

CAPÍTULO IX

CONTROLAR EL PROCESO

CAPÍTULO IX

CONTROLAR EL PROCESO

En este paso se deberá monitorear y mantener en control al proceso. Es necesario desarrollar AMEF y planes de control e incluir técnicas afines como *gráficas de control*, *precontrol*, *gráfica CUSUM* y *gráfica EWMA*.

En ésta última fase se deben establecer los mecanismos para evitar errores y poder estandarizar los procesos a fin de satisfacer permanentemente las especificaciones de los clientes. Los objetivos del plan de control son asegurar los siguientes puntos:

- La eliminación de actividades que no agregan valor.
- La simplificación y reducción de tiempos de proceso.
- Creación de sistemas a prueba de errores.

Para lograr lo anterior se deberá:

- Estandarizar procesos.
- Automatizar procesos.
- Documentar, crear procedimientos en el proceso, pero sobretodo cumplirlos.
- Romper con el esquema tradicional de funciones.
- Apoyar en la tecnología de información.
- Integrar las lecciones aprendidas durante el proyecto.

En este punto culmina el ciclo de la metodología, dejando a su paso una forma de trabajar que asegure el cumplimiento de los requisitos de los clientes internos y externos, en otras palabras satisfacer todas y cada una de las especificaciones del producto, con el mínimo o cero retrabajo, desperdicio, devoluciones, etc. Para que dicha forma de trabajar se convierta en parte de la cultura de la empresa, se tendrá que demostrar día a día con resultados de óptima eficiencia y productividad.

Desde el punto de vista del personal, el equipo debe:

- Vender el proyecto mediante presentaciones y demostraciones.
- Traspasar las responsabilidades del proyecto a los que se encargan del día a día del proceso.
- Asegurarse del apoyo de la dirección para los objetivos a largo plano del proyecto.

Puede ser difícil imaginarse a un equipo retirarse de un proyecto en el que han invertido meses y pasar a otros proyectos o volver a su trabajo habitual, pero eso es lo que hacen siempre los equipos. El éxito final del proyecto Six Sigma descansa en los que hacen el trabajo en el área en la que se enfocó el proyecto.

El Figura 9.1 muestra el Diagrama de Flujo correspondiente al procedimiento de control y mejora de procesos.

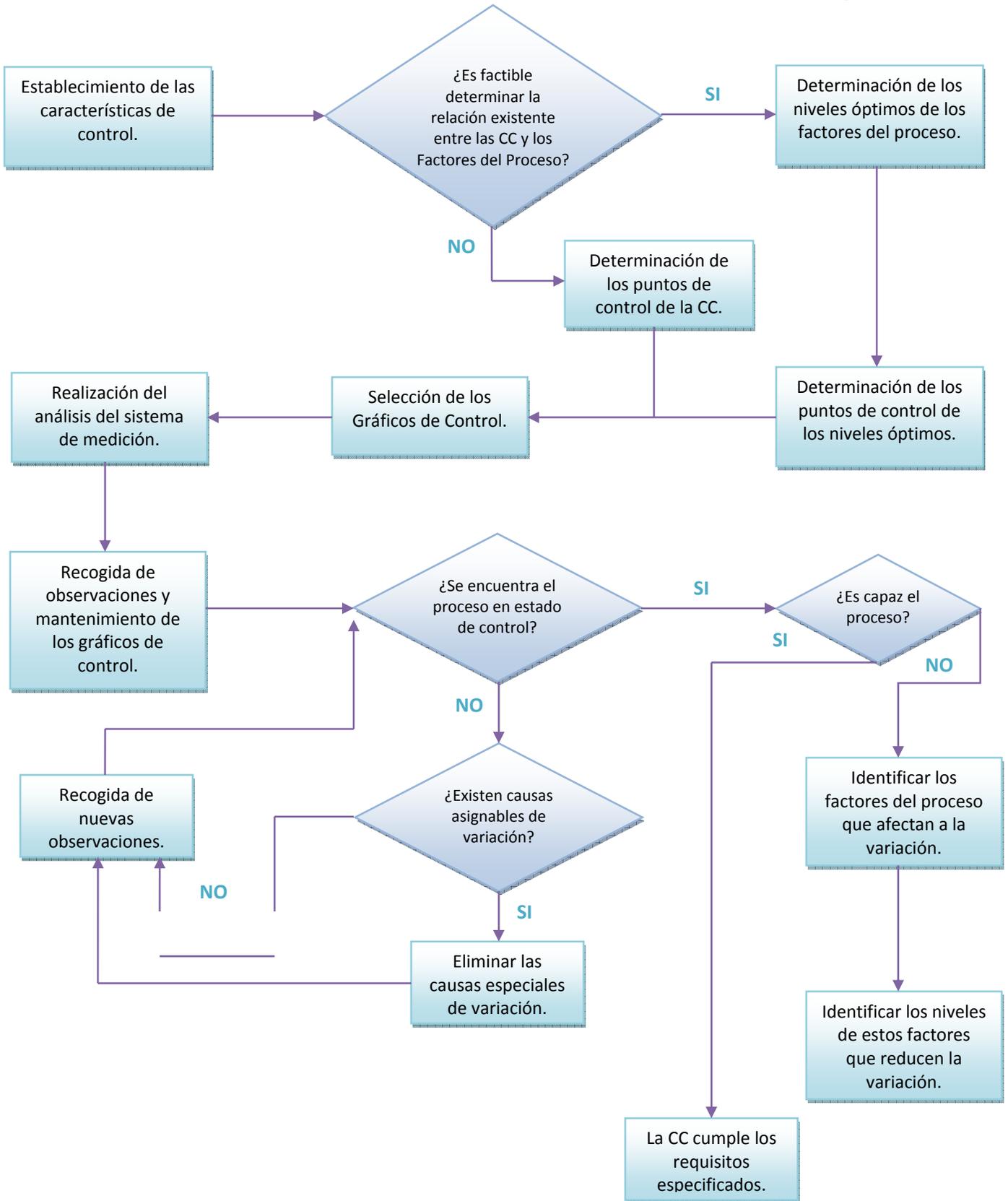


Figura 9.1 Diagrama de Flujo correspondiente al procedimiento de control y mejora de procesos.

Determinación de las características de control

Se justifica la necesidad de disminuir la variación de una característica de un producto por los costos asociados con dicha variación tanto para el fabricante como para el cliente. Esta disminución se logra mediante un programa de seguimiento, control y mejora de aquellos procesos cuyas respuestas son las citadas características. Ahora bien, este seguimiento, control y mejora tiene a su vez un costo y si éste es superior al asociado a la variación, deja de estar justificado el programa. Por ello, a partir de este momento, cuando se haga referencia al seguimiento y control de una característica se entenderá que se está hablando de una característica en la que está justificada esta actuación. A estas características, para distinguirlas del resto, se denominan Características de Control (CC).

Se entiende por CC de un producto aquellas características que tienen un mayor interés, tanto desde el punto de vista de la utilización del producto, lo que se llaman condiciones de diseño (actuaciones y tiempo de vida para el cliente externo) como del de fabricante (ajuste, alta probabilidad de ocurrencia de fallo y baja probabilidad de detección para el cliente interno).

¿Cómo se puede determinar que características se pueden considerar CC? En algunos casos, cuando un proveedor trabaja como subcontratista de otro, las CC pueden venir determinadas por el cliente, tanto con criterios de diseño (actuaciones y tiempo de vida) como de fabricación (ajuste entre el producto entregado por el subcontratista y la integración por parte del cliente) debiendo estar definidas en la documentación objeto del contrato.

Cuando se trata de determinar las CC por un fabricante o por un subcontratista que quiere establecer CC adicionales desde el punto de vista de su propia fabricación, se pueden citar los siguientes métodos de determinación de la CC de un elemento:

- El primer paso es la adquisición de datos respecto a las características de un producto determinado. Estos datos, que deben estar relacionados con criterios de fabricación (formas y ajuste) y con criterios de diseño (actuaciones y vida en servicio), se recogen de toda la documentación disponible: planos, especificaciones de diseño y de fabricación, estadísticas de rechazos tanto internos como externos, reclamaciones en garantía, utilización del producto, etc.
- A ésta información siempre hay que añadir la experiencia de aquellas personas que está relacionadas con el proceso.
- Con los datos obtenidos se utilizarán como criterio general de elección de las CC los siguientes conceptos:
 - El impacto económico de la variación
 - El efecto de la variación.

Determinación de la relación entre Características de Control y factores del proceso

El nombre de este programa es Control y Mejora de Procesos. Aunque la calidad del producto se establece en función del comportamiento de sus características, no se debe olvidar que los gráficos de control, como herramienta estadística, son mucho más eficaces cuando el

control se realiza, no sobre características del producto, sino sobre los propios factores del proceso.

Con base en la experiencia, historial de rechazos internos y externos y cualquier otra información que apoye a lo anterior, debe establecerse una relación de todos los procesos relacionados con las CC. Esta relación se establecerá en orden de prioridad, basándose en el impacto relativo que cada uno tiene en la variación de la CC.

A continuación se ejemplifica mediante la figura 9.2 la “cascada” de relaciones entre las características de control y los valores (niveles) de los factores de los procesos relacionados.

