



Metodología matemática para la predicción de eventos de falla, en empresas dedicadas a la generación de energía eléctrica

Gabriel A. Carrillo

Recibido: Enero del 2008

Aprobado: Marzo del 2008

Resumen / Abstract

Se muestra de forma sencilla y general, cómo es posible llevar a cabo la modelación matemática del comportamiento de los activos físicos de las empresas, dedicadas al negocio de la producción de energía eléctrica. Cuando las empresas han alcanzado un cierto grado de madurez, están en condiciones de aplicar la ingeniería necesaria para cuidar adecuadamente sus activos, y obtener de ellos su mejor rendimiento, en cuanto a vida útil, mejorando así la tasa de rendimiento de la inversión (ROI por sus siglas en inglés). Los ahorros en recursos, que se obtienen con la aplicación de esta herramienta, permiten a las empresas mantener sanas sus finanzas y una tendencia, en cuanto a crecimiento, enmarcadas por la eficiencia.

Palabras clave: Activos físicos, predicción de fallas, modelación matemática del comportamiento, confiabilidad, mantenibilidad, tasa de retorno de la inversión

This paper shows in a simple and general way, like it is possible to take I finish the mathematical modelation of the behavior for assets in a companies dedicated to the electric power generation. When the companies have reached a certain degree of maturity, they are in possibility to applying the necessary engineering to take care the assets appropriately, in this moment are presented the possibility to obtain the best yield, for the useful life. With this, they are in the best rate of the investment, for english initials ROI. The savings in resources that are obtained with the application of this tools, allow to the companies to maintain healthy finances and tendency in a growth, framed by the efficiency.

Key words: Asset management, prediction for failures, mathematics modeling of the behavior, reliability, maintainability, rate of the investment.

INTRODUCCIÓN

El mundo industrial globalizado, reconoce en la actualidad cinco tipos de recursos o activos que dan origen a toda empresa, ellos son: Humanos, financieros, físicos, de información e intangibles.

Se establece, que la permanencia en el mercado y la subsistencia de las empresas, depende, en buena medida, de la eficiente administración que logren los recursos humanos que integran la empresa, en su

interacción con los otros cuatro tipos de recursos o activos.

Este artículo trata de la administración eficiente de uno de los recursos, el activo físico; el cual se define de forma básica, como la planta o edificios, maquinaria, propiedades, como pueden ser, entre otros, los vehículos de todo tipo, los equipos de cómputo, etcétera.

Por otro lado, los ingenieros siempre han pensado en la posibilidad de poder establecer con anticipación las fallas que se presentan en los activos físicos de las empresas.

En la actualidad, es poca la información o los temas que al respecto aparecen en la bibliografía, y los trabajos que se llegan a encontrar, resultan demasiado alejados de la realidad física del comportamiento de los equipos; además, al pretender aplicarlos, las lagunas teóricas y prácticas que existen no permiten llegar al objetivo propuesto, que es sin lugar a dudas, adelantarse a los eventos de falla que muestran todos los sistemas, equipos o productos, a través de su vida útil,

Los conceptos actuales de ingeniería de confiabilidad y mantenibilidad, aunque engloban una serie de parámetros relacionados con la estimación del desempeño o comportamiento operativo de los equipos, y específicamente proporcionan la estimación del término conocido como vida útil, no permiten determinar en el corto plazo, una estimación del pronóstico de eventos de falla que pueda ser considerado confiable, para la toma de decisiones.

En una administración eficiente, los activos físicos se manejan y utilizan términos, como el de mantenimiento predictivo, sin que realmente se defina cómo llevar a cabo la parte de predicción de eventos de falla.

Por años, se ha confundido la parte sintomática con la parte predictiva, que puede mostrar algunas pruebas, como es el caso de las técnicas de termografía, los análisis de aceites y otras, que por sí solas en el momento de su ejecución, muestran solamente un estado operacional transitorio del equipo, que no necesariamente en todos los casos puede considerarse como el inicio de un evento de falla.

No se debe malinterpretar lo anteriormente expuesto, de ninguna forma se está soslayando lo valioso que pueden resultar las técnicas de prueba, como las antes descritas.

