Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales

TRABAJO DE DIPLOMA

"Sistema Experto para el diagnóstico de fallos en bombas de agua de alimentar calderas"

Autor: Alejandro Morejón Ortega

Tutor(es):Ing. Ailet Abreu López

Dr. José Rafael Abreu García

Consultante: Msc. Marcos Consuegra Urquiza

Santa Clara

2015

"Año 57 de la Revolución"

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales

TRABAJO DE DIPLOMA

"Sistema Experto para el diagnóstico de fallos en bombas de agua de alimentar calderas"

Autor: Alejandro Morejón Ortega

Email: amorejon@uclv.edu.cu

Tutor: Ing. Ailet Abreu López

Dr. José Rafael Abreu García

Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV

Email: aileta@uclv.edu.cu

abreu@uclv.edu.cu

Consultante: Msc. Marcos Consuegra Urquiza

Esp. Mantenimiento Industrial, CTE Carlos M. de Céspedes

Email: marcos@ctecmc.une.cu

Santa Clara

2015

"Año 57 de la Revolución"

PENSAMIENTO

"Sé el cambio que quieres ver en el mundo"

Gandhi

DEDICATORIA

A mis padres, a mis hermanos y mi esposa porque ustedes son mi inspiración en cada momento.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia por ser mi apoyo durante toda mi vida, mis padres, Mayito y Baby, mis hermanos Arístides y Alfredo , mis abuelos, mi esposa Heilin y todos aquellos que posibilitaron que mi transición hasta aquí fuera constructiva y placentera.

A mis amigos de todos los tiempos, especialmente los del cuarto 210, Keinsy, Fide, Jorge, Raidán, Rache, Ruha, Andrés, Lily y los camagüeyanos por los años que llevamos juntos.

A mis tutores, Ailet, el profe Abreu por su dedicación.

A la profe María por todo lo que he aprendido de ella.

A los consultantes de la refinería Marcos, German, Silvino, Paco, el Guille cuyo aporte fue fundamental en la realización de este trabajo.

A todos los profesores tanto de las instituciones académicas como de la vida que hicieron posible este resultado.

En fin la lista sería interminable por lo cual mi agradecimiento a todo aquel que se vea reflejado en estos resultados por el amor que ha sido capaz de ofrecer.

RESUMEN

El diagnóstico de fallas 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 creado 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.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO i

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTOS iii

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1. BREVE RESEÑA SOBRE SISTEMAS EXPERTOS EN EL DIAGNÓSTICO 5

1.1 Sistemas Expertos 5

1.1.1 Definición de Sistema Experto 6

1.1.2 Características de los Sistemas Expertos 6

1.1.3 Ventajas de los Sistemas Expertos 7

1.1.4 Arquitectura de un Sistema Experto 8

1.1.5 Adquisición del conocimiento 11

1.1.6 Tipos de Sistemas Expertos 12

1.1.7 Etapas en el desarrollo de un Sistema Experto 13

1.2 Los Sistemas Expertos en el diagnóstico 15

1.2.1 Sistemas Expertos en problemas de diagnóstico en Ingeniería 17

1.3 Conclusiones parciales 19

CAPÍTULO 2. DESARROLLO DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA EXPERTO PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLOS: "*CTEXPERTO*" 20

2.1 Características generales del proceso tecnológico 20

2.1.1 Breve reseña histórica 21

2.1.2 Características fundamentales de las calderas objeto de estudio 21

2.2 La estación de agua de alimentar 23

2.2.1 Fallas fundamentales que afectan las bombas de agua de alimentar caldera para la confección de las bases de conocimientos 24

2.3 Diseño del Sistema Experto 26

2.4 Elección de la herramienta de desarrollo, o lenguaje de programación 27

2.4.1 Generalidades de *UCShell* 29

2.4.2 Sintaxis de las bases de conocimiento 29

2.5 Desarrollo, refinamiento, mantenimiento y puesta al día del Sistema Experto 36

2.5.1 Base de conocimiento: Síntomas.kbs 36

2.5.2 Base de conocimiento: Sobrecalentamiento.kbs 36

2.5.3 Base de conocimiento: Vibraciones.kbs 37

2.5.4 Base de conocimiento: Esfuerzo_excesivo.kbs 38

2.6 Conclusiones parciales 40

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 41

3.1 Prueba del CTExperto 41

3.1.1 Análisis de vibraciones 43

3.1.2 Análisis de temperatura 46

3.1.3 Análisis de esfuerzo excesivo 48

3.2 Análisis económico 51

3.3 Conclusiones del capítulo 53

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 54

Conclusiones 54

Recomendaciones 54

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 56

ANEXOS 59

Anexo I Parámetros técnicos fundamentales de los generadores de vapor de la Central Termoeléctrica de Cienfuegos. 59

Anexo II Especificaciones de la bomba de alimentación 60

Anexo III Especificaciones del motor de la bomba de alimentación 60

Anexo IV Búsqueda de un atributo deducible con *FIND* 61

Anexo V Código de la BC Síntomas.kbs.....62

Anexo VI Código de la BC Sobrecalentamiento.kbs.....64

Anexo VII Código de la BC Vibraciones.kbs 68

Anexo VIII Norma ISO 10816.....86

Anexo IX Código de la BC Esfuerzo_escesivo.kbs.....87

Anexo X Amplitud de las vibraciones.....90

Anexo XI Espectro de vibraciones.....91

INTRODUCCIÓN

En la actualidad una de las tareas más importantes de la ingeniería consiste en aumentar la fiabilidad, seguridad, protección medioambiental y disponibilidad de los procesos industriales (Vizcaya et al., 2011). Esta necesidad se observa en procesos críticos como los eléctricos, químicos, farmacéuticos o en cualquier tipo de proceso de fabricación automatizado como son las líneas de montajes y construcción de automóviles.

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 (Koppen-Seliger and Frank, 1995, Domínguez et al., 2008, García et al., 2009).

Un buen ejemplo de la relevancia de la detección y el diagnóstico es una planta nuclear, donde después de ocurrir un fallo pueden generarse hasta diez alarmas en unos pocos segundos. El diagnóstico de un proceso bajo fallo es difícil (Valenzuela, 2007), pero de vital importancia para el operador de la planta. La mayoría de los sistemas de control usados en la industria actual son todavía ineficientes al comunicar la causa primaria de una anomalía al operador, lo que dificulta la toma de decisiones adecuadas.

A partir del surgimiento de este nuevo tema en las estrategias de control se han desarrollado diferentes técnicas para realizar el diagnóstico de fallos. 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.

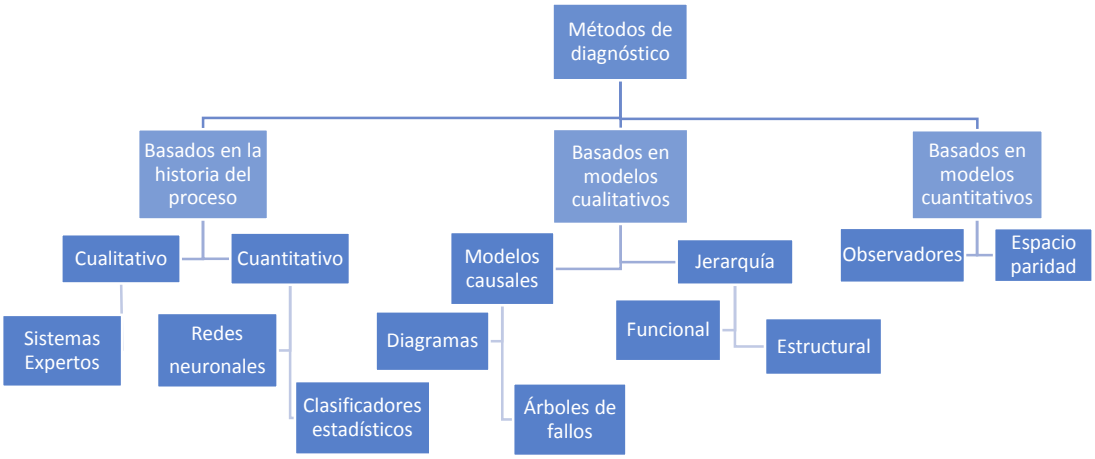


Figura 1. Clasificación de los algoritmos de diagnóstico.

De manera más general se pueden clasificar estos métodos en dos grupos:

1. *Los basados en modelos cualitativos y cuantitativos*. En este punto se pueden mencionar tres métodos fundamentales:

- Observadores.
- Espacio de paridad.
- Árboles de fallos.

2. *Los basados en la historia del proceso* entre los que se pueden mencionar:

- Sistemas Expertos.
- Clasificadores estadísticos.
- Redes neuronales.

Cada una de las técnicas tiene sus ventajas y desventajas con respecto a las otras. Por ejemplo la gran desventaja de los métodos basados en redes neuronales artificiales es que necesitan de un conjunto de datos (Koppen-Seliger and Frank, 1995), que representen el comportamiento fallido del proceso, para su entrenamiento. En los métodos basados en modelos analíticos (Miguel and Perán, 1997), su principal desventaja está dada por la dependencia de un modelo que represente el comportamiento dinámico del proceso con los

correspondientes errores que se pueden cometer en la modelación y el alto costo computacional que puede implicar la solución en línea del modelo.

En la industria energética cubana es poco común encontrar la aplicación de sistemas de mantenimiento que operen de manera preventiva. Esto conlleva a roturas de equipos y a la parada de entidades industriales con las consiguientes pérdidas económicas.

En múltiples ocasiones la CTE "Carlos M. de Céspedes" ha visto su funcionamiento comprometido debido a fallos en los procesos que en ella se realizan. Según (Molina, 2011) los registros demuestran 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 de la CTE "Carlos M. de Céspedes" solo 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 (con la consiguiente afectación al proceso global de la planta) y emplear considerable tiempo y recursos en localizar el fallo y solucionarlo.

Teniendo en cuenta estos elementos se establece como situación problémica de esta investigación:

SITUACIÓN PROBLÉMICA:

No se conoce hasta el momento si existe algún sistema de detección y diagnóstico de fallos en las bombas de agua de alimentar caldera de ninguna central termoeléctrica en el país. Especialmente la CTE "Carlos M. de Céspedes" carece de un sistema capaz de diagnosticar fallos o sistema similar.

A partir de lo anterior se puede plantear como problema científico:

Problema Científico: Las bombas de agua de alimentar caldera de la unidad 4 de la Central Termoeléctrica "Carlos M. de Céspedes" no presentan un sistema capaz de diagnosticar posibles causas de síntomas de fallos mecánicos.

A partir de la situación planteada, surge la siguiente **interrogante científica**:

¿Será posible desarrollar un Sistema Experto para el diagnóstico de posibles causas de síntomas de fallos mecánicos en las bombas de agua de alimentar caldera de la unidad 4 de la Central Termoeléctrica "Carlos M. de Céspedes"?

La hipótesis de esta investigación se fundamenta en los resultados de la revisión bibliográfica que se presenta en el Capítulo 1.

Hipótesis: Si se desarrolla un sistema capaz de diagnosticar posibles causas de síntomas de fallos mecánicos en las bombas de agua de alimentar caldera se podrá actuar con mayor eficacia ante la presencia de los mismos.

Atendiendo a los elementos abordados se establecen los objetivos de esta investigación:

Objetivo General:

- Diseñar un Sistema Experto utilizando métodos computacionales para el diagnóstico de posibles causas de síntomas de fallos mecánicos en las bombas de agua de alimentar caldera de la unidad 4 de la Central Termoeléctrica "Carlos M. de Céspedes".

Objetivos específicos:

- Caracterizar los Sistemas Expertos con el fin de diagnosticar fallas.
- Caracterizar las bombas de agua de alimentar caldera de la unidad 4 de la Central Termoeléctrica "Carlos M. de Céspedes".
- Determinar los fallos fundamentales que afectan las bombas de agua de alimentación,
- Desarrollar el algoritmo computacional para la detección de posibles causas de síntomas de fallos mecánicos.

En vistas de cumplir los objetivos propuestos y resolver la problemática el informe final queda estructurado de la siguiente manera:

Capítulo 1: Breve reseña sobre Sistemas Experto en el diagnóstico.

Capítulo 2: Desarrollo del Sistema Experto para el diagnóstico de fallos: "*CTEXPERTO*".

Capítulo 3: Análisis de los resultados.

CAPÍTULO 1. BREVE RESEÑA SOBRE SISTEMAS EXPERTOS EN EL DIAGNÓSTICO

El presente capítulo recoge el resultado del estudio referente a la construcción de Sistemas Expertos para el diagnóstico. Para ello se comienza con una caracterización de los mismos y luego se analiza antecedentes de su utilización en temas relacionados con el diagnóstico.

1.1 Sistemas Expertos

No hace mucho tiempo, se creía que algunos problemas como la demostración de teoremas, el reconocimiento de la voz y el de patrones, ciertos juegos (como el ajedrez o las damas), y sistemas altamente complejos de tipo determinista o estocástico, debían ser resueltos por personas, dado que su formulación y resolución requieren ciertas habilidades que solo se encuentran en los seres humanos (por ejemplo, la habilidad de pensar, observar, memorizar, aprender, ver u oler). Sin embargo, el trabajo realizado en las tres últimas décadas por investigadores procedentes de varios campos, muestra que muchos de estos problemas pueden ser formulados y resueltos por máquinas (O'Leary, 2008).

El amplio campo que se conoce como *Inteligencia Artificial* (IA) trata sobre estos problemas, que en un principio parecían imposibles, intratables y difíciles de formular al utilizar ordenadores. A. Barry y E.A. Feigenbaum, dos de los pioneros de la investigación en IA, definen esta como sigue (Stevens, 1984):

La Inteligencia Artificial es la parte de la Ciencia que se ocupa del diseño de sistemas de computación inteligentes, es decir, sistemas que exhiben las características que asociamos a la inteligencia en el comportamiento humano que se refiere a la comprensión del lenguaje, el aprendizaje, el razonamiento, la resolución de problemas, etc.

Hoy en día, el campo de la IA engloba varias subáreas tales como los Sistemas Expertos (SE), la demostración automática de teoremas, el reconocimiento de la voz y de patrones, el procesamiento del lenguaje natural, la visión artificial, la robótica y las redes neuronales.

1.1.1 Definición de Sistema Experto

En la literatura existente se pueden encontrar muchas definiciones de SE. Por ejemplo (Castillo and Alvarez, 1991), plantea que estos son máquinas que piensan y razonan como un experto lo haría.

Desde entonces han surgido otras definiciones, debido al rápido desarrollo de la tecnología como las dadas en (Stevens, 1984, Quintanar, 2007, Badaró et al., 2013). El sentido de estas definiciones puede resumirse como sigue:

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. Puede entenderse más fácilmente como un programa o algoritmo capaz de resolver problemas complejos sobre un dominio específico, a un nivel comparable al de un experto humano en el citado dominio. Se entiende por experto humano a la persona que domina muy bien una disciplina, que es perito en un área determinada.

1.1.2 Características de los Sistemas Expertos

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.

Los SE se aplican a problemas complejos donde los sistemas convencionales de software no son suficientes. La naturaleza de estos problemas requiere ciertas características:

- Flexibilidad para abordar diferentes problemas.
- Emulación de comportamiento racional como mecanismo de resolución.
- Operación en un entorno rico y con mucha información.
- Uso de información simbólica en el proceso de razonamiento.
- Uso de interfaces naturales en su comunicación con el usuario.
- Capacidad de aprendizaje como método de adaptación.

En la construcción de sistemas con estas características se debe:

- Mantener el conocimiento del dominio y de solución de problemas separado del mecanismo de control de la resolución.
- Permitir una interacción estrecha con el usuario y/o entorno.
- Para entender el diseño de los SE es necesario conocer los roles de quienes interactúan con el sistema y que al mismo tiempo formen parte del mismo. Los expertos humanos son los especialistas en el tema de estudio que aportan su experiencia (conocimiento) en una forma ordenada y estructurada, además de un conjunto de relaciones bien definidas y explicadas para que sea todo, almacenado en la BC; mientras que los IC son los encargados de extraer el conocimiento de los expertos y traducirlos a un lenguaje que sea inteligible por el SE, se crean así las BC (O'Leary, 2008).

Un SE puede actuar en una cantidad de papeles diferentes:

- *Asistente*: Invocado por el usuario para resolver una tarea específica como parte de un ejercicio más amplio.
- *Crítico*: Revisa trabajos realizados por otros y comenta su precisión y consistencia.
- *Segunda opinión*: Ejecuta una tarea y compara sus resultados con los del usuario.
- *Consultante*: Advierte o previene al usuario.
- *Tutor*: Entrena al usuario en ejecutar una tarea experta.
- *Autómata*: Completa tareas automáticamente e independientemente del usuario.

1.1.3 Ventajas de los Sistemas Expertos

Los SE tienen ventajas y desventajas cuando se comparan con otras soluciones como el software convencional o las proporcionadas por los humanos.

Ventajas:

- Fácil modificación.
- Consistencia en las respuestas (los expertos humanos pueden diferir en sus explicaciones, incluso un mismo experto puede responder de forma diferente en momentos diferentes).
- Gran accesibilidad (trabajan las 24 horas todos los días).
- Preservación de la experticia (constituye una memoria institucional y poseen la capacidad para adquirir nuevo conocimiento y perfeccionar el que poseen).
- Solución de problemas que incluyen datos incompletos.
- Explicación de soluciones (justifica sus conclusiones y explica por qué hace una pregunta).
- Permite evaluar el efecto de nuevas estrategias al añadir o modificar el conocimiento.
- Constituye un entrenador en el dominio de aplicación.

Desventajas:

- Las respuestas no siempre son correctas.
- Conocimiento limitado al dominio de experticia.
- Ausencia de sentido común.
- No reconocen el límite de su conocimiento.

1.1.4 Arquitectura de un Sistema Experto

La arquitectura de un SE de alguna manera 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.

Un aporte fundamental hecho por los SE, como se puede ver en la ver figura 1.1, es el concepto de separación del conocimiento, el cual se organiza en una estructura denominada BC y el procedimiento lógico implementado en un MI.

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.

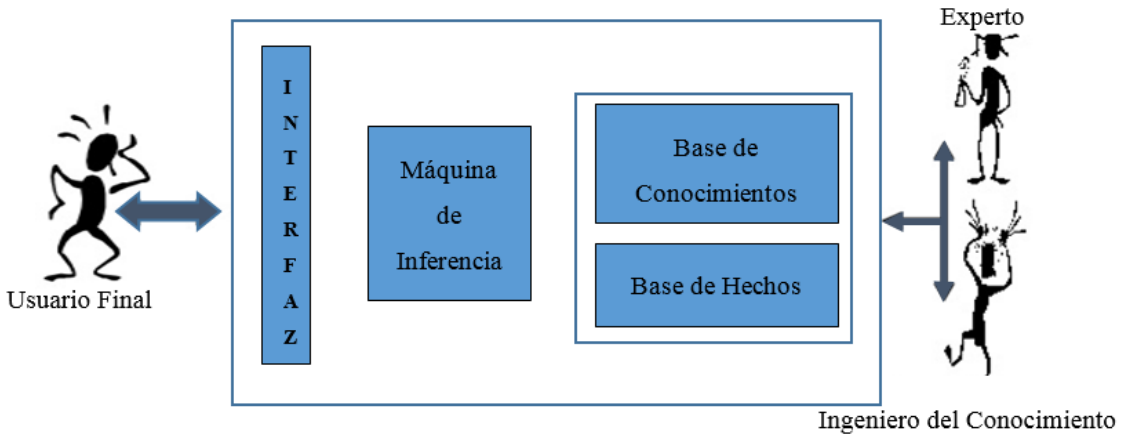


Figura 1.1 Arquitectura general de los componentes de un SE.

