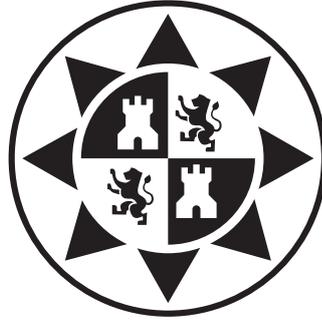


**Universidad Politécnica de Cartagena**  
Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación



Texto-Guía para la asignatura Ingeniería de la Calidad  
5° Curso de la Titulación de Ingeniería Industrial y  
5° Curso de la Titulación de Ingeniería Naval y Oceánica

**Curso de Ingeniería de la Calidad.**

MANUEL ESTREMS AMESTOY

Cartagena, 2012



# Tema 1

---

## Índice general

<b>1. Índice general</b>	<b>3</b>
<b>2. Introducción a la Ingeniería de Calidad</b>	<b>11</b>
2.1. Definición de calidad del producto . . . . .	11
2.2. La Calidad en la gestión empresarial . . . . .	13
2.2.1. Normalización . . . . .	15
2.3. Filosofías respecto a la Calidad . . . . .	15
2.3.1. Aseguramiento de la Calidad . . . . .	15
2.3.2. Métodos de Deming . . . . .	16
2.3.3. Juran Methods . . . . .	16
2.3.4. Taguchi Methods . . . . .	16
2.4. Despliegue Funcional de la Calidad . . . . .	17
2.5. Práctica a realizar en grupo . . . . .	17
2.6. Test de competencias adquiridas y tiempo de trabajo . . . . .	17
<b>3. Sistemas de Calidad</b>	<b>21</b>
3.1. Normalización . . . . .	21
3.2. Conceptos y definiciones en la gestión de la calidad . . . . .	22
3.3. Normativa de la ISO 9000 . . . . .	22
3.4. Elementos de los sistemas de gestión de la calidad . . . . .	23
3.5. Manual de Calidad . . . . .	24
3.6. Normativa ISO 14000 . . . . .	24

<b>4. Los 14 puntos de Deming</b>	<b>25</b>
4.1. Los 14 puntos . . . . .	25
4.1.1. Crear un ambiente de constancia en el propósito de mejorar la calidad de los productos y servicios. . . . .	25
4.1.2. Adoptar la nueva filosofía. . . . .	26
4.1.3. Dejar de depender de la inspección en masa para conseguir la calidad. . . . .	26
4.1.4. Acabar con la práctica de premiar al proveedor sobre la base del índice de precios. . . . .	26
4.1.5. Mejorar constantemente y siempre el sistema de producción y servicio. . . . .	27
4.1.6. Instituir el entrenamiento en el trabajo. . . . .	27
4.1.7. Instituir el liderazgo. . . . .	27
4.1.8. Desterrar el miedo. . . . .	27
4.1.9. Derribar las barreras que hay entre departamentos. . . . .	28
4.1.10. Eliminar los slogans, las exhortaciones y los objetivos numéricos. . . . .	28
4.1.11. Eliminar las cuotas numéricas y la dirección por objetivos. . . . .	28
4.1.12. Derribar las barreras que impiden el orgullo de hacer bien un trabajo. . . . .	29
4.1.13. Instituir un programa vigoroso de educación y auto-entrenamiento. . . . .	29
4.1.14. Involucrar a todos los miembros de la compañía en la transformación. . . . .	29
4.2. Las enfermedades mortales . . . . .	30
<b>5. Círculos de Calidad</b>	<b>31</b>
5.1. Introducción . . . . .	31
5.1.1. Objetivos de los Círculos de Calidad . . . . .	31
5.1.2. Implantación de un programa de Círculos de Calidad . . . . .	33
5.1.3. Riesgos de fracaso del círculo . . . . .	34
<b>6. Las 5 S</b>	<b>37</b>
6.1. Organización . . . . .	38
6.2. Orden . . . . .	39
6.3. Limpieza . . . . .	39
6.4. Control visual . . . . .	40
6.5. Disciplina y hábito . . . . .	40
6.6. Plantillas para los paseos en las distintas fases de programa 5S . . . . .	41

<b>7. Método SMED</b>	<b>49</b>
7.1. Introducción . . . . .	49
7.2. Componentes del SMED . . . . .	49
7.3. Matriz de conversión de amarre . . . . .	50
<b>8. Mantenimiento Productivo ToTal</b>	<b>53</b>
8.1. Introducción . . . . .	53
8.2. Caza de pérdidas . . . . .	54
8.3. Mantenimiento autónomo . . . . .	55
8.4. Mantenimiento Planificado . . . . .	55
8.5. Mejora de competencias operacionales . . . . .	56
8.6. TPM en el diseño inicial . . . . .	56
8.7. Mantenimiento de calidad . . . . .	56
8.8. TPM en servicios administrativos . . . . .	56
8.9. Seguridad y medioambiente . . . . .	57
<b>9. Seis Sigma</b>	<b>59</b>
9.1. Introducción . . . . .	59
9.2. Pasos para la mejora continua . . . . .	59
9.3. Entrenamiento y certificación de operarios . . . . .	60
9.4. Proyectos de fabricación . . . . .	61
9.5. Herramientas del Seis Sigma . . . . .	61
<b>10. Análisis de los modos de fallos y sus efectos (FMEA)</b>	<b>63</b>
10.1. Modelo de acción . . . . .	64
<b>11. Estadística en la mejora de calidad</b>	<b>67</b>
11.1. Hitos históricos en el control estadístico de la calidad . . . . .	67
11.2. Rueda de Deming . . . . .	68
11.2.1. Identificación del problema . . . . .	68
11.3. Distribuciones de frecuencias . . . . .	69
11.3.1. Parámetros estadísticos . . . . .	70
11.3.2. Distribuciones de frecuencia multivariable . . . . .	71
11.4. Ejercicio práctico en hoja de cálculo MS-Excel . . . . .	71
11.5. Cálculo de Probabilidades . . . . .	72
11.6. Aplicación en Fiabilidad de Sistemas . . . . .	73
11.6.1. Subsistemas en serie . . . . .	73
11.6.2. Subsistemas en paralelo . . . . .	74
11.6.3. Subsistemas mixtos . . . . .	74
11.7. Distribuciones de probabilidad . . . . .	74
11.7.1. Distribuciones discretas . . . . .	75

11.7.2. Distribuciones continuas . . . . .	76
11.8. Intervalos de confianza . . . . .	78
11.9. Problemas . . . . .	79
<b>12. Modelizado de la fiabilidad basada en el crecimiento de grieta por fatiga</b>	<b>81</b>
12.1. Introducción . . . . .	81
12.2. Crecimiento de grieta en aceros . . . . .	82
12.3. Modelización del comportamiento de distintos materiales . . . . .	82
12.4. Simulación de vida de material . . . . .	83
12.4.1. Generación de poblaciones aleatorias . . . . .	83
12.4.2. Obtención de curva de fatiga . . . . .	83
12.5. Conclusión . . . . .	85
<b>13. Control Estadístico de Procesos</b>	<b>87</b>
13.1. Introducción . . . . .	87
13.2. Control Estadístico de Procesos (CEP) versus Muestreo Final de Producción . . . . .	87
13.3. Causas asignables y aleatorias . . . . .	89
13.4. Gráfico de control . . . . .	90
13.4.1. Tipos de Gráficos de Control . . . . .	91
13.4.2. Metodología general . . . . .	91
13.4.3. Criterios de prueba . . . . .	92
13.5. Gráficos por variables . . . . .	92
13.5.1. Individuos ( $x$ ) . . . . .	92
13.5.2. Medias-Rango ( $\bar{x}/R$ ) . . . . .	94
13.5.3. Medias-Desviación Típica ( $\bar{x}/s$ ) . . . . .	94
13.5.4. Medianas-Rango ( $Md/R$ ) . . . . .	94
13.6. Gráficos por atributos . . . . .	94
13.6.1. Unidades defectuosas por muestra ( $np$ ) . . . . .	95
13.6.2. Porcentaje de unidades defectuosas por muestra ( $p$ ) . . . . .	95
13.6.3. Número de defectos $c$ . . . . .	95
13.6.4. Número de defectos por unidad de inspección $u_i$ . . . . .	96
13.6.5. Establecimiento del tamaño de muestra para gráficos de control por atributos . . . . .	96
13.7. Gráficos especiales . . . . .	97
13.7.1. Sumas acumuladas (CUSUM) . . . . .	97
13.7.2. Pre-Control . . . . .	99
13.8. Capacidad de proceso . . . . .	100
13.9. Errores comunes . . . . .	101
13.10 Problemas . . . . .	102

<b>14. Muestreo en el control de calidad</b>	<b>115</b>
14.1. Introducción . . . . .	115
14.2. Planes de muestreo . . . . .	116
14.3. Curva característica . . . . .	117
14.4. Inspección con rectificación . . . . .	118
14.5. Planes de Muestreo Normalizados . . . . .	118
14.5.1. MIL-STD 105D . . . . .	119
14.6. Problemas . . . . .	119



# Prefacio

La presente guía docente para la asignatura Ingeniería de la Calidad que se imparte en 5.º curso de las titulaciones de Ingeniería Industrial e Ingeniería Naval y Oceánica. El libro es fruto de la experiencia de 7 años que llevo impartiendo las asignaturas, y de las múltiples conversaciones con personas del mundo de la Industria responsables de programas de calidad en sus respectivas empresas. También se ha de tener en cuenta el desarrollo del exitoso curso de verano "Calidad, Productividad y Competitividad en la fábrica del siglo XXI" de la UPCT que desde 2005 es un auténtico foro de intercambio de experiencias entre personas responsables de programas en las empresas multinacionales más punteras en este campo y en un país donde desgraciadamente año tras año se está quedando a la cola en productividad de Europa.

La metodología didáctica de la asignatura sigue las recomendaciones del EEES en el que se busca principalmente que el alumno adquiera competencias que le den valor en el mercado laboral, y todo ello maximizando el rendimiento de un tiempo de estudio y dedicación a la adquisición de dichas competencias. De este modo el temario se ha dividido en 3 temas que se impartirían en las 15 semanas que dura el cuatrimestre, y cada tema tiene una estructura similar que prácticamente contienen los siguientes apartados:

- Introducción y explicación del tema en dos páginas.
- Plantillas de ayuda para llevar a cabo la técnica.
- Caso práctico resuelto.
- Practica a realizar en equipo.
- Comprobación final.
  - Competencias adquiridas y otros ejemplos de aplicación
  - Tiempo de trabajo y posibles mejoras didácticas sobre la materia.

Como ayuda complementaria se han plasmado los casos resueltos en videos docentes. Las encuestas y los desarrollos de las clases se realizan contando con la ayuda de una aplicación web cliente servidor al final de la misma clase permitiendo una retroalimentación sobre la eficacia de las medidas didácticas planificadas de clase en clase llevando a cabo un control estadístico del aprendizaje "on line". Con esto pretendemos trasladar los mismos métodos que se usan en la industria para conseguir más competitividad de la universidad a través de la mejora continua del trabajo realizado en las aulas y talleres en donde la formación del factor humano, el orden y el aprovechamiento del tiempo tienen cada vez más importancia en las actuales circunstancias culturales.

## Tema 2

---

# Introducción a la Ingeniería de Calidad

Antes de entrar un producto en el mercado en el mercado, o transferir los componentes para su montaje, los productos son inspeccionados en algunas de sus especificaciones. Esta inspección tiene especial importancia para asegurar que las partes van a ajustar adecuadamente durante el montaje, y para identificar productos cuya mala calidad puede acarrear serios daños en la seguridad del trabajador, en la economía de la empresa u otra fatalidad cualquiera. Ejemplos típicos de efectos catastróficos por mala calidad son la fractura de cables, de frenos, de álabes de turbinas, etc.

En este libro se describen algunos métodos sencillos muy usados para inspeccionar los productos fabricados.

### 2.1. Definición de calidad del producto

Usamos términos como **calidad pobre** o **alta calidad** para describir in producto particular, cierto almacén, . . . . ¿Qué es la calidad? Aunque la podemos reconocer en algunos productos, técnicamente es muy difícil de establecer con precisión. Aunque la calidad tiene factores que se pueden definir técnicamente, también depende de opiniones subjetivas, y muchas veces se aprecia por su comparación con la competencia. De todas formas, veamos las definiciones más comunes encontradas en los libros.

1. La adecuación de un producto para su uso.

2. La totalidad de características que determinan la capacidad de un producto para satisfacer una necesidad determinada.
3. Conjunto de atributos de un producto que evitan la "mala calidad".

La primera definición es la más conocida aunque queda muy indeterminada. Más recientemente, algunas dimensiones de la calidad han sido identificadas, incluidas las prestaciones del producto, dimensiones, durabilidad, fiabilidad, estética, y calidad percibida. La segunda definición es más usual y hace referencia a magnitudes concretas con el fin de que el producto sea apto para su uso. La tercera definición es la más fácil de percibir. Como sucede en temas como la salud o la justicia, somos más sensibles a la mala calidad que a la calidad propiamente dicha.

Del mismo modo que la salud es ausencia de enfermedad o nos acordamos de la justicia precisamente donde la injusticia es flagrante, con la calidad pasa lo mismo. La calidad es ausencia de defectos y se suele prestar atención a la calidad especialmente cuando la insatisfacción del cliente hace que se pierdan cuotas importantes de mercado. Al igual que la salud requiere una atención diaria y una mejora continua mediante ejercicios gimnásticos, dieta, vigilancia de peso, etc., así se debe cuidar la calidad y procurar tener rutinas de mejora continua en la producción.

Con la justicia se puede decir lo mismo con su matiz correspondiente. La justicia también se advierte más fácilmente cuando falta que cuando se vive en ella. La falta de justicia provoca malestar, enfados, inestabilidad emocional, y en los casos más graves, desesperanza y guerras. La falta de calidad también genera intranquilidad, sospecha, desconfianza, inestabilidad emocional, pesimismo, etc. Al igual que la justicia, esta no se genera espontáneamente, sino todo lo contrario, espontáneamente sólo se tiende a buscar el propio beneficio sin mirar por los demás. Para conseguir una buena cultura de calidad, se han de superar muchas tendencias humanas hacia la dejadez y el egoísmo.

Por lo tanto, se debe procurar que la calidad en la fabricación no se aborde sólo cuando hay problemas, sino que sea tarea de todos los días marcando objetivos y consiguiendo metas que marquen estándares de trabajo bien hecho y precisión en productos por encima de las empresas de la competencia.

Al contrario de lo que la gente suele creer, un aumento de calidad puede resultar actualmente en una reducción de costes considerando que la calidad pobre trae consigo:

- Coste por insatisfacción del cliente, que puede hacer que se pierda cuota de mercado o todo el mercado.

- Aumenta el número de retrabajos en fabricación, provocando pérdidas considerables de tiempo y disminución de la motivación en el trabajo.
- Aumenta las dificultades en el montaje y en el mantenimiento de los componentes.
- Aumenta el número de reparaciones en campo.
- Un producto defectuoso puede provocar accidentes graves con daños irreparables y pérdidas de vidas humanas.

Entrando en aspectos psicológicos, el esfuerzo por mejorar continuamente la calidad se traduce en la satisfacción del trabajo bien hecho con el efecto multiplicador que la alegría y el entusiasmo trae consigo.

Actualmente es raro considerar la calidad como un coste, más bien se considera una inversión para aumentar la satisfacción del cliente, aumentar la motivación de los trabajadores, y como algo imprescindible para aumentar la productividad, reducir costes crecer en el mercado, y crear puestos de trabajo.

## 2.2. La Calidad en la gestión empresarial

La supervivencia de una empresa depende de que los productos que fabrica satisfaga al cliente en tres aspectos que deben regir la política empresarial: Plazo, calidad y precio. Éstos servicios se asemejan a las tres patas de una mesa (ver Figura 2.1), si faltara una, la mesa no se sostendría. Del mismo modo, la empresa no daría servicio al cliente si fallara en uno de estos tres aspectos. Según la época y las circunstancias se suele poner el énfasis en una u otra pata, pero en cualquier caso, éstas deben ser fiables y equilibradas.

Cada uno de estos aspectos dependen de factores como la productividad, versatilidad, capacidad de gestión, optimización de recursos, etc. Pero lo que resume todos estos aspectos es el esfuerzo continuo por realizar bien todas las tareas. El trabajo bien hecho tanto en sus aspectos técnicos como morales, tienen un efecto multiplicador en la rentabilidad de la empresa. El trabajo bien hecho reduce las reparaciones, los errores, disminuye los retrasos, mejora el uso y mantenimiento de las máquinas, aumenta la seguridad del trabajador, . . . , pero además, y sobretodo, es motivador e involucra más al trabajador en los resultados de la empresa. Esta cadena de mejora que se describe en la figura 2.2 se encuentra en la pizarra de la primera clase de todos cursos de formación de altos ejecutivos desde mediados del siglo XX.

La calidad no es accidental a la empresa sino que debería ser algo sustancial, y afectar a todos los aspectos tanto organizativos, productivos como

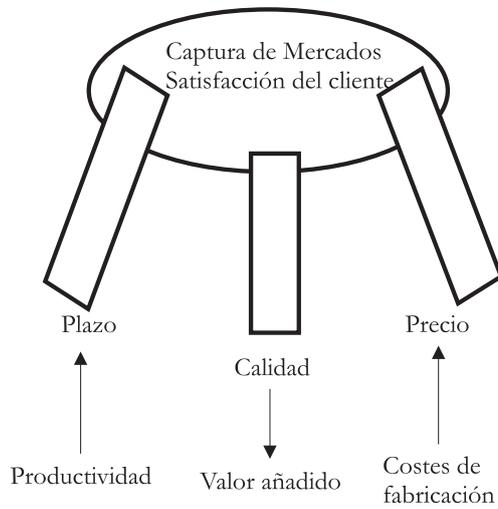


Figura 2.1: Aspectos sobre los que se sostiene la política empresarial de una empresa de producción.

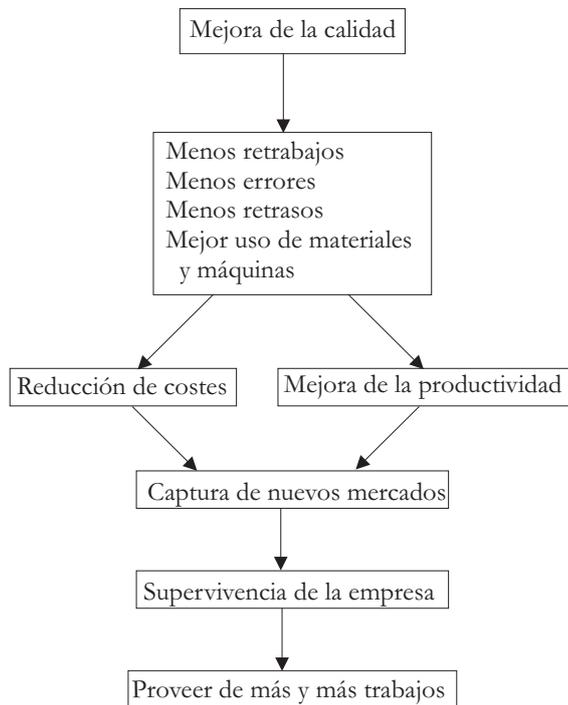


Figura 2.2: Influencia de la mejora de la calidad en la expansión de la empresa.

de relación con los proveedores y clientes. Es como un perfume que hace que la empresa esté contenta consigo misma, y además, mejora las relaciones de confianza y amistad con clientes y proveedores.

### **2.2.1. Normalización**

Para asegurar que la empresa se ocupe de algo que debería ser esencial en ella como es la calidad, la Organización Internacional de Normalización (ISO) ha elaborado unas normas (ISO 9000) que ayudan a incorporar algunos de los múltiples aspectos que lleva consigo tener una política empresarial sobre calidad. La implantación de estas normas fue una de tantas modas que las han seguido sobre aspectos que también deberían ser sustanciales y estar grabados en el mismo ser de las empresas, así ha ocurrido con aspectos como el respeto al medio ambiente (ISO 14000), la seguridad y prevención de riesgos (OHSAS 18001), y es previsible que aparezcan otras normas que toquen aspectos morales de la empresa como la formación continua, la innovación, la deontología empresarial, etc. Todas estas normas se pueden asumir de dos formas, o bien se toman como un trámite burocrático más, o bien asumir el espíritu que late detrás de ellas, de forma que se integren como algo sustancial dentro de los fines de la empresa. Con el reconocimiento oficial de tener implantadas estas normas, se genera una red de confianza empresarial que ahorra numerosos costes de inspección y ensayo.

