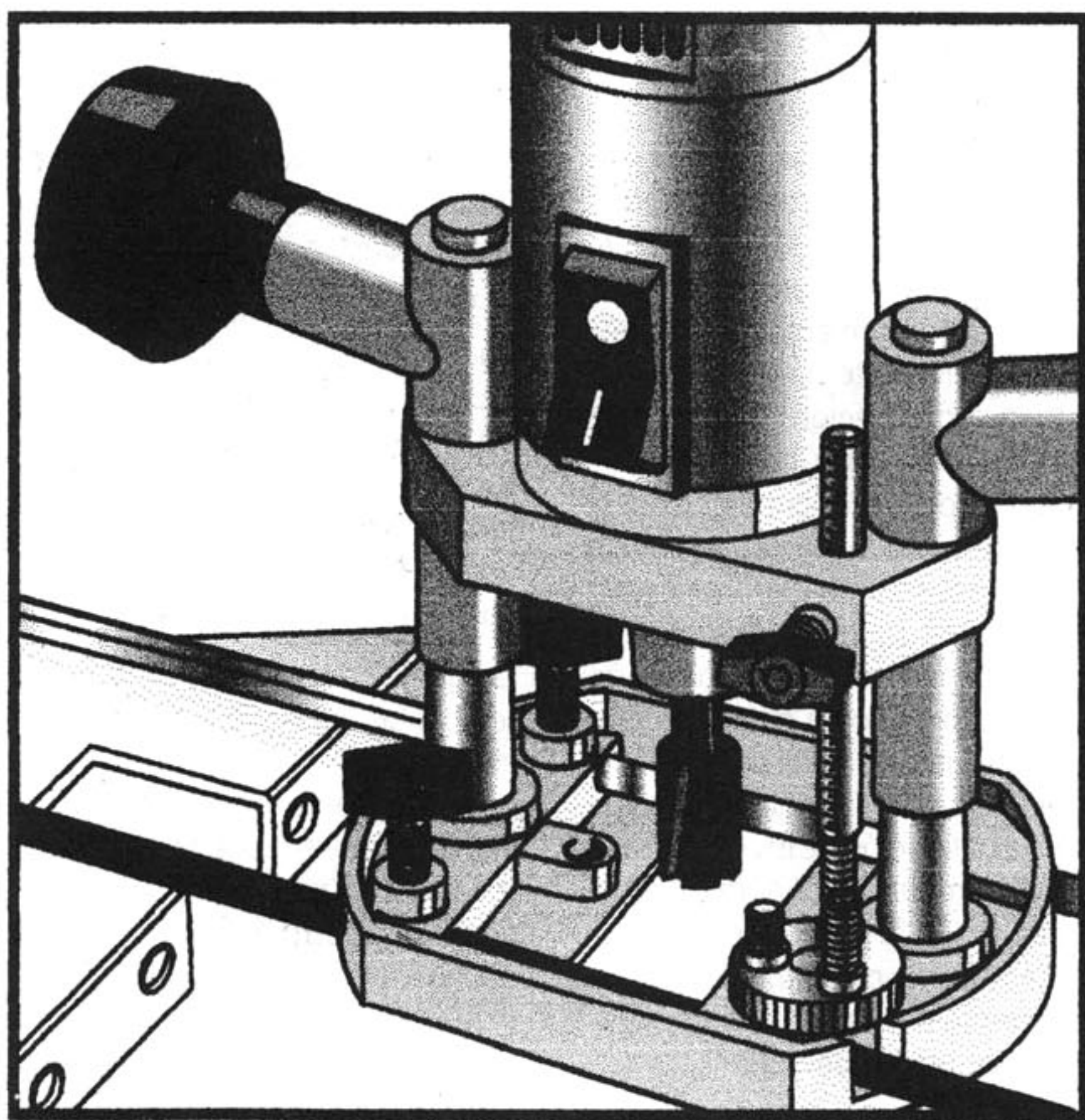


BOMBEX - Sistema Experto en Bombas Centrífugas

Aseguramiento del conocimiento y la experiencia en la G.C.B. de Ecopetrol



□ **Edwin Montoya**
Ingeniero Mecánico
Superintendencia Técnica
Departamento de Ingeniería
de Plantas
Ecopetrol - Gerencia Complejo
Barrancabermeja
Colombia

□ **Josué Machuca Martínez**
Ingeniero de Sistemas
Multiexpert Soft Ltda.

RESUMEN

Mucho se ha hablado sobre la importancia que representa para las organizaciones contar con una estructura dispuesta a suministrar información técnica actualizada, como producto de los conocimientos y experiencias del personal calificado, para tomar decisiones rápidas minimizando el riesgo de equivocación o para apoyar a los empleados en los trabajos de diseño, construcción, operación, mantenimiento o administración; sin embargo, la mayoría de las empresas estatales colombianas y algunas del sector privado, se están quedando sin tecnología propia porque no han generado una cultura que propicie la *desincorporación del conocimiento* para que éste sea manejado por las organizaciones, como uno de sus activos más valiosos.

Este artículo presenta la experiencia de la aplicación de la metodología de Sistemas Expertos (S.E.) como una alternativa de solución a la necesidad de aseguramiento de conocimiento en Ecopetrol - Gerencia Complejo Barrancabermeja G.C.B. (Colombia). Específicamente detalla características de un sistema basado en el conocimiento para el análisis de fallas en bombas centrífugas en la G.C.B.