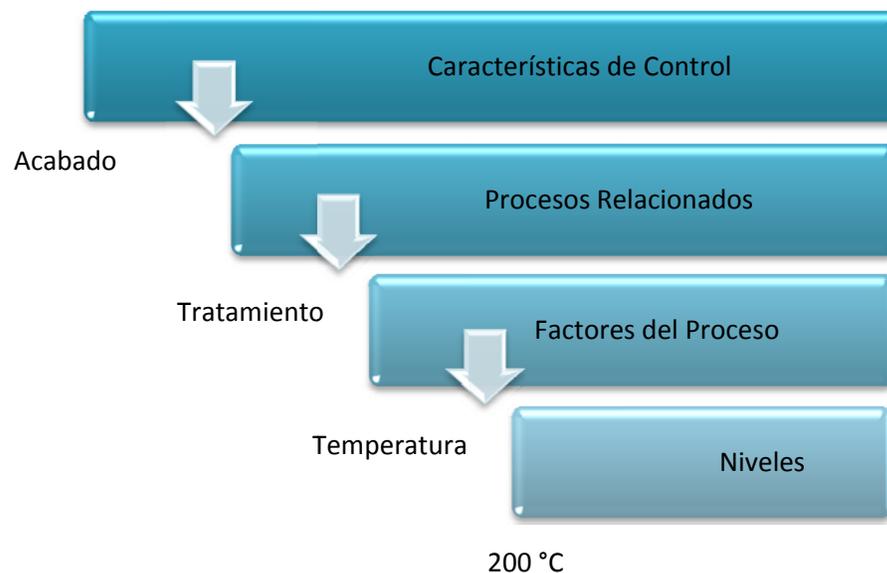


Figura 9.2 Relación entre las características de control y los valores (niveles)

De esta forma, se puede expresar que para cumplir con la característica de control *Acabado*, se tiene el proceso *Tratamiento* relacionado a esta característica, en el cuál es importante tomar en cuenta el factor *Temperatura* manteniendo el nivel en 200°C.

A la hora de establecer las relaciones existentes entre las CC y los factores de los procesos relacionados, existen básicamente dos métodos. El primero es realizar cambios razonables, documentados y controlados, en los procesos relacionados con la característica clave que se piensa que tienen una mayor contribución en la variación de la misma y tomar nuevas mediciones para analizar los resultados (método de prueba y error).

El segundo es el uso de Diseño de Experimentos, utilizado como herramienta estadística para determinar en qué grado distintos procesos afectan a las características de control. Este método identifica aquellos parámetros y sus valores (niveles) que, afectando a estas características, producen la menor variación posible.

Puesto que efectuar cambios en los procesos sin conocer las posibles interrelaciones entre ellos puede producir un enorme costo en tiempo y esfuerzo, siempre que no existan razones demostradas para lo contrario, se debe utilizar el segundo método para estudiar la relación

existente entre los parámetros de los procesos, sus valores y la variación de las características de control.

Aquellos parámetros que contribuyen a la variación de la característica de control son denominados “parámetros de control” del proceso. La relación obtenida mediante estas herramientas estadísticas debe ser confirmada a través de la comprobación en un entorno real de fabricación.

Cualquier información sobre los parámetros de control del proceso será reflejada en documentos formales tales como procedimientos, especificaciones, manuales, etc. No obstante y como criterio general, siempre que sea posible, esta información será reflejada directamente en la documentación de fabricación.

Los diagramas causa-efecto ayudan a visualizar las relaciones entre las características de control y los factores/niveles de los procesos relacionados. Como lo muestra la figura 9.3

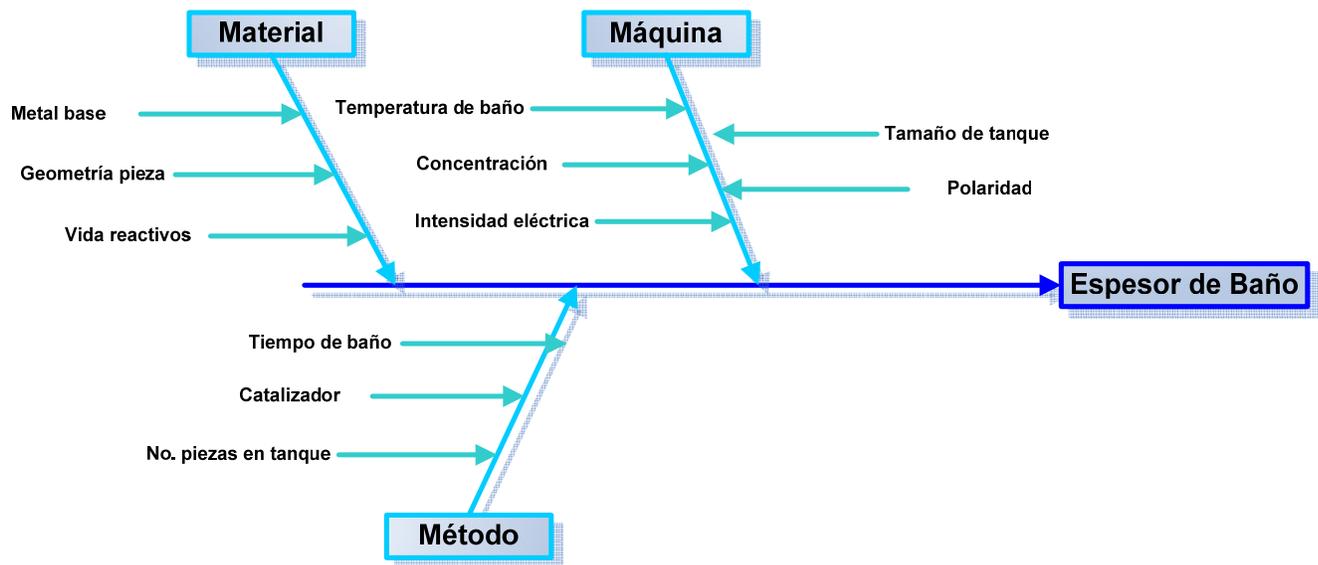


Figura 9.3 Diagrama causa-efecto

Determinación de los niveles óptimos de los factores del proceso

El objetivo final es controlar los procesos a través de la identificación de conjuntos de valores establecidos para los parámetros de control del proceso. Estos valores son aquellos que proporcionan el valor objetivo de la característica de control y / o una disminución de la variación en el resultado del proceso.

Mediante la verificación de estos parámetros de control, es posible evitar la medición de las características clave en las piezas, reduciendo drásticamente el número de gráficos de control mantenidos para piezas individuales. La determinación de los niveles óptimos de los factores del proceso puede ser responsabilidad del mismo equipo del paso anterior.

Determinación de los puntos de Control de CC / Niveles

Una vez determinadas las características consideradas CC o los factores de control y sus niveles, el siguiente paso es cuantificar la variación asociada a éstos.

En primer lugar, hay que decidir en qué momento se van a realizar las mediciones, a partir de las cuales se va a estimar la variación.

La elección es muy simple: desde el primer momento en que sea posible. Hay dos motivos fundamentales: el primero es, si existe algún problema, poder actuar desde el primer momento y el segundo es si la variación es excesiva e inutiliza la pieza, asegurar que el valor añadido a ésta y, por lo tanto, el despilfarro, sea mínimo. Además, si es posible, se elegirá un punto de inspección tal que permita la recogida de datos al operario responsable del proceso.

Es útil en esta actividad tener en cuenta la experiencia anterior de piezas y procesos similares así como la realización de diagramas de flujo de los procesos, para obtener una mejor visión del proceso.

Selección de los gráficos de control

La cuantificación de la variación de las CC o de los factores de los procesos asociados se realiza mediante la utilización de los gráficos de control. Ahora bien, dependiendo del tipo de datos (variables o atributos) del volumen de fabricación (series cortas o largas), del tipo de inspección (destruktiva o no, costosa o económica) se utilizan distintos tipos de gráficos de control. Si la elección del gráfico no es afortunada, el análisis y las conclusiones extraídas del mismo serán erróneas.

Existen fundamentalmente dos tipos de gráficos de control: gráficos de control por variables y gráficos de control por atributos. Se utilizarán los gráficos de control por variables cuando la característica a estudiar sea de tipo cuantitativo (intervalo o ratio), mientras que cuando la característica sea de tipo cualitativo (nominal u ordinal) se utilizarán los gráficos de control por atributos.

Análisis del sistema de medición

Los resultados de la medición deben recoger únicamente la variación debida a las causas comunes y especiales de variación sin que estos resultados se vean afectados por variación inducida por el propio proceso de medición. Por ello, antes de realizar las mediciones de las características de control, hay que analizar el sistema de medición.

Este análisis consiste en realizar un estudio de R&R de los instrumentos de inspección y ensayo involucrados en la medición de la CC / Nivel.

Se considera satisfactorio un sistema de medición que no consuma más de un 10% de la tolerancia especificada para la CC. Dicho porcentaje se calcula como:

$$\% \text{ de tolerancia} = \frac{\text{capacidad del instrumento}}{LTS \times LTI} (100)$$

Entendiendo por capacidad del instrumento la variación total de los valores obtenidos como resultado de múltiples mediciones de unos mismos elementos por distintos inspectores .

Recogida de observaciones y mantenimiento de los gráficos de control

Una vez seleccionado el gráfico de control y analizado y validado el sistema de medición, el siguiente paso es establecer el tamaño y la frecuencia muestral. Entendemos por tamaño muestral el número de observaciones necesarias para representar caso punto del gráfico de control.

Entendemos por frecuencia muestral los intervalos de tiempo en los que se van a recoger las observaciones.

Tanto los tamaños como la frecuencia muestral se encuentran recogidos con sus particularidades en el desarrollo de cada gráfico.