## **2.3. Filosofías respecto a la Calidad**

Algunos expertos en control de calidad han descrito su propio concepto de calidad estableciendo como unos primeros principios de los cuales derivan todas las elaboraciones prácticas que presentan sus sistemas de calidad. Entre estos expertos cabe destacar Deming, Juran y Taguchi por el impacto que han tenido y siguen teniendo en la industria actual. Todas sus observaciones han quedado como diversas formas prácticas de asegurar la calidad, que se traducen en una gestión empresarial según un sistema de gestión de calidad total (TQM)

### **2.3.1. Aseguramiento de la Calidad**

El **Aseguramiento de Calidad** se puede definir como todas las acciones necesarias para garantizar que se cumplirán todos los requisitos de calidad. Es el esfuerzo total que un fabricante hace para garantizar que su producto es conforme a un conjunto detallado de especificaciones y normas. Mientras que

**Control de Calidad** es el conjunto de técnicas operacionales usadas para cumplir los requisitos de calidad. La suma de todas las actividades se denomina **Total Quality Management (TQM)**.

### 2.3.2. Métodos de Deming

W.E. Deming (1900-1993) es famoso por las conferencias que impartió a empresarios japoneses después de la 2da guerra mundial, y a él se atribuye el despegue industrial de Japón. Posteriormente es recordado por sus 14 puntos por los cuales identifica a la fábrica que produce productos de alta calidad.

### 2.3.3. Juran Methods

J.M. Juran (1904-2008) estadounidense de origen rumano, falleció el 28 de febrero de 2008 a la edad de 103 años, resalta las siguientes ideas:

- Reconocer la calidad en todos los niveles de una organización, incluida la alta dirección
- Fomentar una cultura corporativa de responsabilidad
- Entrenar a todo el personal en planificar, controlar y mejorar la calidad

Su libro **Manual de Control de Calidad** en dos tomos es ampliamente utilizado en la industria y ha sido la base para el establecimiento de las normas de calidad ISO 9000.

### 2.3.4. Taguchi Methods

G. Taguchi (1924- ) resalta la importancia de :

- Reforzar la interacción entre equipos multidisciplinares, sobre todo entre los ingenieros de diseño y los ingenieros de fabricación
- Implementación de un diseño experimental en los que los factores involucrados en un proceso o operación y sus interacciones son estudiadas simultáneamente. Esto se realiza mediante un análisis factorial y con el uso de matrices ortogonales, de forma similar a como lo hace el Diseño de Experimentos. Actualmente estas matrices están desaconsejadas desde ámbitos académicos por contener fallos, y se prefiere usar los métodos de Fisher por ser más rigurosos matemáticamente.

Entre los conceptos aportados por Taguchi se encuentran la robustez y la función de pérdida de calidad.

## 2.4. Despliegue Funcional de la Calidad

Actualmente se considera que hay una conexión entre el cumplimiento de los requisitos de uso, o satisfacción del cliente y los parámetros de producción, y todo ello a través de los requisitos técnicos, las especificaciones de productos y los elementos del proceso. Para establecer estas relaciones se puede usar el Despliegue Funcional de la Calidad, más conocido como “Casa de la calidad” debido a la forma que tienen sus diagramas. En el ejemplo de las figuras 2.3 y 2.4 se representa cómo afecta el valor del apriete en la sujeción de una biela en el ruido o durabilidad del motor, a través de su influencia en el sistema de producción, en las especificaciones técnicas de la biela y éstas en los requisitos técnicos del mecanismo, y finalmente éstos en los requisitos de uso.

## 2.5. Práctica a realizar en grupo

Realizar un DFC sobre el espejo retrovisor de un automóvil. El trabajo se realizará en equipo y se entregará al profesor el resultado y recomendaciones para el estudio de la mejora de la calidad.

## 2.6. Test de competencias adquiridas y tiempo de trabajo

Realizar un listado de competencias adquiridas con la práctica sobre el DFC. Poner ejemplos de aplicación en la industria regional. Preparar presentación a un empresario sobre la conveniencia de este tipo de análisis.

Evaluar el tiempo utilizado para realizar la práctica por primera vez. ¿Cuanto tiempo requeriría una persona entrenada y con práctica en realizar el mismo trabajo?.

		Requisitos técnicos		
		Ajuste en mecanismos	Emisión de gases	Sistema de refrigeración
Requisitos cliente	No ruido			
	Durabilidad			
	Bajo coste			
	Bajo consumo de combustible			

		Especificaciones producto		
		Tolerancia agujero	Redondez	Perpendicul.
Requisitos técnicos	Ajuste			

Figura 2.3: Diagramas funcionales de la calidad del producto (motor de coche) y de la pieza (biela).

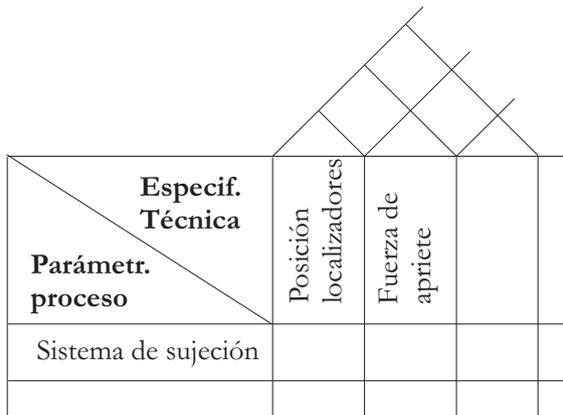
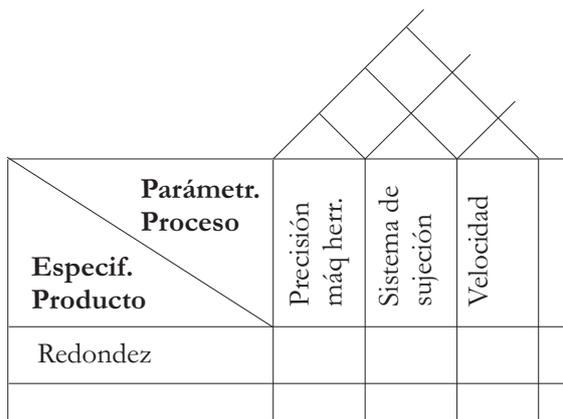


Figura 2.4: Diagramas funcionales de la calidad del proceso (mandrinado de biela) y de la operación (amarre).



## Tema 3

---

# Sistemas de Calidad

### 3.1. Normalización

Las características del mercado global han creado la necesidad de establecer una homogeneidad internacional mediante consenso de unos métodos para el establecimiento de la calidad, fiabilidad y seguridad de los productos. A la hora de demostrar a terceros la capacidad de calidad de una empresa y de sus productos sin tener que realizar costosos controles individuales o estadísticos sobre cada productos, la normalización de conceptos y métodos de gestión de calidad se ha mostrado eficaz y es lo que ha hecho que se haya extendido por casi todas las empresas. El cumplimiento y certificación de empresas con ISO 9000 facilita que se sea proveedor de otra empresa con la ISO 9000. El cumplimiento y acreditación o de la ISO 17025 para los laboratorios de calibración permite realizar calibraciones de equipos de ensayo en empresas con la ISO 9000. El certificado ISO 9000 lo expide AENOR (Asociación Española de Normalización), la acreditación ISO 17025 lo expide la ENAC (Entidad Nacional de Acreditación). Ambos documentos tienen validez internacional.

Un componente fundamental de un sistema de gestión de la calidad es el manual de la calidad, como documento base, parte del cual está disponible a todos los empleados y a los clientes externos. En este manual queda reflejado el sistema de calidad y de su seguimiento fiel se obtiene y se mantiene el certificado de calidad que le imprime un sello de cara a los clientes. Para la obtención y manutención del certificado se realizan frecuentes auditorías internas y externas.

## 3.2. Conceptos y definiciones en la gestión de la calidad

La norma ISO 8402 recoge la definición de términos relacionados con la calidad. Como extracto se recogen aquí algunos:

- **Calidad:** Conjunto de características de una entidad que le confieren la aptitud para satisfacer las necesidades establecidas y las implícitas.
- **Política de calidad:** Directrices y objetivos generales de una organización relativos a la calidad, tal como se expresan formalmente por la alta dirección.
- **Gestión de la calidad:** Conjunto de actividades de la función general de la dirección que determina la política de la calidad, los objetivos y las responsabilidades. Se implanta por medios tales como la planificación de la calidad, el control de la calidad, el aseguramiento de la calidad y la mejora de la calidad, en el marco del sistema de calidad.
- **Sistema de la calidad:** Estructura organizativa, procedimientos, procesos y recursos necesarios para implantar la gestión de la calidad.
- **Aseguramiento de la calidad:** Conjunto de acciones planificadas y sistemáticas implantadas dentro del sistema de la calidad y demostrables, si es preciso, para proporcionar la confianza adecuada de que una entidad cumplirá los requisitos para la calidad.

De igual modo se dan definiciones de producto, fabricante, proveedor o suministrador, proceso, . . . .

## 3.3. Normativa de la ISO 9000

La serie ISO 9000 incluye las siguientes normas:

- **ISO 9000:** Normas para la gestión de la calidad y el aseguramiento de la calidad. En esta norma se establecen las directrices para selección y utilización de las restantes normas de la serie, así como una guía para el desarrollo, instalación y mantenimiento de programas informáticos.
- **ISO 9001:** Modelo de aseguramiento de la calidad en el diseño, producción, instalación y servicio. Representa las mayores exigencias al sistema de gestión de la calidad del proveedor. Se aplica en los casos en los que la relación cliente-proveedor se extiende a todas las etapas de la generación del producto.

- **ISO 9002:** Modelo para el aseguramiento de la calidad en la producción y en la instalación. Se aplica a empresas subcontratistas que fabrican productos según planos y especificaciones definidos por el cliente.
- **ISO 9003:** Modelo para el aseguramiento de la calidad en la inspección final y en los ensayos. Se aplica cuando el cliente simplemente requiere la justificación de que los productos cumplen las especificaciones exigidas.
- **ISO 9004:** Gestión de la Calidad y elementos de un sistema de calidad: Líneas de actuación

Además de las normas ISO 9000 hay otras dos normas que complementan las de esta serie:

- **ISO 10011:** Reglas generales para las auditorías de los sistemas de calidad.
- **ISO 10013:** Guía para el establecimiento de un manual de calidad.

### 3.4. Elementos de los sistemas de gestión de la calidad

La estructura de la ISO 9000 sigue al ciclo del producto. Primero se evalúan las responsabilidades de la dirección de la empresa y de los empleados (1) que se plasman en documentos (2), se establecen requisitos de contrato (3), se controla el diseño con sus documentos y datos (4, 5), se realizan las compras a los proveedores (6, 7), se fabrican los productos (8, 9), se inspeccionan con equipos aptos (10, 11, 12), se da salida a los productos no conformes (13), se establecen acciones de mejora en vista de los resultados obtenidos (14), los productos se manipulan, embalan y envían (15) registrando sus datos (16), todo el sistema descrito en los puntos anteriores se auditan frecuentemente (17), se forma al personal involucrado en la calidad del producto (18), y al final se establecen los requisitos de calidad en el servicio postventa (y 19).

Estos puntos en los que está estructurado la norma se pueden organizar dentro del manual de calidad en los siguientes capítulos:

1. Control y organización: son los puntos 1, 2, 17, y 14.
2. Recursos productivos: en donde se englobarían los puntos 18, 11, 5, 16, y 20.
3. Producto o estado: puntos 7, 8, 12 y 13

4. Proceso o etapa: puntos 3, 4, 6, 9, 10, 15, y 19,

Esta organización puede facilitar la legibilidad y la búsqueda rápida de documentos o procedimientos. Lógicamente no se debe perder la referencia a la norma madre lo cual se realiza mediante tablas cruzadas de correspondencia, esto facilita la labor de auditoría del sistema.

### 3.5. Manual de Calidad

El manual de calidad es el documento base en donde queda reflejado el sistema de calidad, y de donde parten las referencias, a los documentos y carpetas donde se detallan las partes técnicas de la gestión. Normalmente tiene forma de carpeta de anillas cuyas hojas son intercambiables, y cada capítulo o sección contiene en su primera página además del título y la fecha de emisión, la firma de la autorización, de difusión, y de confirmación de lectura por parte de las personas involucradas.

Los párrafos de las distintas secciones conviene que estén enumeradas, y esa enumeración reflejarse en la tabla de correspondencias con los párrafos de la norma ISO 9001.

Habitualmente tiene tres partes:

1. Capítulos de introducción
2. Disposiciones para conseguir la calidad, entre los cuales se encuentran los procedimientos generales y los procedimientos específicos.
3. Anexos entre los que se encuentra el vocabulario, las tablas de correspondencia, etc.

### 3.6. Normativa ISO 14000

Al igual que se ha realizado con la calidad, el impacto ambiental de los productos, también pueden estar sujetos a normativa, en concreto a la norma ISO 14000. Las actividades que regula pueden ser internas o externas a la compañía.

Las actividades que regula esta norma abarcan desde la producción hasta la retirada de servicio del producto, e incluye los efectos sobre el entorno que producen estas actividades como son la polución, la generación de desechos y su disposición, ruido, impacto sobre los ecosistemas y los recursos naturales, y el uso de la energía.

## Tema 4

---

# Los 14 puntos de Deming

W.E.Deming (1900-1993) es famoso por las conferencias que impartió a empresarios japoneses después de la 2da guerra mundial, y a él se atribuye el despegue industrial de Japón. Posteriormente es recordado por sus 14 puntos por los cuales identifica a la fábrica que produce productos de alta calidad.

### 4.1. Los 14 puntos

Según el Dr. Deming, los 14 puntos son la base para la transformación de la industria. La adopción y acción sobre los 14 puntos son la señal de que la gestión pretende que la empresa permanezca en el mercado y, de esta manera, proteja a los inversores y los trabajos.

Los 14 puntos se aplican sobre cualquier tipo de organización, pequeña o grande, de fabricación o de servicios, se puede aplicar a una división dentro de una compañía.

Los 14 puntos están enumeradas según las siguientes subsecciones:

#### 4.1.1. **Crear un ambiente de constancia en el propósito de mejorar la calidad de los productos y servicios.**

Con el objetivo de llegar a ser competitivos, permanecer en el negocio, y proveer empleos, el Dr. Deming sugiere mejorar la innovación, la investigación, el constante mejoramiento y el mantenimiento.

### **4.1.2. Adoptar la nueva filosofía.**

Estamos en una nueva era económica. Las empresas occidentales deben despertarse para el cambio que se avecina. Debe aprender sus responsabilidades y asumir el liderazgo para el cambio. Para el nuevo gestión, la palabra control significa conocimiento, especialmente conocimiento de la variación y de los procesos. La nueva filosofía comprende educación continua, entrenamiento y alegría en el trabajo.

### **4.1.3. Dejar de depender de la inspección en masa para conseguir la calidad.**

Para dejar de dependes de la inspección en mase es necesario construir la calidad, en primer lugar, en el producto.

La inspección que se hizo con el ánimo de descubrir los productos malos y retirarlos es demasiado tardía, ineficaz y costosa manifiesta el Dr. Deming. La calidad no se produce por la inspección sino por el mejoramiento del proceso. La Calidad debe ser diseñada en el producto desde el principio, no puede crearse a través de la Inspección. La inspección provee información sobre la calidad del producto final, pero el costo de los defectos son pasados al consumidor aunque éste solo reciba productos de primera calidad. La inspección hace que el trabajador desplace la responsabilidad de la Calidad al inspector. La inspección no detectará problemas endémicos en el sistema. El grueso de los problemas son del Sistema y el mejoramiento de éste es responsabilidad de la Gerencia.

### **4.1.4. Acabar con la práctica de premiar al proveedor sobre la base del índice de precios.**

En su lugar, es más preferible moverse hacia un solo proveedor para cualquier materia prima, para poder establecer una relación a largo plazo estable, basada en la lealtad y la confianza.

Tiene tres serias desventajas: La primera es que, casi invariablemente, conduce a una proliferación de proveedores. La segunda es que ello hace que los compradores salten de proveedor en proveedor. Y la tercera, que se produce una dependencia de las especificaciones, las cuales se convierten en barreras que impiden el mejoramiento continuo.

#### **4.1.5. Mejorar constantemente y siempre el sistema de producción y servicio.**

De este modo, mejora la calidad y la productividad, y así disminuir constantemente el coste.

Cuando se mejora un proceso, se mejora el conocimiento del mismo al mismo tiempo. La mejora del producto y del proceso van unidos con una mayor comprensión y una mejor toma de decisiones.

#### **4.1.6. Instituir el entrenamiento en el trabajo.**

Es muy difícil borrar la capacitación inadecuada, dice el Dr. Deming: Esto solamente es posible si el método nuevo es totalmente diferente o si a la persona la están capacitando en una clase distinta de habilidades para un trabajo diferente.

#### **4.1.7. Instituir el liderazgo.**

El fin que persigue el líder debe ser ayudar a sus subordinados a realizar un trabajo mejor. Las tareas de supervisión son en realidad un incómodo sobretodo cuando se supervisa a los subordinados.

Un líder reconoce las destrezas, los talentos y las habilidades de los que trabajan con él. No es un juez. Ese conocimiento le permite detectar cuándo alguien está fuera de control (por alguna causa accidental, su trabajo produce productos que en el gráfico de control estaría fuera de los límites) y tomar la acción adecuada.

#### **4.1.8. Desterrar el miedo.**

Nueve de los catorce puntos tienen que ver con el miedo. Sólo eliminándolo puede la gente trabajar con eficacia a favor de la Empresa. El miedo viene de una fuente conocida. La ansiedad viene de una fuente desconocida. Entre los dos, el miedo es preferible. Cuando el miedo es utilizado para mejorar el desempeño individual, esta meta no se logra. Por el contrario, una gran parte del esfuerzo en la organización occidental se destina a utilizar el miedo para conseguir objetivos, a expensas del desempeño más propio de la Empresa. El miedo es lo que favorece que los números se amañen y los operarios tomen otras acciones en detrimento de la Compañía. También puede ocurrir que los operarios traten de desplazar el problema a otra área de la Compañía.

#### **4.1.9. Derribar las barreras que hay entre departamentos.**

Los empleados que se dedican a la investigación, diseño, ventas, y producción deben trabajar en equipo para preveer problemas en la producción y en el uso de los productos o servicios.

Cuando los departamentos persiguen objetivos diferentes y no trabajan en equipo para solucionar los problemas, para fijar las políticas o para trazar nuevos rumbos. Aunque las personas trabajen sumamente bien en sus respectivos departamentos, dice el Dr. Deming, si sus metas se desvían hacia conflictos internos, pueden arruinar a la compañía. Es mejor trabajar en equipo, trabajar para el bien común de todos que es el bien de la compañía.

#### **4.1.10. Eliminar los slogans, las exhortaciones y los objetivos numéricos.**

Las exhortaciones a los empleados exigiéndoles cero defectos y nuevos niveles de productividad, sólo crean enfrentamientos entre sí en el afán de echar la culpa a otro. Estas relaciones adversas son la principal causa de la baja calidad y baja productividad. Ésta causa proviene del sistema y, por lo tanto, está más allá del alcance del trabajador.

Los slogans, dice el Dr. Deming generan frustraciones y resentimientos. Una meta sin un método para alcanzarla es inútil. Fijar metas sin describir cómo han de lograrse es una práctica común entre los gerentes occidentales. Un trabajador no puede lograr mejor calidad de lo que el sistema le permite. Las exhortaciones crean una reacción adversa por cuanto el 94 % de los problemas de calidad son causados por el sistema (causas comunes), y sólo 6 % por causas especiales. El papel de la dirección es trabajar sobre el sistema para mejorarlo continuamente, con la ayuda de todos.

#### **4.1.11. Eliminar las cuotas numéricas y la dirección por objetivos.**

Este punto tiene dos partes diferenciadas. Por una parte, la eliminación de cuotas de producción en planta de fabricación, debiéndola sustituir por el liderazgo. Por otra parte, se pretende eliminar los objetivos numéricos también a nivel más general, lógicamente mediante el empuje de un liderazgo bien llevado.

Las cuotas u otros estándares de trabajo tales como el trabajo diario calculado sostiene el Dr. Deming, obstruyen la calidad más que cualquier otra

condición de trabajo. Los estándares de trabajo garantizan la ineficiencia y el alto costo. A menudo incluyen tolerancia para artículos defectuosos y para desechos, lo cual es no deja de ser un autoengaño de la dirección, ya que por cumplir con unos números ha permitido rebajar el nivel de calidad necesario para permanecer en el mercado.

#### **4.1.12. Derribar las barreras que impiden el orgullo de hacer bien un trabajo.**

Al igual que en el anterior punto, éste se presenta a dos niveles, tanto en el empleado de fábrica como en la dirección e ingeniería. Esto significa que los supervisores deben fijarse más en la calidad que en los números bonitos, y que la dirección deje de trabajar con la obsesión de cumplir unos números a final de año (dirección por objetivos).

Una de las prácticas más perniciosas es la evaluación anual por méritos, destructor de la motivación intrínseca de la gente; es una forma fácil de la Gerencia para eludir su responsabilidad.

#### **4.1.13. Instituir un programa vigoroso de educación y auto-entrenamiento.**

Se puede lograr productividad en varias formas: Mejorando la maquinaria existente, rediseñando los productos y el flujo de trabajo, mejorando la forma en que las partes trabajan juntas, pero el conocimiento y destrezas de los individuos son la verdadera fuente de mejora.

