



Optimización del mantenimiento preventivo, utilizando las técnicas de diagnóstico integral. Resultados finales y evaluación económica

Pedro L. Hernández
Juan Montes de Oca
Sergio J. Fernández

Miguel Carro
Luis García

Recibido: Enero del 2008
Aprobado: Marzo del 2008

Resumen / Abstract

En este trabajo se obtienen los resultados finales y la evaluación económica de la aplicación de la metodología que aporta el diagnóstico integral (DI), presentada por los autores en los artículos anteriores, con la finalidad de introducir el mantenimiento basado en la condición (MBC) como una forma de mejoramiento o perfeccionamiento del mantenimiento preventivo planificado (MPP) que se desarrolla en las centrales termoeléctricas (CCTT) cubanas. Palabras clave: Matriz de fallas, matriz de parámetros óptimos, variables de estado de diagnóstico, matriz de mantenimiento y diagnóstico, período de muestreo, turbina y generador de vapor

In this paper, the authors obtained the final results and the economic evaluation of the application methodology that contributes the integral diagnosis (ID), presented by they in a previous articles, with the purpose of introducing the condition based maintenance (CBM) like a form of improvement the Planned Preventive Maintenance (PPM) that is developed in the Cuban thermoelectric power stations.

Key words: Matrix of failures, matrix of optimum parameters, variables of diagnosis state, matrix of maintenance and diagnosis, period of sampling, turbine and generator of steam

INTRODUCCIÓN

Con este artículo culmina el trabajo desarrollado por los autores en los dos anteriores:¹ Aquí se presenta la matriz de mantenimiento y diagnóstico (MMD) la cual encierra el resultado de la aplicación de toda la metodología seguida por ellos. Se recogen todos los métodos de diagnóstico y mantenimiento a utilizar en los activos principales de una empresa, además de los períodos de muestreo de cada una de las pruebas recomendadas.

De igual forma se proponen ideas generales de los elementos básicos que deben contener las bases de datos que respaldan este tipo de acción y de su papel en el mantenimiento.

El artículo finaliza con el planteamiento de algunos criterios sobre la evaluación económica a partir de una "política de marcas" (Benchmarking)²⁻⁷ que debido a la "censura" de los datos se realiza solo a manera de ejemplo.

A continuación se desarrollan los pasos a tener en cuenta para el diseño de la MMD.

Se debe destacar que aunque los resultados presentados responden a casos reales, en que el grupo de autores se ha visto involucrado en alguna CTE cubana, los datos de fallas se han tomado de forma tal que contengan algunos elementos y resultados interesantes de estudio y no respondan a las características reales de una en particular.

ELABORACIÓN DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO

En el MBC la evaluación del estado del equipamiento se efectúa mediante la medición, seguimiento o monitoreo de las variables o parámetros de estado de diagnóstico.⁷⁻¹⁴

El diagnóstico de estas variables se realiza a partir de su monitoreo y dependerá de la importancia en cuanto al costo del equipo, a la indisponibilidad que el mismo representa y a su impacto en la seguridad y el medio ambiente.

Aunque el diagnóstico moderno (diagnóstico integral o MBC) tiene muchas clasificaciones, en general, el diagnóstico desde el punto de vista estratégico y del equipamiento que lo respalda se puede dividir en:⁷

• **Subjetivo:** Se realiza a partir de las experiencias del personal que atiende y explota los equipos.

-**Características:** Se realiza con pocos o sin ningún equipamiento, y con personal altamente familiarizado con los síntomas que conllevan un trabajo "normal" del equipamiento.

-**Aplicación:** A todos los equipos de las empresas.

-**Participa:** Todo el personal calificado o no de la empresa (MBC, MPT).

-**Costo:** En general solo depende de la autoestima y de la estimulación a todos los trabajadores de la empresa.

• **Objetivo:** Se realiza a partir de la utilización de un equipamiento acorde con la importancia de los equipos que se diagnostican.

-**Características:** Puede ser diagnosticado por métodos off-line, on-line y tiempo real (o combinación de ambos).

-**Aplicación:** A "no" todos los equipos de la empresa.

Participa: Personal mediana y altamente calificado, propio de la empresa o no (tercerización) y de alta formación cultural, técnica y profesional.

-**Costo:** Va desde un costo muy bajo hasta elevado pero siempre en una proporción ínfima con respecto al equipo que se resguarda.

Teniendo en cuenta esta definición general se puede decir que la selección de un tipo u otro dependerá en lo fundamental de la prioridad del equipo o sistema a diagnosticar y del tipo de falla que se quiera detectar; para confeccionar un sistema de diagnóstico se debe tener en cuenta, entre otros:

- Importancia y costo del equipo.
- El tiempo medio y mínimo entre las fallas.
- El sistema de pruebas a que va a ser sometido.
- El período de muestreo necesario.
- Grado de exactitud y precisión a alcanzar.⁷
- Período de umbral de la aparición de las fallas.^{8,10}
- Variables de estado de diagnóstico que se necesitan medir y límites de estas.^{7,8}
- Tipo de diagnóstico: Off-line, on-line y tiempo real o combinaciones de ambos.
- Período de muestreo de cada una de las pruebas que conforman el sistema.⁹
- Formación del personal que realiza las pruebas y el diagnóstico.
- Bases de datos asociadas al seguimiento del comportamiento del equipo.
- Base documental actualizada y equipos, y transductores certificados.
- Que el costo del sistema de diagnóstico se encuentre entre límites aceptables.

Ahora bien, la selección del sistema de diagnóstico a utilizar dependerá en gran medida del período de muestreo necesario para poder detectar las fallas más típicas.⁷⁻⁹ A continuación se desarrollan algunos de los métodos mas usados de selección de los períodos de muestreo.

