



## Simposio de Ingeniería Eléctrica SIE2017

### “Sistema Experto para el diagnóstico de fallos en bombas de agua de alimentar calderas”

#### *"Expert System for the diagnosis of failures in water pumps of feeding boilers"*

Ing. Ailet Abreu López<sup>1</sup>, Dr. José Rafael Abreu García<sup>2</sup>, Ing. Alejandro Morejón Ortega<sup>3</sup>

1-Ing. Ailet Abreu López. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Automática. Cuba. [aileta@uclv.cu](mailto:aileta@uclv.cu)

2- Dr. José Rafael Abreu García. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Automática. [abreu@uclv.edu.cu](mailto:abreu@uclv.edu.cu).

3- Ing. Alejandro Morejón Ortega. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Automática. [abreu@uclv.edu.cu](mailto:abreu@uclv.edu.cu).

**Resumen:** El diagnóstico de fallos en las bombas de agua de alimentar es fundamental para el aumento de la disponibilidad de las calderas y la consecuente reducción de las pérdidas por energía indisponible, para ello se presenta un Sistema Experto que cuenta con cuatro bases de conocimiento desarrolladas en *UCShell*, de esta forma se brinda modularidad al sistema y posibilidad de una futura expansión de su conocimiento sin mayores complicaciones. Tres de las bases de conocimiento se encargan de inferir las causas de un síntoma previamente elegido por el usuario en la base de conocimiento restante, síntomas estos que constituyen los de mayor relevancia a criterio de los expertos. El Sistema Experto obtenido responde satisfactoriamente a las pruebas realizadas y se desenvuelve de manera similar a la de un experto humano pero con mayor rapidez y eficacia, además brinda un ambiente de preguntas y respuestas agradable al usuario.

**Abstract:** The diagnosis of faults in the feed water pumps is fundamental to increase the availability of the boilers and the consequent reduction of the losses by unavailable





energy, for it is presented an Expert System that has four knowledge bases developed in *UCShell*, Thus providing modularity to the system and the possibility of a future expansion of its knowledge without major complications. Three of the knowledge bases are responsible for inferring the causes of a symptom previously chosen by the user in the remaining knowledge base, symptoms that are the most relevant at the discretion of the experts. The Expert System obtained responds satisfactorily to the tests performed and develops in a manner similar to that of a human expert but with greater speed and efficiency, in addition provides a pleasant environment of questions and answers to the user.

**Palabras Clave:** Sistema Experto, Diagnóstico de Fallos, Bombas de Agua, UCShell, Calderas Generadoras de Vapor.

**Keywords:** Expert System, Fault Diagnostics, Water Pumps, UCShell, Steam Generating Boilers.

## 1. Introducción

En la actualidad a medida que se han desarrollado las industrias y se han vuelto más complejos los procesos que tienen lugar en las mismas, se ha incrementado la necesidad de detectar los fallos que afecten al sistema así como la importancia de poder diagnosticarlos para de esta forma tomar decisiones que contrarresten su acción negativa sobre el proceso. La rápida detección y el eficiente diagnóstico de los fallos se han vuelto tareas muy importantes desde el punto de vista de la seguridad de la planta, ya que al ocurrir los mismos en procesos de mediana o gran magnitud puede traer grandes pérdidas económicas, medioambientales y humanas (Domínguez et al., 2008, García et al., 2009).

Un resumen de los diferentes métodos de diagnóstico puede ser estudiado en (Venkatasubramanian et al., 2003). La figura 1 muestra de forma simplificada este resumen.



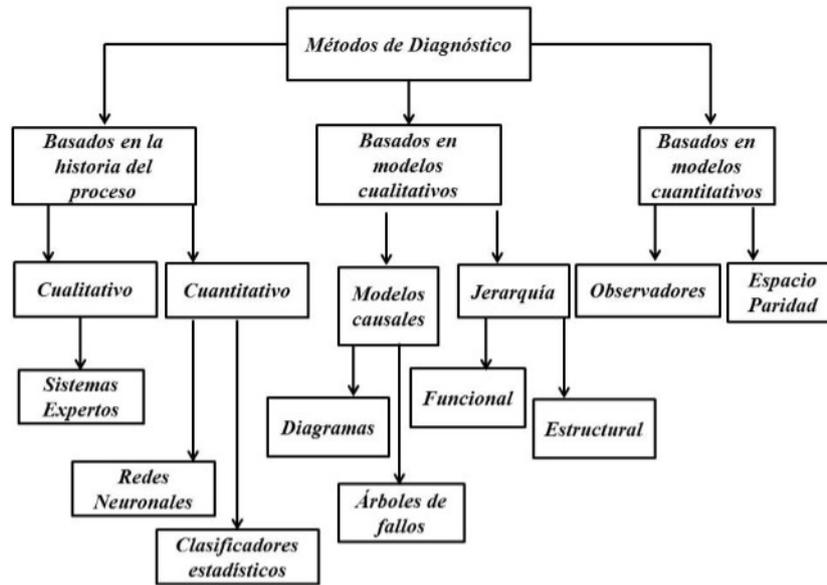


Figura 1: Clasificación de los algoritmos de diagnóstico.

