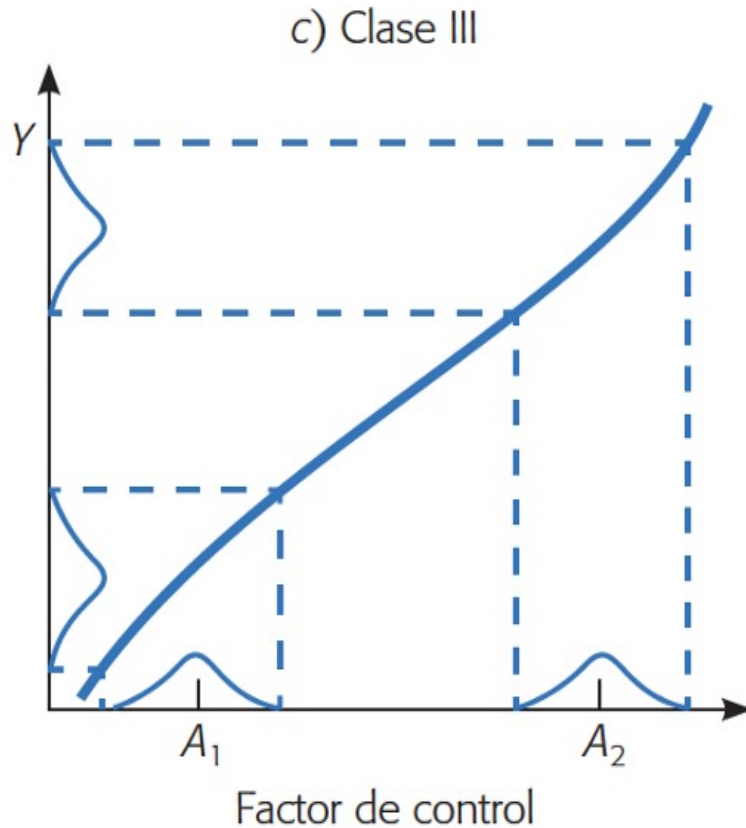
En el nivel A_2 la respuesta Y tendría una variabilidad menor que en el nivel A_1 , es decir, en el nivel A_2 se tiene un comportamiento más robusto del proceso a las posibles oscilaciones del factor. Es claro que al mismo tiempo en A_2 , la media de la característica es mayor que en A_1 .

b) Clase II



El factor de control clase II

Lo más relevante de esta interacción es que en el nivel A_2 del factor control se minimiza el efecto del factor de ruido sobre la variabilidad de Y . Entonces, se puede afirmar que en el nivel A_2 el proceso es más robusto al efecto del factor de ruido. Este tipo de relación entre un factor de control y un factor de ruido es la idea fundamental que permite hacer diseño robusto.

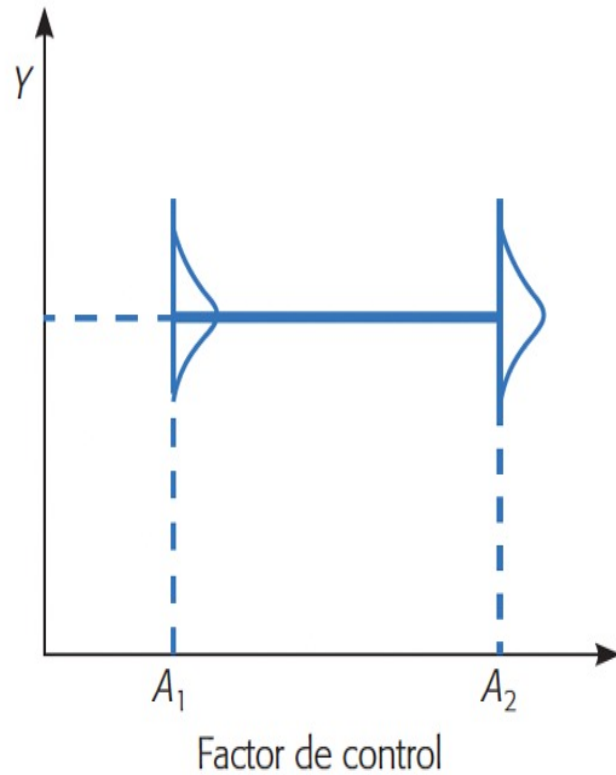


El factor clase III afecta sólo la media de la característica de calidad.