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.

Ejemplos:

temp_lados_chumacera = Iguales

baja_frec= Si

valor_vib_chumaceras= 3.4

REGLAS: en gran parte heurísticas, dirigen la utilización del conocimiento para resolver problemas. Las reglas heurísticas (o simplemente heurísticas) son conocimientos empíricos.

Ejemplo:

- Regla 1 (Regla del tipo ‘’situación – acción’’)

Si

Hay aspecto herrumbroso,

Y

Hay capas de productos de corrosión,

Entonces

Hay corrosión general.

- Regla 2 (Regla de tipo deductivo)

Si

La Velocidad de corrosión es igual a 0.02,

Entonces

La resistencia a la corrosión es sobresaliente.

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

Es necesario comprender el funcionamiento o la lógica de búsqueda del MI de la aplicación antes de redactar o crear las reglas. (Rolston et al., 1990) explica el modo de operar del MI y define dos tipos de reglas de inferencia:

Modus Ponens: Se examina la premisa de la regla, y si es cierta, la conclusión pasa a formar parte del conocimiento.

Modus Tollens: Se examina la conclusión y si es falsa, se concluye que la premisa también es falsa.

En la construcción de un MI, existen dos métodos básicos: encadenamiento hacia adelante y encadenamiento hacia atrás.

Método de encadenamiento hacia adelante.

A este método se le llama *conducido por datos*, porque el MI utiliza la información que el usuario le proporciona para moverse a través de una red de operadores *AND* y operadores

OR hasta que encuentra un punto terminal que es el objeto. Si el MI no puede encontrar un objeto que cumpla con los requisitos, el SE pide más información. Los atributos que definen al objeto crean un camino que conduce al mismo objeto: la única forma de alcanzar dicho objeto es satisfacer todas sus reglas. En resumen el sistema de encadenamiento hacia delante construye un árbol desde las hojas hasta la raíz.

Método de encadenamiento hacia atrás.

Este método es el contrario al método anterior. Un MI de encadenamiento hacia atrás comienza con una hipótesis (objeto) y pide información para confirmarla o negarla. A este método se le llama *conducido por objetos* porque el SE empieza con un objeto e intenta verificarlo. En resumen, el encadenamiento hacia atrás *poda* un árbol, lo cual es lo contrario al método anterior, en el cual se construye un árbol.

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.

1.1.5 Adquisición del conocimiento

El pilar fundamental de todo SE es la BD que almacena el conocimiento del experto, es importante que estos datos se almacenen correctamente al tener en cuenta un formato de reglas que facilite el correcto uso de la información.

Para poseer una BD o conocimientos con información adecuada y que sea realmente de utilidad es fundamental extraer adecuadamente el conocimiento del experto, de forma que se ordene y filtre la información que este entrega.

A esto se dedica fundamentalmente la Ingenieria del Conocimiento. El trabajo de los IC consiste en extraer el conocimiento de los expertos humanos en una determinada área, y codificar dicho conocimiento de manera que pueda ser procesado por un sistema (Vegega et al., 2012).

Según (Pytel et al., 2011) la herramienta más utilizada para estos efectos es la entrevista. Para el caso de la creación de una BC para un SE el entrevistador debe realizar las preguntas:

¿cómo? ¿cuándo? y ¿por qué? Se simula una conversación telefónica y se hace cuenta que existe una distancia física entre el entrevistador y el experto, el cual intentará dar indicaciones al entrevistador para que este pueda solucionar un problema supuesto, únicamente si sigue las instrucciones verbales del experto. Finalmente se debe filtrar y transformar las preguntas y respuestas generadas en la entrevista al formato de regla para luego almacenarlas en la BD de la aplicación (O'Leary, 2008).

1.1.6 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 (o una deducción de una evidencia existente) que apoye una hipótesis en particular.

Las reglas utilizan un formato *IF* - *THEN* para representar el conocimiento, la parte *IF* de una regla es una condición (también llamada premisa o antecedente), y la parte *THEN* de la regla (también llamada acción, conclusión o consecuente) permite inferir un conjunto de hechos nuevos si se verifican las condiciones establecidas en la parte *IF*.

Los SBR son frecuentemente confundidos con sistemas lógicos; sin embargo, estos se definen en dos ideas principales:

- Los hechos pueden variar su veracidad durante el proceso de razonamiento.
- Aceptan incertidumbre en el proceso deductivo.

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). Un mecánico de automóviles que repara un motor porque recordó que otro auto presentaba los mismos síntomas usa RBC al igual que un abogado que apela a precedentes legales para defender

alguna causa. También un ingeniero cuando copia elementos de la naturaleza, trata a esta como una "base de datos de soluciones". 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, red de Bayes, red de creencia, modelo bayesiano o modelo probabilístico en un gráfico acíclico dirigido (DAG por sus siglas en inglés) 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, la cual trabaja con incertidumbre. 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).

1.1.7 Etapas en el desarrollo de un Sistema Experto

(Roth et al., 1984) sugieren las etapas siguientes para el diseño e implementación de un SE, ver también (Luger and Stubblefield, 1989, Koppen-Seliger and Frank, 1995). En la figura 1.2 se muestra un esquema de las mismas:

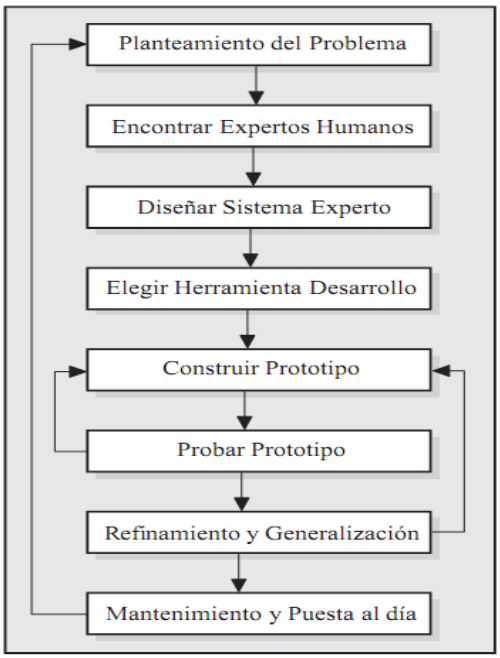


Figura 1.2. Etapas en el desarrollo de un sistema experto.

1. *Planteamiento del problema*. La primera etapa en cualquier proyecto es normalmente la definición del problema a resolver. Puesto que el objetivo principal de un SE es responder a preguntas y resolver problemas, esta etapa es quizás la más importante en su desarrollo. Si el sistema está mal definido, es probable que este suministre respuestas erróneas.
2. *Encontrar expertos humanos que puedan resolver el problema*. En algunos casos, sin embargo, las BD pueden jugar el papel del experto humano.
3. *Diseño de un Sistema Experto*. Esta etapa incluye el diseño de estructuras para almacenar el conocimiento, el MI, el subsistema de explicación, la interface de usuario, etc.
4. *Elección de la herramienta de desarrollo, o lenguaje de programación*. Generalmente, hay dos métodos para desarrollar SE:
    - A través un *Shell*.
    - Comenzar un sistema desde cero.

Un *Shell* es un paquete para desarrollar una BC y en algunos casos una interfaz de usuario especializada. Usualmente se comienza el trabajo con uno de estos paquetes y se termina con una programación propia del sistema.

5. *Desarrollo y prueba de un prototipo*. Si el prototipo no pasa las pruebas requeridas, las etapas anteriores deben ser repetidas hasta que se obtenga un prototipo satisfactorio.
6. *Refinamiento y generalización*. En esta etapa se corrigen los fallos y se incluyen nuevas posibilidades no incorporadas en el diseño inicial.
7. *Mantenimiento y puesta al día*. En esta etapa el usuario plantea problemas o defectos del prototipo, corrige errores, actualiza el producto con nuevos avances, etc.

1.2 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).

La tarea de diagnóstico se reduce a una tarea de clasificación en la que los síntomas observados se asocian con determinados fallos en el sistema. Los SE para el diagnóstico pueden verse como casos particulares de problemas de clasificación y aparecen en campos como la medicina, la electrónica y la ingeniería. Ha recibido especial atención en dominios diversos, tales como: sistemas para el diagnóstico médico, diagnóstico electrónico, diagnóstico mecánico, diagnóstico de software, entre otros.

Este tipo de problema se define de la siguiente forma: *¨Diagnosticar un sistema dinámico consiste en encontrar las causas que justifican la presencia de síntomas¨*.

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.

Los problemas de diagnóstico tienen detalles técnicos de su aplicación que proporcionan ventajas e inconvenientes de cada técnica. En los dominios más frecuentes, en un problema de diagnóstico, se dispone de un conocimiento detallado sobre el sistema a diagnosticar y es posible contar con un modelo del funcionamiento de dicho sistema, que sirve como base al proceso de búsqueda de fallas. Ejemplos de estos son:

- Medicina: cumple la función de realizar diagnósticos de enfermedades. Ejemplos:

Sistema para la clasificación de “células de cáncer”. En la evaluación de este sistema se comparan los resultados con el método CGH (*Comparative genomic hybridization*) que es un método genético molecular, que hace que la alteración genética de “células de cáncer” se haga visible.

El sistema PLEXUS, es un sistema basado en el conocimiento médico, diseñado para asistir a neurólogos y neurocirujanos en el diagnóstico y la planificación del tratamiento de los daños de la “bronchialplexus”. La “brochialplexus” es una red intricada de nervios situada en el cuello, que tiene que ver con los movimientos del hombro, los brazos y las manos. La complicada anatomía y la baja tasa de incidencia de estos daños hacen muy difícil su diagnóstico.

El sistema MYCIN, es un sistema para el diagnóstico y terapia de enfermedades infecciosas bacterianas, desarrollado en la universidad de Stanford por Edward Shortliffe en el año 1972 y es considerado uno de los pioneros en el desarrollo de este tipo de sistemas, según (Roth et al., 1984). Varios test han demostrado que MYCIN trabaja tan bien o mejor que un médico (Bello et al., 2002).

- Química: Estudio de las propiedades de compuestos, interpretación de los resultados obtenidos en los análisis, planificación de los procesos de síntesis.
- Geología: Se emplea en la exploración de suelos, búsqueda de recursos.
- Ingeniería: El reto de los SE industriales se centra en la necesidad de que se comuniquen con dispositivos sensores, bases de datos, dispositivos de mando y accionamiento en tiempo real. En el siguiente epígrafe se hará un recuento de los mismos.

1.2.1 Sistemas Expertos en problemas de diagnóstico en Ingeniería

Los sistemas modernos de control son cada vez más complejos y sus algoritmos de control son altamente sofisticados. En sistemas con una seguridad crítica, la ocurrencia de fallas puede provocar consecuencias extremadamente peligrosas en términos de vidas humanas, impacto medioambiental y pérdidas económicas. Este hecho justifica el auge del diagnóstico de fallas en línea con el objetivo de incrementar la fiabilidad y evitar fallas irreversibles que puedan implicar la paralización de un proceso o provocar grandes catástrofes. El diagnóstico de fallas en línea puede contribuir, además, a una rápida y adecuada reacción ante una situación de avería y favorecer la eficiencia, mantenibilidad y disponibilidad del lugar (Vizcaya et al., 2011).

El primer problema que se encuentra en el diagnóstico de fallas en los sistemas industriales, es la adquisición de la información, problema que puede resultar complejo, ya sea el caso de información analítica o heurística. En el caso de la información analítica o cuantitativa los instrumentos de medición suelen proveer información que en dependencia de la calidad de los sensores introducen mayor o menor grado de incertidumbre en las medidas. En el caso de la información cualitativa o heurística la incertidumbre es todavía mayor, pues depende del punto de vista del ser humano, cuyos criterios pueden ser subjetivos y varían de una persona a otra (Valenzuela, 2007).

Variantes a problemas resueltos a través SE:

- Elaboración de un modelo experto para diagnóstico de fallas: caso Grúa Horquilla: el propósito de este trabajo es la disminución de la carga de trabajo que presenta un mecánico experto en grúas horquillas de la planta Talca de Coca-Cola Embonor S.A,

el cual debe atender las fallas que se presentan en estas máquinas, ejecuta las tareas necesarias para su reparación, guía a otros mecánicos con menos experiencia o instruyen a trabajadores novatos que no cuentan con los conocimientos para intervenir la máquina (Zaror, 2010).

- Sistema Basado en Casos para el diseño de engranajes cilíndricos con contacto exterior: El objetivo de este trabajo consistió en obtener un sistema Basado en Casos mediante la combinación del Razonamiento Basado en Casos, para mejorar la utilización de la experiencia acumulada por los diseñadores, en la realización de nuevos diseños de transmisiones por engranajes cilíndricos con contacto exterior. La base de casos se obtuvo de la información almacenada en el archivo de diseño de una empresa de producciones mecánicas (Ortega et al., 2013).
- Diagnóstico de fallos en sistemas industriales basado en razonamiento borroso y probabilístico: aborda el diagnóstico de fallos en sistemas industriales por técnicas de IA; trata en particular, el razonamiento borroso y probabilístico. Se presentan los problemas a resolver en el diagnóstico de sistemas y después se plantean estrategias para abordarlos, a partir de diferentes técnicas, en donde se destacan los métodos relacionales borrosos. También se estudian los Sistemas Expertos basados en lógica borrosa y que usan tablas de decisión, los que combinan lógica borrosa con probabilidad y los sistemas de diagnóstico basados en redes Bayesianas. Una vez experimentadas y evaluadas las anteriores técnicas, vistos los inconvenientes que surgían, se decidió implementar una nueva metodología que diera una mejor solución al problema del diagnóstico. Esta metodología es el diagnóstico probabilístico borroso visto como un problema de optimización lineal (Valenzuela, 2007).
- Utilización de Sistemas Basados en Reglas y en Casos para diseñar transmisiones por tornillo sinfín: estos sistemas pueden ser usados con éxito para el diseño de engranajes, particularmente para el diseño de transmisiones por tornillo sinfín. En el trabajo se hace una comparación del uso de los SBR y los SBC para el diseño de transmisiones por tornillo sinfín y se muestran los resultados de la aplicación de los SBR al diseño particular de una transmisión por tornillo sinfín (Rodríguez et al., 2012).

1.3 Conclusiones parciales

La Ingeniería del Conocimiento está orientada a la creación de SE, su objetivo es extraer, articular e informatizar el conocimiento de un experto. El ingeniero estructura sus conocimientos y los implementa en el sistema para su aplicación en áreas donde la fuente de conocimiento principal son los expertos.

Un SE para el diagnóstico es un sistema que infiere el funcionamiento inadecuado o fallas de un proceso, a partir de la interpretación de datos observados, el proceso de diagnóstico encuentra las causas internas que explican los síntomas observados.

CAPÍTULO 2. DESARROLLO DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA EXPERTO PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLOS: "*CTEXPERTO*"

El generador de vapor es uno de los sistemas más importantes en la industria, debido a la complejidad y cantidad de procesos que allí se realizan; por lo tanto es importante garantizar su disponibilidad en todo momento. La importancia del diagnóstico oportuno de fallas en ellos es una valiosa herramienta en la operación, ya que toda falla lleva un costo asociado que se incrementa a medida que la falla evoluciona y no es atendida. En sentido opuesto, una falla detectada y atendida con oportunidad, tendrá un costo mínimo (Ruz et al., 2005).

En el presente capítulo se abordan temas relacionados con la estructura y el funcionamiento de las partes más importantes de los generadores de vapor de la CTE "Carlos Manuel de Céspedes", fundamentalmente las bombas de agua de alimentación. Conjuntamente se analiza un cuadro de fallas frecuentes en las mismas con el objetivo de comenzar la construcción de las BC y del SE en general.

2.1 Características generales del proceso tecnológico

Uno de los elementos principales y más complejos de una CTE es el generador de vapor o caldera. Los generadores de vapor acuotubulares son utilizados en las centrales termoeléctricas debido a que permiten altas presiones a su salida y tienen una gran capacidad de generación.

Producto de la alta significación que tienen los generadores de vapor en el proceso productivo de la CTE "Carlos Manuel de Céspedes" y a que su estación de agua de alimentar es el objeto de estudio de este trabajo de diploma, en este epígrafe serán expuestas las principales

características de la calderas de la planta, así como también aspectos importantes de su funcionamiento y estructuras.

2.1.1 Breve reseña histórica

La CTE se localiza al oeste de Cienfuegos, en la ensenada del inglés. La primera unidad fue la Dionisio San Román o también llamada O´Bourke que fue inaugurada el 8 de agosto de 1949 en tierra de una finca rústica llamada Nuestra Señora de Regla perteneciente a Nicolás Castaño y Manuel de la Torre. Todo esto pertenecía a la jurisdicción de Caonao.

El 6 de julio de 1960 nuestro Comandante en Jefe dio a conocer en la OCLAE la nacionalización de la Empresa Eléctrica. El 5 de septiembre de 1961 se le da a la antigua planta de vapor el nombre de Dionisio San Román.

Misión:

La Central Termoeléctrica de Cienfuegos forma parte del Sistema Eléctrico Nacional, se dedica básicamente a generar y suministrar energía eléctrica para satisfacer los requerimientos y necesidades crecientes de los clientes, con un alto nivel de profesionalismo, de esta manera garantiza el necesario equilibrio con el entorno y el medio ambiente.

2.1.2 Características fundamentales de las calderas objeto de estudio

Las calderas de las unidades 3 y 4 de la CTE 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".

Estos generadores están diseñados para mantener una alta eficiencia con la menor pérdida de calor debido al bajo exceso de aire, una combustión total del petróleo y una hermeticidad en la construcción de las paredes de agua bajo las condiciones técnicas que se resumen en el **Anexo I**.

