

A fuzzy classifier system for fault tolerance

Mariela Cerrada L.¹ y José Aguilar C.²

¹Departamento de Sistemas de Control, E-mail: cerradam@ing.ula.ve

²Departamento de Computación, CEMISID, E-mail: aguilar@ing.ula.ve

Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes.
Mérida 5101, Venezuela.

Abstract

In this work, we propose to use a Fuzzy Classifier System for building a fault tolerance automated system which determines the applicable and feasible maintenance tasks on industrial plant. This system is based on the "Reliability-Centered Maintenance" methodology.

Key words: Machine learning, classifier systems, fuzzy logic, genetic algorithms, fault detection and diagnosis, reliability-centered maintenance.

Un sistema clasificador difuso para el manejo de fallas

Resumen

En este trabajo, se propone el uso de un sistema automatizado para el manejo de fallas basado en Sistemas Clasificadores. Dicho sistema genera como salida las tareas de mantenimiento aplicables y factibles, a partir del procesamiento de cierta información que proviene del ambiente y de la planta bajo supervisión. Para el diseño del sistema, se utilizan los procedimientos propuestos por la metodología "Mantenimiento Centrado en Confiabilidad" y se utilizan conceptos de la Lógica Difusa y de los Sistemas Clasificadores.

Palabras clave: Máquinas de aprendizaje, sistemas clasificadores, lógica difusa, algoritmos genéticos, detección y diagnóstico de fallas, mantenimiento centrado en confiabilidad.

1. Introducción

El proceso de cambio en la industria plantea nuevas investigaciones y técnicas con el fin de alcanzar una alta confiabilidad y disponibilidad de la planta [1, 2, 3]. Atendiendo a las necesidades en el área de mantenimiento, surge la metodología *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad* (MCC), la cual desarrolla estrategias orientadas a la optimización del proceso de mantenimiento.

En este trabajo, proponemos un sistema automatizado que permita cubrir aspectos relacionados con el manejo de fallas, tales como detectar fallas, analizar las causas de las mismas, determinar sus consecuencias y generar la tarea de mantenimiento adecuada. Para diseñar el sis-

tema, proponemos utilizar como herramienta un *Sistema Clasificador Difuso* (SCD), el cual combina los aportes de la *Lógica Difusa* (LD), los *Sistemas Expertos* (SEs) y los *Algoritmos Genéticos* (AGs).

Los SCD son usados para implantar computacionalmente la metodología MCC en un entorno industrial. Hasta ahora, uno de los problemas a la hora de querer utilizar dicha metodología es de poder implantarla debido al conjunto de elementos que se deben considerar, a pesar de lo eficiente que ésta ha demostrado ser en el manejo de fallas [12, 13]. Usando los SCD podemos implementar las características esenciales de la metodología MCC en un entorno automatizado, de tal manera que pueda ser usado industrialmente.

La metodología MCC nos permite diseñar un modelo genérico de reglas de control difuso, las cuales constituyen la base de conocimientos del SCD, y los AGs son el mecanismo adaptativo para la búsqueda de nuevas estructuras de las reglas difusas, nuevas relaciones entre las variables involucradas en las reglas y mejores funciones de pertenencia para los conjuntos difusos definidos.

Se escogió usar un SCD puesto que para este problema resulta mejor usar reglas difusas. Usando este tipo de reglas, los elementos esenciales de la metodología MCC, como por ejemplo determinar el nivel de falla de un equipo, las posibles fallas, etc., son capturadas de forma más eficiente usando conjunto difusos.

Así, el objetivo de este trabajo es proponer una herramienta automatizada para el manejo de fallas basada en la metodología MCC. Para desarrollar dicha herramienta se usan los SCD. En este trabajo se muestra su diseño y su implementación en un prototipo computacional de corte académico.

En la segunda sección se presentan los aspectos teóricos sobre los cuales se basa el desarrollo del trabajo. En la tercera sección se presenta el diseño del sistema. En la cuarta sección se presenta el diseño del prototipo computacional desarrollado para implementar el sistema propuesto y las pruebas realizadas. En la quinta sección se presentan las conclusiones del trabajo.

2. Aspectos Teóricos

En esta sección, discutiremos algunos aspectos sobre los sistemas clasificadores y la lógica difusa, para luego definir a un SCD. Seguidamente, presentaremos los aspectos básicos de la metodología MCC.