Se comienza ilustrando los estudios iniciales de viabilidad que permitieron determinar que una de las actividades prioritarias que podían ser

* La Revista recibió este texto en junio de 1998.

soportadas por la metodología era el diagnóstico de fallas en Bombas Centrífugas lo que dio base para el planteamiento y posterior desarrollo del proyecto.

BOMBEX, es un sistema basado en el conocimiento para guiar a los analistas de fallas en la toma de decisiones, y las acciones a seguir, cuando se enfrentan a la tarea de operación y diagnóstico de fallas en bombas centrífugas. Trabajando interactivamente con apoyo multimedial.

ABSTRACT

A lot has been talk about the importance that means having inside of the organizations an structure ready to supply current technic information, as product of the knowledge and experiences of the qualified personel. Even to take quick desitions, minimizing the risk of mistakes or to support the employs in the designs, construction, operation, maintance or administration works.

Even thoug most colombian satete companyes and some of the private sector are running out of their technology because they haven not create a culture that propiate the des-incorporation of knowledge, that way it can be manage by the organization as one of their most valuable actives.

This article presents the aplications experience of the Expert Systems Methodology as an alternative of solution to the mneed of securing the knowledge in Ecopetrol - Management Barrancabermeja Complex. G.C.B. (Colombia - South America).

Especifically it details characteristics of a systems based in the knowledge for the analisis of failure in the centrifugal pumps in the G.C.B.

We start ilustrating the initial studyes of vaibility tha let us determinate that one of the priory activities that could be supported by the methodology was the diagnostic of failures in the centri-

fugal pums tha give us a base for the outlining and later development of the Bombex Project.

Bombex is a system based in the knowledge to guide that failure analyst inthe desitions to make and the following actions when they face the operation and diagnosis work of failures in the centrifugal pumps. Workings in a interactive way with multimedial support.

1. INTRODUCCIÓN

Conocimiento y experiencia, dos cosas tan codiciadas por las empresas como sus utilidades; son las que marcan, en la actualidad, las diferencias de desempeño y existencia entre las empresas que lo poseen y no lo poseen. Por tal motivo, el aseguramiento del *know-how* es siempre tema de discusión en toda organización, aún más en las que llevan gran trayectoria de trabajo, dada la preocupación por la creciente perdida de él, a medida que su personal de experiencia va cumpliendo su tiempo de retiro o a la fuga de conocimiento por medio de retiros sorpresivos a causa de mejores alternativas en el mercado laboral. Por esto, la organización se ve en la obligación de invertir un alto capital humano y económico en la recuperación, o por lo menos en el mantenimiento de su *know-how*, generalmente por medio del adiestramiento de nuevo personal.

Adicionalmente se presenta otro castigo económico, la organización se ve en la obligación de tener que pasar, una y otra vez, por los mismos errores que son inherentes en todo proceso de conocimiento, soportando las consecuentes perdidas de productividad y en algunos casos contratando, con terceros, trabajos que exigen un alto componente tecnológico; haciendo que la información técnica esté en manos externas y por consiguiente la supe-ditación desde el punto de vista tecnológico sea cada vez mayor.

Es bastante sentida, entonces, la necesidad de trazar estrategias administrativas que permitan el aseguramiento del conocimiento, la experiencia y la información, tratando de reducir al mínimo los inconvenientes que se han bosquejado.

Un mecanismo de proyección de estas estrategias es el desarrollo de sistemas que permitan generar una memoria institucional que garantice la continuidad de los procesos de la organización, sin la dependencia específica de una persona. Así surgen los Sistemas Expertos (S.E.) como posible solución ante la necesidad en las organizaciones de *asegurar* eficientemente el *conocimiento* técnico, operacional y administrativo y poder brindarlo con un alto grado de confiabilidad, a quien lo necesite.

Los Sistemas Expertos (S.E.) y/o Sistemas Basados en el Conocimiento (S.B.C.) son sistemas informáticos que simulan, hasta cierto punto, el proceso de razonamiento, las formas de comunicación, de acción y de aprendizaje de un experto humano en un dominio determinado.

Hay que aclarar que en ningún momento momento se intenta reemplazar al experto humano, primero por que los niveles de conocimiento que se involucran en este tipo de sistemas son muy particulares y específicos y segundo por que los expertos poseen una característica fundamental que aún no se ha podido integrar a estos desarrollos, el sentido común.

1.1 Sistemas expertos en el aseguramiento del conocimiento

Ecopetrol - Gerencia Complejo Barrancabermeja, en busca del aseguramiento de su conocimiento, ha invertido en un plan de desarrollo de sistemas expertos acorde a sus necesidades. Para tales efectos se realizó un estudio inicial en la G.C.B, con el fin de determinar la forma de implantación de dichos sistemas. El estudio se realizó mediante con-

sultoría con la Universidad Industrial de Santander (U.I.S) que en resumen identificó la siguiente problemática:

- Fuga de experiencia y conocimiento.
- Sobrecarga de trabajo.
- Elevados costos de capacitación.
- Necesidad de dispersar la experiencia.
- Necesidad de conservar el conocimiento.