DETERMINACIÓN DEL PERÍODO DE MUESTREO

Una vez determinado el sistema de diagnóstico a introducir se necesita conocer el período de muestreo del sistema de pruebas que lo regirá.^{1,7,9,15-32} Este no es un tema sencillo de tratar y mucho menos de resolver, ya que en el mismo están imbuidos un sinnúmero de factores que harían imposible el enunciado en este trabajo. En la actualidad existen varios métodos para encontrar el período de muestreo o frecuencia de muestreo de un sistema de diagnóstico. Estos van desde la simple división del TMEF por un número determinado hasta el análisis del tiempo mínimo entre las fallas pesándolas con elementos de riesgo.⁹ Es conveniente señalar que cualquier método que se tome, aún el menos riguroso, implica un compromiso indirecto (metas) a alcanzar y por tanto implica una introducción en la "política de las marcas o el Benchmarking.

Resulta importante resaltar que el tema de la determinación del período de muestreo ha tomado en los últimos quince años un peso de increíble valor, ya

que el mismo está ligado al desarrollo de los equipos detectivos y de protección (mantenimiento detectivo) automáticos y semiautomáticos, en el cual el hombre es el que fija los umbrales de disparo y alarma. Estos dispositivos, que algunos piensan tenderán en un futuro a desplazar a los métodos de diagnóstico off-line y on-line, constituyen verdaderos ejemplos de diagnóstico en línea como en el caso de los grandes transformadores, las turbinas de vapor, etcétera.⁷

La determinación del intervalo de búsqueda de falla o el periodo de muestreo que se realiza en este trabajo sobre la base de la disponibilidad y la confiabilidad, es un ejemplo correcto de lo mucho que se puede hacer en aras de mejorar el sistema de diagnóstico y mantenimiento en una empresa cualquiera y en especial en una CTE cubana. Este puede servir de ejemplo para su generalización.^{1, 7, 9, 15 - 32}

Para la determinación de estos períodos deben tenerse en cuenta, entre otros los siguientes factores:

1. El peso de la falla y la periodicidad de la misma.
2. Análisis del intervalo P-F. En la referencia 29 puede el lector encontrar un análisis detallado de la aplicación del mismo, por lo cual se recomienda su consulta.

3. Establecer el nivel de riesgo del fallo múltiple que está dispuesto a tolerar.
4. Determinar la probabilidad de fallo del equipo o sistema durante el periodo en cuestión.
5. Determinar qué disponibilidad debe alcanzar la falla oculta para reducir la posibilidad de fallo múltiple.
6. Determinar el costo de la detección de las fallas, ya que aumentar el período de muestreo implica incrementar el costo del mismo.
7. Tener establecido un programa de análisis modal de fallos y efecto (AMFE) que permita obtener un análisis continuo de las fallas y las consecuencias de las mismas.^{7 - 22 - 27}

El análisis del desarrollo del período de falla o intervalo P-F (figura 1), que no es más que el intervalo de tiempo que existe entre el punto donde se comprueba que el equipo está fallando (falla potencial) y el punto donde falla (falla funcional) debe ser conocido y tenido en cuenta a la hora de fijar el intervalo de pruebas, el cual debe ser menor que el P-F para poder detectar la falla potencial antes de que ocurra la funcional.

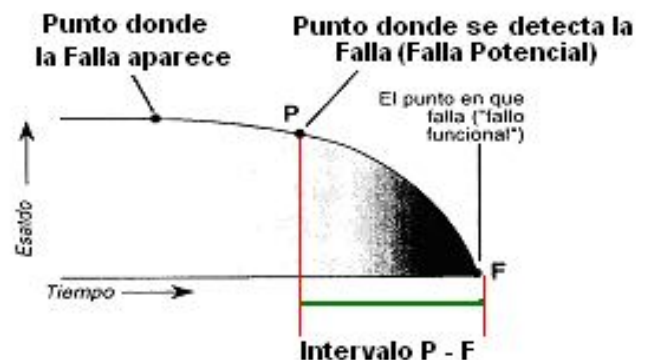
De igual forma, el AMFE permite identificar los elementos variables significativos del proceso/ producto para poder determinar y establecer las acciones correctoras necesarias para la prevención de la falla, o la detección del mismo si este se produce, evitando que productos defectuosos o inadecuados lleguen al cliente. Este es un método de análisis sistemático dirigido a asegurar la calidad, el

cual contribuye a identificar y prevenir los modos de fallo de las fallas,^{1, 7, 22-27} tanto de un producto como de un proceso, evaluando su gravedad, ocurrencia y detección, mediante la prioridad de riesgo, que permite priorizar las causas, sobre las que hay que actuar para evitar las fallas.

