

Sistema experto asistente para determinar fallas en una central térmica de gas o diesel.

Assistant software to determine faults in a gas or diesel thermal power plant.

John E. Candelo Becerra
Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia
Medellín-Colombia
57+4+4255399
jecandelob@unal.edu.co

Hector A. Tabares Ospina.
Facultad de Ingeniería
I.U. Pascual Bravo
Medellín-Colombia
57+3168601736
h.tabares@pscualbravo.edu.co

RESUMEN

La determinación de fallas en una central térmica de gas o acpm requiere un rápido tratamiento, si lo que se pretende es no afectar su operación y cumplimiento del servicio. Estas fallas generan alarmas genéricas y específicas en los módulos de control, por lo que su solución hace parte de las labores de inspección diarias que hace el personal operativo y de mantenimiento. Se plantea como problema que la Institución Universitaria Pascual Bravo no posee una herramienta informática para que los estudiantes del programa de Ingeniería eléctrica o afines realicen prácticas sobre el asunto, lo que permite formular como objetivo, desarrollar un producto software en ambiente local, con propósito didáctico para la enseñanza de la cuestión.

La metodología empleada para desarrollar el producto software fue el modelo en cascada que consiste en: Análisis de requisitos, Diseño del sistema, Diseño del programa, Codificación, Pruebas de validación, Verificación, Mantenimiento.

Como resultado, se presenta el desarrollo tecnológico del tipo software "SE_TERMOELECTRICA_IUPB" que facilita la toma de decisiones conducentes a resolver las fallas en una central térmica de gas o acpm. El sistema propuesto modela el conocimiento específico del personal de mantenimiento de la planta, mediante relaciones entre las variables evidenciables y objetivo.

En las especificaciones de diseño del aplicativo desarrollado, la base de reglas se implementó en lenguaje C# de Microsoft, y la base de conocimiento reside en un manejador de bases de datos.

ABSTRACT

The determination of faults in a coal-burning power plant requires a rapid treatment, if it is intended not to affect its operation and service performance. These faults generate generic and specific alarms in the control modules, so that their solution is part of the daily inspection work done by the operating and maintenance staff. It is posed as a problem that the Pascual Bravo University Institution does not have a computer tool for the students of the electrical engineering or related program to practice on the subject, which allows to formulate as objective, to develop a software product in a local environment, with a didactic purpose

The methodology used to develop the software product was the cascade model consisting of: Requirements analysis, System design, Program design, Coding, Validation tests, Verification, Maintenance.

As a result, the technological development of the software type "Fallas_CentralTermica_Carbon" is presented, which facilitates decision making leading to the resolution of faults in a coal-fired power station. The proposed system models the specific knowledge of plant maintenance personnel, through relationships between the evidentiary and objective variables.

In the design specifications of the developed application, the rule base was implemented in Microsoft's C# language, and the knowledge base resides in a database handler.

Palabras clave

Sistema experto, Fallas Central Térmica.

Keywords Expert system, faults in a coal-burning power plant.

1. INTRODUCCION

Este trabajo es el inicio de una propuesta de Investigación en la línea ENERGÍA Y DESARROLLO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS, del programa doctorado en SISTEMAS ENERGÉTICOS, de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. En particular, se están estudiando las series de tiempo de demanda de energía eléctrica, las cuales siguen en la mayor parte de los casos complejas dinámicas no-lineales de carácter caótico.

El objetivo fundamental de este trabajo consistió en desarrollar un sistema experto (SE) realizado en la INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO, Medellín, Colombia, que actúa como asistente del personal de mantenimiento, para atender las fallas en una central térmica de gas o acpm de ciclo combinado.

El artículo comienza tratando una central térmica de gas o acpm convencional, continua con el estado de la técnica relacionado con los procedimientos para atender las fallas. A continuación se presenta la metodología utilizada para la implementación de un SE determinista que asesore la solución de una falla. Continúa el artículo mostrando las pruebas de validación y los resultados más importantes. Finaliza, presentando las principales conclusiones del trabajo investigativo.