Para su solución, se establece un plan global para la aplicación de la metodología de S.B.C. y/o S.E. en la G.C.B. de acuerdo a las actividades cognitivas que se realizan en cada uno de los grupos de trabajo. Entre ellas se cuentan:

- Diagnóstico y reparación de equipos y/o plantas.
- Monitoreo y control de procesos.
- Manejo administrativo de personal.
- Control de calidad en productos.
- Diseño de plantas y/o procesos.
- Entrenamiento de personal.

Una vez terminada esta consultoría se buscó la continuidad del proceso, basada en la política de Ecopetrol de incentivar la cooperación universidad-empresa. Es así como se adelantó un proyecto de grado con estudiantes de Ingeniería de Sistemas de la U.I.S., para que en la actividad más prioritaria de las definidas en el estudio inicial, es decir en el diagnóstico de fallas de equipos y/o plantas, se hiciera un trabajo donde se identificaran y priorizarán las tareas dentro de dicha actividad que pudieran ser apoyadas con la metodología de S.E. y adicionalmente se registrará formalmente el conocimiento de la tarea que se obtuviera prioritaria involucrando las leyes, los conceptos, la heurística utilizada por los expertos.

Los resultados de este trabajo fueron: una lista priorizada por familias de equipos de proceso para la aplicación de la metodología (ver figura 1) y la formalización del conocimiento

para la más prioritaria, específicamente para el análisis de fallas en Bombas Centrífugas de la G.C.B.

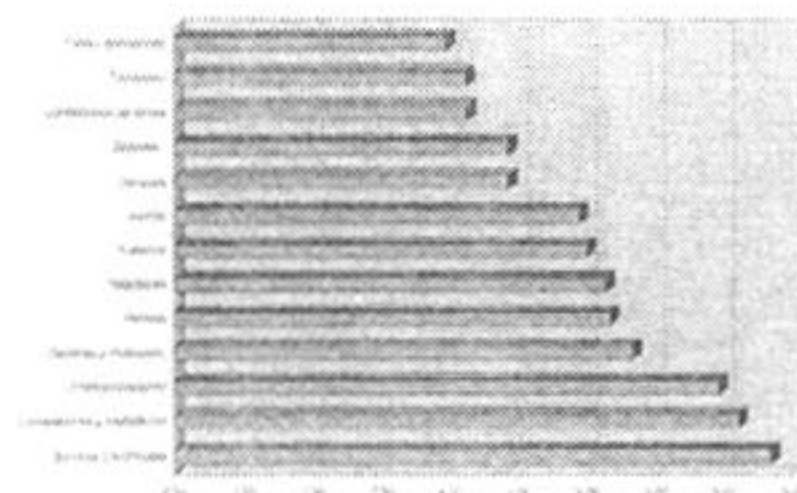


Figura 1. Priorización de las familias de equipos de la G.C.B. de acuerdo a dos criterios

- (1) Experiencia y conocimiento para el análisis de fallas. Peso 60 %.
- (2) Costos de mantenimiento. (año 1990 a 1994). Peso 40 %.

De acuerdo a los avances alcanzados se impulsan gestiones para materializar los posibles sistemas de diagnóstico. Este impulso lleva a que nazca una empresa de la región, Multiexpert Soft Ltda., dedicada al desarrollo de sistemas expertos, la cual se encarga de apoyar la realización de un sistema basado en el conocimiento para análisis de fallas en bombas centrífugas (Proyecto BOMBEX) y de coordinar y desarrollar proyectos similares para las familias de compresores y sopladores como también para la familia de Intercambiadores.

A continuación se ilustra los resultados del Proyecto BOMBEX.

2. PROYECTO "BOMBEX"

2.1. Objetivo

Desarrollar un Sistema Basado en el Conocimiento que permita:

- Preservar el conocimiento y la experiencia
- Estandarizar los procedimientos
- Disminuir los costos asociados con la capacitación de personal y la ejecución errada de procedimientos
- Apoyar la toma de decisiones

- Distribuir el conocimiento

Todo esto relacionado con el proceso de diagnóstico en fallas de Bombas Centrífugas de la G.C.B.

2.2. Funcionamiento de BOMBEX

BOMBEX, es un sistema basado en el conocimiento para guiar a los analistas de fallas en la toma de decisiones y las acciones a seguir cuando se enfrentan a la tarea de operación y diagnóstico de fallas en bombas centrífugas. Trabajando interactivamente con apoyo multimedial.

BOMBEX, para su desarrollo, involucró personal de las áreas operativa, técnica y mecánica, entre los cuales se realizó el intercambio de experiencias y conocimientos, que permitieron su creación. Este proceso de formalización de BOMBEX está diseñado para apoyar tres actividades principales de los procesos de análisis de fallas: el diagnóstico, la reparación y la verificación.

En el diagnóstico se tiene como función principal apoyar la búsqueda de la *causa* de un mal funcionamiento del sistema de bombeo de una forma eficiente, contribuyendo a reducir el costo de investigación y de diagnósticos errados.

En la reparación, etapa que sigue al diagnóstico, se aconseja al usuario respecto a las acciones correctivas que necesiten ser ejecutadas.

En la verificación se asegura que la acción de reparación corrija el mal funcionamiento y que el equipo funcione correctamente, de no ser así, se deberá determinar si existen otras posibilidades de reparación asociadas a las causas detectadas que conlleven a la solución del problema.