#### **4.1.14. Involucrar a todos los miembros de la compañía en la transformación.**

La transformación de la empresa para su adaptación a los catorce puntos anteriormente señalados no se puede llevar a cabo sin la concienciación de todos y cada uno de los agentes involucrados, empezando por la dirección que debe ser la primera en poner en práctica todos los puntos.

1. Los miembros de la alta gerencia han de luchar por lograr cada uno de los trece puntos anteriores y por eliminar las enfermedades mortales y los obstáculos.
2. Los miembros de la alta gerencia deben sentirse apenados e insatisfechos por el desempeño pasado y deben tener coraje para cambiar. Deben abandonar el camino trillado y lanzarse a hacer nuevas cosas,

incluso hasta el punto de ser marginados por sus colegas. Debe existir un ardiente deseo de transformar su estilo de gerencia.

3. Mediante seminarios y otros medios, la alta gerencia debe explicarle a una masa crítica de la compañía, porque es necesario el cambio y que en el cambio participaran todos. Un número adecuado de personas de la compañía deben entender los catorce puntos, las enfermedades mortales y los obstáculos. De no ser así la alta gerencia estaría perdida.
4. Toda actividad es un proceso y puede ser mejorado. Para trabajar en el ciclo Shewhart, todos deben pertenecer a un equipo, con objeto de tratar uno o más asuntos específicos. La Transformación es responsabilidad de todos, pero en el núcleo del cambio requerido está la necesidad de cambiar nuestra forma de pensar sobre aspectos cruciales. El reto mayor de Deming a la Gerencia es cambiar la forma como tratamos a la gente. Esto es lo que determinará si "verdaderamente" nos insertaremos en el futuro.

## 4.2. Las enfermedades mortales

Junto a los 14 puntos, Dr. Deming señala las 7 enfermedades principales de una organización:

1. Carencia de constancia en el propósito de planificar el producto y servicio que crea el mercado y mantiene a la compañía en el negocio, y provee de trabajos.
2. Buscar excesivamente los beneficios a corto plazo: el pensar a corto plazo está alimentado por el miedo a fusiones inamistosas, y por proporcionar dividendos a banqueros y accionistas.
3. Evaluación del trabajo mediante rankings de méritos, o de resúmenes anuales.
4. Movilidad de la gestión y la esperanza de trabajo.
5. Trabajo por sólo cifras numéricas visibles, con poca o nula consideración de las cifras que son desconocidas y los valores que no tienen cuantificación.
6. Costes médicos excesivos.
7. Costes excesivos en abogados que cobran tasas altas por posibles contingencias.

## Tema 5

---

# Círculos de Calidad

### 5.1. Introducción

Los círculos de calidad son un programa a través del cual grupos de trabajadores se reúnen para analizar sus problemas y proponer soluciones en el lugar de trabajo. Son parte de un movimiento de gerencia democrática que busca ampliar la participación de los trabajadores en el control y en la administración de las empresas.

El origen de los círculos de calidad es consecuencia lógica del deseo de implantar la calidad total en la empresa con los conceptos de mejora continua, trabajo en equipo y mayor intervención del trabajador. La primera vez que apareció su metodología fue en la revista japonesa “Control de Calidad.”<sup>en</sup> 1962 y fue el profesor Ishikawa de la Universidad de Tokio, el que dió forma a los cursos que se realizarían en Japón para su difusión. Actualmente, se estima que más de 15 millones de japoneses participan en programas de círculos de calidad.

#### 5.1.1. Objetivos de los Círculos de Calidad

Los objetivos que se persiguen en la elaboración de un programa de círculo de calidad se pueden distinguir entre los objetivos generales y los específicos. En cualquier caso se basan en tratar de dirigir todas las energías humanas hacia el objetivo de la mejora continua de la calidad, respetando la naturaleza del hombre como ser social e inteligente, buscando que se sienta más persona.

Los objetivos fundamentales serán los siguientes:

1. Mejorar las habilidades de liderazgo y administración del supervisor y auxiliares en el taller y estimular el mejoramiento de sus actividades por medio del auto desarrollo.
2. Incrementar la motivación del trabajador para aumentar el nivel de producción y crear simultáneamente un medio en el cual todos sean más conscientes de la importancia de la calidad y de la necesidad de un mejoramiento.
3. Funcionar como un núcleo del control de calidad total de la empresa en el ámbito del taller, por ejemplo, los círculos de calidad proporcionan una base efectiva para conocer e implantar las políticas establecidas por la gerencia y alcanzar el aseguramiento de la calidad.

Los objetivos específicos y concretos que se buscan en la ejecución del programa de círculo de calidad son:

1. **Construir un lugar de trabajo sólido.**

En el lugar de trabajo debe haber un ambiente de respeto y cooperación entre el encargado y los subordinados, creando un clima de confianza.

2. **Establecer un estado de control.**

Un lugar de trabajo bien controlado cumple las normas adecuadas, y tiene concretadas las medidas preventivas y correctivas, procurando eliminar todo lo que puede ser causa de disconformidades.

3. **Mejorar la motivación y las relaciones humanas.**

La motivación es uno de los factores más difíciles de controlar, sin embargo, el enriquecimiento de las relaciones humanas contribuye grandemente en su logro. Para ellos se deben tomar las siguientes medidas:

- a) *Mejoras en el ámbito de taller*, en donde los propios operarios son los que más tienen que decir.
- b) *Voluntariedad en las actuaciones*. Las medidas que se tomen en los círculos las tiene que hacer cada uno como propias, aumentando la propia responsabilidad ante sí mismo y ante los demás.
- c) *Mejores ingresos*. La mejora de la calidad se traduce, además de en un mayor valor añadido del producto, en un aumento de la productividad y en una reducción de costes. Por lo tanto, La consecuencia lógica es que los salarios aumenten. La expectativa de un aumento salarial es parte importante en la motivación del trabajador.

### 5.1.2. Implantación de un programa de Círculos de Calidad

Para que el círculo de calidad cumpla los objetivos, su organización debe ser lo bastante sólida como para que se tenga la sensación de aprovechar el tiempo en el transcurso de la reunión. El esquema diseñado por el profesor Ishikawa es el más extendido y es el que mostramos a continuación.

#### Componentes del círculo de calidad

Los componentes del círculo de calidad son personas que tienen en común alguna área de la empresa y de la que deben responder ante la dirección. La coordinación, las posibles suplencias en tareas encomendadas, la comprensión y apoyo mutuo son esenciales en el buen ambiente creado entre las personas, y es bueno que todos sientan la responsabilidad de solucionar hasta los más pequeños problemas aunque a alguno no le toque directamente. Además deben sentirse plenamente apoyados desde la dirección de la empresa.

Los componentes esenciales del círculo son pues:

- **Representante de la gerencia.** Debe tener el suficiente poder para obtener los fondos para que las mejoras que se propongan lleguen a buen término. Su actitud es fundamental para que sin perder la autoridad, los miembros del círculo sientan la empresa como cosa propia.
- **Líder del grupo.** El encargado o supervisor, debe tratar de ser el líder natural dentro del grupo que tiene encomendado una tarea de la dirección. Es la persona investida con la mayor autoridad, y conviene que esa autoridad también sea moral. Ha de ir siempre por delante y predicar con el ejemplo. Conocer a la perfección las tareas que realizan los subordinados, y con capacidad para sugerir mejoras en los procesos. En la reunión del círculo su autoridad formal debe cesar siendo necesario que logre sus objetivos mediante la persuasión y con argumentos lógicos. Además, debe estar preparado para recibir críticas y valorar en mucho las opiniones del resto del círculo. Tendrá capacidad para dar soluciones y demostrando al resto de círculo la validez de esas soluciones.
- **Coordinador o facilitador.** Es un miembro imparcial del círculo (su misión no es dar opiniones), centrando su misión en reclutar voluntarios, proveer de entrenamiento a los líderes de grupo, explicar la importancia del círculo a los gerentes, recoger información de los miembros del grupo para preparar el guión de la reunión, de modo que se realice

con la mayor agilidad posible. Recoge las conclusiones de cada círculo y las da a conocer al resto. Deberá estar familiarizado con los procesos productivos, con la situación laboral de cada miembro del círculo, etc.

- Obreros o subordinados. Son la parte más importante del programa, y requieren atención especial, pues son los que mejor pueden plantear los problemas que tienen, no deben sentirse cohibidos para sincerarse, y decir los problemas reales en el puesto de trabajo.

### Proceso del círculo

El proceso del círculo de calidad tiene los siguientes subprocesos:

1. Identificación de problemas. El facilitador procurará ir a la reunión con el listado y observaciones que habrá recogido de los empleados.
2. Estudio a fondo de las técnicas para mejorar la actividad y diseño de soluciones. Durante la reunión se realizan diagramas causa-efecto, se recopilan estudios anteriores relacionados, etc. Entre todos se plantea la solución más idónea. Muchas veces se requerirá la intervención de otro departamento, o de investigadores más especializados. La presencia de un miembro de la gerencia facilita la intercomunicación entre departamentos y afrontar el posible gasto que la mejora lleve consigo.
3. Explicar a la máxima dirección las conclusiones del círculo, valorando ésta la conveniencia o pidiendo informes técnicos para la toma de decisiones.
4. Ejecución de la solución por parte de la organización general.
5. Evaluación del éxito de la propuesta por parte del círculo y de la organización.

### 5.1.3. Riesgos de fracaso del círculo

Cuando algunas empresas occidentales intentaron implantar los programas de círculos de calidad, las primeras de ellas fracasaron, teniendo que pasar varios años hasta que el modelo japonés fuese realmente exportable. Las causas principales del fracaso fueron:

- Falta de comprensión y respaldo por la dirección de la empresa.
- Los temas de estudio o los puntos elegidos para abarcar en la reunión son inapropiados.

- Los círculos se alejan de los problemas reales.
- Se presentan datos truncados.
- Reuniones largas sin tratar bien los temas. Las conversaciones se desvían hacia temas ajenos a los objetivos propios del círculo.
- Faltan nuevas ideas. Un sentido crítico excesivo puede matar muchas posibles soluciones.
- El facilitador o la gerencia no es imparcial en el trato de los asuntos. Perdiendo la gente la motivación necesaria para exponer los problemas.
- El supervisor no es persona apropiada para el puesto, o no tiene la actitud necesaria en las reuniones.
- ...



## Tema 6

---

### Las 5 S

Hay una verdad evidente muchas veces no percibida: «No puede hacerse calidad en una oficina desordenada o en una fábrica sucia», de aquí que mejorar la organización, el orden y la limpieza es el primer paso para hacer calidad y para aumentar la productividad y la seguridad. Otras ventajas que se consiguen son las siguientes: Menos productos defectuosos, menos averías, rápidas reparaciones, menos accidentes, menos movimientos y traslados inútiles, más espacio, mejor imagen ante clientes, mejor conocimiento del puesto, etc.

En Toyota se desarrolló un programa conocido internacionalmente como las 5S, que son las iniciales de cinco vocablos japoneses que se corresponden con las cinco fases de dicho programa.

1. **Organización** (seiri): Consiste en identificar y separar los materiales necesarios de los innecesarios y en desprenderse de estos últimos.
2. **Orden** (seiton): Se establece el modo en que deben ubicarse e identificarse los materiales necesarios, de manera que sea fácil y rápido encontrarlos, utilizarlos y reponerlos.
3. **Limpieza** (seiso): Se identifican y se eliminan las fuentes de suciedad, asegurando que todos los medios están en perfecto estado de uso.
4. **Control visual** (seiketsu): Se establecen normas visuales para distinguir fácilmente una situación normal de otra anormal.
5. **Disciplina y hábito** (shikshuke): Consiste en trabajar permanentemente de acuerdo con las normas establecidas.

Bakaert Consulting S.L. ha desarrollado la metodología OOL©(Organización, orden, limpieza) como guía en la implantación de los contenidos de las 5S. Para cada fase se siguen los pasos enumerados a continuación:

1. Formación
2. Preparación del paseo
3. Paseo
4. Análisis de mejoras
5. Ejecución de acciones de mejora
6. Acciones de consolidación
7. Indicadores

Como resultado de cada una de las fases conviene servirse de planos del área a cubrir, plantillas para listar, cámaras de fotos para analizar y etiquetas para marcar.

## 6.1. Organización

Organización es identificar, clasificar, separar y eliminar del puesto de trabajo todos los materiales innecesarios, conservando todos los materiales necesarios que se utilizan.

Material innecesario es el que no se prevé utilizar en el futuro, y el necesario es aquel que no existe duda sobre su próxima utilización.

En esta fase se practica los valores de desprendimiento, veracidad y sinceridad, pues cuesta desprenderse de cosas y la imaginación tiende a encontrar utilidad a todo. Un indicador sobre la necesidad de un artículo es apuntar cuántas veces se ha usado el último mes. La descripción de los materiales ha de seguir las 3C (clara, concisa, completa), y debe estar jerarquizada según la frecuencia de uso, tanto si son necesarios como si son dudosos. Éstos últimos artículos se incorporan a un almacén o a un lugar donde se puede permitir cierto tiempo para su hallazgo, dada la poca o nula frecuencia de uso.

La preparación del paseo consistirá en elaborar una hoja de cálculo con lista de materiales necesarios con los siguientes campos: número de etiqueta, descripción, tipo (según una clasificación establecida previamente), cantidad disponible, la deseada, el tipo de uso, la frecuencia de uso, el usuario, ubicación, y observaciones.

También se hacen listados de materiales innecesarios con posibles salidas o reutilizaciones.

Se analizan las causas de aparición de materiales innecesarios y se proponen soluciones, y se adecúan la disponibilidad de los materiales necesarios, estableciendo acciones de consolidación para que nunca falten.

## 6.2. Orden

Ordenar es establecer la manera en que los materiales necesarios deben ubicarse e identificarse para que "cualquiera" pueda encontrarlos, usarlos y recolocarlos en el mismo sitio de forma fácil y rápida.

Esta fase es importante para aumentar la productividad ya que debido a la falta de orden se pierde tiempo en búsquedas y se desconoce qué tenemos o qué nos falta en el lugar de trabajo, provocando parálisis innecesarias.

Un concepto necesario para establecer el orden es la identificación: Un nombre para cada cosa, y cada cosa para un sólo nombre.

Hay una identificación referida a la ubicación: MACRO horizontal (layout) y MACRO vertical (estanterías, paredes). La identificación MICRO es la que se coloca sobre el material necesario (denominación, referencia, cantidad, ubicación,...).

En la preparación del paseo se elaboran planos del área vertical y horizontal. La hoja de cálculo de identificación MACRO contiene los siguientes campos: número, denominación, identificación horizontal (con dimensión, forma, marca, color), identificación vertical (con contenido, número, tipo, dimensión, soporte, fijaciones), y observaciones. La hoja de identificación MICRO tendrá los siguientes campos: número, contenido (denominación, referencia, cantidad, ubicación, otros), soporte, lugar fijación, observaciones.

En el análisis de mejoras se decide la distribución de las zonas de trabajo, la ubicación de los materiales necesarios, y el cómo se almacenan. Los criterios que guían las mejoras son el aseguramiento de un acceso rápido y un control visual de las carencias o desórdenes.

Las acciones de consolidación son importantes para asimilar los criterios y rentabilizar el orden establecido.

## 6.3. Limpieza

Limpiar es mantener limpio el puesto y su entorno. En otras palabras, asegurar que todo se encuentra siempre en perfecto estado de uso.

La limpieza implica identificar y eliminar las fuentes de suciedad, los lugares difíciles de limpiar, los apaños y las piezas deterioradas o dañadas, y establecer y aplicar procedimientos de limpieza. Debe predominar el enfoque preventivo: siempre se trata de evitar que se ensucie más que limpiar.

Para preparar el paseo se elaboran cuatro hojas de cálculo para identificar: las fuentes de suciedad, los lugares difíciles de limpiar, los apaños y las piezas deterioradas o dañadas en las que además de la identificación y descripción, se detalle una propuesta de solución.

Como resultado del análisis de mejora se establecerán las acciones para prevenir, con un plan de revisiones frecuentes. También se elaborarán etiquetas para los lugares y fuentes para un mantenimiento preventivo adecuado.

## 6.4. Control visual

El control visual consiste en distinguir fácilmente una situación normal de otra anormal mediante normas visibles para todos. Para que sea eficaz, requiere que se defina también cómo actuar en caso de desviación.

En la preparación del paseo se elabora la hoja con los elementos a controlar visualmente con los campos: número, máquina o instalación, elemento a controlar, norma de trabajo, tolerancia, cómo se identifica, acciones correctoras.

En el análisis de mejoras se procurará que los indicadores de normalidad se vean fácilmente, que estén situados sobre los elementos a controlar y que sean fáciles de interpretar por cualquiera.

## 6.5. Disciplina y hábito

Disciplina y hábito consiste en trabajar permanentemente de acuerdo con las normas establecidas, asumiendo el compromiso de todos para mantener y mejorar el nivel de organización, orden y limpieza en la actividad diaria. Disciplina es actuar con respeto a lo que hayamos acordado. El hábito se crea mediante la repetición de actos conforme a las normas establecidas, de forma que cada vez su cumplimiento cueste menos y sea más connatural.

Esta fase funciona de forma similar a una auditoría. Se pueden establecer paseos de control de las fases realizadas por los propios trabajadores, y también por gente externa que conozca bien el programa elaborado, el resultado de dichos paseos se traducirá en un índice de cumplimiento de programa y en una serie de acciones correctoras.

## 6.6. Plantillas para los paseos en las distintas fases de programa 5S

Se presentan a continuación plantillas ejemplo que se pueden utilizar para las distintas fases.

Conviene imprimir estas plantillas en folios de distintos colores, de esa forma no perdemos de vista en qué fase estamos trabajando en cada momento. Es corriente el uso del azul para la fase de organización, verde para el orden, rojo para la limpieza, naranja para el control visual, y amarillo para el hábito y disciplina.

Además de estas plantillas conviene ir cargado de etiquetas adhesivas de estos colores, con el fin de marcar en el propio sitio la mejora pendiente y la referencia que aparece en la plantilla.















# Tema 7

---

## Método SMED

### 7.1. Introducción

SMED son las siglas de Single Minute Exchange of Dies. Es una metodología para conseguir reducir las puestas a punto de las máquinas para procesar lotes a menos de un minuto, lo que permite que los lotes puedan ser más reducidos y la fabricación más flexible. También ayuda a pensar sobre la calidad de los útiles que se usan en la fijación de piezas de forma que a la vez se busca el cero defectos. Esta metodología se desarrolló como herramienta de caza de pérdidas del sistema de producción Toyota, del TPM, y está entre los temas habituales a tratar por los grupos KAIZEN o círculos de calidad.

### 7.2. Componentes del SMED

El SMED tiene tres componentes esenciales:

- Identificar qué acciones se pueden realizar fuera de la máquina o estación de trabajo (preparación externa OED), y cuáles necesitan parar la máquina para realizar la puesta a punto (preparación interna IED).
- Rediseñar el sistema para llevar el mayor número de actividades IED a OED.
- Minimizar el tiempo necesarios para realizar el IED.

Los recursos que se utilizan para llevar a cabo el rediseño de utillaje son:

- Combinar la funcionalidad de los equipos. Esto requiere la normalización de las piezas, herramientas, utillajes, y procesos para reducir el número de pasos y los tiempos de ciclos. Algunas ideas para llevar acabo estas operaciones:
  - El sistema se debe diseñar de forma que el simple operación de apriete aseguren la funcionalidades de centrado, ajuste, posicionado, etc. lo que muchas veces requiere el uso de bloques calibrados.
  - El mismo amarre puede contener varios brutos de forma que mientras se está mecanizado uno se pueden prepara otros.
  - Eliminar pérdidas mediante colocación visual de los útiles utilizados.
  - ...
- Reducir los tiempos de amarre. Eliminando tornillos y sustituyendo por placas de levas. De esta forma se puede conseguir mayor repetitividad en la fuerza de apriete. Otros medios en caso de que sean imposible la eliminación de tornillos son:
  - Uso de arandelas en forma de U.
  - Usar orificios en forma de pera.
  - Usar cuñas y topes.
  - ...
- Mejorar transporte de útiles y otras piezas y brutos, mediante carros especialmente diseñados, tableros de rodillos, etc.

### 7.3. Matriz de conversión de amarre

Para facilitar la transformación de amarre puede servir una la plantilla 7.1 sobre la que recoger datos y que resalte las posibles mejoras.





# Mantenimiento Productivo ToTal

## 8.1. Introducción

El TPM son las siglas del original inglés Total Productive Maintenance. Originalmente TPM es un sistema japonés de mantenimiento industrial desarrollado a partir del concepto de "mantenimiento preventivo". El TPM se ha ido desarrollando para otras áreas de la empresa hasta que el JIPM lo ha convertido en modelo completo de dirección industrial.

El TPM es una estrategia compuesta por una serie de actividades ordenadas que una vez implantadas ayudan a mejorar la competitividad de una organización industrial o de servicios.

El TPM es un sistema orientado a lograr:

- cero accidentes
- cero defectos de calidad
- cero defectos en máquinas
- cero averías
- cero problemas medioambientales
- ....

