

2. MARCO DE REFERENCIA

El presente capítulo está compuesto por tres secciones: en la primera se habla acerca de la generación de energía eléctrica en las Centrales Termoeléctricas (CT), en la siguiente se abunda sobre el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) y por último las herramientas estadísticas utilizadas en esta investigación para apoyar la estimación de pronósticos de fallas.

2.1 Generación de Energía Eléctrica

El objetivo principal de cualquier sistema de generación de energía eléctrica se traduce en el suministro de la cantidad de energía que demanda el mercado y en cumplimiento de los requisitos regulatorios definidos por las leyes del gobierno. Para alcanzar el objetivo, uno de los requerimientos más importantes para cualquier sistema de generación de energía es garantizar su disponibilidad técnica (Carazas y Souza, 2010).

La evaluación de riesgos en plantas de proceso ha aumentado, y es utilizada en la industria para detectar eventos peligrosos y para prevenir o mitigar sus consecuencias para la población humana, los bienes materiales y el medio ambiente. La eficiencia de los equipos, la fiabilidad y la disponibilidad juegan el papel más importante en la mejora de la eficacia de las centrales de energía (Kancev y Cepin, 2011).

En la industria dedicada al proceso de producción de manera continua, el mantenimiento preventivo juega un papel importante en el buen funcionamiento de la planta. Un área de mejora es el programa de mantenimiento, que por su adecuada planificación y programación en diversas tareas, dará por resultado la optimización de los recursos y disponibilidad de los equipos (Deshpande y Modak, 2002).

La disponibilidad de un sistema complejo como una planta de energía térmica está fuertemente asociada con la fiabilidad de las piezas y la política de mantenimiento. Esa política no sólo tiene influencia en el tiempo de reparación de partes, sino también en la fiabilidad de las partes que afectan a la degradación y disponibilidad del sistema (Carazas y Souza, 2010).

Las fallas de las plantas son causadas frecuentemente por un mantenimiento inadecuado y la incapacidad de predecir los problemas que puedan ocurrir en el futuro durante el uso de los equipos. Sin embargo, con la consideración de la planificación y toma de decisiones en el mantenimiento, la frecuencia de las fallas y sus consecuencias; el mejoramiento del funcionamiento de los equipos es evidente (Eti et al., 2007).

2.1.1 Descripción del proceso de generación eléctrica en una central termoeléctrica

México cuenta con CT con diseños para generar 160 a 350 MW, estas últimas con capacidad de evaporación de 1,000 toneladas de vapor sobrecalentado y recalentado a 540°C, poseen una superficie de calefacción de más de 25,000 metros cuadrados y operando con eficiencias de alrededor de 89% (Plauchu, 2006).

Los tres componentes más importantes de una unidad termoeléctrica son el generador de vapor (GV), el grupo turbina-generador eléctrico y el condensador. El principal elemento que une las tres partes del equipo es el vapor, a menudo denominado medio de trabajo, producido por una caldera de alta presión. El vapor se desplaza sucesivamente desde la caldera a la turbina y de ésta al condensador. El ciclo de agua de alimentación completa este circuito, haciendo el flujo continuo desde el condensador hasta la caldera. Así, con la elevada temperatura final del ciclo, el GV transfiere o convierte la energía calorífica del combustible a energía térmica en forma de vapor de agua sobrecalentado. La turbina después transforma el

calor del vapor en trabajo mecánico y acciona el generador eléctrico que está acoplado a ella. El generador a su vez transforma esta energía mecánica en energía eléctrica (Kohan, 200).

Una descripción detallada de los elementos que integran una CT se muestra en la figura 2.1

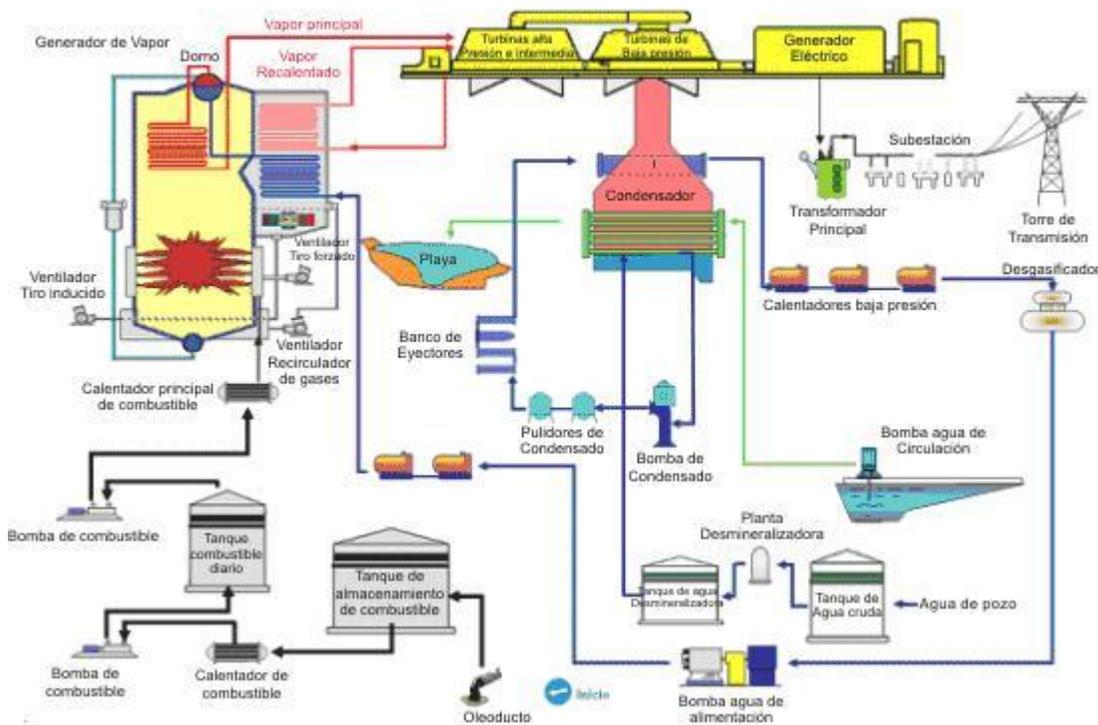


Figura 2.1 Esquema de una central termoeléctrica (CFE, 2011)

El vapor se produce dentro de una caldera que se alimenta de agua en forma continua para sustituir el vapor producido. Un condensador es utilizado para aprovechar el vapor y el calor residual, bombeando de nuevo esta agua a la caldera.

A través del condensador se hace circular agua procedente de una fuente importante de agua a través de una bomba que es utilizada para impulsar el agua de

alimentación a la caldera. En un GV, el agua de alimentación de la caldera se hace pasar primeramente por un economizador llamado así porque ahorra combustible utilizando el calor de los gases de combustión para aumentar la temperatura del agua. Para seguir enfriando más los gases de combustión se añade un calentador de aire que se emplea para traspasar parte del calor de los gases al aire de combustión (Gaffert, 1980).

Tanto el economizador como el calentador de aire aumentan la resistencia a la circulación de los gases a través de la caldera, por lo que se requiere de un ventilador de tiro inducido para vencer dicha resistencia y ayudar al tiro de la chimenea. La resistencia que constituye el calentador de aire y el equipo del hogar hacen necesario un segundo ventilador de tiro forzado para impulsar el aire de combustión al hogar. La alimentación de agua a la caldera debe regularse de manera que la cantidad que penetre en la caldera sea igual a la cantidad de vapor producido, lo cual exige un regulador del agua de alimentación que consiste en una válvula de paso utilizada para conservar el nivel. El vapor producido por la caldera tendrá una temperatura baja y solo se producirá vapor saturado, lo cual hace necesario un recalentador para aumentar la temperatura del vapor producido utilizando para ello los gases de combustión. El hogar es donde tiene lugar la combustión que posee paredes refrigeradas por agua que aumentan la absorción de calor. La circulación se logra disponiendo adecuadamente los tubos de descenso o alimentación y los tubos ascendentes que son los tubos del hogar (Gaffert, 1980).