BOMBEX, al comenzar presenta la posibilidad de elegir entre cinco opciones:

- *Procedimientos de operación:* Permite consultar los pasos que deben seguirse en forma gene-

ral para: la Instalación y montaje, arrancada y parada, cambio a una bomba auxiliar, modificaciones y relocalizaciones de la bombas y alistamiento o pre-arrancada de una bomba centrífuga.

- **Casos de estudio:** permite visualizar estudios para el análisis de bombas, los cuales fueron realizados por diversos grupos de expertos y que sirvieron de base para la creación de BOMBEX.

- **Métodos para asesinar una bomba:** Es un forma didáctica y divertida para instruir a los usuarios en las prácticas que deben erradicarse.

Bibliografía: Esta opción contiene la bibliografía consultada para la realización del proyecto, desde el punto de vista de sistemas expertos como también para el análisis de fallas en bombas centrífugas.

Guía para análisis de fallas en bombas centrífugas: Es la opción fundamental de BOMBEX, El desarrollo de un análisis de falla de una bomba se plantea conservando el esquema general para un sistema de diagnóstico tradicional (ver figura 2).

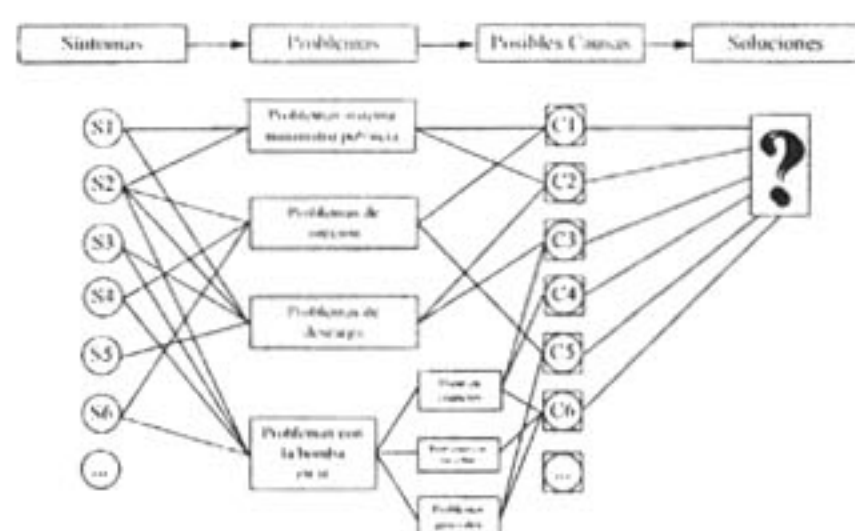


Figura 2. Esquemización general para el análisis de fallas en Bombas Centrífugas.

BOMBEX, trabaja partiendo de una identificación general de la bomba donde se le asocian los datos característicos de presión, flujo, temperatura y equipo motriz. Luego se hace la solicitud de los síntomas que se detectan en la arrancada de la bomba o en su operación (ver figura 3).

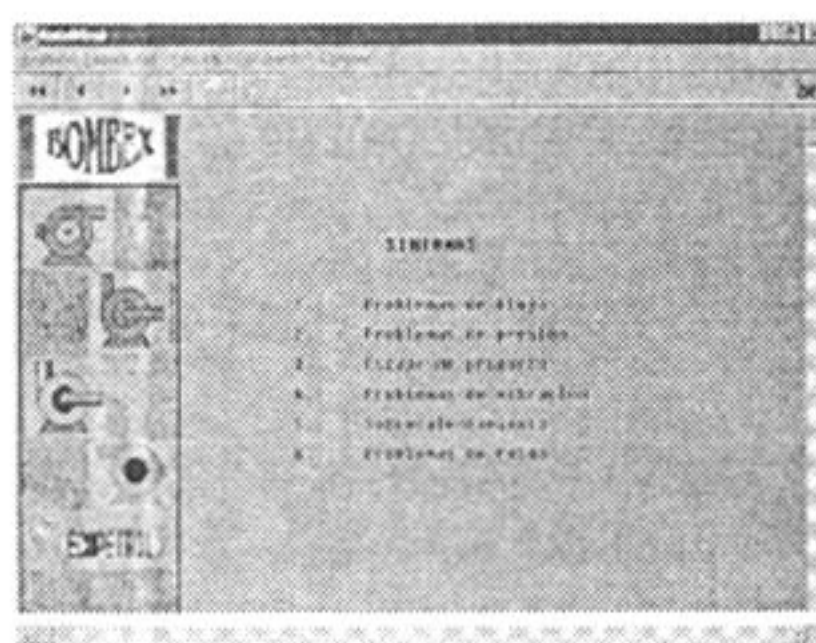


Figura 3. Solicitud de Síntomas para el nivel primario - BOMBEX.