Constructivamente la caldera es un intercambiador de calor de paredes de agua compuesta además por un domo separador de fases. En total son cuatro paredes de agua y una pared divisoria que forma el festón y sirve de división entre los conductos radiantes y convectivos. Las paredes lateral izquierda y derecha están formadas por 101 tubos de intercambio que a su vez se alimentan de 6 cabezales inferiores de la caldera, ubicados a diferentes alturas para

formar el cenicero; una pared frontal o de quemadores formada por 119 tubos que se alimentan de 3 cabezales frontales inferiores y una pared trasera formada por 119 tubos que se divide luego en dos partes; una parte formada por 60 tubos continúa para formar la pared trasera conjuntamente con 58 tubos descendientes de vapor saturado y otra parte formada por 59 tubos que después se doblan en 119 pasan a formar la pared divisoria entre el horno y el eje convectivo. En la parte superior estas 5 paredes se unen en el cabezal de techo desde donde la mezcla de vapor y agua regresa al domo. El domo es un intercambiador de calor donde se produce la separación de las fases del agua. Los tubos de la pared divisoria después de formar la "P" invertida abandonan la formación lineal y hacen una formación de ajedrez para permitir la fijación de los serpentines de los sobecalentadores y el recalentador. En la parte superior estos tubos vuelven a tomar una formación lineal para permitir el paso de los gases al eje convectivo.

Partes principales de la caldera. Principios de funcionamiento

Horno: Cuenta con nueve quemadores divididos en grupos de tres y se encargan de la combustión del combustible propiamente dicho, para de esta forma lograr la cantidad de calor necesaria para el cambio de fase del agua que circula por las paredes del horno.

Domo: Al domo llega agua de alimentación procedente del economizador, mediante el mismo se conoce el nivel de agua que tiene la caldera y además ocurre la separación de la mezcla agua-vapor por mediación de los separadores y ciclones, encargados de condensar el vapor húmedo y dejar salir solo el más seco.

Economizador: Es un intercambiador de calor en el cual los gases del producto de la combustión le ceden calor al agua de alimentar.

Sobrecalentador primario: Intercambiador de calor por radiación donde el vapor que sale del domo absorbe calor y pasa a ser vapor sobrecalentado.

Sobrecalentador secundario: Este es también un intercambiador pero de tipo convectivo y también el vapor absorbe calor y también es vapor sobrecalentado con mejores propiedades.

Recalentador: Es el encargado de recalentar el vapor extraído de la turbina para aumentar sus propiedad.

Quemadores: Forman la mezcla aire-combustible y de forma atomizada con el empleo de vapor, se forma así la llama portadora del calor dentro del horno.

2.2 La estación de agua de alimentar

Uno de los esquemas más importantes en los generadores de vapor acuotubulares es el de agua de alimentar debido a la gran influencia que tiene el mismo en su funcionamiento. Puesto que este tipo de dispositivos está en uso las 24 horas del día, un correcto tratamiento del sistema de alimentación de agua de calderas permite evitar o reducir las averías y tiempos de parada.

Estas tienen la función de succionar el agua del tanque y darle la presión suficiente, para que circule a través de los calentadores de alta presión, el economizador y, finalmente penetre al domo de la caldera, por lo tanto ayudarán a:

- Conseguir un ahorro energético y una eficiencia de funcionamiento considerable al subir la temperatura del agua de alimentación de la caldera.
- Evitar un choque térmico en la caldera o en el desaireador al subir la temperatura del agua de alimentación.
- Evitar que se sequen las calderas modernas más pequeñas.

Debido a esto las exigencias principales que se plantean a estas bombas son: resistencia, hermeticidad, compensación de las deformaciones térmicas, estabilidad dinámica en cualquiera de los regímenes de carga y largo plazo de servicio (Cherkassky, 1986). Durante su operación normal se mantienen dos bombas en servicio y una de reserva. En el **Anexo II** y el **Anexo III** se muestran las especificaciones de la bomba de alimentación y del motor de la misma respectivamente.

En la siguiente tabla se muestran las características de las BAA instaladas en las más importantes CTE de Cuba (García, 2013), se puede ver que todas tienen más de 30 años de explotación, por lo que muchas deben sufrir desgastes producto de tantos años de trabajo.

Tabla 2.1 Bomba de Agua de Alimentación de las CTE de Cuba. (Los datos espacios en blanco indican que los datos correspondientes no fueron encontrados).

CTE	Cienfuegos	Felton	Renté	Mariel	Guiteras
Año de Fabricación	1977	*	1967-79	1977	1988
Potencia de la unidad de generación (MW)	158	250	100	100	330
País de Origen	Japón	*	URSS	URSS	Francia

* Los datos espacios en blanco indican que los datos correspondientes no fueron encontrados.

2.2.1 Fallas fundamentales que afectan las bombas de agua de alimentar caldera para la confección de las bases de conocimientos

La operación de una bomba centrifuga puede afectarse por dificultades hidráulicas o mecánicas. Las dificultades hidráulicas pueden hacer que una bomba falle hasta no descargar nada de agua, o una cantidad insuficiente, desarrollar poca presión, perder su cebado luego de arrancar, o consumir una cantidad de energía excesiva. Las dificultades mecánicas pueden aparecer en los estroperos o cojinetes, producir vibración, ruido o sobrecalentamiento. Para determinar la raíz de los síntomas que provocan las fallas 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 causado por una falla mecánica dentro de la bomba o por falla 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
- Flecha doblada. Sobreconsumo
- Sobreconsumo por desgaste

Parámetros:

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

2.3 Diseño del Sistema Experto

A continuacion se muestra como está conformado el SE:

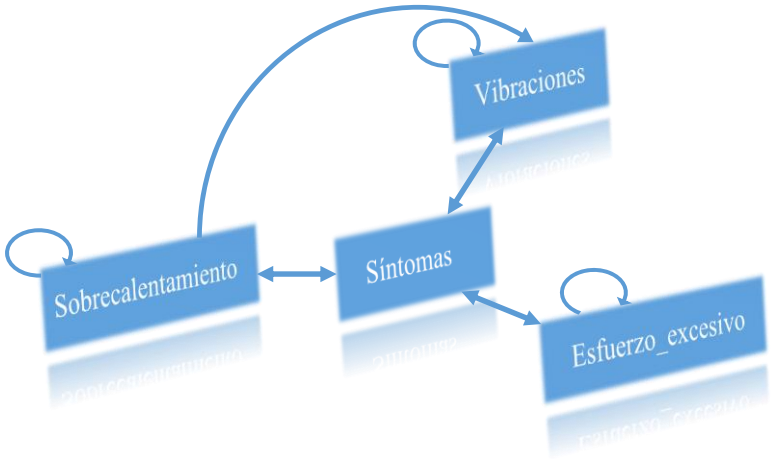


Figura 2.1. Relación entre las Bases de Conocimientos.

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:

- **Sobrecalentamiento**
- **Vibraciones**
- **Esfuerzo_ excesivo**

De esta manera el sistema está conformado de una manera modular. Esta modularidad da la posibilidad de añadir nuevas bases de conocimientos sin hacer cambios sustanciales y nos evita crearlas de manera sencilla y limpia.

Igualmente 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.

2.4 Elección de la herramienta de desarrollo, o lenguaje de programación

La construcción de un SE no es una tarea sencilla, debido a que involucra mucha participación de distintas personas, cada una de las cuales aportará algo para que SE a desarrollar sea robusto y fácil de usar y mantener. Además se deben hacer varias elecciones en cuanto al desarrollo del mismo, una de ellas es elegir que herramienta utilizar para su estructuración.

A continuación una lista de algunas de las herramientas que se pueden utilizar para desarrollarlos:

- *CBR Express*: es una herramienta de construcción de SE que se basa en la existencia de una librería de situaciones o 'casos' resueltos. Ante la aparición de una nueva situación, el sistema se encarga de recuperar el caso o los casos que mejor la identifique de forma que el usuario pueda interpretar o ajustar la solución. Esta herramienta utiliza un algoritmo de reconocimiento de texto para comparar la descripción del caso actual con las descripciones de los casos de la base de casos. Este algoritmo ignora la mayoría de las palabras usuales y se concentra en las palabras que aportan una mayor descripción. *CBR Express* está configurado para reconocer texto en inglés, aunque puede modificarse para acomodarse a otro lenguaje.
- *Nexpert Object:* el conocimiento básicamente se expresa mediante reglas. Esta herramienta incorpora los siguientes componentes en el entorno de desarrollo:
  - Interfaz gráfica de usuario.
  - Herramientas de razonamiento y representación.
  - Interfaz para programar aplicaciones.

  Nexpert Objects implementa los hechos como objetos (Objeto. Propiedad). En general, se utiliza todo el potencial de la programación orientada a objetos: clases,

subclases, métodos, objetos, hipótesis, herencia, polimorfismo, etc. Utiliza encadenamiento hacia adelante y hacia atrás para razonar y en cierta medida, también permite el tratamiento de la incertidumbre.

- *SWI Prolog*: Programar en ProLog consiste en dar al ordenador un universo finito en forma de hechos y reglas, de forma tal que proporciona los medios para realizar inferencias de un hecho a otro, en general consiste en:
  - Declarar algunos HECHOS sobre los objetos y sus relaciones.
  - Definir algunas REGLAS sobre los objetos y sus relaciones.
  - Hacer PREGUNTAS sobre los objetos y sus relaciones.
- *Expert System Builder:* es un programa gratuito destinado a simplificar el desarrollo de Sistemas Expertos que apoyan los procesos de toma de decisiones de una organización. Es un *kit* de herramientas de IA implementado en *Common Lisp*. El sistema *Expert System Builder* tiene la intención de industrializar el proceso de construcción de SE, ya que proporciona a los desarrolladores el modelado y varias instalaciones arquitectónicas que no se encuentran en la mayoría de kits de herramientas de IA.
- *UCShell (Shell de la Universidad Central):* es un ambiente de desarrollo integrado, que permite la creación de proyectos y bases de conocimiento. El ambiente permite editar, compilar (con información simbólica o no) y ejecutar BC. Está programado en Java, por ese motivo para usarlo tiene que instalarse la máquina virtual de Java con el JRE 1.5 o superior. 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. El proceso de compilación toma como entrada un archivo con extensión kbs (knowledge base system) que contiene la base de conocimientos y lo transforma en un archivo, con el mismo nombre pero con extensión kbo (knowledge base object) que contiene la forma interna que ejecutará la máquina de inferencia.

Para la realización del Sistema Experto el software *UCShell* resulta ser el más idóneo debido a su simpleza a la hora de crear las BC ya que tiene mecanismos de depuración y además, la sintaxis es fácil de entender, el conocimiento puede ser añadido, modificado o eliminado. El experto puede leer la BC y entenderla, luego de que se le explique, debido a la escritura de

la misma. El ambiente de preguntas y respuestas que brinda es agradable y favorece la comunicación con el usuario. En el siguiente apartado se presenta una descripción ampliada sobre cómo trabajar con este software.

2.4.1 Generalidades de *UCShell*

Los objetos que manipula la máquina de inferencia de *UCShell* se denominan atributos y pueden verse como las variables en los lenguajes de programación. Estos pueden ser de tres tipos:

- *Hechos*: cuando tienen un valor asociado.
- *Deducibles*: cuando forman parte de la conclusión de una regla.
- *Preguntables*: cuando tienen una pregunta asociada.

Los dos últimos pueden convertirse en hechos durante el proceso de inferencia, adicionalmente cualquier atributo puede tener la cualificación de externo.

2.4.2 Sintaxis de 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 2.2 muestra un esquema de su sintaxis.

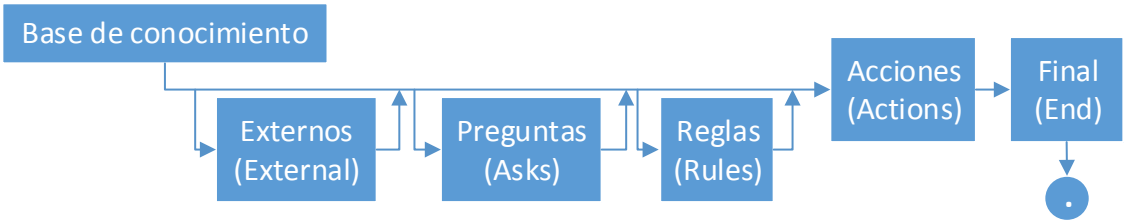


Figura 2.2. Esquema de la Base de Conocimientos

De acuerdo a la figura anterior, una base de conocimiento está compuesta por tres módulos opcionales que deben escribirse en el orden mostrado. Estos son:

- *Bloque de atributos externos*: Se especifica por la palabra reservada *EXTERNAL*.
- *Bloque de preguntas*: Especificado por la palabra reservada *ASKS*.
- *Bloque de reglas*: Comienza con la palabra reservada *RULES*.

Adicionalmente existe un cuarto módulo obligatorio y conocido como Bloque de acciones, que se define con la palabra reservada *ACTIONS*.

El fin de un bloque se especifica, implícitamente, con el inicio de otro, excepto el bloque de acciones que finaliza con la palabra reservada *END* seguida por un punto lo que constituye, además, el fin de la base de conocimiento.

El bloque de atributos externos

El boque de atributos externos, si existe, tiene que ser el primer bloque de una base de conocimientos. El bloque se inicia con la palabra reservada ***External*** termina con el inicio de otro de los bloques admitidos.

Los atributos externos son útiles cuando el SE tiene más de una BC y el proceso de inferencia se cambia (al usar la cláusula *CHAIN*) de una base a otra.

El bloque de preguntas

El bloque de preguntas contiene todas las interrogantes que el sistema hará a sus usuarios. La palabra reservada *ASKS* inicia el bloque de atributos que se preguntan al usuario del sistema experto y finaliza con la definición del próximo bloque. Dentro del bloque de preguntas se definen los atributos preguntables, mediante la cláusula *ASK*.

Para definir un atributo como preguntable se usa la meta cláusula *ASK*, su sintaxis general se muestra en la figura 2.3.

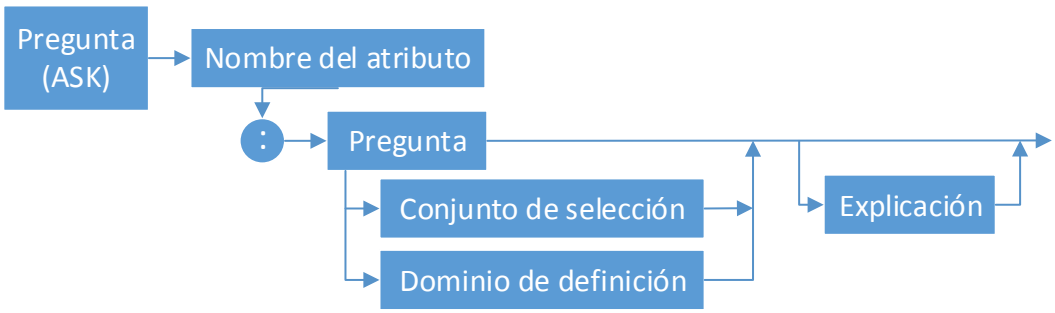


Figura 2.3. Sintaxis de un *ASK*

Los elementos sintácticos de esta definición se ajustan a las reglas siguientes:

- <Nombre del atributo>, sigue la forma usual del nombre de una variable en cualquier lenguaje de programación.

- <Pregunta>, es un conjunto de cadenas de caracteres separadas por el signo más (+). Las cadenas en *UCShell* se forman con cualquier secuencia de caracteres encerrados entre apóstrofes.
- <Conjunto de selección> o <Dominio de definición>, solo puede existir uno de ellos en cada pregunta y si existe contiene los valores que puede tomar el atributo, entre los cuales el usuario debe elegir uno solo. Son opcionales, los atributos preguntables que no tienen este elemento, presentarán una línea de edición para que el usuario teclee su respuesta. Las entradas numéricas se toman como tal, todo lo demás se considera una cadena. Debe tenerse cuidado al responder aunque el sistema reporta algunos de los posibles errores.
- <Explicación>, es un texto que explica por qué se hace la pregunta, este elemento es opcional.

El bloque de reglas

El bloque de reglas, como su nombre lo indica, contiene la definición de todas las reglas de una base de conocimientos para *UCShell*, inicia con la palabra reservada *ASKS* y termina con la definición del bloque de acciones.

UCShell usa las reglas de producción como paradigma de representación del conocimiento, la forma general de una regla es:

IF

<conjunto de condiciones>

THEN

<conjunto de conclusiones>

Lo anterior se interpreta como:

"Si se cumple <conjunto de condiciones> entonces se cumple la conclusión."

La definición de una regla comienza por la palabra reservada *RULE* y termina con la palabra reservada *END* seguida de un punto y coma (;). La sintaxis de las reglas para *UCShell* se muestra en la figura 2.4.

- El elemento Entero es un número que identifica a la regla, en caso de que se declaren varias reglas con el mismo número el sistema mostrará que hay un error.

- El elemento Condición contiene las condiciones que deben satisfacerse para que la regla se cumpla. El resultado de evaluar esta parte de la regla es booleano (verdadero o falso).
- El elemento Conclusión contiene un conjunto de conclusiones y es donde toman valores los atributos deducibles.
- El elemento Acción contiene un conjunto de cláusulas que se ejecutan cuando la regla se cumple. Usualmente en las acciones de una regla es donde se muestran los resultados que se alcanzaron durante la inferencia, para lo cual se usa la cláusula *DISPLAY*.
- El elemento Explicación (*BECAUSE*) permite explicar cómo se llegó a una conclusión. Su sintaxis es la misma que la de la explicación en los *ASK*.

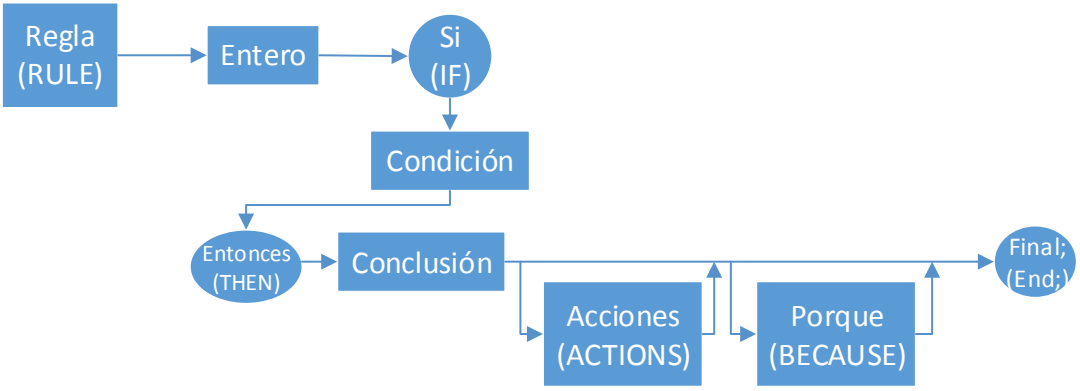


Figura 2.4. Sintaxis de una regla

El bloque de acciones

La palabra reservada *ACTIONS* comienza la lista de acciones que debe efectuar la máquina de inferencia una vez comenzado el proceso de inferencia, su sintaxis se puede apreciar en la figura 2.5.