El vapor producido en una caldera pasa a través de una turbina donde se expande hasta una presión más baja y acciona un generador que produce energía eléctrica a voltaje conveniente (Moran y Shapiro, 2004). Un transformador eleva el voltaje de la energía eléctrica transmitiéndola a través de un sistema de líneas, mediante transformadores auxiliares se rebaja el voltaje de la línea de transmisión o del generador a baja tensión para ser utilizado para el accionamiento de motores auxiliares en la central (Gaffert, 1980).

2.1.2 Definición y Componentes de un generador de vapor

Un GV es un transformador de energía que, dentro de sus capacidades, genera y entrega vapor en la cantidad, calidad y oportunidad requeridas por el usuario final con operación económica y segura (Plauchu, 2006).

El funcionamiento de una caldera es esencialmente un equilibrio entre la generación de calor por la combustión de combustible y la formación de vapor en la superficie interior del tubo de agua. Cuando el equilibrio se mantiene, los tubos calentados por la llama se enfrían al mismo tiempo por la generación de vapor. La temperatura máxima de metal dentro de los tubos se mantiene dentro de las condiciones de diseño, que dependen de la temperatura de saturación de vapor y el flujo de calor (Bulloch et al, 2009).

Según Central Electric Generating Board (CEGB, 1971), la disposición de las distintas partes de las superficies de enfriamiento está cuidadosamente pensada para hacer el uso más económico de los fenómenos físicos naturales.

Los componentes principales de un GV son:

- a) Economizador.- la función de un economizador en una unidad de vapor es absorber el calor de los gases de combustión y lo añade en forma de calor sensible al agua de alimentación que entra en el Circuito de evaporación de la caldera (CEGB, 1971). Está constituido por tubos de diámetro menor que los tubos del hogar para así lograr una mejor transmisión de calor (Gaffert, 1980).

- b) Sobrecalentador.- los calentadores de aire han sido de uso común por muchos años para recuperar el calor de los gases de combustión (CEGB, 1971) y mediante el sobrecalentador puede transferirse al vapor energía adicional aportando vapor en condiciones de sobrecalentamiento a la entrada de la turbina (Moran y Shapiro, 2004)

- c) Recalentador.- similar al economizador, excepto que es usado en sistemas de agua caliente para calefacción, el intercambiador se instala en la chimenea con su propia válvula de control, la temperatura de los gases se controla por el flujo de agua a través del recuperador de calor (Plauchu, 2006).

- d) Paredes. Un GV está integrado por pared frontal, pared posterior, pared izquierda y derecha, las cuales forman la caja de la caldera. Consiste en un conjunto de tubos sellados que contienen un fluido de alta entalpia de evaporación, cuando este se calienta en un extremo del tubo se evapora, fluye por el centro y se condensa en el otro extremo al contacto externo con un medio más frío y retorna por acción capilar para reiniciar el ciclo. Su aplicación permite transferir energía de los gases calientes al aire o agua, son elementos de rápida transferencia, sin partes móviles, robustos y pueden usarse en medios de diferentes presiones (Plauchu, 2006).

Dentro de estas zonas existe la posibilidad de variaciones que el diseñador debe proveer para que la absorción de la proporción correcta de calor en todas las etapas, sea la ideal. El saldo debe ser mantenido al encender el combustible que se ha especificado para la caldera, y bajo condiciones de carga variables. También cabe señalar que las proporciones de distribución de calor varía con el ciclo de presión utilizados (Moran y Shapiro, 2004).

2.1.3 Fallas en tuberías

Los GV son un importante componente de las plantas eléctricas. Un GV tiene aproximadamente 4000 tubos y la eficiencia depende de las propiedades de transferencia de fluidos. Este desempeño se afecta significativamente cuando una fracción de estos tubos presenta defectos o degradación por las características de transferencia de calor causadas por el ensuciamiento de los tubos (Mesquita et al, 2004).

Las fallas en tubos de caldera son la principal causa de las salidas forzadas de un GV; aproximadamente el 40% de estas fallas se presentan en lo que se le conoce como paredes de agua, el 30% en el sobrecalentador, el 15% en recalentadores, el 10% en el economizador y el 15% restante en las demás partes (Comisión Federal de Electricidad – CFE, 1991).

El medio ambiente del interior del GV durante su operación, es en gran medida la razón de estas fallas, podemos señalar que los efectos por sus esfuerzos, temperatura, corrosión-erosión y vibración, se combinan para producir la degradación del tubo de acero (Mesquita et al, 2004).

Una de las principales causas de falla por tubería rota es la erosión y en base a investigaciones realizadas por N. Davis Inc., representa el 6.5% de todas las causas de falla. De acuerdo con la ubicación de las fallas, los tubos de la pared de agua son el segundo tipo de falla más alto después de los tubos del sobrecalentador. Sin embargo, por tipo de material los tubos de acero al carbón son estadísticamente el material más frecuente causante de fallas (Ahmad et al, 2009).

La lenta acumulación de depósitos y los productos de corrosión originan que la conductividad térmica de las tuberías sea menor, donde básicamente el efecto consiste en elevar la temperatura del tubo de metal. Las temperaturas del tubo de metal no sólo dependerán de la conductividad térmica y el espesor del óxido, sino también en el flujo de calor y por lo tanto de la ubicación específica dentro de la caldera (Bulloch et al, 2009).

Los tubos de la caldera en aplicaciones vulnerables a variaciones de temperatura ocasionan que el material pueda sufrir deformaciones (abombamiento) e incluso la fractura (rotura longitudinal) subsiguiente, con consecuencias graves. Se estima que el 10% de todos los detalles de centrales eléctricas son causadas por fracturas de los tubos de caldera (Jones, 2004).

Los errores humanos son también un factor importante en las fallas de tubos de caldera. Estos errores se pueden presentar durante el diseño, fabricación, embarque, almacenamiento, construcción, operación y mantenimiento de la tubería del GV (CFE, 1991).

Por todo lo anterior, es muy importante establecer el mecanismo correcto de la falla, a fin de prevenir problemas futuros. La determinación de este mecanismo, es un proceso complejo que puede involucrar a varios especialistas y organizaciones. Especialistas en metalurgia, química, combustión y diseño de la caldera deberán trabajar en conjunto para investigar la causa de la falla. En este proceso, el personal de la planta representa un factor muy importante para el análisis, ya que ellos proveen la información inicial del daño y las condiciones de operación del generador previas a la misma. Así mismo, el superintendente de la central y su equipo técnico deberán seguir las investigaciones y aplicar las medidas correctivas requeridas para corregir el problema (CFE, 1991). Comisión Federal de Electricidad (CFE) presenta una calificación de los mecanismos de fallas que ocurren en las tuberías de los GV, tal como se muestra en la tabla 2.1 de la siguiente pagina.

I. MECANISMOS DE FALLA DEBIDOS A RUPTURA BAJO ESFUERZOS <ul style="list-style-type: none"> • Sobrecalentamiento repentino • Sobrecalentamiento prolongado • Termofluencia en soportes de sobrecalentador • Soldadura de metales diferentes 	II. MECANISMOS DE FALLA POR CORROSIÓN LADO AGUA <ul style="list-style-type: none"> • Corrosión cáustica • Daño por hidrógeno • Picadura (corrosión localizada) • Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo (sc) 	III. MECANISMOS DE FALLA POR CORROSIÓN LADO FUEGO <ul style="list-style-type: none"> • Corrosión a baja temperatura • Corrosión de paredes de agua • Corrosión por cenizas de carbón • Corrosión por cenizas de combustóleo
IV. MECANISMOS DE FALLA POR EROSIÓN <ul style="list-style-type: none"> • Cenizas en los gases • Sopladores de hollín • Partículas de carbón • Caída de escoria 	V. MECANISMOS DE FALLA POR FATIGA <ul style="list-style-type: none"> • Fatiga por vibración • Fatiga térmica • Corrosión fatiga 	VI. MECANISMOS DE FALLA POR FALTA DE CONTROL DE CALIDAD <ul style="list-style-type: none"> • Daño por limpiezas durante mantenimiento • Daño por reactivos químicos • Defectos de material • Defectos de soldadura

Tabla 2.1 Clasificación de mecanismos de fallas (CFE, 1991).