Este tipo de factor es útil para llevar la media a su valor nominal una vez elegidos los niveles de los factores clases I y II que minimizan la variabilidad, de aquí que al factor clase III se le llame *factor de ajuste*.

Con los factores clases I y II es posible elegir las condiciones más robustas, reduciendo la variabilidad de la respuesta, pero la media se habrá movido de su valor deseado, pero con el factor clase III ésta se regresa a su valor nominal sin afectar la variabilidad.

d) Clase IV



El factor clase IV no tiene efecto ni en la media ni en la variabilidad y de éste se elige su nivel más económico como el mejor.

En el diseño robusto se trata de sacar ventaja principalmente de los factores de control clase II que interactúan con factores de ruido: se trata de elegir el nivel del factor controlable que hace al proceso más insensible al ruido. Después, se busca ajustar la media al valor nominal con un factor de ajuste (clase III).

Factor señal

Se llama *factor señal* al dispositivo que permite cambiar el nivel de operación de acuerdo a los deseos del usuario. Por ejemplo, en una tostadora de pan el factor señal es el mecanismo que permite seleccionar el grado de tostado deseado.

En el caso de una copiadora, un factor señal es el mecanismo para elegir la oscuridad deseada de la impresión.

El factor señal permite cambiar el valor de la media de la característica de calidad, y es deseable que la variabilidad en cada nivel de operación sea mínima. Es decir, el producto debe ser robusto en cada nivel del factor señal.

Por ejemplo, el factor de control clase III, que sólo afecta la media, podría hacer las veces de factor señal, puesto que permitiría modificar el valor de la media sin que cambie la variabilidad de la respuesta.

Factores de ruido

Los factores de ruido que actúan sobre el producto o sobre el proceso se clasifican como: de ruido externo, ruido interno y de deterioro.

El ruido externo se refiere al ambiente en el cual el proceso (o producto) se desempeña y a la carga de trabajo a que es sometido.

Por ejemplo, es ruido externo la humedad ambiental, el polvo o los errores en la operación del equipo.

El ruido interno se refiere a la variación generada por el proceso de unidad a unidad producida, y que se debe a su propia naturaleza o tecnologías y la diversidad de sus componentes.

El deterioro se refiere a efectos que aparecen poco a poco con el tiempo por la degradación paulatina del proceso y sus componentes, que pueden causar la aparición de fallas en el proceso/producto. Por ejemplo, piezas o herramientas que se van gastando por el mismo uso.

Tipos de estudios de robustez

Los estudios de robustez se clasifican utilizando como criterios al tipo de variable de respuesta y la existencia o ausencia de factores de señal. Una variable de respuesta puede ser de tres tipos:

- 1) Entre más pequeña mejor
- 2) Entre más grande mejor
- 3) o nominal es lo mejor.

En cuanto al factor señal, se dice que el estudio es estático si no hay factor señal y es dinámico en el otro caso.

Entre más pequeña mejor. Son variables o características de calidad cuya única exigencia es que no excedan cierto valor máximo tolerado o especificación superior (ES), y entre más pequeño sea su valor mejor. Por ejemplo: porcentaje de impurezas en una sustancia o la cantidad de sustancias tóxicas en un producto alimenticio.

Entre más grande mejor. Son variables o características de calidad a las que se les exige que sean mayores que un valor mínimo o que cierta especificación inferior (EI), y entre más grande sea el valor de la variable es mejor. Por ejemplo, la resistencia de una pieza de plástico inyectado o la “blancura” de una tela de color blanco.

Valor nominal es el mejor. Variables que deben tener un valor específico y que, por lo tanto, no deben ser menores que una especificación inferior (EI), pero tampoco mayores que una superior (ES). Ejemplos de este tipo de características de calidad con doble especificación son el diámetro interior de una tuerca y la longitud de una pieza para ensamble.