En una empresa con departamento de mantenimiento y de producción con personal diferente, cuando se produce una avería, trabajan los de mantenimiento y los de producción están parados, cuando no hay averías, trabajan

los de producción y los de mantenimiento están parados. Para eliminar, entre otras cosas, esta paradoja se implanta el TPM como herramienta para obtener productos y servicios de alta calidad, mínimos costes, una alta moral en el trabajo y una imagen de empresa excelente.

El TPM ayuda a implantar sistemas de calidad total TQM, utiliza herramientas de gestión participativa y es una metodología que se concibe como un edificio sostenido por ocho pilares:

1. Caza de pérdidas o Mejoras orientada
2. Mantenimiento Autónomo.
3. Mantenimiento planificado.
4. Entrenamiento y desarrollo de habilidades de operación
5. TPM en el diseño inicial.
6. Mantenimiento de calidad.
7. TPM en servicios administrativos y de apoyo.
8. Dominio de las condiciones de trabajo, seguridad y medioambiente.

## 8.2. Caza de pérdidas

Se elaboran un conjunto de actividades desarrolladas por un grupo autónomo e interdisciplinar de trabajadores que, organizados como un grupo de proyecto, persiguen un objetivo bien definido.

El objetivo de cualquier proyecto de Caza de pérdidas es maximizar la efectividad global de equipos, procesos y plantas persiguiendo el *Shero des-pilfarros*.

Se emplea metodología específica y estructurada siempre en los mismos pasos y concentrando su atención en la eliminación de los despilfarros que se presentan en las plantas industriales.

Los equipos de trabajo son interdisciplinarios y de diferentes niveles jerárquicos. La información se presenta en forma gráfica y estratificada. Para facilitar su interpretación se exponen en paneles que se colocan en las instalaciones.

## 8.3. Mantenimiento autónomo

El Mantenimiento Autónomo consiste en involucrar a los operadores de producción en actividades de mantenimiento. Con esto se satisfacen dos necesidades cada vez más importantes:

- La necesidad de mayor mantenimiento debido a la automatización
- La utilización de la mayor formación de los trabajadores (eficiencia y satisfacción). Hay que tener en cuenta que el mayor capital de un operario es su inteligencia muchas veces desaprovechada.

Los objetivos del mantenimiento autónomo son los siguientes:

1. Que los equipos operen ininterrumpidamente.
2. Que los operarios sean flexibles para operar y mantener otros equipos.
3. Eliminar las causas de los defectos o paradas mediante la participación activa del operario.
4. Implementar gradualmente las actividades de mantenimiento autónomo.

En todo este proceso se emplean herramientas de comunicación: Etiquetas, Lecciones puntuales, Fichas de mejora, Paneles, Hojas de Estandarización de Tareas Preventivas.

## 8.4. Mantenimiento Planificado

Consiste en un proceso de mejora continua sobre las máquinas y equipos industriales orientado a la meta  $\checkmark$  cero averías  $\checkmark$  llevado a cabo por técnicos cualificados. Con esto se hace frente a dos realidades:

- Mantenimiento cubre el tiempo que ha ganado porque Producción hace parte del mantenimiento.
- Mantenimiento se dedica a temas de más cualificación para las que está preparado.

Para ello se siguen los siguientes pasos:

1. Identificar el punto de partida del estado de los equipos
2. Eliminar deterioro y mejorar el equipo.

3. Mejorar el sistema de información de mantenimiento.
4. Mejorar el sistema de mantenimiento periódico.
5. Desarrollo de un sistema de mantenimiento preventivo.
6. Desarrollo superior del sistema de mantenimiento.

## 8.5. Mejora de competencias operacionales

Es un conjunto de actividades orientadas a formar a los operarios y trabajadores de la empresa. El objetivo es conseguir trabajadores cada vez más competentes en los equipos y procesos que manejan. Se establece el requisito de que el entrenamiento en el mismo lugar de trabajo y que al operario se le da la oportunidad de ponerlo en práctica inmediatamente.

## 8.6. TPM en el diseño inicial

Se diseñan actividades orientadas a concebir y diseñar las máquinas e instalaciones según las prácticas de Mantenimiento autónomo, Planificado, etc. Se pretenden tener instalaciones que desde su concepción estén preparadas para realizar TPM.

En las especificaciones se hace participar a operarios y mandos que aportan su visión del diseño como usuarios y mantenedores de las máquinas, buscando abaratar el coste mantenimiento y explotación y disminuyendo los tiempos de arranque.

## 8.7. Mantenimiento de calidad

Consiste en realizar acciones de mantenimiento orientadas al cuidado del equipo para que este no genere defectos de calidad. El objetivo es 0 defectos en las máquinas para conseguir 0 problemas de calidad.

## 8.8. TPM en servicios administrativos

Los objetivos en este pilar son conseguir lugares de trabajo más gratos y optimizar los procesos administrativos. Una parte importante de esta etapa es aplicar las 5S a las oficinas.

## **8.9. Seguridad y medioambiente**

Se incorporan al trabajo desarrollado en los pilares anteriores criterios de seguridad y respeto al medioambiente, con el objetivo de cero accidentes y mejorar la imagen social de la empresa que respeta y mejora el entorno.



## Tema 9

---

# Seis Sigma

### 9.1. Introducción

Seis Sigma es un método para resolver problemas. Este método se ejecuta mediante proyectos que pretenden reducir el número de productos defectuosos a menos de 3.4 por millón (probabilidad de que en una población normal, un individuo se encuentre fuera de la banda  $\pm 6\sigma$ ). Estos proyectos ayudan a mejorar sustancialmente tareas rutinarias y repetitivas, y a que los proyectos grandes y complejos salgan bien a la primera.

Estos proyectos integran la sabiduría de la organización y las herramientas estadísticas probadas. Se crea la infraestructura para asegurar que las actividades de mejora de prestaciones tengan los recursos necesarios. Por eso cada proyecto incluye un presupuesto para la justificación del gasto, de forma que antes de aplicarlo se vea claramente un beneficio y un rápido retorno de la inversión.

Este método fue desarrollado por unos ingenieros de Motorola para evitar fallos en los componentes electrónicos. Pero el gran impulso se debió a la implantación del método en General Electric por decisión de sus ejecutivos en 1995. Sus beneficios económicos se multiplicaron, y debido a su éxito, su uso se ha extendido a la industria del automóvil europea y americana, y está siendo implantada por grandes empresas industriales.

### 9.2. Pasos para la mejora continua

El método seis Sigma tiene cinco fases. Cuando se trata de proyectos completos éstas son:

1. *Definir* el problema crítico
2. *Medir* valores para el tratamiento estadístico
3. *Analizar* con herramientas estadísticas probadas,
4. *Mejorar* el sistema y afinar las variables de entrada
5. *Controlar* esas acciones de mejora una vez implantadas.

En el caso de mejora de sistemas se tienen las siguientes fases:

1. *Definir* las funciones del sistema
2. Acotar valores para los valores de los que depende el buen funcionamiento del sistema y establecer el modo de *medir* esos valores
3. *Analizar* estadísticamente los riesgos de fallo.
4. *Diseñar* el sistema
5. *Verificar* después de construido.

### 9.3. Entrenamiento y certificación de operarios

El objetivo de este proceso es la creación de expertos en estadística aplicada a la resolución de problemas industriales. Esta formación está basada en casos directamente relacionados con el campo de aplicación para el que están siendo entrenados.

Las certificaciones tiene tres niveles básicos:

- **Cinturón Verde.** Que es la certificación que deben tener la mayoría de los empleados. Esta certificación les homologa para realizar operaciones estadísticas básicas.
- **Cinturón Negro.** Les capacita para ser líderes de proyecto y expertos en el método.
- **Maestro Cinturón Negro.** Es entrenador y formador en calidad del resto de personal. Es la máxima autoridad en materia de calidad dentro de la empresa.

Algunas empresas y asociaciones independientes emiten certificados para los distintos grados de personal.

## 9.4. Proyectos de fabricación

En el caso de Proyectos de Planificación de Procesos de Fabricación, Las cinco fases son las siguientes:

1. Estudio de factibilidad del procesos
2. Planificación de proceso
3. Preparación del proceso
4. Ensayo de producción
5. Cualificación del proceso

La planificación de procesos debe satisfacer los requisitos de calidad, por lo que se deben determinar:

- Plan de desarrollo de proceso para un nuevo producto y sus modificaciones con una documentación comprensiva de los pasos de producción y los flujos de material
- El ambiente del equipo y del trabajo
- Mantenimiento preventivo de los equipos
- Procedimientos y métodos para el aseguramiento de la calidad
- Seguimiento y documentación de todos los parámetros del proceso
- La aprobación de procesos y equipos por todas las personas responsables

## 9.5. Herramientas del Seis Sigma

Las herramientas para determinar las variables a estudiar estadísticamente son:

- **FMEA.** Es el análisis de modos de fallos y sus efectos. Esta técnica se desarrolla en una lección posterior
- **Mapa de proceso.** Es un desarrollo gráfico del proceso en el que se indican las operaciones, controles y en cada paso las KPIV (key process input variables) y las KPOV (key process output variables)



## Tema 10

---

# Análisis de los modos de fallos y sus efectos (FMEA)

El uso del FMEA (AMFE en castellano) en Ingeniería de Fabricación aparece como la necesidad de una herramienta de prevención dentro de la estrategia de cambio desde el control de la calidad al aseguramiento de la calidad de un producto. Aunque su origen proviene de la industria aeroespacial y fue desarrollada por la NASA, su uso se ha extendido ampliamente a la industria del automóvil. Es una de las herramientas que utiliza el método Seis Sigma, y por lo tanto, todas las industrias que se adhieran a dicho sistema. Por ejemplo, en Ford aparece como un requerimiento en la norma de calidad Q1 (años 80) y se ha mantenido a lo largo de las normas Q-101, ISO 9000 y QS9000.

Hay dos tipos básicos de FMEA, el de diseño y el de proceso. El primero se realiza una vez se tienen los conceptos y antes de la emisión de planos. El segundo comienza antes de los informes de factibilidad y finaliza antes de la emisión de las órdenes de trabajo. Aquí se estudiará el caso de FMEA de proceso en el cual se pretende identificar las variables en los que centrar los controles, las deficiencias del proceso, y los riesgos para los operarios.

Realizar un FMEA es tan sencillo como rellenar una plantilla, en la cual para cada fase del proceso se prevén los modos potenciales de fallo, se determinan posibles causas, y por cada una de ellas se evalúa con una cifra sencilla, el nivel de ocurrencia, el riesgo para los operarios, y la posibilidad de prevenirlos. El producto de estos tres factores es el RPN o Risk Probability Number que permite priorizar los fallos a estudiar.

Como resultado del FMEA se obtienen:

- Una lista de modos de fallo potenciales del proceso.
- Una lista de características Críticas o Significativas confirmadas.
- Una lista de controles especiales recomendados.
- Lista de acciones recomendadas para reducir la ocurrencia o aumentar la detección de los posibles defectos.

## 10.1. Modelo de acción

En la Figura 10.1 de la página siguiente se representa la plantilla de un FMEA y la metodología para rellenarla es la siguiente:

1. Se rellena las funciones y requisitos que tiene la fase o operación del proceso.
2. Se establecen los modos potenciales de fallo: no funciona, función degradada por el tiempo o uso, funcionamiento intermitente, etc.
3. Por cada fallo se establecen los efectos que llevan consigo dándole un valor de severidad del 1 al 10.
4. Se determinan las causas de esos fallos dando un valor del 1 al 10 según una tabla de probabilidades de que ocurra.
5. Se determina la posibilidad de que se pueda prevenir o detectar indicadores antes de que ocurra el fallo. Esto se valora con un valor del 1 al 10.
6. Una vez obtenidos los tres números se calcula el RPN y se priorizan los fallos.
7. Se proponen acciones de mejora simples que disminuyan el RPN estableciendo nuevas probabilidades.

El FMEA es un trabajo en equipo en donde las valoraciones de Severidad, Ocurrencia y Detección se realizan por consenso. De esta forma se evitan visiones sesgadas.

Al seleccionar los modos de fallo se obvian los triviales, centrándose en los que realmente supongan un riesgo.

Al establecer medidas de control preventivo y de detección, lógicamente, cambiará el valor de la ocurrencia.





## Tema 11

---

# Estadística en la mejora de calidad

### 11.1. Hitos históricos en el control estadístico de la calidad

La aplicación de la estadística a la mejora de la calidad fue muy posterior al de su aplicación en otros campos como la biología y la física. De todas formas, aunque su repercusión ha sido grande en las industrias pesadas, todavía queda mucho para que la estadística intervenga en las decisiones de pequeños empresarios, lo cual aumentaría la eficiencia de la fuerza de trabajo y la competitividad de las empresas.

Los principales hitos a destacar en la historia de la aplicación de la estadística al control de calidad son los siguientes:

1924 Primer esbozo de un diagrama de control por Walter Shewhart de la Bell Telephone.

1931 Desarrollo de la teoría de la inspección por muestreo. Elaboración de las tablas Dodge-Romig.

1940 Reunión de científicos e ingenieros americanos en Camp David para el desarrollo de las normas MIL-STD-105.

1942 Se imparten cursos intensivos de manejo de las normas a toda la industria bélica.

1951 Conferencias de E.W. Deming en Japón.

1965 Sistema Toyota de Producción, Círculos de calidad, 5S, DFC, Poka-Yoke, etc.

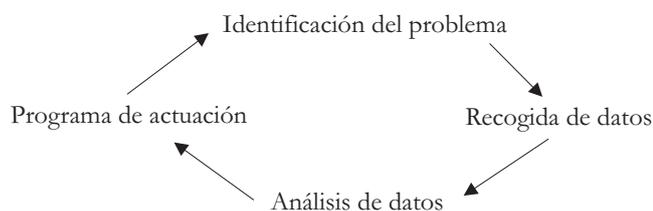


Figura 11.1: Rueda de Deming

1973 Crisis del petróleo, competitividad global, producción individualizada, eliminación de stocks, expansión del Sistema Toyota de Producción.  
 1980 Introducción de las normas de calidad ISO 9000.  
 1985 Elaboración del sistema 6-sigma por los ingenieros de Motorola  
 1995 Formación e introducción de 6- $\sigma$  en General Electric  
 2000 Extensión del 6- $\sigma$  a la industria del automóvil  
 2004 Aplicación sistema Toyota a servicios públicos en Japón  
 2008 Crisis Financiera Internacional. Despertar del sueño del ladrillo.  
 Afloramiento de falta de calidad y competitividad en países antiguamente industrializados.

## 11.2. Rueda de Deming

La rueda de Deming (Figura 11.1 es un esquema que puede servir para pensar en las actuaciones referentes al control de calidad. Esta metodología sigue también la denominación PDCA que son las iniciales de las palabras en lengua inglesa Plan-Do-Check-Act. Las cuatro fases que describe la rueda nos servirá para establecer el programa de esta parte de la asignatura. En esta primera lección se establecerán los criterios para seleccionar variables, el modo de recoger los datos, y se hará una introducción a los conocimientos estadísticos para comprender las metodologías de análisis de los datos recogidos que se mostrarán en las secciones siguientes. Sólo se hace una introducción o más bien un recordatorio pues la estadística como tal ya ha sido estudiada monográficamente por los alumnos a los que se dirige este texto en los primeros cursos de grado.

### 11.2.1. Identificación del problema

Con la estadística se pretende descubrir tendencias de distintas características técnicas, su evolución, las causas que influyen en esas tendencias, etc.

con el fin de tener un mayor conocimiento del proceso y poder aplicar las medidas correctoras y preventivas convenientes.

Debido a que la primera aplicación de la estadística fue en el campo de la biología, el vocabulario que utiliza es el propio de dicha disciplina. El análisis estadístico consiste en el estudio de caracteres de una muestra de individuos extraídos de una población. De forma paralela se estudia la calidad de un lote (población) compuesto por un número determinado de unidades (individuos), en parte de los cuales (muestra) se estudian algunas especificaciones (caracteres) que pueden adquirir distintos valores (modalidades).

Los caracteres pueden ser variables (son medibles) o atributos (no son medibles, e.g. color). Las variables pueden ser discretas (conjunto de valores finito) o continuas (conjunto de valores infinito).

A la hora de identificar el problema y decidir qué caracteres se deben estudiar se puede usar el diagrama de la casa de la calidad, que fue originado en el Despliegue Funcional de la Calidad, explicado en la primera unidad. La matriz indica la influencia del carácter en la calidad de la pieza. En función del peso y del coste que esas medidas representan se puede realizar una selección de caracteres más importantes. De igual modo, en el tejado de la casa queda reflejado las correlaciones entre las características técnicas, con lo que entre los caracteres importantes bastará obtener información de algunos para extraer información de todos.

Por otra parte, muchas veces un carácter puede tomarse como variable o como atributo. Es el caso de los calibres pasa-nopasa.

### 11.3. Distribuciones de frecuencias

Para realizar el análisis de una variable continua, los datos se agrupan en intervalos finitos, que se denominan *clases*, a la amplitud del intervalo se le denomina *tamaño de clase*, y al punto medio del intervalo *marca de clase*. De esta forma una variable continua se puede manejar como una discreta. De esta forma las modalidades del carácter son finitas.

Cuando se toma una muestra de tamaño  $n$ , se define la frecuencia absoluta de una modalidad  $A_i$  como el número de ocurrencias de dicha modalidad  $n_i$ , de forma que  $\sum n_i = n$ . La frecuencia relativa se define como la frecuencia absoluta dividido el tamaño de la muestra ( $f_i = n_i/n$ ) de forma que  $\sum f_i = 1$ ). Las frecuencias se pueden representar bien mediante tablas, o bien gráficamente mediante histogramas, diagramas de sectores, etc. En la Tabla 11.1 y la Tabla 11.2 se presentan ejemplos de distribuciones de frecuencias.

A cada intervalo de valores se le denomina Clase y al punto central de dicho intervalo se le denomina Marca de Clase. La unión de los valores de

nº de defectos	Frecuencia	Frec. acumulada
0	8	8
1	6	14
2	11	25
3	4	29
4	1	30
Total	30	

Tabla 11.1: Frecuencia de ocurrencia de defectos en cada chapa metálica

masa	Frecuencia	Frec. acumulada
150-160	3	3
160-170	12	15
170-180	21	36
180-190	4	40
Total	40	

Tabla 11.2: Frecuencia de masa de piezas mecanizadas

frecuencia relativa en las marcas de clase dará una aproximación a la función de densidad de la distribución estadística que sigue el carácter, mientras que la frecuencia acumulativa aproxima a la función de distribución.

### 11.3.1. Parámetros estadísticos

Los parámetros estadísticos más usados para describir una población se distinguen entre parámetros de centralización y parámetros de dispersión. Los parámetros de centralización más usuales son la media y la mediana, mientras que los parámetros de dispersión más usados son los de Rango o Recorrido, Varianza y Desviación Típica. Para recordar el significado de estos parámetros se recurre al ejemplo expuesto en la Tabla 11.2.

$$\text{Media } \bar{x} = \frac{1}{40}(3 \cdot 12 + 12 \cdot 165 + 21 \cdot 175 + 4 \cdot 185) = 171,5$$

$$\text{Mediana } Md = 170 + \frac{180-170}{36-15} \cdot (20 - 15) = 172,38$$

$$\text{Rango o Recorrido } R = 190 - 150 = 40$$

$$\text{Varianza } s^2 = \frac{1}{40-1}(3 \cdot (155 - 171,5)^2 + 12 \cdot (165 - 171,5)^2 + \dots) = 59,23$$

$$\text{Desviación típica } s = \sqrt{s^2} = 7,7$$

La mediana  $Md$  es el valor que divide la población en dos. en el caso de muestras continuas se suelen tomar tamaño de muestra impares de forma que el valor que se toma como mediana el que al ordenar la muestra queda en el punto medio. e.g. si se toma una muestra con valores 9, 3, 4, 5, 7, la mediana será 5.

### 11.3.2. Distribuciones de frecuencia multivariable

Habitualmente, cuando se inspecciona una unidad, se mide varios caracteres, las variaciones de estos caracteres pueden estar correlacionados, lo cual es interesante para determinar causas de variaciones y dispersiones, o para simplificar los cálculos, hallando las distintas dependencias. Para calcular las variables de correlación de unas variables frente a otras se puede usar el método matricial de regresión.

Tomando una muestra de  $n$  se miden datos  $y_i$  y  $x_i$  en cada unidad.  $y_i$  sería la variable dependiente de las  $x_i$ . Con estos datos se forman las matrices  $\mathbf{Y}$  y  $\mathbf{X}$ . La matriz de términos independientes  $\alpha$  se obtiene multiplicando ambos lados por la traspuesta de  $\mathbf{X}$  y despejando.

$$\alpha = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}$$

En el caso de que se tengan dos variables independientes  $x_1^i$  y  $x_2^i$  se pretenderá obtener una función del tipo  $y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2$ , con lo que en este caso se tienen las siguientes matrices para obtener los coeficientes  $\alpha$ :

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} y^1 \\ \vdots \\ y^n \end{bmatrix} \quad x = \begin{pmatrix} 1 & x_1^1 & x_2^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_1^n & x_2^n \end{pmatrix} \quad (11.1)$$

Para estimar el grado de dependencia de la variable  $y_i$  respecto a una de las variables dependientes  $x_i$  se usa el coeficiente de correlación  $r$ .

$$r = \frac{\Sigma(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n s_x s_y}$$

Un valor de  $|r| \simeq 1$  indicaría una fuerte correlación entre las variables.