Estudios demuestran (Molina, 2011) que al menos desde el año 2000 hasta la actualidad la mayor cantidad de anomalías se han producido en sus generadores de vapor. Dentro de estos, el esquema que más problemas ha presentado es el de la bomba de agua de alimentación.

En cuanto a resguardos contra fallos o sistemas de vigilancia que avisen previamente la presencia de un fallo inminente en el proceso, las bombas de agua de alimentar caldera siempre cuentan con protecciones que disparan los bloques generadores cuando un funcionamiento defectuoso compromete la estabilidad del sistema, lo que conlleva a interrumpir el proceso de generación de ese bloque y emplear considerable tiempo y recursos en localizar el fallo y solucionarlo.

Por tal motivo en la presente investigación se diseña un Sistema Experto utilizando métodos computacionales para el diagnóstico de posibles causas de síntomas de fallos mecánicos en las bombas de agua de alimentar calderas.

### 1.1 Definición de Sistema Experto

Un SE puede definirse como un sistema informático (hardware y software) que simula a los expertos humanos en un área de especialización dada.



Estos utilizan reglas empíricas o heurísticas (O'Leary, 2008), para enfocar los aspectos más importantes de problemas determinados y para manipular descripciones simbólicas a fin de razonar con el conocimiento que tienen.

Los SE son una nueva evolución, en estos sistemas los datos, o sea, la base de conocimiento (BC) y el código que los explota: el motor de inferencias (MI), se generalizan según diferentes paradigmas (Román et al., 2006). Esta BC la produce un usuario experto en el dominio, los ingenieros del conocimiento (IC), que son diferentes a los programadores de la interfaz o del propio MI. Un sistema de este tipo varía mucho en dependencia del tema en que se va a desarrollar, de la forma para representar el conocimiento y del mecanismo de inferencias que use.

### **Arquitectura de un Sistema Experto**

La arquitectura de un SE refleja la estructura cognoscitiva y los procesos humanos. La primera parte es la memoria de largo plazo, en la que guarda los hechos (Base de Hechos) y el conocimiento acerca del dominio en el que tiene experiencia. Estos se implementan con la utilización de una BC y un Mecanismo de Inferencia para modelar el razonamiento del experto.

Básicamente un SE, se divide en tres módulos:

*Base de Conocimiento:* es el corazón del SE, contiene el conocimiento tanto público como privado, que posee el experto para la solución de problemas en un dominio de aplicación concreto. La información en la BC es todo lo necesario para comprender, formular y resolver el problema. Por lo general, en los sistemas prácticos se utiliza una herramienta de desarrollo o Shell que ya tiene las demás componentes y por lo tanto, el desarrollo se limita a la BC. Incluye dos elementos básicos; HECHOS: situación del problema y teoría del dominio de aplicación. Comprende la representación de la existencia de entidades y relaciones entre estas, y REGLAS: en gran parte heurísticas, dirigen la utilización del conocimiento para resolver problemas. Las reglas heurísticas (o simplemente heurísticas) son conocimientos empíricos.

*Máquina de Inferencia:* Implementa algún Método de Solución del Problema (MSP) que manipula el conocimiento almacenado en la BC e informaciones sobre estados iniciales





y estados actuales de la solución del problema, los cuales se procesan dinámicamente en una estructura que se le llama Base de Datos (BD) o Memoria de Trabajo.

*Interface con el Usuario:* el usuario plantea los problemas al SE, recibe preguntas del mismo y ofrece las explicaciones necesarias. Se encarga de establecer el protocolo de diálogo mediante parámetros, menús, íconos o lenguaje natural, debe ser capaz de argumentar las razones por las que formula cierta pregunta, hace un razonamiento y llega a una conclusión específica.

## **Tipos de Sistemas Expertos**

### *Basados en reglas*

Los sistemas basados en reglas (SBR) trabajan mediante la aplicación de reglas, comparación de resultados y aplicación de las nuevas reglas basadas en una situación modificada (Rodríguez et al., 2012). También pueden trabajar por inferencia lógica dirigida, al empezar con una evidencia inicial en una determinada situación y dirigirse hacia la obtención de una solución, o bien con hipótesis sobre las posibles soluciones y volver hacia atrás para encontrar una evidencia existente que apoye una hipótesis en particular.

### *Basados en casos*

El razonamiento basado en casos (RBC) es el proceso de solucionar nuevos problemas a partir de las soluciones de problemas anteriores (Hinkle and Toomey, 1995). El RBC es una manera de razonar a través de analogías. Se ha argumentado que este no sólo es un método poderoso para el razonamiento de computadoras, sino que es usado por las personas para solucionar problemas cotidianos.