ARREGLOS FACTORIALES MAS FRECUENTES

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.

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.

ARREGLOS FACTORIALES MAS FRECUENTES

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 ($4 < k < 11$).

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.

ARREGLOS FACTORIALES MAS FRECUENTES

Arreglo $L_{16} (2^{15-11})$															
Núm. de corrida	Núm. de columna														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

4 factores: columnas 1, 2, 4, 8
5 factores: columnas 1, 2, 4, 8, 15
6 factores: columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14
7 factores: columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13
8 factores: columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13, 11
9 factores: columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13, 11, 7
10 factores: columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13, 11, 7, 12
11 factores: columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13, 11, 7, 12, 10
12 factores: columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13, 11, 7, 12, 10, 9
13 factores: columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13, 11, 7, 12, 10, 9, 6
14 factores: columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13, 11, 7, 12, 10, 9, 6, 5
15 factores: columnas 1, 2, 4, 8, 15, 14, 13, 11, 7, 12, 10, 9, 6, 5, 3

Un diseño experimental propuesto por Taguchi para determinar condiciones de operación robustas a uno o varios factores de ruido es el *diseño con arreglo interno y externo*.

Una vez identificados los factores de control y los factores de ruido con los que se quiere experimentar, se construyen dos arreglos ortogonales, uno para cada tipo de factores.

La mejor combinación de los factores de control es aquella donde los factores de ruido tienen el menor efecto (causan mínima variación) y, al mismo tiempo, la media del color se encuentra más cerca del valor deseado (valor óptimo).

Razón señal/ruido

Para el análisis del diseño con arreglo interno y externo, Taguchi propone un estadístico de desempeño, al cual le llama **cociente o razón señal/ruido (signal to noise ratio)**, que se calcula en cada combinación de los factores controlables y se analiza como cualquier variable de respuesta. La combinación más robusta de los niveles de los factores controlables es aquella que **maximiza el estadístico razón señal/ruido.**

Tipo de característica	Razón señal/ruido (S/R)
Mientras más pequeña es mejor	$-10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right]$
Mientras más grande es mejor	$-10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right]$
Su valor nominal es lo mejor (tipo I)	$10 \log \left(\frac{\bar{Y}^2}{S^2} \right)$
Su valor nominal es lo mejor (tipo II)	$-10 \log (S^2)$
Proporción de defectuosos	$-10 \log \left(\frac{p}{(1-p)} \right)$

El hecho de que se saque logaritmo en los estadísticos tiene que ver con buscar que los efectos de los factores controlables sean *aditivos*, es decir, que se minimice la posibilidad de efectos de interacción entre ellos.

Se multiplican por 10 para trabajar en una escala más grande y el signo que lo antecede se escoge de manera que el problema siempre sea maximizar el valor del estadístico para obtener las condiciones de operación más robustas.

En cuanto a los **dos estadísticos para respuestas del tipo nominal**, se recomienda el tipo I para respuestas no negativas que van de cero a infinito, que tienen valor objetivo diferente de cero y que la varianza es cero cuando la respuesta también es cero.

El estadístico tipo II es para respuestas que pueden tomar tanto valores positivos como negativos, y donde el cero puede ser el valor nominal.

El estadístico tipo I también se recomienda cuando la media y la desviación estándar tienen una relación lineal; y **el estadístico tipo II** cuando la media y la desviación estándar son independientes (Fowlkes y Creveling, 1995).

Una alternativa que se ha propuesto es transformar los datos de manera que se logre un comportamiento independiente de la media y la variabilidad, y luego analizarlas de manera separada para los datos transformados (Nair y Pregibon, 1986).

Otra alternativa más directa y práctica, que en muchos casos da buenos resultados, es utilizar con cualquier tipo de respuesta continua el estadístico del caso nominal, lo mejor es emplear el **tipo II** ($-10 \log(S^2)$).

Optimización en dos pasos

La estrategia de análisis del experimento con arreglos interno y externo se resume en los dos pasos siguientes:

1. Se determinan los factores controlables que tienen efecto sobre el estadístico razón señal/ruido (S/R), que fue seleccionado de acuerdo con el tipo de característica de calidad que se tiene.

