

# Sistema computarizado para el apoyo del mantenimiento predictivo en centrales termoeléctricas de la Comisión Federal de Electricidad

**Sergio Aranda A., Raúl García M., Francisco Poujol G., Carlos Cháirez C. y Nely Domínguez M.**

*En opinión de las industrias más importantes del mundo, la tendencia de ahorro en gastos está orientada hacia un programa de mantenimiento que busca las causas raíz del desgaste y fallas de los equipos.*

Con sistemas como el SIIDMP, se busca una reducción de los costos debido a paradas por averías accidentales de los equipos principales, limitar el deterioro de los equipos, así como proporcionar conocimientos y asistencia a todo el personal que interviene en la gestión de la operación y conservación de las instalaciones de la central.

## Resumen

Se describe la funcionalidad del Sistema Integral de Información para el Diagnóstico del Mantenimiento Predictivo en las centrales termoeléctricas (SIIDMP), cuyo objetivo principal es apoyar al personal relacionado con el mantenimiento y operación de la central termoeléctrica para optimizar la aplicación de las inspecciones, mantenimientos y sus costos asociados. Es importante comentar que en las centrales generadoras de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) se aplican técnicas y metodologías para el mantenimiento preventivo y correctivo, además de que cuentan con equipos electrónicos de operación dedicada para la inspección y control de equipos vibratorios.

La arquitectura del SIIDMP es del tipo cliente-servidor y para su diseño e implantación se empleó Windows NT 4.0 como sistema operativo, SQL Server 7.0 como servidor y administrador de la base de datos, Visual C++ para los programas de extracción de datos, Visual Basic 6.0 para la codificación de los programas de aplicación e Interfaz Hombre-Máquina (IHM), el mecanismo de comunicación Open Data Base Connectivity (ODBC) para establecer la conexión con los diferentes fuentes de datos, así como bibliotecas de símbolos y gráficas que se incluyeron en la interfaz del usuario. El principal objetivo del SIIDMP es atender las necesidades propias sobre optimización, mejoras y ahorros en la operación de las centrales.

## Antecedentes

Para apoyar la operación y mantenimiento de las centrales generadoras de energía eléctrica, la CFE cuenta con varios sistemas de cómputo, entre los que están el Sistema Integral para la Gestión de Mantenimientos y Almacenes (SIGMA), el Sistema de Informes Mensuales de Operación (SIMO) y el Sistema de Control y Optimización del Régimen Térmico (SCORT), que operan independientemente en las centrales donde están instalados. La CFE ha considerado que la información que manejan cada uno de los tres sistemas es la requerida para realizar análisis y diagnósticos para aplicar técnicas y procedimientos de mante-



nimiento predictivo. Además, también en la Oficina de Evaluación de Productos y Equipos del Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales (Lapem) aplican metodologías de selección de equipos y modelado matemático para predecir la confiabilidad del equipo en estudio a partir de su comportamiento histórico.

Considerando lo anterior, la Subdirección de Generación de la CFE solicitó al Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) el desarrollo del Sistema Integral de Información para el Diagnóstico del Mantenimiento Predictivo en las centrales termoeléctricas, que se encarga de realizar la selección y concentración de la información almacenada en la base de datos de los tres sistemas (SIMO, SIGMA y SCORT) que están instalados en la central termoeléctrica Presidente Plutarco Elías Calles; y que incluya la automatización e integración de la metodología aplicada en la Oficina de Evaluación de Productos y Equipos del Lapem. Actualmente, el SIIDMP está instalado en la central termoeléctrica P. P. Elías Calles y se está desarrollando la personalización para instalarlo en la central termoeléctrica Francisco Pérez Ríos de Tula. De igual manera, se tiene proyectado replicarlo en otras centrales termoeléctricas que definirá la CFE.

### **Descripción del SIIDMP**

El SIIDMP es una herramienta computacional que tiene como objetivo principal apoyar al personal relacionado con el mantenimiento y operación de la central para que optimicen la aplicación de las inspecciones, mantenimientos y sus costos asociados, así como hacer más eficiente la operación de los equipos y componentes en vigilancia, aumentando su confiabilidad a través de las herramientas proporcionadas para realizar el análisis y diagnóstico del comportamiento operativo.

El alcance del SIIDMP incluye la extracción de la información del SIGMA, SIMO y SCORT, concentrar toda la información extraída en la base de datos (BDD) propia al SIIDMP para su análisis; mostrar y permitir la selección de los equipos y componentes que fallan más, para que el usuario del sistema efectúe el estudio del comportamiento histórico operativo y realice la predicción de la confiabilidad de un periodo dado. El SIIDMP presenta los resultados del análisis que hizo al equipo por medio de gráficas, listas tabulares, mímicos y reportes para que con la información proporcionada se respalde la toma de decisiones técnicas y administrativas sobre la programación futura de la aplicación (o no aplicación) de mantenimiento a un equipo o componente.



El sistema está diseñado para responder a planteamientos sobre el estado y comportamiento operativo de la central, identificando la unidad generadora que presenta un mayor número de condiciones no aceptables o anormales en los índices principales en vigilancia y en seguimiento y se puede llegar hasta el equipo o conjunto de equipos y sus componentes, donde se concentran las condiciones anormales en un periodo de tiempo específico, siendo el menor periodo de información el de un mes.

Durante el análisis de la información, el SIIDMP muestra las unidades generadoras y todos sus equipos (críticos, principales y auxiliares), en diagramas u ordenados de mayor a menor –en lista tabular-, exhibiéndose en qué equipos o componentes se ha presentado la incidencia de los eventos en análisis. En lo que corresponde a la confiabilidad de los equipos, en el sistema se implantaron las distribuciones de Weibull, Log-Normal, Normal y Exponencial, en donde, empleando el modelado matemático del comportamiento histórico del equipo, se realiza la predicción de su confiabilidad. Es preciso señalar que la técnica que se emplea es la relacionada al Mantenimiento centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en Inglés).

