

Diseño de sistema para la detección de fallas en planta compresora con mantenimiento centrado en confiabilidad usando lógica difusa

Luis W. Escalona G.⁽¹⁾, Carlos J. Jiménez⁽¹⁾, Arquímedes J. Ferrera⁽²⁾, Francisco J. Arteaga⁽¹⁾

⁽¹⁾Unidad de Investigación en Automatización Industrial, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela. Email: lescalon@uc.edu.ve, cjimenez@uc.edu.ve, farteaga@uc.edu.ve

⁽²⁾PDVSA, Petróleos de Venezuela, S.A. E-mail: ferreraa@cantv.net

Resumen

Esta investigación presenta el diseño de un sistema para el tratamiento de las fallas en la planta compresora de gas PIGAP I ubicada en el complejo MUSCAR PDVSA de Monagas basándose en mantenimiento centrado en confiabilidad MCC y usando lógica difusa. El sistema diseñado trabaja con variables empleadas para la supervisión del sistema de gas de proceso de los cinco trenes compresores de la planta. El sistema de inferencia difusa permite la detección de fallas funcionales o estados de fallas de acuerdo con la metodología MCC y el conocimiento real de los modos de falla de la planta de compresión. El sistema fue elaborado con la herramienta de lógica difusa de Matlab y validado con datos provenientes de la operación de la planta.

Palabras claves: Lógica difusa, mantenimiento centrado en confiabilidad, planta de compresión

System design for fault detection in compression plant with reliability centered maintenance using fuzzy logic

Abstract

This research presents a system design for fault processing in PDVSA compression plant PIGAP I located in MUSCAR Monagas complex, based on reliability centred maintenance RCM and using fuzzy logic. The designed system works with variables used for supervising the gas process system in each of the five units of the compression plant. The fuzzy inference system permits operational fault detection or fault state estimation according with RCM methodology and the actual knowledge of failure modes for the compression plant. The system was realized using Matlab fuzzy logic toolbox and validated with data obtained from the operation of the plant.

Keywords: Fuzzy logic, reliability centered maintenance, compression plant

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se dispone de herramientas para capturar el componente esencial de la estructura del conocimiento humano y de técnicas de solución de problemas, aplicables a una gran variedad de situaciones. Estas herramientas y técnicas se agrupan en el campo de la inteligencia artificial, disciplina orientada al desarrollo de algoritmos para imitar ciertas características de sistemas biológicos inteligentes. Una rama de la inteligencia artificial es la lógica difusa o lógica

borrosa, con la cual es posible emular la forma de razonamiento humano consiguiendo un amplio rango de aplicaciones en áreas como electrónica, control, robótica, industria automotriz y en otras áreas del conocimiento tales como ingeniería civil, mecánica e industrial, medicina, economía, psicología, ingeniería de mantenimiento, etc. [1-7].

El mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC) es una metodología surgida en el principio de los años sesenta (1960s) en la industria de la aviación y su fortaleza se basa en el desarrollo de planes

de mantenimiento sustentados en contextos operacionales reales, permitiendo la aplicación de programas orientados a la necesidad verdadera de las plantas [8-9].