Con los efectos activos se determinan las condiciones de operación más robustas, las cuales maximizan el valor de la respuesta S/R .

2. Los factores que sólo afectan a la media se utilizan como factores de ajuste para llevar a ésta a su valor objetivo.

Si todos los factores que afectan a la media también afectaran al estadístico S/R será necesario encontrar una solución de compromiso, utilizando como factor de ajuste el de más efecto en la media y con menos efecto en la dispersión o variabilidad.

Además de los pasos anteriores, para cualquier respuesta continua es útil realizar estos mismos dos pasos con el estadístico general $S/R = -10 \log(S^2)$, a fin de tener otra visión del análisis.

Si los resultados de este otro análisis llegaran a diferir de los resultados del estadístico recomendado por Taguchi, se deben analizar con detenimiento las dos soluciones encontradas para finalmente determinar cuál es la mejor. Este segundo análisis puede proteger al experimentador de una solución subóptima que algunas veces generan las señales/ruido originales (Logothetis y Wynn, 1994).

Ejemplo diseño robusto

Una de las características importantes en el proceso de producción de un pigmento es su color (Optimo igual 23). El problema que se tenía en este proceso era el exceso de variación del color del pigmento.

Un grupo de mejora decide utilizar diseño robusto para tratar de hacer el proceso menos sensible al efecto de factores de ruido difíciles de controlar durante la producción. Se identificaron siete factores de control y **tres de ruido** con dos niveles cada uno.

Se decide utilizar un arreglo ortogonal L_8 para los factores de control y un L_4 para los factores de ruido, con lo que el diseño resultante tiene 32 corridas (pruebas) a nivel proceso.