Un aspecto muy importante durante la inspección inicial del GV después de una falla, es determinar si existen tubos adyacentes al fallado que presenten algún tipo de daño como resultado de un mecanismo de falla secundario. Por ejemplo, la fuga de vapor a través de un tubo agrietado puede atrapar cenizas del flujo de gases e impulsarlas contra los tubos cercanos, produciéndoles daño por erosión. Una pequeña fuga puede causar más fugas en otros tubos y provocar rupturas múltiples que pueden complicar la reparación y la duración del tiempo fuera de servicio de la unidad. Otro mecanismo de falla queda presentado por impactos en los tubos adyacentes cuando la falla original es violenta y causa que el tubo proyecte pedazos de material que golpeen a los elementos cercanos (CFE, 1991).

2.1.4 Normatividad

La generación de energía eléctrica involucra satisfacer los intereses de la planta generadora, del usuario final y de las autoridades gubernamentales, para la cual se

ha acordado dirigir los esfuerzos hacia la estandarización y regulación dentro de esta industria mediante el desarrollo de normas y códigos para calderas seguras (Shield, 1965).

La ASME, fundada en 1880, es una asociación docente dedicada a la promoción del arte y de la ciencia de la ingeniería mecánica y ciencias correlativas, que organiza y sostiene comités para la introducción de códigos y normas en la industria relacionadas con calderas (Shield, 1965).

La selección del material del tubo dependerá de la temperatura que el metal va a experimentar, de acuerdo con los criterios de diseño y los tubos de acero al carbón son fabricados bajo la especificación ASME. De lo anterior se deduce que se requiere un registro exacto de los lugares donde ocurre un cambio de dimensiones y/o material para asegurar el reemplazo con el acero adecuado, así como su procedimiento de soldadura correspondiente, cada vez que tenga que efectuar una reparación debida a una falla en el equipo (CFE, 1991).

La ASME propone la siguiente ecuación para el cálculo del espesor de pared mínimo permisible para un tubo de caldera,

$$t = \frac{P D}{2S + P} + 0.005 D + e \quad (2.1)$$

Donde:

t = Espesor mínimo de pared, pulgadas

D = Diámetro externo del tubo, pulgadas

P = Presión de trabajo máxima permisible, lb/pulg².

S = Valor de esfuerzo máximo permisible, lb/pulg².

e = Factor de espesor para abocinar el extremo del tubo, pulgadas.

2.2 Mantenimiento centrado en confiabilidad

El mantenimiento ha ganado gran importancia como unidad de apoyo para garantizar la disponibilidad de los equipos, productos de calidad, entregas a tiempo y la seguridad de la planta (Gang et al, 2010).

El MCC fue desarrollado en 1970 por la Asociación de Transporte Aéreo, Asociación de Fabricantes Aeroespaciales y la Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos de América. El MCC es un enfoque de mejora industrial centrado en la identificación y el establecimiento de la operación, mantenimiento y políticas de mejoras de capital que gestionan los riesgos de fallas en los equipos con mayor eficacia. Es un marco de ingeniería que permite la definición de un régimen de mantenimiento completo (Selvik y Aven, 2010).

Los ingenieros de mantenimiento de Aviación de Estados Unidos dirigieron los esfuerzos para reevaluar la estrategia de mantenimiento preventivo y se determinó que sólo el 11% de todos los componentes experimentaron una característica del envejecimiento, mientras que el 89% es por razones distintas a la fatiga. A partir de esta observación, el porcentaje de los componentes sustituidos se ha reducido del 58% a 9%, mientras que el seguimiento de condiciones pasó del 2% a 51%. Los efectos de estos cambios permitió a la industria de la aviación comercial reducir los costos de mantenimiento y ayudó a desarrollar los conceptos básicos y procesos que se han conocido como MCC (Randall y Usrey, 2000).

El MCC, como un procedimiento para la identificación de mantenimiento preventivo de los sistemas complejos, ha sido reconocido y aceptado en muchos campos de la industria, tales como plantas de acero, la aviación, la red de trenes y en mantenimientos de barcos (Zhonghua et al, 2007).

Varios autores definen el MCC de la siguiente manera:

- Es un proceso utilizado para determinar que se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual (Moubray, 2004).
- MMC es un método de desarrollo y la selección de alternativas de diseño basado en la seguridad, operacionales y de criterios económicos (Jones, 1995).
- MCC proporciona una metodología estándar, común para la evaluación, clasificación y evaluación de la efectividad de cualquier procedimiento de mantenimiento (Eti et al, 2007).
- Es una técnica para el desarrollo de un programa de mantenimiento preventivo, basado en las tareas programadas en condiciones regulares o sustitución para garantizar que la fiabilidad de los equipos se realiza (Carazas et al, 2010).

La elección de la mejor estrategia de mantenimiento es uno de los principales puntos del MCC (Eisinger y Rakowsky, 2001), siendo su objetivo reducir el costo de mantenimiento, centrándose en las funciones más importantes del sistema y evitar o eliminar acciones de mantenimiento que no sean estrictamente necesarias (Marvin, 1998).

El MCC ha sido utilizado desde hace décadas por las industrias para el desarrollo de planes óptimos de mantenimiento, definiendo las tareas y requerimientos elementales para la restauración de la capacidad operativa de un sistema o equipo. Así, el MCC puede ser aplicado a las instalaciones y equipos para establecer un programa de mantenimiento basado en la seguridad, como las consecuencias económicas (Deshpande y Modak, 2002).

Este método aporta la estructura y el orden de la estrategia de mantenimiento, definiendo los recursos necesarios e identificando los roles que deben desempeñar

los distintos grupos de trabajo. La experiencia de estos grupos puede ayudar a desarrollar la estrategia y las tácticas de apoyo para las instalaciones existentes, identificar las rutas para alcanzar los objetivos y administrar los requisitos de mantenimiento de las plantas (Eti et al., 2007).

2.2.1. Fases del MCC: Las siete preguntas básicas

El MCC se centra en la relación entre la organización y los elementos físicos que la integran, por lo tanto, es necesario conocer el tipo de elementos físicos existentes y decidir cuáles son las que deben estar sujetos al proceso del MCC (Moubray, 2004).

Según la norma SAEJA1011 (1999) un análisis MCC básicamente proporciona respuesta a las siguientes siete preguntas:

- ¿Cuáles son las funciones?
- ¿De qué manera puede fallar?
- ¿Cuál es la causa de la falla?
- ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
- ¿En qué sentido cada falla es importante?
- ¿Qué se puede hacer para prevenir o predecir cada falla?
- ¿Qué debe hacerse si no se puede encontrar una tarea preventiva adecuada?

No existe un método estandarizado sobre la aplicación del MCC, sin embargo varios autores dividen el proceso en varias etapas o fases. A continuación se presenta la secuencia lógica aportada por algunos de ellos.

Paso 1. El proceso inicia con la selección del sistema a analizarse. Todos los sistemas pueden beneficiarse con la aplicación de un análisis de MCC, sin embargo, con recursos limitados, debemos, establecer prioridades y comenzar con los sistemas que se supone serán los más beneficiados del análisis (Marvin, 1998).

Paso 2. Identificación de los elementos del equipo, los cuales fueron adquiridos para cumplir con ciertos propósitos, por lo que es importante definir sus funciones específicas (Moubray, 2004), las normas de funcionamiento y cuantificar los estándares del sistema, considerando el nivel de rendimiento deseado por el usuario (Gang et al, 2010).

Paso 3. El paso siguiente es detallar cómo puede fallar cada elemento en la realización de sus funciones, (Moubray, 2004), un posible fallo es una condición física identificable que indica que ha iniciado el proceso de fracaso (Eisinger y Rakowsky, 2001).

Paso 4. Posteriormente se describen los modos de fallo potenciales del sistema que tienen mayor posibilidad de causar la pérdida de una función, lo cual permite comprender que es lo que se está tratando de prevenir definiendo la causa de cada falla (Marvin, 1998).

Paso 5. Las consecuencias del fracaso son evaluados para cada modo de fallo predominante para determinar su gravedad. Si es grave, el modo de fallo se considera crítico. Los modos de fallo no críticos no se consideran en el estudio (Randall y Usrey, 2000). Cuando se identifica cada modo de falla, los efectos de las fallas también deben registrarse, lo cual permite decidir la importancia de cada falla y por lo tanto que nivel de mantenimiento será necesario (Moubray, 2004).