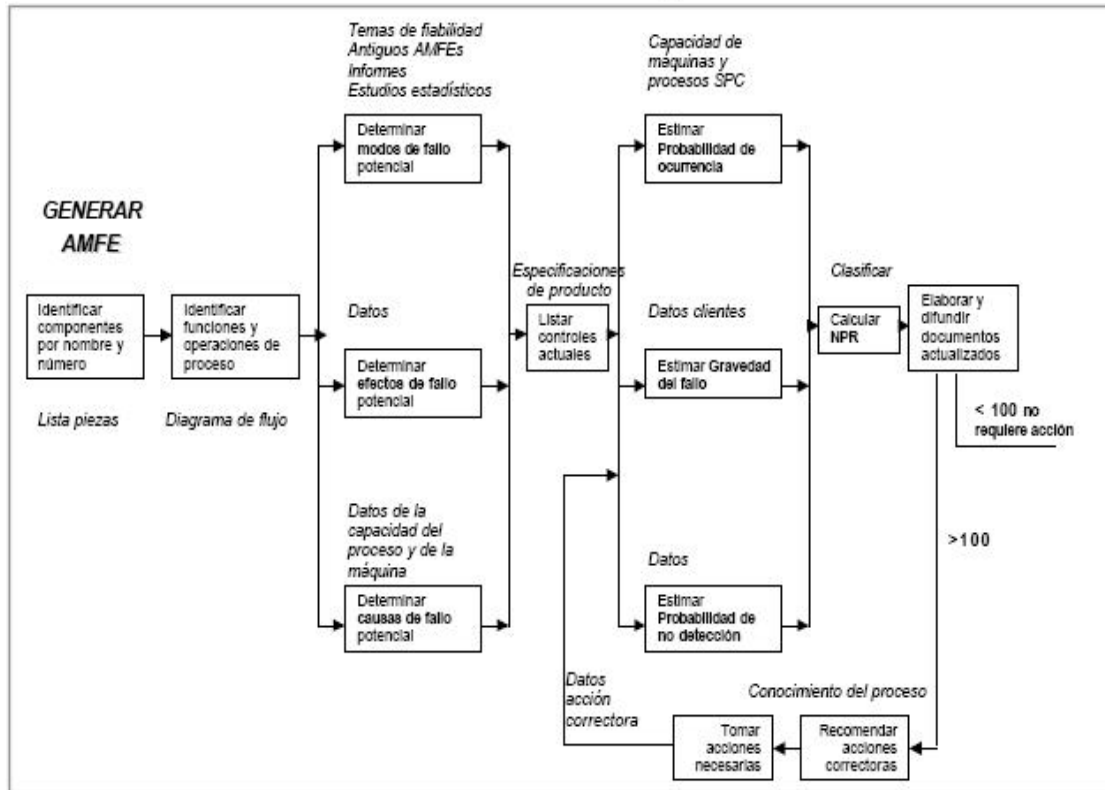
Por la corta extensión de este artículo, y debido a la importancia que le atribuyen los autores a este tema, se introduce en la figura 2, de forma exacta lo que aparece en la bibliografía 22, y que da una idea precisa de lo complejo del análisis de AMFE sin el cual se hace imposible la detección rigurosa de los períodos de muestreo.

Una vez desarrollados todos los pasos anteriores se pueden aplicar una serie de métodos para la obtención de los períodos de muestreo, de los cuales se relacionarán dos, ya que los autores presentarán un próximo artículo sobre los métodos de obtención de los mismos:

- Un método bastante simple, es dividir el TMEF por 10,²⁸ en este caso se parte de considerar que lo más importante es el tiempo medio entre fallas y buscar un tiempo probable de la aparición de estas. En este caso no hay una relación directa "visible" aparentemente con otros indicadores como son la disponibilidad, confiabilidad, etc. De igual forma no está contemplado en él las características de las fallas en cuanto a velocidad de desarrollo, peso de la misma, etc. Aunque simple, este método conlleva un análisis anterior que coincide con el estimado del 10 % de la disponibilidad del método que se presenta a continuación.
- Existe un segundo método que plantea una relación entre el TMEF²⁹ y la disponibilidad de una empresa. Este es un poco más complejo ya que relaciona de forma indirecta el costo del muestreo al tomar una relación en la cual el período de muestreo disminuye a partir del aumento de disponibilidad que se quiera alcanzar.



Evolución de la falla funcional en el tiempo.



Metodología para la implantación del AMFE.

2

A continuación se pasará a brindar un simple ejemplo del mismo.

Partiendo de la posibilidad de los fallos de un equipo o sistema y de los datos registrados del TMEF, se puede encontrar la relación existente entre la disponibilidad que se debe lograr para reducir la posibilidad de fallo (tabla 1). En la figura se toman en cuenta tres niveles de aceptación de la disponibilidad, pudiéndose utilizar cualquiera de los tres como una meta (Benchmarking) tendiente a la mejora de la disponibilidad de la CTE.

Como puede observarse, se puede seleccionar el intervalo de búsqueda de fallo que corresponda al nivel de disponibilidad deseado. En la tabla 2 se exponen los resultados del TMEF calculados a partir de análisis de fallas para una turbina de vapor y uno de sus agregados seleccionados.¹

En las tablas 1 y 2 se observa que a medida que se requiere de una mayor disponibilidad, el período de muestreo disminuye, lo cual incrementa el costo del mismo.

Nuevamente se evidencia la necesidad del establecimiento en la CTE de registros confiables, ya que su ausencia o falta de calidad limitaría la rigurosidad de este análisis. En los casos donde existan problemas con los datos para el análisis de activos, suele examinarse el estado general de los activos protegidos en el contexto operacional y seleccionar una disponibilidad apropiada para los equipos y sistemas que se quieren proteger, siendo la tendencia más generalizada la aceptación de la disponibilidad del 95% (TMEF/10). Como puede verse este es el criterio expuesto en la referencia 28.

Una vez tenido en cuenta el equipamiento que intervendrá en el sistema de mantenimiento propuesto y de conocer el período de muestreo de cada una de las pruebas a realizar se puede pasar al diseño y desarrollo de la matriz de mantenimiento y diagnóstico. Independientemente del nombre que se le dé a la misma, ella es el resultado final del análisis anteriormente realizado y contiene el tipo de mantenimiento y diagnóstico que debe ser impuesto a cada activo que se quiera proteger, además del período de muestreo de las pruebas a realizar en los mismos.

Tabla 1
Determinación del período de muestreo mediante la relación disponibilidad y TMEF

Aceptación	Bueno			Admisible			No admisible			
Disponibilidad (%)	99,5	97,5	95	93	91	89	87	85	83	81
TMEF (%)	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45

Tabla 2
Resultados del cálculo de período de muestreo

Activos	TMEF (días)		Disp. a Alcanzar		
			99,5	97,5 %	95 %
Turbina	140,4	Periodo de muestreo	1,4	7,02	14,04
APA	173,91		1,73	8,69	17,39

- Aplicar el indicador costo/beneficio para cada medición y ver si es factible o no su introducción.
- Realimentar la matriz de parámetros óptimos y verificar si en la misma se sigue cumpliendo el indicador factor de cubrimiento.
- Definir los períodos de muestreo de cada medición.

CLASIFICACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN

A continuación se presenta una clasificación analizada en reuniones de expertos.

Instrumentación para la clase I¹⁵

Características: Alta capacidad de diagnóstico, trabajo on-line y tiempo real fundamentalmente, alta sensibilidad, exactitud y precisión, alta capacidad de tratamiento y procesamiento de datos, necesita una alta calificación del personal.

Instrumentación para la clase II

Características: Media capacidad de diagnóstico, trabajo on-line fundamentalmente, alta sensibilidad, exactitud y precisión, media capacidad de tratamiento y procesamiento de datos, autónomos o semiautónomos, necesita una alta y media calificación del personal.

Instrumentación para la clase III

Características: Baja y media capacidad de diagnóstico, trabajo off-line fundamentalmente, baja y media sensibilidad, exactitud y precisión, media capacidad de tratamiento y procesamiento de datos, autónomos o semiautónomos, necesita una alta y media calificación del personal.

Instrumentación autónoma⁷

Está conformada por transductores autónomos o como parte de un sistema más completo de procesamiento y análisis de los datos que los mismos colectan, en general son de tiempo real. Pueden tener cualquier tipo de sensibilidad, exactitud y precisión y su fundamental característica es que pueden emitir alarmas, interrumpir circuitos, sistemas o procesos (protecciones) o servir como colectores de datos de sistemas más complejos. Este tipo de equipamiento ha dado lugar al mantenimiento detectivo (MD) el cual toma cada día más fuerzas.

MATRIZ DE MANTENIMIENTO Y DIAGNÓSTICO

En los epígrafes anteriores se desarrollaron detalladamente los elementos a tener en cuenta para la confección de la matriz de mantenimiento y diagnóstico, la cual se presenta a continuación en la tabla 3. En esta se mantiene el período de muestreo actual en la CTE, debido a que el desarrollado en este trabajo se realiza a partir de indicadores estadísticos (TMEF) obtenidos por los datos históricos, que no son enteramente confiables (datos "censurados"), como ya se ha expuesto.

En la tabla 4 se pueden observar los parámetros a monitorear en una turbina de vapor y sus agregados. La misma se presenta de forma sintética.

ANÁLISIS DE EQUIPAMIENTO

A continuación se relacionan algunos de los elementos básicos³⁰⁻³² a tener en cuenta a la hora de seleccionar la instrumentación, estos son:

- Definir los objetivos a alcanzar en la matriz de mantenimiento y diagnóstico.
- Caracterización del equipamiento y el personal con que cuenta la CTE, en el caso de las CCEE cubanas ya existe un equipamiento básico del cual partir, para cubrir las necesidades posibles con la misma.
- Definir las nuevas necesidades materiales y humanas.
- Clasificación de acuerdo con la importancia de los objetivos a cubrir.

Tabla 3
Subsistemas de la turbina de vapor y agregados, propuesta para la aplicación del MPP combinado con el MBC

No.	Equipo	Subsistema	Categ.	Prop. mto.	Propuesta de diagnóstico			
					On line	Off line	Tiempo real	Frec. Med.
1	Turbina	Principal	A	MPP-MBC	X	X	X	M
2	B. Alimentación	Alimentación	B	MPP-MBC	X	X	X	M
3	B. Condensado IIE	RBP	B	MPP-D	X	X		(2M)
4	B. Condensado IE	RBP	B	MPP		X		-
5	B. Circulación	Circulación	B	MPP-D	X			(3M)
6	Mallas rotatorias	Circulación	B	MPP		X		-
7	Aceite arranque Ppal. CD y CA	Lubricación	B	MPP-D	X	X		(6M)
8	CAP	RAP	B	MPP-D	X	X		(M)
9	CBP	RBP	B	MPP-D	X	X		(M)
10	Girador de turbina	Eq. turb.	B	MPP-D	X	X		(M)
11	B. Circuito interm.	Circ. interm.	B	MPP-D	X	X		(2M)
12	Comp. Aire Interm.	Compresores	B	MPP-D	X	X		(M)
13	B. Aceite S el laje CA y CD	Lubricación	B	MPP-D	X	X		(6M)
14	TK Ppal. Aceite	Lubricación	B	MPP		X		-
15	Excitatrices Aux.	Excitación	B	MPP-D	X	X		(3M)
16	Decreador	RAP	B	MPP-D	X	X		(6M)
17	Condensador	RBP	B	MPP-D	X	X		(M)
18	Eyector Ppal	RBP	C	MPP		X		-
19	Extractor de H ₂	Lubricación	C	MPP-D	X	X		(6M)
20	B. DCBP	RBP	C	MPP-D	X	X		(2M)
21	B. Suav. de cond.	RBP	C	MPP-D	X			(3M)
22	Enf. de aceite	Lubricación	C	MPP		X		-
23	B. Lavado mallas	Circulación	C	MPP		X		-
24	Tk aceite S el laje	Lubricación	C	MPP		X		-

Las figuras 3 y 4 resumen, a manera de ejemplo en vibraciones, la relación instrumentación - diagnóstico, en la cual se presentan la recolección y procesamiento de datos como la piedra angular del tipo de análisis a realizar.

La figura 4 muestra el esquema de conexión de este tipo de instrumentación para el monitoreo de vibraciones.

Como un ejemplo del equipamiento necesario para el cumplimiento de las tareas de diagnóstico mencionadas en las figuras anteriores, en la tabla 5 se expone un equipamiento básico necesario.

ELEMENTOS A TENER EN CUENTA PARA EL DISEÑO DE BASE DE DATOS DINÁMICA
 El papel fundamental de las bases de datos es el de servir de recolectoras de los datos necesarios para el desarrollo y control del diagnóstico, y a su vez servir

de cadena de enlace con los sistemas de mantenimiento, con vistas a lograr un buen funcionamiento. En la actualidad, estas se han desarrollado a partir del avance de la electrónica, la automática y la computación llegando a convertirse en verdaderos sistemas de procesamiento y análisis de los datos y se encuentran clasificadas en off-line y tiempo real teniendo en cuenta a si están recibiendo datos automáticamente o no.