## 11.4. Ejercicio práctico en hoja de cálculo MS-Excel

Se propone realizar una tabla de 400 números, en la que se representa la resistencia de una fibra de Nylon, suponiendo que tiene una media 50 N con una desviación típica  $\pm 6$ . Para ello se utilizarán las funciones de generación de números aleatorios, y la función de distribución normal inversa.

Con la anterior tabla realizar un Histograma de frecuencias absolutas y relativas, representándola gráficamente. Utilizar la función de contar condicional CONTAR.SI.

En los datos del histograma hacer la regresión para hallar la función de distribución con una expresión polinómica. Usar funciones de multiplicación trasposición e inversión de matrices.

## 11.5. Cálculo de Probabilidades

Después de identificar el problema y recoger los datos, el siguiente paso en la Rueda de Deming es analizarlos y sacar consecuencias que lleven a planes de actuación acertados. Los datos de las mediciones o inspecciones suelen ser estocásticos siguiendo una distribución de probabilidades, en principio desconocida. Al conjunto de modalidades se le llama ahora espacio muestral  $E$ , y a cada modalidad se le denomina suceso aleatorio.

Para analizar este tipo de datos conviene antes que nada enunciar los tres axiomas y las cinco propiedades del cálculo probabilístico.

### Axiomas:

1. Para cualquier suceso  $A$  ocurre que  $0 \leq P(A) \leq 1$
2. Si  $A$  y  $B$  son incompatible ( $A \cap B \in \phi$ )  $\Rightarrow P(A \cup B) = P(A) + P(B)$
3.  $P(E) = 1$

### Propiedades:

1. Si  $\bar{A}$  es el suceso complementario de  $A \Rightarrow P(\bar{A}) = 1 - P(A)$ .
2.  $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$ .
3.  $P(A/B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$  y si  $P(A/B) = P(A)$   $\Rightarrow A$  y  $B$  son independientes:  $P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$ .
4. Teorema de la probabilidad total.

Si  $A_1, A_2, \dots$  son incompatibles dos a dos y

$A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n = E$  entonces

$$P(B) = \sum P(A_i) P\left(\frac{B}{A_i}\right)$$

5. Teorema de Bayes.

Con las mismas propiedades que en 4)

$$P(A_i/B) = \frac{P(A_i)P(B/A_i)}{P(B)}$$

## 11.6. Aplicación en Fiabilidad de Sistemas

Un cuerpo suele estar compuesto por órganos. El funcionamiento del cuerpo depende del funcionamiento de los distintos órganos. Del mismo modo, un sistema suele estar compuesto por subsistemas, y la fiabilidad del sistema depende de la probabilidad de fallo de cada uno de los subsistemas. Ej. Un Submarino tiene los subsistemas de estanqueidad, propulsión, Control, Alimentación eléctrica, respiración, armamento, etc. En el caso de fallo de cualquiera de esos subsistemas supondría el que el submarino dejaría de funcionar como tal.

Para la nomenclatura de las formulaciones se va a seguir la siguiente nomenclatura:

$R$  : Probabilidad de éxito

$Q$  : Probabilidad de fallo

$S_i$  : Subsistema  $i$

En los cálculos en ingeniería se puede trabajar de dos formas:

1. Haciendo cálculos nominales de dimensionamiento y establecer un coeficiente de seguridad por el que se multiplican las condiciones de carga. Este método es el utilizado mayormente por los códigos técnicos profesionales.
2. Calcular las probabilidades de fallo y rediseñar los componentes para reducirlos por ejemplo a  $10^{-6}$ .

El primer modo es el propio de los códigos profesionales. En ellos no se requiere conocimiento de estadística y sirve para quitarse responsabilidades legales. Los componentes muchas veces quedan sobredimensionados con un uso ineficiente de materiales y recursos que los hace poco competitivos. Otras veces los componentes quedan subdimensionados debido a las características de las distribuciones estadísticas poniendo en grave peligro muchas vidas humanas.

En un entorno competitivo se debe garantizar la seguridad y la calidad por encima de todo, y a la vez, minimizar costes, y aumentar la eficiencia, mediante el uso optimizado de los recursos. Esto hace que el estudio estadístico de fiabilidad debiera ser preceptivo en los productos industriales.

### 11.6.1. Subsistemas en serie

En los sistemas compuestos de subsistemas en serie, si un subsistema falla, falla todo el sistema, por lo que la fiabilidad es la intersección de todas las

fiabilidades

$$R = \prod_{i=1}^n R_i \quad (11.2)$$

### 11.6.2. Subsistemas en paralelo

En un sistema en paralelo tendrían que fallar todos los subsistemas para que fallara el sistema. La fiabilidad es el complementario a la intersección de fallo de todos los subsistemas.

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (11.3)$$

### 11.6.3. Subsistemas mixtos

Normalmente los sistemas son más complejos y su diseño se realiza en función de una fiabilidad global. Además, hay subsistemas que son más prescindibles que otros lo cual puede añadir más complejidad al análisis de fiabilidad. Por ejemplo, En el cuerpo humano tenemos sistemas replicados en paralelo (dos ojos, dos pulmones, dos manos, varias muelas, etc.), y hay sistemas en serie (un corazón, un estómago, etc.), y también hay componentes más prescindibles que otros (podemos considerar más necesarios los ojos que las orejas, aunque éstas últimas no dejan de ser imprescindibles para el funcionamiento normal). La fiabilidad del cuerpo humano, será resultado de lo que se considere como imprescindible y del entorno en el que debe dar ese resultado. Del mismo modo se podría trabajar en el caso de diseñar un coche o una nave espacial, para lo cual existen metodologías como el FMEA (Que se estudia en la otra parte de la asignatura) en las que se requiere el análisis de ocurrencias de fallos dentro del proceso de mejora.

## 11.7. Distribuciones de probabilidad

Las distribuciones de probabilidad son modelos matemáticos que relacionan las probabilidades de ocurrencia de que una variable  $x$  tome un valor  $x_i$  concreto. Una Función de Distribución  $F(x)$  es la probabilidad acumulada de una variable, y se obtiene a partir del histograma de frecuencias relativas acumuladas. La Función de densidad  $f(x)$  es la derivada de la función de distribución e indica la densidad de ocurrencias en el entorno de  $x$ . A continuación se mostrarán las distribuciones estadísticas más usuales en control de calidad.

### 11.7.1. Distribuciones discretas

#### Distribución hipergeométrica

Se consideran  $N$  artículos de los que  $D$  son defectuosos, se seleccionan sin reemplazamiento  $n$  artículos. La probabilidad de que entre estos  $n$  hayan  $d$  defectuosos es:

$$P(X = d) = \frac{\binom{N-D}{n-d} \binom{D}{d}}{\binom{N}{n}} \quad (11.4)$$

en donde

$$\binom{n}{x} = \frac{n!}{x!(n-x)!} \quad (11.5)$$

Esta distribución tiene una aplicación concreta en el control de calidad por muestreo. El problema de cálculo viene cuando el tamaño de lote  $N$  es muy grande y tanto el tamaño de muestra  $n$  como el número de defectuosos  $D$  son muy pequeño. En este caso el tiempo de cálculo computacional es muy elevado debido a los factoriales de números muy elevados, con lo que el análisis de hipótesis (en el que se desconoce  $D$ ) se hace lento.

#### Distribución binomial

La variable  $X$  es el número de unidades defectuosas en  $n$  extracciones independientes (con reemplazamiento) de un lote con un porcentaje de defectuosos igual a  $p$ .

$$P(X = x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} \quad (11.6)$$

La media de esta distribución es  $np$  y su varianza  $np(1-p)$ .

La distribución hipergeométrica se puede aproximar a una binomial con  $p = \frac{D}{N}$  cuando  $\frac{N}{n} \leq 0,1$ .

#### Distribución de Poisson

Cuando en un objeto se tiene una densidad de defectos de  $\lambda$ , la probabilidad de encontrar  $x$  defectos en una inspección es:

$$P(X = x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} \quad (11.7)$$

Esta distribución tiene una media y una varianza de valor  $\lambda$ .

La distribución de Poisson se dan cuando se proporciona una densidad de defectos (ej. n° de picaduras por m<sup>2</sup>, n° de faltas de ortografía por cada n páginas, etc.). Lambda será esa densidad y  $X$  el número de defectos inspeccionado en esa superficie.

La distribución binomial se puede aproximar a una de Poisson con  $\lambda = np$  cuando  $n \geq 16$  y  $p \leq 0,1$ . De esta forma, en una inspección industrial en la que el porcentaje de defectuosos es muy pequeño, la distribución de Poisson es la más utilizada con diferencia.

## 11.7.2. Distribuciones continuas

### Distribución Normal

La expresión de la función de densidad de la variable tipificada  $y = \frac{x-\mu}{\sigma}$  de  $x$  es la siguiente:

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} \quad (11.8)$$

La Función de Distribución se haya integrando la función de densidad.

La distribución gaussiana o normal tiene unas propiedades que la hacen especialmente útil a la hora de acotar la calidad de distribuciones desconocidas, y de establecer la incertidumbre en variables indirectas. Esto se debe a dos propiedades: Teorema Central del Límite, y la Ley de Propagación de Varianzas.

El Teorema Central del Límite establece que la variable suma aritmética de variables no normales tiende a ser una distribución normal. Esta propiedad tendrá un valor especial en el control estadístico de procesos para hallar evidencias de cambios de distribución estadística.

La Ley de Propagación de Varianzas establece que cuando una variable aleatoria  $y$  depende de otras variables aleatorias  $x_i$  independientes unas de otras, suponiendo que todas siguen una ley de distribución Normal, se puede estimar la varianza de  $y$  determinando la media cuadrática de los errores debidos a cada una de las variables  $x_i$ :

$$\sigma_y^2 = \left( \frac{\partial y}{\partial x_1} \right)_{\bar{x}_1}^2 \sigma_{x_1}^2 + \dots + \left( \frac{\partial y}{\partial x_n} \right)_{\bar{x}_n}^2 \sigma_{x_n}^2 \quad (11.9)$$

### Distribución de Weibull

La distribución de Weibull es, después de la Normal, la más usada en ingeniería. Esto es debido a su relación que tiene con fiabilidad de sistemas, y lo bien que refleja sistemas resistentes.

Esta distribución fue publicada por primera vez por el sueco Waloddi Weibull en el Journal of Applied Mechanics (ASME) en septiembre de 1951. Desde entonces, esta distribución es un elemento común en los análisis de fiabilidad en ingeniería.

Para ver su utilidad usemos un ejemplo. Una cadena con  $n$  eslabones, ¿Cuál será su probabilidad de fallo si la de cada eslabón sigue una distribución del tipo siguiente?

$$F(x) = 1 - e^{-\phi(x)} \quad (11.10)$$

Aplicando las propiedades de probabilidad condicional, la cadena romperá cuando rompa uno de los  $n$  eslabones. Es decir, la cadena rompe por el eslabón más débil. La probabilidad de no-fallo será entonces el producto de las probabilidades de no-fallo de los  $n$  eslabones.

$$(1 - P)^n = e^{-n\phi(x)} \quad (11.11)$$

con lo que conociendo la fiabilidad de un eslabón se puede calcular la fiabilidad de la cadena que seguirá una distribución del tipo

$$F_n(x) = 1 - e^{-n\phi(x)} \quad (11.12)$$

Esta ecuación proporciona una expresión matemática apropiada para el principio de que un sistema falla cuando falla el subsistema más débil. Lo mismo se aplica para vida de un producto, o para estimar la resistencia de un sólido.

Para especificar la función  $\phi(x)$ , la única condición necesaria es que sea una función no decreciente, y que tenga un valor igual a cero cuando  $x = \gamma$ , que es un valor de resistencia mínimo que no tiene porqué ser igual a 0. La función más simple que cumple este requisito es

$$\phi(x) = \left( \frac{x - \gamma}{\beta} \right)^\alpha \quad (11.13)$$

por lo tanto la función general de distribución queda como sigue:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha} \quad (11.14)$$

siendo  $\alpha$  el factor de forma,  $\beta$  un factor de proporcionalidad, y  $\gamma$  el valor mínimo que puede tomar el valor  $x$ .

En la siguiente figura se representa la función de distribución  $F(y)$  siendo  $y = \frac{x-\gamma}{\beta}$  para distintos valores de  $\gamma$ . Como se puede observar, todas las distribuciones intersectan en un punto para un valor de  $y = 1$  siendo la más aproximada a una distribución normal cuando  $\alpha = 3, 2$

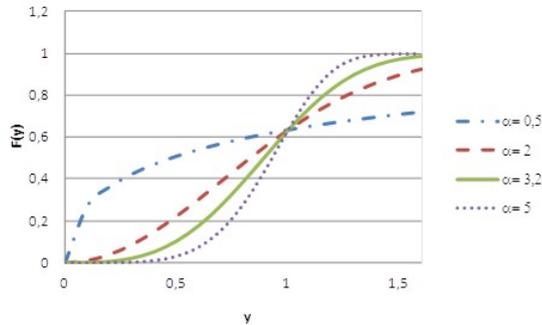


Figura 11.2: Distribución de Weibull normalizada

Esta distribución también tiene la ventaja de que se puede generar una población con dicha distribución a partir de la función de generación de números aleatorios entre 0 y 1 (función =ALEATORIO() de MSExcel), ya que se puede despejar  $x$  de la ecuación 12.7.

$$x = \gamma + \beta e^{\frac{1}{\alpha} \ln(\ln \frac{1}{1-F(x)})} \quad (11.15)$$

Esta función permite generar numerosos individuos de una población con una distribución determinada, y reproducir escenarios para análisis de fiabilidades tal como se realiza en el último capítulo de este libro.

## 11.8. Intervalos de confianza

El concepto de intervalo de confianza se utiliza cuando se utilizan instrumentos de medida de poca repetitibilidad que midiendo varias veces una entidad que sigue otra distribución normal, produce una población de mediciones. Por ejemplo, la medición del diámetro de un eje con un micrómetro de división de escala inferior a su incertidumbre, y que a su vez el eje tiene un error de redondez. Se supone que tanto la distribución del aparato como la de la variación de la entidad siguen un patrón normal.

El teorema central del límite para distribuciones normales posibilita el establecimiento de intervalos, tanto para la media y la desviación típica entre los cuales se puede asegurar con una fiabilidad  $1-\alpha$  que la media o desviación típica verdadera se encuentra en dicho intervalo.

Las distribuciones para establecer estos intervalos de confianza son la  $t$ -Student y la  $\chi^2$ -cuadrado ( $\chi^2$ ). Estas distribuciones vienen dadas en tablas y también están incluidas entre las funciones de hoja de cálculo en MS-Excel.

Dada una muestra de  $n$  mediciones que han dado lugar a una media muestral de  $\bar{x}$  y una desviación típica  $s$ , establecido un nivel de confianza  $1 - \alpha$  el intervalo de confianza para la media real  $\mu$  es el siguiente:

$$\left[ \bar{x} - t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}}, \bar{x} + t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \right] \quad (11.16)$$

y para la varianza real  $\sigma^2$ :

$$\left[ \frac{(n-1)s^2}{\chi_{\alpha, n-1}^2}, \frac{(n-1)s^2}{\chi_{1-\alpha, n-1}^2} \right] \quad (11.17)$$

## 11.9. Problemas

1. De un bombo con 16 bolas blancas y 4 bolas rojas, se extraen sin reemplazamiento 3 bolas. Calcular la probabilidad de que al menos una sea blanca.
2. En el ejercicio anterior suponer que después de cada extracción la bola se devuelve al bombo antes de la siguiente extracción.
3. En un perfil de extrusión de 25 metros de largo se supone que hay 4 defectos en toda la barra. Calcular la probabilidad de hallar al menos un defecto después de 5 observaciones de longitudes de 1 metro.
4. en un depósito a presión se realizan 30 radiografías observando que todas son conformes con una probabilidad del 0.1 % de que rompan a la presión máxima. ¿Cuál es la fiabilidad del conjunto?
5. Un libro tiene 500 páginas. suponiendo que hay 10 faltas de ortografía. Hallar la probabilidad de analizando 50 páginas se hallen 2 o más faltas ortográficas.
6. En la producción de lámparas se tiene una distribución normal en su luminosidad con una media de 3000 candelas con una desviación típica  $\sigma = 50$  Cd. ¿Dónde estableceríamos el límite inferior de luminosidad de forma que sólo del 0.5 % de las lámparas den una luminosidad por debajo de ese límite?
7. Una estructura está fabricada con 20 bloques colocados uno encima de otro. Cada bloque tiene una altura de 3 m con una varianza de 5 cm<sup>2</sup>. Calcular la varianza de la altura de la estructura.

8. En una muestra de 6 datos se ha obtenido una media  $\bar{x} = 12$  y una dispersión  $s = 3$ . Calcular el intervalo de confianza de la media y la desviación típica de la muestra.
9. Para calcular la distribución de probabilidades para determinar fiabilidades de un alambre de acero endurecido, se realizan 389 ensayos de tracción obteniendo una resistencias que se agrupan según las frecuencias mostradas en la siguiente tabla. Comprobar si se adecúa a una distribución de Weibull. ¿Cuál sería la resistencia media de un alambre con una longitud 50 veces superior a la de la probeta con la que se han realizado los ensayos? Usar hoja de cálculo con herramientas de regresión, y el algoritmo de Montecarlo.

Tensión (Kg/mm <sup>2</sup> )	Frecuencia
32	10
33	33
34	81
35	161
36	224
37	289
38	336
39	369
40	383
42	389

## Tema 12

---

# Modelizado de la fiabilidad basada en el crecimiento de grieta por fatiga

### 12.1. Introducción

Un problema importante en diseño es estimar la vida de estructuras (puentes, edificios, aviones, ...) bajo factores inciertos, y la vida residual de las estructuras que tienen muchos años dando servicio. Así, la función de distribución de probabilidad acumulada para la vida de componentes críticos es esencial para el diseño y para la estimación de la vida residual.

El criterio asumido en este ejemplo se basa en el número de ciclos para fallos  $N$  de cada acero, cuando todos están sometidos a idénticas condiciones. La estimación de  $N$  se desarrolla en el contexto de un crecimiento de grieta simple por fatiga. El modelo asumido para la fatiga de los componentes de acero debería ser considerado como puramente cualitativo. El ejemplo se basa en el artículo de D.G. Harlow titulado "Reliability modelling based on fatigue crack growth" publicado en el "International Journal of Mathematical Education in Science and Technology" en el año 1996 (Volumen 27), aunque el procedimiento y resultados difieren.

## 12.2. Crecimiento de grieta en aceros

El tamaño de grieta  $2a$  evoluciona con el número de ciclos siguiendo la ley exponencial de Paris-Erdogan:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (12.1)$$

La tenacidad a Fractura  $K$  y la constante  $C$  son variables aleatorias, y reflejan la variabilidad de las propiedades microestructurales del material base.  $\Delta K$  para una placa semiinfinita viene dado por:

$$\Delta K = \Delta\sigma(\pi a)^{0,5} \quad (12.2)$$

donde  $\Delta\sigma$  es la tensión alternante en un punto alejado de la grieta. Sustituyendo (12.2) en (12.1), tomando valores de  $n$  distintos, se tendrán expresiones explícitas de  $N$ :

$$N = \frac{2(\sqrt{a_f} - \sqrt{a_0})}{C\Delta\sigma\sqrt{\pi}} \quad n = 1 \quad (12.3)$$

$$N = \frac{\ln(a_f/a_0)}{C\pi(\Delta\sigma)^2} \quad n = 2 \quad (12.4)$$

$$N = \frac{2[\sqrt{a_0}^{-1} - \sqrt{a_f}^{-1}]}{C(\Delta\sigma\sqrt{\pi})^3} \quad n = 3 \quad (12.5)$$

El factor  $n$  depende del mecanismo de propagación (intergranular, intra-granular, porosidad, ...). El valor de  $a_f$  tiene un valor máximo a partir del cual la grieta pasa a ser inestable. Como valor de diseño se toma la décima parte de esa longitud de grieta para funcionar con un margen de seguridad de 10. Este sería un criterio de reemplazo del componente.

$$a_f = \frac{0,1}{\pi} \left( \frac{\Delta K}{\Delta\sigma} \right)^2 \quad (12.6)$$

## 12.3. Modelización del comportamiento de distintos materiales

Se van a estudiar 4 tipos de acero cuyas propiedades de fractura son bien conocidas, así como el mecanismo de propagación de grieta. Se pretende averiguar la vida de un componente fabricado con estos 4 tipos de acero, cuando el tamaño de grieta inicial es el mismo  $a_0 = 0,0001$  m, y la tensión

alternante es  $\Delta\sigma = 400$  MPa. Las características de Fractura y propagación de grieta son variables aleatorias que siguen una distribución tipo Weibull cuya función de distribución es:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha} \quad (12.7)$$

Los valores de los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  para la constante  $C$  y para  $\Delta K$ , así como los valores de  $n$  vienen dados en la tabla siguiente:

Material	$n$	$\alpha_C$	$\beta_C \cdot 10^{-8}$	$\gamma_C$	$\alpha_K$	$\beta_K$	$\gamma_K$
4340	1	5	5	0	5	37	103
D6CA	1	6	1	0	6	38	406
MAR-250	2	8	0.055	0	8	45	151
HP9-40.2	3	12	0.0025	0	8	45	151

## 12.4. Simulación de vida de material

Para la estimación de vida de un componente dependiendo del material con el que se fabrique, se va a proceder a elaborar un procedimiento numérico de generación de poblaciones aleatorias para luego obtener la distribución de vida de componente final.