Sin embargo, se debe ponderar el verdadero peso específico que tienen cada uno de los elementos de predicción, y desde el punto de vista, del autor de este trabajo, los procedimientos matemático-estadísticos, deben ser en todo momento la ayuda inicial principal, que determine la dirección sobre la que es posible operar satisfactoriamente los activos físicos de las empresas.

Incluso, en la mayoría de las ocasiones, la simulación matemático-estadística, debe considerarse por encima de la propia experiencia personal del observador del

desempeño de los equipos, dado que como se sabe, su experiencia puede tomar algún sesgo que limite su buen juicio, en este sentido.

Para aquellos que siempre quieren anteponer a todo la relación costo-beneficio, con el propósito de incluir el costo del dinero, desde el punto de vista de costo total del activo físico, el análisis matemático-estadístico por ser una simulación, tendrá un costo inicial muy bajo, si se compara con el costo de una prueba física al sistema, equipo o producto en cuestión.

Los resultados, que los usuarios han obtenido hasta el día de hoy, con el direccionamiento que les proporciona la modelación matemática del comportamiento, de los activos físicos, usados en la generación de energía eléctrica, permite establecer, que sin lugar a dudas, este debe ser el primer paso a seguir en la búsqueda de la predicción real de los eventos de falla.

Un hecho importante en la construcción de la metodología, es posicionar a esta herramienta, como el primer paso a seguir en todo programa de operación, de rehabilitación, de mantenimiento, de mantenimiento predictivo o de cualquier otro término relacionado, con el que se desea nombrar a esta parte de la metodología.

El paso siguiente es obvio, la confirmación de la predicción de falla del activo, con alguna de las pruebas físicas como las antes indicadas, termografía, condición de los aceites y lubricantes, análisis dinámico, pruebas de eficiencia, sonometría, vida residual, y otras, según apliquen.

Finalmente, el seguimiento de la problemática analizada permite documentar y validar, si es el caso, la confianza que se ha obtenido de la aplicación de la metodología, y específicamente y con mayor detalle la predicción de la falla, obtenida por los medios matemático-estadísticos, cuyos pormenores no se presentan en este documento.

Como es posible esperar, la aplicación de la metodología propuesta,¹⁻⁴ es la base para obtener una eficiente administración en todos sentidos, de uno de los cinco recursos o activos más importantes que tiene toda empresa, el activo físico.

OBJETIVO

El objetivo de este artículo es resumir la metodología de simulación matemático-estadística diseñada y en uso en el Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales (LAPEM), que permite predecir y conocer el comportamiento operativo de los equipos que integran unidades generadoras de electricidad, de

forma tal, que posibilite la estimación de un pronóstico de eventos de falla, que permita la eficiente administración de los activos físicos de la empresa. Se deben analizar también algunos índices tradicionales, como son: los de disponibilidad, indisponibilidad por falla, decremento y mantenimiento. De igual forma, se debe establecer una correlación entre el comportamiento de los equipos y las horas de operación acumuladas, para obtener una estimación de los parámetros de confiabilidad y de mantenibilidad; índices que son de suma importancia al efectuar la planeación de la operación y el mantenimiento de los equipos que integran unidades generadoras de electricidad.

Luego entonces, utilizando la modelación matemática del comportamiento operativo, diseñada por el Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales (LAPEM), se desarrolla y presenta un pronóstico del comportamiento de los equipos, para el siguiente período anual de operación.

Esta última estimación, permite entre otras cosas, el conocimiento, la medición y el control del proceso de generación de electricidad para cada unidad, lo que hace posible, poder efectuar una adecuada comparación del comportamiento operativo y del desempeño mostrado por los diversos activos físicos de la empresa.

DESARROLLO

Estimadores globales del desempeño¹⁻³

La metodología diseñada por LAPEM, incluye la presentación de los índices generales tradicionales del comportamiento de la unidad generadora, entre ellos, se encuentran los que aparecen en la tabla 1.

Dichos índices, representan un punto de partida para aplicar la metodología de predicción, que debe dar paso a la optimización operativa de los recursos físicos.