Central térmica de Gas o Acpm

Un detallado estudio sobre una central térmica de gas o acpm está más allá del ámbito de esta unidad. En [1], se ofrece una completa información con referencias específicas. Se presenta a continuación un resumen sobre los principales aspectos relacionados con el tema.

Una central térmica de gas o acpm, es una central en la que la energía térmica del combustible es transformada en electricidad mediante dos ciclos termodinámicos: el correspondiente a una turbina de gas (ciclo Brayton) y el convencional de agua/turbina vapor (ciclo Rankine).

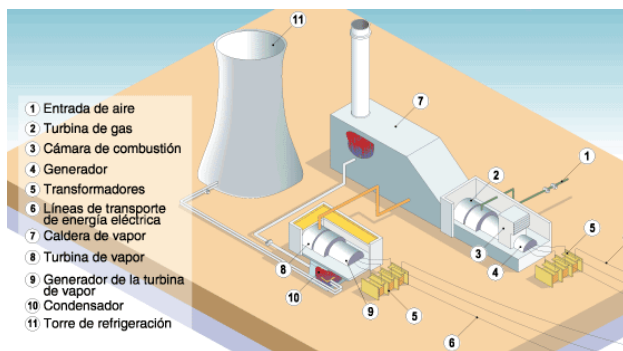


Figura 1. Central térmica de Gas o Diesel. Fuente: [1]

La turbina de gas consta de un compresor de aire, una cámara de combustión y la cámara de expansión. El compresor comprime el aire a alta presión para mezclarlo posteriormente en la cámara de combustión con el gas. En esta cámara se produce la combustión del combustible en unas condiciones de temperatura y presión que

permiten mejorar el rendimiento del proceso, con el menor impacto ambiental posible.

A continuación, los gases de combustión se conducen hasta la turbina de gas (2) para su expansión. La energía se transforma, a través de los álabes, en energía mecánica de rotación que se transmite a su eje. Parte de esta potencia es consumida en arrastrar el compresor (aproximadamente los dos tercios) y el resto mueve el generador eléctrico (4), que está acoplado a la turbina de gas para la producción de electricidad. El rendimiento de la turbina aumenta con la temperatura de entrada de los gases, que alcanzan unos 1.300 °C, y que salen de la última etapa de expansión en la turbina a unos 600 °C. Por tanto, para aprovechar la energía que todavía tienen, se conducen a la caldera de recuperación (7) para su utilización.

La caldera de recuperación tiene los mismos componentes que una caldera convencional (precalentador, economizador, etc.), y en ella, los gases de escape de la turbina de gas transfieren su energía a un fluido, que en este caso es el agua, que circula por el interior de los tubos para su transformación en vapor de agua.

A partir de este momento se pasa a un ciclo convencional de vapor/agua. Por consiguiente, este vapor se expande en una turbina de vapor (8) que acciona, a través de su eje, el rotor de un generador eléctrico (9) que, a su vez, transforma la energía mecánica rotatoria en electricidad de media tensión y alta intensidad. A fin de disminuir las pérdidas de transporte, al igual que ocurre con la electricidad producida en el generador de la turbina de gas, se eleva su tensión en los transformadores (5), para ser llevada a la red general mediante las líneas de transporte (6).

El vapor saliente de la turbina pasa al condensador (10) para su licuación mediante agua fría que proviene de un río o del mar. El agua de refrigeración se devuelve posteriormente a su origen, río o mar (ciclo abierto), o se hace pasar a través de torres de refrigeración (11) para su enfriamiento, en el caso de ser un sistema de ciclo cerrado.

Conviene señalar que el desarrollo actual de esta tecnología tiende a acoplar las turbinas de gas y de vapor al mismo eje, accionando así conjuntamente el mismo generador eléctrico.

En Colombia, se encuentra la Central Termoeléctrica La Sierra [2], localizada en el corregimiento del mismo nombre, municipio de Puerto Nare, en el departamento de Antioquia, orilla izquierda del río Magdalena. Su capacidad efectiva neta del ciclo combinado es de 460 MW, 294 MW en ciclo simple, en operación comercial desde 1998 y 166 MW en ciclo combinado, en operación comercial desde 2001. Es la de mayor eficiencia en generación térmica de Colombia, y la segunda en potencia.