Tamaño de muestra

- a) Siempre mayores en el estudio inicial (primera evaluación de la variación del proceso), que en procesos ya conocidos.
- b) Siempre mayores el procesos marginales y / o erráticos que en procesos con un comportamiento correcto y repetitivo.
- c) Función del gráfico a utilizar:
 - Unidad en gráficos (XI, RM)
 - < 10 en gráficos (\bar{X} , R)
 - > 10 en gráficos (\bar{X} , S)
- d) En los gráficos de control por atributos, el tamaño de muestra idóneo es función de la calidad media del proceso. Por ejemplo, en un gráfico p, en el que la proporción media de unidades defectuosas es \bar{P} el tamaño de muestra n ha de ser tal que se cumpla:

$$\bar{P} - 3 \sqrt{\frac{\bar{P}(1 - \bar{P})}{n_i}} \geq 0$$

$$\bar{P} + 3 \sqrt{\frac{\bar{P}(1 - \bar{P})}{n_i}} \leq 1$$

En el desarrollo de cada gráfico por atributos se incidirá sobre el tamaño de muestra más adecuado. Una regla sencilla que es aplicable a todos los gráficos por atributos es que el tamaño de muestra n ha de ser tal que en todas las muestras haya al menos un defecto (gráficos c y u) o una unidad defectuosa (gráficos n y np).

Frecuencia muestral

- a) Siempre mayor en el estudio inicial (primera evaluación de la variación del proceso), que en procesos ya conocidos.
- b) Siempre mayor en procesos marginales y/o erráticos que en procesos con un comportamiento correcto y repetitivo.
- c) El intervalo ha de ser tal que nos garantice que la muestra va a ser representativa de la población que se pretende estudiar. Por una parte, intervalos muy cortos donde no ha existido oportunidad de efectuar cambios sobre el proceso no proporcionan más información y, sin embargo, sí encarecen el proceso. Si por el contrario, con una idea de economía, el intervalo es muy dilatado, lo más probable es que pasen desapercibidas las causas especiales. Como cada proceso bajo estudio tiene unas características completamente diferentes de los demás, no existen reglas fijas referentes al intervalo de toma de muestra (cada 6 horas, dos veces por turno, para cada lote de fabricación, etc.).

Para establecer el intervalo idóneo, se debe estudiar cada proceso teniendo en cuenta la experiencia con procesos similares.

Los puntos básicos a tener en cuenta son:

- No establecer tomas de muestra en periodos que la experiencia nos garantice la continuidad del proceso.
- Establecer tomas de muestra siempre que exista posibilidad de actuación de una causa especial:
 - Cambio de turno.
 - Relevo de operarios.
 - Cambio de materia prima.
 - Cambio de herramienta.
 - Parada y arranque de la instalación, etc.

La determinación de los puntos de inspección, selección de los gráficos de control, selección del tamaño y frecuencia muestral debe ser llevada a cabo por un grupo interdepartamental con personas de las siguientes áreas:

- Ingeniería de fabricación.
- Producción.
- Calidad (ingeniería y verificación).

con conocimientos del producto y de los procesos que se están analizando, informadas respecto el contenido del programa de control y mejora de procesos, así como una formación específica en herramientas de análisis y resolución de problemas: análisis de Pareto, tormenta de ideas, análisis de riesgo y diagrama causa-efecto, y herramientas estadísticas: diseño y análisis de gráficos de control.

Una vez que se ha realizado la construcción de los gráficos de control (punto de inspección, determinación, análisis y validación del sistema de medición, establecimiento del tamaño y frecuencia muestrales) estos gráficos acompañando a la documentación de fabricación

pasan al taller. Salvo que la inspección o ensayo sean tan especializados que deban ser realizados por personal técnico especializado, la responsabilidad de la cumplimentación será del operario responsable de la fabricación.

Determinación del estado de control del proceso

El estado de control estadístico de un proceso se determina directamente a partir del gráfico de control construido con los datos que ha proporcionado. Los gráficos de control disponen de límites que marcan la tolerancia natural del proceso, denominados límites de control.

Se considerará que un proceso cuya respuesta es una CC se encuentra en estado de control estadístico en un periodo de tiempo t si los puntos representados a lo largo de ese periodo se encuentran todos dentro de los límites de control.

Cuando el proceso no se encuentra en estado de control, es necesario averiguar qué es lo que ha ido mal. Las figuras 9.4 y 9.5 muestran gráficos de control, los cuales avisan dónde y cuándo han sucedido los cambios o causas especiales de variación.

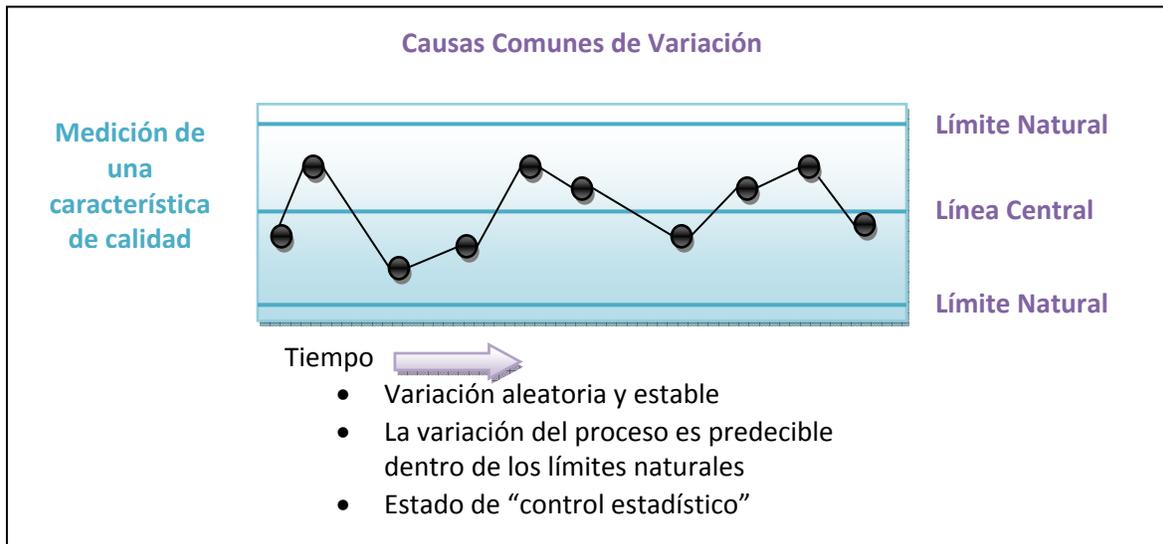


Figura 9.4 Gráfico de control de un proceso estable

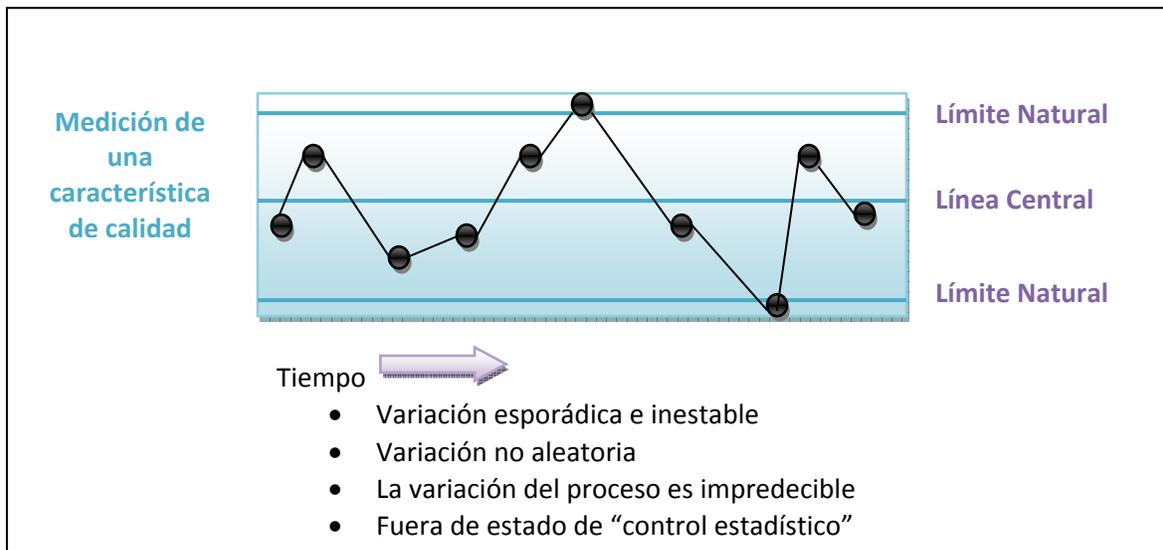


Figura 9.5 Gráfico de control de un proceso inestable

Causas asignables, su eliminación y recogida de nuevas observaciones

Si se puede asignar una razón a éstas causas especiales de variación, se denominarán causas asignables. La responsabilidad de dar la voz de alarma cuando aparece alguna señal de que el proceso tiene algún problema es de la misma persona que cumplimenta el gráfico de control.

Todas aquellas condiciones del sistema de fabricación que contribuyen a la aparición de causas asignables deben ser eliminadas. La acción correctiva consiste en eliminar la causa que ha creado la condición fuera de control. Por lo general, las razones de aparición de estas causas especiales asignables son fácilmente encontradas por la persona encargada de realizar el proceso. Es buena práctica que, independientemente de quién sea el responsable del mantenimiento de los gráficos de control, la persona responsable del proceso lleve un registro de todas aquellas observaciones de cambios en el entorno de producción, procedimientos, materiales, instalaciones, etc. La responsabilidad del establecimiento y seguimiento de las acciones correctoras puede ser un grupo constituido por las mismas personas que diseñaron los gráficos de control. Una vez que se han establecido las acciones correctoras se realiza una nueva recogida de datos para comprobar la efectividad de éstas. Si realmente han sido efectivas, el proceso se encontrará en estado de control y se podrá pasar a calcular la capacidad del proceso.

Análisis de capacidad del proceso

Cuando la CC se encuentra en estado de control estadístico, es el momento de estudiar si el proceso es capaz o no.

El estado de control de un proceso garantiza la homogeneidad de sus resultados, pero no se este resultado es aceptable.