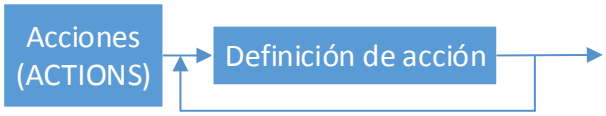


Figura 2.5. Sintaxis del bloque de acciones

Las acciones que se pueden realizar sobre los elementos de la base de conocimiento están definidas por un conjunto de cláusulas que especifican operaciones sobre los atributos o la

base de conocimiento en sentido general. Las cláusulas del lenguaje solo pueden escribirse dentro de los bloques de acciones y son las siguientes:

- *DISPLAY*
- *FIND*
- *FINDFORWARD*
- *FINDALL*
- *ASSUME*
- *REPEAT*
- *RESET*
- *CHAIN*

Cláusula ASSUME

Cuando se trabaja con un SE que usa la dirección de búsqueda dirigida por datos, es necesario partir de algunos hechos ya probados, aunque es posible que en un sistema dirigido por objetivos sea necesario establecer algunos hechos iniciales.

La cláusula *ASSUME* es la única forma directa de establecer un atributo como un hecho, su sintaxis se puede apreciar en la figura 2.6.

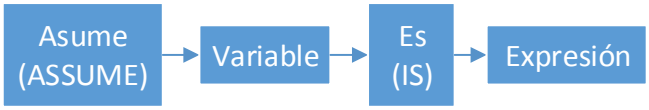


Figura 2.6. Sintaxis de la cláusula *ASSUME*

Cláusula CHAIN

La cláusula *CHAIN* especifica el camino de búsqueda hacia una base de conocimiento destino, con la que se va a enlazar la base de conocimiento actual u origen. Su sintaxis se aprecia en la figura 2.7.

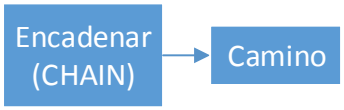


Figura 2.7. Sintaxis de *CHAIN*

Cláusula DISPLAY

La cláusula *DISPLAY* especifica una lista de imágenes o de elementos visibles que se muestran, en pantalla, en tiempo de ejecución. La sintaxis de ambos conceptos ha sido definida previamente, la figura 2.8 muestra su sintaxis.

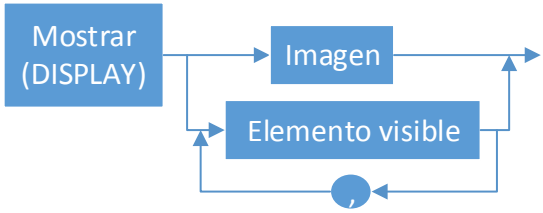


Figura 2.8. Sintaxis de la cláusula *Display*

Cláusula FIND

Existen tres cláusulas para probar un atributo deducible en *UCShell*: *FIND*, *FINDFORWARD* y *FINDALL*.

La cláusula *FIND* (figura 2.9) inicia un proceso de inferencia, dirigido por objetivos o *backward chaining* (encadenamiento hacia atrás), del atributo especificado. Si el proceso es exitoso, el atributo se instancia con el valor inferido y si no tiene éxito continúa con el valor *UNKNOWN* que es el que toman por defecto todos los atributos antes de iniciarse el proceso de inferencia.

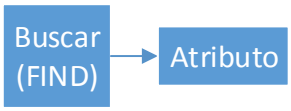


Figura 2.9. Sintaxis de la cláusula *FIND*

La búsqueda del atributo se hace en el siguiente orden:

- Se verifica si el atributo es un hecho. En ese caso no hay nada que probar y se toma su valor y certidumbre de la base de hechos que mantiene internamente el sistema.
- Si el atributo a inferir es preguntable, se realizará la pregunta asociada al atributo y se introduce el atributo con el valor y la certidumbre (si se da este último valor también) entrado por el usuario. En ese instante el atributo deja de ser un preguntable y se convierte en un hecho.
- Si el atributo es un deducible se realiza el proceso de inferencia. Si la prueba del atributo tiene éxito se le asigna el valor deducido y el atributo deja de ser deducible para convertirse en un hecho. El diagrama del **Anexo IV** ilustra el proceso de búsqueda para los atributos deducibles.

Cláusula FINDALL

El objetivo de la cláusula *FINDALL* es obtener todas las instancias posibles de un atributo. La sintaxis y la forma de búsqueda de *FINDALL* es la misma que la de *FIND*, la diferencia estriba en que la inferencia no para cuando encuentra la primera solución sino cuando las encuentra todas.

Cláusula REPEAT

La cláusula *REPEAT* permite programar un conjunto de órdenes cíclicas que comienzan con la cláusula que sigue a la palabra *REPEAT* y termina con la palabra reservada *UNTILKNOWN*.

La condición de terminación del ciclo se alcanza cuando el atributo que está a continuación de *UNTILKNOWN* recibe un valor diferente de desconocido (definido por la constante *UNKNOWN*). El atributo que se encuentra como condición de parada no se inferirá en el momento de la evaluación solo se verificará si su valor es conocido o no. La figura 2.9 muestra la sintaxis de la cláusula.

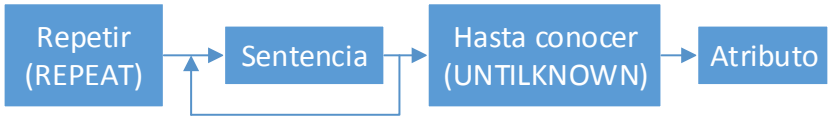


Figura 2.9. Sintaxis de la cláusula REPEAT

Cláusula RESET

La cláusula RESET actúa sobre un conjunto de atributos o sobre todos a los cuales les asigna el valor *UNKNOWN*. En *UCShell* los atributos que tienen el valor *UNKNOWN* son desconocidos lo que significa que aún no se han probado. Cuando un atributo resulta probado, por cualquier vía, adquiere un valor distinto de *UNKNOWN* y pasa a ser un hecho.

La figura 2.9 muestra la sintaxis de *RESET*.

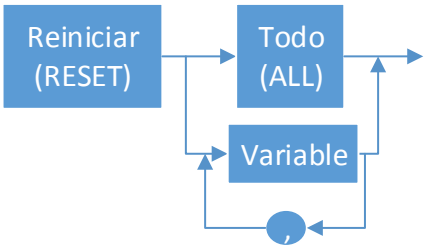


Figura 2.9. Sintaxis de la cláusula *RESET*.

2.5 Desarrollo, refinamiento, mantenimiento y puesta al día del Sistema Experto

Luego de elegir la herramienta de desarrollo se procedió a crear 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.

2.5.1 Base de conocimiento: Síntomas.kbs

La BC Síntomas (ver código en el **Anexo V**) está constituida por 5 reglas y 5 atributos que caracterizan el síntoma presente en la bomba. En la siguiente tabla se muestran los conceptos fundamentales de esta BC.

Tabla 2.2 Conceptos fundamentales de la BC **Síntomas.kbs**.

Concepto	Atributo*	Dominio
Síntoma presente en la BAA	*sintoma*	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	*sintoma_escogido*	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.

Al ejecutar esta BC aparece una pantalla de bienvenida y a continuación el SE le brinda al usuario tres síntomas, de los cuales elige el que presenta la bomba y el SE salta a la BC correspondiente.

2.5.2 Base de conocimiento: Sobrecalentamiento.kbs

La BC **Sobrecalentamiento.kbs** (ver código en el **Anexo VI**) está constituida por 9 reglas y 8 atributos que caracterizan las causas que provocan un sobrecalentamiento en la bomba. A continuación se muestra una tabla con los conceptos fundamentales de esta BC.

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. Este proceso se realiza una chumacera a la vez ya que el sistema da la posibilidad de volver a consultar la BC.

Tabla 2.2 Conceptos fundamentales de la BC **Sobrecalentamiento.kbs**.

Concepto	Atributo*	Dominio
Temperatura mayor de 75ºC en el aceite de las chumaceras	*temp_chumaceras*	Chumacera 1, Chumacera 2, Chumacera 3, Chumacera 4, Ninguna
Estado de las temperaturas a los lados de la chumacera	*temp_lados_chumacera*	Iguales, Diferentes
Causa encontrada	*causa*	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.

2.5.3 Base de conocimiento: Vibraciones.kbs

La BC **Vibraciones.kbs** (ver código en el **Anexo VII**) está constituida por 35 reglas y 38 atributos que caracterizan las causas que provocan vibraciones en la bomba. A continuación se muestra una tabla con los conceptos fundamentales de esta BC.

Tabla 2.3 Conceptos fundamentales de la BC **Vibraciones.kbs**.

Concepto	Atributo	Dominio
Valor de la amplitud de las vibraciones	*valor_vib_chumaceras*	Valor numérico
Dirección de las vibraciones	*direccion*	Radial, Axial, Ambas direcciones
Fase de las vibraciones	*fase*	Está en fase, El desfasaje es de 180 grados, El desfasaje está entre 0 y 180 grados
Presencia de armónicos	*vib_1, vib_2, vib_3, vib_4, vib_5, vib_6, vib_7, vib_8, vib_9*	Si, No
Armónico más alto	*vib_mas_alta*	Primero, Segundo, Tercero, Cuarto, Quinto, Sexto, Séptimo, Octavo, Noveno
Presencia de holgura mecánica	*holgura_mecanica*	Si, No

Diámetro medio del rodamiento	*D*	Valor numérico
Diámetro de las bolas o rodillos	*d*	Valor numérico
Velocidad del eje	*N*	Valor numérico
Número de bolas o rodillos	*n*	Valor numérico
Ocurrencia de armónicos en FTF	*existe_FTF*	Si, No
Ocurrencia de armónicos en BSF	*existe_BSF*	Si, No
Ocurrencia de armónicos en BPFO	*existe_BPFO*	Si, No
Ocurrencia de armónicos en BPFI	*existe_BPFI*	Si, No
Existencia de bandas laterales	*existen_bandas_laterales*	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 (para ello se revisa la norma ISO 10816 mostrada en el **Anexo VII**) examina el espectro de vibraciones en busca de alguna anomalía que identifique la causa de las mismas.

2.5.4 Base de conocimiento: Esfuerzo_excesivo.kbs

La BC **Esfuerzo_excesivo.kbs** (ver código en el **Anexo IX**) está constituida por 7 reglas y 13 atributos que caracterizan las causas que provocan esfuerzo excesivo en la bomba. A continuación se muestra una tabla con los conceptos fundamentales de esta BC.

Tabla 2.2 Conceptos fundamentales de la BC **Síntomas.kbs**.

Concepto	Atributo*	Dominio
Presión de descarga	*presion_descarga*	Valor numérico
Presión de succión	*presion_succion*	Valor numérico
Potencia de la bomba	*potencia_bomba*	Valor numérico

Valor del amperaje	*amperaje*	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.

2.6 Conclusiones parciales

- El proceso de Ingeniería del Conocimiento conduce a la conformación de cuatro BC a través de las dificultades naturales que traen la conversión de la forma de pensar del experto a las reglas que conforman las BC.
- La concepción de cada uno de los prototipos de las BC para cada uno de los síntomas que conforman el Sistema Experto se desarrolló con el software *UCShell*.
- La construcción de una BC para cada síntoma ofrece ventajas a la hora del procesamiento de las mismas ya que no se sobrecarga la memoria del sistema, pues carga solo la seleccionada.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se presentarán una serie de pruebas con el objetivo demostrar el buen desempeño del prototipo desarrollado y la correcta utilización de los criterios de los expertos humanos en el tema de bombas de agua de alimentar caldera. Para ello se utilizará un juego de datos procedente de un mantenimiento realizado en el mes de diciembre del 2014 en la CTE "Carlos M. Céspedes". Finalmente se hará un breve análisis económico del proyecto.

3.1 Prueba del CTExperto

A continuación se muestran los datos registrados de la bomba de agua de alimentar BAA-4A en la Tabla 3.1, la cual en el citado mantenimiento no tenía problemas de aumento de temperatura, aunque si se le detectó que presentaba un ligero desalineamiento angular y un sobreconsumo.

Tabla 3.1. Datos de la BAA-4A

Parámetro		Valor
Temperatura aceite	Chumacera-1	53 ºC
	Chumacera-2	47 ºC
	Chumacera-3	50 ºC
	Chumacera-4	50 ºC
Flujo		285 T/h
Amperaje		200 A
Presión de descarga		159 Kg/cm^2
Presión de succión		10.5 Kg/cm^2
Potencia		1909 KW

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 3.1:

Figura 3.1. Interfaz de presentación del *CTExperto*.

Al usuario hacer *click* sobre el botón *Accept* el sistema comenzó con la primera interrogante; para llevar a cabo el diagnóstico este solicitó al usuario el síntoma presente en la bomba, ver figura 3.2.

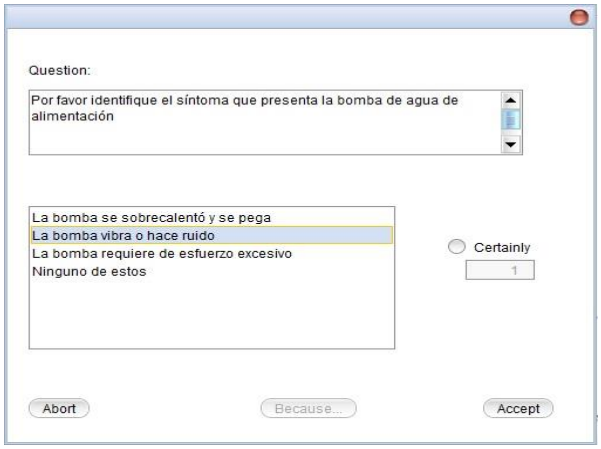


Figura 3.2. Interfaz para elegir el síntoma presente en la bomba.

3.1.1 Análisis de vibraciones

Se inició el análisis con el síntoma “La bomba vibra o hace ruido”. Luego el sistema le lanzó la segunda pregunta, para saber el tipo de bomba a diagnosticar con el objetivo de ubicar la severidad de las vibraciones según la norma ISO 10816(ver **Anexo VII**) atendiendo al tipo de bomba y el operador respondió lo siguiente como se observa en la figura 3.3:

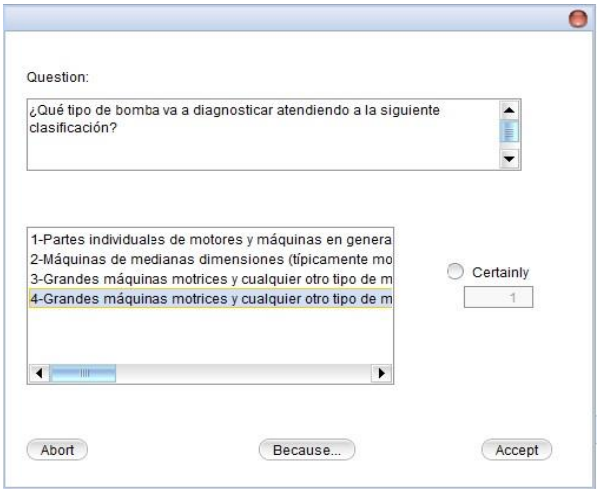


Figura 3.3. Interfaz para elegir el tipo de bomba a diagnosticar.

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 atendiendo a la gráfica de vibraciones que se muestra en el **Anexo X**, ver figura 3.4:

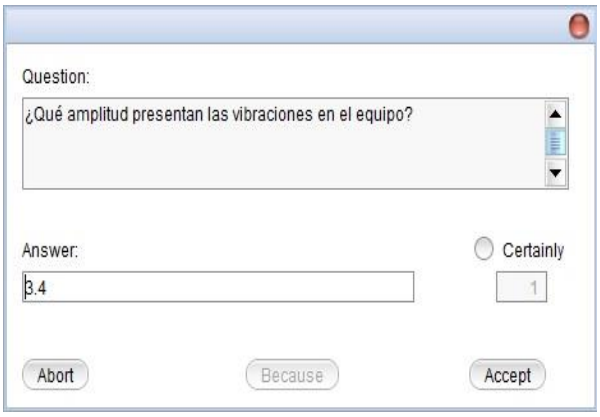


Figura 3.4. Interfaz para ingresar el valor de la amplitud de las vibraciones.

El sistema a continuación preguntó por las amplitudes de los armónicos y el usuario respondió que solo estaban presentes los tres primeros armónicos, luego de hacer uso del

espectro de vibraciones mostrado en el **Anexo XI**. A continuación se presenta un ejemplo de la pregunta realizada en la figura 3.5:

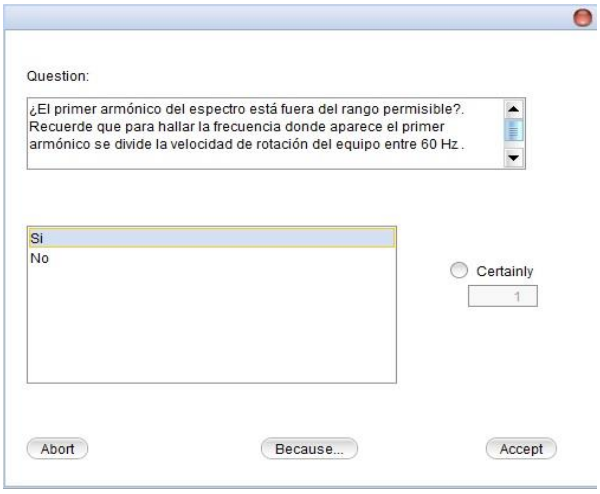


Figura 3.5. Interfaz de presencia de armónicos.

Seguidamente el sistema preguntó si alguno de estos armónicos estaba acompañado de un armónico de baja frecuencia a lo que el operador respondió lo siguiente, al fijarse nuevamente en el espectro de vibraciones, ver figura 3.6:

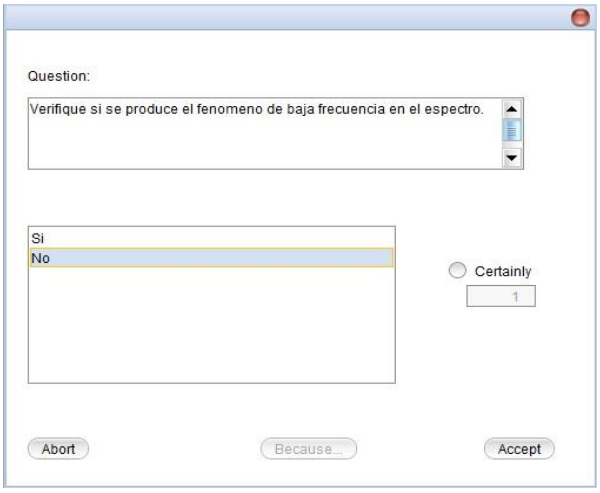


Figura 3.6. Interfaz de presencia de armónicos de baja frecuencia.

Entonces el sistema lanzó la primera conclusión, mostrada en la figura 3.7:

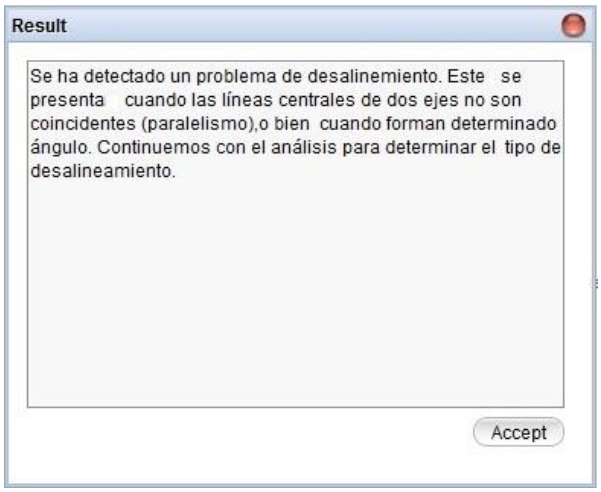


Figura 3.7. Primera conclusión presentada por el sistema.