### *Basados en redes bayesianas*

Según (Henrion, 2013) una red bayesiana, es un modelo gráfico probabilístico (un tipo de modelo estático) que representa un conjunto de variables aleatorias y sus dependencias condicionales a través de un DAG. Por ejemplo según (Quintanar, 2007), una red bayesiana puede representar las relaciones probabilísticas entre enfermedades y síntomas. Dados los síntomas, la red puede ser usada para computar las probabilidades de la presencia de varias enfermedades.





### *Sistemas de expertos difusos*

Los Sistemas Expertos difusos se desarrollan usando el método de lógica difusa. Esta técnica emplea el modelo matemático de conjuntos difusos, simula el proceso del razonamiento normal humano, al permitir a la computadora comportarse menos precisa y más lógicamente que una convencional. Este enfoque es utilizado porque la toma de decisiones no es siempre una cuestión de blanco y negro, verdadero o falso; a veces involucra áreas grises y el término “quizás” (Isermann, 1998).

### **Los Sistemas Expertos en el diagnóstico**

Una de las subáreas de aplicación de la IA es el diagnóstico en general. El diagnóstico es la tarea de identificar las causas del mal funcionamiento de algún dispositivo y se puede formular como "dado un conjunto de síntomas y la descripción de un dispositivo, encontrar una explicación a esos síntomas", similar a un problema de clasificación cuando existe un reducido número de posibles explicaciones (Arbolaez, 2012).

Habitualmente, el proceso de diagnóstico encuentra las causas internas que explican los síntomas observados. De forma resumida, los pasos principales para llevar a cabo diagnóstico son los siguientes:

1. Detectar síntomas: dadas unas observaciones sobre un sistema, en este primer paso se seleccionan las que corresponden a situaciones no deseadas.
2. Generar hipótesis: en un segundo paso se generan hipótesis de causas que explican los síntomas.
3. Discriminar hipótesis: si existen varias causas alternativas que explican los mismos síntomas es necesario solicitar información adicional sobre nuevas observaciones del sistema que permitan discriminar entre hipótesis. Tras obtener dicha información, el proceso se repite de forma iterativa hasta alcanzar un conjunto de hipótesis satisfactorio.

### **2. Desarrollo del prototipo del sistema experto para el diagnóstico de fallos: “CTEXPERTO”**

Las calderas que se utilizan en esta investigación, se encargan de suministrar el vapor para alimentar los turbogeneradores de 158 MW (Domínguez et al., 2008); son de domo





simple y de circulación natural de agua, diseñadas para usar petróleo como combustible. Este tipo de caldera es conocida como "El Paso".

*Fallos fundamentales que afectan las bombas de agua de alimentar caldera para la confección de las bases de conocimientos*

Para determinar la raíz de los síntomas que provocan los fallos se hace un seguimiento detallado del problema a través de las siguientes interrogantes:

- ¿Cómo estuvo incurriendo el daño?
- ¿Qué consecuencias resultaron?

A continuación se presentan los síntomas fundamentales que padecen las bombas de agua de alimentación junto con la descripción de las causas que los provocan y los parámetros que intervienen para su identificación.

1. La bomba se sobrecalienta y se pega:

Causas posibles:

- Margen insuficiente entre la presión de succión y la presión de vapor.
- Empuje excesivo cuasado por un fallo del dispositivo de balance hidráulico si lo hay.
- Desalineamiento.
- Parte giratoria que roza con una parte estacionaria.
- Cojinetes gastados

Parámetros:

- Temperatura en el aceite de las chumaceras.
- Temperatura superficial a los lados de las chumaceras.

2. La bomba vibra o hace ruido:

Causas Posibles:

- Desalineamiento:
  - ✓ Paralelo
  - ✓ Angular
  - ✓ Severo





- ✓ En cojinetes
- Desbalance:
  - ✓ Estático
  - ✓ Par
  - ✓ Dinámico
  - ✓ De rotores en voladizo
- Holgura
  - ✓ En la estructura
  - ✓ En la sujeción
  - ✓ Eje-Agujero
- Rodamientos dañados
  - ✓ Pista exterior
  - ✓ Pista interior
  - ✓ Bolas o Rodillos
  - ✓ Caja que contiene a las bolas

Parámetros:

- Amplitud de vibraciones
- Espectro de vibraciones

3. La bomba requiere de esfuerzo excesivo:

Causas posibles:

- Velocidad muy alta
- Dirección de rotación invertida
- Cuerpos extraños en el impulsor
- Desalineamiento
- Sobreconsumo por desgaste

Parámetros:

- Presión de sellaje
- Presión de balance
- Presión de descarga
- Presión de succión
- Potencia de la bomba

### **Diseño del Sistema Experto**

A continuación se muestra como está conformado el SE:



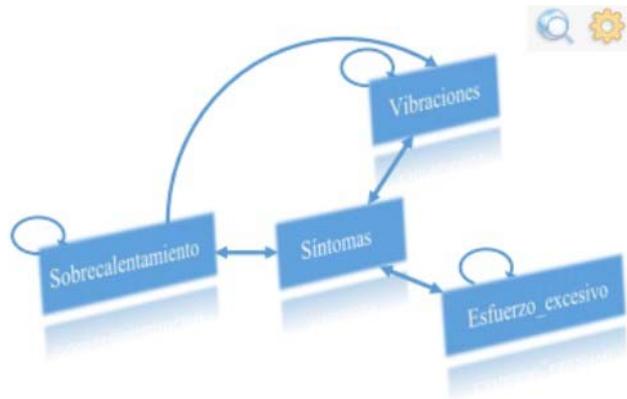


Figura 2. Relación entre las bases de conocimientos.

Como se puede observar el sistema cuenta con cuatro bases de conocimientos, de ellas una es la BC principal o nodo principal: Síntomas. A partir de allí el usuario puede acceder a las demás bases de conocimientos.

El sistema da la posibilidad de volver a consultar la BC una vez realizado el proceso de inferencia, volver a la BC principal Síntomas o simplemente salir del SE.

#### *UCShell para conformar el SE*

UCShell (Shell de la Universidad Central): es un ambiente de desarrollo integrado, que permite la creación de proyectos y bases de conocimiento. Las bases de conocimiento del sistema UCShell usan las "Reglas de Producción" como forma de representación del conocimiento. El sistema dispone de un ambiente desde el cual se pueden editar, compilar o ejecutar las bases de conocimiento.

Una base de conocimiento para el sistema UCShell está compuesta por cuatro partes, tres son opcionales y una, denominada bloque de acciones, es obligatoria. La figura 3 muestra un esquema de su sintaxis.

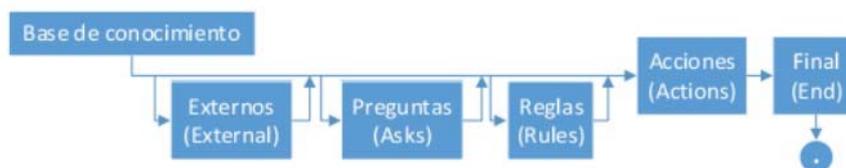


Figura 3. Esquema de la Base de Conocimientos



Luego de elegir la herramienta de desarrollo se crea cada una de las bases de conocimientos organizadas dentro de un proyecto titulado CTExperto. A la hora de escribir los atributos en la BC no se tuvo en cuenta las tildes para evitar errores. A continuación se muestra un resumen de cada una de ellas.

### Base de conocimiento: Síntomas.kbs

En la siguiente tabla se muestran los conceptos fundamentales de esta BC.

Tabla 1. Conceptos fundamentales de la BC Síntomas.kbs.

Concepto	Atributo*	Dominio
Síntoma presente en la BAA	<i>sintoma</i>	La bomba se sobrecalentó y se pega, La bomba vibra o hace ruido, La bomba requiere de esfuerzo excesivo, Ninguno de estos
Elección de síntomas	<i>sintoma_escogido</i>	si, no

\* En la columna de los atributos describe los atributos reales del SE, en los cuales no se han tenido en cuenta las tildes para evitar posibles errores.

### Base de conocimiento: Sobrecalentamiento.kbs

En esta BC el sistema pregunta al usuario por las temperaturas en el aceite de las chumaceras y por la temperatura superficial a ambos lados de las mismas para determinar las causas del sobrecalentamiento.

Tabla 2. Conceptos fundamentales de la BC Sobrecalentamiento.kbs.

Concepto	Atributo*	Dominio
Temperatura mayor de 75°C en el aceite de las chumaceras	<i>temp_chumaceras</i>	Chumacera 1, Chumacera 2, Chumacera 3, Chumacera 4, Ninguna
Estado de las temperaturas a los lados de la chumacera	<i>temp_lados_chumacera</i>	Iguales, Diferentes
Causa encontrada	<i>causa</i>	si, no

\* En la columna de los atributos describe los atributos reales del SE, en los cuales no se han tenido en cuenta las tildes para evitar posibles errores.

### Base de conocimiento: Vibraciones.kbs





A continuación se muestra una tabla con los conceptos fundamentales de esta BC.

Tabla 3. Conceptos fundamentales de la BC Vibraciones.kbs.