Si la variación del proceso debida a causas comunes es superior a la tolerancia de la especificación, el proceso producirá un producto homogéneamente defectuoso.

Por lo tanto, es necesario estudiar la variación natural del proceso en comparación con la variación permitida por la especificación.

Es lo que se denomina un estudio de la capacidad del proceso. Si la variación natural del proceso es inferior a la permitida por la especificación diremos que el proceso es capaz y, por lo tanto, el producto resultado del mismo satisface los requerimientos.

Procesos en estado de control estadístico y no capaces

¿Qué sucede si el proceso no es capaz? Es decir, se encuentra un producto que tiene variación constante y predecible puesto que el proceso se encuentra en estado de control pero que esta variación es superior a la máxima permitida por la especificación.

Ahora el problema es más complicado. La solución es clara: reducir la variación debida a las causas comunes, pero la dificultad estriba en llevarla a cabo. Al contrario que la eliminación de las causas especiales de variación que suele ser simple y económica, la eliminación de la variación debida a causas comunes suele ser más costosa.

Antes de pasar a estudiar la reducción de la variación debida a causas comunes, se realiza un último esfuerzo en reducir las causas de variación especiales en aquellos procesos que, no siendo el responsable directo de la fabricación de la CC, sí están de alguna forma relacionados con ella.

Mediante una investigación de todos los subsistemas y sus procesos de transformación que aportan algo en la fabricación de la característica clave, se pueden encontrar las fuentes potenciales de variación debidas a causas comunes. La variación de estos procesos está asociada a los factores del proceso y a sus valores asignados (niveles).

En la identificación sistemática de todos los procesos, sus parámetros y los valores de los parámetros que se piensa son causas potenciales de variación de las CC, se utilizan las siguientes herramientas de análisis y resolución de problemas: tormenta de ideas, diagramas de flujo de los procesos y diagramas causa-efecto.

Una vez identificadas todas las fuentes potenciales de variación debida a causas comunes, se ordenan los procesos relacionados con las CC en orden de prioridad con base en el impacto relativo que cada uno tiene en la variación de la CC. Mediante el uso de gráficos de control, se vigilarán estos procesos identificando y eliminando las causas asignables de variación. Por lo general, la eliminación de las causas asignables de variación de todos los procesos relacionados con la CC hace que ésta pase a cumplir los requerimientos, es decir, que sea capaz. Si después de eliminar todas las causas especiales de variación de los procesos relacionados con la CC, esta sigue sin cumplir los requerimientos, sólo queda un camino para reducir la variación debida a causas comunes: utilizar el diseño de experimentos como herramienta estadística para determinar en qué grado afectan a la CC los distintos procesos, sus factores y sus niveles.

Mediante el diseño de experimentos, se identificarán aquellos parámetros y sus valores que, afectando a las CC, producen la menor variación posible. Este método se utiliza hasta que se logra la CC cumpla los requerimientos.

9.1. Control de los elementos de la producción

Los elementos de la producción son:

- Métodos
- Materiales
- Mano de obra
- Máquinas e
- Información

Dichos elementos de la producción están interactuando dentro de una planta, en forma parecida a la mostrada en la figura 9.6

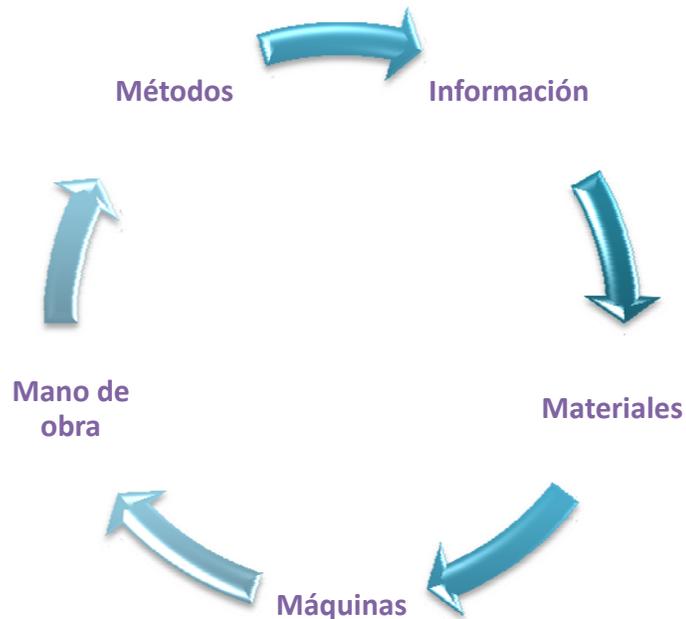


Figura 9.6 Control de los elementos de la producción

Para que el número de problemas sea reducido, al igual que un mejoramiento en el desempeño del proceso, es necesario un factor muy importante relacionado con cada uno de los elementos de la producción. Ese factor vital es el control de todos los elementos mostrados en la figura anterior. Se puede definir **control** como un grupo de acciones encaminadas a mantener una situación en un estado deseado, como se muestra en la figura 9.7.

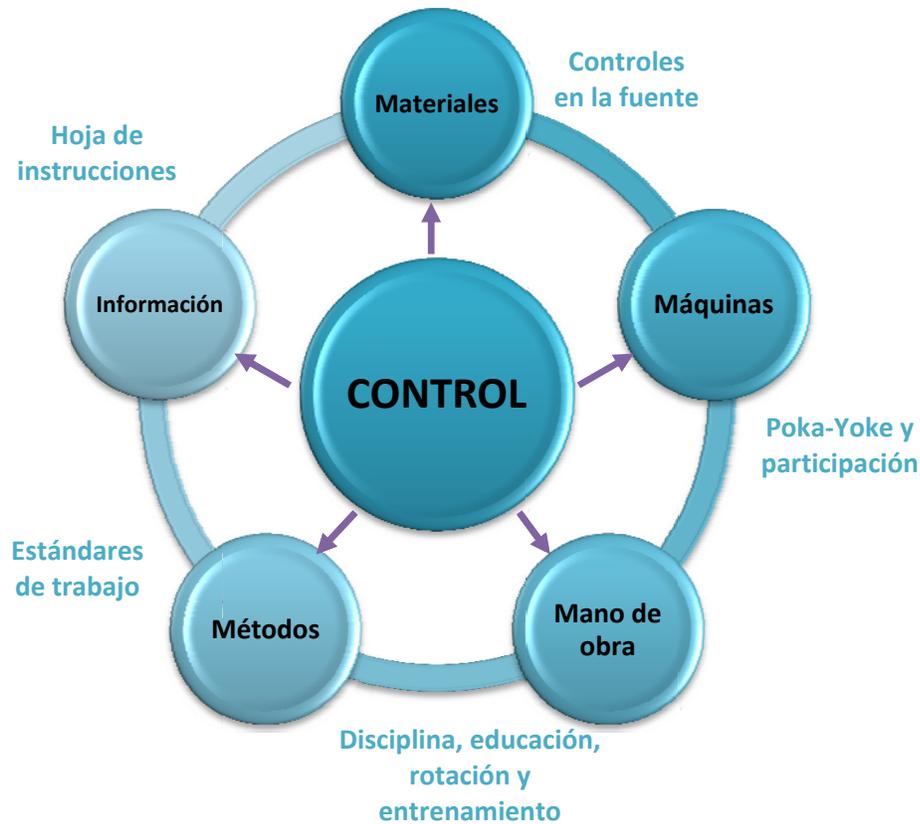


Figura 9.7 Esquema de control de un proceso

9.2. Análisis de modo y efecto de fallas (AMEF)

Trabajar bajo el entorno de Six Sigma es mucho más que trabajo en equipo. Implica utilizar una serie de técnicas para ayudar a desarrollar y fabricar productos de calidad. Los objetivos y herramientas típicas que se usan en proyectos Six Sigma para reducir la variabilidad en los tres procesos que afectan más a la calidad de producción: diseño, producción y aprovisionamiento.

Diseño

- Diseño de experimentos
- Diseño Robusto
- AMEF.

Producción

- Herramientas básicas del control de calidad
 - Histograma
 - Diagrama de Pareto
 - Diagrama de espina de pez (Ishikawa)
- AMEF
- Control estadístico de procesos

- Diseño de experimentos.

Aprovisionamiento

- Control estadístico de los procesos de proveedores
- Diseño de experimentos en los procesos de proveedores.

Los equipos de proyectos Six Sigma usarán estas herramientas de mejora en función de la complejidad del proceso o producto. De entre éstas destaca por su utilidad el AMEF (Análisis de Modo y Efecto de Fallas).

El Análisis de Modo y Efecto de Fallas es una metodología que permite analizar la calidad, seguridad y/o fiabilidad del funcionamiento de un sistema, tratando de identificar los fallos potenciales que presenta el diseño, y por tanto tratando de prevenir problemas futuros de calidad. Se aplica por medio del estudio sistemático de los fallos (que se denominarán modos de fallo) y sus causas, partiendo de sus efectos. El estudio tendrá como objetivo la corrección de los diseños para evitar la aparición de los fallos, estableciendo en lo necesario un plan de control dimensional, como resultado del estudio de los fallos y su corrección, en lo que sea necesario para evitar la aparición de los mencionados fallos.

Este análisis es un grupo sistemático de actividades con el propósito de:

1. Reconocer y evaluar las fallas potenciales de un producto o procesos, y los efectos de dichas fallas.
2. Identificar acciones que podrían eliminar o reducir la posibilidad de que ocurran fallas potenciales.
3. Documentar todo el proceso.

De la propia definición del AMEF se deduce que se trata de una herramienta de predicción y prevención. La aplicación de éste método se puede enmarcar en primer lugar dentro del proceso de diseño de nuevos productos, para los que se aplicará con el fin de validar los diseños desde el punto de vista funcional. En este sentido, podría aplicarse a continuación de la planificación del diseño por medio del QFD, aunque evidentemente puede aplicarse a cualquier otra forma de concebir un diseño.