Una vez que se hayan determinado las funciones, las fallas, los modos de falla y los efectos de los mismos, el método sugiere el desarrollo del modo de fallo y análisis de efectos (AMEF) con el fin de definir los componentes más críticos. La herramienta de análisis supone que un modo de fallo se produce en un componente a través de algunos mecanismos de falla y el efecto de este fracaso en el equipo se define (Carazas et al, 2010).

Paso 6. La próxima fase del MCC es preguntar cuál es el impacto de la falla y la importancia que tiene, la razón de ésto es porque las consecuencias de cada falla dicen si se necesita prevenirlos (Moubray, 2004).

Paso 7. La siguiente tarea consiste en la selección de la tarea de mantenimiento en función de los pasos realizados anteriormente, utilizando la lógica de la decisión, las tareas rutinarias de mantenimiento se seleccionan directamente y para tratar de forma rentable cada causa de fracaso (Randall y Usrey, 2000). MCC se centra sólo en las tareas que deben ejecutarse y por qué. La asignación de la frecuencia de las tareas se deriva de los análisis realizados en el AMEF, tomando en cuenta los lineamientos de la empresa y la experiencia en el sector para establecer las frecuencias iniciales de trabajo (Gang et al, 2010).

Paso 8. Para finalizar, las acciones recomendadas deben ser aplicadas y actualizadas continuamente, una de las ventajas más significativas del MCC es que sistemáticamente analiza y documenta la base de la toma de decisiones iniciales, y, por tanto, el beneficio total se obtiene cuando la operación y la experiencia de mantenimiento se alimenta de nuevo en el proceso de análisis (Marvin, 1998).

2.2.2 Clasificación de Funciones y Tipos de Fallas

El sistema por lo general tiene un gran número de funciones diferentes. Es esencial para el análisis de MCC que todas las funciones importantes del sistema sean identificados (Marvin, 1998). Moubray en el 2004 hace una clasificación del tipo de funciones:

- Funciones primarias: estas son las funciones necesarias para cumplir la finalidad del producto. Las funciones esenciales son simplemente las razones para instalar el equipo.

- Funciones secundarias: estas son las funciones que son necesarias para apoyar las funciones esenciales. Un fallo de una función auxiliar en muchos casos puede ser más importante que un fallo de una función esencial.
- Funciones de protección: las funciones destinadas a proteger a las personas, equipos y el medio ambiente.

La definición de una función asegura que se conozca exactamente qué es lo que se quiere, lo que a su vez asegura que las actividades de mantenimiento permanezcan enfocadas hacia las necesidades reales de los usuarios (Moubray, 2004).

Las organizaciones adquieren equipos porque desean que realicen una tarea cumpliendo sus funciones bajo ciertos estándares aceptables de funcionamiento; sin embargo, si por alguna razón se dejan de cumplir las funciones deseadas se considera que los equipos están fallando (Moubray, 2004).

Históricamente las fallas han sido clasificadas de acuerdo a su patrón de comportamiento, el primer patrón de falla identificado era simplemente que cuando los elementos físicos envejecen tienen más posibilidades de fallar, durante la segunda guerra mundial apareció la creencia general de la curva de la bañera. Sin embargo, los equipos en general son mucho más complejos de lo que eran hace algunos años, lo que ha llevado a que no solo ocurre un modelo de falla sino seis diferentes, como se muestra en la figura 2.2 (Moubray, 2004):



Figura 2.2 Patrón de comportamiento de fallas (Moubray, 2004).

- El modelo A es la conocida como “curva de la bañera” la cual está compuesta por varios patrones de falla, comienza con una incidencia de falla alta conocida como mortalidad infantil seguida por una frecuencia de falla que aumenta gradualmente o es constante, y por ultimo entra a una periodo de desgaste (Juran y Gryna, 1995).
- Modelo B “el punto de vista tradicional” muestra una probabilidad de falla constante o ligeramente ascendente, y termina en una zona de desgaste (Moubray, 2004).
- El modelo C muestra una probabilidad de falla ligeramente ascendente, pero no existe una edad de desgaste definida que sea identificable (Juran y Gryna, 1995).
- El modelo D muestra una probabilidad de falla bajo cuando el componente es nuevo, luego da un aumento rápido a un nivel constante (Moubray, 2004).
- Mientras que el modelo E definido como “fallas aleatorias” muestra una probabilidad constante de falla en todas las edades, es decir, no existe ninguna relación entre la edad de los equipos y la probabilidad de que fallen (Moubray, 2004).
- Finalmente el modelo F comienza con una mortalidad infantil que desciende finalmente a una probabilidad de falla que aumenta muy despacio o que es constante (Gutiérrez y de la Vara, 2004).

2.2.3 Consecuencias de fallas

Cuando ocurre una falla, su impacto es reflejado en varios factores dentro de la organización. Es evidente que si la gestión de las empresas son conscientes de la inseguridad y sus grandes consecuencias, se pueden realizar correcciones (Jones, 1995).

La naturaleza y gravedad de estos efectos también definen las consecuencias de las fallas, y si son serias entonces se harán esfuerzos para evitarlas, eliminarlas o

disminuirlas. Este enfoque sobre las consecuencias de las fallas hace que el MCC comience el proceso de selección de tareas asignando los efectos a cada modo de falla y clasificándolos dentro de una de las cuatro categorías (Moubray, 2004).

Una falla tiene consecuencias para la *seguridad* si puede lesionar o causar la muerte de alguien, y si se infringe alguna normativa relativa al medio ambiente sería una consecuencia para el *medio ambiente*. Una falla tiene consecuencias *operacionales* si afecta a la producción o las operaciones en el volumen de producción, calidad del producto o servicio al cliente. Las fallas con consecuencias *no operacionales* no afectan la seguridad, el medio ambiente ni la producción, de modo que solo involucran el costo directo de reparación (Moubray, 2004).

Para cada una de estas clases se puede clasificar la consecuencia como: alta (A), media (M), baja (B), donde la definición de las categorías dependerá de la aplicación específica (Marvin, 1998).

Dacheng y Jinji (2010), presentan una matriz para evaluar los elementos críticos de una planta petroquímica, en su trabajo se agregó una columna al AMEF para ordenar el nivel crítico de los modos de falla, y así asignar racionalmente los recursos de los servicios de mantenimiento durante la formulación de la estrategia. La abscisa de la matriz corresponde a las consecuencias del fracaso, mientras que el eje de ordenadas muestra la posibilidad de fracaso, dividiendo la evaluación de la consecuencia en las cuatro categorías: seguridad, medio ambiente, la pérdida de producción, y el costo de mantenimiento. La figura 2.3 muestra la matriz para asignación del nivel crítico en base a la probabilidad de la falla y la categoría de la consecuencia, descritos en la Tabla 2.2