Factores de Control

A: Tiempo de carga de materiales

B: Tiempo de amasado

C: Exceso de sal

D: Temperatura de amasado

E: orden de introducción de materiales

F: Velocidad de amasado

G: Tipo de materiales

Factores de ruido

H: Calidad de la sal

I: Aspecto de la resina

M: Temperatura del agua para enfriar

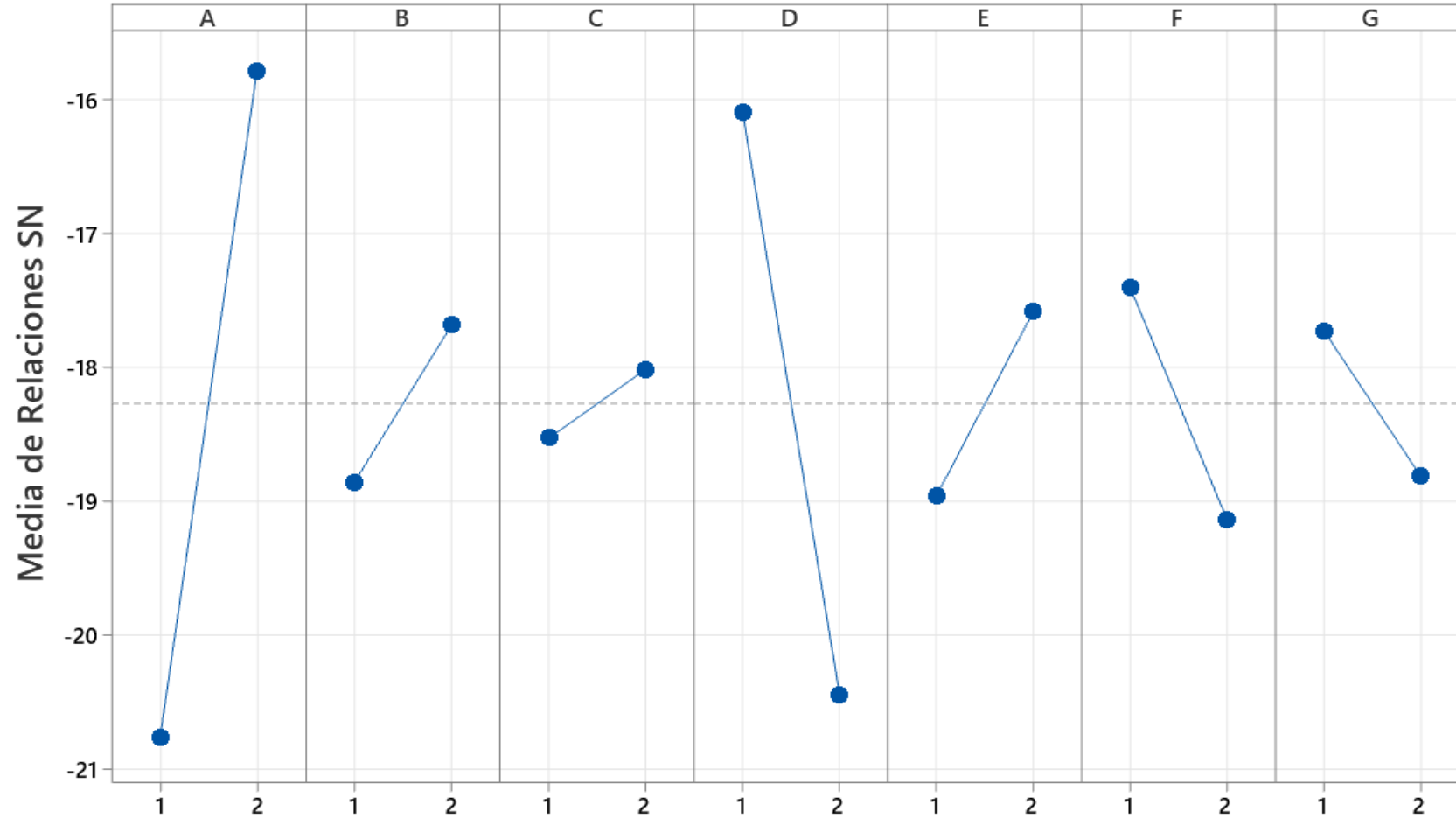
						FACTORES DE RUIDO					MEDIA	S	RAZON SEÑAL/RUIDO	
							J	1	2	2				1
							I	1	2	1				2
						H	1	1	2	2				
A	B	C	D	E	F	G		C1	C2	C3	C4			
1	1	1	1	1	1	1	1	36	26	24	15	25.25	8.61	-18.71
1	1	1	2	2	2	2	2	32	62	24	32	37.5	16.76	-24.49
1	2	2	1	1	2	2	2	34	16	25	12	21.75	9.81	-19.83
1	2	2	2	2	2	1	1	10	30	26	32	24.5	9.98	-19.98
2	1	2	1	2	2	1	2	33	31	27	23	28.5	4.43	-12.93
2	1	2	2	2	1	2	1	34	48	26	39	36.75	9.21	-19.29
2	2	1	1	2	2	2	1	26	27	18	20	22.75	4.42	-12.92
2	2	1	2	1	2	1	2	28	40	21	32	30.25	7.93	-17.99

ANALISIS DE VARIANZA PARA SEÑAL DE RUIDO

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
A	1	49.401	49.4007	49.4007	*	*
B	1	2.756	2.7557	2.7557	*	*
C	1	0.527	0.5273	0.5273	*	*
D	1	37.641	37.6408	37.6408	*	*
E	1	3.767	3.7673	3.7673	*	*
F	1	5.973	5.9727	5.9727	*	*
G	1	2.360	2.3596	2.3596	*	*
Error residual	0	*	*	*		
Total	7	102.424				

Gráfica de efectos principales para Relaciones SN

Medias de datos



Señal a ruido: Nominal es lo mejor ($-10 \times \text{Log}_{10}(s^2)$)