Como puede observarse, los indicadores agrupan algunos elementos importantes, tales como las horas de operación acumuladas por las unidades generadoras, la disponibilidad histórica acumulada por las unidades en un cierto período de operación; el total de salidas de la unidad, clasificadas por fallas y decrementos de sus equipos, la indisponibilidad expresada como porcentaje y un elemento nuevo para la administración de la unidad o central, la tasa de falla, que caracteriza el comportamiento de falla de la unidad y sus equipos.

La tabla 1, es una fotografía inicial general, que permite la posible comparación en la operación y el mantenimiento que se ha desarrollado sobre las unidades y sus equipos, entre dos períodos de tiempo diferentes.

METODOLOGÍA

Los valores que aparecen en las gráficas de este artículo, corresponden a la información generada por una unidad, en un periodo simbólico, que se puede fijar, por ejemplo, entre el 2 de enero de 2004 y el 31 de mayo de 2007. A menos que se especifique lo contrario, los valores utilizados en la construcción de las tablas y gráficas, corresponden a los valores promedios estimados en el periodo de referencia.

Con el propósito de mostrar de forma objetiva los resultados de la metodología, la presentación de los mismos se desarrolla a través de tablas y gráficas estadísticas.

En la elaboración de este documento, no se desarrolla, ni muestra la parte matemático-estadística de la metodología.

Tasas de falla vs. disponibilidad, indisponibilidad por falla, indisponibilidad por decremento

La tabla 2, muestra la relación entre los estimadores de comportamiento de fallas y decrementos de la unidad generadora y los índices tradicionales de disponibilidad e indisponibilidad.

Unidad	Fecha de 1ra. sincronización	Horas de operación acumuladas	Disponibilidad promedio (%)	Total de salidas	Total de decrementos	Indisponibilidad por fallas promedio (%)	Tasa de falla promedio
02-01-04 a 12-06	02-01-04	23 777,09	90,39	15	4	0,20	0,000 630
02-01-04 a 5-07		25 206,22	77,65	25	4	0,28	0,000 991

Tabla 2
Índices de mejora-comportamiento 2004-2006. Toma de decisiones 2007

Años Unidad	Tasa de falla		Disponibilidad		Indispon. por falla		Indispon. por decem.	
	2005	2006	2005	2006	2005	2006	2005	2006
7	0,228 7	0,882 8	99,84	77,59	0,11	0,39	0,05	0,00

Nota: La estimación de la tasa de falla del año 2006, incluye hasta el mes de mayo de 2007.

Puede observarse que en función del estimador utilizado, es el grado de certeza que se tendrá para resolver la problemática que presentan los equipos que integran la unidad, durante su operación y mantenimiento. No se debe perder de vista que se trata de uno de los recursos o activos más importantes de toda empresa generadora de electricidad.

Confiabilidad vs tiempo de operación¹

La figura 1, muestra el comportamiento de la confiabilidad de la unidad generadora durante el periodo de operación, correspondiente al año de 2006, y el periodo de operación de 2007.

En general, se observa de un período a otro, una tendencia a la baja en su confiabilidad. Lo anterior, como resultado de la falta de una política formal de mantenimiento. Por lo que, se recomienda, diseñar y aplicar el programa de mantenimiento correspondiente a esta unidad.

Tasa de falla por componente mayor vs. año

La figura 2 muestra el comportamiento de la tasa de falla de los componentes mayores de la unidad generadora, durante los años de operación del 2004 a mayo de 2007.