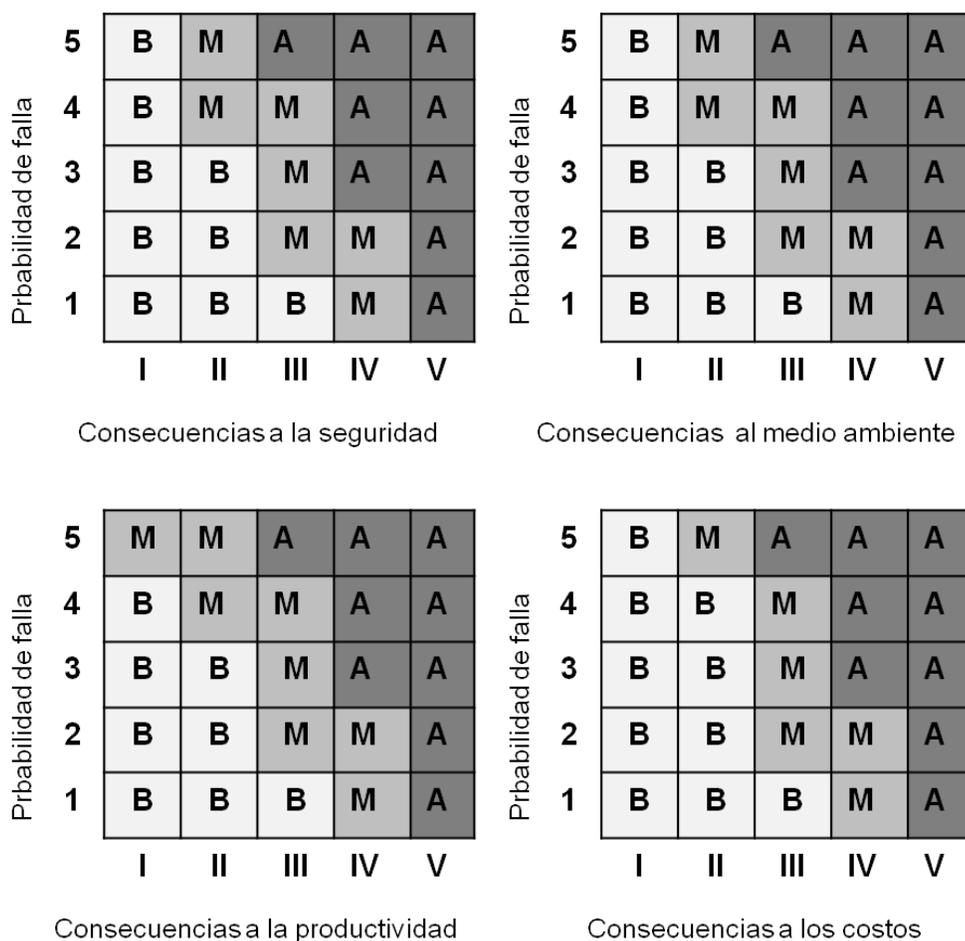


Figura 2.3 Matriz de asignación de nivel crítico para una planta petroquímica (Dacheng y Jinji, 2010)

	Nivel	Criterio
Probabilidad de falla	5	Se produce > 5 veces en un ciclo de mantenimiento
	4	Se produce 4 veces en un ciclo de mantenimiento
	3	Se produce 3 veces en un ciclo de mantenimiento
	2	Se produce 2 veces en un ciclo de mantenimiento
	1	Se produce 0-1 tiempo en un ciclo de mantenimiento
Consecuencias a la seguridad	I	Más de una pérdida de la vida en un accidente de grande
	II	Muerte inmediata (incluyendo las muertes por intoxicación aguda) o dentro de 30 días después del accidente
	III	Discapacidad física o desfiguración, pérdida de la función del órgano auditivo, visual o de otro tipo; peligro grave para la salud humana
	IV	Daños leves o moderados en el cuerpo humano o la cara; leve o discapacidad a corto plazo en función de los órganos auditivos, visuales o de otro tipo; leve o moderado riesgo para la salud humana

	V	No hay daños en el cuerpo o la cara; no hay lesiones en el funcionamiento de los órganos auditivos, visuales o de otro tipo; No hay peligro para la salud humana
Consecuencias al medio ambiente	V	Cambios significativos en la estructura de los ecosistemas o pérdidas de la función ecológica; mayor influencia social e internacional, deben ser corregidos con la ayuda del gobierno local y las autoridades internacionales
	IV	Salida de grandes cantidades de contaminantes; alta toxicidad de los contaminantes; influencia social grande, pero se puede resolver con el apoyo del departamento de autoridades locales y regionales
	III	Factores complejos de la contaminación, muchos tipos de contaminantes que se producen y la salida es grande; contaminantes muy tóxicos o difíciles de degradar, los esfuerzos de la compañía son necesarios para resolver el problema
	II	Factores simples de la contaminación, se producen baja cantidad de contaminantes y la salida es baja, la toxicidad de contaminantes es menor, puede ser resuelto dentro del sistema
	I	No existen aguas residuales, gases residuales; y los residuos de polvo, olores, ruidos, vibraciones, radiaciones, ondas electromagnéticas, u otros efectos adversos producidos son: dentro de la gama admisible de los índices de protección del medio ambiente
Consecuencias a pérdida de la producción	V	No hay producción en más de 24 h
	IV	No hay producción de 8 a 24 h
	III	No hay de producción en menos de 8 h
	II	Reducción de la calidad de la producción o del producto
	I	Ningún efecto
Consecuencias a los costos por mantenimiento	V	>RMB50,000
	IV	RMB20,000-RMB50,000
	III	RMB10,000-RMB20,000
	II	RMB5,000-RMB10,000
	I	<RMB5,000

Tabla 2.2 Criterios de evaluación para el análisis de componentes críticos (Dacheng y Jinji, 2010)

2.2.4 Casos de aplicación

Diversos estudios se han realizado en torno al MCC, varios casos son presentados en este apartado con la finalidad de analizar los métodos propuestos por cada uno de los autores. La tabla 2.3 muestra cada uno de los casos de aplicación, en la columna izquierda muestra las preguntas que el MCC intenta resolver, mientras que

en la columna superior se enlistan los métodos y herramientas empleados para dar solución a cada una de las preguntas.

Casos aplicación Preguntas MCC	Deshpande y Modak (2002)	Dacheing y Jinji (2010)	Gang et al, (2010)	Carazas et al, (2010)
	Estrategias y herramientas utilizadas			
¿Cuáles son las funciones?/Descripción y especificaciones del sistema	DFP PMA HC	DFP	AMEF	AF PMA
¿De qué manera puede fallar? /Lista de fallas	HC	AMEF	AMEF	AMEF
¿Cuál es la causa de la falla?/ Modos de falla		RHF	AMEF	AMEF
¿Qué sucede cuando ocurre cada falla? /efectos asociados a la falla		RHF	AMEF	
¿En qué sentido cada falla es importante?/Asignación de nivel critico	AD, HC	MANC AAF		CF-SB ACR: AAF
¿Qué se puede hacer para prevenir o predecir cada falla? /Asignación de tareas de mantenimiento	AD, HC	RM	MBC: FD- (RN)	F- DW D- SMC
¿Qué debe hacerse si no se puede encontrar una tarea preventiva adecuada?		PRP		
Descripción de herramientas de aplicación				
PMA: Programas de mantenimiento actuales HC: hoja de calculo AD: árbol de decisión DFP: diagrama de flujo del proceso AMEF: Análisis de modos y efectos de fallas RHF: registros históricos de fallas MANC: matriz de asignación de nivel critico		AAF: Árbol de análisis de falla RM: mantenimiento radical MBC: mantenimiento basado en la condición FD-RN: fusión de datos redes neuronales AR: árbol funcional ACR: análisis de causa raíz F-DW: fiabilidad con distribución de Weibull D-SM: disponibilidad con simulación Monte Carlo		

Tabla 2.3 Matriz comparativa de casos de estudio (elaboración propia)

Deshpande y Modak (2002) en su trabajo el concepto de MCC se ha aplicado al proceso de desgasificación al vacío de una industria de acero. Mediante la aplicación sistemática de la metodología MCC, son analizados los fracasos y los modos de falla.

El sistema de desgasificación al vacío comprende varios subsistemas a los cuales se identifican sus funciones y fallas como primer paso, estos datos son depositados en hojas de cálculo que también consisten en la asignación del nivel crítico de cada modo de fallo y se establece una correlación de los modos de falla con las tareas de mantenimiento pertinentes. Con base en los datos recogidos, se formula el programa de mantenimiento para el sistema. En la hoja de cálculo se incluyen las frecuencias de las tareas a realizar en un año.

Esto revela que las tareas de MCC no necesariamente tienden a aumentar la frecuencia, pero pueden mantener o incluso disminuir la frecuencia de mantenimiento basado en las prioridades funcionales. MCC también puede recomendar las tareas de mantenimiento adicionales.

Dacheing y Jinji en el 2010 presentan un estudio de ingeniería realizado en la industria petroquímica con la aplicación del MCC considerando el mantenimiento radical (MR).