El AMEF también es aplicable a la mejora de productos ya existentes, y por otro lado, a los procesos de fabricación, pero extendiéndose a cualquier tipo de proceso, de ahí que sea realmente herramienta poderosa. En el primer caso, se habla de AMEF de diseño, mientras que en el segundo caso se trata de AMEF de proceso.

Evolución Histórica

Como predecesores del AMEF, existían algunos métodos de análisis de problemas *a priori*, de los cuales se puede destacar el método desarrollado por Kepner y Tregoe, conocido como técnicas KT, en el cual ya existía una priorización a estos problemas potenciales, asociándoles una probabilidad de fallo y un índice de gravedad asociado al mismo.

El AMEF, propiamente dicho, se utilizó por primera vez en Estados Unidos, en la década de los 60's, en la industria aeroespacial militar, en la cual se estableció una especificación del método (norma MIL-STD-16291); ya en la siguiente década se extendió a las empresas automovilísticas, de las cuales Ford fue pionera en utilizar este método que pronto sería utilizado por el resto de la industria del automóvil.

Esta técnica es un método de análisis de fiabilidad cualitativo dirigido a identificar los modos de fallo cuyas consecuencias afectan de forma significativa al funcionamiento del producto en una aplicación determinada. Este método es muy recomendado para su uso durante las revisiones de diseño del producto y del proceso de producción que efectúa el equipo de proyecto Six Sigma.

Las características del AMEF son: minimizar la probabilidad de una falla o minimizar el efecto de la falla; se efectúa previamente a la finalización del concepto (diseño) o previamente al inicio de la producción (proceso); es un proceso interactivo sin fin, y es una manera de documentar el diseño y el proceso.

El AMEF de diseño evalúa lo que podría resultar mal con el producto durante su uso y durante su manufactura como consecuencia de debilidades del diseño.

El AMEF de proceso se enfoca en las razones de fallas potenciales durante manufactura, como resultado del incumplimiento con el diseño original, o el incumplimiento de las especificaciones de diseño.

Aunque los problemas o las fallas generalmente surgen durante la producción, realmente se originan en las fases de planeación y diseño del producto.

El uso del AMEF se enfoca en nuevos diseños, nueva tecnología o procesos nuevos, cuando se hacen modificaciones a diseños o procesos existentes, cuando se usa un diseño o proceso existente en un nuevo ambiente, o en un nuevo lugar, o una nueva aplicación. Sin embargo también se puede usar en procesos que ya están instalados y funcionando, y también como técnica de solución de problemas.

El AMEF de diseño se debe llevar a cabo antes que la liberación de los dibujos de producción. Incluye la fase de desarrollo del producto.

No se basa en los controles del proceso para corregir las deficiencias en el diseño, pero sí toma en cuenta las limitaciones técnicas y físicas de manufactura y ensamble (capacidad del proceso, limitaciones del endurecimiento del acero, etc.)

El AMEF de proceso se debe llevar a cabo antes que el herramental de producción, y debe tomar en cuenta todas las operaciones de manufactura, desde componentes individuales hasta ensambles.

No se basa en cambios en el diseño para corregir las deficiencias en el proceso, pero si lo considera para la planeación del proceso de manufactura para cumplir con las expectativas del cliente.

En figura 9.8 se muestra un diagrama AMEF y su relación con las herramientas de diseño para Six Sigma.

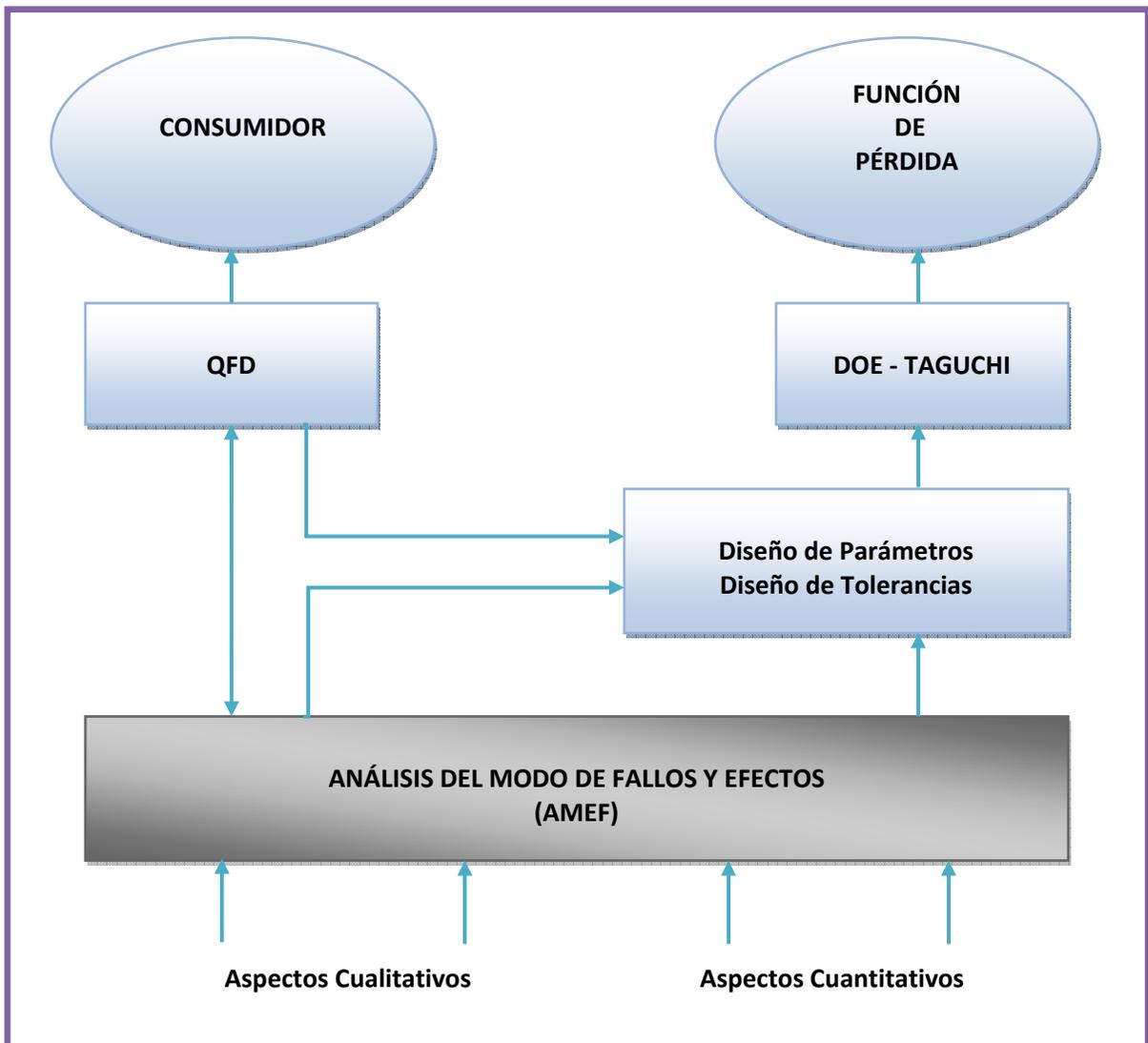


Figura 9.8 Diagrama AMEF y su relación con las herramientas de diseño para Six Sigma

Principios y Objetivos

La Metodología AMEF contribuye a la mejora de la fiabilidad y del mantenimiento óptimo de un producto o sistema, a través de la investigación de los puntos de riesgo, para reducirlos a un mínimo, mediante acciones apropiadas.

Para el desarrollo de cualquier AMEF, son necesarios la coordinación y el entendimiento de todos los departamentos afectados, es decir, se trata de un equipo multifuncional típico de los equipos de Ingeniería Concurrente. Se trata de un método sistemático, existiendo una disciplina de realización.

Como objetivos del AMEF se señalan:

- Análisis de los fallos que pueden afectar a un producto o sistema y las consecuencias de aquellos sobre los éstos.
- Identificación de los modos de fallo, así como priorización de estos modos sobre los efectos en el producto o sistema de estudio, teniendo en cuenta para ello diferentes criterios.
- Determinación de los sistemas de detección para los distintos modos de fallo, y aseguramiento de los mismos a través de revisiones periódicas.
- Satisfacción del cliente (interno y externo) mediante la mejora de la calidad del proceso o del diseño del producto.

Elaboración de un AMEF

La elaboración de un AMEF concierne a un equipo pluridisciplinar constituido por todos los departamentos involucrados en el diseño de un producto o proceso, y se habla de proceso, sin limitar únicamente al proceso de fabricación, sino siendo válido y extensible a cualquier tipo de proceso.

En el desarrollo de un AMEF, se parte del producto o proceso de diseño, y con la elaboración de un diagrama, donde aparecen todos los elementos posibles, y a través de un método sistemático.

La siguiente lista muestra los pasos del AMEF (de diseño y de proceso):

1. Seleccionar al equipo y realizar lluvia de ideas (equipo formado por personal de diferentes áreas).
2. Elaborar diagrama de bloques (diseño) o diagrama de flujo (proceso).
3. Obtener datos de fallas y llenado de la forma (modos de falla).
4. Análisis de la información. Pueden ser análisis cuantitativos o cualitativos. Se puede usar lluvia de ideas, Ishikawa, DOE, simulación para obtener información sobre los efectos de las fallas y estimar la severidad, ocurrencia y detección.
5. Recomendar acciones de mejoramiento.
6. Evaluar las acciones (confirmar efectividad de las acciones y recomendar mejoras –llenar las columnas apropiadas).
7. Continuar con las mejoras (documento dinámico).

