

## 1\_Definición del Método Taguchi.

La mayoría de los problemas de calidad son el resultado de un mal diseño del producto y del proceso, por lo tanto se necesitan herramientas para evitar esto. Una de ellas es el método Taguchi, una técnica de calidad mejorada dirigida al mejoramiento tanto del diseño del producto como del proceso. La idea es quitar los efectos de condiciones adversas en lugar de remover las causas, ya que este método sugiere que remover los efectos es más barato que eliminar las causas, creándose así productos más de mejor calidad.

### 1.1\_Factores controlables y factores de ruido.

El objetivo primordial de un diseño robusto es identificar el conjunto de parámetros o factores que proporcionan al producto o al proceso la capacidad de ser insensibles o invariantes frente a cambios en las condiciones de operación medio-ambientales. Para conseguir que productos y procesos sean robustos se requiere un estudio activo de los factores medio-ambientales. Taguchi incorpora el estudio de factores medio-ambientales en la fase del diseño de los parámetros. Más concretamente, propone construir dos matrices del diseño ortogonales: Una para los parámetros del diseño o factores controlables y otra para los factores de ruido o factores no controlables. El procedimiento para estudiar los factores de ruido es el mismo que el procedimiento empleado para el estudio de los parámetros del diseño (factores controlables). Se seleccionan los factores de ruido que deben ser considerados, definiendo entonces un diseño ortogonal apropiado para estos factores. Para los parámetros del diseño, Taguchi considera una matriz que se conoce como matriz del diseño interno, mientras que para el diseño de los factores de ruido se considera otra matriz que se refiere como matriz del diseño externo.

### 1.2\_Etapas de la ingeniería de calidad.

El sistema de calidad propuesto en la metodología de Taguchi supone una revolución de los sistemas de calidad tradicionales, donde predominaba el uso de herramientas para el control On Line. El enfoque de Taguchi destaca la importancia del control de la calidad Off Line y, por tanto, de un diseño apropiado del producto y del proceso. Se utilizará fundamentalmente el diseño de experimentos como herramienta para fabricar productos más robustos y, por tanto, menos sensibles a los factores de ruido. Es decir, se reducen los efectos de la variabilidad sobre las características de la calidad del producto y del proceso.

En función a lo anterior podemos distinguir dos etapas en la ingeniería de la calidad:

Off Line (fuera de línea): aplicada en investigación y desarrollo de productos y procesos.

On Line (en línea): aplicada durante la producción.

#### 1.2.1\_Calidad Off Line.

En la etapa (I), es decir, en el diseño del producto, se considera en primer lugar el problema de diseño del sistema. Se aplica entonces el conocimiento científico para desarrollar un prototipo de diseño que cumpla los requerimientos del cliente. La selección inicial de materiales y de tecnología para el proceso de manufacturación es realizada en esta fase. El principal objetivo en esta etapa es conseguir la mejor tecnología disponible para cubrir las necesidades del cliente al costo más bajo posible.

El siguiente paso es el diseño de los parámetros, determinando el conjunto óptimo de parámetros del producto. El objetivo aquí es minimizar los costos de manufacturación y de la vida del producto mediante minimización de la variación en la ejecución. Esto se consigue mediante la creación de diseños robustos, que no se ven afectados por los factores de ruido. Un factor de ruido es una fuente de variación incontrolable en las características funcionales del producto. En esta etapa de diseño de los parámetros se utiliza el diseño de experimentos para determinar el impacto de los factores controlables y no controlables (ruido) sobre las características del producto. El objetivo aquí es la selección de niveles de los factores controlables que permiten minimizar los efectos de los factores de ruido, haciendo el producto robusto frente a dichos factores.

Finalmente, en el diseño de las tolerancias se establecen los límites en torno al valor nominal o umbral establecido en la etapa anterior. El objetivo en esta etapa es definir o especificar unas tolerancias lo suficientemente amplias como para minimizar costos, pero manteniendo las características funcionales del producto dentro de las especificaciones.

En la etapa (II), es decir, en el diseño del proceso, se considera, en primer lugar, de forma paralela a la etapa anterior, el diseño del sistema, que consiste en la selección del proceso de manufacturación sobre la base del conocimiento del producto y de la tecnología de manufacturación de ese momento. El objetivo principal es especificar el uso de maquinaria existente y el proceso en la medida de lo posible.

En el diseño de los parámetros se determinan los niveles apropiados de los factores controlables que intervienen en el proceso de producción. El objetivo aquí es hacer el proceso robusto para minimizar los efectos de ruido sobre el proceso de producción y el producto acabado. El diseño de experimentos es utilizado durante este paso.

Finalmente, en el diseño de las tolerancias, se establecen las tolerancias para los parámetros del proceso, identificadas como críticas en el diseño durante el diseño de los parámetros. Si el diseño de los parámetros del proceso o del producto se ha realizado pobremente, es necesario, quizás, realizar un reajuste de tolerancias, o bien considerar materiales de elevado costo o equipos de alta calidad, lo que produce un incremento de los costos de manufacturación.