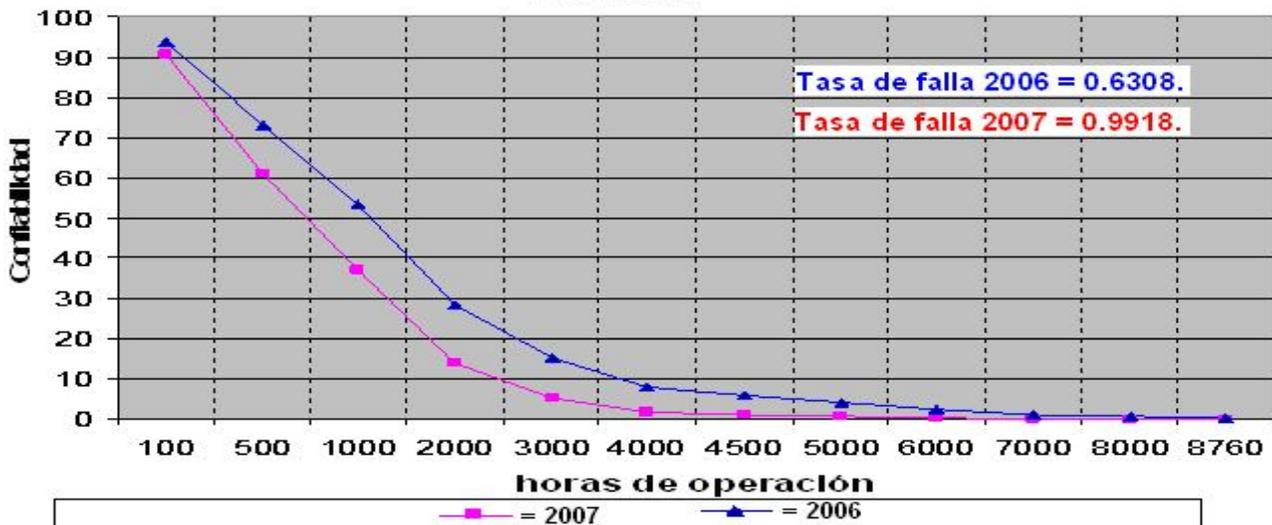
De igual forma, se efectúa la estimación de las tasas de falla anuales, para la unidad completa, lo que permite la obtención del modelo matemático del comportamiento de falla y la estimación de un pronóstico del comportamiento para el siguiente período de operación.

Confiabilidad por componente mayor, comparación entre 2006 y 2007

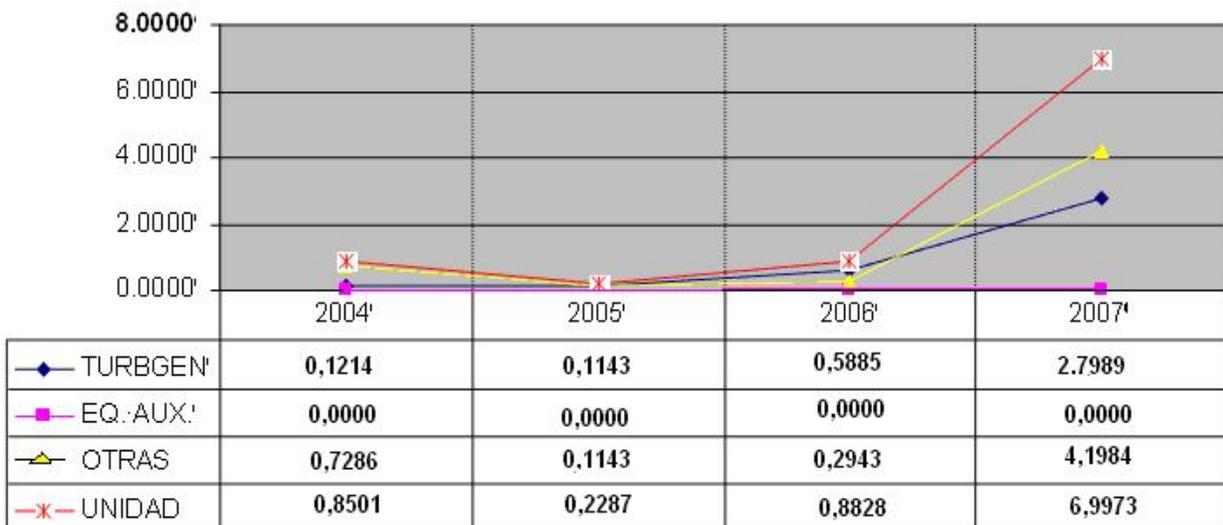
Las gráficas 3 y 4, muestran la confiabilidad de los componentes mayores de las unidades generadoras, y los cambios ocurridos durante los años 2006 y 2007.