Análisis de Varianza de Relaciones SN

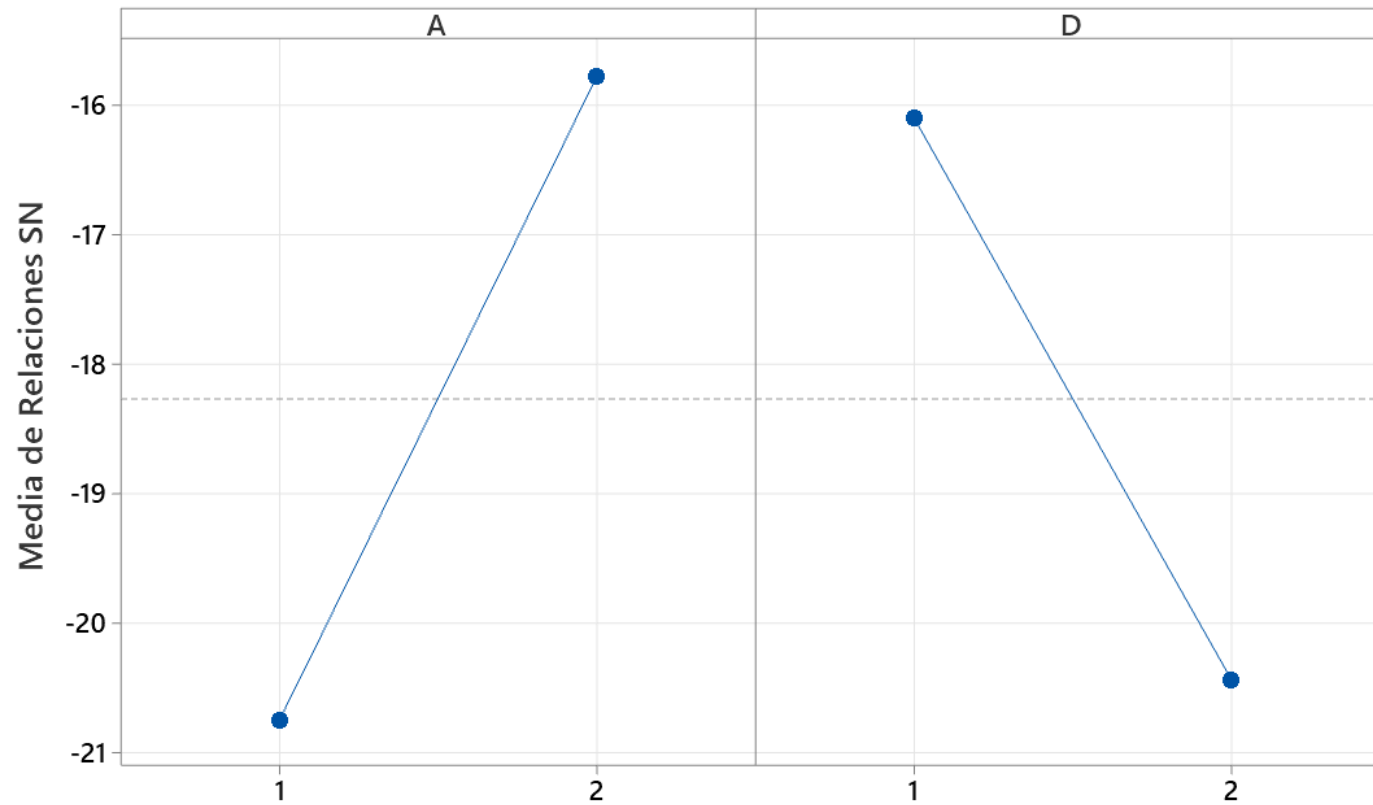
Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
A	1	49.40	49.40	49.401	16.06	0.0103
D	1	37.64	37.64	37.641	12.23	0.0173
Error residual	5	15.38	15.38	3.077		
Total	7	102.42				

R-cuadrado(ajustado)

78.97%

Gráfica de efectos principales para Relaciones SN

Medias de datos



Señal a ruido: Nominal es lo mejor ($-10 \times \text{Log}_{10}(s^2)$)