Concepto	Atributo	Dominio
Valor de la amplitud de las vibraciones	<i>valor_vib_chumaceras</i>	Valor numérico
Dirección de las vibraciones	<i>direccion</i>	Radial, Axial, Ambas direcciones
Fase de las vibraciones	<i>fase</i>	Está en fase, El desfase es de 180 grados, El desfase está entre 0 y 180 grados
Presencia de armónicos	<i>vib_1, vib_2, vib_3, vib_4, vib_5, vib_6, vib_7, vib_8, vib_9</i>	Si, No
Armónico más alto	<i>vib_mas_alta</i>	Primero, Segundo, Tercero, Cuarto, Quinto, Sexto, Séptimo, Octavo, Noveno
Presencia de holgura mecánica	<i>holgura_mecanica</i>	Si, No
Diámetro medio del rodamiento	<i>D</i>	Valor numérico
Diámetro de las bolas o rodillos	<i>d</i>	Valor numérico
Velocidad del eje	<i>N</i>	Valor numérico
Número de bolas o rodillos	<i>n</i>	Valor numérico
Ocurrencia de armónicos en FTF	<i>existe_FTF</i>	Si, No
Ocurrencia de armónicos en BSF	<i>existe_BSF</i>	Si, No
Ocurrencia de armónicos en BPFO	<i>existe_BPFO</i>	Si, No
Ocurrencia de armónicos en BPFI	<i>existe_BPFI</i>	Si, No
Existencia de bandas laterales	<i>existen_bandas_laterales</i>	Si, No

\* En la columna de los atributos describe los atributos reales del SE, en los cuales no se han tenido en cuenta las tildes para evitar posibles errores.

En esta BC el sistema junto con el usuario realiza un análisis de vibraciones en la bomba, primeramente revisa la amplitud de las mismas y de no encontrarse en un valor adecuado





examina el espectro de vibraciones en busca de alguna anomalía que identifique la causa de las mismas.

### Base de conocimiento: *Esfuerzo\_excesivo.kbs*

A continuación se muestra una tabla con los conceptos fundamentales de esta BC.

Tabla 4. Conceptos fundamentales de la BC Síntomas.kbs.

Concepto	Atributo*	Dominio
Presión de descarga	<i>presion_descarga</i>	Valor numérico
Presión de succión	<i>presion_succion</i>	Valor numérico
Potencia de la bomba	<i>potencia_bomba</i>	Valor numérico
Valor del amperaje	<i>amperaje</i>	Valor numérico

\* En la columna de los atributos describe los atributos reales del SE, en los cuales no se han tenido en cuenta las tildes para evitar posibles errores.

En esta BC se realiza un análisis funcional de la bomba, se comparan los valores de carga, potencia y amperaje con sus respectivos valores nominales y se determina su estado.

### 3. Análisis y discusión de los resultados

Para realizar la prueba del CTExperto se escogió a un operario al azar con el objetivo de simular una situación donde no se encontraba el experto y verificar si este podía realizar la tarea del diagnóstico con la ayuda de la nueva herramienta.

Primeramente se procedió a inicializar el sistema experto, para ello se ejecutó la aplicación UCShell IDE 3.0.exe y a continuación se cargó el proyecto titulado CTExperto. Luego se compiló la base de conocimientos Síntomas.kbs que es la principal y se ejecutó posteriormente de modo que apareció la primera interfaz, que se muestra a continuación en la figura 4:



Figura 4. Interfaz de presentación del CTExperto.

Al usuario hacer click sobre el botón Accept el sistema comienza con la primera interrogante; para comenzar el diagnóstico este solicita al usuario el síntoma presenta en la bomba, ver figura 5.

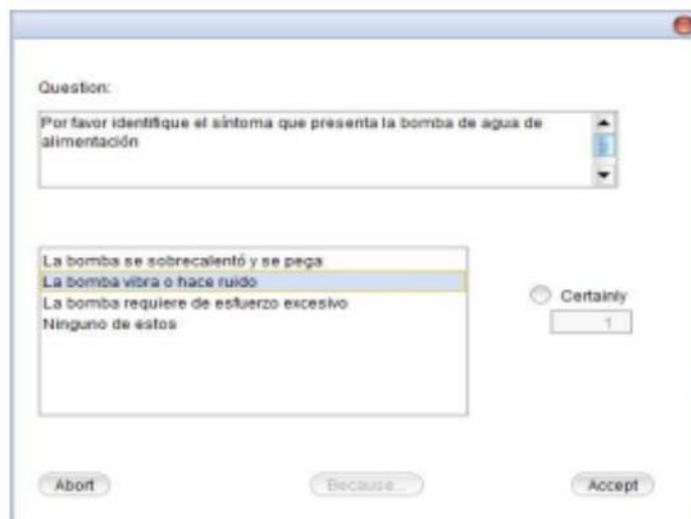


Figura 5. Interfaz para elegir el síntoma presente en la bomba.