Dentro de lo que corresponde al suplemento de la información de las posibles causas que originaron la ocurrencia de los eventos a un equipo en particular, el SIIDMP cuenta con el historial de mantenimiento aplicado a cualquier equipo. Cada acción de mantenimiento corresponde a una orden de trabajo ejecutada por personal de la central, en cada orden de trabajo se retroalimentan las acciones principales ejecutadas y esta información puede proporcionar datos para determinar una posible causa raíz de la generación de un evento en particular.

El SIIDMP proporciona al final una hoja de resultados con un llenado parcial por el operador, don-



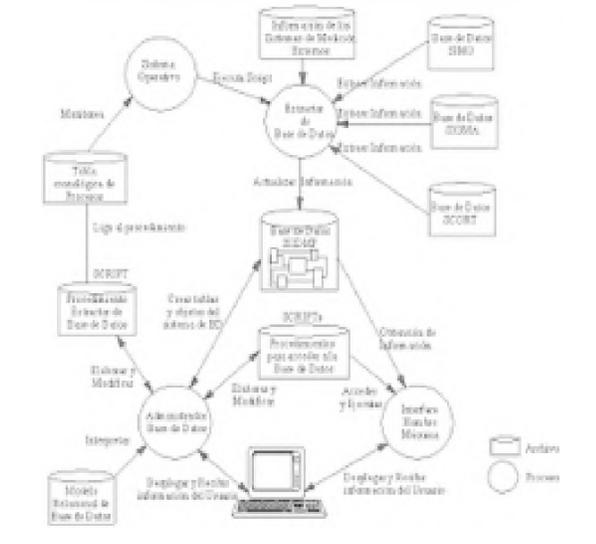
de se define el periodo y el equipo al que se está realizando el estudio; el resultado final se resume a alguna de las siguientes condiciones: a) el equipo puede seguir operando, b) el equipo sigue en operación condicionada, c) cambiar por equipo paralelo y d) paro de emergencia para aplicar mantenimiento.

### Arquitectura

Para realizar sus funciones, el SIIDMP está conformado por la integración de los módulos principales, que se muestran en la Figura 1.

Figura 1

Arquitectura software del SIIDMP.



La arquitectura software del SIIDMP se diseñó modularmente, asignando actividades específicas a cada módulo. Esta concepción permite agrupar, delimitar tareas y validar estados e interfaces entre ellos que conducen hacia una integración rápida y confiable. Desde el punto de vista de mantenimiento de software, permite agregar o eliminar funciones sin afectar al resto de los módulos. Las funciones de los módulos son:

#### Módulo: Sistema Extractor de Datos

Obtiene periódicamente los datos de interés de los sistemas SIGMA, SIMO y SCORT de la central termoeléctrica, los filtra, normaliza y deposita en la base de datos del SIIDMP. El acceso a las BDD de los sistemas de la CFE por los programas del extractor de datos no afectan su integridad, informando al final de cada ciclo de obtención de datos el resultado de la extracción de cada tabla.



#### Módulo: Sistema Administrador de BDD

Proporciona los servicios de acceso a los datos almacenados en la BDD, a los módulos de Ecuaciones de Predicción y a los que están embebidos en la IHM del SIIDMP, manteniendo su integridad e indicando al usuario las operaciones que causan inconsistencia en los datos leídos.

#### Módulo: Ecuaciones de Predicción

Se cuenta con las distribuciones Weibull, LogNormal, Normal y Exponencial. En cada una de ellas se realiza, previamente, la estimación de los parámetros y se selecciona la distribución que tengan los parámetros que modelen mejor los datos del equipo en análisis para que, con los resultados obtenidos, se realice la predicción de la confiabilidad.

#### Módulo: Cálculo de Costo

Las funciones correspondientes a este módulo están dentro de la IHM, a través de ellas se calcula el costo de los recursos humanos y de los materiales empleados en los mantenimientos aplicados en un periodo dado.

#### Módulo: Interfaz Hombre-Máquina (IHM)

Permite mostrar los resultados de los módulos de predicción y cálculo de costos por medio de gráficas y tabulares, y cuenta con herramientas de calidad para mostrar los datos observados por: Análisis de Causa-Efecto, Análisis de Pareto, Gráfica de Barras, Gráficas de Tendencias de 2 y 3 Dimensiones, Diagrama de Dispersión, Histograma de Frecuencias y un infor-

me condensado de resultados donde se deciden las acciones a tomar sobre el equipo en análisis.

La navegación de la IHM en el SIIDMP va de lo general a lo particular, es decir:

Central → Unidad → Equipo → Componente del Equipo.

Además, la navegación de la IHM permite realizar directamente un análisis en particular con la activación de dos o tres botones que llevan a igual número de niveles y detalles de la información de una unidad o equipo.

### Descripción del Sistema Extractor de Datos (SED)

El SED tiene como finalidad obtener los datos de los sistemas ya implantados en la central termoeléctrica a través de protocolos abiertos de base de datos y comunicación en red, filtrarlos, normalizarlos y depositarlos en la BDD del SIIDMP, que comprende de manera general:

- Proceso de descarga de datos local para los sistemas SIMO y SIGMA.
- Transferencia de archivos ASCII planos a la máquina del SIIDMP.
- Proceso de transformación de datos (cuando aplique).
- Inserción de los datos en la BDD del SIIDMP.

Actualmente los sistemas de la CFE en la central termoeléctrica de Petacalco (Presidente Plutarco Elías Calles) se encuentran en distintas plataformas, como se ve en la Tabla 1.

Se cuenta con un proceso de extracción de datos local para los sistemas fuente SIMO y SIGMA

Tabla 1

Plataforma software de los Sistemas SIGMA, SIMO y SCORT en la central termoeléctrica Presidente Plutarco Elías Calles.