A	D
2	1

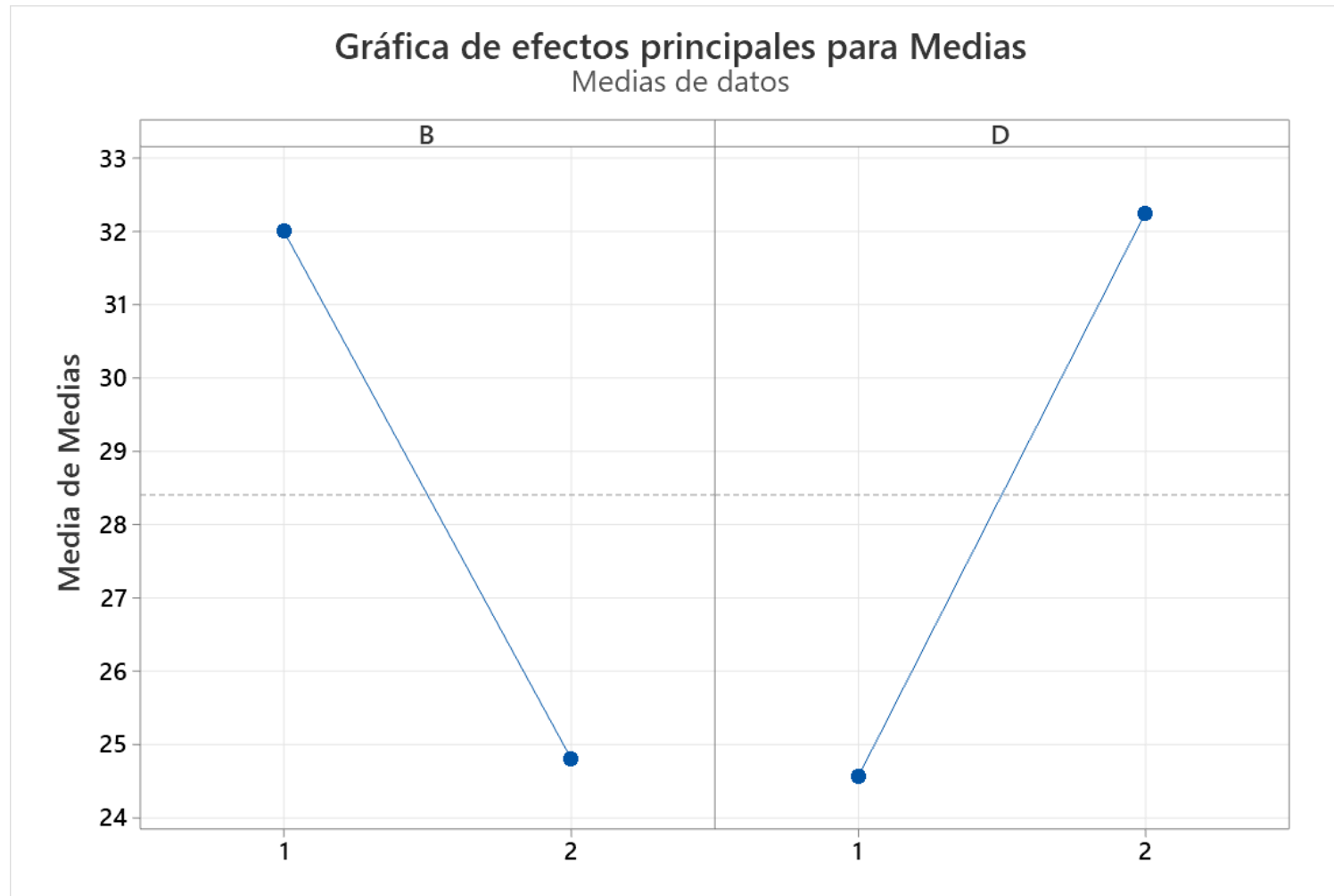
Análisis de Varianza de Medias

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
B	1	103.32	103.32	103.320	14.46	0.0126
D	1	118.20	118.20	118.195	16.54	0.0097
Error residual	5	35.73	35.73	7.145		
Total	7	257.24				

R-cuadrado(ajustado)

80.56%

FACTOR B PUEDE SER CONSIDERADO COMO FACTOR DE AJUSTE



El nivel adecuado del factor B que se aproxima al óptimo del color 23 es en nivel 2.

Recomendaciones para operar el optimo del color del pigmento

A	B	C	D	E	F	G
2	2	\$	1	\$	\$	\$