### *Análisis de vibraciones*

Se inició el análisis con el síntoma “La bomba vibra o hace ruido”. Luego el sistema le lanza la segunda pregunta, para saber el tipo de bomba a diagnosticar con el objetivo de

ubicar la severidad de las vibraciones atendiendo al tipo de bomba y el operador respondió lo siguiente como se observa en la figura 6:

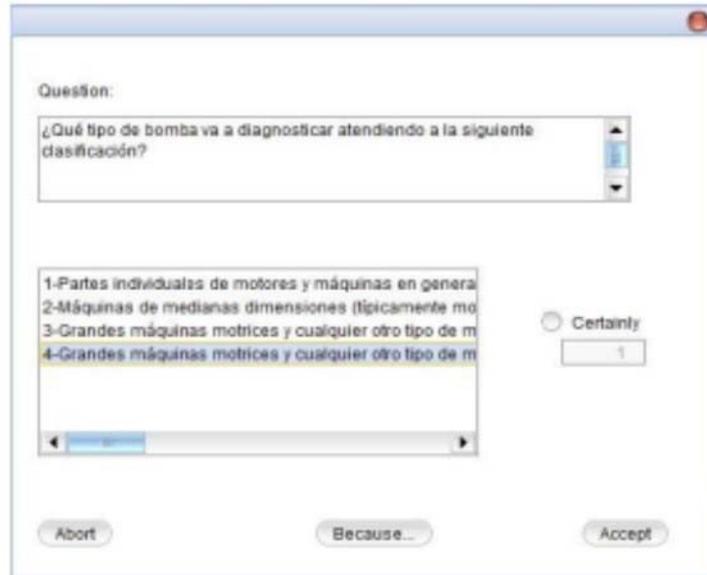


Figura 6. Interfaz con el tipo de bomba a diagnosticar.

El sistema continuó con el proceso de inferencia y le pidió al usuario el valor de la amplitud de las vibraciones, a lo que este le contestó lo siguiente:

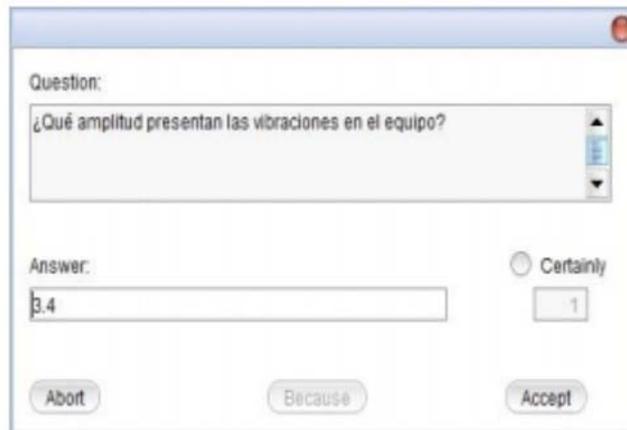


Figura 7. Interfaz para introducir el valor de la amplitud de las vibraciones.

El sistema a continuación preguntó por las amplitudes de los armónicos y el usuario respondió luego de hacer uso del espectro de vibraciones, a continuación se presenta un ejemplo de la pregunta realizada en la figura 8:

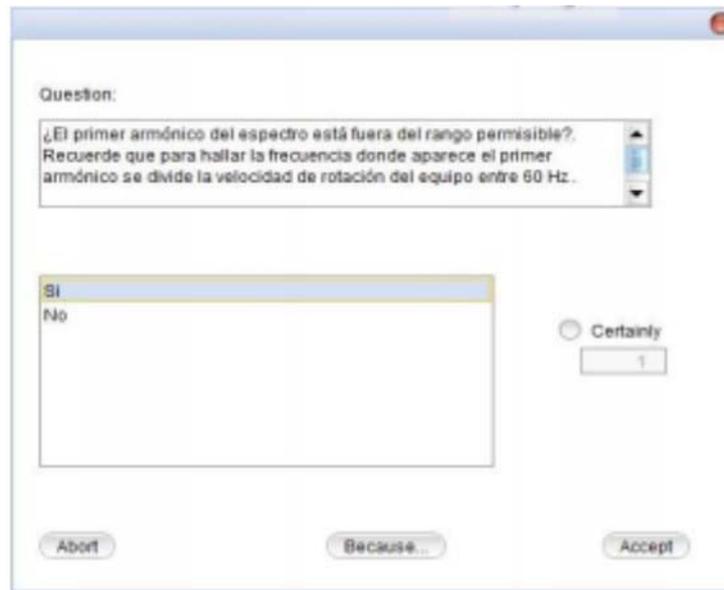


Figura 8. Interfaz de presencia de armónicos.

Seguidamente el sistema pregunta si a algunos de estos armónicos lo acompaña un armónico de baja frecuencia a lo que el operador responde que NO atendiendo al espectro de vibraciones.