### 1.2.2\_Calidad On Line.

Taguchi establece dos etapas en el control de la calidad On Line:

- a) Métodos de control de la calidad de la producción:
  - Proceso de diagnóstico y ajuste. El proceso es examinado en intervalos regulares de tiempo; ajustes y correcciones son efectuados según las necesidades que surgen.
  - Predicción y corrección. Un parámetro cuantitativo o numérico del proceso se mide en intervalos regulares de tiempo. Los datos son utilizados para proyectar tendencias en el proceso. En el caso en que el proceso se encuentra demasiado alejado de los valores umbrales o nominales, el proceso es reajustado para corregir la situación. Este método se conoce con el nombre de control feedback o feedforward.
  - Medición y acción. Consiste en el control de la calidad mediante inspección. Cada unidad manufacturada es inspeccionada. Las unidades defectuosas son reparadas o eliminadas. Este procedimiento de control de la calidad es el más caro, puesto que no previene defectos ni tampoco identifica todas las unidades defectuosas.
- b) Relaciones con los clientes. Servicios a clientes pueden ofrecer la reparación o el reemplazamiento de productos defectuosos, o bien la compensación de pérdidas.

## 2\_Metodología.

### 2.1\_Matrices ortogonales.

Las matrices OA de Taguchi se denominan  $LN(Sm)$ , donde N es el número de experimentos a realizar, S son los niveles que se van a tomar de cada uno de estos experimentos, m es el número de variables/factores elegidos en la matriz  $N \times m$ , cuyas columnas son ortogonales.

A la hora de diseñar una OA, la primera etapa es seleccionar la magnitud adecuada de forma que abarque todos los grados de libertad presentes en el estudio. Con esto obtenemos el mínimo número de experimentos que deben ser llevados a cabo para estudiar los factores involucrados.

Una vez definidos los grados de libertad para el número de factores definidos y los niveles tomados para cada uno de ellos, se seleccionara una OA estándar, recomendándose tomar la OA de menor tamaño posible.

Las OAs tienen una estructura especial que permite obtener más rápidamente una información muy precisa en relación a un factor. La estructural ortogonal de las OAs nos permite separar matemáticamente el efecto principal de

cada variable respecto del efecto principal de las demás variables, con lo que se puede estudiar cada variable independientemente. El objetivo de los experimentos es realizar comparaciones entre los efectos de los diferentes factores y determinar la mejor aproximación de cada uno de ellos.

Si el número total de experimentos llegara a ser excesivamente elevado, se tomaría solamente un subconjunto de la matriz de diseño, que sería nuestra nueva matriz de diseño fraccionada.

### 3\_Optimización de tratamientos de terreno mediante el Método Taguchi.

#### 3.1\_Identificación de la función objetivo.

Nuestra función objetivo sería minimizar la altura de precarga

#### 4\_Identificación de los factores de control y niveles.

Parámetros		Características			Niveles		
					1	2	3
<b>A</b>	Separación mechas drenantes				2,00 m	2,50 m	3,00 m
<b>B</b>	Longitud mechas drenantes				20 m	25 m	30 m
<b>C</b>	Altura de base de terraplén				1,00 m	2,00 m	3,00 m
<b>D</b>	Tiempo de precarga				3 meses	6 meses	9 meses

Ruidos		Características		Niveles (cm)	
				1	2
<b>E</b>	Separación mechas drenantes			-10	+10
<b>F</b>	Longitud mechas drenantes			-5	+5
<b>G</b>	Altura de base de terraplén			-3	+3

#### 5\_Seleccionar el arreglo ortogonal.

Matriz		Número máximo de factores	
<b>L<sub>4</sub></b>		3 Factores x 2 Niveles	
<b>L<sub>8</sub></b>	<b>a</b>	7 Factores x 2 Niveles	
	<b>b</b>	1 Factor x 4 Niveles y 4 Factores x 2 Niveles	
<b>L<sub>9</sub></b>		4 Factores x 3 Niveles	
<b>L<sub>12</sub></b>		11 Factores x 2 Niveles	
<b>L<sub>16</sub></b>	<b>a</b>	15 Factores x 2 Niveles	
	<b>b</b>	1 Factor x 4 Niveles y 12 Factores x 2 Niveles	
	<b>c</b>	2 Factores x 4 Niveles y 9 Factores x 2 Niveles	
	<b>d</b>	3 Factores x 4 Niveles y 6 Factores x 2 Niveles	
	<b>e</b>	4 Factores x 4 Niveles y 3 Factores x 2 Niveles	
	<b>f</b>	5 Factores x 4 Niveles	
	<b>g</b>	1 Factor x 8 Niveles y 8 Factores x 2 Niveles	
<b>L<sub>18</sub></b>	<b>a</b>	7 Factores x 3 Niveles y 1 Factores x 2 Niveles	
	<b>b</b>	1 Factor x 1 Niveles y 6 Factores x 3 Niveles	
<b>L<sub>27</sub></b>	<b>a</b>	13 Factores x 3 Niveles	
	<b>b</b>	1 Factor x 9 Niveles y 9 Factores x 3 Niveles	

Para la elección de la matriz ortogonal debemos fijarnos en el número de factores y los niveles de estos a analizar. Como consecuencia, elegimos la matriz **L<sub>9</sub>** (3<sup>4</sup>).