Para el inicio del AMEF de diseño es necesario:

1. Desarrollar una lista de lo que se espera que sea el diseño, y lo que no se espera que sea.
2. Elaborar un diagrama de bloques del sistema, subsistema y/o componente a ser analizado (estos diagramas deberían acompañar al AMEF).

Para el inicio del AMEF de proceso se requiere:

1. Desarrollar una lista de lo que se espera que sea el proceso, y lo que no se espera que sea.
2. Elaborar un diagrama de flujo del proceso, que incluya las características del producto y del proceso asociadas en cada operación. Dicho diagrama debería acompañar al AMEF.

En la figura 9.9 se presenta esquemáticamente las etapas de la elaboración de un AMEF partiendo del equipo de trabajo pluridisciplinar al que se ha hecho referencia.

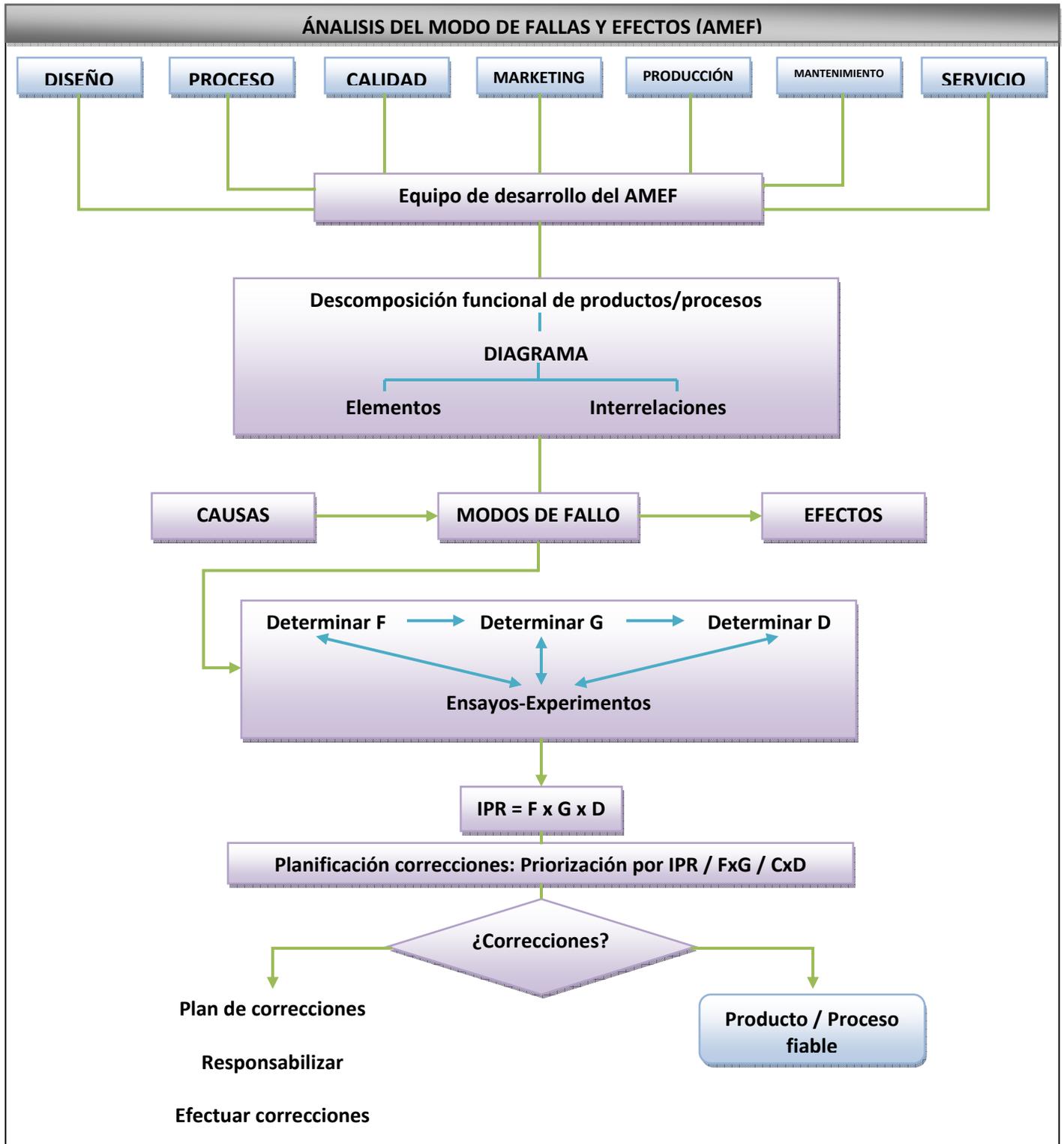


Figura 9.9 Esquema de la elaboración de un AMEF

Modos de fallo, efectos y causa

Por lo que hace referencia a los **modos de fallo**, elementos fundamentales del estudio, se definirán como la manera en que una pieza o sistema puede fallar potencialmente respecto a unas especificaciones dadas. Asimismo se considera fallo de un elemento cuando no cumple o satisface unas funciones para las cuales ha sido diseñado. Un fallo puede ocurrir, pero no necesariamente, de ahí que exista la posibilidad de que el cliente no lo detecte, pero se debe considerar como tal.

Una función puede conllevar varios modos de fallo. Éstos se expresan en términos físicos: fatiga, vibraciones, corrosión, bloqueo, pandeo, desalineación, circuitos con fugas, etc.

Para cumplimentar este punto es recomendable comenzar con el repaso de AMEF anteriores, o bien si se trata de un elemento nuevo, de estudios de fiabilidad y AMEF realizados a elementos afines a este nuevo.

También hay que tener en cuenta las condiciones extremas de funcionamiento, para encontrar modos potenciales de fallo, que en condiciones normales de trabajo no aparecerían.

Otros elementos de gran importancia en el AMEF son los **efectos** de fallo. Éstos han tenido lugar precisamente como consecuencia de los fallos, cuando éstos se han dado; por otra parte, los efectos es lo que realmente se percibe como resultado del fallo, y a partir de ellos debe identificarse el modo de fallo; es conveniente que se identifiquen los efectos de forma que estén en consonancia con las observaciones y experiencias del cliente del producto.

De acuerdo con la percepción del cliente, pueden darse las siguientes categorías de fallos:

- Sin consecuencias
- Ligeras molestias
- Descontento
- Gran descontento
- Problema de seguridad.

Los efectos, además, debe ser evaluados globalmente, es decir, aparte de la importancia del efecto por sí misma, hemos de tener en cuenta la repercusión sobre el sistema. Ejemplos de efectos pueden ser combado, ruido, suciedad, ausencia de funcionamiento, fugas y cualquier otro que pueda ser detectado por los cinco sentidos o por instrumentos de medición y comprobación.

Otros elementos, que junto a modos de fallo y efectos son determinantes son las **causas** de los fallos.

De hecho, la investigación fruto del AMEF debe dirigirse hacia la identificación de las causas de los modos de fallos y sus efectos, así como las acciones correctoras.

Las causas de fallos se pueden definir como las maneras que el modo de fallos puede ocurrir. Se deben relacionar todas las causas potenciales atribuibles a cada modo de fallos. Estas causas deben ser descritas lo más concisamente posible y en términos claros de forma que permitan llevar a cabo acciones correctivas que vayan dirigidas a esas causas concretas. Por tanto, se debe evitar cualquier ambigüedad en su descripción. Vibraciones, calor, dimensiones excesivas

o cortas, excentricidad, fragilidad, falta de lubricación, etc. serían ejemplos claros de causas de fallos.

Pueden existir una o varias causas para un único modo de fallo. Cuando son varias las causas que afectan a un modo de fallo, pueden ser independientes entre sí, pero es más frecuente que exista una relación de dependencia entre ellas, y convendría encontrar la relación que liga esa dependencia. Cuando el número de causas es elevado, se hace difícil hallar esa relación de dependencia, entonces es recomendable apoyarse en herramientas estadísticas, de las cuales el DOE o métodos de Taguchi serían las más apropiadas para los objetivos.

Por otra parte, en todo proceso, sistema o pieza, existirán distintos modos de fallo, producido por diversas y variadas causas, y con diferentes efectos asociados.

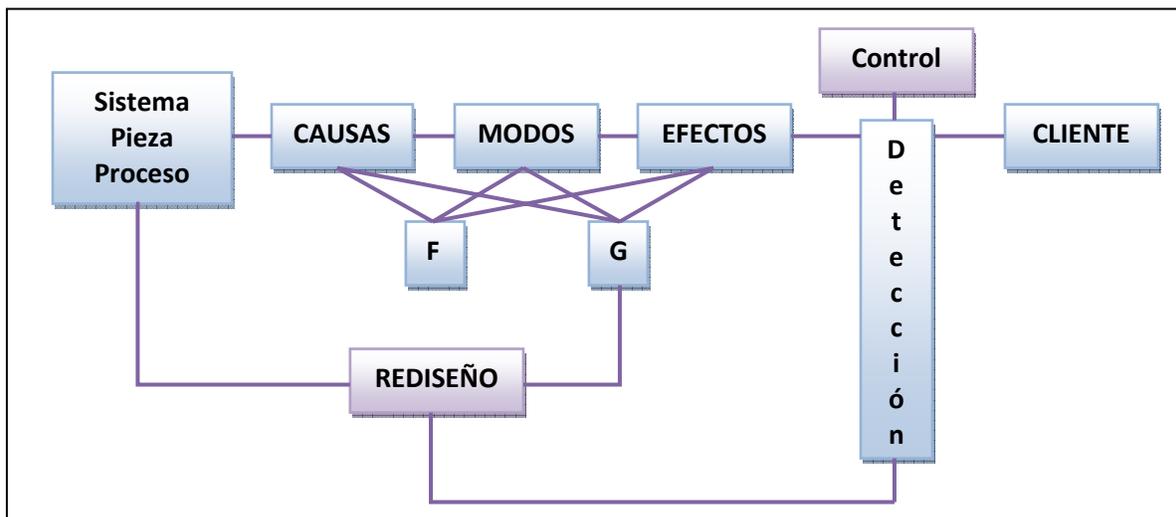
Controles necesarios

En este punto del documento se describirán los controles previstos para evitar que se produzcan los fallos, es decir, los modos de fallos, y en todo caso detectar lo que ocurran.