De hecho, no vale de nada que una empresa tenga establecida una cultura de informatización adecuada y posea un sistema informativo, si este no está respaldado por un sistema de base de datos automatizado. Esto haría que el desarrollo del sistema de mantenimiento de la empresa estaría truncado y tendría que someterse a los límites establecidos en esa política.

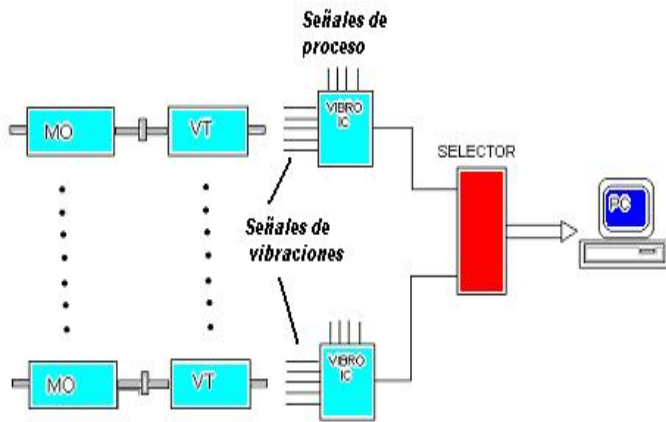


Gráfico de instrumentación vs. diagnóstico (Brüel & Kjær/ Shenck)

3

Tabla 4
Parámetros a controlar para la aplicación de un sistema de mantenimiento combinado MPP y MBC

No.	Equipo	Parámetro a monitorear
1	Turbina	Vibraciones, dilatación, expansión, excentricidad, controlado por el VC-4000 (CM-410), y el VT-60 con ruta predeterminada (base de datos CM-400) La temperatura, presión, diferencias de temperatura, parte superior e inferior del cuerpo de los cilindros, flujo, carga, niveles, controlado por el CITEC (DB-3) Apertura y cierre de las válvulas de admisión, tiempo de puesta en servicio del girador, pruebas de disparo real y ficticia de los pistones de seguridad Controles de alineamiento, cigüeñalidad, centramientos, posición de operación, juegos de vapor, juegos axiales, holguras de chumaceras, simulación de sobrevelocidades eléctricas, disparo por falta de aceite de lubricación y por falta de vacío en el condensador. Control de fluencia, apriete a pernos montados y a desmontados, controles, inspección con líquidos penetrantes. Al igual que los álabes, flexión, erosión, diámetro del muñón, control de agujeros de platos de acoplamientos. Chumaceras, inspección visual y líquidos penetrantes para ver fijación de metal patente y porosidad
2	Bomba de alimentación	Vibraciones controladas por VC-4000 y el VT-60 con ruta predeterminada (CM-410, CM-400) Las temperaturas, presiones, el flujo, la corriente, el voltaje, controlado por el CITEC (DB-3) En inspección se controla el alineamiento, centrado magnético y entrehierro, centramientos, juegos axiales, aprietes, holguras en chumaceras y sellos fijos y móviles, asentamientos en la superficie de trabajos, pruebas de hermeticidad a los cheques y otras válvulas, inspección visual en las chumaceras y por líquidos penetrantes para ver fijación de metal patente y porosidad



Instalación de instrumentos de monitoreo clase II.

4

Tabla 5
Instrumentación necesaria para el trabajo de diagnóstico y mantenimiento

Equipo que se necesita	Especialista que lo debe utilizar (cargo)
Microlog. CMVA-60	Especialista
Parametizador	Especialista
Llevar el CITEC hasta el puesto de ing. adquirir llave	Especialista
Vibro control 5000	Especialista
Medidor de dureza	Especialista
Medidor espesor	Especialista
Equipos de ultrasonido	Especialista
Estiloscopio	Especialista
Marcadores	Especialista
Líquidos penetrantes	Especialista

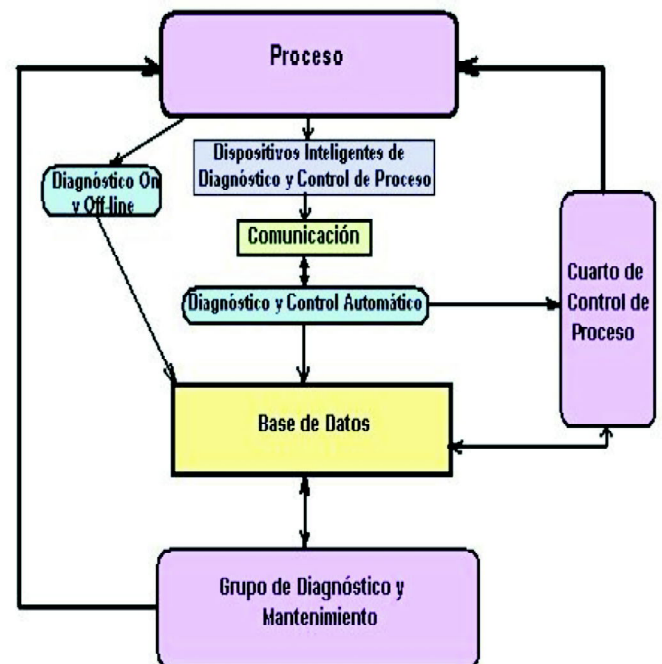
En la figura 5 se expone la estructura básica de un sistema informativo automatizado de una CTE en el cual la base de datos juega un papel preponderante de enlace y control.

FUNCIONES DE LAS BASES DE DATOS

Las funciones de las bases de datos son las siguientes:³⁵⁻³⁸

- Contener las características técnicas de los activos más importantes de una empresa, incluyendo los diagramas.