Entonces el sistema lanzó la primera conclusión, mostrada en la figura 9:

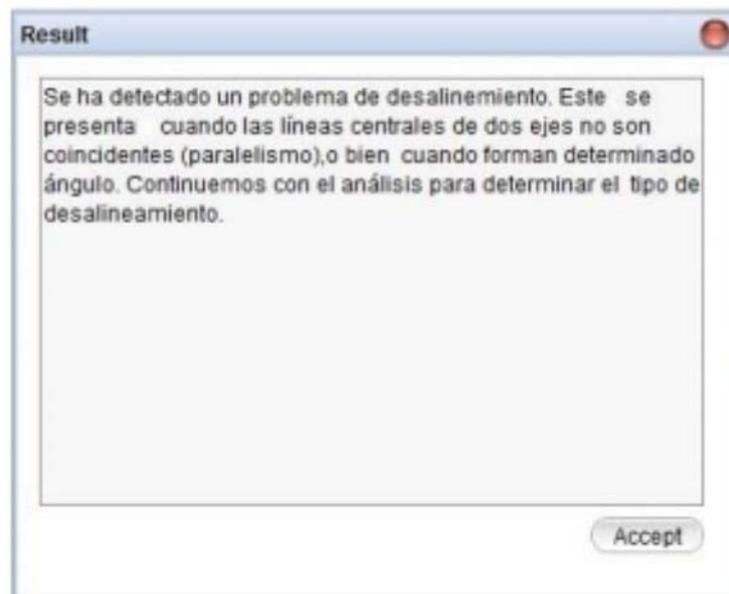


Figura 9. Primera conclusión presentada por el sistema.

Después para continuar con el análisis el sistema preguntó por la dirección de las vibraciones, a lo que el operador responde que vibra en dirección axial:

Seguidamente el sistema solicitó información acerca del armónico predominante, como se muestra en la figura 10:

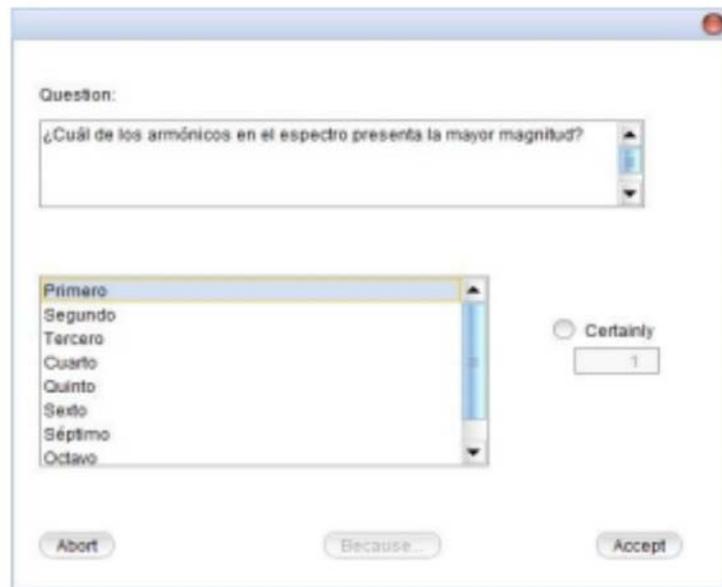


Figura 10. Interfaz para elegir el armónico de mayor amplitud.

El operador eligió el primero como se observa en el espectro y el sistema arrojó la segunda conclusión (figura 11) donde refleja la causa de las vibraciones y la recomendación que el SE le hace al usuario:

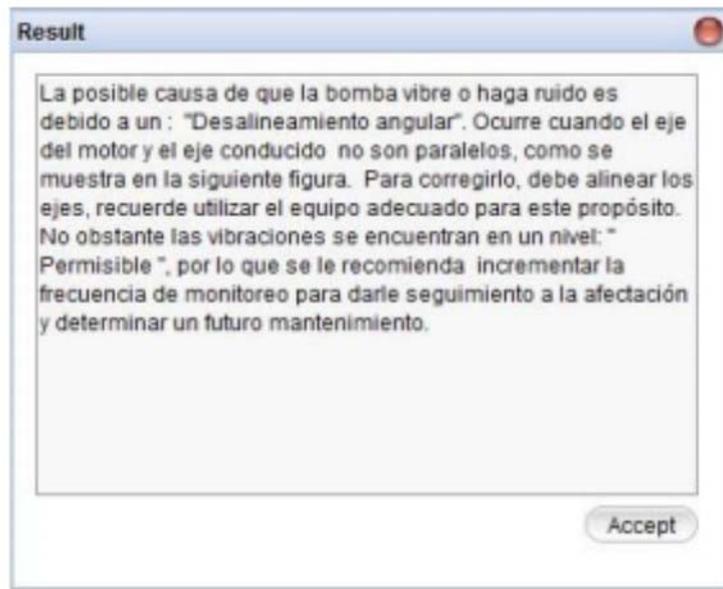


Figura 11. Segunda conclusión presentada por el sistema.

Finalizado el análisis se comprobó como el operador sin tener un conocimiento acerca del tema de vibraciones pudo encontrar la causa que originaba las mismas con ayuda del SE.