### 12.4.1. Generación de poblaciones aleatorias

Para generar poblaciones aleatorias de las variables, se utiliza el generador de números aleatorios que tiene muchos programas informáticos. Estos números se sustituyen en  $P$  que resulta de despejar la variable  $x$  en (12.7):

$$x = \gamma + \beta e^{\frac{1}{\alpha} \ln(\ln \frac{1}{1-P})} \quad (12.8)$$

A partir de los números aleatorios generados se obtienen la población de  $N$  para cada uno de los materiales. En total se han obtenido 1000 valores de  $N$ .

### 12.4.2. Obtención de curva de fatiga

A partir de los 1000 valores de  $N$  por cada material se ha realizado un histograma acumulado de 10 intervalos, a partir de los cuales se puede hacer el test de si el resultado se corresponde con una distribución de Weibull, haciendo la representación en abscisas de  $\ln(x-\gamma)$  y en ordenadas de  $\ln(\ln \frac{1}{1-P})$  de forma de que si se aproxima a una recta, la ecuación población se puede

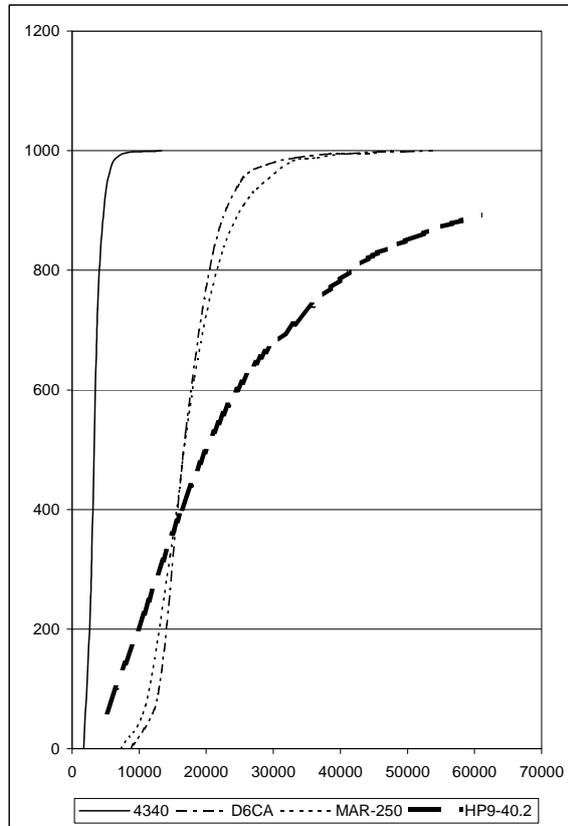


Figura 12.1: Curva de fatiga para los distintos materiales analizados

modelizar bien por una distribución de Weibull, ya que la siguiente recta procede de la ecuación anterior:

$$\ln \left( \ln \frac{1}{1-P} \right) = \alpha \ln(x - \gamma) - \alpha \ln \beta \quad (12.9)$$

Para la regresión se puede utilizar la formulación de la sección anterior en la cual se obtiene el valor de  $\alpha$  y  $\beta$ . El valor de  $\gamma$  se obtiene por intuición: aquel valor mínimo que puede dar la población.

Una vez obtenida la distribución de  $N$  para los distintos materiales, se puede representar la curva de fatiga en el que las abscisas representan el número de ciclos, y las ordenadas la probabilidad de fallos.

Como se puede observar en la gráfica 12.1, las curvas de D8CA y MAR-250 son muy parecidas, siendo más fiable a alto número de revoluciones el primero (por encima de 15000), mientras que el segundo presenta mejor fiabilidad a menor número de revoluciones (por debajo de 15000). La primera curva

representa un material de muy corta vida, mientras que el cuarto hay alguna probabilidad de que su vida sea muy larga pero es muy poco fiable.

## **12.5. Conclusión**

Con este tipo de herramientas se puede establecer una comparativa de comportamiento a fatiga entre distintos materiales cuando van a estar sometidos a un esfuerzo concreto. Normalmente se prefieren materiales altamente fiables en donde la probabilidad de no-fallo para un determinado número de ciclos sea muy elevado.



# Control Estadístico de Procesos

### 13.1. Introducción

El control estadístico de procesos (CEP) es una herramienta que informa realmente sobre la calidad con que se está produciendo, en términos estadísticos. Esto permite corregir los errores, detectar sus causas, reducir las dispersiones, . . . , y eliminar el control final por muestreo. Es una herramienta de mejora continua en la que los datos son tomados por los propios operarios y ellos mismos pueden muchas veces detectar las causas y mejorar los procesos.

### 13.2. Control Estadístico de Procesos (CEP) versus Muestreo Final de Producción

Desde que las normas MIL-STD 105D se impusieron en la industria bélica americana durante la Segunda Guerra Mundial. Se extendió el uso del control de calidad por muestreo para las compras de productos. Esto llevó a los proveedores a realizar sus propios planes de muestreo antes de pasar el examen del cliente. Sin embargo, esto no daba buenos resultados pues estos planes no dejan de ser un juego en el que el cliente tiene un riesgo de aceptar un lote malo, y el cliente también tiene un riesgo de que le rechacen un lote bueno. El procedimiento de control en inspección final se representa en la figura 13.1.

Al contrario de lo que sucede con los planes de muestreo, el CEP informa de la capacidad del proceso para hacer productos válidos, y permite tener una

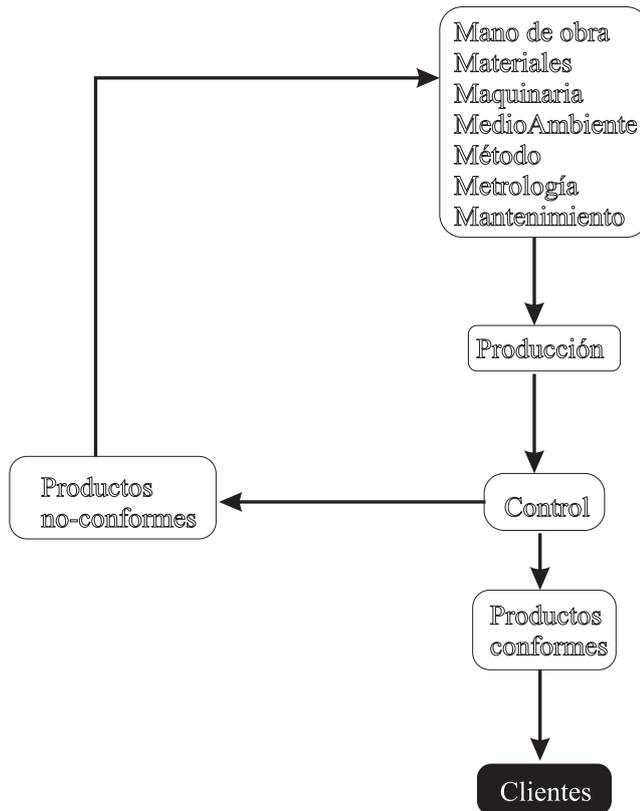


Figura 13.1: Procedimiento de control de calidad basado en muestreo de piezas producidas

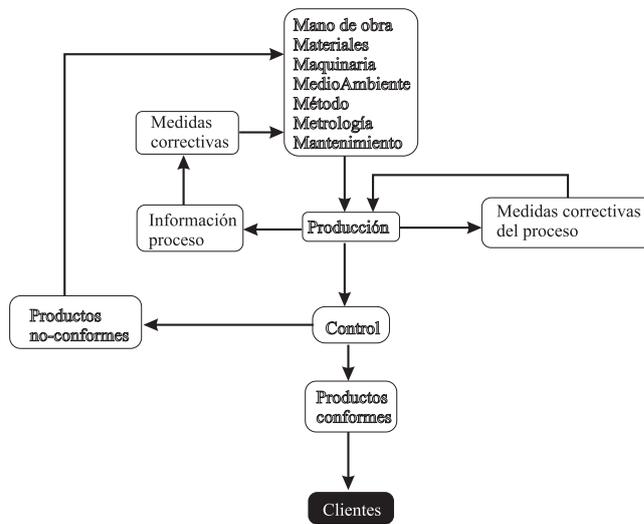


Figura 13.2: Procedimiento de control de calidad basado en control de procesos

información mucho más exhaustiva de cómo se cumplen las especificaciones de producto.

El control estadístico de procesos, introduce el control en el mismo proceso de producción, en las etapas críticas que definen la calidad del producto. De este modo, y mediante herramientas estadísticas se pueden detectar con prontitud variaciones en parámetros de calidad, determinando las causas de esas variaciones y aplicando las medidas correctivas en el mismo proceso, anticipándose con mucho margen a la producción de productos defectuosos.

Como se muestra en la Figura 13.2, las medidas correctivas se pueden aplicar o bien en la misma producción, o bien después de un estudio de las causas en las 7M.

### 13.3. Causas asignables y aleatorias

En el CEP se busca conocer las causas de desviaciones en especificaciones a partir del análisis estadístico. Esto se basa en el principio metafísico de la causalidad enunciado por primera vez por Aristóteles por el que "todo efecto tiene una causa", por el que se pretende introducir conocimiento científico (conocimiento cierto por sus causas") en la producción. Este conocimiento de las causas no sólo lleva a mejorar la calidad sino que también produce satisfacción en el obrero de a pie de máquina que, como todo ser humano, se

alegra al alcanzar una mayor comprensión de lo que lleva entre manos.

Además del principio de causalidad, otro principio aplicable es el de imperfección de la materia, que afecta a las cosas materiales y a los instrumentos con que medimos esas cosas materiales. Incluso los objetos más perfectos como son los patrones de calibración tienen su incertidumbre, y su medición o replicación añade más incertidumbre todavía a la medida. No existe el patrón perfecto ni la tolerancia 0 en la medición.

En los diagramas causa-efecto de Ishikawa hay 7 fuentes de causas que pueden dar lugar a un producto defectuoso, que en español se las denomina las 7M: Maquinaria, Mano de obra, Medio ambiente, Materiales, Método, Mantenimiento y Metrología. Al descubrir con las herramientas del CEP una evidencia de que la distribución estadística ha cambiado (también puede ser para mejor), la causa puede ser trivial, o bien habrá que priorizar entre un listado que se haya realizado teniendo en cuenta las 7M.

Es importante justificar estadísticamente que la distribución ha cambiado, de otra manera se estarían realizando modificaciones sobre la producción que aumentarían la dispersión de las variables, tal como ilustró Deming con su experimento del embudo. En la industria, se considera la evidencia estadística como una probabilidad observada del 99,7% (criterio  $3\sigma$ ). Hasta que no se alcanza esta evidencia, no hay razón para sacar conclusiones respecto a la calidad del proceso, pues las variaciones entran dentro de una variabilidad posible. Las variaciones evidentes (probabilidad  $>99,7\%$  de que ha habido cambio) tienen una causa asignable que habrá que descubrir. Mientras que las variaciones en la medición que son no evidentes se pueden considerar aleatorias y por lo tanto no se puede encontrar ninguna causa para ellas sino la imperfección del objeto o del instrumento con el que se mide.

El ejemplo del embudo y la canica es la típica ilustración del concepto de evidencia estadística y se puede encontrar en múltiples vídeos en YouTube, por ejemplo en <http://www.youtube.com/watch?v=9Z3o64FAtvA>.

## 13.4. Gráfico de control

El objetivo del gráfico de control es la representación temporal del parámetro de calidad de forma que cualquier variación del modelo de probabilidad (con evidencia estadística) salte a la vista de dicho gráfico. El gráfico de control es un instrumento para anticiparse a posibles pérdidas de calidad o para encontrar causas que mejoren ésta, siendo un instrumento de mejora continua.

El proceso está "bajo control" cuando el modelo de probabilidad es estable y por lo tanto todas las variabilidades son aleatorias. El proceso está "fuera de

controlando se tiene evidencia estadística de que el modelo de probabilidad ha cambiado por lo que se ha de buscar la causa que ha provocado esta variación, de modo que se pueda consolidar (si mejora el producto) o se pueda eliminar (para volver a lo anterior).

En estos gráficos se reflejan también los cambios en las 7M de forma que se pueda establecer una correlación entre el cambio probabilístico y su causa correspondiente.

### 13.4.1. Tipos de Gráficos de Control

#### Gráficos de control por variables

- Individuos ( $x$ )
- Medias-Rango ( $\bar{x}/R$ )
- Medias-Desviación Típica ( $\bar{x}/R$ )
- Medianas-Rango ( $Md/R$ )
- Sumas acumuladas
- Pre-Control
- ...

#### Gráficos de control por atributos

- Porcentaje de unidades defectuosas ( $p$ )
- Número de unidades defectuosas ( $np$ )
- Porcentaje de defectos ( $u$ )
- Número de defectos ( $c$ )

### 13.4.2. Metodología general

1. Elegir carácter a evaluar. Este carácter suele obtenerse de un gráfico de Pareto o de un FMEA. Es importante que se realice en el punto de producción adecuado para evitar operaciones posteriores que distorsionen la causa.
2. Elegir tipo de gráfico. Por variables o atributos, y el tipo específico.

3. Elegir tamaño de muestra
4. Diseñar sistema de recogida de datos y su análisis
5. Elaborar ficha y dar instrucciones a los que van a estar involucrados en el proceso.

### 13.4.3. Criterios de prueba

Los criterios de prueba se utilizan para reconocer la aparición de sucesos no aleatorios en los gráficos. Aunque existen muchos, los más usados son los cinco siguientes:

1. Un puntos supera los límites de control
2. 7 valores seguidos se encuentran en el mismo lado respecto a la línea media
3. 7 valores seguidos con el mismo signo de tendencia
4. 2 valores al mismo lado y más alejados de  $2\sigma$  respecto a la línea media
5. 4 valores al mismo lado y más alejados de  $\sigma$  respecto a la línea media

Estos dos últimos criterios se aplican sólo si la distribución es normal y por lo tanto simétrica.

## 13.5. Gráficos por variables

Para la construcción de gráficos, se usan unas constantes en función del tamaño de muestra. Estas constantes vienen dadas en la tabla 13.1, donde las constantes están definidas en la tabla 13.2.

### 13.5.1. Individuos ( $x$ )

Se representa en abscisas el valor de tiempo y en ordenadas el valor de  $x$ . La línea media se establece en la ordenada  $\bar{x}$  y los límites de control se establecen en  $LS_x = \bar{x} + 3s$  y en  $LI_x = \bar{x} - 3s$ .

Este gráfico se usa poco ya que las variable de medición, con frecuencia no siguen el patrón de una distribución normal.

Tabla 13.1: Valor de las constantes para el establecimiento de límites de control

$n$	$A_2$	$A_3$	$B_3$	$B_4$	$D_3$	$D_4$
2	1,88	1,88	0	3,267	0	3,627
3	1,023	1,187	0	2,868	0	2,574
4	0,729	0,796	0	2,266	0	2,282
5	0,577	0,691	0	2,089	0	2,114
6	0,483	0,548	0,03	1,97	0	2,004
7	0,419	0,508	0,118	1,885	0,076	1,924
8	0,373	0,433	0,185	1,815	0,136	1,864
9	0,377	0,412	0,239	1,761	0,184	1,816
10	0,308	0,362	0,284	1,716	0,223	1,777

Tabla 13.2: Significado de las constantes de la tabla 13.1

Cte.	Gráfico	A partir de
$A_2$	$\bar{X}$	$R$
$A_3$	$Md$	$R$
$B_3$	$LI_s$	$s$
$B_4$	$LS_s$	$s$
$D_3$	$LI_R$	$R$
$D_4$	$LS_R$	$R$

### 13.5.2. Medias-Rango ( $\bar{x}/R$ )

Se representa en abscisas el valor de tiempo y en ordenadas el valor de  $x$ . La línea media se establece en la ordenada  $\bar{x}$  y los límites de control se establecen en  $LS_{\bar{x}} = \bar{x} + A_2\bar{R}$  y en  $LI_{\bar{x}} = \bar{x} - A_2\bar{R}$  para las medias. Los límites para los recorridos son  $LI_R = D_3\bar{R}$  y  $LS_R = D_4\bar{R}$ .

Este gráfico es el más usado por ser el más intuitivo a la hora de interpretar.

### 13.5.3. Medias-Desviación Típica ( $\bar{x}/s$ )

Se representa en abscisas el valor de tiempo y en ordenadas el valor de  $x$ . La línea media se establece en la ordenada  $\bar{x}$  y los límites de control se establecen en  $LS_{\bar{x}} = \bar{x} + A_1\bar{s}$  y en  $LI_{\bar{x}} = \bar{x} - A_1\bar{s}$  para las medias. Los límites para los recorridos son  $LI_s = B_3\bar{s}$  y  $LS_s = B_4\bar{s}$ .

Este gráfico es el más estadístico, pues los conceptos son fáciles de interpretar, pero tiene el inconveniente de que para calcular  $s$  se requieren calculadoras especiales por lo que es menos usado que el medias-rango. De todas formas, este gráfico es preferido cuando la toma de datos es electrónica y la información es procesada directamente por el ordenador.

### 13.5.4. Medianas-Rango ( $Md/R$ )

Se representa en abscisas el valor de tiempo y en ordenadas el valor de  $Md$ . La línea media se establece en la ordenada  $\overline{Md}$  y los límites de control se establecen en  $LS_{Md} = \overline{Md} + A_3\bar{R}$  y en  $LI_{Md} = \overline{Md} - A_3\bar{R}$  para las medias. Los límites para los recorridos son  $LI_R = D_3\bar{R}$  y  $LS_R = D_4\bar{R}$ .

Este gráfico es el más fácil de rellenar cuando se realizan las operaciones manualmente. No hace falta calculadora.

## 13.6. Gráficos por atributos

En los gráficos por atributos se registran variables discretas, se analizan muestras de grandes lotes y el número de unidades defectuosas o número de defectos queda registrado. Para los distintos tipos de gráficos se usan las distribuciones Binomial y la de Poisson. Los límites de control se establecen las líneas distanciadas  $3\sigma$  de la media.

A la hora de diseñar el gráfico es importante acertar al establecer el tamaño de muestra.

### 13.6.1. Unidades defectuosas por muestra ( $np$ )

Siendo  $n$  el tamaño de muestra y  $p$  la porción de unidades defectuosas,  $np$  representará el número de unidades defectuosas por muestra. La distribución que sigue esta variable será la Binomial. La distribución es simétrica y los límites superior e inferior vienen dados por:

$$\begin{aligned} LS_{np} &= \bar{np} + 3\sqrt{\bar{np}(1 - \bar{p})} \\ LI_{np} &= \bar{np} - 3\sqrt{\bar{np}(1 - \bar{p})} \end{aligned} \quad (13.1)$$

Si el límite inferior es negativo, el límite inferior será el 0 y la distribución deja de ser simétrica por lo que dejan de tener sentido las pruebas complementarias.

### 13.6.2. Porcentaje de unidades defectuosas por muestra ( $p$ )

En este gráfico la variable es más intuitiva e indica el índice de calidad en cuanto que da un porcentaje.  $p$  la porción de unidades defectuosas, y los límites de control equivalen al de  $np$  pero dividiendo por el tamaño de muestra:

$$\begin{aligned} LS_p &= \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{n}} \\ LI_p &= \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{n}} \end{aligned} \quad (13.2)$$

Si el límite inferior es negativo, el límite inferior será el 0 y la distribución deja de ser simétrica por lo que dejan de tener sentido las pruebas complementarias.

### 13.6.3. Número de defectos $c$

En este tipo de gráfico una unidad puede tener 2 ó más defectos.  $c$  será el número total de defectos por muestra. La distribución de probabilidad utilizada es la de Poisson con parámetro  $\lambda = c$ .

$$\begin{aligned} LS_c &= \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}} \\ LI_c &= \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}} \end{aligned} \quad (13.3)$$

Si el límite inferior es negativo, el límite inferior será el 0 y la distribución deja de ser simétrica por lo que dejan de tener sentido las pruebas complementarias.