Para continuar con el análisis el sistema preguntó por la dirección de las vibraciones como se observa en la figura 3.8, a lo que el operador indicó que vibra en dirección axial:

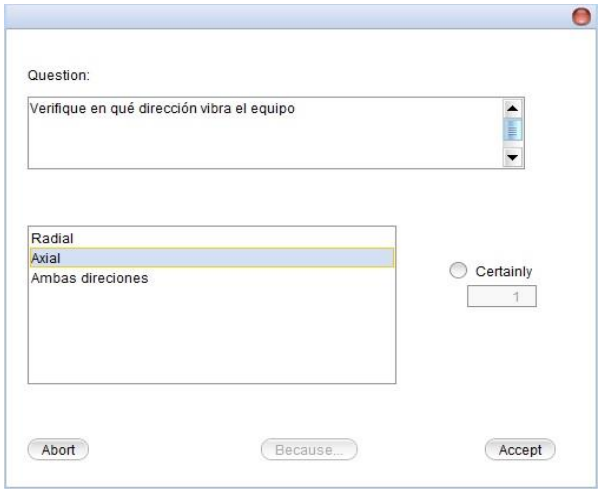


Figura 3.8. Interfaz para elegir la dirección de las vibraciones.

Seguidamente el sistema solicitó información acerca del armónico predominante, como se muestra en la figura 3.9:

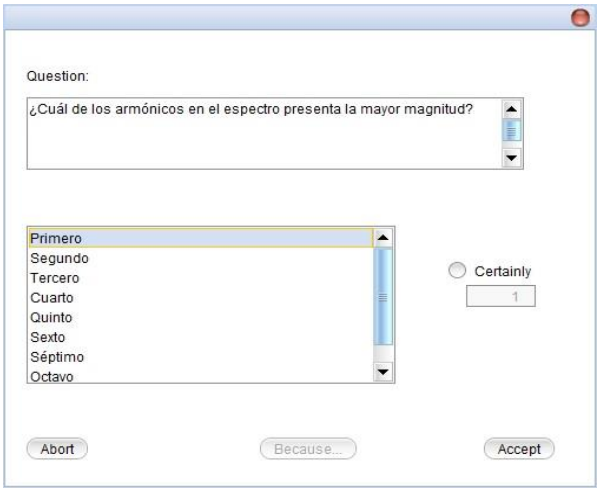


Figura 3.9. Interfaz para elegir el armónico de mayor amplitud.

El operador eligió el primero como se observa en el espectro y el sistema arrojó la segunda conclusión (figura 3.10) donde se refleja la causa de las vibraciones y la recomendación que el SE le hace al usuario:

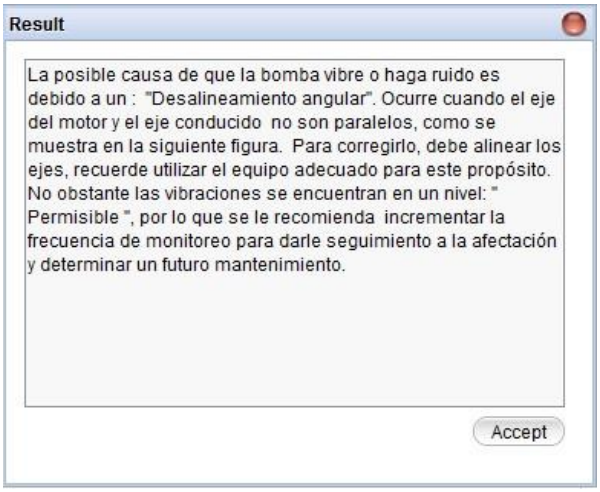


Figura 3.10. Segunda conclusión presentada por el sistema.

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.

3.1.2 Análisis de temperatura

Se sigue el análisis con el síntoma “La bomba se sobrecalentó y se pega” como se observa en la figura 3.11.

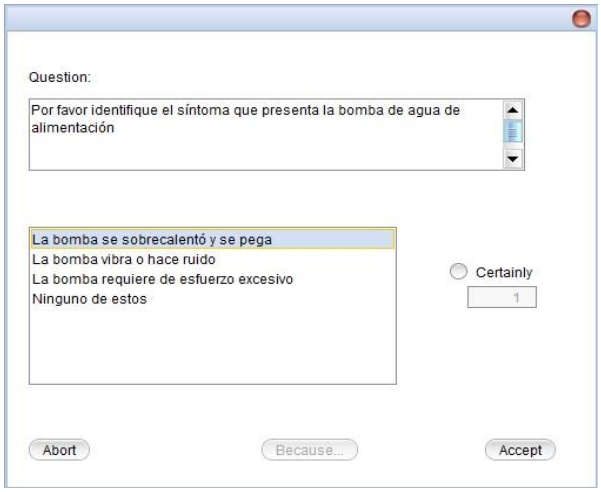


Figura 3.11. Interfaz para elegir el tipo de síntoma.

El sistema le preguntó al usuario si alguna chumacera posee una temperatura superior a los 75 °C como se observa en la figura 3.12, a lo que el usuario respondió: “Ninguna”.

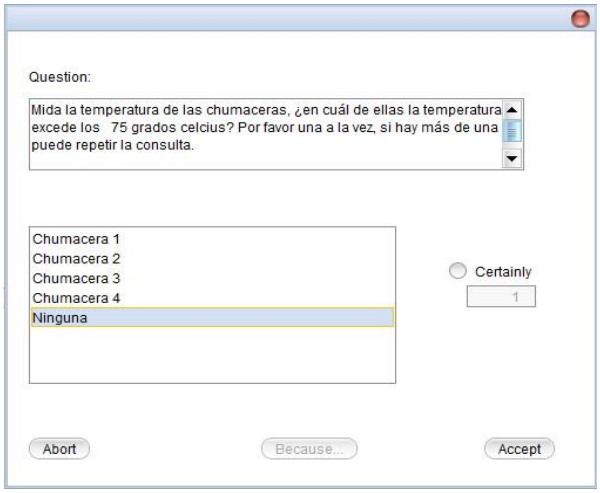


Figura 3.12. Interfaz para elegir la chumacera con temperatura elevada.

Seguidamente el sistema arrojó el resultado que se observa en la figura 3.13, el cual era de esperar por no haber síntomas de sobrecalentamiento.

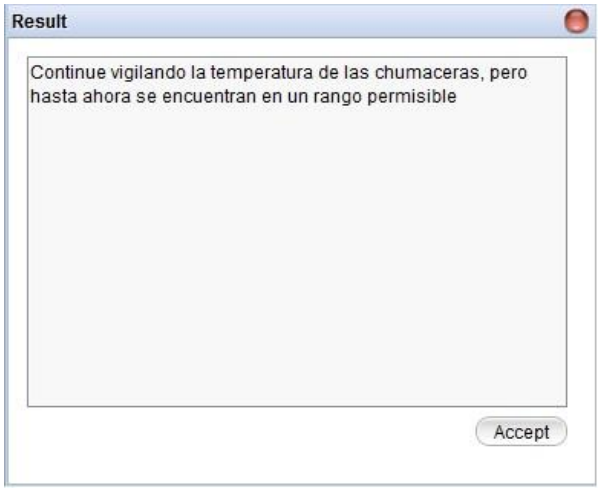


Figura 3.13. Resultado arrojado por el sistema.

3.1.3 Análisis de esfuerzo excesivo

Para terminar con el análisis se elige el síntoma “La bomba requiere de esfuerzo excesivo” como se observa en la figura 3.14.

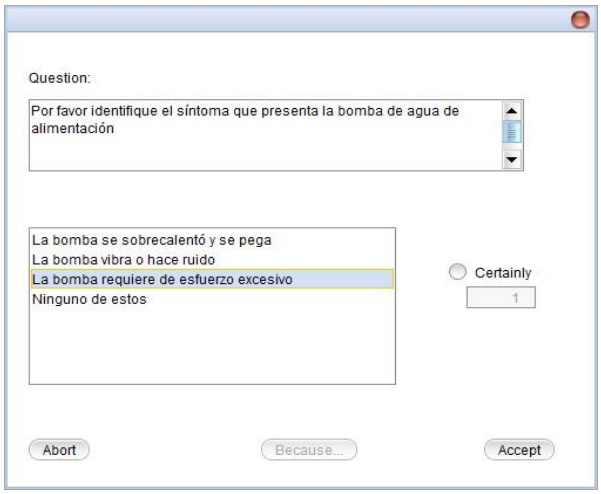


Figura 3.14. Interfaz para elegir el tipo de síntoma.

Luego el sistema comenzó a realizar algunas preguntas, la primera de estas relacionada con el valor de la potencia de la bomba como se observa en la figura 3.15:

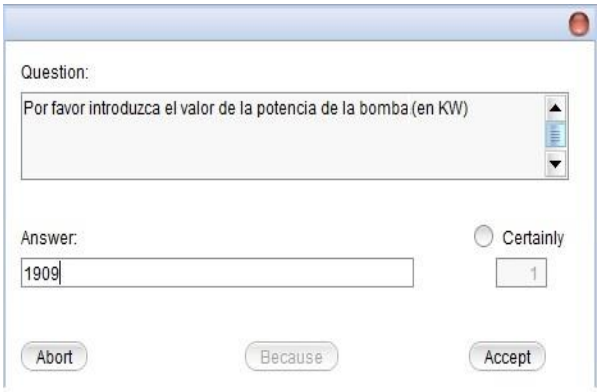


Figura 3.15. Interfaz para insertar el valor de la potencia de la bomba.

Seguidamente le pidió al usuario ingresar el valor de flujo a la salida de la bomba y el valor del amperaje de la misma, ver figuras 3.16 y 3.17.

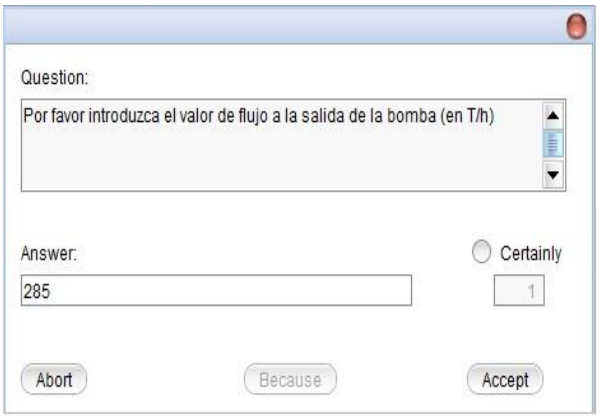


Figura 3.16. Interfaz para insertar el valor del flujo a la salida de la bomba.

Figura 3.17. Interfaz para insertar el valor del amperaje de la bomba.

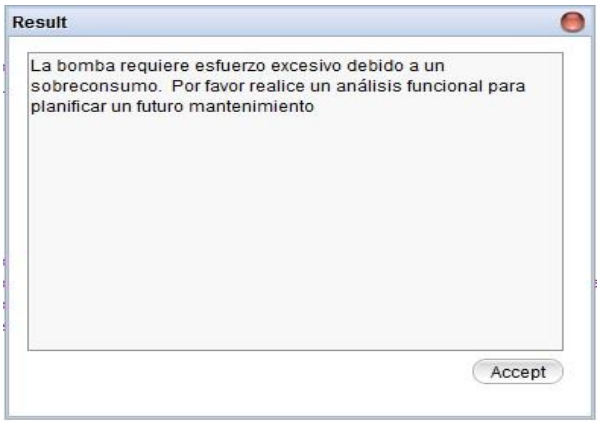


Figura 3.18. Resultado arrojado por el sistema.

Como se observa en la figura 3.18, se identificó un sobreconsumo en la bomba a partir de los datos ingresados. El sistema continuó con las preguntas, en el caso de las figura 3.19 y 3.20 preguntó por la presión de descarga y la presión de succión.

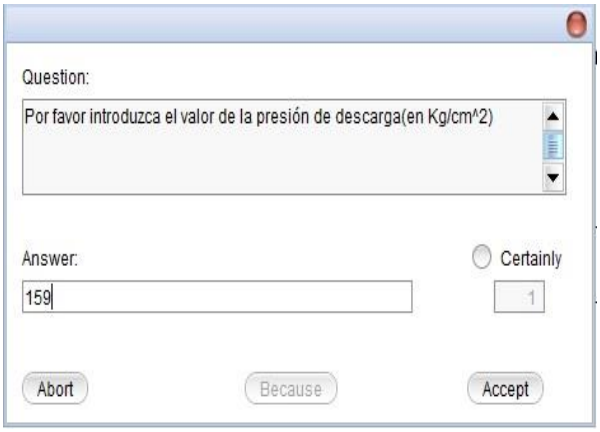


Figura 3.19. Interfaz para insertar el valor de la presión de descarga de la bomba.

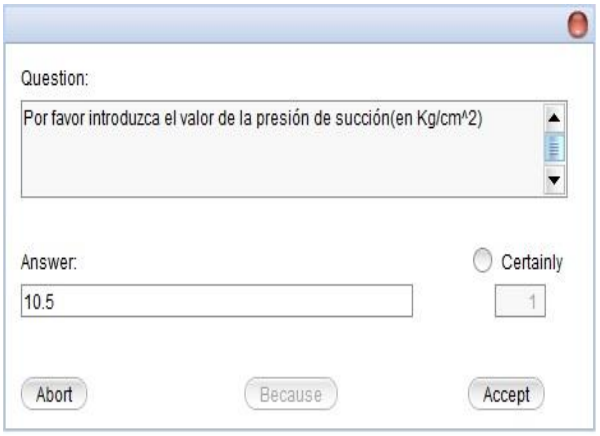


Figura 3.19. Interfaz para insertar el valor de la presión de succión de la bomba.

A continuación se mostró un segundo resultado arrojado por el sistema en el cual aclaró que el sobreconsumo se debía al desgaste como se puede observar en la figura 3.20.

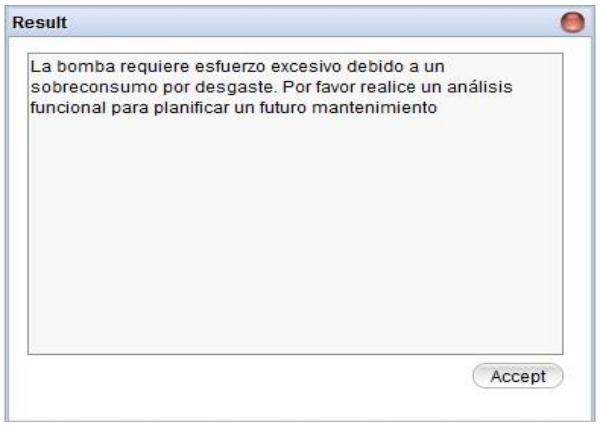


Figura 3.20. Resultado arrojado por el sistema.

El SE a impresión del experto actuó de forma correcta, de una manera similar a como él lo haría, no solo encontró la causa de los síntomas sino que evaluó la peligrosidad del mal funcionamiento y diagnosticó el momento de dar mantenimiento o dio las indicaciones necesarias para planificarlo.

3.2 Análisis económico

El desarrollo del presente trabajo de investigación proporciona beneficios de manera directa para la CTE Carlos M. de Céspedes y al realizar un análisis técnico-económico se demuestra la importancia del mismo.

Si se tiene en cuenta que un salario promedio equivalente a 675 pesos de un trabajador en Cuba, que se trabajó durante un período de desarrollo de la aplicación de un mes de trabajo igual a 24 días efectivos y se respeta la jornada laboral con ocho horas de duración, se puede entonces elaborar una propuesta del presupuesto en gastos de salarios y materiales para el diseño de *CTExperto*, según se muestra en la tabla 3.1.

Ahora bien para la empresa el diseño de *CTExperto* genera beneficios de carácter intangible como el ahorro de tiempo en el proceso de diagnóstico y la reducción de la probabilidad de errores durante el mismo.

Tabla 3.1. Escribir aquí el título de la tabla

Gastos por concepto	Costo por unidad (CUP)	Cantidad de unidades	Total (CUP)
Salario	3.52	192	675,00
Ordenador	125 (por depreciación)	1	125
TOTAL			800,84

Como se ha mencionado en el presente trabajo normalmente hay dos bombas funcionando y una de repuesto, en caso de avería como no hay bomba de respaldo se baja la potencia de generación a 80 MW traduciéndose lo anterior en una pérdida por energía indisponible, la siguiente gráfica muestra el valor de estas pérdidas en la etapa comprendida entre los años 2000 al 2008.

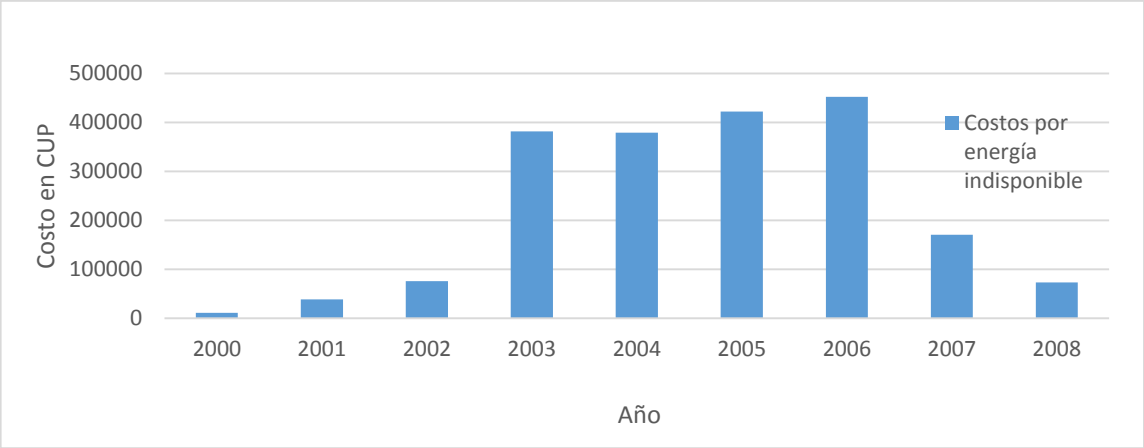


Figura 3.21. Costos por energía indisponible

De la anterior figura se puede concluir que el costo por energía indisponible es variable y se traduce en una pérdida de aproximadamente 222 536,86 pesos anuales a la empresa. Con el desarrollo del *CTExperto* las pérdidas económicas por este concepto pueden ser reducidas considerablemente ya que el número de averías disminuye a raíz de que las fallas que puedan ocurrir serán tratadas con antelación.