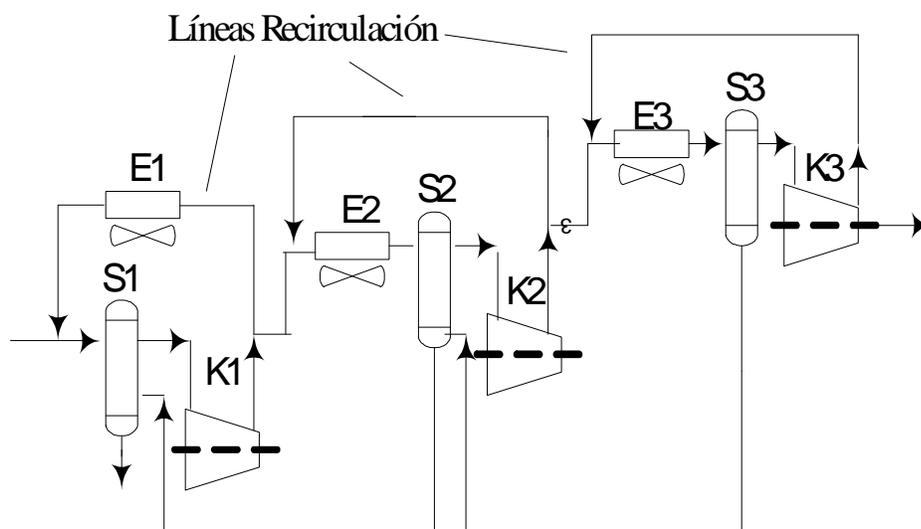
El proceso de reinyección de gas de alta presión a los yacimientos petroleros, constituye un factor importante en la recuperación secundaria de crudo, permitiendo prolongar el tiempo de utilización de los yacimientos. Es por esto que el mantenimiento adecuado de las plantas compresoras destinadas para este fin propicia el empleo de estrategias como el MCC.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema que permite utilizar de manera sistemática, mediante la aplicación de lógica difusa, la información obtenida de los análisis de MCC, empleando una base de conocimiento (experiencia real) que contenga los modos de fallas para el análisis, diagnósticos y acciones a tomar por parte de los operadores durante sus labores diarias y turnos normales de trabajo, ante posibles eventos que propicien un estado de falla o cuando se presente la falla como tal (pérdida de la función deseada) [10].

2. SISTEMA DE GAS DE PROCESO DE LA PLANTA COMPRESORA

La planta compresora PIGAP I está formada por cinco trenes o sistemas de compresión de gas, cada tren consiste en tres (3) etapas de compresión, que aumentan la presión del gas de 1100 psig en la succión hasta 9000 psig en la descarga. El caudal suministrado de descarga es de 200 MMPCGND (millones de pie cúbico gas normal diario). Cada tren de compresión presenta la estructura mostrada en la Figura 1.

El gas proviene de un sistema de deshidratación de alta presión donde se trata la humedad del gas que entrará a la planta con un caudal máximo dado, que se divide en cinco corrientes iguales. Cada corriente entra en un tren de compresión donde el gas pasa por tres etapas para elevar su presión. Cada etapa está conformada por un compresor respectivo, tres enfriadores empleados para disminuir la temperatura del gas proveniente de las descargas de los compresores y tres depuradores para separar los líquidos que puedan condensarse en el gas. El funcionamiento Seguro



E1,E2,E3: Enfriadores Recirculación e Interetapa
K1,K2,K3: Compresores
S1,S2,S3: Depuradores

Figura 1. Diagrama esquemático de un tren de compresión.

y estable de la unidad de compresión lo garantizan las líneas de recirculación que impiden toda condición que sea posible de pulsación y hacen al sistema capaz de quedar funcionando a un flujo mínimo de gas.

El sistema de gas de proceso cuenta con circuitos principales de control encargados del nivel de los depuradores, las íter etapas, la antipulsación en los compresores y el reparto de carga (velocidad de las turbinas). Cada tren de compresión posee indicadores locales y remotos de variables como presión de gas, temperatura de gas, vibración y temperatura en cojinetes de los compresores y nivel en los depuradores. Dichos indicadores realizan la supervisión de cada una de las tres etapas de los cinco trenes de compresión.

3. ASPECTOS TEÓRICOS

3.1. Lógica Difusa

La lógica difusa es una lógica multievaluada propuesta por Lofti Zadeh en 1965 [11], estableciendo la posibilidad de que los elementos pudieran tener diferentes grados de pertenencia a un conjunto (por ejemplo, el caso del vaso con el 90% de líquido, tendría un grado de pertenencia al conjunto de vasos llenos de valor 0,9 en el rango 0-1).