- Almacenar todos los datos de diagnóstico y control (variables o parámetros de estado de diagnóstico) en todas sus formas de presentación (tiempo real, off-line y on-line), teniendo acceso directo, a todas las pruebas y a las normas y procedimientos que la respaldan (base documental).
 - Almacenar todos los datos de fallas y de pruebas, y permitir la realización de forma automatizada los análisis estadísticos de todas las fallas, clasificándolas de forma conveniente para su posterior análisis.
 - Contener los diagramas de Ishikawa de las fallas y de todas las matrices de falla y de parámetros fundamentales u óptimos de los activos y sus agregados.
 - Contener todos los modos de fallos de las fallas, factor fundamental del análisis de diagnóstico.
 - Almacenar los resultados de análisis, permitiendo conocer en varios niveles de información el estado o condición de los activos de forma simple y precisa.
 - Llevar los archivos históricos de forma dinámica.
 - Almacenar datos de ayuda al nivel operativo y la creación de las base de conocimientos (sistemas expertos).
- Sin las bases de datos sería imposible el control y desarrollo de cualquier tipo de sistema de mantenimiento.



Esquema de un sistema informativo automatizado.^{32,33}

5

ANÁLISIS ECONÓMICO

Optimización de costos

El objetivo del proceso de optimización de los costos del mantenimiento, es determinar los intervalos óptimos de mantenimiento,^{2,5,7,29,34,39} para aumentar la

productividad de los equipos y minimizar el costo total. Ahora bien, el nivel óptimo es el punto en el que los costos totales, que combinan costos directos, tiempo perdido y deterioro excesivo, son mínimos, como se muestra en la figura 6, lo cual se presenta cuando el costo directo se aproxima al costo indirecto.

Numerosos artículos y libros tratan acerca de los métodos de obtención de los costos del mantenimiento con la finalidad de optimizar el MPP, entre ellos se encuentra uno muy importante,³⁹ el cual se recomienda consultar a los lectores.

En el mundo actual los empresarios se cuestionan cada centavo que se necesita invertir en el sistema de mantenimiento y diagnóstico que su empresa aplica, de hecho la introducción del MBC es cuestionada en muchos casos debido a la instrumentación que la misma requiere, de ahí la razón de que no acepten ningún cambio que no esté económicamente justificado. Entre los elementos a tener en cuenta para la realización de una evaluación económica en la introducción del MBC hay ventajas y desventajas.

Ventajas:

- El aumento del TMEF y la disminución del TMPR lo que implica un incremento de la tasa de reparación y con ello el aumento de la disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad de una empresa.
- Disminución de las fallas de todo tipo: Recurrentes, ocultas, etc., y de los efectos de las mismas.
- Mejorar la utilización de equipos, piezas y componentes a partir de una política adecuada de sustitución de los mismos basado en el diagnóstico del estado o condición de los activos (MBC), lo cual se diferencia del MPP.

- Disminución del costo del ciclo de mantenimiento, según algunos autores esta disminución puede llegar hasta un 30 %.

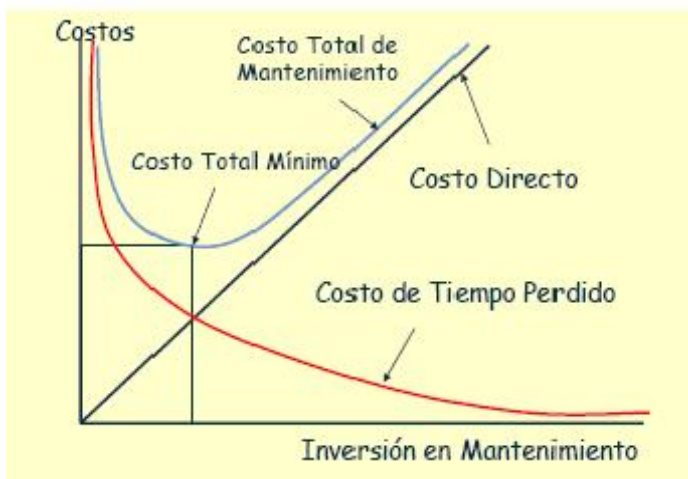
Desventajas:

- Aumento del costo por:
 - Introducción de nuevo equipamiento y formación del personal.
 - Aumentar el período de muestreo de las pruebas.
 - Necesidad de desarrollar e introducción de las bases de datos dinámicas y las modificaciones necesarias a los software de gestión del mantenimiento para lograr sus incorporaciones.

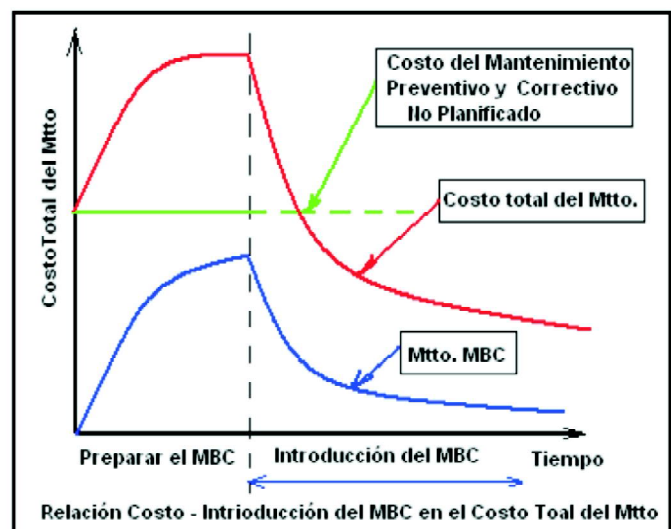
En la figura 7 se presenta la variación de los costos al entrar el MBC en una empresa.⁷

Teniendo en cuenta todo lo anterior, y que los datos con que se cuenta están fuertemente censurados, así como en las CCEE no existe instaurada una política de marcas (Benchmarking) o método de la mejora continua como motor impulsor y controlador del mantenimiento, los autores plantean a manera de ejemplo, las posibles marcas iniciales de las que pudiera partirse para dejar establecida una referencia de las mismas en los próximos cinco años.