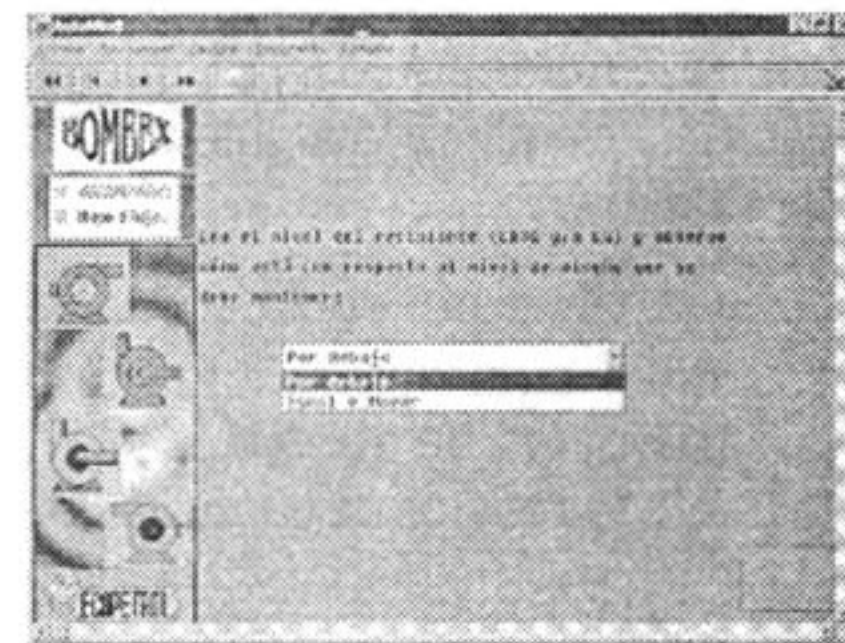


Figura 4. Ejemplo de una solicitud de información de BOMBEX.

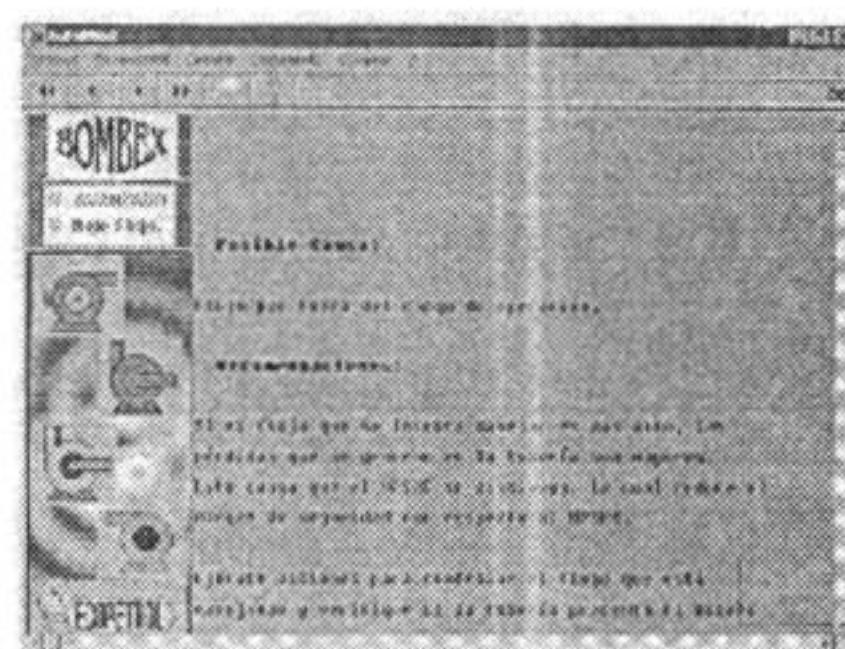


Figura 5. Ejemplo de una conclusión generada por BOMBEX.

Estos síntomas son el punto de partida del diagnóstico ya que en seguida se identifican los posibles problemas que pueden estar asociados a ellos, se determinan las posibles causas y como resultado final se obtiene una serie de recomendaciones encaminadas a solucionar los problemas del sistema, de acuerdo a los síntomas referenciados.

La búsqueda de causas se realiza en forma similar a como la realizan los expertos de las diferentes áreas involucradas, planteando ciertos interrogantes y en función de las respuestas se pueden plantear nuevamente otros interrogantes o pruebas que permitan llegar a una posible causa. Ligada a esa causa se sugieren ciertas recomendaciones a realizar. Como es sabido, la existencia de un problema es un acontecimiento complejo que es el resultado de una convergencia de fuerzas que pueden rara vez atribuirse a una causa exclusiva, por tal motivo en este punto el usuario del sistema puede elegir si desea explorar otras alternativas de causas o aplicar las recomendaciones sugeridas, sea cual fuere la decisión. BOMBEX tiene la posibilidad de grabar la sesión en un archivo con las conclusiones y respuestas dadas hasta el momento y poder cargarlo nuevamente cuando el usuario desee continuar con el análisis de la misma bomba (ver figura 4 y 5.)

2.3. Niveles de operación

La formalización del conocimiento registrado en BOMBEX, permitió la identificación de dos niveles de operación del sistema:

2.3.1. Nivel de análisis primario. Permite el análisis de la condición de un equipo cuando éste se encuentra funcionando y presente fallas rutinarias.

2.3.1.1 Contenido. Incluye soporte para las siguientes actividades del proceso de análisis de falla de un sistema de bombeo.

- Monitoreo en planta de condiciones operacionales.
- Acciones correctivas de "primera mano" por parte del operador y supervisor.
- Evaluación de las condiciones operacionales.
- Evaluación de las condiciones mecánicas.
- Acciones mecánicas correctivas básicas.