Experimentos	A	B	C	D
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

Experimentos	E	F	G
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

6\_Hacer la matriz de experimento.

Experimentos	A	B	C	D	Altura de precarga (m.)
1	1	1	1	1	5,59
2	1	2	2	2	3,67
3	1	3	3	3	1,71
4	2	1	2	3	4,61
5	2	2	3	1	6,22
6	2	3	1	2	3,04
7	3	1	3	2	7,03
8	3	2	1	3	4,34
9	3	3	2	1	5,08

7\_Análisis de datos y predicción de los niveles óptimos.

Calculamos la altura de precarga en cada nivel de parámetros.

TABLA DE RESPUESTAS			
FACTOR	Altura de precarga por nivel		
	1	2	3
A	5,59+3,67+1,71	4,61+6,22+3,04	7,03+4,34+5,08
B	5,59+4,61+7,03	3,67+6,22+4,34	1,71+3,04+5,08
C	5,59+3,04+4,34	3,67+4,61+5,08	1,71+6,22+7,03
D	5,59+6,22+5,08	3,67+3,04+7,03	1,71+4,61+4,34

TABLA DE RESPUESTAS			
FACTOR	Altura de precarga por nivel		
	1	2	3
A	10,97	13,87	16,45
B	17,27	14,23	9,83
C	12,97	13,36	14,96
D	16,89	13,74	10,66

Por lo tanto, según la tabla anterior, la combinación óptima de los niveles de los diferentes factores será:

A(1) B(3) C(1) D(3)

8\_Realizar la verificación del experimento y planear acciones futuras.

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

Diseño ortogonal del Método de Taguchi				Ruido	E	1	2	2	1	Media	Desviación típica	$\frac{S}{R} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$
					F	1	2	1	2			
					G	1	1	2	2			
Parámetros				Altura de precarga (obtenida por Settle 3D)								
A	B	C	D									
1	1	1	1	5,67	5,66	5,64	5,60	5,64	0,031	-11,507		
1	2	2	2	3,74	3,73	3,73	3,70	3,73	0,018	-7,901		
1	3	3	3	1,77	1,76	1,75	1,72	1,75	0,021	-1,339		
2	1	2	3	4,66	4,68	4,66	4,62	4,66	0,026	-9,836		
2	2	3	1	6,28	6,26	6,25	6,24	6,26	0,017	-12,406		
2	3	1	2	3,10	3,10	3,08	3,06	3,09	0,020	-6,263		
3	1	3	2	7,09	7,08	7,08	7,05	7,08	0,018	-13,472		
3	2	1	3	4,42	4,41	4,40	4,37	4,40	0,022	-9,347		
3	3	2	1	5,15	5,14	5,12	5,11	5,13	0,018	-10,680		

Efecto de cada señal sobre la relación s/r

Nivel	A			B			C			D		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
S/R	-11,51	-9,84	-13,47	-11,51	-7,90	-1,34	-13,47	-7,90	-1,34	-11,51	-7,90	-1,34
	-7,90	-12,41	-9,35	-9,94	-12,41	-6,26	-6,26	-9,84	-12,41	-12,41	-6,26	-9,84
	-1,34	-6,26	-10,68	-13,47	-9,35	-10,68	-9,35	-10,68	-13,47	-10,68	-13,47	-9,35
Promedio	-6,92	-9,50	-11,17	-11,64	-9,89	-6,09	-9,69	-9,47	-9,07	-11,53	-9,21	-6,84
Efecto	4,25			5,55			0,62			4,69		

Señales que tienen efecto sobre la variable de respuesta sin interactuar con las otras señales.

Nivel	A			B			C			D		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Media	5,64	4,66	7,08	8,64	3,73	1,75	5,64	3,73	1,75	5,64	3,73	1,75
	3,73	6,26	4,40	4,66	6,26	3,09	3,09	4,66	6,26	6,26	3,09	4,66
	1,75	3,09	5,13	7,08	4,40	5,13	4,40	5,13	7,08	5,13	7,08	4,40
Promedio	3,71	4,67	5,54	6,79	4,80	3,32	4,38	4,51	5,03	5,68	4,63	3,60
Efecto	1,83			3,47			0,65			2,08		