En lógica difusa se emplean conjuntos difusos, a los cuales un elemento puede pertenecer o no con un grado de certidumbre dado, a diferencia de los conjuntos convencionales donde un elemento pertenece a

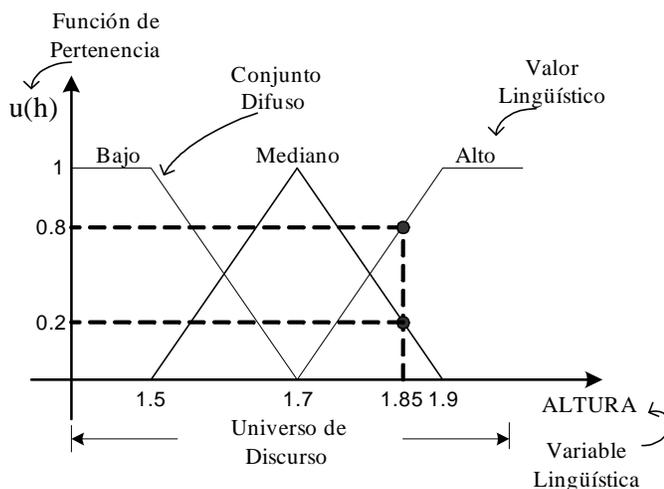


Figura 2. Ejemplo de Conjuntos Difusos.

un conjunto dado o no. La Figura 2 muestra un ejemplo de conjuntos difusos y los términos empleados en los mismos.

El término grado de certidumbre o grado de pertenencia define un valor entre cero (0) y uno (1) que indica la membresía de un elemento a un conjunto dado. Las funciones de pertenencia definen a los conjuntos y se denotan como μ_c e indican el grado de pertenencia que tiene un elemento con valor "x" al conjunto difuso "C" mediante un conjunto de clasificaciones conocidas como valor lingüístico con el cual el conjunto difuso define a la variable lingüística, mediante el lenguaje hablado. Todo esto definido para un universo de discurso conformado por el rango de valores que pueden tomar los elementos que poseen la propiedad expresada por la variable lingüística.

3.2. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)

A comienzos de los años sesenta surge el mantenimiento centrado en confiabilidad en la industria de la aviación civil norteamericana. Esta filosofía de mantenimiento está orientada al entendimiento de las funciones del sistema para que este se mantenga en la ejecución de dichas tareas. El proceso de aplicación de la metodología del MCC de acuerdo con Moubray [8] implica la definición de los siguientes aspectos:

- Definición del contexto operacional, es decir los sistemas y las unidades de proceso.
- Funciones y estándares de desempeño, aquello que esperan los usuarios de los activos.
- Fallas funcionales, las cuales son los estados presentes cuando el equipo no cubre una función.
- Modos de fallas, o eventos probablemente responsables de causar el estado de falla.
- Efectos de fallas, o señales presentes en el modo de falla.
- Consecuencias de las fallas.
- Tareas de mantenimiento, proactivas y "a falta de" en su defecto.

4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DIFUSO

4.1. El sistema de inferencia difusa

cionar las variables lingüísticas. Estas proposiciones se conocen también como reglas y asignan valores lingüísticos a otras variables resultantes del proceso conocido como inferencia. El sistema de inferencia difusa empleado [12] en el presente trabajo posee la estructura mostrada en la Figura 3.

4.1.1. Definición de las variables lingüísticas

Entradas

Las entradas son las variables empleadas para la supervisión de cada tren de compresión: temperatura, presión, nivel, entre otras. Los conjuntos difusos de cada variable se tienen como valores lingüísticos: MBAJO (Muy Bajo), BAJO, NORMAL, ALTO, MALTO (Muy Alto). Los valores asociados con estas caracterizaciones dependen de los puntos de referencia en los que opera la planta en un momento dado. Un ejemplo se muestra en la Figura 4, para la variable Presión de Succión del Compresor de Primera Etapa (PSK1).

Salidas

Para la definición de las variables lingüísticas de salida resultantes del proceso de inferencia (evaluación de proposiciones), se definieron variables que cumplieran con la función de ser indicadores de estados anormales en la planta compresora. La caracterización de las variables lingüísticas se hace definiendo “Estados Anormales” mencionados a continuación:

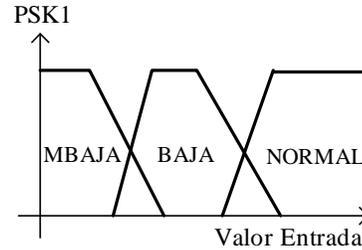


Figura 4. Ejemplo de variable de entrada PKS1.