2.3.1.2 Usuario Principal. Operadores y supervisores de operación, técnicos y supervisores mecánicos.

2.3.2. Nivel de análisis avanzado. Permite el análisis de la condición de un equipo que esté presentando fallas repetitivas y que las acciones correctivas del nivel primario de análisis no haya solucionado el problema.

2.3.2.1 Contenido. Incluye soporte para las siguientes actividades del proceso de análisis de falla de un sistema de bombeo.

- Análisis vibracionales.
- Revisión de ingeniería básica (cálculos Npsh, especificaciones, etcétera)
- Análisis de flexibilidad básico.
- Análisis de fallas en el taller.
- Análisis de la incidencia de las condiciones de falla registradas anteriormente en el sistema de bombeo.

2.3.2.2 Usuario principal. Analista de fallas en sistemas de bombeo.

2.4. Estructura interna

BOMBEX se desarrolló en una herramienta software especial para la construcción de sistemas basados en el conocimiento llamada Visual-Tree, cuya plataforma de trabajo es Windows 3.11 o Windows 95. Esta herramienta utiliza árboles de decisión como forma de representación del conocimiento, aunque posteriormente convierte dichos árboles en reglas de producción, que son compiladas para generar un producto final disponible para ser usado independiente de la herramienta en que se desarrolló. La aplicación está montada en la red de datos de la G.C.B. para que sea accedida por los usuarios que la necesiten.

La filosofía de estructuración que se siguió para la implementación de BOMBEX, fue la utilización de árbo-

les de decisión, compuestos por nodos que reflejan puntos de decisión, por ramas que son las salidas posibles de los nodos y por bloques que son los que permiten la ejecución de determinadas acciones. Los árboles en general reflejan en ellos el razonamiento seguido por el experto en su proceso de diagnóstico de fallas en bombas centrífugas (ver figura 6).

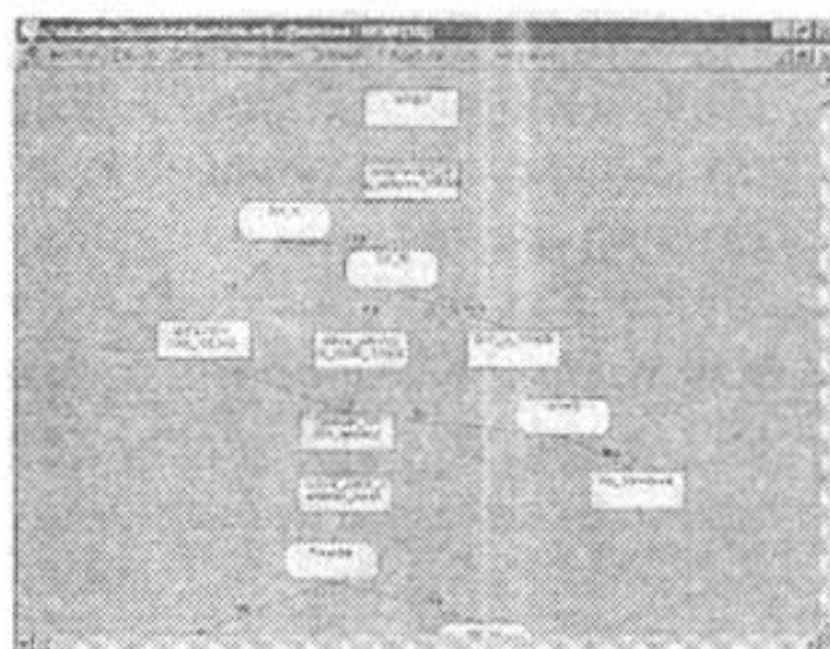


Figura 6. Ejemplos de árboles de decisión de BOMBEX.

BOMBEX trabaja con un árbol principal donde se establecen las ramas que representan las opciones de utilización iniciales (guía para análisis de fallas, procedimientos de operación, casos de estudio, etc.) cada opción es, en sí misma, un subárbol completo y dentro de ella, de acuerdo a la forma de razonamiento, también se estructuran otros subárboles internos y así sucesivamente (ver figura 7 y 8).

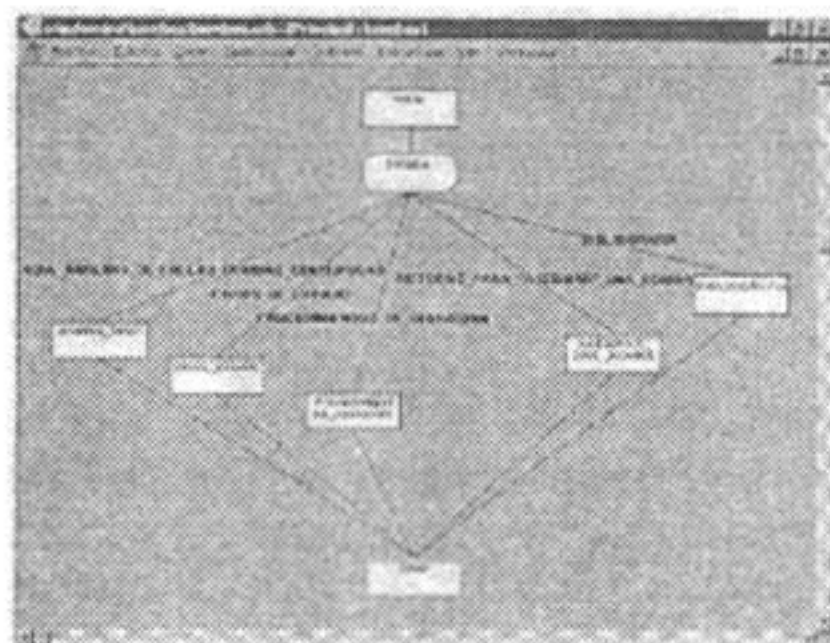


Figura 7. Ejemplos de árboles de decisión de BOMBEX.