Los controles actuales son aquellos que han sido diseñados en proyectos similares, y que deban servir a la prevención o detección de los modos o causas específicas de fallo. Estos controles han de llevarse a la práctica si están incluidos en las especificaciones de ingeniería, o bien sean normas industriales en práctica en sistemas análogos. Cualquier tipo de control que sea considerado como necesario, deberá estar de acuerdo con las acciones recomendadas, y ser añadido a las especificaciones de ingeniería.

En un diseño completamente nuevo, puede suceder que los controles actuales sean muy limitados para éste e incluso carecer de ellos, pero es recomendable usar controles generales que ya estén planificados, adaptándolos a las características de nuestro diseño, siempre con la aceptación del área responsable del proyecto.

En la figura 9.11 se muestran los elementos que intervienen en un AMEF y sus relaciones y repercusiones en el cliente.



Dimensionado de los modos de fallo: Índice de Prioridad de Riesgo

El dimensionado de la importancia de los modos de fallo se obtiene a partir de tres coeficientes cuyo producto representará el índice final que permitirá calibrar el fallo y sus consecuencias, y que se denominará índice de prioridad de riesgo (IPR). Al exponer el esquema de las etapas de la elaboración del AMEF se ha anticipado ya el cálculo del IPR a partir de estos tres coeficientes (F, G y D).

Coeficiente de Frecuencia (F)

Se define como coeficiente de frecuencia la probabilidad de ocurrencia de un modo de fallo, valorándose en una escala de 1 a 10. Equivale, de hecho a la probabilidad compuesta de dos sucesos: que se produzca la causa y además que ésta dé lugar al modo de fallo, y puesto que ambas cosas son necesarias, el coeficiente de frecuencia será el producto de ambas probabilidades.

Así pues, la probabilidad de ocurrencia de un fallo parte de la posibilidad de que se dé previamente la causa potencial de fallo (probabilidad P_a). Para ello, ante todo, hay que evaluar todos los controles actuales utilizados para prevenir que se produzca la causa de fallo en la pieza o proceso.

Deberá evaluarse luego la probabilidad, que una vez ocurrida la causa de fallo, como consecuencia de ésta se produzca el modo de fallo asociado a ella ($P_{a/b}$). Para el cálculo de esta probabilidad se debe suponer que tanto la causa y el modo de fallo no son detectados antes de que llegue al cliente. Así pues, la probabilidad de que se produzca el modo de fallo (P_m) vendrá dada por el producto de ambas probabilidades:

$$P_m = P_a \times P_{a/b}$$

La tabla 9.12 contiene los valores de esta probabilidad para los diez posibles niveles que considera el coeficiente de frecuencia. Los valores del índice de frecuencia están linealmente escalados en una gráfica logarítmica:

Coeficiente de Frecuencia (F)	Probabilidad $P_m = P_a \times P_{a/b}$
1	0 a < 3/100 000
2	3/100 000 a < 1/10 000
3	1/10 000 a < 3/10 000
4	3/10 000 a < 1/1000
5	1/1000 a < 3/1000
6	3/1000 a < 1/100
7	1/100 a < 3/100
8	3/100 a < 1/10
9	1/10 a < 3/10
10	3/10 a < 1

Tabla 9.12 Coeficiente de frecuencia

En la práctica, a veces, el cálculo de estas probabilidades es difícil, debido a que en ocasiones puede resultar difícil conocer los valores de las dos probabilidades que componen la frecuencia. En este caso es recomendable realizar una estimación basada en la experiencia y siempre acotará la probabilidad por su valor subjetivo más alto, debiéndose anotar en el documento AMEF que la estimación efectuada es subjetiva, y en posteriores seguimientos ir ajustando este valor estimado.

La acción de mejora que puede llevarse a cabo en el AMEF, con respecto al coeficiente de frecuencia, es reducir su valor, para lo que se pueden llevar a cabo dos acciones: a) Cambiar el diseño, de modo que se reduzca la probabilidad de aparición de fallo, y b) Incrementar o mejorar los sistemas de control para impedir que se produzca el fallo.

Coeficiente de gravedad (G)

El coeficiente de gravedad es una valoración de la afectación ocasionada al cliente por, única y exclusivamente, el efecto del fallo. Este coeficiente se clasifica en una escala de 1 a 10, como puede apreciarse en la tabla 9.13, atendiendo a: a) la insatisfacción del cliente; b) la degradación de las prestaciones, y c) el costo y el tiempo de la reparación del perjuicio ocasionado.

Hay varias alternativas para minimizar este índice:

1. Correcciones de diseño. Alterando el (los) elemento(s) causante(s) del fallo.
2. Sistemas redundantes. En previsión a potenciales fallos existen elementos destinados a cumplir exactamente la misma funcionalidad.

G	Fallo	Percepción del Cliente
1	Menor	Sin consecuencias
2	Sin degradación de las prestaciones	Ligeras molestias
3		
4	Con señal anticipada	Indispone
5		
6	Degradación notable de las prestaciones	Descontento manifiesto
7		
8	Con señal anticipada	Gran descontento y/o gastos de reparación
9	Avería manifiesta	Gran descontento y/o gastos de reparación
10	Sin señal anticipada	Problema de seguridad

Tabla 9.13 Coeficiente de gravedad (G)

Coeficiente de Detección (D)

Este coeficiente se refiere a la probabilidad de que la causa y/o modo de fallo, suponiendo que aparezca, llegue al cliente. Para este índice, al igual que los anteriores se utilizará una escala de 1 a 10, como puede apreciarse en la tabla 9.14. En realidad, se refiere pues a la probabilidad de que no pueda detectarse el fallo y su causa antes de entregar el producto al cliente, y por tanto en realidad se trata de un coeficiente de no detección más que de detección.

Del mismo modo se define la detección como el grado de seguridad con el que se puede detectar, con los controles existentes, el modo y/o causa de fallo antes de que llegue al cliente.

Para reducir este índice de no-detección:

- a) Se puede añadir o mejorar los sistemas de control de calidad, y
- b) Modificación del diseño.

D	Probabilidad de que llegue al cliente
1	0 a 0.02
2	0.02 a 0.12
3	0.12 a 0.22
4	0.22 a 0.32
5	0.32 a 0.42
6	0.42 a 0.52
7	0.52 a 0.62
8	0.62 a 0.72
9	0.72 a 0.82
10	0.82 a 1

Tabla 9.14 Coeficiente de Detección (D)

Índice de Prioridad de Riesgo (IPR)

El índice IPR se obtiene del producto de los tres que se acaban de exponer (F, G y D) con el objetivo de priorizar todos los fallos para llevar a cabo posibles acciones correctoras, de forma que se tengan en cuenta la probabilidad de que se produzca el fallo, su gravedad y la probabilidad de que no sea detectado, dado que la importancia del fallo depende de que se den las tres circunstancias (un fallo frecuente pero que se detecta siempre, puede no tener más trascendencia). El IPR se obtiene, calculando el producto de la frecuencia, la gravedad y el índice de no detección para todas las causas de fallo.

$$IPR = F \times G \times D$$

Por lo tanto, el IPR está escalado del 1 al 1000.

Deberá hacerse un seguimiento del IPR y aplicar acciones correctivas para reducir los IPR elevados. Para reflejar la evolución del IPR es conveniente utilizar los histogramas.

Caso a considerar especialmente al margen del IPR: Fallos críticos. Son todos aquellos cuya gravedad es máxima (mayor de 8) y tanto la frecuencia como la no detección sean superiores a uno. En el documento básico se identificará con un símbolo indicativo de valor crítico (\bar{V}).

Análisis y mejora de diseños con el AMEF

En la columna correspondiente a las mejoras, se describirán brevemente las acciones correctoras recomendadas, que deben ser identificadas específicamente. Para la elección de las acciones correctivas conviene proceder con las que siguen y en el siguiente orden que se muestra:

- a) Mejora o cambio en el diseño del componente o sistema.
- b) Mejora o cambio en el proceso, y
- c) Incremento en el control y por tanto mejorar la detección.

Ello es así porque la tendencia actual es introducir la calidad en las etapas iniciales de diseño, ya que ello redundará en mejores resultados a menor costo, mientras que reforzar el control suele dar lugar a una calidad más cara, por lo que sólo se procederá a ello cuando se hayan agotado las posibilidades de actuar en etapas anteriores. Así pues, se procurará que a un mismo nivel de calidad, es decir, un mismo IPR, el costo de la acción recomendada sea más bajo, lo que llevará a priorizar el que tenga una F más elevada y no la D. Asimismo, es conveniente realizar una acción correctiva para todas aquellas cuyo IPR > 100, al mismo tiempo que se establecerá un plan de acción para determinar las acciones recomendadas, el plazo de realización y los responsables del mismo.

Todas aquellas causas de fallo que no necesitan acciones correctoras, en la columna correspondiente se incluirá un símbolo indicativo (NR: no requiere acción correctiva).