Estado de la técnica sobre fallos en una central térmica convencional de gas o acpm.

En [3], se ofrece una completa información sobre el asunto. Un recuento sobre los principales aspectos relacionados con el tema, se presenta a continuación.

Independientemente del fabricante, tipo, modelo y tamaño, la central térmica de gas o acpm es una tecnología concebida como

un conjunto de sistemas que deben ser supervisados y monitoreados desde un centro de control automático con el fin de garantizar la integración de cada uno de ellos y su correcto funcionamiento. Las averías o fallas de la planta están clasificados en ocho grandes grupos: turbina de gas, turbina de vapor, caldera, ciclo agua-vapor, sistema de agua de refrigeración, estación de gas, generador, sistemas eléctricos. Personal de mantenimiento (PM) de la planta termoeléctrica La Sierra, integran grupos de investigación de la INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO, y han venido trabajando modelos computacionales usando SE como el expuesto en [4]. Para los propósitos de este trabajo investigativo, el artículo antes referido fue tomado y adaptado para la atención de fallas en una central térmica de gas o acpm.

2. METODOLOGÍA Y PROCESOS DE DESARROLLO

Las fallas en una central térmica de gas o acpm, las tareas de mantenimiento que se realizan en el sistema siguiendo las instrucciones del fabricante, y la experiencia adquirida por el personal de mantenimiento desarrollando nuevas rutinas de vigilancia, llevó a pensar en el desarrollo de un sistema experto del tipo determinista, titulado “SE TERMOELECTRICA_IUPB”, para modelar el conocimiento del PM, para que actúe como su asistente en las labores de mantenimiento preventivo y correctivo.

Los actores que intervienen en la aplicación “SE TERMOELECTRICA_IUPB” son: el ingeniero de sistemas que en este caso hace las veces de ingeniero del conocimiento (IC), el experto en el dominio de conocimiento (EDC) sobre fallas en una central térmica, y los usuarios finales (UF) que interactúan con el sistema con miras de atender la falla que presenta el sistema.

La metodología abordada para la implementación del SE contempló las siguientes etapas:

- a) Identificación del problema. En este caso, atender las fallas en una central térmica de gas o acpm.
- b) Selección de la variable objetivo y sus valores. El EDC definió como variable objetivo la atención de las fallas en una central térmica, sujeta a revisión periódica con el propósito de detectar sus modos de fallo.
- c) La selección de las variables evidenciables y sus posibles valores. Sobre la base de conocimiento del EDC, se seleccionaron el conjunto de variables evidenciables relevantes. Cada sistema de la planta térmica (véase tablas 1) debe ser evaluado por distintos indicadores. Para el caso de la casa de filtros son: Roturas de filtros, Conductividad alta en agua, Desprendimiento de boquillas, Entrada de suciedad por cierre no estanco de la casa de filtros, Corrosión en la casa de filtros, etc. Todas las variables son de tipo booleano, asumiendo el valor de uno con el que se confirma el evento. El valor de cero, cuando no se presenta falla. Los indicadores listados no constituyen la universalidad de casos, por lo que el programa “SE TERMOELECTRICA_IUPB” provee los medios para la recolección de nuevos indicadores.