2.1. Los Sistemas Clasificadores (SCs)

Las máquinas de aprendizaje basadas en genética son herramientas que permiten una representación flexible del conocimiento. Un SC es un tipo particular de máquina de aprendizaje que aprende reglas [4]. Los SCs poseen como característica primordial la adaptabilidad necesaria lograda a través de los AGs. Dicha característica consiste en aprender comportamientos a través de la modificación de la población inicial de re-

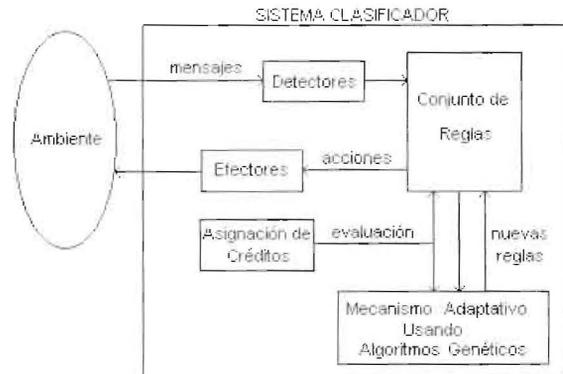


Figura 1. Estructura de un sistema clasificador.

glas, garantizando que las nuevas reglas sean mejores que las anteriores. Los tres componentes que coexisten dentro de un SC son (ver Figura 1) [10]:

a) El sistema de reglas. El sistema de reglas es quien determina el conjunto de actividades/acciones a realizar, de acuerdo a la información que proviene del exterior, dentro del SC. Para eso, la información externa es codificada en mensajes. Estos mensajes activan a un conjunto de reglas para generar nuevos mensajes. Estos nuevos mensajes pueden activar a otras reglas (mensajes internos) o pueden fluir hacia el exterior, proponiendo alguna acción concreta sobre el ambiente. Cada vez que se activa un conjunto de reglas y se generan nuevos mensajes, se cumple un *ciclo de reglas-mensajes*.

b) El sistema de asignación de crédito. El sistema de asignación de crédito es el mecanismo encargado de evaluar la eficiencia de cada regla durante la ejecución del SC. En otras palabras, se trata de evaluar la pertinencia de cada regla en el problema concreto que se está resolviendo. El mecanismo clásico utilizado es el llamado *bucket brigade* [4], el cual propone que, para un intervalo de tiempo dado, cada regla tiene un nuevo valor de crédito según las veces que ésta activó a otras reglas o fue activada. Así, el valor del crédito de la *i*-ésima regla viene dado por la siguiente ecuación:

$$S_i(t+1) = S_i(t) - P_i(t) + R_i(t) - T_i(t) \quad (1)$$

donde: $S_i(t)$ representa el valor del crédito en el tiempo t ; $P_i(t)$ representa el pago a las reglas que la activaron; $R_i(t)$ representa el pago que recibe de

todas aquellas reglas que ella activó; y $T_i(t)$ representa otros impuestos al que puede estar sujeto.

Cada vez que ocurre un ciclo de reglas-mensajes, se calcula el valor de crédito de cada regla.

c) Mecanismo adaptativo usando AGs.

Un AG emula la teoría de la evolución biológica para resolver problemas de optimización [4, 5]. La evolución es entendida como una sucesión de cambios en las características de las especies. En los problemas de optimización, los AGs manipulan poblaciones de soluciones potenciales para generar nuevas y mejores soluciones a través de la aplicación de los *operadores genéticos* sobre dicha población, teniendo como base una función de ajuste para evaluar a las soluciones y decidir cuales "individuos" deberán "evolucionar".

En los SCs, la población a manipular son las reglas que se encuentran en el sistema de reglas. La idea es generar mejores reglas a partir de las existentes en un momento dado. Esta manipulación ocurre cada vez que se cumple un cierto número de ciclos de reglas-mensajes. Dicho número es fijado como un parámetro del SC. La ecuación (1) es tomada como la función de ajuste. Los AGs se encargarán de generar nuevas reglas usando los operadores genéticos como los mecanismos de combinación de las reglas existentes, y tomando como población a reemplazar aquellas reglas con un bajo valor de crédito.