- Primarios, cuando los instrumentos empleados en la supervisión fallan en su función, es decir arrojan información poco confiable.
- Secundarios, cuando el proceso presenta comportamientos anómalos, este estado es detectado con ayuda de los instrumentos de supervisión.

Los valores que toman las variables de salida de acuerdo a su caracterización están definidos como se observa en la Figura 5. Matemáticamente, la presencia de un estado inhibe a otro presente, en el momento que se realiza la defusificación de la variable.

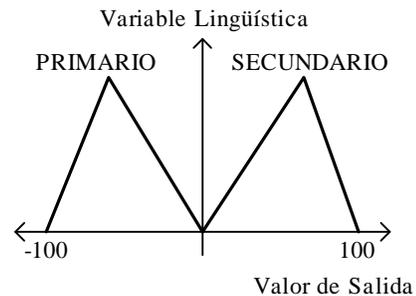


Figura 5. Variable de Salida.

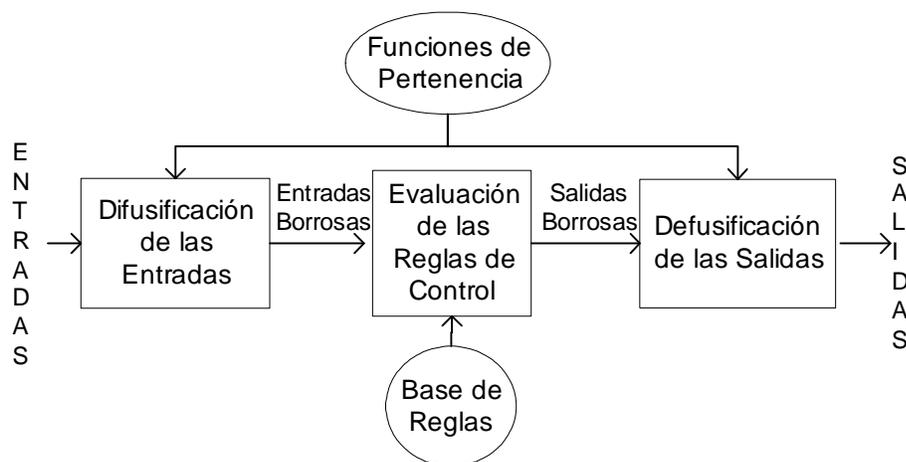


Figura 3. Sistema de inferencia difusa.

4.1.2. Redacción de las reglas difusas

La estructura de las reglas empleadas para el proceso de inferencia es la siguiente:

If (x1 is A1) and (x2 is A2).....then (y1 is B1)

If (x1 is A1) or (x2 is A2).....then (y1 is B1)

La mayoría de las reglas emplean operadores lógicos AND, donde el consecuente tendrá un alto grado de pertenencia si los antecedentes son altos también. La implicación sigue la estructura de Mamdani [13], donde la condición resulta cierta si el antecedente es cierto y el consecuente también. Se siguió el Modus Ponens, en el cual se examina la premisa de la regla, si es cierta, la conclusión pasa a formar parte del conocimiento.

4.2. Configuración del Sistema de Inferencia Difusa (SID)

Para que el sistema de inferencia funcione, deben definirse los rangos de las variables de entrada que tomarán las funciones de membresía de los conjuntos difusos y las reglas para implicar y relacionar las entradas con las variables de salida. Para configurar las entradas, el sistema toma como información los valores de operación normal de las variables de planta consideradas como entradas a fusificar, así como las condiciones de alarma y paro de las mismas. Con esta información se definen los rangos de las funciones de pertenencia y el universo de discurso como tal. Para la configuración de las reglas es necesaria la inserción de las mismas en una base de datos siguiendo estrictamente la estructura preestablecida; el sistema se encarga entonces de la transformación de la base de reglas en código comprensible por el mismo, para posteriormente proceder a su interpretación.