#### 4. Conclusiones

1. Se puede ver un Sistema Experto como: dado un conjunto de síntomas y la descripción de un dispositivo, encontrar una explicación a esos síntomas.
2. Las reglas que componen las bases de conocimiento del CTExperto son el resultado de un análisis de las causas que originan los principales síntomas de fallas en las bombas de agua de alimentar caldera.
3. Tras el proceso de la Ingeniería del Conocimiento se construyen cuatro Bases de Conocimiento con UCSHELL, las cuales fueron validadas con el experto y otros especialistas del grupo de diagnóstico.
4. La CTE "Carlos M. de Céspedes" cuenta ahora con un Sistema Experto capaz de simular la manera de actuar de un experto humano y trabajar con eficacia ante la presencia de estos.

#### 5. Referencias bibliográficas

ARBOLAEZ, D. A. S. 2012. Análisis de la aplicabilidad de los métodos de solución de problemas de la inteligencia artificial en el problema diagnóstico.



- BADARÓ, S., IBAÑEZ, L. J. & AGÜERO, M. J. 2013. Sistemas Expertos: Fundamentos, Metodologías y Aplicaciones. Ciencia y Tecnología, 13, 349-364.
- BELLO, R., VALDIVIA, Z., GARCÍA, M. & REYNOSO, L. 2002. Aplicaciones de la inteligencia artificial. Ediciones de la Noche, Guadalajara, Jalisco, México, 970(27), 177.
- CASTILLO, E. & ALVAREZ, E. 1991. Expert systems: uncertainty and learning, WIT Press.
- CHERKASSKY, V. M. 1986. Bombas, ventiladores, compresores, Moscú, Mir.
- DOMÍNGUEZ, P. L. H., PUIG, M. C., IZNAGA, J. M. D. O. & GARCÍA, S. F. F. 2008. Optimización del mantenimiento preventivo utilizando las técnicas de diagnóstico integral. Fundamento teóricopráctico. Ingeniería Energética, 29(2), 14-25.
- GARCÍA, A. P. 2013. Características de los equipos principales instalados en las plantas térmicas, URQUIZA, M. M. C. .
- GARCÍA, E., MORANT, F., CORRECHER, A., QUILES, E. & LLANES, O. 2009. Seguimiento de Estado, Diagnóstico de Fallos y Mantenimiento Industrial: una visión integrada. Proceedings of the Novena Semana Tecnológica, 19-23.
- HENRION, M. 2013. Practical issues in constructing a Bayes' belief network. arXiv preprint arXiv:1304.2725.
- HINKLE, D. & TOOMEY, C. 1995. Applying case-based reasoning to manufacturing. AI magazine, 16(1), 65.
- ISERMANN, R. 1998. On fuzzy logic applications for automatic control, supervision, and fault diagnosis. Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on, 28, 221-235.
- KOPPEN-SELIGER, B. & FRANK, P. Fault detection and isolation in technical processes with neural networks. Decision and Control, 1995., Proceedings of the 34th IEEE Conference on, 1995. IEEE, 2414-2419
- MOLINA, A. L. J. 2011. Factibilidad técnico- económica para la introducción del mantenimiento por diagnóstico. Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico, Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez"
- O'LEARY, D. E. 2008. Expert Systems. AI Magazine, 18(3), 49-52.
- ORTEGA, R. H., MÉNDEZ, C. A. C., CASTAÑEDA, F. & RODRÍGUEZ, J. L. M. 2013. Sistema Basado en Casos para el diseño de engranajes cilíndricos con contacto exterior. Ingeniería Mecánica, 16, 152-160.



PYTEL, P., UHALDE, C., RAMÓN, H. D., CASTELLO, H., TOMASELLO, M., POLLO CATTANEO, M. F., BRITOS, P. V. & GARCÍA MARTÍNEZ, R. Ingeniería de requisitos basada en técnicas de ingeniería del conocimiento. XIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación, 2011.

QUINTANAR, T. L. 2007. Sistemas Expertos y sus aplicaciones. Tesis de Licenciatura Universidad autónoma del Estado de Hidalgo.

RODRÍGUEZ, J. L. M., FERREIRO, A. M. B. & MÉNDEZ, C. A. C. 2012. Utilización de Sistemas Basados en Reglas y en Casos para diseñar transmisiones por tornillo sinfín. Ingeniería Mecánica, 15, 01-09.

ROLSTON, D. W., GAMA, A. P. & ZISKIEND, I. T. 1990. Principios de inteligencia artificial y sistemas expertos, McGraw-Hill.

ROMÁN, J. V., GARCÍA, R. C. & JJ. GARCÍA RUEDA 2006. Inteligencia en redes de comunicaciones. Sistemas basados en conocimiento. Minería de Datos. Universidad Carlos III, Madrid.

VEGEGA, C., PYTEL, P., RAMÓN, H. D., RODRÍGUEZ, D., POLLO CATTANEO, M. F., BRITOS, P. V. & GARCÍA MARTÍNEZ, R. Formalización de Dominios de Negocio para Proyectos de Explotación de Información basada en Técnicas de Ingeniería del Conocimiento. XVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación, 2012.