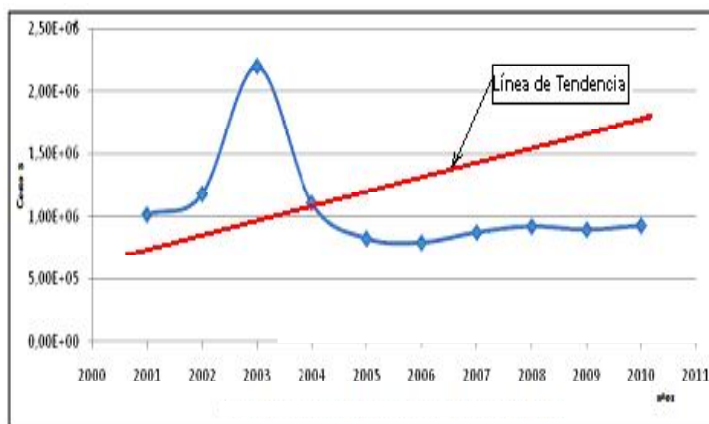
En la figura 8 se muestra el costo de las indisponibilidades producidas en una turbina de vapor durante el periodo 2001-2005 y su tendencia hasta el 2010, así como el análisis de marcas, donde se propone disminuir en un 20 o un 25 % el costo de las indisponibilidades a partir de un 5 % por año desde el 2001 hasta el 2010.^{1,30-32}



Relación del costo - inversión del mantenimiento.



Variación de los costos del mantenimiento al entrar el MBC.



Propuesta de costos del mantenimiento hasta el año 2010.

8

CONCLUSIONES

Aunque no es muy común, los autores han determinado exponer algunas conclusiones de todo el trabajo relacionado con la optimización del mantenimiento preventivo, a partir de la introducción del mantenimiento basado en la condición, en activos fundamentales de una central termoeléctrica, utilizando la metodología que ofrece el diagnóstico integral desarrollado a lo largo de tres artículos, dichas conclusiones son:

- Este trabajo pudiera servir de ejemplo para su futura generalización en todas las CCEE de Cuba, de considerarse útil su aplicación.
- El desarrollo del mismo se ha hecho sobre la base de los datos de fallas y económicos tomados de forma tal que contengan algunos elementos y resultados interesantes de estudio y no respondan a las características reales de una CTE cubana en particular.
- En el trabajo se aplicó la metodología que brinda el diagnóstico integral para la introducción del MBC, la cual se fundamenta en la obtención de la relación fallas - variables de estado de diagnóstico a partir de las matrices de fallas y la de parámetros fundamentales óptimos, haciendo uso de todas las técnicas del MCC II.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la cooperación y la dedicación de cientos de técnicos y expertos de las CCEE y de la Empresa de Mantenimiento a Centrales Termoeléctricas (EMCE) y a la Empresa de Ingeniería y Proyectos de Electricidad (INEL) por la contribución que han hecho a la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

1. Hernández, Pedro y otros: "Optimización del mantenimiento preventivo, utilizando las técnicas de diagnóstico integral. Fundamento teórico-práctico y Resultados parciales teórico-prácticos (Parte I y II), Revista Ingeniería Energética, Vol. XXIX, No. 2, 2008.

2. Carrillo Ramos, Ángel Gabriel: "Materiales de las Conferencias" (folleto), Cipel, Ciudad de La Habana marzo, 2002.

3. Grecik, Juraj y Vaclav Legat: "Audit and Benchmarking-Tools to Develop Maintenance Strategy, University of Zilina, Czech Republic, (Conferencia Publicada en el III Congreso Internacional de Mantenimiento 2006), Ciudad de La Habana, 2006.

4. Aguado Quintero: "Administrar el cambio organizativo. Benchmarking", Conferencia, Ciudad de La Habana, s/f.

5. Folleto digital del Curso de Mantenimiento, CEIM, Ciudad de La Habana, 2000.

6. Kardec, Alan & Nascif: Mantenimiento, función estratégica, Editorial Cubana, Ciudad de La Habana, 2004.

7. Fernández García, Sergio: "Diagnóstico integral", (folleto digital), Texto de la Especialidad de Diagnóstico Integral de Centrales y Subestaciones Eléctricas, Ciudad de La Habana, 1996.

8. —.: "Diagnóstico integral de centrales y subestaciones eléctricas", Texto de la Especialidad de diagnóstico integral de centrales y subestaciones eléctricas, Cipel, Ciudad de La Habana, 1998.

9. García Abreu, Luís: "Diseño de un sistema de diagnóstico integral para instalación motriz de tanque mediano de explotación", Tesis Doctoral, Ciudad de La Habana, 2007.

10. Fernández G., Sergio J.: "Selección de mediciones para el diagnóstico de los grandes transformadores en tiempo real", Taller Latinoamericano de Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico ALTAE'95, Cuba, Nov. 21-23 de 1995.

11. Fernández G., Sergio J. y otros: "Introducción de un SAD como medio de diagnóstico para el mantenimiento y la explotación de centrales eléctricas cubanas y hardware y software para el diagnóstico en tiempo real del transformadores de potencia", METANICA'97, Cuba, 14-18 de julio de 1997.

12. Fernández G., Sergio J. y otros: "Sistema de adquisición de datos y software para el diagnóstico en tiempo real de la subestación tropical y diagnóstico en tiempo real en la CTE Antonio Guiteras de Matanzas", Taller Internacional sobre Diagnóstico en Tiempo Real de Equipos Eléctricos y Procesos DIAGNOS'97, Cuba, 15-17 de abril del 1997.

13. Fernández G., Sergio J.: "Los sistemas de diagnóstico como salvaguarda de la confiabilidad en centrales termoeléctricas, una experiencia cubana a lo largo de un lustro de trabajo", I Bienal Internacional de Confiabilidad y Mantenibilidad, Exposición Industrial, Comisión Federal de Electricidad de México por Conmemoración del 50 Aniversario del LAPEM, junio, 2002.