### 13.6.4. Número de defectos por unidad de inspección $u_i$

En este tipo de gráfico una unidad puede tener 2 ó más defectos. Si  $c$  será el número total de defectos por muestra, el número de defectos por unidad de inspección será  $u_i = c/n$ . La distribución de probabilidad utilizada es la de Poisson con parámetro  $\lambda = c/n$ .

$$\begin{aligned} LS_{u_i} &= \bar{u} + 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}} \\ LI_{u_i} &= \bar{u} - 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}} \end{aligned} \quad (13.4)$$

Si el límite inferior es negativo, el límite inferior será el 0 y la distribución deja de ser simétrica por lo que dejan de tener sentido las pruebas complementarias.

### 13.6.5. Establecimiento del tamaño de muestra para gráficos de control por atributos

Es importante acertar en el establecimiento del tamaño de muestra en gráficos de control por atributos, ya que se es pequeño, el número de muestras sin unidades defectuosas o con 0 defectos sería excesivo, y si es demasiado grande, el coste de la inspección puede ser muy elevado, y encarecer el producto.

Los métodos más habituales para calcular el tamaño de muestra y evitar estos extremos son:

1. Que la probabilidad de encontrar alguna unidad defectuosa sea  $a_\gamma$ .
2. Que el límite inferior de control sea mayor que 0
3. Que tengamos una probabilidad de 0.5 de detectar un incremento de  $p$  igual a  $\delta$ .

Como ejemplo, supongamos que estamos produciendo lotes con un porcentaje de defectuosos  $\bar{p} = 0,01$ . Si  $a_\gamma = 0,95$  el tamaño de muestra será tal que, aplicando la distribución binomial,  $P(x = 0) = 1(1 - p)^n = 0,05$ , es decir,  $0,95^n = 0,05$ . Por lo que

$$n = \frac{\ln 0,05}{\ln 0,99} = 298$$

Aplicando el segundo criterio

$$LI = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} > 0$$

con lo que si  $\bar{p} = 0,01$  resulta que  $n > 891$

Y por último, aplicando el último método con un  $\delta = 0,04$  la expresión resultante será:

$$\delta = p_2 - p_1 = 3\sqrt{\frac{\bar{p}_1(1-\bar{p}_1)}{n}} = 0,04$$

Esta expresión viene de que la diferencia entre la nueva media y el límite de control antiguo es el valor  $\delta$  por lo que la mitad de los valores caerían en ese intervalo.

Con un  $p_1 = 0,01$  se obtiene un valor de tamaño muestral  $n = 56$ .

Comparando los tres métodos, se observa que el segundo es el más conservador, mientras que el primero y el último será más o menos restrictivos dependiendo del valor que se otorgue a  $a_\gamma$  y  $\delta$ .

## 13.7. Gráficos especiales

Los gráficos de control vistos hasta ahora se basan en el establecimiento de unos límites y unos criterios a las variables o atributos cuya muestra se ha medido. Ahora se van a ver dos casos de gráficos de control en los que los criterios de control son distintos.

### 13.7.1. Sumas acumuladas (CUSUM)

El gráfico de sumas acumuladas es muy específico para detectar cambios en la media. Es muy usado en la regulación de máquinas, temperaturas, tensión de aporte, etc. para corregir desviaciones respecto a un valor objetivo.

Para detectar que la media ha cambiado, se usa una plantilla en forma de cuña tal como se representa en la Figura con una geometría definida por  $d$  y  $\theta$ . Esta plantilla se va colocando en el último punto registrado de forma que cuando algún punto de los anteriores queda oculto por la plantilla, se puede decir que la media de la distribución ha cambiado.

Para la construcción del gráfico y de la plantilla se sigue el siguiente procedimiento:

1. Se rellena la tabla,  $\bar{x}_i$ ,  $y_i = \bar{x}_i - \omega$ ,  $S_i = \sum_0^i u_i$ , y se estima la  $\sigma_{\bar{x}_i}$ .
2. Se construye el gráfico de sumas acumuladas que representan las  $S_i$ .

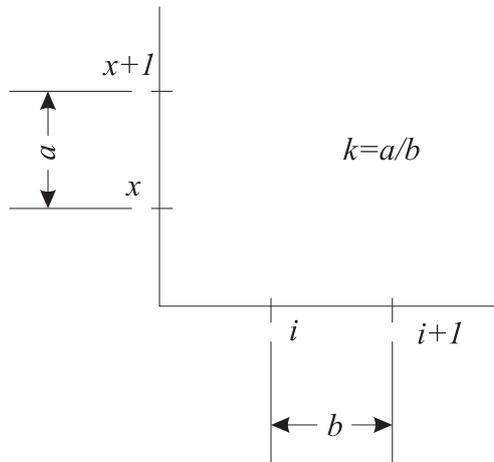


Figura 13.3: Definición del factor  $k$  a partir de las medidas sobre papel de  $a$  y  $b$

Tabla 13.3: Tabla para el cálculo de parámetros en la gráfica CUSUM

$\delta_1, \delta_2$	$\theta$	$\mathbf{d}$
0,5	$14^\circ$	36,7
1	$26^\circ 34'$	13,2
1,4	$35^\circ$	6,7
2	$45^\circ$	3,3
2,4	$50^\circ 12'$	2,3

- Se determina la menor magnitud  $D$  del cambio de  $\bar{x}$  que se desea detectar. Y se calcula  $\delta_i = \frac{D}{\sigma_{\bar{x}_i}}$ . Siendo  $\delta_i$  un valor entre 0.5 y 2.
- Se establece un nivel de probabilidad para tomar decisiones  $\alpha = 0,00135$  correspondiente al criterio  $3\sigma$ .
- Se define un factor de escala  $k$  como relación entre la magnitud lineal de una unidad en ordenadas con la de una unidad en abcisas tal como se muestra en la figura 13.3. Es práctica común escoger  $A$  y  $B$  de forma que  $k = 2\sigma_{\bar{x}}$
- Se obtiene la distancia  $d$  de la tabla 13.3 introduciendo un  $\delta = \delta_i$  obtenido en el paso 3.
- Se obtiene el valor del ángulo  $\theta$  de la tabla 13.3 introduciendo el valor de  $\delta = \frac{D}{k}$

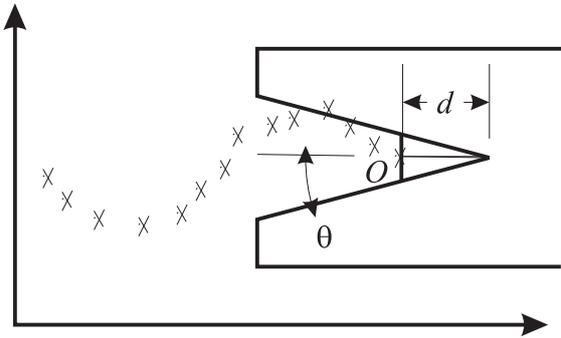


Figura 13.4: Realización del Gráfico CUSUM

8. Con los valores de  $\theta$  y  $d$  se dibuja y se recorta la plantilla colocando el punto vértice  $O$  en cada punto conforme se vaya señalando en la gráfica, tal como se muestra en la figura 13.4

Por ejemplo si se realizan 20 subgrupos de 4 unidades con un valor de referencia  $\omega = 10$  y se ha visto que el rango medio es  $\bar{R} = 8,08$  se obtiene a partir del  $A_3$  la desviación típica de las medias  $\sigma_{\bar{x}} = 1,96$ . Si establecemos que queremos detectar un cambio en la media de  $D = \sigma_{\bar{x}}$  con un factor de escala  $k = 2\sigma_{\bar{x}}$  se obtiene de  $\delta_1 = 1$  un valor de  $d = 13,2$ , y de un valor  $\delta_2 = 0,5$  el valor de  $\theta = 14^\circ$

### 13.7.2. Pre-Control

El Pre-control es un sistema alternativo a los gráficos de control. En este sistema no se mira tanto mejorar la calidad del proceso como prever la salida fuera de tolerancia del proceso.

El sistema consiste en marcar sobre una cinta de 6 bandas y 3 colores las medidas tomadas durante el proceso. La cinta viene representada en la Figura 13.5, y el procedimiento es como sigue:

1. Si cinco unidades consecutivas caen dentro de zona verde, se considera el proceso capaz.
2. Una vez conseguido este régimen se inspeccionan 2 unidades consecutivas cada 10 unidades no inspeccionadas.
3. se toman decisiones dependiendo de la zona en la que caigan las unidades:

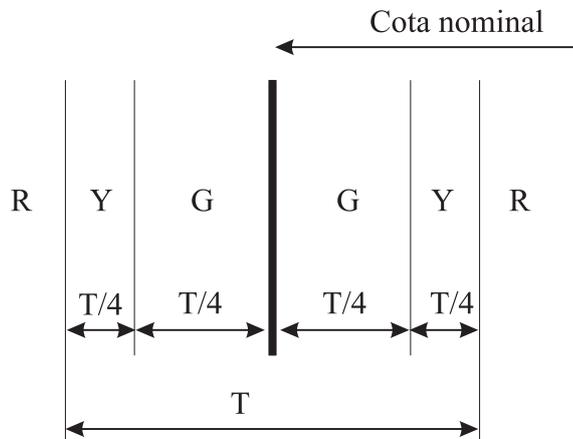


Figura 13.5: Cinta para el uso en Pre-Control con sus bandas verdes (G), amarillas (Y), y rojas (R)

- a) Si ambas unidades caen en zona amarilla del mismo lado, se procede al ajuste inmediato
- b) Si ambas son amarillas pero en lados opuestos, el proceso ha entrado en inestabilidad por lo que ha de parar el proceso
- c) Si una está en zona roja y otra en verde, proceder a un ajuste
- d) si las dos son rojas, parar

Este sistema tiene algunas ventajas frente al gráfico de control aunque su utilidad queda limitada solamente a prevenir productos fuera de tolerancia.

1. El operario no hace cálculos y no rellena gráficos
2. La comprensión y utilidad es más intuitiva
3. La distribución no tiene que ser normal
4. El proceso no necesita estar bajo control estadístico

## 13.8. Capacidad de proceso

La capacidad de proceso es un índice para cuantificar la capacidad del proceso para producir dentro de tolerancia considerando aceptable un porcentaje del 99.7%. Si el índice de capacidad es mayor o igual a 1 el proceso se considera capaz, y si es menor el proceso se considera incapaz.

En un proceso centrado en el que la media de las medidas coincide con el centro del intervalo de tolerancia, la capacidad de proceso tiene la siguiente expresión:

$$C_p = \frac{LST - LIT}{6\sigma_x} \quad (13.5)$$

En donde  $LST$  y  $LIT$  son los límites superior e inferior de tolerancia respectivamente, y  $\sigma_x$  es la desviación típica de la variable  $x$  que debe cumplir con los límites de tolerancia.

En el caso de que el proceso esté descentrado el índice de capacidad de proceso se mide a partir del límite más desfavorable.

$$C_{pk} = \frac{\text{Min}(LST - \bar{x}, \bar{x} - LIT)}{3\sigma_x} \quad (13.6)$$

Si la primera expresión 13.5 indica que el proceso es incapaz, entonces  $C_{pk}$  también será menor que 1.

$C_{pk}$  también se usa cuando sólo hay un límite de tolerancia, el superior o el inferior.

## 13.9. Errores comunes

Existen situaciones que distorsionan el control de calidad y que se pueden detectar a través de los gráficos de control y el histograma de la distribución estadística. Las distorsiones más comunes son:

1. Ausencia en el histograma de valores de  $x$  en el intervalo inmediato al límite de tolerancia. Ej. (ausencia de calificaciones entre 4.5 y 5 en exámenes universitarios)
2. Histogramas bi-modales debido a dos inspectores o diferentes instrumentos de medida
3. Forma de diente de sierra. Ej. Deterioro de la herramienta de mecanizado que se cambia regularmente.
4. Excesivos puntos en la línea central en porcentaje de defectuosos. Ej. Impronta de molde que contiene 12 unidades y que una de ellas es defectuosa.

## 13.10. Problemas

1. Se han seccionado cordones de soldadura y se ha medido la penetración máxima que ha tenido el material base fundido, si esta penetración fuera menor de 1.5 milímetros habría una gran probabilidad de aparición de grietas, mientras que si fuera mayor de 3 mm las propiedades metalúrgicas del material base quedarían gravemente deterioradas. Se han obtenido 8 muestras de 5 inspecciones cada una de cordones realizados por 4 operarios distintos según la tabla 13.9.
  - a) Realizar un gráfico de control medianas rango ( $\overline{Md}/R$ )
  - b) Indicar si el proceso es capaz (excluyendo las irregularidades)
  - c) Calcular el porcentaje de inspecciones que pueden caer fuera de tolerancia
  
2. Se pretende llevar el control de la limpieza en el proceso de producción de rollos de papel cliché fotografiando muestras de 20\*20 mm y mediante tratamiento de imágenes contar el número de picaduras que se observa en cada muestra. En la tabla 13.10 se señalan los resultados de 15 muestras de 4 inspecciones cada una.
  - a) Realizar un gráfico de control de número de defectos por unidad de inspección ( $u_i$ )
  - b) Indicar si los operarios influyen en el proceso y de qué manera
  - c) Realizar un diagrama de sumas acumuladas (sin plantilla). ¿Se observa alguna evolución en la media?
  
3. Al realizar un diagrama de medias rango ( $\overline{x}/R$ ) cada muestra es de 5 valores. Se calcula la media de medias y la media de recorridos, se obtienen unos valores de  $\overline{\overline{x}} = 200$  y  $\overline{R} = 2,3$ . Los límites de especificación son  $200 \pm 3$ . Dibujar la plantilla del diagrama de control, indicar si el proceso es capaz y el porcentaje de piezas que se salen fuera de la especificación.
  
4. Los tubos para estructuras de 20mm de diámetro por 0.5 de espesor, se fabrican en serie mediante etapas de corte de bobina metálica en cintas, curvado longitudinal de éstas y soldadura continua de sus bordes. Estos tubos se cortan cada 6 m de longitud para su almacenaje en lotes hexagonales de 300 unidades. La fabricación es continua y se realizan durante el día 5 inspecciones visuales del cordón de soldadura en las

cuales se analizan 10 unidades, evaluándose el número total de defectos. Los resultados vienen reflejados en la tabla 13.11

- a) Realizar un gráfico de control por número de defectos
  - b) Analizarlo y excluir razonadamente los tramos no aleatorios
  - c) ¿Cuál debería ser la longitud total analizada por muestra para que el límite inferior de control sea mayor de cero?
5. Los tubos para estructuras de 30 mm de diámetro por 0.5 de espesor, se fabrican en serie mediante etapas de corte de bobina metálica en cintas, curvado longitudinal de éstas y soldadura continua de sus bordes. Estos tubos se cortan cada 6 m de longitud para su almacenaje en lotes hexagonales de 61 unidades. La fabricación es continua y se realizan inspecciones por análisis de imagen de todo el cordón de soldadura a la salida de la máquina, evaluándose el número total de defectos en cada hora de trabajo. Los resultados vienen reflejados en la tabla 13.4
- a) Realizar un gráfico de control de número de defectos por unidad de tiempo ( $c_i$ )
  - b) Si la productividad es de 0.3 m/s. ¿Cuál es la media de defectos por unidad?
  - c) Si el límite de especificación es de 5 defectos por lote. ¿Qué porcentaje de lotes se sale fuera de especificación?
6. En el mecanizado de un lote de piezas mediante una máquina transfer, la operación de mandrinado en una estación de trabajo es crítica en la calidad final de la pieza, por lo que se somete a inspección automática continua después de dicha operación. El control estadístico de proceso se realiza mediante gráficos de control medias-rango. La especificación para el diámetro de dicha característica es  $\emptyset 30^{+0.02}_0$ . El cambio de herramienta se realiza después de mecanizar 15 piezas, tomando tamaños de muestra de 3 para la realización del gráfico, resultando los datos de la tabla 13.5
- a) Realizar el gráfico de control.
  - b) Rechazar razonadamente los tramos no aleatorios. Indicar dos posibles causas.
  - c) Indicar la capacidad del proceso en condiciones estables
  - d) ¿Qué porcentaje de piezas caen fuera de tolerancia? y ¿Cuántas de ellas serían rectificables?

Tabla 13.4:

n.º hora	Defectos		n.º hora	Defectos
1	5		26	2
2	7		27	3
3	6		28	8
4	8		29	4
5	2		30	4
6	5		31	7
7	4		32	4
8	9		33	4
9	5		34	6
10	7		35	6
11	2		36	2
12	4		37	2
13	7		38	6
14	4		39	8
15	6		40	5
16	5		41	7
17	4		42	6
18	0		43	7
19	5		44	2
20	2		45	7
21	4		46	3
22	2		47	2
23	7		48	4
24	8		49	5
25	8		50	4

Tabla 13.5:

n.º muestra	Herramienta	Media	Rango
1	1	30,012	0,009
2	1	30,013	0,012
3	1	30,009	0,008
4	1	30,007	0,007
5	1	30,004	0,004
6	2	30,010	0,007
7	2	30,013	0,012
8	2	30,007	0,005
9	2	30,009	0,009
10	2	30,003	0,002
11	3	30,012	0,009
12	3	30,010	0,007
13	3	30,007	0,004
14	3	30,007	0,006
15	3	30,004	0,004
16	4	30,011	0,008
17	4	30,009	0,006
18	4	30,006	0,004
19	4	30,005	0,004
20	4	30,007	0,008
21	5	30,013	0,007
22	5	30,015	0,010
23	5	30,013	0,009
24	5	30,012	0,007
25	5	30,010	0,007

Tabla 13.6:

n.º hora	Resp.		n.º hora	Resp.
1	23		16	1
2	28		17	4
3	22		18	3
4	23		19	4
5	13		20	9
6	20		21	11
7	21		22	8
8	18		23	15
9	11		24	12
10	10		25	7
11	9		26	12
12	12		27	12
13	12		28	16
14	12		29	14
15	6		30	15

7. Al realizar inspecciones a 200 unidades en un lote de 3000 ejes de motores eléctricos de 80 W mediante calibre pasa-no-pasa, se obtiene la tabla 13.12 de unidades defectuosas por muestra de lote:
- Realizar un gráfico de control de número de unidades defectuosas
  - ¿Cuál es la media de unidades defectuosas por lote? Una vez discriminados los lotes no aleatorios
  - Si el límite de especificación es de 100 defectuosos por lote. ¿Qué porcentaje de lotes se sale fuera de especificación?
8. En una cadena de cafeterías un ejecutivo quiere monitorizar mediante un gráfico de control la satisfacción del cliente. Cada semana cada camarero tiene que recoger 200 respuestas a la pregunta: ¿Está todo bien? y anotar las que no son del todo satisfactorias. En la tabla 13.6 se registran la suma hipotética de respuestas no satisfactorias del todo para 30 semanas en una de las cafeterías.
- Construir un diagrama de control adecuado
  - ¿Cuáles son las posibles causas de los tramos no-aleatorios y la razón de las tendencias?
  - Si la cafetería cuenta con 3 camareros ¿Qué porcentaje de respuestas no satisfactorias se están recibiendo?

Tabla 13.7:

Muestra	$\bar{x}$	$R$
1	57.62	106.34
2	98.04	56.83
3	49.74	61.72
4	50.67	63.41
5	42.40	47.85
6	41.19	26.79
7	26.71	49.59
8	38.05	49.25
9	38.01	48.19
10	37.81	45.31
11	32.66	32.12
12	37.02	23.45

9. El Vicerrectorado de Calidad de una Universidad se ha planteado, ante las constantes quejas del profesorado, implantar un procedimiento de mejora continua de la calidad en la función de administración y servicios mediante gráficos de control, con el fin de hacer que esta función sea "profesional, adecuada, fiable, completa, responsable y accesible". Para ello, se procede a registrar informáticamente el tiempo transcurrido desde la solicitud de un servicio (por el portal web de servicios) y el correo respuesta de trabajo cumplido. En la tabla 13.7 se representa la evolución temporal de la media de 5 tiempos de respuesta medidos en horas.
- Construir un diagrama de control adecuado
  - ¿Cuáles son las posibles causas de los tramos no-aleatorios y la razón de las tendencias?
  - ¿Cual sería la capacidad del proceso si se garantiza una respuesta en 48 horas?
10. El entrenador de un tenista DAN quiere mejorar el grado de fiabilidad de un golpe ganador concreto. Para ello instrumenta la raqueta con un acelerómetro triaxial y dos giróscopos MEMS que transmiten datos por Bluetooth a un ordenador cercano que registra la velocidad y los ángulos de impacto en cada golpe. Los golpes se producen siempre a la misma altura y en la misma posición de la pista, la bola llega siempre en horizontal con una velocidad de 10 m/s y una rotación de 200 rad/s. Después de estudiar los datos registrados el factor que más influye en

la dispersión del resultado es el ángulo de inclinación de raqueta  $\lambda$ . El entrenador tratará por lo tanto de encontrar métodos y técnicas para que el tenista mida y controle mejor ese ángulo, para ello decide realizar sesiones de entrenamiento de 21 golpes después de los cuales quiere analizar el grado de mejora de la técnica implementada. Se pide:

- a) Proponer un gráfico de control sobre el dato registrado de  $\lambda$  para detectar las mejoras.
  - b) El entrenador decide realizar un gráfico de medias-rango con un tamaño de muestra de 7 golpes, obteniendo unos resultados que se muestran en la tabla 13.13. Dibujar el gráfico de control y comentar que conclusiones se pueden sacar respecto a los cambios de técnica.
  - c) Si la distancia de la nube de puntos de impacto de bola tiene una desviación típica  $\sigma = 0,3$  m estando el límite de pista a 1 m de distancia respecto al punto central de la nube ¿Cual es la fiabilidad del golpe? y, desde criterios industriales ¿Es capaz el proceso?
11. Al realizar inspecciones a 250 unidades en un lote de 5000 tubos de plástico inyectado mediante calibre pasa-no-pasa, se obtiene la tabla 13.12 de unidades defectuosas por muestra de lote:
- a) Realizar un gráfico de control de porcentaje de unidades defectuosas
  - b) ¿Cuál es la media de unidades defectuosas por lote? Una vez discriminados los lotes no aleatorios
  - c) Si el límite de especificación es de 100 defectuosos por lote. ¿Qué porcentaje de lotes se sale fuera de especificación?
12. En un proceso de laminado de rosca en tornillos se observa que el diámetro final varía disminuyendo en las primeras operaciones. Se piensa que esto es debido al calentamiento de las matrices de conformado. Tomando muestras de 3 tornillos cada 5 minutos se obtiene la tabla 13.8 durante las primeras horas:
- a) Realizar el gráfico de control Medias Rango.
  - b) Estudiar el tiempo que tarda el proceso en ser estacionario.
  - c) Si la tolerancia es de  $30 \frac{0}{-0,04}$  Calcular la capacidad del proceso.
  - d) Excluyendo el periodo transitorio, calcular el porcentaje de defectuosos.