4.3. Identificación de Fallas

Cuando se configura el sistema de inferencia difusa, se efectúa la evaluación de las entradas (valores provenientes de los indicadores en planta) mediante el proceso de fusificación (obtención de los grados de pertenencia de los valores a las funciones de pertenencia), luego la implicación empleando la base de reglas y finalmente la defusificación (obtención de los valores numéricos a partir de los conjuntos difusos). El resultado de la defusificación es un conjunto de indi-

cadore de distintas áreas de cada tren de compresión, siendo estos valores interpretados por el sistema. La interpretación de salidas emplea una base de vínculos donde cada salida (indicador) tiene un conjunto de vínculos asociados. La estructura de un vínculo se muestra en la Figura 6.

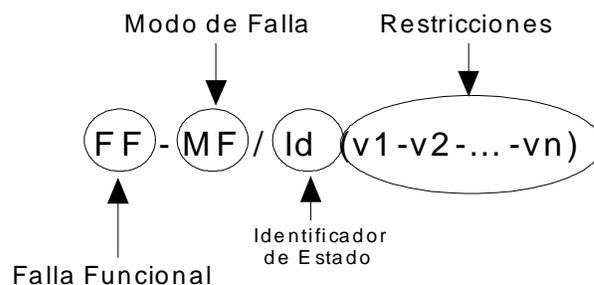


Figura 6. Estructura de un Vínculo.

Para el sistema de gas de proceso analizado se aplicó la metodología del MCC, se definieron las funciones, fallas, modos de fallas, efectos, consecuencias, y tareas de mantenimiento, obteniéndose una hoja de trabajo. Para el sistema se desarrolló una base de conocimientos (un conjunto de representaciones de hechos) con la información del MCC, estructurándose toda la información en: sucesos (falla), hipótesis (modos de falla), falla (efecto), pruebas y acciones (tareas de mantenimiento).

En el vínculo empleado para la identificación, la falla funcional (FF) es el código de la falla funcional obtenido de la hoja de trabajo, el modo de falla (MF) especifica cual modo de falla presenta la falla funcional y es opcional, el identificador (Id) se emplea para identificar el nivel de la anomalía, y las restricciones son variables de salida que pueden inhibir la variable asociada al vínculo con el fin de optimizar la detección de fallas.

El proceso de identificación comienza en el momento que se ha realizado la defusificación de las salidas, se obtiene el conjunto de salidas con valores entre -100 y 100, se revisa cada salida en la base de vínculos, se obtiene de cada vínculo los elementos: FF, MF, Id y restricciones. Con el "Id" se compara el valor de la variable con un valor umbral dependiendo del estado anormal que refleja la variable, el valor umbral es el 90% del centroide del conjunto difuso PRIMARIO de las salidas o el 90% del centroide del conjunto SECUNDARIO, en ambos casos el valor absoluto es el mismo, solo difieren en signo. Esto se observa en la figura 7.

Cuando el valor de la variable cumple el valor umbral, entonces la falla funcional asociada al vínculo se registra en un reporte. Todo lo antes mencionado se ilustra en la Figura 8.

4.4. Consulta de Fallas

Una vez que el sistema ha procesado las entradas (estados) provenientes de la planta y los procesa con

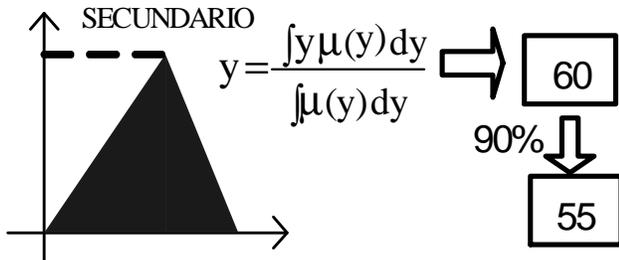


Figura 7. Cálculo de Valor Umbral.

la generación respectiva de un reporte, el usuario tiene la posibilidad de revisar dicho reporte (base de datos) y partiendo de las fallas y/o modos de falla encontrados buscar las tareas de mantenimiento apropiadas para el estado fallido empleando la base de conocimientos, así entonces; el reporte permite al sistema buscar en la base de conocimientos basada en MCC.