Sistema:	SIGMA	SIMO v 4.0	SCORT
Sistema operativo:	SCO UNIX 3.0	MS-DOS	MS-DOS
Manejador de BDD:	Informix 5.0	Informix para DOS	CA-Clipper 5.2

que tiene como salida uno o más archivos ASCII. Los datos depositados en los archivos ASCII son transportados e insertados en una estructura intermedia que soporta acceso ODBC, localizada en el nodo de la red que contenga al SIIDMP. El transporte se hace vía *floppy disk* o mediante *ftp* en los casos que la máquina local esté conectada en red a la máquina del SIIDMP. Una vez depositados los datos se lleva a cabo los procesos de transformación e inserción de datos al SIIDMP, utilizando ODBC. Para el SCORT todo el proceso de extracción, transformación e inserción se hace directamente utilizando ODBC. En la Figura 2 se presenta la arquitectura general del SED con el mecanismo de extracción utilizado.

Para el caso de actualización, cambio de plataforma o cambio en alguna de las bases de datos fuentes de los sistemas involucrados, sólo se requiere que la información obtenida sea consistente con el formato definido para hacer la inserción y transformación de los datos hacia la BDD del SIIDMP.

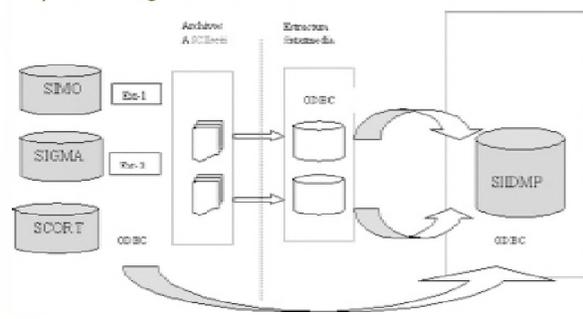
### Procesos de extracción de datos local (SIMO y SIGMA)

Este proceso se lleva a cabo según las características de los sistemas operativos y manejadores de base de datos con que cuenta cada sistema y consta de las siguientes actividades:

- La plataforma sobre la que se ejecuta cada extractor local es la misma en la que residen los datos fuente.
- La ejecución de la extracción se hace en dos formas: una extracción inicial y otra periódica. La extracción inicial permite el llenado de la BDD del SIIDMP. La ejecución de la extracción periódica se hace bajo demanda del usuario y únicamente se descargan las tablas para las que se tenga identificado el criterio de periodicidad.

Figura 2

Arquitectura general del SED.





- Después de que se ha ejecutado la función de extracción en sus formas inicial y periódica, se realiza un procedimiento para enviar los archivos planos generados al nodo donde reside el SIIDMP.

### Procesos de transformación e inserción a la BDD del SIIDMP

Es un proceso que se ejecuta en el servidor del SIIDMP y consiste en leer la información de los archivos ASCII del SIMO y del SIGMA y directamente del SCORT, para después depositarlos en la BDD propia del SIIDMP. Este proceso se encarga de:

- La verificación de la integridad referencial. Valida que todas las llaves foráneas de la tabla de hechos estén siempre ligadas a las llaves primarias de los catálogos.
- La ordenación de los registros. Los registros que no pudieron ser cargados por alguna causa (ejemplo: por violación de la integridad referencial), se concentran en un archivo para su reparación para que sean cargados posteriormente.

### Descripción del Sistema Administrador de la Base de Datos (SABDD)

Una tarea importante dentro de la modelación de las bases de datos consiste en especificar la forma en que se van a distinguir las entidades de las relaciones. Conceptualmente, las entidades y las relaciones son distintas, pero desde el punto de vista de las bases de datos, su diferencia debe expresarse en términos de sus atributos. Para hacer estas distinciones, a cada entidad se le asigna una llave primaria.

La BDD del SIIDMP se diseñó a partir de la información que manejan los tres sistemas institucionales de la CFE: SIMO, SIGMA y SCORT. Para el desarrollo de la BDD del SIIDMP se utilizó información de la central termoeléctrica Presidente Plutarco Elías Calles. La BDD del SIMO contiene información de la operación, como es generación, consumos propios de energía y combustible, eventos de fallas y decrementos de cada una de las unidades de generación de la central.

La BDD del SIGMA contiene información de las actividades de mantenimientos preventivos, correctivos, variables de operación de equipos rotatorios en vigilancia, así como información sobre los mantenimientos mayores. La estructura de esta BDD también incluye información de recursos humanos y materiales utilizados en el mantenimiento.

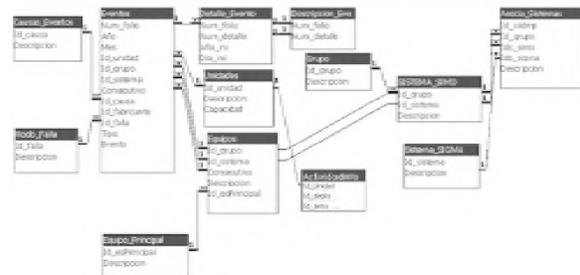
La BDD del SCORT contiene información del régimen térmico y eficiencias de los equipos críticos como los ventiladores de tiro forzado, generador de vapor, turbinas de alta, media y baja presión, condensador, bombas de agua de alimentación, condensado y circulación. La BDD del SCORT también contiene valores de los parámetros de diseño del régimen térmico de la unidad, que son tomados como referencia, así como los valores de la desviación de estos parámetros en los diferentes porcentajes de generación de la unidad.

A la BDD del SIIDMP se le incluyeron tablas para adicionar tanto imágenes digitalizadas como informes generados por otros sistemas de análisis de parámetros de operación, como pueden ser análisis de vibraciones, análisis de aceite, termografías, etc. Los informes tienen que realizarse en formato de MS-Word. Actualmente, la BDD del SIIDMP está formada por cuarenta y ocho tablas.