La estimación de la confiabilidad para los componentes mayores, permite conocer el comportamiento de falla y la estimación de un pronóstico del tiempo de mantenimiento a una determinada confiabilidad, antes de que se presente una nueva falla.

Confiabilidad Unidad 7.
2006 vs 2007



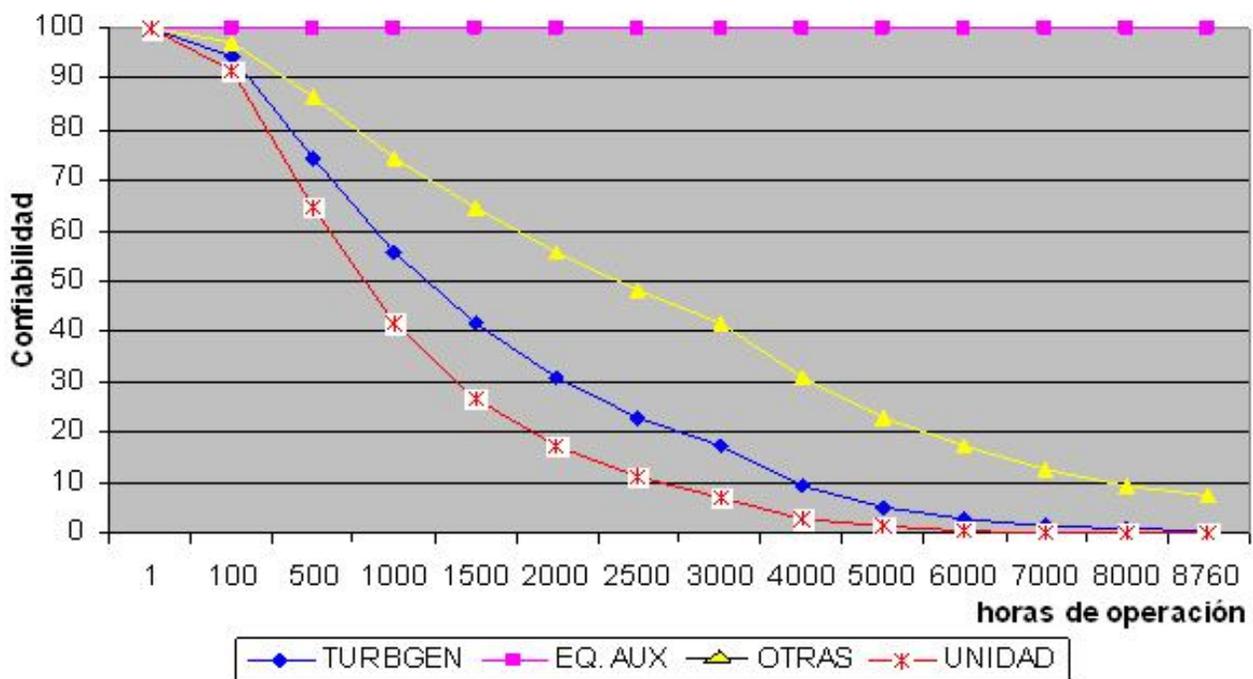
Comportamiento operativo de la unidad, confiabilidad vs tiempo de operación .



Nota: La estimación de la tasa de falla, incluye hasta el mes de mayo de 2007.