En general, la estructuración mediante subárboles se asemeja a la utilización de módulos que registran

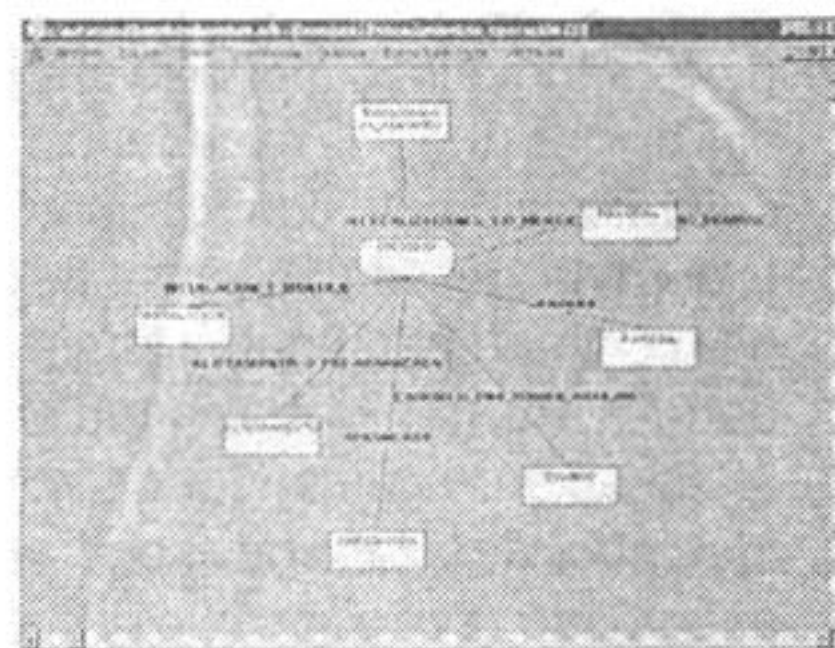


Figura 8. Ejemplos de árboles de decisión de BOMBEX.

una serie de conocimiento, de esta forma es mucho más sencillo el entendimiento de todo el esquema de razonamiento, su modificación y actualización, así como el aprovechamiento de subárboles posteriormente en otros sitios donde se necesiten.

BOMBEX consta de 165 subárboles de decisión, que Visual-tree transforma en 969 reglas de producción, posee además ayudas de hipertexto y gráficas ilustrativas que ayudan a una mayor interiorización de los conceptos que él maneja.

3. CONCLUSIONES

- BOMBEX es una herramienta de apoyo al desempeño de diversos grupos analistas de fallas en bombas centrífugas, pues permite servir de guía e instrucción al personal de baja experiencia, buscando reducir las fallas mediante unas recomendaciones de primera mano. Por otro lado, sirve de soporte en la toma de decisiones de expertos analistas cuando estudian casos con problemas repetitivos. BOMBEX, es el primer paso en la búsqueda de acciones que conllevan a una mayor confiabilidad de los equipos.
- La mayoría del conocimiento y experiencia relacionada con el diagnóstico de fallas de equipos en la Gerencia Complejo Barrancabermeja se encuentra poco registrada. Hay una supeditación constante y alta, hacia los exper-

tos, los cuales son escasos, generando consecuencias críticas obvias (fuga de experiencia, centralización del conocimiento y pérdida de tiempo en entrenamiento de personal); sin embargo, se ha tratado de enfrentar la situación, evaluando la problemática de la falta de aseguramiento del conocimiento y se están estudiando soluciones alternativas adicionales a los sistemas expertos, como la rotación de expertos en diferentes áreas, intercambios de experiencias con empresas afines, actualización de manuales y procedimientos, ..., situaciones que hacen propicio aún más la implantación de la metodología.

- La planeación para la estructuración e implantación de sistemas expertos ha sido un factor constante desde el comienzo hasta el fin de los proyectos. El estudio de alternativas de trabajo y la elección de las formas de desarrollo, están soportadas por el análisis de la situación actual de la empresa respecto al registro de conocimiento y por los conceptos emitidos por los expertos. Lo que permite asegurar buenos resultados en el desarrollo de los sistemas mismos.
- Se ha podido establecer a lo largo del proceso, la unificación de conocimiento reflejada en los diagramas causa-efecto y en los árboles de decisión. Como lo demuestra el hecho de su utilización en actividades de capacitación de operadores.
- La generación de expectativas en las diferentes áreas involucradas para otras familias de equipos indica la aceptación que tuvo la metodología como alternativa de solución viable para el registro del conocimiento. Por tal motivo se está trabajando en una guía metodológica que resume la forma de implantar sistemas para el análisis de fallas

en equipos, en especial en la familia de rotatorios.