Como se puede ver el *CTExperto* representará un ahorro sustancial a la CTE “Carlos M. de Céspedes” solo por el concepto de garantizar la disponibilidad técnica de las bombas de agua de alimentar caldera sin tener en cuenta los costos por mantenimiento innecesarios.

3.3 Conclusiones del capítulo

- El SE desarrollado es capaz de detectar las causas que provocan los síntomas de fallos en las bombas de manera similar a como lo hace el experto.
- Con el desarrollo del SE se pueden disminuir los gastos por energía indisponible considerablemente en la CTE “Carlos M. de Céspedes”.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1 Los Sistemas Expertos son útiles dadas las limitaciones de la memoria humana y la complejidad de los problemas de diagnóstico.

2 Se puede ver un Sistema Experto como: dado un conjunto de síntomas y la descripción de un dispositivo, encontrar una explicación a esos síntomas.

3 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.

4 Tras el proceso de la Ingienieria del Conocimiento se construyen cuatro Bases de Conocimiento con *UCShell*, las cuales fueron validadas con el experto y otros especialistas del grupo de diagnóstico.

5 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.

Recomendaciones

1 Expandir el área de conocimientos del *CTExperto* a todos los equipos roto-dinámicos que tengan relación con los Generadores de vapor.

2 Valorar la viabilidad de realizar el *CTExperto online*, o sea, que trabaje de manera autónoma.

3 Implementar el *CTExperto* en un leguaje de programación como C, C++ y C# que presentan como ventajas su eficiencia, familiaridad y portabilidad a cualquier entorno.

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.

LUGER, G. F. & STUBBLEfiELD, W. A. 1989. *Artificial Intelligence and the Design of Expert Systems,* Redwood City, California, Benjamin & Cummings.

MIGUEL, L. J. D. & PERÁN, J. R. 1997. Métodos de detección y diagnóstico de fallos basados en el modelo de la planta. *Automática e Informítica Industrial,* 29(1)**,** 3-29.

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*.

ROTH, F. H., WATERMAN, D. & LENAT, D. 1984. *Building expert systems,* United States, Addison-Wesley,Reading, MA.

RUZ, J. A., SÁNCHEZ, E. N. & SUÁREZ, D. A. 2005. Esquema neuronal para diagnóstico de fallas en centrales termoeléctricas. *Congreso Nacional de la Asociación de México de Control Automático.* México.

STEVENS, L. 1984. *Artificial Intelligence. The Search for the Perfect Machine,* Nueva York, Hayden Book Company.

VALENZUELA, D. J. C. R. 2007. *Diagnóstico de fallos en sistemas industriales basado en razonamiento borroso y posibilístico.* Universidad Politécnica de Valencia.

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.

VENKATASUBRAMANIAN, V., RENGASWAMY, R., YIN, K. & KAVURI, S. 2003. A review of process fault detection and diagnosis. Part I *Computer and Chemical Engineering* 27**,** 293-311.

VIZCAYA, M. T., BARRIOS, T. R., MORENO, A. P. & SANTIAGO, O. L. 2011. Diagnóstico de fallos en el generador de vapor BKZ-340-140-29M. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones.* Ediciones Cujae.

ZAROR, J. E. B. 2010. *Elaboración de un modelo experto para diagnóstico de fallas: caso Grúa Horquilla.* Tesis en opción al título de Ingeniero de Ejecución Mecánica, Universidad de Talca.

ANEXOS

Anexo I **Parámetros técnicos fundamentales de los generadores de vapor de la Central Termoeléctrica de Cienfuegos.**

Condiciones técnicas	Valor
Salida del sobrecalentador	535 t/h
Salida del recalentador	455 t/h
Presión de vapor a régimen máximo continuo	
Salida del sobrecalentador	131 kgf/cm2
Salida del recalentador	30 kgf/cm2
Temperatura del vapor a régimen máximo continuo	
Salida del sobrecalentador	540 °C
Salida del recalentador	540 °C
Temperatura del agua de alimentar.	
Entrada del economizador	263 °C
Salida del economizador	295 °C
Combustible	petróleo
Sistema de horno	presurizado
Régimen químico de caldera.	
Total de sólidos sílica	<50ppm
Fosfato de sodio	2 a 5ppm
PH	9.5-10

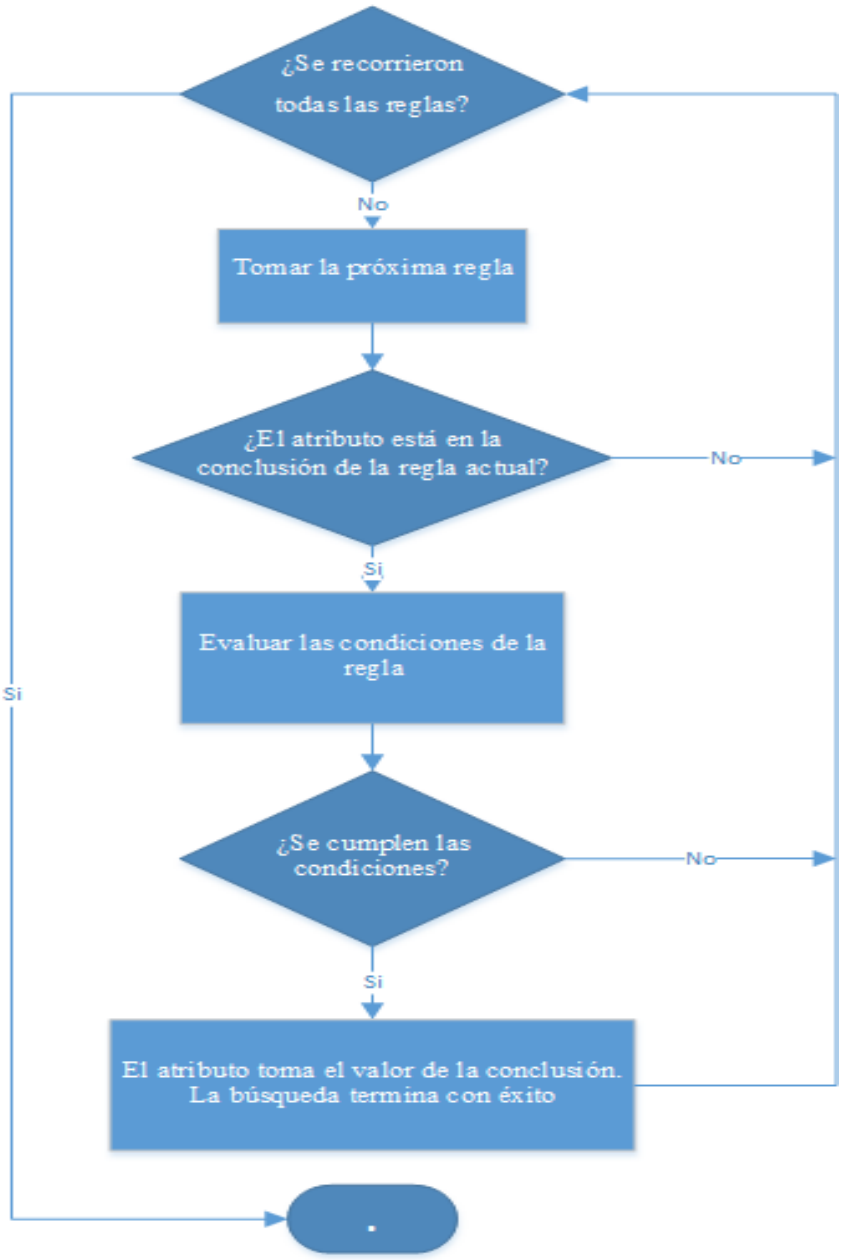
Anexo II Especificaciones de la bomba de alimentación

Condiciones técnicas	Valor
Tipo	Barril horizontal de etapas múltiples
Número de pasos	9
Capacidad	290 ton/h
Flujo mínimo	100 ton/h
Presión de descarga	160 kg/cm2
Presión de succión	10 kg/cm2
Temperatura del agua de alimentar	177,9°C
Flujo de calentamiento	2,5 m3/h
Velocidad	3 570 r.p.m.
Flujo de balance del rotor	14,1 ton/h

Anexo III Especificaciones del motor de la bomba de alimentación

Condiciones técnicas	Valor
Capacidad	1 850 kW
Velocidad	3 570 r.p.m.
3 570 r.p.m.	6 000 V
Corriente	220 A
Frecuencia	60 Hz
No. de polos	2

Anexo IV Búsqueda de un atributo deducible con *FIND*



Anexo V Código de la BC Síntomas.kbs

```
/*Preguntas que el sistema le realiza al usuario*/

ASKS

ASK sintoma:'Por favor identifique el síntoma que presenta la bomba de agua de alimentación'

DOMAIN 'La bomba se sobrecalentó y se pega', 'La bomba vibra o hace ruido', 'La bomba requiere de esfuerzo excesivo', 'Ninguno de estos'


RULES

/*Reglas para inferir nuevos atributos*/

RULE 1

IF condicion='empezar'

 THEN

  inicio:= 'si'

  ACTIONS

   DISPLAY IMAGE ('presentacion.jpg')

END;

RULE 2

IF sintoma= 'La bomba se sobrecalentó y se pega'

 THEN

  sintoma_escogido:= 'si'

  ACTIONS

   DISPLAY 'A continuación se presentarán una serie de preguntas para encontrar las posibles causas que están provocando que "', sintoma,'"'

   CHAIN 'Sobrecalentamiento.kbs'

END;

RULE 3

IF sintoma= 'La bomba vibra o hace ruido'

 THEN

  sintoma_escogido:= 'si'

  ACTIONS

   DISPLAY 'A continuación se presentarán una serie de preguntas para encontrar las posibles causas que están provocando que "', sintoma,'"'

   CHAIN 'Vibraciones.kbs'

END;
```

```
RULE 4
IF sintoma= 'La bomba requiere de esfuerzo excesivo'
 THEN
  sintoma_escogido:= 'si'
  ACTIONS
   DISPLAY 'A continuación se presentarán una serie de preguntas para
encontrar las posibles causas que están provocando que "', sintoma,'"'
   CHAIN 'Esfuerzo_excesivo.kbs'
END;
RULE 5
IF sintoma= 'Ninguno de estos'
 THEN
  sintoma_escogido:= 'no'
  ACTIONS
   DISPLAY 'Lo siento pero solo tengo conocimientos de estos tres síntomas,
por favor contacte al experto para que realice una actualización de las
bases de conocimientos'
END;

/* Aquí comienza el programa, se declaran las acciones que se realizarán*/
ACTIONS
ASSUME condicion IS 'empezar'
 FIND inicio
 FIND sintoma_escogido
END.
```

Anexo VI Código de la BC Sobrecalentamiento.kbs

```
/*Preguntas que el sistema le realiza al usuario*/

ASKS


ASK temp_chumaceras: 'Mida la temperatura de las chumaceras, ¿en cuál de
ellas la temperatura excede los 75 grados Celsius? Por favor una a la vez,
si hay más de una puede repetir la consulta.'

 DOMAIN 'Chumacera 1','Chumacera 2','Chumacera 3','Chumacera 4','Ninguna'

ASK temp_lados_chumacera: '¿La temperatura en ambos lado de la chumacera,
cómo se comporta?'

 DOMAIN 'Iguales', 'Diferentes'

ASK volver: '¿Desea volver a reconsultar en busca de las causas pues el
sistema no le arrojó ningún resultado o porque otro equipo posee este
síntoma?'

 DOMAIN 'Si', 'No'

ASK reconsulta: '¿Desea volver al inicio para consultar otro síntoma?'

 DOMAIN 'Si’, ‘No'


RULES

/*Reglas para inferir nuevos atributos*/

RULE 1

IF

((temp_chumaceras='Chumacera 1') AND (temp_lados_chumacera = 'Iguales'))
OR

((temp_chumaceras='Chumacera 2') AND (temp_lados_chumacera = 'Iguales'))

 THEN

 causa:='si'

 ACTIONS

  DISPLAY 'Las posibles causas de que la bomba se sobrecaliente y se pegue
son: 1-Parte giratoria que roza una estacionaria o 2-Coginetes gastados.
Verifique estas causas y evalúe la falla para un futuro mantenimiento.'

END;

RULE 2

IF (temp_chumaceras ='Chumacera 3') AND (temp_lados_chumacera = 'Iguales')

 THEN

 causa:='si'
```

```
 ACTIONS
  DISPLAY 'Las posibles causas de que la bomba se sobrecaliente y se pegue son las siguientes: 1-Parte giratoria que roza una estacionaria, 2-Coginetes gastados o 3-Margen insuficiente entre la presión de succión y la presión de vapor. Verifique estas causas y evalúe la falla para un futuro mantenimiento.'
END;
RULE 3
IF (temp_chumaceras ='Chumacera 4') AND (temp_lados_chumacera = 'Iguales')
 THEN
 causa:='si'
  ACTIONS
   DISPLAY 'Las posibles causas de que la bomba se sobrecaliente y se pegue son las siguientes: 1-Parte giratoria que roza una estacionaria, 2-Coginetes gastados, 3-Margen insuficiente entre la presión de succión y la presión de vapor o 4-Empuje excesivo causado por una falla mecánica dentro de la bomba o por falla del dispositivo de balance hidráulico si lo hay. Verifique estas causas y evalúe la falla para un futuro mantenimiento.'
END;
RULE 4
IF
(temp_chumaceras ='Chumacera 1' AND temp_lados_chumacera = 'Diferentes')
OR
(temp_chumaceras ='Chumacera 2' AND temp_lados_chumacera = 'Diferentes')
OR
(temp_chumaceras ='Chumacera 3' AND temp_lados_chumacera = 'Diferentes')
OR
(temp_chumaceras ='Chumacera 4' AND temp_lados_chumacera = 'Diferentes')
 THEN
 causa:='si'
  ACTIONS
   DISPLAY 'La posible causa de que la bomba se sobrecaliente y se pegue es: 1-Desalineamiento. Como hay un posible desalineamiento vamos a hacer un análisis de vibraciones para indagar más profundo.'
   CHAIN 'Vibraciones.kbs'
END;
RULE 5
IF temp_chumaceras ='Ninguna'
 THEN
```

```
 causa:='no'
  ACTIONS
   DISPLAY 'Continúe vigilando la temperatura de las chumaceras, pero hasta
ahora se encuentran en un rango permisible.'
END;
RULE 6
IF volver ='Si'
 THEN
 volver_ok:='si'
END;
RULE 7
IF volver ='No'
 THEN
 volver_ok:='si'
 reconsultar_sintoma:='si'
END;
RULE 8
IF reconsulta ='Si'
 THEN
 terminar:='NO'
  ACTIONS
   CHAIN 'Síntomas.kbs'
 END;
RULE 9
IF reconsulta ='No'
 THEN
 terminar:='No'
  ACTIONS
   DISPLAY 'GRACIAS POR SU CONSULTA'
 END;

ACTIONS
/*Aquí comienza el programa, se declaran las acciones que se realizarán*/
REPEAT
RESET ALL
```

```
FIND causa
FIND volver_ok
UNTILKNOWN reconsultar_sintoma
FIND terminar
END.
```

Anexo VII Código de la BC Vibraciones.kbs

```
/*Preguntas que el sistema le realiza al usuario*/

 ASKS

ASK clase: '¿Qué tipo de bomba va a diagnosticar atendiendo a la siguiente clasificación?'

DOMAIN

'1-Partes individuales de motores y máquinas en general, vinculadas integralmente en condiciones normales de operación. Los motores eléctricos de hasta 15 kW de potencia constituyen ejemplos de ésta categoría.',

'2-Máquinas de medianas dimensiones (típicamente motores eléctricos de entre 15 kW y 75 kW de potencia) montadas sobre bases convencionales. Máquinas de hasta 300 kW montadas en bases especiales.',

'3-Grandes máquinas motrices y cualquier otro tipo de máquina rotatoria, montadas sobre bases rígidas y pesadas, exhibiendo rigideces relativamente altas en la dirección donde se efectúe la medición de vibraciones.',

'4-Grandes máquinas motrices y cualquier otro tipo de máquina rotatoria, montadas sobre bases relativamente flexibles en la dirección donde se efectúe la medición de vibraciones (por ejemplo, turbogeneradores y turbinas de gas, cuyas potencias sean superiores a 10 MW.'

BECAUSE 'Es necesario para determinar el nivel de permisibilidad de las vibraciones según la norma ISO 10816'

ASK valor_vib_chumaceras: '¿Qué amplitud presentan las vibraciones en el equipo?'

ASK direccion:'Verifique en qué dirección vibra el equipo'

DOMAIN 'Radial', 'Axial', 'Ambas direcciones'

ASK fase: 'Por favor mida la fase de las vibraciones y elija cómo se comporta'

DOMAIN 'Está en fase', 'El desfasaje es de 180 grados', 'El desfasaje está entre 0 y 180 grados'

ASK baja_frec: 'Verifique si se produce el fenómeno de baja frecuencia en el espectro.'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK vib_1: '¿El primer armónico del espectro está fuera del rango permisible? Recuerde que para hallar la frecuencia donde aparece el primer armónico se divide la velocidad de rotación del equipo entre 60 Hz.'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK vib_2: '¿El segundo armónico del espectro está fuera del rango permisible? Recuerde que para hallar la frecuencia donde aparece el segundo armónico se divide la velocidad de rotación del equipo entre 60 Hz y se multiplica por dos.'
```

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK vib_3: '¿El tercer armónico del espectro está fuera del rango permisible? Recuerde que para hallar la frecuencia donde aparece el tercer armónico se divide la velocidad de rotación del equipo entre 60 Hz y se multiplica por tres.'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK vib_4: '¿El cuarto armónico del espectro está fuera del rango permisible? Recuerde que para hallar la frecuencia donde aparece el cuarto armónico se divide la velocidad de rotación del equipo entre 60 Hz y se multiplica por cuatro.'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK vib_5: '¿El quinto armónico del espectro está fuera del rango permisible? Recuerde que para hallar la frecuencia donde aparece el quinto armónico se divide la velocidad de rotación del equipo entre 60 Hz y se multiplica por cinco.'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK vib_6: '¿El sexto armónico del espectro está fuera del rango permisible? Recuerde que para hallar la frecuencia donde aparece el sexto armónico se divide la velocidad de rotación del equipo entre 60 Hz y se multiplica por seis.'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK vib_7: '¿El séptimo armónico del espectro está fuera del rango permisible? Recuerde que para hallar la frecuencia donde aparece el séptimo armónico se divide la velocidad de rotación del equipo entre 60 Hz y se multiplica por siete.'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK vib_8: '¿El octavo armónico del espectro está fuera del rango permisible? Recuerde que para hallar la frecuencia donde aparece el octavo armónico se divide la velocidad de rotación del equipo entre 60 Hz y se multiplica por ocho.'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK vib_9: '¿El noveno armónico del espectro está fuera del rango permisible? Recuerde que para hallar la frecuencia donde aparece el noveno armónico se divide la velocidad de rotación del equipo entre 60 Hz y se multiplica por nueve.'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK vib_mas_alta: '¿Cuál de los armónicos en el espectro presenta la mayor magnitud?'