El contar con una BDD relacional permite que las consultas se realicen sobre diferentes entidades y atributos. Cada uno de los índices de generación se puede calcular para diferentes relaciones. Si observamos la Figura 3, la tabla de Eventos se utiliza para registrar cada evento relacionado con una falla o un decremento en la generación de energía eléctrica. La tabla Detalle\_Evento se utiliza para precisar la duración del evento y calcular la energía no generada por cada evento en particular. La tabla Descripción\_Evento se emplea para almacenar los detalles de cada evento y describirlo más ampliamente. Con estas relaciones se obtiene información partiendo de lo general a lo específico o viceversa. Por ejemplo, se puede determinar la energía no generada en la central, en cada unidad generadora, hasta llegar a determinar la causa de la no-generación de energía eléctrica por los equipos. Las relaciones en la base de datos nos permiten clasificar la energía no generada por modo de falla, o determinar en qué sistema se ha dejado de generar más y qué equipos intervienen en la no-generación de electricidad.

Figura 3

Vista parcial del modelo E-R del SIIDMP.



### Procedimientos de consulta de la BDD del SIIDMP

Para la obtención de la información de la BDD se utiliza el lenguaje de consulta estructurada propio de SQL Server: Transact-SQL. Los accesos a las tablas se hacen por medio de procedimientos almacenados *Store Procedures*. Cada procedimiento de consulta es llamado por los módulos de la IHM con una serie de parámetros, que pueden ser fechas del periodo, el número de la unidad, el grupo al que pertenece un equipo, entre otros según el caso. Un ejemplo de procedimiento almacenado es "EnergiaPerdidaSAguaA 1, 1998,1998,1, 12, 1, 31". Este procedimiento calcula la energía perdida por fallas o decrementos en el Sistema de Agua de Alimentación de la unidad 1 entre el primero de enero y treinta y uno de diciembre de 1998. El resultado entregado por el procedimiento es:

EnergiaPerdida      MW/hr

23466.498300499996

El código que llama al procedimiento "EnergiaPerdidaSAguaA" obtiene el resultado anterior, que incluye tanto el valor en el sistema decimal como las unidades de presentación, al valor obtenido le realiza un ajuste al formato para su presentación en la IHM como elemento de una gráfica o como valor en una tabla tabular. Las unidades de ingeniería las presenta tal como las recibe en la IHM .

### Ejemplos de resultados

A continuación se revisa el análisis de tres casos de uso del SIIDMP en el periodo del 1 de enero al 31 de agosto del 2001. En la descripción de cada uno de estos casos, se presentan las funciones configuradas en la IHM y los resultados obtenidos. En las imágenes y las tablas se muestran datos reales de los casos de estudio al ejercitar el SIIDMP que, como se mencionó en incisos anteriores, corresponden a datos de la central termoeléctrica Presidente Plutarco Elías Calles.

Caso 1: Se desea conocer en qué unidad se han presentado la mayor cantidad de eventos de falla y salida forzada.

#### Opción de la IHM: Resumen de Índices

La Figura 4 corresponde a la primera vista del SIIDMP. En ella se muestran los siete índices operativos acumulados en el año tanto por central como por unidad, en ella se presentan en color blanco los valores más

altos o bajos según el índice en particular, como ejemplo el índice del régimen térmico de la unidad 2 se presenta en color blanco y tiene el valor más alto. En cambio el índice de disponibilidad de la unidad 5 se presenta en blanco también y tiene el valor más bajo. Dando respuesta al caso 1, se observa en la figura que la unidad 2 tiene el índice de fallas y salidas forzadas más alto en el periodo de análisis.

Figura 4

Resumen de Índices.

Índice	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5	Unidad 6
1. Eficiencia (%)	34.42	34.57	35.03	34.52	40.11	35.05
2. Régimen Térmico B.(kcal/kwh)	2,374.78	1,124.82	1,158.23	1,113.34	1,362.05	2,199.34
3. Disponibilidad (%)	79.23	79.54	87.82	88.63	79.48	79.81
4. Generación Bruta (Gwh)	1,511.24	1,562.77	1,612.33	1,722.44	1,468.25	1,513.34
5. Fallas y Salidas Forzadas	22	22	4	4	1	2
6. Fallas por Error Humano	2	2	2	1	1	1
7. Costo de Gen. Bruta (M\$)	23,466.498300499996	18,866.51	9,081.61	20,275.41	11,541.4	17,962.39

En la Tabla 2 se muestran los siete índices de la unidad 2.

#### Opción de la IHM: Diagramas de Proceso

Caso 2: Se desea conocer en que equipo o componentes se tiene la mayor cantidad de energía no generada.

Por medio de la activación de los botones del lado izquierdo, se tiene acceso a las diferentes funciones configuradas en la IHM. En la Figura 5, al presionar el botón Diagramas de Proceso, se muestran

Tabla 2

Índices de la unidad 2.

Unidad 2. Periodo: 01/01/2001 al 31/08/2001

Eficiencia (%)	34.57
R. Térmico B.(kcal/kwh)	2,374.86
Disponibilidad (%)	79.54
Generación Bruta (Gwh)	1,562.77
Fallas y Salidas Forzadas	22
Fallas por Error Humano	2
Costo de Gen. Bruta (M\$)	N/D

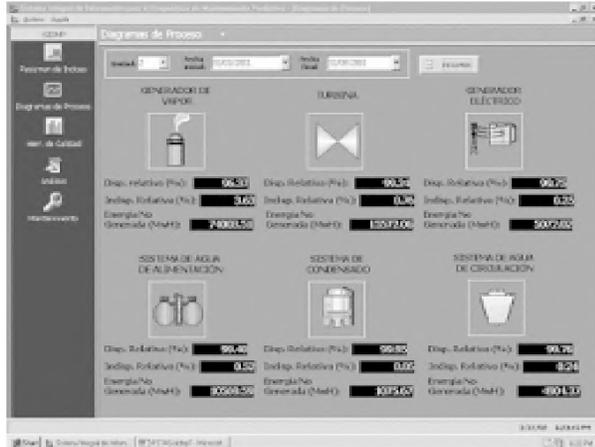
N/D = No Disponible.



los sistemas en que se dividió cada unidad generadora y los tres índices a obtener: porcentaje de Disponibilidad Relativa a fallas, porcentaje de Disponibilidad Relativa a fallas y Energía No Generada (ENG).