- Hay que realizar un seguimiento completo de la utilización de BOMBEX para mantenerlo actualizado y plantear los refinamientos y ampliaciones que puedan surgir producto de su utilización.
- Los resultados de este proyecto han impulsado el surgimiento de otros proyectos del mismo tipo, particularmente se han iniciado trabajos para formalizar el conocimiento en el análisis de fallas en compresores centrífugos de gas e intercambiadores de calor. Por otro lado también se están evaluando herramientas software de desarrollo disponibles bajo ambiente intranet, que permitan seguir realizando sistemas que hasta cierto punto aseguren el conocimiento y la experiencia de los expertos de la Gerencia Complejo Barrancabermeja

4. BIBLIOGRAFÍA

1. BENCHIMOL, G, LEVINE, P, POMEROL, J. Ch, Los Sistemas Expertos en la empresa. México: Macrobit Editores, 1990.
2. BRULE, J.F. y BLOUNT, A, Knowledge acquisition. USA: Mac Graw-Hill, 1989.
3. CASTILLO, E. y ACUARE, E, Sistemas Expertos: Aprendizaje e incertidumbre. Paraninfo. Madrid, 1989.
4. CORREDOR M, M. V, Principios de Inteligencia Artificial y Sistemas Expertos. Ediciones UIS, 1992.
5. DUFOUR, J.W y NELSON, W.E, Centrifugal Pump Sourcebook. McGraw-Hill. 1993. Segunda Edición.
6. GARAY, P. N, Pump application

DeskBook. Prentice Hall. 1993. Segunda Edición.

7. HALKER, M. y WELZ, U, Sistemas Expertos, experiencia de la práctica. Berlín y Munich: Marcombo, 1991
8. HEINZ P. B. y FRED K. G, Machinery failure analysis and troubleshooting, practical machinery management process plants. Houston, Gulf Publishing Company, 1994.
9. HURTADO C. J. L. y MACHUCA, M.J, Aplicación de la Metodología de Sistemas Expertos en el área de diagnóstico de Fallas de equipos de la G.C.B. (1996).
10. Identifying causes of seal leakage. John Crane-Houdaille, Inc. 1989.
11. KARASSIK, I. y CARTER, R, Bombas Centrífugas, Selección, Operación y Mantenimiento. New-York, Mac-Graw-Hill, 1971. Tercera edición.
12. MANUAL DE OPERACIONES, UNIDAD U-2.000, G.C.B., Enero de 1989.
13. Manual de operación y mantenimiento para bombas marca Byron Jackson Products. Bomba P-225B - G.C.B
14. Manual Pacific (ingersollrand) LMV-801. P241C - G.C.B
15. Manual Sundyne Modelo LMV-322 - 9244
16. Manual de Bombas Gould GPM6. Sexta edición, 1995.
17. Manual de entrenamiento para operadores. UOP process division (TYRO) Illinois, 1978. Sección 9.
18. MCGRAW, K. L. and HARBISON-BRIGGS K, Knowledge acquisition: principles and guidelines. USA: Prentice-Hall International, 1989.
19. REYNOLDS, A. y ARAYA, R,

- Building Multimedia Performance Support System. U.S., Mac Graw-Hill, 1995.
20. ROLSTON, D.W, Principios de Inteligencia Artificial y Sistemas Expertos. Bogotá: Mac Graw-Hill, septiembre de 1989.
 21. SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT, Sistemas Expertos, Introducción a la técnica y aplicación. Berlín y Munich: Marcombo, 1988.
 22. WOWK, V, Machinery Vibration, Measurements and Analysis. McGraw-Hill, 1991.

RECONOCIMIENTOS

- Ecopetrol - Gerencia Complejo Barrancabermeja
- Superintendencia Técnica. Ingeniero Edelberto Gil M. Ingeniero. Orlando Diaz. Ing. Diego N. Moncada.
- Coordinación de Informática. In-

geniero Luis A. Gutiérrez. Ingeniero Benedicto Mora.

- Ecopetrol - Vicepresidencia de Transporte. Ingeniero Orlando Lamo Vasquez. Ingeniero Adolfo Ramírez Olivares.
- Universidad Industrial de Santander - Colombia. Doctora. Martha V. Corredor.
- MultiExpert Soft Ltda. Ingeniero Jorge Luis Hurtado 

AUTORES

Josué Machuca Martínez

Ingeniero de Sistemas de la Universidad Industrial de Santander - U.I.S. Bucaramanga, 1996, Especialización en Desarrollo Intelectual y Educación de la Universidad



Autónoma de Bucaramanga. Areas de Interés: Sistemas Expertos, Gestión de Conocimiento, Software Multimedia aplicado a la instrucción. Se desempeña como Gerente de la firma MultiExpert Soft Ltda.

c.e.:jmachuca@virtual.umb.edu.co

Edwin Fernando Montoya

Ingeniero Mecánico, 1994, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, actualmente es Estudiante del Posgrado en Automatización de Procesos Industriales en la Universidad de los Andes. Labora como Asesor en Equipo Rotatorio - Departamento Ingeniería de Plantas de Ecopetrol. Areas de Interés: Análisis de Turbomaquinaria, Sistemas Expertos, Gestión de Tecnología.



c.e.: emontoya@ecopetrol.com.co

Solamente en cuanto los hombres viven bajo el gobierno de la razón, concuerdan siempre, necesariamente, con la naturaleza.

B. Spinosa