El fundamento de las acciones correctivas es eliminar los fallos críticos, y minimizar el IPR, para ello, teniendo en cuenta la priorización de acciones ya indicada se procederá a:

1. Eliminar la causa del fallo. A veces con un ligero cambio de diseño es suficiente.
2. Reducir la frecuencia de fallo. Para ello el análisis preventivo es el más apropiado, y la previsión siempre parte de un rediseño, haciéndolo más robusto.
3. Reducir la gravedad de fallo. Será primordial reducir o eliminar todas aquellas causas de fallo cuya gravedad sea alta, para ello se deberá apoyar en sistemas redundantes o bien en un cambio de diseño.
4. Aumentar la probabilidad de detección. Ya que no se ha podido prevenir, al menos hay que evitar que el fallo no llegue al cliente (interno o externo), aumentando los controles actuales, o bien mejorando el diseño para que los controles sean más eficaces.

En la columna destinada a las acciones recomendadas para las causas seleccionadas, se debe incluir una pequeña descripción de la acción en sí, y su estado en las sucesivas revisiones. Se buscan acciones que acentúen la prevención antes que la detección. Si no requiere acción correctiva, se ha de indicar mediante un símbolo (usualmente NR: No requerida). Otro subapartado que se aconseja incluir es el área y el responsable de dichas acciones.

Una vez realizadas las acciones correctivas, se volverá a calcular el IPR resultante, a partir de los nuevos índices calculados de frecuencia, gravedad y no detección. A su vez debe realizarse una pequeña descripción de cómo se aplicó, en qué fecha y en qué consistió la acción adoptada. Si se han realizado varias acciones para una misma causa, se realizarán otros tantos cálculos nuevos para actualizar el IPR.

Asimismo, existirán nuevas acciones correctoras sobre las últimas aplicadas, y de nuevo se calculará el IPR, pues el AMEF es una herramienta activa y viva, en el sentido de que siempre refleja las últimas acciones implantadas y los índices de priorización actualizados.

Además, se pueden realizar otros documentos que sirvan de apoyo al modelo básico para la determinación de las acciones correctivas. Una posibilidad sería un documento que sirva para

llevar a cabo un seguimiento de las acciones correctivas a lo largo de los diferentes meses del año y en el que figuren la acción, el departamento y el responsable de tales acciones.

Se deberán indicar los plazos previstos y los realmente conseguidos.

Se hará constar el responsable o responsables de que las acciones correctivas designadas se lleven a cabo en la fecha y los plazos previstos. Además de controlar que las acciones recomendadas sean implantadas correctamente.

El responsable debe llevar a cabo las acciones correctivas, de la selección del personal que las realizará y de que son aplicadas de forma correcta, realizando un seguimiento adecuado, es el diseñador. Por tanto, debe actuar como un líder, realizando un control y seguimiento de las acciones llevadas a cabo con ayuda de las especificaciones y de los planos de ingeniería o laboratorio. El AMEF es un documento vivo que debe ir actualizándose conforme se vayan realizando cambios de diseño, acciones correctivas, revisiones, etc.

9.3. Plan de Control

El plan de control es una continuación del AMEF en donde se registra información de control importante principalmente para las características críticas señaladas en el AMEF, como se muestra en la figura 9.15.

Concepto de autocontrol

De acuerdo con Juran y Gryna, para estar en estado de autocontrol, la persona se le debe proveer:

- a) Información sobre lo que debe hacer,
- b) Información sobre su desempeño, y
- c) Medios para regular su desempeño (autoridad y habilidad).

Concepto de dominancia

También de acuerdo con Jurán y Gryna, el concepto de dominancia se manifiesta en el o los factores que son determinantes para el buen funcionamiento de un proceso. Existen varios tipos de dependencia o dominancia:

1. Mano de obra. El sistema es sensible al conocimiento y habilidades del operario. Sus formas recomendadas de control son las gráficas de control p y c, hojas de verificación, Poka-Yoke y auditorías de proceso.
2. Materiales. El sistema es sensible a los materiales/componentes (formulación, almacenamiento, variación). Sus formas de control son las gráficas de control, reportes de laboratorio, Poka-Yoke e inspección.
3. Máquinas. El sistema es sensible a los parámetros de operación de las máquinas, vida y/o reparación de herramientas, variación entre posiciones, aditamentos de sujeción. Su control se basa en autoajustes de parámetros, y gráfica de medias y rangos. Para el

caso de aditamentos, su control son los procedimientos de carga, ajustes y mantenimiento y muestreo. En el caso de sus herramientas, es necesario verificar la primera pieza, control de lotes y Poka-Yoke.

4. Métodos. El sistema es sensible al ajuste inicial (set up), al mantenimiento preventivo de los equipos (limpieza, reparación, reemplazo), y a los sistemas de medición. Su control se ejerce por medio de un set up adecuado, verificar la primera pieza y control de lotes. En cuanto a mantenimiento, es necesaria una correcta programación, y dispositivos de aviso.
5. Medio. El sistema es sensible a los efectos del medio, como temperatura, humedad, polvo, vibración. Su control se debe realizar por medio de revisiones periódicas y primera pieza.

Formato del plan de control

Compañía / Planta	Fecha inicio	Departamento	Preparado por	Hoja
				/
	Última rev.	Proceso	Aprobado por	No. Documento

Parámetro	Crítico	Medición		
		Especificación	Instrumento	Responsable

Medición				Método de control	Plan de reacción
Lugar	Registro	Frecuencia	Muestra		

Figura 9.15 Formato de un plan de control

Un plan de reacción es un procedimiento que indica las actividades por realizar en caso de que exista alguna anomalía en el funcionamiento del proceso.

9.4. Precontrol

El precontrol es una técnica estadística que indica el desempeño de un proceso con respecto a sus especificaciones. El objetivo es controlar la capacidad del proceso para producir dentro de especificaciones y prevenir defectos.

Requisitos del precontrol

1. Cualquier proceso en donde se pueda pedir y modificar la característica de calidad de interés.
2. Procesos o continuos o discretos (piezas).
3. Que la producción total sea de tres o más piezas.
4. No es necesario que la distribución de la característica de calidad sea normal, ni que el proceso esté control estadístico.
5. No existe suposición alguna ni requisitos adicionales.

Ventajas del precontrol

1. Se puede usar en corridas cortas o largas.
2. No es necesario graficar el precontrol. Se puede llevar la gráfica cuando sea necesario demostrar el seguimiento en alguna corrida.
3. Trabaja con especificaciones en lugar de límites de control.
4. Señala el tiempo de ajuste del proceso o de un cambio de herramienta.

9.5. Gráfica CUSUM

La Gráfica de Sumas Acumuladas (CUSUM) de medias es usada para detectar cambios pequeños o medianos en la media del proceso, de una manera más rápida que los gráficos de control de Shewhart.

Uso de los gráficos de Shewhart

1. Para detectar cambios de magnitud 2σ o mayores.
2. Se requiere simplicidad.
3. Los costos de muestreo son bajos.

Uso de la gráfica CUSUM

1. Cuando se tiene la necesidad de una respuesta rápida (de dos a cuatro veces más rápido que una gráfica Shewhart) ante cambios pequeños, en el rango de 0.5σ a 2σ . Sin embargo puede ser lenta para detectar cambios grandes. Se recomienda si:
 - a. Se tienen largas corridas de producción.
 - b. La varianza del proceso es estable.
 - c. El proceso puede ajustarse para trabajar en un valor objetivo específico.
2. Los costos de muestreo son altos y hay que reducirlos, y cuando se necesita saber cuándo ocurrió el cambio en el proceso.

CUSUM Tubular

La CUSUM tubular es el procedimiento más sencillo de usar con respecto a otros enfoques. Es necesario calcular:

$$C_i^+ = \max[0, x_i - (\mu_0 + K) + C_i^+ - 1]$$

$$C_i^- = \max[0, (\mu_0 - K) - x_i + C_i^- - 1]$$

$$C_0^+ = C_0^- = 0$$

C_i^+ y C_i^- son desviaciones del objetivo
 μ_0 = valor objetivo

$$K = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{2} = \frac{\delta\sigma}{2}$$

$\mu_1 = \mu_0 + \delta\sigma$ es el cambio (fuera de control) que desea detectar.

9.6. Gráfica EWMA (Exponentially Weighted Moving Average)

La Gráfica EWMA tiene una función similar a la de la gráfica CUSUM, pues también es usada para detectar cambios pequeños en la media del proceso. Es más fácil de operar que la CUSUM, y se usa típicamente con tamaños de muestra $n=1$. Su ventaja es que se puede usar en modelación de series de tiempo y para pronosticar, y es insensible a la suposición de normalidad.

Se puede combinar con las gráficas de Shewhart para detectar tanto cambios grandes como pequeños.

Diseño de la gráfica EWMA

Las cantidades que se grafican son las Z_i 's, donde $Z_i = \lambda X_i + (1 - \lambda)Z_{i-1}$, siendo $Z_0 = \mu_0$.

λ es la ponderación de las observaciones. Es una constante entre 0 y 1. Un rango más frecuente es entre 0.05 y 0.25. Los valores más populares son 0.05, 0.10 y 0.20. Una regla práctica es usar valores pequeños de λ para detectar cambios más pequeños.

Si el tamaño de muestra es $n > 1$, usar el promedio de cada subgrupo en lugar de x_i , y $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ en lugar de σ .

Los límites de control son:

$$LSC = \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{2 - \lambda} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]}$$

$$LIC = \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{2 - \lambda} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]}$$

Los cuales, para i grande, se estabilizan en:

$$LSC = \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{2 - \lambda}}$$

$$LIC = \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{2 - \lambda}}$$

L es una constante que tiene que ver con el ancho de los límites. Un valor muy común es L=3, aunque para valores de λ menores o iguales a 0.1 conviene usar L en el rango de 2.6 a 2.8, siendo 2.7 un valor aceptable.