TABLA 1. LISTADO DE FALLOS

Parte mecánica	Indicador de falla
Turbina de gas. Fallos en casa de filtros	Roturas de filtros, Conductividad alta en agua, Desprendimiento de boquillas, Entrada de suciedad por cierre no estanco de la casa de filtros, Corrosión en la casa de filtros.
Turbina de gas. Fallos en álabes (compresor y turbina de expansión).	Impactos (FOD, Foreign Object Damage y DOD, Domestic Object Damage), Fisuras (cracks), Rotura por velocidad crítica, Pérdida de recubrimiento cerámico (coating loss), Obstrucción de orificios de refrigeración, Corrosión (fretting), Erosión, Roces (Rubbing), Deformación por fluencia térmica (creep), Sobretemperatura (overfiring), Decoloración (en compresor).
Turbina de gas. Fallos en cámara de combustión.	Llama pulsante (provoca una vibración), Pérdida de material en las placas de recubrimiento (TBC spallation), Sobretemperatura en lanzas (provocando su degradación), Sobretemperatura en piezas de transición.
Turbina de gas. Fallos del rotor.	Bombeo del compresor (no entra suficiente caudal de aire), Ensuciamiento del compresor, Vibración.
Turbina de gas. Fallos de la carcasa	Fisuras en la carcasa, Fugas de aire por carcasa, Perno bloqueado (los tornillos de sujeción se ha podido quedar soldados en sus agujeros).
Turbina de gas. Fallos en cojinete	Desplazamiento axial excesivo, Fallos en la lubricación, Desgaste del material antifricción, Golpes y daños en material antifricción, Problemas de lubricación
Turbina de gas. Fallos de control y de la instrumentación.	Sensores de temperatura, Sensores ópticos.
Turbina de vapor	Fallos en la instrumentación, Fallos en válvulas (como pueden ser las de control, de cierre o de recirculación), Fallos en el circuito hidráulico, Desequilibrios en el rotor (que generarán vibraciones), Incrustaciones en los álabes de la turbina, Corrosión del eje.
Caldera	Fugas en válvulas, Fallos en la instrumentación (lazos de control de nivel de agua en los calderines, lazos de presión, lazos de caudal y lazos de temperatura), Fugas de vapor y de agua por tuberías externas, Roturas internas en haces tubulares, pinchazos de tubos, y colectores, Obstrucción de filtros, Fallos en los motores y las bombas de agua de alimentación, Desprendimiento y deterioro del material aislante (calorifugado).
Fallos en el ciclo agua-vapor	Fugas en tuberías, Fallos en válvulas, Mal funcionamiento de las válvulas de derivación (by-pass).
Fallos en el sistema de agua de refrigeración.	Obstrucción en los filtros de admisión de agua, Fallos en las bombas de impulsión, Rotura de la tubería que conduce el agua hasta el condensador, Fallos en válvulas, Roturas y obstrucciones en el condensador, Fallos en la instrumentación (temperatura, presión, caudal).
Fallos estación de gas (ERM)	Vibraciones en el compresor de gas, Elevada temperatura del compresor por fallos en el sistema de refrigeración y o lubricación, Válvulas que no funcionan correctamente, Fugas de gas por soldaduras de tubos o por válvulas.
Fallos generador	Pequeñas fugas de refrigerante, Vibraciones en el eje (por defectos en cojinetes o problemas de lubricación), Fallos en el sistema de excitación o en el variador de frecuencia empleado durante los arranques, Cortocircuito en bobinados (por defectos o deterioro del aislamiento), Fuga importante de hidrógeno refrigerante con explosión, Gripado del eje.
Fallos sistemas eléctricos	Fallos en las protecciones del transformador principal (de servicio o auxiliares), Alta temperatura en los transformadores principales (por fallo en la ventilación), Fallo en el cambiador de carga de transformadores, Fallo mecánico en el interruptor principal o en los seccionadores, Fallo en la medida de energía importada/exportada, Fallo en las protecciones de la línea, Rotura o derivación de la línea de alta tensión desde el interruptor principal hasta la subestación de la red eléctrica.

Se trata de una base de reglas especificada por el fabricante y nuevas rutinas desarrolladas por el PM, sobre las fallas de una central térmica de gas o acpm. El SE intercambia datos de la tabla 1 para inferir el tipo de atención de la falla que está siendo reportada.

La tabla no presenta una clasificación completa de las fallas, sino que existen tantas clasificaciones como expertos en el tema, siendo todas válidas y muchas veces complementarias unas de otras. De lo anterior se deduce que la base de conocimiento (BC) del programa “SE_TERMOELECTRICA_IUPB” permite registrar nuevos tipos de fallas.

Implementación software. En las especificaciones de diseño de la aplicación “SE_TERMOELECTRICA_IUPB”, se manejaron tres capas: interfaz, lógica de programa, datos; esto para lograr que la interfaz sea completamente independiente del sistema y la BC pueda alterarse sin tener que hacer cambios en la programación. La BC reside en un manejador de bases de datos. La base de reglas y el motor de inferencia (MI) se implementaron en lenguaje C# para ambiente de escritorio, utilizando el escenario de conectado para tener acceso al motor de la BD.