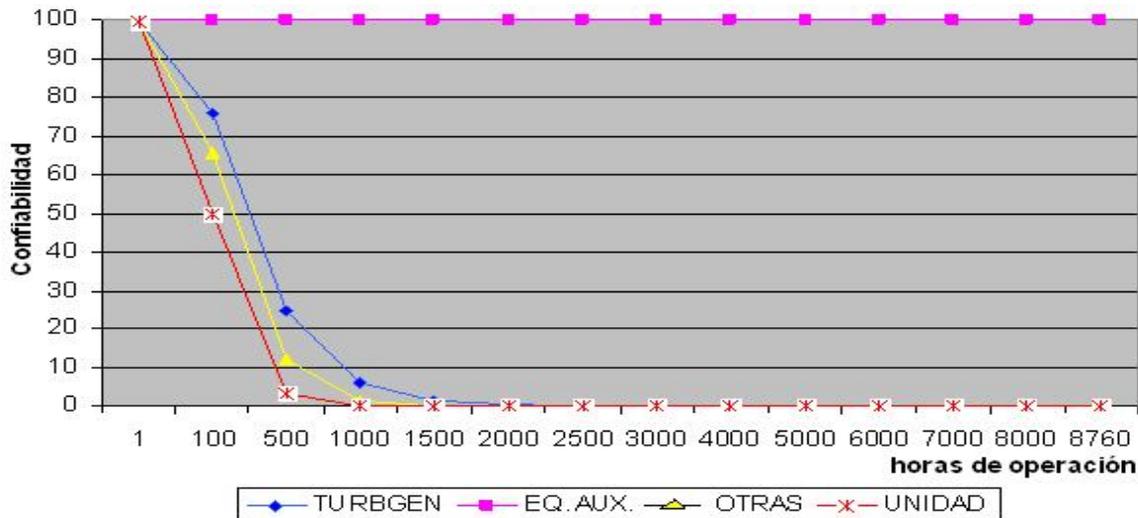
Tasa de falla por componente mayor, Unidad 7.

2



Confiabilidad por componente mayor en 2006, Unidad 7.

3



Confiabilidad por componente mayor en 2007, Unidad 7.

4

Como puede observarse en las gráficas, es posible hacer una comparación año con año, de cómo va cambiando el comportamiento de falla de los equipos, y por medio del análisis de ese comportamiento, es posible medir la efectividad de las actividades de operación y mantenimiento desarrolladas sobre ellos.

Lo anterior permite medir si los resultados deseados se están o no alcanzando, o qué tan rápido los equipos o sus componentes, se están acercando a un nuevo período de mantenimiento y en su caso, al término de su vida útil.

Además, la estimación de la confiabilidad, es un indicador preciso del trabajo desarrollado por el personal que opera las unidades y sus equipos.

Modelación matemática del comportamiento de la unidad generadora

La figura 5, muestra la modelación matemática del comportamiento de la unidad generadora, durante los años de operación del 2004 al 2006.

La modelación permite determinar y conocer los algoritmos matemáticos del comportamiento de falla y decremento, y la posible estimación de un pronóstico del número de eventos de falla y decremento, esperados para el siguiente periodo de operación; estableciéndose asimismo, cuáles son los equipos en los que se pueden presentar nuevos eventos de falla.

En el ámbito de la empresa, la gráfica se conoce con el nombre de gráfica de Carrillo.

La gráfica contiene una serie de elementos, que además de permitir la predicción de eventos de falla y/o decrementos, establece la posibilidad de conocer y medir el desempeño de las unidades generadoras y sus equipos a través de los límites de control.

En este documento, no se presenta el desarrollo matemático-estadístico que permite conocer a detalle la estimación de la predicción de falla en equipos que integran unidades generadoras de electricidad.

Comportamiento de la unidad y las causas que la mantienen fuera de servicio, durante el 2006