Los resultados de la aplicación se presentan a través de una estrategia de mantenimiento basada en el análisis del proyecto mediante el establecimiento de los criterios de evaluación y matrices para determinar los componentes críticos de las máquinas rotativas, apoyadas en la elaboración de un árbol de fallas de las vibraciones del compresor. El procedimiento de análisis de MCC considerando MR lo definen como un sistema de mantenimiento centrado en confiabilidad inteligente (RCIMS), que consta de seis partes. La primera parte consiste en la recopilación de información, continua con la división del sistema, la evaluación del equipo, la

construcción de un AMEF, un análisis de árbol de fallas y por último la selección de la estrategia de mantenimiento. La investigación muestra que el uso de MR en el MCC tradicional, puede ayudar a asignar los recursos de mantenimiento y mejorar la calidad de las estrategias de mantenimiento.

El desarrollo de un sistema de Mantenimiento Basado en la Condición (MBC) por Gang et al, (2010) integra la estrategia de fusión de datos siguiendo la arquitectura de la gestión del MCC. Usando la estrategia de fusión de datos puede aumentar la precisión de mantenimiento, mientras que con el MBC evita tareas innecesarias de mantenimiento mediante la adopción de acciones de mantenimiento sólo cuando hay pruebas de comportamientos anormales de un activo físico con los beneficios de costo óptimo.

El MBC tradicional es un programa de mantenimiento que recomienda las acciones de mantenimiento basado en la información recopilada a través de monitoreo de condición. Con el aumento de la exigencia en la predicción de la tendencia futura de la degradación del rendimiento del equipo, se extienden las funciones del MBC y agrega una capa de pronóstico.

Las tareas del pronóstico de datos predicen la tendencia a la degradación del estado de la máquina, la evaluación de la vida útil restante y su intervalo de incertidumbre, para lo cual fue empleado un método de regresión no lineal. Después de obtener los resultados de predicción se dieron cuenta de las posibles mejoras de la exactitud y precisión mediante la fusión de los resultados previstos.

En el 2010 (Carazas et al), presentan un método para la evaluación de la fiabilidad y la disponibilidad del recuperador de calor del generador de vapor (HRSG) instalado en la planta de energía ciclo combinado. El primer paso del método consiste en la elaboración de un árbol funcional del GV basado en el diagrama de flujo del proceso de acuerdo con el manual de instrucciones dadas por el fabricante, después se

desarrolló el AMEF en el cual se registraron cinco campos: componente bajo análisis, modos físicos por los que el componente puede fallar, posibles causas de cada uno de los modos de fallo, los efectos de cada modo de fallo y la escala de criticidad, dado el grado de degradación en el funcionamiento de la caldera. El análisis AMEF se realizó para cada componente que aparece al final de una rama determinada del árbol funcional.

El paso siguiente consiste en un análisis de fiabilidad basados en el tiempo hasta el fracaso y el tiempo para reparar los datos registrados durante la operación del GV, representados por dos parámetros de distribución de Weibull, normalmente utilizado para modelar desgaste o fallas por fatiga. Una vez que los parámetros de fiabilidad del mantenimiento se calculan la disponibilidad del sistema fue estimado aplicando el método de simulación Monte Carlo. En el caso de una caldera de recuperación en una planta de energía, la disponibilidad es una medida de la fracción de tiempo que está generando la salida de vapor de producción nominal.

El tercer paso, el objetivo de mejorar la disponibilidad, recomienda la elaboración de análisis de árbol de fallos para identificar los componentes de la falla (o una combinación de fallas) de lo que puede provocar el cierre HRSG. El análisis de árbol de fallas se ejecuta con el fin de definir los componentes de la bomba de agua de alimentación que pueden provocar su fracaso. Finalmente se propone un procedimiento de mantenimiento para reducir la frecuencia de ocurrencia fracaso para los componentes críticos.

2.3 Análisis de modo y efecto de fallas

Actualmente, la gestión eficaz de los riesgos se ha convertido en un elemento esencial para la gestión exitosa de un proyecto, ayudando al administrador del proyecto a mitigar los riesgos conocidos y no previstos en los proyectos de todo tipo (Carbone y Tippett, 2004).

El análisis de modo y efecto de fallas (AMEF) fue creado a partir de estudio realizados por la NASA en el año de 1963 (Gülsen y Coskun, 2009). La aplicación del AMEF es una actividad encaminada a garantizar que los productos sean confiables, en el sentido que logren funcionar bien el tiempo que se ha establecido como su periodo de vida útil, además de detectar fallas potenciales y prevenirlas (Gutiérrez y de la Vara, 2004).

El AMEF es una mejora de la calidad y una herramienta de evaluación del riesgo de uso común en la industria, es un documento para la captura de información de diseño y el fracaso del proceso (Teoh y Case, 2004). El objetivo principal del AMEF es descubrir y dar prioridad a los modos de fallo potenciales que podrían tener un efecto perjudicial en el sistema y su rendimiento. El método AMEF se basa en una lluvia de ideas para descubrir las fallas que pudieran ocurrir en un sistema o en un proceso, que requiere la identificación de los modos de falla de un determinado producto o sistema, su frecuencia y las posibles causas (Gülsen y Coskun, 2009).

El AMEF se clasifica en dos tipos principales: AMEF de diseño y AMEF de proceso. El AMEF de diseño se refiere al diseño de producto, mientras que el AMEF de proceso se utiliza para resolver problemas debido a los procesos de fabricación (Teoh y Case, 2004).

Los pasos principales para el desarrollo de un AMEF de procesos son los siguientes:

Selección del proceso al que se aplicará y definición de la función del proceso.

Es importante establecer una descripción de las funciones del proceso al que está dirigido el AMEF, indicando las principales fases y sus funciones correspondientes (Gutiérrez y de la Vara, 2004). Indicar el propósito del proceso u operación que se analiza, incluyendo la información acerca del diseño del sistema, subsistema o componente (DaimlerChrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporations –DCFMCGMC-, 2001).

Modo de falla potencial. Se refiere a la manera en que el proceso puede fallar en el cumplimiento de las funciones y especificaciones establecidas anteriormente. Durante esta etapa se identifican todos los modos de falla (Gutiérrez y de la Vara, 2004). La lista de los modos de falla deben considerar: las fallas que ya han ocurrido, las fallas que se están controlando mediante los planes de mantenimiento actuales y los que no han ocurrido pero se piensan que son razonablemente probables de ocurrir en el contexto operacional de la empresa (Pérez, 2010).

Definición de efectos de la falla potencial. De ocurrir la falla, se establece una descripción objetiva y específica sobre todos los efectos que ocasiona el modo de falla identificado (Gutiérrez y de la Vara, 2004). Describir los efectos del fracaso en términos de lo que el cliente puede percibir, recordando que el cliente puede ser un cliente interno, así como el usuario final, o si el modo de fallo puede afectar la seguridad o el incumplimiento de normativas. El cliente en este contexto podría ser la siguiente operación, el distribuidor y/o propietario (DCFMCGMC, 2001).

Causas o mecanismos de la falla potencial. Listar todas las posibles causas para cada modo potencial de falla, entendiéndose por causa de falla la manera en cómo podría ocurrir la falla. En el desarrollo de la AMEF, el equipo identifica los modos de falla y las acciones que pueden reducir o eliminar la posible ocurrencia de la falla. Se solicitan los aportes de un amplio grupo de expertos en diseño, ensayo, calidad, línea de productos, comercialización, fabricación, y el cliente para asegurarse de que los modos de falla potencial se identifican (Carbone y Tippett, 2004).

Severidad. En esta etapa se estima la severidad de los efectos definidos en una escala del 1 al 10 y representa la gravedad de la falla para el cliente o para una operación posterior una vez que esta falla ha ocurrido. El grado de severidad se estima aplicando los criterios establecidos en el rango asociado con el efecto más grave para un modo de fallo determinado (DCFMCGMC, 2001).

Ocurrencia. Estimar la frecuencia con la que se espera que ocurra la falla debido a cada una de las causas potenciales, la cual se estima en una escala de 1 a 10. De existir registros estadísticos éstos deben utilizarse (Gutiérrez y de la Vara, 2004).

Detección. La detección es el rango asociado con el mejor control de procesos. La detección es una clasificación relativa para estimar la probabilidad de que los controles establecidos detecten la falla (DCFMCGMC, 2001).