El programa “SE_TERMOELECTRICA_IUPB” está compuesto por tres subsistemas: i) editor de variables evidenciales y objetivo, ii) la base de conocimiento, ii) la interfaz de usuario final.

Bases de datos

Todo el sistema está relacionado como una base de datos Microsoft Access (MDB) titulada BD_TERMOELECTRICA.db, y centra su gestión en tres aspectos principales: los grupos del sistema (Turbina de gas, turbina de vapor, caldera, etc.) y los indicadores de fallas provenientes de cada grupo. El esquema de la base de datos relacional con las tablas, atributos, claves principales y relaciones existentes que cumple con el planteamiento de los requisitos se presenta en la Figura 2.

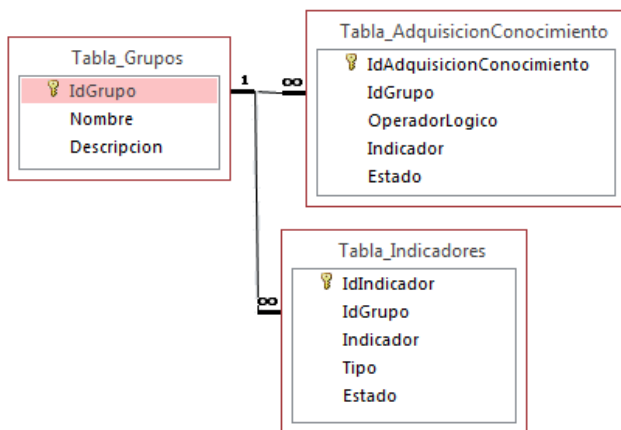


FIGURA 2. MODELO DE LA BD.

El significado de las tablas y sus relaciones es el siguiente:

- a) Tabla_Grupos almacena la lista de grupos que constituyen la central termoeléctrica de gas o acpm.

- b) Tabla_AdquisiciónConocimiento, contiene la BC sobre de los indicadores de falla de cada grupo.
- c) Tabla_Indicadores, contiene los indicadores de falla de cada grupo.

El significado de los atributos que componen las diferentes tablas son explícitos, de tal manera que los lazos entre las relaciones son fáciles de entender. Por ejemplo, el lazo que conecta Tabla_Grupos con Tabla_Indicadores, clasifica los indicadores de fallas del grupo.

Interfaz de usuario final

El subsistema de interacción con el UF (véase figura 3), permite el acceso al conocimiento especializado, que puede consultarse, luego de seleccionar la variable evidencial.

El cuestionario primero se presenta al EDC cuando utiliza el subsistema de adquisición del conocimiento para completar la BC y verificar como están relacionadas cada una de las opciones disponibles para recomendar una solución.

El funcionamiento general del subsistema de interacción con el UF es el siguiente: el UF inspecciona los diferentes indicadores de alarmas, cuyo normal estado es de NO presencia de alarma. Si se presenta una falla, el sistema lo informa en el campo Estado, junto con la solución propuesta por el fabricante o el EDC.

La configuración realizada por el UF es empleada por el MI para obtener razonamiento deductivo automático, seleccionando las reglas posibles que especifican la atención al tipo de fallas presentes en el sistema.

3. RESULTADOS

La Institución Universitaria Pascual Bravo sometió a evaluación ante pares externos el programa SE_TERMOELECTRICA_IUPB, obteniéndose su aprobación y registro ante la Dirección Nacional de Derechos de Autor número 13-59-325, Abril 6 de 2017.

Para probar el sistema, los evaluadores emplearon el subsistema de interfaz de interacción con el UF. Con los datos definidos en los filtros, el programa “SE_TERMOELECTRICA_IUPB” simuló al experto humano, usando el MI, aplicando un encadenamiento de reglas hacia adelante para contrastar los hechos particulares de la base de hechos con el conocimiento contenido en la BC y obtener conclusiones acerca de la consulta realizada. En la Figura 3, se presenta la inferencia del SE ante cualquier posible falla reportada por los respectivos indicadores.