Figura 5

Diagrama de Proceso General.



Dando respuesta al caso 2, en la Figura 5 se identifica que en el Generador de Vapor (GV) de la unidad 2 se presentó la ENG más alta para el periodo en análisis. Una vez identificado en qué sistema está la ENG más alta, se selecciona el Diagrama de Proceso del GV y se presenta la vista donde se muestran los equipos primarios y auxiliares con los índices de ENG más altos. En la Tabla 3 se muestran los tres valores más altos de ENG del GV de la unidad 2, obtenidos en el equipo principal Ventilador de Tiro Forzado B (VTF) y en dos equipos auxiliares: Sellos de Aire y Gases y Elementos Térmicos del Par.

Algunos equipos, como las bombas y ventiladores, tienen una vista más donde se muestran las tendencias de valores puntuales de vibraciones, temperaturas, corrientes, etc.

En este estado ya se tiene cubierta la respuesta al caso 2: siendo los Sellos de Aire y Gases el equipo –auxiliar en este caso–, en donde se tiene la mayor ENG del periodo.

Opción de la IHM: Herramientas de Calidad

Con esta opción se pueden realizar análisis directos de los datos con diferentes herramientas de calidad, cada gráfica da información particular y en ocasiones es complementaria con otras gráficas.

En la Tabla 4 se indican los análisis y las herramientas de calidad usadas en esta opción.

Tabla 3

Energía No Generada en el GV de la unidad 2.

Unidad 2. Sistema GV. Periodo: 01/01/2001 al 31/08/2001

Energía No Generada en el GV (Mwh)	74,003.51
Ventilador Tiro Forzado B (Mwh)	80.75
Sellos de Aire y Gases (Mwh)	44,468.00
Elementos Térmicos del Par (Mwh)	27,320.74

Tabla 4

Análisis y gráficas más comunes.

Tipo de análisis	Clasificado por:	Tipo de gráficas
Decrementos	Sistema Equipos	Barras Pareto
Energía No Generada	Causas Equipos Grupos Modos de fallas Sistemas de equipos	Barras (*) Pareto(*) Dispersión Tendencia 3D (*) Dividido para: • Equipos Críticos • Todos los Equipos
Eventos por equipos	Salida por disparo/falla Salida por error humano Salida forzada.	Barras Pareto

Diagrama de Causas y Efectos

Además de las herramientas de calidad mencionadas, el sistema cuenta con la capacidad de crear gráficas de Ishikawa o de espaldas de pescado (fishbone diagram) para realizar análisis de causa-efecto. En la parte izquierda de la Figura 6 se muestra un árbol que representa al diagrama de espaldas de pescado en el que se exponen tres elementos de estudio: la maquinaria (el equipo) involucrada en un evento específico (en la figura es la ENG), el mantenimiento realizado y la manufactura, que se refiere a los fabricantes de los equipos involucrados en los eventos.

En la sección de la derecha de la Figura 6 se muestran seis tablas con la siguiente información: la descripción del evento (efecto) y de la falla provocada (causa), el mantenimiento mayor realizado al equipo, el historial de todos los mantenimientos, los trabajos programados, la eficiencia del equipo y el régimen térmico de la unidad antes, durante y después

del mantenimiento en una fecha seleccionada específicamente.

El análisis de causas y efectos se puede realizar de acuerdo con los tipos de análisis y clasificaciones presentadas en la Tabla 4.

Con esta herramienta es posible analizar algún evento específico y determinar, –de acuerdo con los mantenimientos realizados al equipo involucrado–, la acción a llevar a cabo en el equipo, como puede ser que el equipo siga operando en condiciones normales, que se mantenga en operación condicionada, que se requiera poner el equipo en mantenimiento o que se necesite sacarlo de emergencia.

*Opción de la IHM: Análisis*

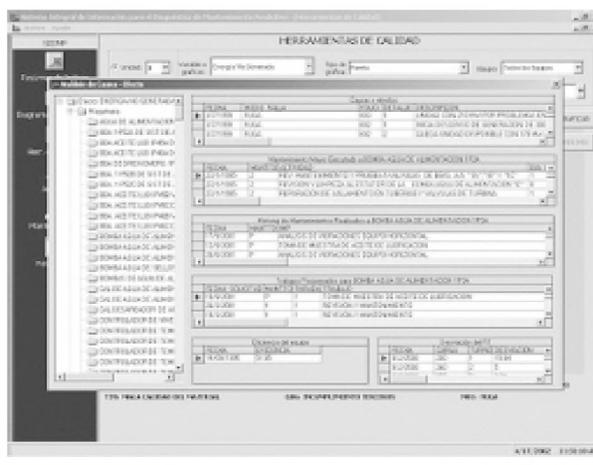
En esta opción se realiza un análisis de la tendencia de los índices listados en la Tabla 5, se desea visualizar principalmente cuál ha sido la evolución de los índices y conocer cuándo se presentaron valores altos o bajos y, posteriormente, entrar a la opción de herramientas de calidad y conocer los eventos ocurridos en la unidad en estudio.

En esta opción de análisis están incluidas dos funciones más del sistema:

<b>Función</b>	<b>Resultado</b>
Imágenes y Documentos	Se almacena cualquier información adicional y complementaria que exista sobre el estado del equipo en análisis.
Confiability de Equipos	Se realiza el modelado de un equipo principal y se predice su confiabilidad.