14. —.: "El diagnóstico moderno como base de la confiabilidad de las centrales y subestaciones eléctricas", 2da. Bienal de Confiabilidad y Mantenibilidad del LAPEM, México D.F., 11-14 de junio del 2004.

15. Pérez, Román: "Instrumentación CTE Antonio Guiteras" (folleto digital), 2004.

16. Moulbray, Jonh M.: "Reliability Centred Maintenance", Conference on Condition Monitoring, Gol, Norway, 2 - 4 Nov., 1987.

17. ———.: "Maintenance Management. A New Paradigm", III Conferencia de la Sociedad de Mantenimiento y Confiabilidad, Chicago, USA, 2 - 4 Oct., 1995.
18. ———.: "Maintenance Management, RCM II Reliability Centred Maintenance", Publis Hed for Butterworth Heinemann, Oxford, UK, 1999.
19. ———.: Mantenimiento centrado en la confiabilidad, 2002. www.pwsrcc.org/docs/d0012800pdf.
20. ———.: Reliability Centred Maintenance. An Introduction, 2000. Enero 2002. <http://www.aladon.co.uk/10intro.html>.
21. ———.: Reliability Centred Maintenance. The Responsible Custodianship of Physical Assets, 1999. Feb. 2002. <http://www.aladon.co.uk/10intro.html>
22. AMFE: Análisis Modal de Fallos y Efectos, Editado por Diputación Foral de Bizkaia, Departamento de Promoción Económica. Librería HOR DAGO.
23. Stamatis, D.H.: "Failure Mode and Effect Analysis, FMEA from Theory to Execution", ASQC Quality Press, Milwaukee, Wisconsin, 1995.
24. "Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). QS 9000 Standard", Reference Manual, Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation, Second Edition, Feb., 1995.
25. Norma IEC 812 "Analysis Techniques for System Reliability. Procedure for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), International Electrotechnical Commission. 1985.
26. "Potential Failure Mode and Effects Analysis", Reference Manual, Ford Motor Company, General Motors Company, 1995.
27. "Fiabilidad y AMFE en ciclo de vida de productos y procesos", LABEIN, 1996.
28. Mourdoch Misa, Francisco: Técnicas de mantenimiento predictivo, Cap II. Ciudad de La Habana, s/f.
29. Cabrera Gómez, Jesús: Plataforma básica para un enfoque del MCC, CEIM, Cujae, Ciudad de La Habana, 2003.
30. Hernández Domínguez, Pedro L.: "Diseño de un sistema de diagnóstico integral para las turbinas de vapor de 100 MW, no. 7 de la CTC Máximo Gómez", Tesis en opción al título de Especialista en CCEE y SSEE, Ciudad de La Habana, 2007.
31. Carro Puig Miguel: "Diseño de un sistema de mantenimiento basado en la condición para la turbina de vapor de la CTE Antonio Guiteras Holmes de 330,5 MW de Matanzas", Tesis en opción al título de Especialista en CCEE y SSEE, 2007.
32. Montes de Oca Iznaga, Juan: "Sistema de mantenimiento basado en la condición aplicado al generador de vapor de la Central Termoeléctrica Antonio Guiteras Holmes", Tesis en opción al título de Especialista en CCEE y SSEE, 2007.
33. Fernández García, Sergio J.: "Organización de bases de datos para el mantenimiento" (folleto digital), CIPEL, Ciudad de La Habana, 2004.

34. ———.: "Estructuración de grupos de mantenimiento y diagnóstico 2 (folleto digital), CIPEL, Ciudad de La Habana, 2004.

35. Fernández García, Sergio y otros: Base de datos en tiempo real, nuevas técnicas para el mantenimiento, Congreso Cubano de Mantenimiento, 27-29 de enero, 1997.

36. Fernández García, Sergio y otros: Base de datos de transformadores BDTransf., Revista Ingeniería Energética, Vol. XXIV, No. 3, Ciudad de La Habana, 2003.

37. Fernández García, Sergio y otros: "Base de datos de transformadores Bdtransf", Memorias del Congreso Latinoamericano de Alta Tensión ALTAE 2003, julio, Costa Rica, 2003.

38. Fernández García, Sergio y otros: "Base de datos dinámica para el diagnóstico de fallas en transformadores de potencia", Congreso de la Asociación Venezolana para el Avance de la Ciencia ASOvac 2003. 20-24 de noviembre, 2003.

39. García Palencia Oliverio y Héctor Álvaro González: "Modelo mixto de confiabilidad basado en estadística para la optimización del mantenimiento industrial", Movimientos conjuntos TPM, RCM y PMO, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y Universidad Tecnológica de Pereira, s/f.

AUTORES

Pedro L. Hernández Domínguez

Ingeniero Mecánico, Especialista en Diagnóstico Integral, Central Termoeléctrica de Mariel, Máximo Gómez, Mariel, Cuba, 2007.
e-mail: pelly@ctemg.une.cu

Miguel Carro Puig

Ingeniero Mecánico, Especialista en Diagnóstico Integral, Central Termoeléctrica de Mariel, Máximo Gómez, Mariel, Cuba.
e-mail: carro@inel.une.cu

Juan Montes de Oca Iznaga

Ingeniero en Energética Nuclear, Especialista en Diagnóstico Integral, Empresa de Ingeniería y Proyectos de Electricidad (INEL), Ciudad de La Habana, Cuba

Luis García Abreu

Ingeniero Mecánico, Instructor, Doctor en Ciencias Técnicas, Escuela Interarmas General Antonio Maceo, La Habana, Cuba
e-mail: cid4@reduim.cu

Sergio J. Fernández García

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Asistente, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana Cuba
e-mail: sfg@electrica.cujae.edu.cu
sergiofernandez@yahoo.com