4.5. Interacción con el Usuario

El desarrollo del sistema automatizado se realizó con el software Matlab y sus herramientas de lógica difusa y base de datos [14-15]. Con este software se efectuó la programación necesaria para todos los componentes antes descritos. Adicionalmente se desarrolló una interfaz gráfica en Matlab para el usuario que permite llevar a cabo las funciones del sistema, tales como: la configuración del sistema de inferencia difusa (SID) con la introducción de datos nominales de operación y alerta del proceso, la evaluación del estado de la planta empleando las variables de supervisión, y la elaboración y consulta del reporte generado. La Figura 9 ilustra el menú principal de la interfaz gráfica presentada al usuario. Las opciones disponibles son las siguientes:

- Condiciones del proceso.
- Estado actual del proceso.
- Configuración del SID.
- Consulta del SID.
- Generación del reporte.
- Consulta de resultados.

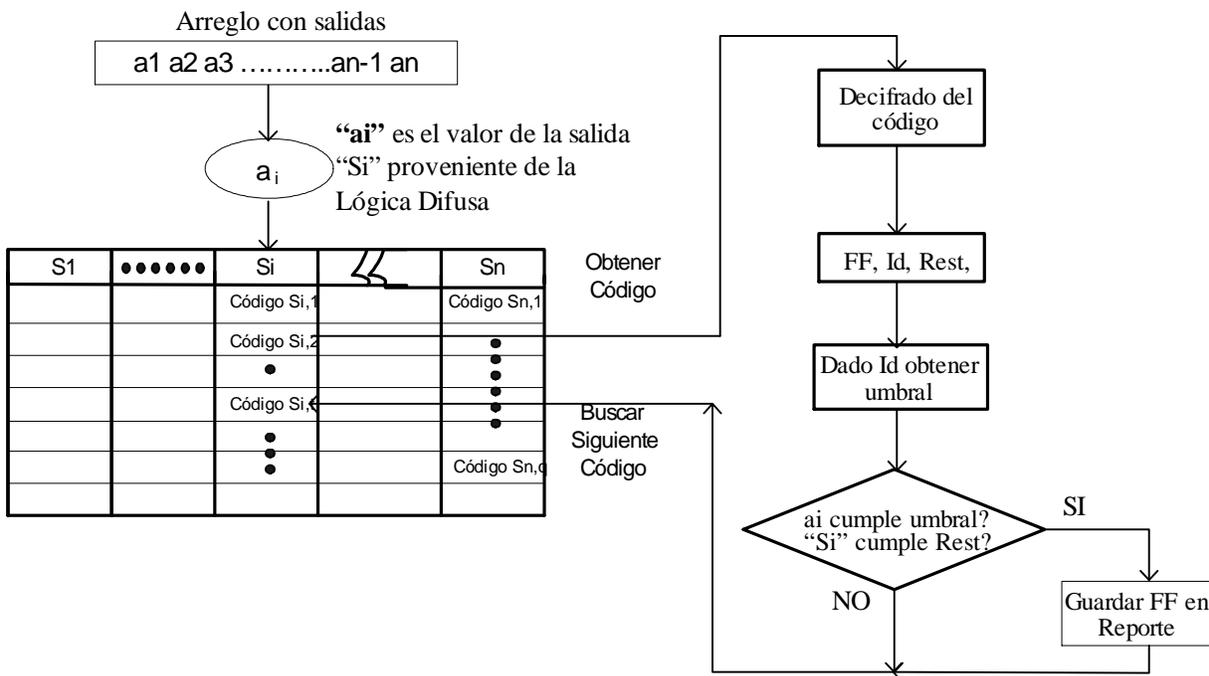


Figura 8. Proceso de Identificación de Salida.