**Figura 6**

*Análisis de Causas y Efectos ENG en la Bomba Agua de Alimentación 1P2A.*



**Tabla 5**

*Análisis de Tendencia de Índices*

<b>Análisis de tendencia</b>	<b>Resultado de la observación</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo Medio Entre Fallas (TMEF)</li> <li>• Confiabilidad de la unidad</li> <li>• Eficiencia de equipos</li> <li>• Eficiencia por unidad</li> <li>• Régimen térmico por unidad</li> <li>• Disponibilidad por unidad</li> <li>• Fallas y salidas forzadas por unidad</li> <li>• Fallas por error humano por unidad</li> </ul>	<p>La graficación de cada uno de uno de los índices de la izquierda muestra el comportamiento de la unidad en el periodo de análisis. En cada caso, se detectan visualmente los años en que se han tenido los valores más altos.</p>

*Análisis Confiabilidad de Equipos*

Caso 3: Se desea conocer la confiabilidad del equipo Bomba de Agua de Circulación A.

El propósito de aplicar estudios de confiabilidad es predecir la operación de un equipo en el futuro cercano. En particular, el objetivo del módulo es proporcionar datos para que el usuario optimice los programas actuales de mantenimiento correctivo y preventivo y que, al contar con más datos analizados, se pueda llevar (o conservar) la operación de los equipos en vigilancia lo más cercano a los puntos de operación óptima y así contribuir para prolongar la vida útil de los equipos, reduciendo el desgaste que puedan tener por operar fuera de los valores y óptimos de operación. La predicción de la confiabilidad a los equipos se realiza tomando como base los datos de falla ya que éstos son la parte central en los estudios de confiabilidad que se realizan.

El tema de confiabilidad de equipos es amplia, no es función del presente trabajo desarrollarlas, sino aplicar las distribuciones para predecir la confiabilidad. En la Tabla 6 se mencionan las distribuciones implantadas en el SIIDMP, los parámetros que se necesitan para su evaluación y una breve descripción de dónde se aplican las distribuciones.

Los resultados que arrojan las distribuciones están ligados al ciclo de vida de los equipos, que se puede representar con la “curva de la bañera”, que está dividida en tres secciones como se muestra en la Figura 7. Cada sección de la curva está determinada por el valor del parámetro Beta ( $\beta$ ) de las distribuciones.



Tabla 6

Distribuciones y sus parámetros.

**Distribuciones**

**Parámetros**

**Distribución Weibull.** La distribución Weibull es la más ampliamente utilizada de las cuatro, ya que modela diversos tipos de equipos.

**Beta:** ( $\beta$ ) de forma  
**Theta:** ( $\theta$ ) de escala  
**Delta:** ( $\delta$ ) de localización

**Distribución Exponencial.** Es utilizada para modelar datos con una ( $\lambda$ ) constante, como en algunos componentes eléctricos.

**Lambda:** ( $\lambda$ ) tasa de fallas

**Distribución Normal.** Es utilizada en el modelado de eventos del mismo tipo.

**Mu** ( $\mu$ ) media  
**Sigma:** ( $\sigma$ ) des. estándar

**Distribución LogNormal.** Es utilizada comúnmente para modelar las vidas de equipos cuyos modos de falla de tipo esfuerzo por fatiga.

Logaritmo de la media  
 Logaritmo de desviación estándar

Los valores en el parámetro de forma  $\beta$  se consideran como sigue:

- $\beta < 1$  Corresponde a fallas antes de su entrada en operación y pueden ser: fallas por baja calidad del material, mala instalación u operación vida acelerada.
- $\beta = 1$  Tendencia de fallas casi constante, se le conoce como vida útil y pueden ser: fallas propias del material de fabricación o fallas ocultas o no detectadas.
- $\beta > 1$  El equipo ya rebasó su vida útil y pueden ser fallas por desgaste.

Para responder al Caso 3 –“conocer la confiabilidad de la Bomba de Agua de Circulación”, se realiza la siguiente secuencia de navegación y selección de opciones en la IHM:

Análisis → Confiabilidad de Equipos → BDD → Equipo → Distribución → Método de Estimación de Parámetros → Dar fecha en que la bomba entró en operación.

Como ejemplo, en la Figura 8 se muestra la información para la bomba de circulación con fecha de entrada en operación de mayo de 1998. En la primera ventana están todos los eventos ocurridos en

Figura 7

Ciclo de vida.

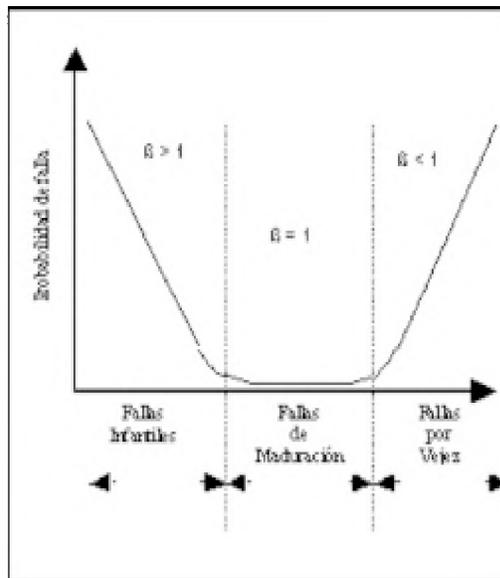
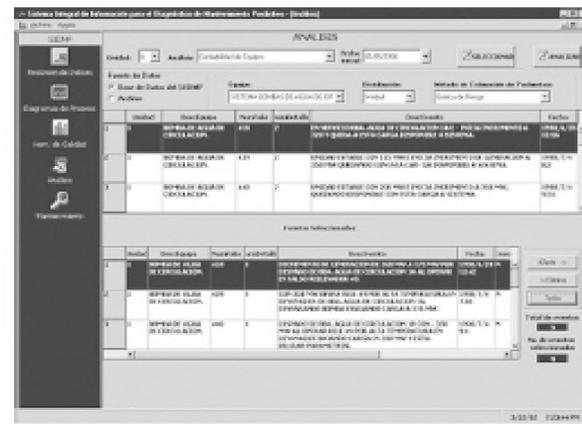


Figura 8

Datos de falla de la bomba de agua de circulación. Operación en 1998.



las bombas de agua de circulación, el usuario procede a seleccionar los eventos propios de la bomba que desea analizar, éstos se muestran en la ventana inferior del diagrama.