Tabla 13.8:

n.º muestra	x1	x2	x3
1	30.000	30.123	29.969
2	29.997	29.975	30.080
3	29.937	29.893	29.981
4	30.003	30.055	29.988
5	30.059	30.009	29.956
6	30.080	30.015	30.003
7	30.059	29.981	29.997
8	30.046	30.038	30.053
9	29.962	29.947	29.962
10	29.983	29.939	30.021
11	30.003	29.961	29.978
12	29.991	29.978	29.984
13	29.990	29.973	29.983
14	29.970	29.959	29.981
15	29.995	29.996	30.001
16	29.970	30.004	29.994
17	29.955	29.976	29.978
18	29.993	29.980	29.959
19	29.981	29.980	29.969
20	29.987	29.994	29.981
21	29.999	29.998	29.985
22	29.985	29.961	29.959
23	29.977	29.988	29.978
24	29.967	29.975	29.969
25	29.971	29.998	29.983

Tabla 13.9:

Operario muestra	Operario 1		Operario 2		Operario 3		Operario 4	
	1	2	3	4	5	6	7	8
x1	2,76	2,93	2,46	2,51	2,88	2,34	2,84	2,36
x2	2,17	2,57	3,28	2,93	2,39	2,73	2,50	2,58
x3	2,30	2,66	2,72	3,30	2,70	2,45	2,62	2,53
x4	2,38	2,65	3,65	2,10	2,08	2,71	2,01	2,55
x5	2,88	2,55	2,07	2,50	2,55	2,50	2,75	2,46

Tabla 13.10:

Operario muestra	Operario 1					Operario 2					Operario 3				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
x1	9	10	8	6	10	4	4	3	0	2	10	13	9	4	9
x2	3	11	7	7	7	6	4	6	12	0	9	9	7	9	12
x3	4	7	3	7	12	9	10	5	1	4	7	1	8	11	7
x4	5	8	1	5	3	1	8	1	8	13	8	11	5	11	6

Tabla 13.11:

n.º muestra	Día	Defectos		n.º muestra	Día	Defectos
1	1	8		26	6	0
2	1	10		27	6	4
3	1	10		28	6	7
4	1	10		29	6	7
5	1	6		30	6	3
6	2	6		31	7	4
7	2	9		32	7	5
8	2	7		33	7	1
9	2	4		34	7	4
10	2	6		35	7	2
11	3	3		36	8	2
12	3	4		37	8	3
13	3	5		38	8	6
14	3	6		39	8	7
15	3	9		40	8	4
16	4	10		41	9	4
17	4	12		42	9	7
18	4	10		43	9	3
19	4	8		44	9	5
20	4	9		45	9	6
21	5	6		46	10	8
22	5	7		47	10	2
23	5	2		48	10	5
24	5	5		49	10	4
25	5	4		50	10	7

Tabla 13.12:

n.º muestra	Unidades defectuosas	n.º muestra	Unidades defectuosas
1	9	26	9
2	10	27	8
3	5	28	11
4	3	29	14
5	7	30	4
6	5	31	10
7	6	32	7
8	7	33	4
9	0	34	6
10	3	35	5
11	2	36	1
12	4	37	8
13	5	38	5
14	0	39	6
15	7	40	5
16	7	41	1
17	5	42	2
18	2	43	7
19	6	44	5
20	9	45	5
21	5	46	6
22	8	47	3
23	11	48	5
24	4	49	5
25	11	50	5

Tabla 13.13:

muestra	media	recorrido	muestra	media	recorrido
1	21.32	13.78	16	20.77	6.07
2	17.69	11.23	17	20.02	3.77
3	20.24	14.37	18	19.38	6.40
4	22.62	19.20	19	21.47	8.60
5	18.96	28.79	20	19.13	4.98
6	21.98	19.03	21	20.52	8.09
7	18.58	11.60	22	19.79	7.70
8	19.70	7.91	23	19.64	4.68
9	19.25	14.69	24	20.51	5.44
10	20.93	7.90	25	20.04	9.51
11	18.87	6.04	26	20.33	6.92
12	18.91	10.97	27	19.24	5.64
13	20.97	13.18	28	19.99	4.74
14	19.38	12.70	29	20.37	3.84
15	19.30	8.77	30	20.97	6.93



# Muestreo en el control de calidad

### 14.1. Introducción

En un plan de muestreo se toma una muestra aleatoria de  $n$  unidades en un lote de tamaño  $N$ . Se verifica la conformidad de cada pieza con las especificaciones dadas. En función del número de unidades defectuosas  $d$  se procede a la aceptación o rechazo del lote por parte del proveedor. Este es el procedimiento de un muestreo simple pero sirve para ver las peculiaridades de los muestreos en general.

La toma de muestras para deducir el nivel de productos defectuosos es una herramienta estadística que se usa abundantemente en la industria. La toma de muestras se usa como herramienta normalizada para ganar confianza entre proveedor y cliente. El propósito de los planes de muestreo no es estimar la calidad pues no llega a conocer el porcentaje de defectuosos, ni tampoco pretende mejorar sistemáticamente la calidad como lo persigue el Control Estadístico de Procesos. Su objetivo es juzgar si un lote se acepta o no, en función del resultado de una inspección de una muestra de unidades. La probabilidad de aceptar un lote con un alto porcentaje de defectuosos es un riesgo que asume el comprador (riesgo  $\beta$ ), y la probabilidad de rechazar un lote con muy bajo porcentaje de defectos es un riesgo que asume el proveedor (riesgo  $\alpha$ ).

Estos procedimientos son imprescindibles cuando para ver hay que romper (ensayos destructivos). También es muy útil en algunos casos:

- Los costes de inspección 100 % son muy elevados
- Cuando los errores de los instrumentos de medida son elevados.

- Cuando se tiene un historial de la calidad del proveedor que lleva a desconfiar.
- Cuando hay riesgos serios respecto a la responsabilidad legal.
- ...

Estos procedimientos también tienen sus inconvenientes:

- Los riesgos del proveedor  $\alpha$  y y del cliente  $\beta$ . Hay una probabilidad de que el cliente acepte lotes malos, y también hay una probabilidad de que la proveedor le rechacen lotes buenos
- No busca las causas, por lo que es independiente del proceso de fabricación por lo que no pretende mejorarlo
- Genera gran cantidad de documentación que ha de ser ordenada y conservada largo tiempo
- ...

## 14.2. Planes de muestreo

Además del plan de muestreo simple mostrado al principio de la lección, están los muestreos dobles y múltiples. En el doble el número de rechazo de la primera muestra ( $Re_1$ ) es mayor que el número de aceptación ( $Ac_1$ ) más uno. Por lo que hay una probabilidad de que el número de unidades defectuosas sea tal que no se acepte ni se rechace en primera muestra ( $Ac_1 < d_1 < Re_1$ ). En el plan de muestreo múltiple de  $n$  etapas como máximo se cumple que  $Re_n > Ac_n + 1$ .

El coste de un plan de muestreo múltiple depende de la probabilidad de rechazo del lote en las distintas inspecciones, de esta forma el Número Muestral Medio ( $NMM$ ) se define como el promedio de número de inspecciones que se realizan en varios lotes. Por ejemplo, en un muestreo doble el  $NMM$  vendrá dado por:

$$NMM = n_1 + n_2(1 - P_{a1} - P_{re1}) \quad (14.1)$$

### 14.3. Curva característica

Dado un plan de muestreo, su curva característica es la representación gráfica de la probabilidad de aceptación del lote  $P_a$  en ordenadas frente al posible porcentaje de unidades defectuosas ( $p$ ) que tuviera dicho lote. En el caso de que el tamaño de lote sea mucho mayor que el tamaño de muestra  $n$ , esta curva será la representación de la suma de unos sumandos de la curva binomial.

$$P_a = \sum_{i=0}^{A_c} \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i} \quad (14.2)$$

En ciertos casos se puede aproximar en su caso a la distribución de Poisson

$$p_a = \sum_{i=0}^{A_c} e^{-np} \frac{(np)^i}{i!} \quad (14.3)$$

En esta curva se distingue el punto del proveedor o Nivel de Calidad Aceptable ( $NCA$ ) que es el porcentaje de defectuosos que el proveedor considera que lo supera con un riesgo mínimo  $\alpha$ . El punto del cliente o Calidad Límite ( $CL$ ) es el porcentaje de defectuosos por encima del cual no está dispuesto a tolerar, de todas formas a asumir el riesgo  $\beta$  si no quiere hacer un muestreo 100 %. Por último el Punto de Riesgo compartido ( $PRC$ ), el porcentaje de unidades defectuosas en el que la probabilidad de aceptación es de un 50 %. Este punto se encuentra entre el  $NCA$  y la  $CL$ .

A la hora de diseñar un plan de muestreo simple en el que tanto el proveedor como el cliente exponen sus riesgos y sus  $NCA$  y  $CL$ , se puede plantear un método numérico para su obtención, o bien se acude a un diagrama binomial especialmente diseñado para la elaboración de este tipo de planes.

El problema numérico para resolver las siguientes ecuaciones y obtener el tamaño de muestra  $n$  y el número de aceptación  $A_c$ , suele resolverse con tanteo:

$$1 - \alpha = \sum_{i=0}^{A_c} e^{-nNCA} \frac{(nNCA)^i}{i!} \quad (14.4)$$

$$\beta = \sum_{i=0}^{A_c} e^{-nCL} \frac{(nCL)^i}{i!} \quad (14.5)$$

## 14.4. Inspección con rectificación

En muchas inspecciones por muestreo el cliente admite que los lotes rechazados sean inspeccionados al 100 % con el fin de entregar un lote con 0 defectos. En este caso el cliente, en este caso, recibe menos unidades defectuosas promedio por lote. Este porcentaje de unidades defectuosas global se conoce como Calidad Media de Salida (*CMS*). En una producción con un porcentaje de defectuosos  $p$  se puede calcular la probabilidad de aceptación de un plan de muestreo  $P_a$ , si se inspeccionan  $N_l$  lotes, el n.º de lotes aceptados sería de media  $P_a N_l$  lo que indica que el cliente recibirá un n.º de piezas defectuosas totales igual a  $p P_a N_l N$  siendo  $N$  el número de piezas por lote. El *CMS* será entonces el porcentaje de unidades defectuosas que le llegan al cliente que será:

$$CMS = \frac{p P_a N_l N}{N_l N} = p P_a \quad (14.6)$$

Esta función si se representa respecto al n.º de defectuosos  $p$ , (combinando la curva característica del plan de muestreo  $P_a$ ) tendría un máximo que representaría el Limite de la Calidad Media de Salida (*LCMS*).

En estas inspecciones con rectificación conviene evaluar el coste que vendría dado por la Inspección Media Total (*IMT*) que incluye el coste de las inspecciones al 100 % de los lotes rechazados.

$$IMT = n + (1 - P_a)(N - n) \quad (14.7)$$

En el caso de inspección múltiple basta con sustituir  $n$  por el *NMM*.

## 14.5. Planes de Muestreo Normalizados

La práctica industrial ha llevado a normalizar los planes de muestreo por varias razones:

- Simplificar los cálculos y no meterse en discusiones matemáticas
- Facilitar la especificación en contratos, informes, auditorías, etc.
- Facilita la gestión de datos
- ...

Los objetivos de los planes de muestreo normalizados son la protección del comprador y del vendedor así como registrar un historial de calidad. De este modo hay tres normas usadas extensamente en la industria cada una de las cuales se centra en un aspecto:

- MIL-STD 105D. Está basada en el *NCA* y por tanto en la protección del proveedor. Es la más usada.
- Tablas Dodge-Romig. Tiene como datos de entrada la *CL* o el *LCMS*, y por lo tanto pone límites al n.º de unidades defectuosas en la aceptación, protegiendo al cliente.
- Tabla de Philips. Utiliza el Punto de Riesgo Compartido (*PRC*) que el porcentaje de defectuosos para el que  $P_a = 0,5$  como criterio de muestreo.

### 14.5.1. MIL-STD 105D

Esta norma se centra en el *NCA* normalizando sus valores entre 0,01 y 1000, representando porcentajes de defectuosos para valores inferiores a 10, y n.º de defectos para el resto de valores. El vendedor fija el *NCA* y el proveedor el Nivel de inspección que pueden ser I, II y III y representan calidades de 1, 1.5 y 4 % respectivamente. El tipo de inspección puede ser Normal, Rigurosa y Reducida permitiendo variar la intensidad de la inspección dependiendo del historial de inspecciones anteriores. El procedimiento suele ser:

1. Comienzo de la inspección Normal
2. Cuando dos lotes consecutivos son rechazados se pasa a Rigurosa
3. cuando se aceptan 5 lotes consecutivos se vuelve a la inspección normal
4. Cuando el n.º total de unidades defectuosas halladas en la inspección de los últimos 10 lotes es menor de un valor dado en una tabla, se pasa a Reducida
5. Un lote rechazado en Reducida indica que se vuelve a normal

## 14.6. Problemas

1. En un contrato entre comprador y proveedor de piezas de plástico cuya característica crítica se puede comprobar mediante un calibre pasapasa, se tiene que decidir qué norma aplicar para establecer la aceptación o rechazo de los lotes fabricados. El fabricante propone que se aplique la MIL STD 105D con muestreo doble (tipo II normal) y un  $NCA=0.65\%$  mientras que el comprador propone un muestreo simple Dodge-Romig con una calidad límite del 1 %. Si el tamaño de lote es de 1500 unidades y el porcentaje medio de defectuosos es del 0.3 %:

- a) ¿Cuál de los dos planes es más estricto?
  - b) ¿Cuál es la probabilidad de aceptación en ambos muestreos?
  - c) Si la inspección es rectificadora ¿Cuál es la calidad media de salida y la inspección media total en ambos tipos de muestreo?
2. Sobre lotes de  $N = 1000$  se establece el siguiente plan de muestreo doble:  $n_1 = 50$ ;  $A_{c1} = 0$ ;  $R_{e1} = 3$ ;  $n_2 = 25$ ;  $A_{c2} = 3$ ;  $R_{e2} = 4$ . Calcular el riesgo del proveedor si el nivel de calidad aceptable es  $NCA = 0,005$ , y el riesgo del cliente si la calidad límite es  $CL = 0,08$ . Calcular el número medio muestral ( $NMM$ ) si el porcentaje de defectuosos es de  $p = 0,01$ .
3. En la compra de lotes de 600 envases para bebidas, el cliente quiere que el porcentaje máximo de defectuosos con el que se encuentre sea de 3 %, teniendo un historial estable de porcentaje medio de defectuosos del 0,1 %. Aplicar un plan de muestreo doble Dodge-Romig para este caso.
- a) ¿En qué consistiría dicho plan de muestreo?
  - b) ¿Cuál es la probabilidad de aceptación en primera y segunda muestra del lote si el porcentaje de defectuosos es de 1.5%?
  - c) ¿Cuál es, en ese caso, la calidad media de salida, la calidad límite y la inspección media total?
4. Un fabricante de cajas eléctricas universales provee lotes de 840 unidades que se fabrican por inyección de plástico. El coste de fabricación es de 0.18 € unidad. Para el control de calidad el proveedor estima un porcentaje de defectuosos del 1.1 %. En los contratos, incluye un plan de muestreo doble usando la MIL STD 105D Nivel II con un nivel de calidad aceptable de 1.5 %. Se pide:
- a) ¿En qué consistiría el plan de muestreo para la inspección normal?
  - b) ¿Cuál es el riesgo asumido por el proveedor?
  - c) Si el coste de inspección es de 0.30 €/unidad, y la inspección es rectificadora ¿Cuál es el porcentaje medio del coste del lote que se lleva el control por muestreo?
5. Un fabricante de componentes electrónicos tiene un contrato de suministro y transporte de 35000 unidades hasta el almacén de su cliente durante los próximos 7 meses. En la firma del contrato se especifica

una calidad normal en un NCA del 0,4 % y un nivel de inspección para usos generales II conforme a MIL STD 105D.

El fabricante tiene un coste de 0.3 €/unidad para la inspección mediante muestreo simple de los componentes en fábrica y de 2900 € por transporte independientemente de las unidades transportadas. La dirección de calidad conoce que la calidad del proceso es del 0.3 % de defectuosos real.

El cliente estipula que la entrega de componentes se realice en lotes de 5000 unidades al mes hasta completar el pedido, dando la posibilidad al fabricante de entregar el pedido de una sola vez y repercutiéndole el coste de mantenimiento de stock establecido en 2925 €.

Se pide:

- a) ¿En qué consistirían los planes de muestreo?
  - b) ¿Cuál es el riesgo asumido por el proveedor en cada plan?.
  - c) Si la inspección es rectificadora ¿Qué modalidad de entrega le reportará al fabricante más beneficio económico?
6. En un muestreo triple se tienen los siguientes parámetros  $n_1 = 50$ ,  $A_{c1} = -$ ,  $R_{e1} = 2$ ;  $n_2 = 50$ ,  $A_{c1} = 1$ ,  $R_{e1} = 3$ ;  $n_3 = 50$ ,  $A_{c3} = 3$ ,  $R_{e3} = 4$ . Si el proveedor sabe que el porcentaje medio de defectuosos es de 0,5. El tamaño de lote es 2000 y el coste de fabricación del lote son 3000 €. Se pide:
- a) ¿Cuál es el riesgo asumido por el proveedor?.
  - b) Si el coste de inspección es de 0.30 €/unidad, y la inspección es rectificadora ¿Cuál es el porcentaje medio del coste del lote que se lleva el control por muestreo?
7. Sobre lotes de  $N = 1000$  se establece el siguiente plan de muestreo doble:  $n_1 = 50$ ;  $A_{c1} = 0$ ;  $R_{e1} = 3$ ;  $n_2 = 25$ ;  $A_{c2} = 3$ ;  $R_{e2} = 4$ . Calcular el riesgo del proveedor si el nivel de calidad aceptable es  $NCA = 0,5$  (en %), y el riesgo del cliente si la calidad límite es  $CL = 8$  (en %). Calcular el número medio muestral ( $NMM$ ) si el porcentaje de defectuosos es de  $p = 1\%$ . ¿Cual es la repercusión de la inspección en el coste de la pieza si fabricarla cuesta 2 € e inspeccionarla 0.2 €?
8. Un profesor decide ser más justo a la hora de hacer un examen y evaluar las competencias en conocimientos de sus alumnos. Decide asumir un riesgo máximo del 10 % de que un alumno apruebe conociendo menos

del 80 % de la materia. A la vez, quiere dar al alumno una probabilidad menor del 5 % de suspender en el caso de que domine más del 95 % de la materia. Usar el diagrama binomial para plantear un examen con el número de preguntas a realizar y el criterio para aprobar. Calcular probabilidad de aprobar de un alumno que domina el 90 % de la asignatura.

9. En una empresa de transporte se constató que el área contable-financiera está llevada por personas de perfil inadecuado por lo que la información de dicho departamento podría contener errores. Para determinar si se admiten las cuentas se procede a una auditoría interna. Esta auditoría analizará, entre otras cosas, la existencia de 186 activos inventariables adquiridos en el último año mediante muestreo doble usando la MIL STD 105D con un nivel III, NCA 1,5 %
  - a) Establecer el muestreo en estado riguroso.
  - b) En este estado y suponiendo que hay un 5 % de inventariable no existente. ¿Cuál es la probabilidad de aceptar las cuentas?
  - c) En el caso que se rechacen las cuentas se tendrá que hacer una revisión de todas las cuentas. ¿Qué soluciones propones para evitar situaciones parecidas en el futuro?