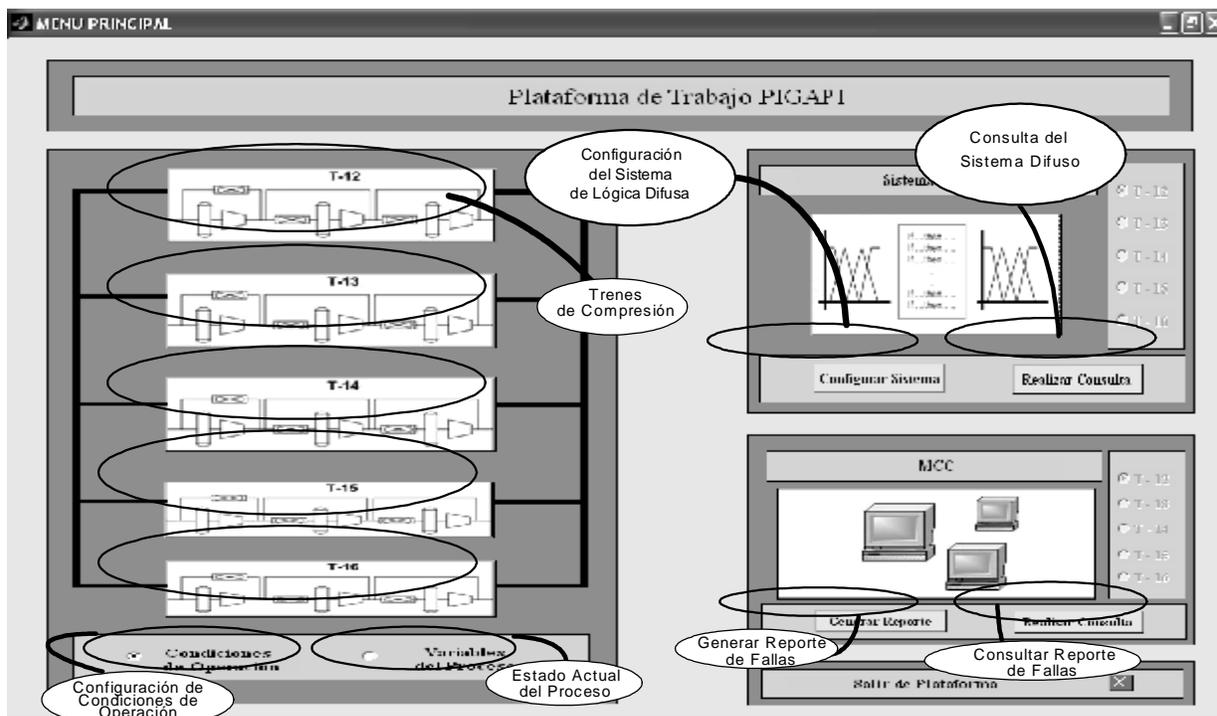


Figura 9. Menú principal de la interfaz con el usuario.

5. VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Para la validación se procedió a la introducción de los datos necesarios para configurar el sistema de inferencia difusa. Estos datos son las reglas difusas y las condiciones de operación de planta presentados en el trabajo desarrollado por Escalona [12] y están basados en información provenientes de la sala de control de la planta compresora PIGAP I.

Así mismo, se emplearon datos de prueba para el sistema, es decir; valores correspondientes a lecturas proporcionadas por los instrumentos de supervisión en planta, se utilizaron valores provenientes de sala de control y campo como tal, así como de valores críticos para validar el comportamiento de todos los elementos del sistema. Por ejemplo para el dato de entrada Presión Gas Descarga K-1401 (Compresor de Primera Etapa del Tren #3) = 4000 psig., considerando los demás valores de temperatura, presión, etc, del tren en estudio como normales, se procede a la evaluación de estos datos, previa configuración del sistema de inferencia difusa. El reporte arroja los siguientes resultados mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de Simulación.