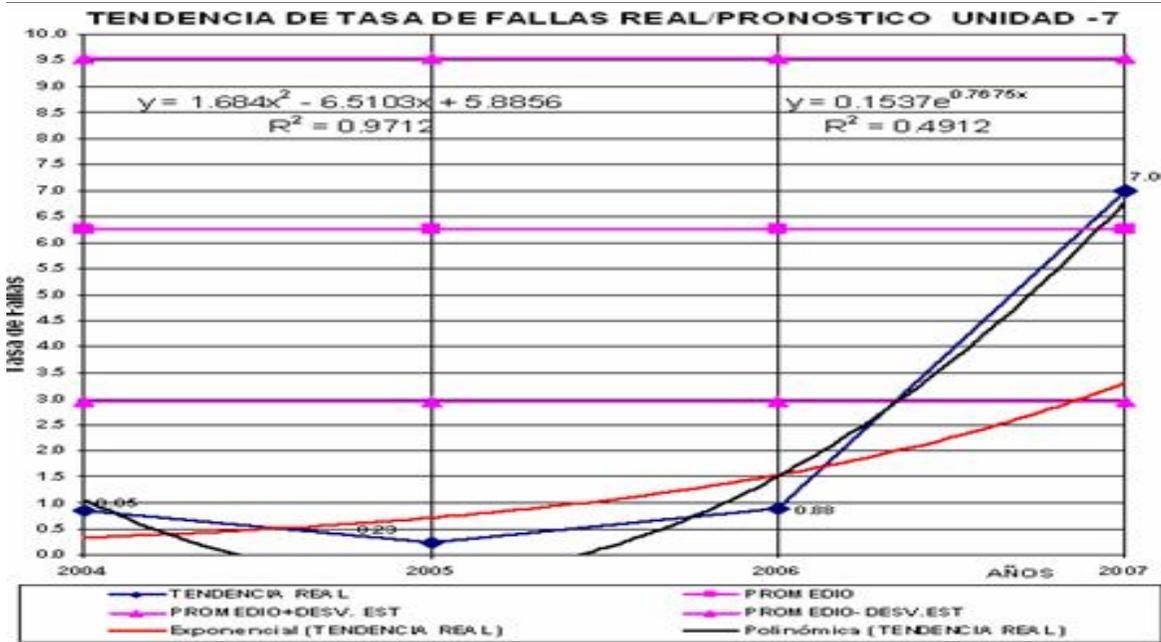
La figura 6 muestra el comportamiento de la unidad y las causas que la mantienen fuera de servicio durante este año.

Lo anterior, tiene relación con las causas tipificadas como: falla, decremento, mantenimiento y causas ajenas. En esta ocasión, se muestra también en la gráfica a la disponibilidad.

La relación que se establece a partir de la gráfica, es en el sentido, de que al no haberse programado tiempo para mantenimiento a la unidad; el número de fallas en los equipos que la integran, mostraron una tendencia a la alza.

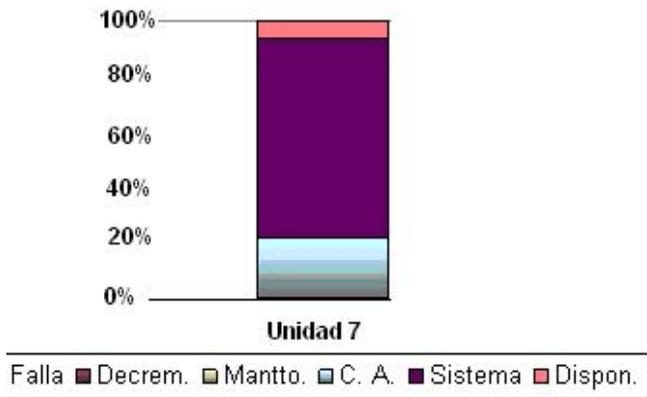
Equipos a seguir en cuanto a comportamiento en 2007

La tabla 3, muestra los equipos que se deben seguir en cuanto a comportamiento, durante el año de 2007. El monitoreo constante del comportamiento operativo de estos equipos y su mantenimiento, ayudarán a evitar que se presenten nuevas fallas en los mismos.



Modelación matemática del comportamiento, Unidad 7.

5



Comportamiento tipificado por causas en 2006.

6

Resumen del pronóstico de comportamiento de la unidad generadora

Las tabla 4, muestra el resumen del pronóstico de comportamiento de fallas y decrementos de la unidad generadora, para los años de operación del 2006 y 2007.

Como ya se estableció con anterioridad, la modelación matemática del comportamiento de falla posibilita la estimación de un pronóstico del número de eventos de falla y decrementos, esperados para el periodo de operación correspondiente a 2007.

Es importante destacar que para esta unidad es la primera vez que se elabora un pronóstico de comportamiento, tanto para eventos de falla como para eventos de decrementos, a presentarse en 2007.

Los números anteriores representan 20 fallas pronosticadas, o sea, casi el doble de las que se han

Tabla 3 Unidad 7 - Equipos a monitorear en 2007
Equipos a monitorear en 2007
Sist. de control analógico-digital de la turbina de gas
Motor bomba de agua de enfriamiento al estator de C.A.
Pilotos de cámara de combustión
Válvulas de sangrado
Compresor de aire
Enfriadores de agua y enfriadores al estator
Dispositivos de control y protección al sistema de gas a turbina

presentado en la unidad; y un evento de decremento pronosticado para 2007.