Cuando ya se seleccionaron todos los eventos que corresponden al equipo en análisis, el usuario presiona el botón analizar, el sistema muestra la Figura 9, donde el parámetro Beta ( $\beta$ ) = 1.88 que equivale –según la Figura 7 del ciclo de vida– a “fallas por desgaste”. El valor del parámetro de escala ( $\theta$ ) = 22762.97 indica el número de horas a futuro y corresponden a una confiabilidad de 36.8%.

En la parte inferior de la Figura 9 se presenta

una tabla donde el usuario alimenta ya sea el porcentaje de confiabilidad o el número de horas, para que el sistema proporcione el complemento de cualquiera de los dos. En el caso que se muestra en la Figura 9, se proporciona el porcentaje de confiabilidad del 85% y el sistema responde que ese valor equivale a 8683.14 hrs igual a 12 meses, esto indica que en un año más, conservando las condiciones operativas de la bomba, el equipo tendrá una confiabilidad del 85%.

Finalmente, en la Figura 10 se muestra el mismo análisis para la bomba de agua de circulación pero en este caso, se supone una fecha de inicio de operación en 1993. Como se aprecia al comparar las Figuras 9 y 10, los parámetros de forma y escala son

diferentes, lo que muestra la importancia para los cálculos de confiabilidad de conocer con precisión la entrada en operación de un equipo y de conocer si el equipo cuenta con horas de operación y número de fallas acumuladas.

### Conclusiones

El SIIDMP es un sistema diseñado a la medida de los requisitos definidos por la CFE, que integra las aportaciones de la Subdirección de Generación de la CFE y de la Oficina de Pruebas de Equipos y Materiales de Lapem-CFE. La BDD del SIIDMP cuenta con un historial de falla de los equipos de la central termoeléctrica Presidente Plutarco Elías Calles de la CFE desde 1993, esta información se puede explotar para iniciar mantenimientos centrados en la confiabilidad y mantenimientos pro-activos que se enfoca a la detección y eliminación de la causa raíz de los problemas. En opinión de las industrias más importantes del mundo, la tendencia de ahorro en gastos está orientada hacia un programa de mantenimiento que busca las causas raíz del desgaste y fallas de los equipos. Según DuPont, “el mantenimiento es el gasto controlable más grande de una planta” ([www.maintenance.com](http://www.maintenance.com), 2000).

El SIIDMP concentra la información importante para realizar los análisis y diagnósticos de confiabilidad rápidamente (de minutos a horas). Específicamente, en Confiabilidad de Equipos, se compararon los resultados que entrega el módulo contra los resultados que entrega un *software* comercial y los resultados son prácticamente iguales, las diferencias son menores y se concluye que el SIIDMP cumple con los requisitos definidos.

Figura 9

Confiabilidad para la bomba de agua de circulación. Operación en 1995.

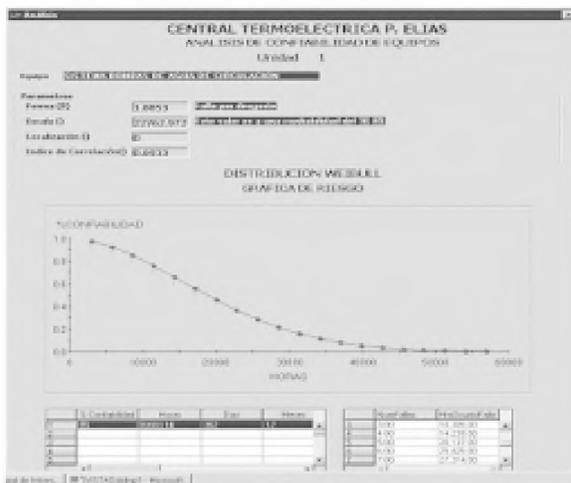
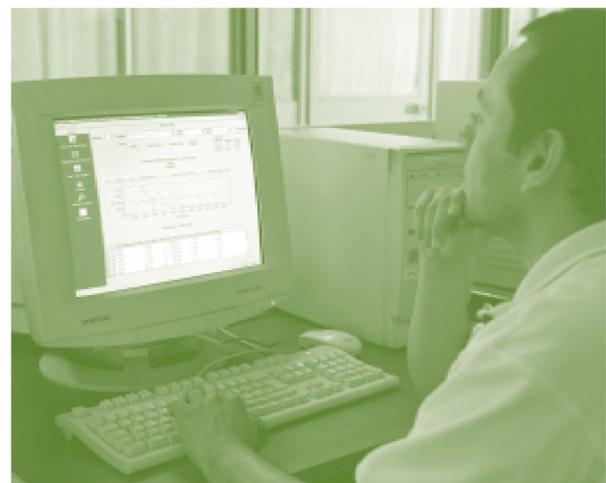
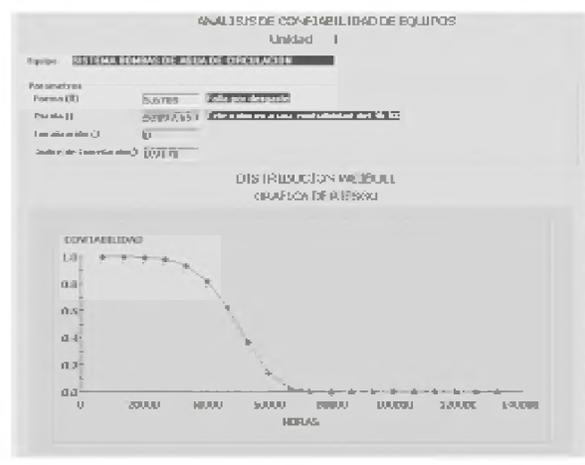


Figura 10

Datos de falla para la bomba de agua de circulación. Operación en 1993.