FF	MF	FALLA	FECHA	HORA
1A	13	Incapaz de comprimir el caudal de gas natural a las condiciones deseadas	2-11-2002	21:30:34
33C		(PSV-14004): No se activa y alivia cuando hay falla	2-11-2002	21:30:34

Con esta información el usuario puede revisar cuales tareas de mantenimiento están propuestas en la base de conocimientos con ayuda de la interfaz gráfica proporcionada.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El empleo de lógica difusa en la detección de fallas funcionales en las unidades compresoras de la planta PIGAP I permite la disponibilidad de una base de reglas (conocimiento) que hace posible relacionar gran número de variables manteniendo un nivel de comprensión lingüístico accesible y comprensible por parte de cualquier usuario, logrando la participación del mismo en la modificación y mejoramiento de la base de conocimiento.

El desarrollo de una base de conocimientos basada en MCC además de la lógica difusa, permitió la clasificación de la información proveniente de esta metodología interactuando a su vez con el sistema de inferencia difusa con ayuda de algoritmos basados en lógica convencional. Es recomendable el empleo de otras herramientas de la inteligencia artificial tales como algoritmos genéticos y redes neuronales que permitan optimizar el desempeño del sistema basado en lógica difusa.

7. REFERENCIAS

- [1] Matthews, C. (2003), "A formal specification for a fuzzy expert system", *Information and Software Technology*, Vol. 45, No. 7, pp. 419-429.
- [2] Matthews, C. (2002), "Fuzzy Concepts and Formal Methods: A Sample Specification for a Fuzzy Expert System", *Proc. of the World Congress on Computational Intelligence (WCCI 2002)*, IEEE Press.
- [3] Uppal, F. J. and Patton, R. J. (2002), "Fault Diagnosis of an Electro-pneumatic Valve Actuator Using Neural Networks with Fuzzy Capabilities", *ESANN'2002 Proc. European Symposium on Artificial Neural Networks*, pp. 501-506, Bruges, Belgium.
- [4] Suzuki, H., Matsakis, P. and Desachy J. (2001), "Fuzzy Image Classification and Combinatorial Optimization Strategies for Exploiting Structural Knowledge", *Proc. FUZZ-IEEE 2001 (IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems)*, Melbourne, Australia.
- [5] Marjamaa, J., Sjahputera, O., Keller, J. and Matsakis, P. (2001), "Fuzzy Scene Matching in LADAR Imagery", *Proc. FUZZ-IEEE 2001 (IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems)*, Melbourne, Australia.
- [6] Thongchai, S., Suksakulchai, S., Wilkes, D. M. and Sarkar N. (2000), "Sonar Behavior-Based Fuzzy Control for a Mobile Robot", *Proc. 2000 IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics*, Nashville, Tennessee.
- [7] Li, Y. (2000), "Intelligent Control with Application to Robotics", *Proc. of Conf. on Automation Science and Technology*, pp. 293-297, Macao, P. R. China.
- [8] Moubray, J. (2001), "Reliability Centered Maintenance", *Industrial Press Inc.*, New York.
- [9] Rausand, M. and Vatn, J. (1998), "Reliability Centered Maintenance", In C. G. Soares, editor, *Risk and Reliability in Marine Technology*, Balkema, Holland.
- [10] Escalona, L. (2002), "Diseño de un Sistema para el Análisis de Fallas en Planta Compresora PI GAP I PDVSA basado en Mantenimiento Centrado en Confiabilidad empleando Lógica Difusa", Trabajo de Grado, Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Valencia, Venezuela.
- [11] Zadeh, L. (1973), "Outline of a new approach to the analysis of a complex system and decision processes", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, SMC, Vol. 3, pp. 28.
- [12] Delgado, A. (1998), "Inteligencia Artificial y Minirobots", Ediciones ECOE, Bogotá.
- [13] Mamdani, E.H and Assilian S. (1975), "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", *Int. J. Man-Machine Studies*, Vol. 7, pp.1-13.
- [14] MathWorks Inc. (2000) "Fuzzy Logic Toolbox User's Guide", Natick, MA.
- [15] MathWorks Inc. (2000) "Database Toolbox User's Guide", Natick, MA.