Debe comentarse que el 2007, ha representado para la Unidad, uno de los peores años, en cuanto al resultado de sus estimadores de confiabilidad.

Con toda seguridad influyeron en estos resultados, la falta de diseño y ejecución de un programa formal de mantenimiento, y la poca experiencia obtenida por el personal de operación y mantenimiento, para este tipo de unidades a lo largo de los tres años de operación.

Tabla 4
Resumen del pronóstico de comportamiento 2006-2007, unidad 7

Unidad	Pronóstico de fallas		Fallas reales a diciembre del:		Pronóstico de decrementos		Decrementos reales a diciembre del:		
	Años Unidad	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007
7		9,7	20,8	6		0,37	1,00	0	

En la medida que se continúe con la actualización de estos diagnósticos de comportamiento, los algoritmos que permiten la estimación del pronóstico, se irán ajustando, de tal forma que el error en la estimación será menor en cada período pronosticado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con la importancia que tiene para el personal que administra la operación y el mantenimiento de la Unidad, se recomienda la actualización de este diagnóstico al finalizar el año 2007. Con lo que será posible determinar una estimación del número de eventos de fallas y decrementos para el año 2008; además de establecer con la debida anticipación, los programas de rehabilitación y mantenimiento de los equipos en los cuales se presentarán los eventos pronosticados.

No hay dudas, de que el 2006 fue un año normal en el comportamiento operativo de la unidad y sus equipos. Se recomienda mejorar los trabajos y tiempos de mantenimiento, con lo que se mejorarán las tendencias mostradas por los indicadores operativos, obtenidos en la unidad.

Los indicadores del desempeño de la unidad durante 2006, muestran los valores siguientes:

- De un total de 365 días posibles de operar, se operaron 22 días (6,06 %), se atribuyeron al sistema 261 días (71,53 %) y no se operó la unidad por falla, decremento, mantenimiento y causas ajenas, un total de 82 días (22,41 %).

- Durante el año de 2006, la unidad, sumó un total de 6 eventos de falla y cero eventos de decrementos. Los estimadores de mantenibilidad, mostraron que la duración promedio de cada una de las fallas fue de 5,73 h y la duración promedio de cada uno de los decrementos, fue de cero horas.

- Se recomienda diseñar y ejecutar a tiempo la planeación del mantenimiento, conservando un

almacén de refacciones y materiales óptimos. Asimismo, se recomienda, capacitar al personal de operación y mantenimiento, para disminuir al mínimo las fallas y las causas que las provocan.

Lo anterior, traerá como consecuencia una disminución en el número de horas dedicadas a la atención de fallas, que de inmediato se reflejarán en los estimadores de mantenibilidad y en un incremento de la disponibilidad de la unidad y sus costos asociados.

- Se puede asegurar, que al diseñar y aplicar una mejora a la planeación de las actividades de operación y mantenimiento, aunado a un manejo más oportuno de piezas y refacciones, traerá como consecuencia un aumento en la confiabilidad y disponibilidad de la unidad generadora.

REFERENCIAS

1. Carrillo Ramos, Gabriel Ángel: "Mathematics Modeling of the Behavior in Operation of Induced Draft Fans for 350-MW Fossil Power Units to Predict its Optimum Maintenance Time", Electric Power System Research Journal, Vol. 70, pp. 109-113, 2004.
2. PAS 55-1 Asset Management, Part 1- Specification for the Optimized Management of Physical Infrastructure Assets, Institute of Asset Management. www.bsiglobal.com/en/shop/publication-detail.2005.
3. PAS 55-2 Asset Management, Part 2- Guidelines for the Application of PAS 55-1, Institute of Asset Management. www.bsi-global.com/en/shop/publication/detail.2005.

AUTOR

Gabriel A. Carrillo Ramos

Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, Doctor en Ciencia y Tecnología, Especialidad de Diseño y Desarrollo de Sistemas Mecánicos, Oficina de Confiabilidad de la Gerencia de LAPEM, México D.F.
e-mail:gcarrillo@cfe.gob.mx