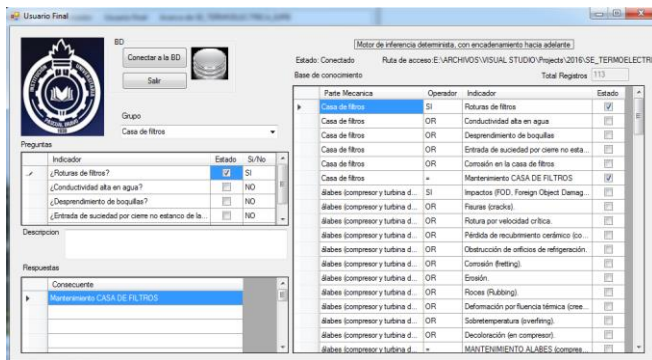


FIGURA 3. INTERFAZ DE USUARIO FINAL.

Como se observa, el SE determinó exitosamente la solución del tipo de atención de la falla en función de las variables evidenciables seleccionadas. Para lograr un mejor rendimiento del MI del sistema informático “SE_TERMoelectRica_IUPB” maneja la transaccionalidad de la base de datos y su procesamiento de manera local, usando los recursos de la máquina en vez del servidor designado.

4. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo consistió en desarrollar el producto software “SE_TERMoelectRica_IUPB” para la determinación de fallas en una central térmica de gas o diesel.

El sistema propuesto modela datos relacionados con las fallas, el conocimiento específico del fabricante o del personal de mantenimiento experto en el asunto, mediante relaciones entre conceptos explicitados en las variables evidenciables (indicadores de fallas), y las variables objetivos (solución de las fallas).

El prototipo de SE permite obtener información sobre el tipo de fallas de acuerdo a los indicadores de desempeño.

Las operaciones de mantenimiento del sistema son registradas por los operarios en el SE, posibilitando que el sistema emita futuras recomendaciones sobre la realización de labores de mantenimiento de las piezas del sistema, en función de los tiempos promedios calculados por el sistema, en el que cada elemento falló.

Se presentaron las características del sistema experto “SE_TERMoelectRica_IUPB” y los indicadores de fallas se desarrollaron con la normativa ISO 13374-2: 2007 (E) [5] en el que se especifican los requisitos para la arquitectura de procesamiento en CMD (Condition Monitoring Diagnóstico).

El prototipo de sistema desarrollado está accesible en la dirección: <http://www.pascualbravo.edu.co/desarrollosinvestigacion/>.

Se encuentra también:

- Un documento sobre la ingeniería de requisitos, en lo relacionado a requerimientos funcionales y no funcionales, requisitos de usuario, casos de uso, base de reglas.
- Un manual de usuario del programa “SE_TERMoelectRica_IUPB”
- Un video tutorial que enseña cómo utilizar el software.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta sección reconoce la ayuda de los señores profesores Oscar Botero, Julian Galeano, docentes titular de las asignaturas en Control Industrial y Bases de Datos respectivamente.

Se agradece a los revisores del artículo las constructivas sugerencias realizadas.

6. REFERENCIAS

- Central ciclo combinado. (Mayo 19 de 2017), [Online]. Obtenido de <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1343-central-ciclo-combinado>.
- Central TermoelectRica La Sierra. (Mayo 19 de 2017), [Online]. Obtenido de <http://www.epm.com.co/site/Home/Institucional/Nuestrasplantas/Energ%C3%ADa/TermoelectRica.aspx>
- Averías habituales en centrales térmicas de ciclo combinado. (Mayo 19 de 2017), [Online]. Obtenido de <http://www.cicloscombinados.com/index.php/mantenimiento-programado/averias-habituales-en-centrales-termicas-de-ciclo-combinado>
- Primorac, C., Mariño, S. (abril 26 de 2016) “Un sistema experto para asistir decisiones turísticas. Diseño de un prototipo basado en la web”. Revista de investigación en turismo y desarrollo local. vol. 4, No 10. Obtenido de <http://www.eumed.net/rev/turydes/10/pm.pdf>.
- International Standard ISO (ISO 13379-1:2012 (E)), Condition monitoring and diagnostics of machines – Data interpretation and diagnostics techniques – Part 1: General guidelines.