Tradicionalmente, cuando se realiza un AMEF, se identifican tres índices: la frecuencia, la gravedad de los efectos asociados y la detección, donde la severidad es una estimación de la gravedad de los peores efectos de la insuficiencia, la ocurrencia es una estimación de la probabilidad de la ocurrencia de la causa de fracaso y de la detección es una estimación que refleja lo difícil que es detectar un fracaso (Gutiérrez y de la Vara, 2004).

Definición de controles actuales para la detección de fallas. Los actuales controles de proceso son las descripciones de los controles que previenen en la medida de lo posible el modo de fallo o mecanismo de falla, o su detección en caso de producirse. Estos controles pueden ser controles de proceso tales como el de prueba y error, control estadístico de procesos o puede ser la evaluación posterior al proceso (DCFMCGMC, 2001).

Acciones recomendadas. Descripción de acciones recomendadas para los NPR más altos, siendo responsabilidad de todas las áreas involucradas establecer programas de seguimiento efectivo para su implementación (Gutierrez y de la Vara, 2004).

El objetivo de los pasos es encontrar la intersección de los valores fundamentales para definir el conjunto inicial de los riesgos que requieren un plan de respuesta , los

eventos de riesgo que tienen una puntuación de riesgo por encima de los valores críticos se les da prioridad para la planificación inicial de respuesta al riesgo (Carbone y Tippett, 2004).

2.3.1 Análisis de Causa Raíz

El análisis de causa raíz es utilizado para el desarrollo del AMEF en su etapa de análisis, siendo su objetivo es identificar las causas que están generando el problema, entendiendo la manera en cómo se generan mediante los datos obtenidos (Gutiérrez y de la Vara, 2004).

La causa raíz es el factor básico que puede provocar fallos en el sistema, por lo que su identificación ayudará a garantizar la fiabilidad y seguridad, así como la maximización de su vida útil (Dacheng y Gao, 2010).

El análisis se realiza para cada subsistema crítico del sistema bajo análisis con el objetivo de determinar las posibles combinaciones de fallos de los componentes que causan los fracasos del subsistema. Sobre la base del análisis, puede surgir una propuesta de mantenimiento para los componentes a fin de reducir su degradación y, en consecuencia, sus probabilidades de fallo (Carazas et al, 2010).

A pesar de que mucha de la información puede centrarse en la planta y equipos, a menudo la causa raíz del problema de la planta se remonta al proceso de mantenimiento de trabajo, procedimientos inadecuados, rutinas de trabajo deficientes o el uso inadecuado de listas de control (Eti et al, 2007).

Las herramientas que son de utilidad en esta fase son: lluvia de ideas, diagrama Ishikawa, gráficas de Pareto, estratificación, cartas de control, mapeo de procesos,

los cinco porqués, diseño de experimentos, árbol de fallas, prueba de hipótesis, diagrama de dispersión, entre otros (Gutiérrez y de la Vara, 2004).

Las graficas de Pareto contribuyen a desglosar un problema en las contribuciones relativas de sus componentes, basándose en el resultado empírico común de que un gran porcentaje de los problemas se deben a un pequeño porcentaje de las causas (Chase et al, 2009).

Mientras los gráficos de Pareto ayudan a determinar las causas que provocan el mayor porcentaje de los problemas, el diagrama de Ishikawa muestra las relaciones propuestas hipotéticamente entre causas potenciales y el problema que se estudia (Chase et al, 2009).

El desarrollo del árbol de fallas es fundamental para la comprensión de la relación funcional entre los componentes del sistema (Carazas y Salazar, 2010). Este enfoque de arriba hacia abajo comienza por suponer que ocurre un accidente. Después considera las causas directas posibles que puedan conducir a este accidente y busca los orígenes de estas causas (Juran y Gryna, 1995). Una herramienta de apoyo es la de los cinco porqués.

La parte del análisis de causas, como se indica, se basa en preguntarse hasta cinco veces ¿por qué?, comenzando por el accidente. A cada paso la respuesta se convierte en consecuencia y su porqué sería la causa o antecedente. La causa real suele manifestarse en el nivel de la quinta causa (Azkoaga et al, 2002).

2.4 Confiabilidad

Hoy en día la confiabilidad toma mayor relevancia debido a la creciente demanda por productos de calidad establecidos y evaluados durante el proceso de producción y

que además posean un buen desempeño durante un tiempo suficientemente largo (Gutiérrez y de la Vara, 2004).

La confiabilidad se puede definir como la probabilidad de que un sistema funcione correctamente durante un período determinado de tiempo, bajo un conjunto dado de condiciones (Carazas y Salazar, 2010). La confiabilidad ayuda a predecir la fiabilidad global de un sistema mediante la aplicación de métodos de ingeniería que permitan asegurar que los objetivos requeridos se alcanzan (Eti et al, 2007).

El proceso de confiabilidad de componentes de los sistemas representa la integración y coordinación de actividades que involucra a diferentes áreas de las centrales generadoras, con la finalidad de analizar y evaluar los equipos, desarrollar e implementar un plan óptimo de mantenimiento, un monitoreo de condición del componente y realizar un continuo ajuste de las tareas y frecuencias de mantenimiento preventivo y predictivo (Becerra et al, 2006).

Para las instalaciones existentes, las fuentes de falta de confiabilidad se pueden identificar y rastrear mediante el análisis de las causas ya sea por un mal diseño, funcionamiento incorrecto, mantenimiento inadecuado o una combinación de los mismos. Dos formas de evaluar la confiabilidad son: a priori (antes de los hechos) y, a posteriori (después). La ingeniería en producción ve la confiabilidad del sistema en el funcionamiento a posteriori de una planta, examinando las fuentes de falta de fiabilidad y sus causas que le permitan identificar las áreas con la mayor oportunidad de mejora (Eti et al, 2007).

Los trabajadores en las plantas pregonan la falta de los datos, cuando éstos se encuentran a su alrededor con diversos grados de utilidad. La mayoría de las plantas industriales cuentan con registros históricos de equipos relacionados con el fracaso

de muchos años, pero rara vez se analizan de una manera científica. Es por eso que las herramientas de análisis de confiabilidad se vuelven más importantes, demandando la disponibilidad de datos precisos y oportunos para el estudio, considerando algunas pautas técnicas para la cantidad de datos que deben ser adquiridos, anotados y utilizados (Eti et al, 2007).

Entre las consideraciones importantes en la determinación de la confiabilidad se encuentra la capacidad de un componente o producto antes de ser remplazado, dentro de un periodo dado, al estado especificado en que puede desempeñar su función esperada (Feigenbaum, 2004).

Para fomentar la confianza, la parte central es el monitoreo de las condiciones del sistema, que se puede realizar con el seguimiento en línea o mediante control periódico, siendo utilizado este último debido a su bajo costo y otorgando un diagnóstico preciso mediante filtrado de los datos procesados. Pronóstico es el proceso de la predicción de la confiabilidad futura de un producto mediante la evaluación del grado de desviación o degradación del producto de sus condiciones previstas de funcionamiento normal. (Gang et al, 2010).

La mayoría de los análisis de confiabilidad dependen de la evaluación matemática basadas en la información asociada a los datos de fiabilidad de algunos componentes. (Carazas y Salazar, 2010). Varios modelos están disponibles, entre ellos se encuentran la distribución de Weibull, la distribución logarítmica normal y la distribución inversa de Gauss; todas estas distribuciones son bastante flexibles y pueden ser utilizadas para la modelación detallada de los mecanismos de error. (Marvin, 1998). La construcción de modelos debe ser la más adecuada para representar el comportamiento de los datos observados y por lo general consta de las siguientes etapas: 1. Identificación del modelo, 2. Estimación de parámetros implícitos en el modelo, 3. Verificación de supuestos y 4. Uso del modelo (Guerrero, 1991).

2.5 Procesos Estocásticos

Los modelos están siendo utilizados en una medida cada vez mayor para investigar fenómenos que se definen por un flujo de acontecimientos en el tiempo, especialmente aquéllos que presentan características muy variables. Un modelo que posee una distribución de probabilidad conjunta de diferentes tipos de individuos en cada punto de tiempo sería un modelo estocástico, y todo proceso, concebido como un desarrollo continuo en el tiempo sería llamado proceso estocástico (Bayley, 1964).