En el SIIDMP se puede incluir el resultado analizado de otros equipos o componentes como son imágenes o archivos tipo Word ya existentes en la central termoeléctrica para complementar las conclusiones y la toma de decisiones. Cuenta con una hoja de resultados en la que se resumen las recomendaciones de mantenimiento a aplicar al equipo en análisis. Finalmente, como resultado de la aplicación del SIIDMP, se optimizará el costo/beneficio en la aplicación de los mantenimientos de la central termoeléctrica.

### Agradecimientos

Los autores agradecen las aportaciones y comentarios realizados por el Ing. Jesús A. Nebradt G., jefe de la Unidad de Investigación y Desarrollo; al Ing. Felipe Torres E., jefe del Departamento Evaluación y Análisis de Proyectos de la Subdirección de Generación de la CFE, al Ing. Gabriel A. Carrillo R., jefe de la Oficina de Evaluación de Productos y Equipos de Lapem y, finalmente, al personal de la central termoeléctrica Presidente Plutarco Elías Calles. Con el apoyo y participación de todos ellos fue posible conjuntar los requisitos que dieron forma al desarrollo e implantación del sistema.

### Referencias

- Carrillo, R. Gabriel. *Informe de Estancia Técnica en Lapem*, del 28 al 30 de octubre de 1998.
- Dhillon, B. S. *Design Reliability Fundamentals and Applications*, editorial CRC Press LLC, 1999, capítulo 2, 3 y 4.
- Korth, Henry F. y Abraham SilberScahtz. *Fundamentos de Bases de Datos*, McGraw-Hill, 1987, México.
- Reliability & Maintenance Analyst, *Engineered Software*, version 4.0.2.
- [www.maintenanceresource.com/ReferenceLibrary/OilAnalysis/oa-what.htm](http://www.maintenanceresource.com/ReferenceLibrary/OilAnalysis/oa-what.htm)

#### SERGIO ARANDA ÁVILA

Ingeniero Industrial en Electrónica por el Instituto Tecnológico de la Laguna (ITL). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Centro de Graduados e Investigación del ITL. Desde 1985 labora en el Instituto de Investigaciones Eléctricas como investigador de tiempo completo. Ha participado en diversos proyectos con el desarrollo de mecanismos *software* para la administración de recursos en disco, para el mantenimiento de la base de datos y de diálogos hombre-máquina en arquitecturas de cómputo centralizadas y distribuidas. Actualmente es el jefe del proyecto del desarrollo del Sistema Integral de Información para el Diagnóstico y Mantenimiento Predictivo (SIIDMP) para centrales termoeléctricas.

*aranda@iie.org.mx*

#### RAÚL GARCÍA MENDOZA

Ingeniero Mecánico Electricista por la Universidad Nacional Autónoma de México y Maestro en Ciencias Computacionales por el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Morelos. Es investigador de la Gerencia de Supervisión de Procesos desde 1990. Ha participado en diferentes proyectos desarrollando interfaces hombre máquina, algoritmos de control moderno para centrales termoeléctricas así como el diseño e implementación de bases de datos para el sector eléctrico y petrolero. Actualmente participa en el desarrollo del SIIDMP.

*rgarcia@iie.org.mx*

#### FRANCISCO CUAUHTÉMOC POUJOL GALVÁN

Ingeniero Mecánico por la Universidad de Maryland, College Park. Desde 1986 labora en el IIE como investigador de tiempo completo. Ha participado en proyectos de transferencia de tecnología para la fabricación de una turbina para pozos geotérmicos. También ha participado en diversos proyectos de desarrollo de equipos de análisis de vibraciones para el balanceo y diagnóstico de equipo rotatorio. Actualmente trabaja en el desarrollo de bases de datos y análisis de confiabilidad de equipo crítico para el proyecto SIIDMP para centrales termoeléctricas. Ha publicado varios artículos para conferencias nacionales e internacionales sobre temas de desarrollo de sistemas de diagnóstico de equipo rotatorio.

*fpoujol@iie.org.mx*

#### CARLOS CHÁIREZ CAMPOS

Ingeniero Industrial en Electrónica por el ITL. Realizó estudios de maestría en el Centro de Graduados e Investigación del ITL de Torreón Coahuila y después obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica. En febrero 1985 ingresó como investigador al IIE participando como jefe de proyecto en diferentes desarrollos relacionados con los sistemas de adquisición y control de datos para la operación de centrales termoeléctricas, tanto en arquitecturas de cómputo centralizada como distribuida. Actualmente participa en el proyecto Desarrollo e implantación de los módulos de ecuaciones de predicción, cálculo de costos e Interfaz Hombre Máquina (IHM), así en como la integración y puesta en servicio del SIIDMP.

*cchaires@iie.org.mx*

#### NELY DOMÍNGUEZ MOSCOSO

Licenciada en Sistemas Computacionales Administrativos por la Universidad Veracruzana (UV) en el año de 1998. Realizó una estancia en la Gerencia de Supervisión de Procesos del IIE realizando la tesis Diseño una Interfaz Hombre Máquina (IHM) para un Sistema Inteligente de Ayuda para el Arranque de Unidades Termoeléctricas (SIAAT) entre los años de 1999 y 2000. Asimismo, realizó una estancia de trabajo en el año 2000 en la misma gerencia desarrollando el módulo de la IHM del Sistema de Adquisición Automatizado de Energía (SAAE) de Luz y Fuerza del Centro. Sus áreas de interés son el diseño, desarrollo y administración de bases de datos y minería de datos; el desarrollo de IHM en sistemas multiáreas y el diseño y desarrollo de sistemas multimedia.

*ndm@iie.org.mx*