DOMAIN 'Primero', 'Segundo', 'Tercero', 'Cuarto', 'Quinto', 'Sexto', 'Séptimo', 'Octavo', 'Noveno'

```
ASK holgura_mecanica: 'Por favor realice un análisis de estructura de la chumacera y fíjese si se encuentra en óptimas condiciones. Una técnica fácil de realizar es echar agua en su base y ver si chapaletea.'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK consulta_rodamiento: 'Por favor diga si el sistema presenta rodamientos para continuar con su diagnóstico'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK D:'Por favor entre el valor del diámetro medio del rodamiento en pulgadas'

ASK d:'Por favor entre el valor del diámetro de las bolas o rodillos en pulgadas'

ASK N:'Por favor entre el valor de la velocidad del eje en revoluciones por segundo'

ASK n:'Por favor entre el valor del número de bolas o rodillos'

ASK existe_FTF: 'Realice un espectro de alta frecuencia y revise si aparecen una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X de la frecuencia de falla en jaula (FTF), en dirección radial.'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK existe_BSF: 'Realice un espectro de alta frecuencia y revise si aparecen una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X de la frecuencia de falla de los elementos rodantes (BSF), en dirección radial.'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK existe_BPFO: 'Realice un espectro de alta frecuencia y revise si aparecen una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X la frecuencia de falla de la pista externa (BPFO), en dirección radial.'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK existe_BPFI: 'Realice un espectro de alta frecuencia y revise si aparecen una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X la frecuencia de falla de la pista interna (BPFI), en dirección radial.'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK existen_bandas_laterales: 'Revise si existen bandas laterales alrededor de los armónicos de las frecuencias del defecto antes encontrado.'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK volver: '¿Desea volver a reconsultar en busca de las causas pues el sistema no le arrojó ningún resultado o porque otro equipo posee este síntoma?'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK reconsulta: '¿Desea volver al inicio para consultar otro síntoma?'
```

```
DOMAIN 'Si', 'No'


RULES

/*Reglas para inferir nuevos atributos*/

RULE 1

 IF (clase='1-Partes individuales de motores y máquinas en general, vinculadas integralmente en condiciones normales de operación. Los motores eléctricos de hasta 15 kW de potencia constituyen ejemplos de ésta categoría.' AND valor_vib_chumaceras < 0.71) OR

(clase='2-Máquinas de medianas dimensiones (típicamente motores eléctricos de entre 15 kW y 75 kW de potencia) montadas sobre bases convencionales. Máquinas de hasta 300 kW montadas en bases especiales.' AND valor_vib_chumaceras < 1.12) OR

(clase='3-Grandes máquinas motrices y cualquier otro tipo de máquina rotatoria, montadas sobre bases rígidas y pesadas, exhibiendo rigideces relativamente altas en la dirección donde se efectúe la medición de vibraciones.' AND valor_vib_chumaceras < 1.8) OR

(clase='4-Grandes máquinas motrices y cualquier otro tipo de máquina rotatoria, montadas sobre bases relativamente flexibles en la dirección donde se efectúe la medición de vibraciones (por ejemplo, turbogeneradores y turbinas de gas, cuyas potencias sean superiores a 10 MW.' AND valor_vib_chumaceras < 2.8)

 THEN

 estado_vibraciones:='Normal'

 vib_chumaceras:='No'

  ACTIONS

   DISPLAY 'El nivel de vibraciones es normal por lo que no es necesario seguir con el análisis'

END;

RULE 2

IF (clase='1-Partes individuales de motores y máquinas en general, vinculadas integralmente en condiciones normales de operación. Los motores eléctricos de hasta 15 kW de potencia constituyen ejemplos de ésta categoría.' AND valor_vib_chumaceras >= 0.71 AND valor_vib_chumaceras <1.8) OR

(clase='2-Máquinas de medianas dimensiones (típicamente motores eléctricos de entre 15 kW y 75 kW de potencia) montadas sobre bases convencionales. Máquinas de hasta 300 kW montadas en bases especiales.' AND valor_vib_chumaceras >=1.12 AND valor_vib_chumaceras < 2.8) OR

(clase='3-Grandes máquinas motrices y cualquier otro tipo de máquina rotatoria, montadas sobre bases rígidas y pesadas, exhibiendo rigideces relativamente altas en la dirección donde se efectúe la medición de
```

vibraciones.' AND valor_vib_chumaceras >= 1.8 AND valor_vib_chumaceras < 4.5) OR

(clase='4-Grandes máquinas motrices y cualquier otro tipo de máquina rotatoria, montadas sobre bases relativamente flexibles en la dirección donde se efectúe la medición de vibraciones (por ejemplo, turbogeneradores y turbinas de gas, cuyas potencias sean superiores a 10 MW.' AND valor_vib_chumaceras >= 2.8 AND valor_vib_chumaceras < 7.1)

THEN

estado_vibraciones:='Permisible'

vib_chumaceras:='Si'

exito:='no'

recomendacion:='incrementar la frecuencia de monitoreo para darle seguimiento a la afectación y determinar un futuro mantenimiento.'

END;

RULE 3

IF (clase='1-Partes individuales de motores y máquinas en general, vinculadas integralmente en condiciones normales de operación. Los motores eléctricos de hasta 15 kW de potencia constituyen ejemplos de ésta categoría.' AND valor_vib_chumaceras >= 1.8 AND valor_vib_chumaceras < 4.5) OR

(clase='2-Máquinas de medianas dimensiones (típicamente motores eléctricos de entre 15 kW y 75 kW de potencia) montadas sobre bases convencionales. Máquinas de hasta 300 kW montadas en bases especiales.' AND valor_vib_chumaceras >= 2.8 AND valor_vib_chumaceras < 7.1) OR

(clase='3-Grandes máquinas motrices y cualquier otro tipo de máquina rotatoria, montadas sobre bases rígidas y pesadas, exhibiendo rigideces relativamente altas en la dirección donde se efectúe la medición de vibraciones.' AND valor_vib_chumaceras >= 4.5 AND valor_vib_chumaceras < 11.2) OR

(clase='4-Grandes máquinas motrices y cualquier otro tipo de máquina rotatoria, montadas sobre bases relativamente flexibles en la dirección donde se efectúe la medición de vibraciones (por ejemplo, turbogeneradores y turbinas de gas, cuyas potencias sean superiores a 10 MW.' AND valor_vib_chumaceras >= 7.1 AND valor_vib_chumaceras < 18)

THEN

estado_vibraciones:='Límite'

vib_chumaceras:='Si'

exito:='no'

recomendacion:='incrementar la frecuencia de monitoreo para hacerle un seguimiento a la afectación y programar la reparación para el próximo mantenimiento'

END;

```
RULE 4

IF (clase='1-Partes individuales de motores y máquinas en general, vinculadas integralmente en condiciones normales de operación. Los motores eléctricos de hasta 15 kW de potencia constituyen ejemplos de ésta categoría.' AND valor_vib_chumaceras >4.5) OR

(clase='2-Máquinas de medianas dimensiones (típicamente motores eléctricos de entre 15 kW y 75 kW de potencia) montadas sobre bases convencionales. Máquinas de hasta 300 kW montadas en bases especiales.' AND valor_vib_chumaceras >7.1) OR

(clase='3-Grandes máquinas motrices y cualquier otro tipo de máquina rotatoria, montadas sobre bases rígidas y pesadas, exhibiendo rigideces relativamente altas en la dirección donde se efectúe la medición de vibraciones.' AND valor_vib_chumaceras >11.2) OR

(clase='4-Grandes máquinas motrices y cualquier otro tipo de máquina rotatoria, montadas sobre bases relativamente flexibles en la dirección donde se efectúe la medición de vibraciones (por ejemplo, turbogeneradores y turbinas de gas, cuyas potencias sean superiores a 10 MW.' AND valor_vib_chumaceras >18)

 THEN

 estado_vibraciones:='No permisible'

 vib_chumaceras:='Si'

 exito:='no'

 recomendacion:='parar la bomba y darle un mantenimiento inmediato'

END;

RULE 5

IF estado_vibraciones='Normal'

 THEN

 causa:='no existe'

END;

RULE 6

IF (estado_vibraciones='Permisible' OR estado_vibraciones='Límite' OR estado_vibraciones='No permisible') AND

vib_1='Si' AND

vib_2='Si' AND

vib_3='Si' AND

vib_4='No' AND

vib_5='No' AND

vib_6='No' AND

vib_7='No' AND
```

```
vib_8='No' AND
vib_9='No' AND
baja_frec='No'
 THEN
 causa:= 'desalineamiento'
  ACTIONS
   DISPLAY 'Se ha detectado un problema de desalinemiento. Estos se presentan cuando las líneas centrales de dos ejes no son coincidentes (paralelismo), o bien cuando forman determinado ángulo. Continuemos con el análisis para determinar el tipo de desalineamiento.'
END;
RULE 7
IF (estado_vibraciones='Permisible' OR estado_vibraciones='Límite' OR estado_vibraciones='No permisible') AND
vib_1='Si' AND
vib_2='No' AND
vib_3='No' AND
vib_4='No' AND
vib_5='No' AND
vib_6='No' AND
vib_7='No' AND
vib_8='No' AND
vib_9='No' AND
baja_frec='No' AND
holgura_mecanica='No'
 THEN
 causa:= 'holgura'
 exito:='si'
 diagnostico:='dieciocho'
  ACTIONS
   DISPLAY 'Como usted ha comprobado existe una fatiga estructural debido a un ablandamiento o desplazamiento del pie de la máquina, por holgura en los tornillos o por deterioro de los componentes de sujeción. Se recomienda primero revisar el estado de fatiga del pie de la máquina (rajaduras, corrosión). Luego debe verificarse el estado de los sujetadores y por último el estado de la cimentación. Se recomienda realizar nuevamente el análisis debido a que pudiera haber desbalance. No obstante las vibraciones
```

```
se encuentran en un nivel: "', estado_vibraciones,'", por lo que se le
recomienda ',recomendacion
   DISPLAY IMAGE ('holgura_estructura.jpg')
END;
RULE 8
IF (estado_vibraciones='Permisible' OR estado_vibraciones='Límite' OR
estado_vibraciones='No permisible') AND
vib_1='Si' AND
vib_2='No' AND
vib_3='No' AND
vib_4='No' AND
vib_5='No' AND
vib_6='No' AND
vib_7='No' AND
vib_8='No' AND
vib_9='No' AND
baja_frec='No' AND
holgura_mecanica='Si'
 THEN
 causa:= 'desbalance'
  ACTIONS
   DISPLAY 'La presencia del primer armónico indica la probabilidad que
exista desbalance en los ejes. Este curre cuando el eje de inercia de la
masa en rotación no coincide con el eje de giro de la masa en rotación.
Continuemos con el análisis para determinar qué tipo de desbalance
presenta.'
END;
RULE 9
IF (estado_vibraciones='Permisible' OR estado_vibraciones='Límite' OR
estado_vibraciones='No permisible') AND
(vib_1='Si' AND
vib_2='Si' AND
vib_3='Si' AND
vib_4='No' AND
vib_5='No' AND
vib_6='No' AND
```

```
vib_7='No' AND
vib_8='No' AND
vib_9='No' AND
baja_frec='Si') OR
(vib_1='Si' AND
vib_2='Si' AND
vib_3='Si' AND
vib_4='Si' AND
vib_5='Si' AND
vib_6='Si' AND
vib_7='Si' AND
vib_8='Si' AND
vib_9='Si' AND
baja_frec='No')
 THEN
 causa:= 'holgura'
  ACTIONS
   DISPLAY 'La presencia de los armónicos indican la probabilidad que exista algún tipo holgura.'
END;
RULE 10
IF
causa='desalineamiento' AND
direccion='Radial' AND
vib_mas_alta='Segundo'
 THEN
 exito:='si'
 diagnostico:='cinco'
  ACTIONS
   DISPLAY 'La posible causa de que la bomba vibre o haga ruido es debido a un: "Desalineamiento paralelo". Ocurre cuando el eje del motor y el eje conducido son paralelos, pero no colineales, como se muestra en la siguiente figura. Para corregirlo, debe alinear los ejes, recuerde utilizar el equipo adecuado para este propósito. No obstante las vibraciones se encuentran en un nivel: "',estado_vibraciones,'", por lo que se le recomienda ',recomendacion
```

```
   DISPLAY IMAGE ('desalimeamiento_paralelo.jpg')
END;
RULE 11
IF
causa='desalineamiento' AND
direccion='Axial' AND
vib_mas_alta='Primero'
 THEN
 exito:='si'
 diagnostico:='seis'
  ACTIONS
   DISPLAY  'La posible causa de que la bomba vibre o haga ruido es debido a un : "Desalineamiento angular". Ocurre cuando el eje del motor y el eje conducido no son paralelos, como se muestra en la siguiente figura. Para corregirlo, debe alinear los ejes, recuerde utilizar el equipo adecuado para este propósito. No obstante las vibraciones se encuentran en un nivel: "', estado_vibraciones, '", por lo que se le recomienda ', recomendacion
   DISPLAY IMAGE ('desalimeamiento_angular.jpg'
END;
RULE 12
IF
(estado_vibraciones='Permisible'   OR   estado_vibraciones='Límite'   OR estado_vibraciones='No permisible') AND
(vib_1='Si' AND
vib_2='Si' AND
vib_3='Si' AND
vib_4='Si' AND
vib_5='Si' AND
vib_6='Si' AND
vib_7='Si' AND
vib_8='Si' AND
vib_9='No' AND
baja_frec='No') AND
(direccion='Axial' OR direccion='Radial') AND
vib_mas_alta='Segundo'
 THEN
```

```
 exito:='si'
 diagnostico:='siete'
  ACTIONS
   DISPLAY 'La posible causa de que la bomba vibre o haga ruido es debido a un: "Desalineamiento severo". Cuando el desalineamiento radial o axial se convierte en severo, se pueden generar picos de alta amplitud en muchos armónicos mayores. Es una combinación del desalineamiento angular y paralelo pues el eje del motor y el eje conducido no son paralelos ni colineales, como se muestra en la siguiente figura. Para corregirlo, debe alinear los ejes, recuerde utilizar el equipo adecuado para este propósito. No obstante las vibraciones se encuentran en un nivel: "', estado_vibraciones,'", por lo que se le recomienda ', recomendacion
   DISPLAY IMAGE ('desalimeamiento_severo.jpg')
END;
RULE 13
IF
causa='desalineamiento' AND
direccion='Axial' AND
vib_mas_alta='Segundo'
 THEN
 exito:='si'
 diagnostico:='ocho'
  ACTIONS
   DISPLAY 'Las posible causa de que la bomba vibre o haga ruido es debido a un: '"Cojinete desalineado" como se observa en la siguiente figura. El cojinete deteriorado generará considerable vibración axial. Causará movimiento de torsión con aproximadamente fase de 180º, moviéndose de la parte superior a la inferior y de lado a lado medido en la dirección axial en el mismo housing de la chumacera. Intentar alinear el coupling o balancear el rotor no aliviará, la chumacera debe ser desmontada e instalalada correctamente. No obstante las vibraciones se encuentran en un nivel: "',estado_vibraciones,'", por lo que se le recomienda ',recomendacion
   DISPLAY IMAGE ('cojinete_desalineado.jpg')
END;
RULE 14
IF
causa='holgura' AND
direccion='Radial' AND
vib_mas_alta='Segundo'
```

```
 THEN
 exito:='si'
 diagnostico:='nueve'
  ACTIONS
   DISPLAY 'La posible causa de que la bomba vibre o haga ruido es debido a: "holgura en la sujeción". En este tipo de holgura se produce un aflojamiento o pérdida de tuercas o fracturas en la estructura de soporte. Se recomienda para corregir el problema revisar el estado de la estructura del soporte y luego verificarse el torque de apriete de los sujetadores. No obstante las vibraciones se encuentran en un nivel: "', estado_vibraciones,'", por lo que se le recomienda ', recomendacion
   DISPLAY IMAGE ('holgura_en_sujecion.jpg')
 END;
RULE 15
IF
causa='holgura' AND
direccion='Radial' AND
vib_mas_alta='Primero'
 THEN
 exito:='si'
 diagnostico:='diez'
  ACTIONS
   DISPLAY 'La posible causa de que la bomba vibre o haga ruido es debido a: "holgura eje-alojamiento". En este tipo de holgura se produce un aflojamiento de manguitos, tolerancias de manufactura inadecuadas (con juego), y holgura entre el impulsor y su eje en bombas. Causa un truncamiento en la forma de onda en el dominio del tiempo. Se recomienda verificar la colocación de los manguitos y los juegos eje-agujero cercano al punto de medición. Igualmente, los ajustes de rotor-eje. No obstante las vibraciones se encuentran en un nivel: "', estado_vibraciones,'", por lo que se le recomienda', recomendacion
   DISPLAY IMAGE ('holgura_eje-agujero.jpg')
END;
RULE 16
IF
causa='desbalance' AND
direccion='Axial' AND
fase ='El desfasaje está entre 0 y 180 grados'
 THEN
```

```
 exito:='si'
 diagnostico:='once'
  ACTIONS
   DISPLAY  'La posible causa de que la bomba vibre o haga ruido es debido a: "Desbalance dinámico". Este es el tipo dominante de desbalance que se presenta y es una combinación de ambos, desbalance de fuerzas y el desbalance de par, como se muestra en la figura. 1X RPM domina el espectro y seguramente requiere una corrección de 2 planos. Aquí, la diferencia de fase radial entre la chumacera interior y exterior puede variar donde quiera de 0º a 180º. Sin embargo, la diferencia de fase horizontal debe emparejarse fuertemente a la diferencia de fase vertical. No obstante las vibraciones se encuentran en un nivel: "', estado_vibraciones,'", por lo que se le recomienda ', recomendacion
   DISPLAY IMAGE ('desbalance_dinamico.jpg')
END;
RULE 17
IF
causa='desbalance' AND (direccion='Ambas direcciones')
 THEN
 exito:='si'
 diagnostico:='doce'
  ACTIONS
   DISPLAY 'La posible causa de que la bomba vibre o haga ruido es debido a: "Desbalance de rotores en voladizo". Ocurre en rotores que se encuentran en el extremo de un eje. Es producido por desgaste en la superficie del rotor y doblamiento del eje. Para corregir la falla, primero debe verificarse que el rotor NO TENGA EXCENTRICIDAD NI QUE EL EJE ESTÉ DOBLADO. Luego debe realizarse el balanceo adecuado. Consulte a un experto en balanceo de máquinas. No obstante las vibraciones se encuentran en un nivel: "', estado_vibraciones,'", por lo que se le recomienda ',recomendacion
   DISPLAY IMAGE ('desbalance_voladizo.jpg')
END;
RULE 18
IF
causa='desbalance' AND
direccion='Radial' AND
fase ='Está en fase'
 THEN
 exito:='si'
```

```
 diagnostico:='trece'
  ACTIONS
   DISPLAY 'La posible causa de que la bomba vibre o haga ruido es debido
a: "Desbalance estático". Identificado también como desbalance de fuerzas
se define como aquella condición para la cual el eje longitudinal principal
de inercia de rotor está desplazado paralelamente con respecto al eje de
rotación. Este puede ser identificado fácilmente colocando el rotor sobre
dos apoyos prismáticos y viendo como la fuerza de gravedad hace que el
lado más pesado se coloque hacia abajo. No obstante las vibraciones se
encuentran en un nivel: "', estado_vibraciones,'", por lo que se le
recomienda', recomendacion
   DISPLAY IMAGE ('desbalance_estatico.jpg')
END;
RULE 19
 IF
causa='desbalance' AND
direccion='Radial' AND
fase ='El desfasaje es de 180 grados'
 THEN
 exito:='si'
 diagnostico:='catorce'
  ACTIONS
   DISPLAY 'La posible causa de que la bomba vibre o haga ruido es debido
a: "Desbalance de par". Se define como aquella condición para la cual el
eje longitudinal principal de inercia de rotor intercepta al eje de
rotación en el centro de masas del propio rotor. En este caso las lecturas
de amplitud de las vibraciones de un rotor simétrico soportado por
cojinetes idénticos, estas serán iguales pero la fase tendrá una diferencia
de 180 grados. No obstante las vibraciones se encuentran en un nivel: "',
estado_vibraciones,'", por lo que se le recomienda', recomendacion
   DISPLAY IMAGE ('desbalance_par.jpg')
END;
RULE 20
IF consulta_rodamiento='Si'
 THEN
 frecuencias:='Si'
 FTF:=0.5*N*(D/d)*(1-(d/D)^2)
 BPFO:=0.5*N*n*(1-(d/D))
 BPFI:=0.5*N*n*(1+ (d/D))
```

```
 BSF:=2*0.5*N*(1-(d/D))
  ACTIONS
   DISPLAY 'La frecuencia falla de las bolas o rodillos (BSF por sus siglas en inglés) es', BSF, 'Hz. La frecuencia de falla en la pista exterior (BPFO por sus siglas en inglés) es', BPFO, 'Hz. La frecuencia de falla de la caja (FTF por sus siglas en inglés) es', FTF, 'Hz. La frecuencia de falla en la pista interior (BPFI por sus siglas en inglés) es ', BPFI, 'Hz. '
   FINDALL causa_rodamiento
END;
RULE 21
IF consulta_rodamiento='Si' AND existe_FTF='Si'
 THEN
 causa_rodamiento:= 'caja'
  ACTIONS
   DISPLAY 'Existe una deformación de la jaula, caja o cubierta que mantiene en su posición a los elementos rodantes.'
END;
RULE 22
IF consulta_rodamiento='Si' AND existe_BSF='Si'
 THEN
 causa_rodamiento:= 'bola o rodillo'
  ACTIONS
   DISPLAY 'Existe un agrietamiento o desastillamiento del material en los elementos rodantes, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente.'
END;
RULE 23
IF consulta_rodamiento='Si' AND existe_BPFO='Si'
 THEN
 causa_rodamiento:= 'pista exterior'
  ACTIONS
   DISPLAY 'Existe un agrietamiento o desastillamiento del material en la pista externa, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente. '
END;
RULE 24
IF consulta_rodamiento='Si' AND existe_BPFI='Si'
```

```
 THEN
 causa_rodamiento:= 'pista interior'
  ACTIONS
   DISPLAY 'Existe un agrietamiento o desastillamiento del material en la pista interna, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente.'
END;
RULE 25
IF consulta_rodamiento='Si' AND existe_BPFI='No' AND existe_BPFO='No' AND
existe_BSF='No' AND existe_FTF='No'
 THEN
 causa_rodamiento:= 'no hay'
  ACTIONS
   DISPLAY 'El rodamiento no se encuentra defectuoso.'
END;
RULE 26
IF consulta_rodamiento='Si' AND causa_rodamiento= 'no hay'
 THEN
 diagnostico_rodamiento:= 'no hay'
END;
RULE 27
IF consulta_rodamiento='Si' AND (causa_rodamiento= 'bola o rodillo' OR causa_rodamiento= 'pista exterior' OR causa_rodamiento= 'pista interior' OR causa_rodamiento= 'caja') AND existen_bandas_laterales='Si'
 THEN
 diagnostico_rodamiento:= 'Debe susutituir el rodamiento cuanto antes, independientemente de las amplitudes de las frecuencias de defectos del rodamiento en el espectro de vibración.'
  ACTIONS
   DISPLAY diagnostico_rodamiento
END;
RULE 28
IF consulta_rodamiento='Si' AND (causa_rodamiento= 'bola o rodillo' OR causa_rodamiento= 'pista exterior' OR causa_rodamiento= 'pista interior' OR causa_rodamiento= 'caja') AND existen_bandas_laterales='No'
 THEN
```

```
 diagnostico_rodamiento:= 'Realice un chequeo continuo del rodamiento pues hay probabilidades grandes de fallas.'
  ACTIONS
   DISPLAY diagnostico_rodamiento
END;
RULE 29
IF exito='no'
 THEN
 diagnostico:='no hay'
  ACTIONS
   DISPLAY 'Lo siento pero no pude encontrar un diagnóstico para los datos entrados por usted. No obstante las vibraciones se encuentran en un nivel:"', estado_vibraciones,'", por lo que se le recomienda', recomendacion
END;
RULE 32
IF volver ='Si'
 THEN
 volver_ok:='si'
END;
RULE 33
IF volver ='No'
 THEN
 volver_ok:='si'
 reconsultar_sintoma:='si'
END;
RULE 34
IF reconsulta ='Si'
 THEN
 terminar:='NO'
  ACTIONS
   CHAIN 'Síntomas.kbs'
END;
RULE 35
IF reconsulta ='No'
 THEN
```

```
 terminar:='No'
  ACTIONS
   DISPLAY 'GRACIAS POR SU CONSULTA'
END;

ACTIONS
/*Aquí comienza el programa, se declaran las acciones que se realizarán*/
REPEAT
 RESET ALL
 FIND diagnostico
 FIND frecuencias
 FIND diagnostico_rodamiento
 FIND volver_ok
UNTILKNOWN reconsultar_sintoma
FIND terminar
END.
```