Un proceso estocástico es una familia de variables aleatorias asociadas a un conjunto índice, generalmente el tiempo, de tal forma que a cada elemento del conjunto le corresponda una variable aleatoria; esto se escribirá como $\{Z(\tau); \tau \in T\}$, en donde T es el conjunto índice de $Z(\tau)$ es la variable aleatoria correspondiente al elemento τ de T . Cuando se desea remarcar la dependencia del evento aleatorio ω entonces al proceso se le identifica como $Z(\omega, \tau)$ de tal forma que $Z(\omega, \cdot)$ representa una variable aleatoria en un punto específico del valor del índice y $Z(\cdot, \tau)$ representa una trayectoria del proceso para un evento particular. Tanto la variable aleatoria Z como el conjunto índice T pueden ser continuos o discretos por lo que existen en general cuatro posibles procesos estocásticos que se pueden observar: continuos tanto en variable como en el índice que se conocen como procesos aleatorios continuos, discreto en variable pero continuo en el índice a los que se les denomina procesos aleatorios discretos, de variable continua pero índice discreto llamadas secuencias o sucesiones aleatorias continuas, y por último, tanto la variable como el índice son discretos y se denominan secuencias aleatorias discretas (Papoulis, 1984).

Un proceso aleatorio o estocástico se dice que es estacionario si todas sus propiedades estadísticas no cambian con el tiempo, esto es, sus momentos de

cualquier orden son independientes del conjunto índice (del tiempo). En caso contrario, se denominan no estacionarios (Guerrero, 1991).

2.6 Modelos de regresión lineal

El análisis de regresión es una técnica estadística para investigar y modelar la relación entre variables. Las aplicaciones de la regresión se encuentran en numerosos campos de la investigación (Navidi, 2006). La idea principal consiste en que dada la información de un conjunto de variables que se consideran explicativas de un proceso, la respuesta se da a través de una o varias variables dependientes.

Un modelo simple lo constituye aquel en el que se observa una sola respuesta que depende de por lo menos una variable explicativa o independiente del tipo: $y_i = f(x, \beta) + \varepsilon_i$ donde x, β representan el vector de variables explicativas y el vector de parámetros respectivamente. La variable ε_i se le imponen como condiciones que su media sea cero, varianza finita generalmente desconocida pero que puede ser estimada, y no correlacionada entre sí.

Bajo los supuestos anteriores el mecanismo para estimar los parámetros del modelo consiste en tener una muestra $\{(x_i, y_i) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ y tener una medida para medir el ajuste de la función a los datos o muestra. El criterio utilizado en este caso se denomina mínimos cuadrados y se busca minimizar el error cuadrático medio, esto es: $\min Q = \sum \varepsilon_i^2$. El resultado obtenido se denomina ecuaciones normales y siempre consiste en un sistema de ecuaciones lineales en los parámetros. La minimización se logra mediante el gradiente con respecto a los parámetros: $\frac{\partial Q}{\partial \beta_i} = 0$.
(2.2) (Mendenhall, 2002).

Obsérvese que en este modelo $E(Y)$ es una función lineal de x , así como también de β_0 y β_1 por lo que afirmamos que tenemos un modelo estadístico lineal de Y en función de los parámetros desconocidos β_0 y β_1 y no necesariamente una función

lineal de x , por tanto, $Y = \beta_0 + \beta_1(\ln x) + \varepsilon$ es un modelo lineal ya que $\ln x$ es una constante conocida (Mendenhall, 2002).

Un procedimiento para estimar parámetros de un modelo lineal es el método de mínimos cuadrados ajustando una recta a un conjunto de datos, considerando que las desviaciones entre los valores observados y los estimados sean pequeñas (Mendenhall, 2002). Una ventaja de los mínimos cuadrados iterativo es que es simple de explicar a los estadísticos y puede ser fácilmente aplicado por ellos (Hahn et al, 1981)

Cuando se cumplen los supuestos respecto a los errores aleatorios ε [normalidad, independencia, $V(\varepsilon) = \sigma^2$ para todos los valores de x_1, x_2, \dots, x_k], se puede demostrar que el procedimiento de mínimos cuadrados da como resultado los mejores estimadores lineales insesgados para $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$. Es decir, si estimamos los parámetros $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$, mediante funciones lineales y_1, y_2, \dots, y_k , los estimadores de mínimos cuadrados tienen una varianza mínima. Otros estimadores de mínimos cuadrados pueden tener una varianza menor que la de los estimadores de mínimos cuadrados, pero si existen tales estimadores no se les conoce en este momento. Por lo tanto, utilizar el método de mínimos cuadrados es de fácil aplicación con propiedades útiles en muchas situaciones para investigar la relación entre una respuesta y un conjunto de variables independientes. Una vez estimado el modelo entonces puede estimarse la varianza residual mediante $\sigma_i^2 = \sum_i^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - k)$ (2.3) donde k representa la cantidad de parámetros estimados. La varianza residual permite elegir entre modelos que mejor expliquen el ajuste a la información (Mendenhall, 2002).

2.7 Pruebas de hipótesis para varianzas

Una prueba de hipótesis es una comparación de un parámetro contra cierto valor, con el propósito de determinar la certeza de una hipótesis semejante es verdadera

(Navidi, 2006). El procedimiento formal para realizar pruebas de hipótesis se asemeja al método científico, en donde se inicia con la observación, se formula una teoría para después confrontarla con lo observado proponiendo una hipótesis con respecto a uno o más parámetros, en la cual afirma que los valores específicos son iguales. En seguida compara y si esta con concuerda con ellas, la rechaza, de lo contrario concluye que la hipótesis no puede ser rechazada con la información con la que se cuenta (Mendenhall, 2002).

En el caso de una prueba para la varianza su estructura es la siguiente:

$$H_0: \rho^2 = \rho_0^2$$

$$H_1: \begin{cases} \rho^2 < \rho_0^2 \\ \rho^2 \neq \rho_0^2 \\ \rho^2 > \rho_0^2 \end{cases}$$

Para el rechazo de la hipótesis nula se requiere que el estadístico asociado a esta prueba $X_c^2 = (n - 1)s^2/\sigma_0^2$ (2.4) se compare con el valor de tablas correspondiente X_{α}^2 para un error máximo α y varianza muestral s^2 observada.

2.8 Software de apoyo: Matlab

El éxito de la aplicación del MCC depende un poco del tipo de la industria y la complejidad de los sistemas analizados, así como los recursos asignados al proyecto, por ejemplo, recursos externos, como consultores y software diseñado para ello (Selvik and Aven, 2010).

Matlab representa un software de apoyo para la solución de problemas de ingeniería y varios autores han realizado investigaciones con esta herramienta. Chen et al, (20) resolvieron numéricamente un sistema de ecuaciones matemáticas de MATLAB para estimar el cambio de la eficiencia del sistema de generadores de alta eficiencia. Un análisis de fiabilidad de nuevos diseños para la seguridad en automóviles, fue desarrollado por Matlab para la descripción de las tasas de transición entre los

estados del sistema con un fracaso y los estados del sistema con dos fracasos (Dominguez-Garcia et al, 2005).

Matlab es un entorno de computación técnica que posibilita la ejecución del cálculo numérico y simbólico de forma rápida y precisa, acompañado de características graficas y de visualización avanzadas aptas para el trabajo científico y la ingeniería implementando más de 500 funciones para el trabajo en distintos campos (Pérez, 2002).

La habilidad para utilizar Matlab se ha convertido en un requisito para muchos campos de la ingeniería y ciencias. Para su uso es importante tener un enfoque consistente en resolver problemas técnicos, como se plantea a continuación (Moore, 2007).

- Plantear el problema
- Describir los valores de entrada (conocidos) y las salidas (incógnitas) que se requieren
- Desarrollar un algoritmo para resolver el problema mediante la identificación de ecuaciones que relacionen los valores conocidos con las incógnitas.
- Resolver el problema con ayuda de las herramientas que ofrece Matlab
- Y por último, probar la solución.

Áreas como la estadística, algebra lineal, análisis matemático, bases de datos y geométrica se encuentran en el modulo básico de Matlab y en sus toolboxes adicionales (Pérez, 2002).