Anexo VIII Norma ISO 10816

<table>
<tr><td>45</td><td rowspan="4">No Permisible</td><td rowspan="3">No Permisible</td><td rowspan="2">No Permisible</td><td>No Permisible</td></tr>
<tr><td>28</td><td rowspan="2">Límite</td></tr>
<tr><td>18</td><td rowspan="2">Límite</td></tr>
<tr><td>11,2</td><td rowspan="2">Límite</td></tr>
<tr><td>7,1</td><td rowspan="2">Límite</td><td rowspan="2">Admisible</td></tr>
<tr><td>4,5</td><td rowspan="2">Límite</td><td rowspan="2">Admisible</td></tr>
<tr><td>2,8</td><td rowspan="2">Admisible</td><td rowspan="4">Normal</td></tr>
<tr><td>1,8</td><td rowspan="2">Admisible</td><td rowspan="3">Normal</td></tr>
<tr><td>1,12</td><td rowspan="3">Normal</td></tr>
<tr><td>0,71</td><td rowspan="3">Normal</td></tr>
<tr><td>0,45</td></tr>
<tr><td>0,28</td></tr>
<tr><td>↑
vel.
[mm/s]
RMS</td><td>Clase I</td><td>Clase II</td><td>Clase III</td><td>Clase IV</td></tr>
</table>

Clase I Partes individuales de motores y máquinas en general, vinculadas integralmente en condiciones normales de operación. Los motores eléctricos de hasta *15 kW* de potencia constituyen ejemplos de ésta categoría.

Clase II Máquinas de medianas dimensiones (típicamente motores eléctricos de entre *15 kW* y *75 kW* de potencia) montadas sobre bases convencionales. Máquinas de hasta *300 kW* montadas en bases especiales.

Clase III Grandes máquinas motrices y cualquier otro tipo de máquina rotatoria, montadas sobre bases rígidas y pesadas, exhibiendo rigideces relativamente altas en la dirección donde se efectúe la medición de vibraciones.

Clase VI Grandes máquinas motrices y cualquier otro tipo de máquina rotatoria, montadas sobre bases relativamente flexibles en la dirección donde se efectúe la medición de vibraciones (por ejemplo, turbogeneradores y turbinas de gas, cuyas potencias sean superiores a *10 MW*).

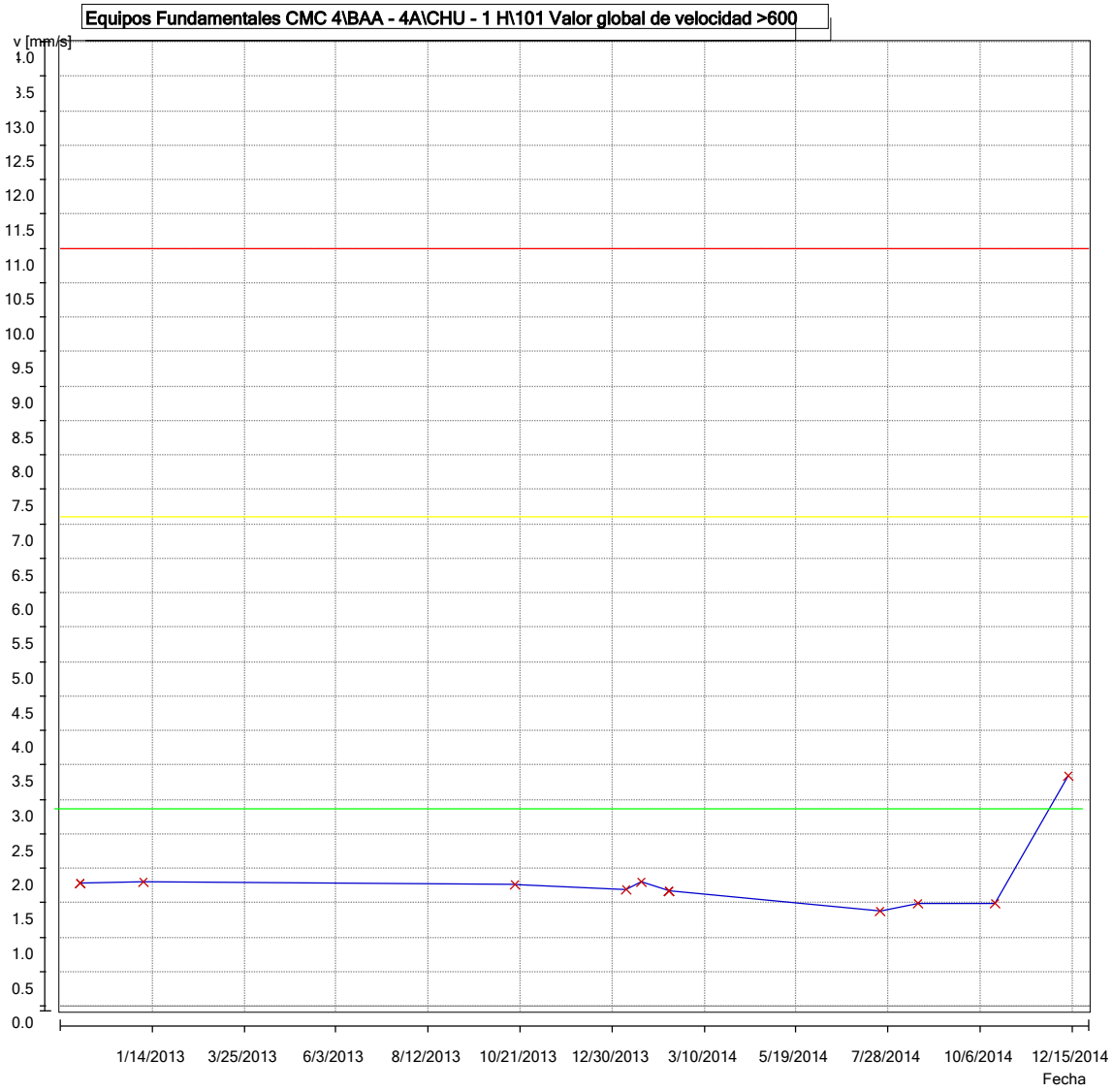
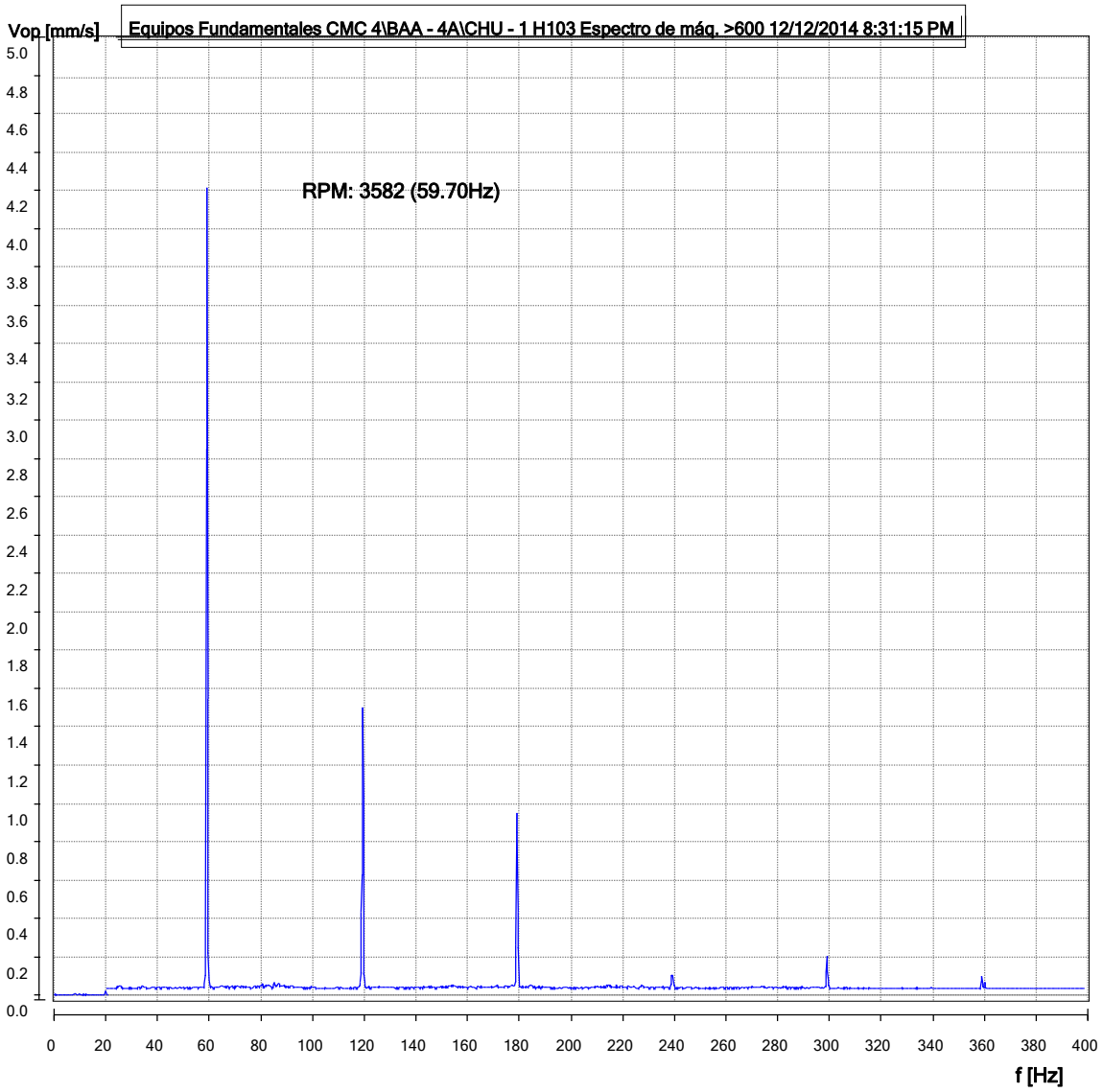
Anexo IX Código de la BC Esfuerzo_escesivo.kbs

```
/*Preguntas que el sistema le realiza al usuario*/

ASKS


ASK presion_descarga: 'Por favor introduzca el valor de la presión de descargan (en Kg/cm^2)'

ASK potencia_bomba: 'Por favor introduzca el valor de la potencia de la bomba (en KW)'

ASK presion_succion:'Por favor introduzca el valor de la presión de succión (en Kg/cm^2)'

ASK flujo: 'Por favor introduzca el valor de flujo a la salida de la bomba (en T/h)'

ASK amperaje: 'Por favor introduzca el valor del amperaje'

ASK volver: '¿Desea volver a reconsultar en busca de las causas pues el sistema no le arrojó ningún resultado o porque otro equipo posee este síntoma?'

DOMAIN 'Si', 'No'

ASK reconsulta: '¿Desea volver al inicio para consultar otro síntoma?'

DOMAIN 'Si', 'No'

/*Reglas para inferir nuevos atributos*/

RULES


RULE 1

IF (potencia_bomba > 3.1311*flujo + 923.92) OR (amperaje >0.3053*flujo + 92.884)

 THEN

 diagnostico:='quince'

  ACTIONS

   DISPLAY 'La bomba requiere esfuerzo excesivo debido a un sobreconsumo. Por favor realice un análisis funcional para planificar un futuro mantenimiento'

END;

RULE 2

IF ((presion_descarga - presion_succion) < -0.0008*flujo*flujo + 0.1598*flujo +176.38)

 THEN

 diagnostico:='dieciséis'
```

```
  ACTIONS
   DISPLAY 'La bomba requiere esfuerzo excesivo debido a un sobreconsumo
por desgaste. Por favor realice un análisis funcional para planificar un
futuro mantenimiento'
END;
RULE 3
IF amperaje < 100
 THEN
 diagnostico:='diecisiete'
  ACTIONS
   DISPLAY 'Las posibles causa de que la bomba requiera esfuerzo excesivo
es debido a: 1-Velocidad muy alta, 2-Dirección de rotación invertida, 3-
Cuerpos extraños en el impulsor, 4-Desalineamiento o 5-Flecha doblada.
Verifique estas causas y evalúe la falla para un futuro mantenimiento'
END;
RULE 4
IF volver ='Si'
 THEN
 volver_ok:='si'
END;
RULE 5
IF volver ='No'
 THEN
 volver_ok:='si'
 reconsultar_sintoma:='si'
END;
RULE 6
IF reconsulta ='Si'
 THEN
 terminar:='NO'
  ACTIONS
   CHAIN 'Síntomas.kbs'
END;
RULE 7
IF reconsulta ='No'
 THEN
```

```
 terminar:='No'
  ACTIONS
   DISPLAY 'GRACIAS POR SU CONSULTA'
END;

ACTIONS
/*Aquí comienza el programa, se declaran las acciones que se realizarán*/
REPEAT
 RESET ALL
 FINDALL diagnostico
 FIND volver_ok
UNTILKNOWN reconsultar_sintoma
FIND terminar
END.
```

Anexo X Amplitud de las vibraciones



Anexo XI Espectro de vibraciones