Por el propio mecanismo de ajuste del sistema de reglas, aquellas reglas que no tengan sentido perecerán en las próximas generaciones (tendrán un valor bajo de crédito, por lo que serán escogidas para ser reemplazadas). Además, para evitar perder la consistencia de la base de reglas (en especial, aquellas reglas que han mostrado ser eficientes), se usa un método de reemplazo parcial que asegura que las reglas con ciertos valor de crédito (por consiguiente, útiles para el sistema) permanecerán en la base de reglas. A su vez, este método permite incorporar las nuevas reglas generadas.

2.2. La Lógica Difusa (LD)

La LD, permite asignar diferentes grados de certeza a la ocurrencia de un evento (lógica multivaluada). En 1965, L. Zadeh aplicó la lógica mul-

tivaluada a la teoría de conjuntos, estableciendo la posibilidad de que los elementos pudieran tener diferentes grados de pertenencia a un conjunto, introduciendo, así, el término *difuso* [6, 7, 8, 9].

Definición. Dado $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ un conjunto de elementos genéricos denotados por $x_i \forall i = 1, \dots, n$ dentro de un rango específico. Entonces, un conjunto difuso F en X es caracterizado por una función de pertenencia $\mu_F(x)$ que asociada a cada elemento x_i en X , un número real $\mu_F(x_i)$ en el intervalo $[0, 1]$ que representa el grado de pertenencia del elemento x_i al conjunto difuso F .

En LD, la condición y la acción de las reglas de producción de la forma Si <condición> entonces <acción>, tienen valores difusos (valores descriptivos). Cada regla de producción tiene un *peso* definido según las operaciones lógicas involucradas en dicha regla. El peso de la regla es un elemento clave para establecer la acción, a través de un mecanismo de inferencia difusa [9].

2.3. Los Sistemas Clasificadores Difusos (SCD)

Un SCD es un SC cuyas reglas o clasificadores son reglas difusas de la forma Si <condición> Entonces <acción> [10, 11]. De esta manera, la activación de una regla se logra cuando se cumplen las instancias de la <condición> de una regla para los valores de las variables difusas contenidas en los mensajes. Los AGs son utilizados para adaptar los siguientes elementos de los SCD: la estructura de las reglas, las instancias de las reglas, las funciones de pertenencia. El *peso* de cada regla será un elemento a ser tomado en cuenta cuando se establezca el valor del crédito de las reglas y las funciones de pertenencia. Entonces, para definir el crédito de una regla, la ecuación (1) queda definida como:

$$S_i(t+1) = S_i(t) - P_i(t) + R_i(t) + Act_i(t) \quad (2)$$

donde: i es el identificador de la regla; $Act_i(t)$ es el grado de activación de la regla, y viene dado por el *peso* de la misma; $P_i(t)$ es el pago dado, definido como $Pr * Act_i(t)$; $R_i(t)$ es el pago recibido, definido como $\sum_{j \in D} Pr * Act_j(t)$; D es el conjunto de reglas que activó la regla i en el instante t ; y Pr es la tasa de pago, dada como un parámetro del SC.

La función de ajuste de crédito para la función de pertenencia de un conjunto difuso F viene dada por:

$$S_F(t+1) = S_F(t) + Act_i * \mu_{F(x_k)},$$

si el operador condición es "O" (3)

$$S_F(t+1) = S_F(t) + Act_i * \frac{1}{\mu_{F(x_k)}},$$

si el operador condición es "Y" (4)

donde: $S_F(t)$ es el valor de crédito de la función de pertenencia del conjunto difuso F en el tiempo t ; Act_i es el peso de la regla i ; $\mu_{F(x_k)}$ es el grado de pertenencia del elemento x_k al conjunto difuso F presente en la <condición>.

La definición de la ecuaciones (3) y (4), permite asignar más crédito al conjunto difuso que determinó el nivel de disparo de una regla. Así, su función de pertenencia será modificada por los AG con el fin de maximizar el grado de activación de la regla. En el caso de la ecuación (3), puesto que en la operación lógica "O" el peso de la regla es el valor máximo de entre los grados de pertenencias de los conjuntos difusos de la parte de la condición de la regla, se debe dar un crédito proporcional a su peso a cada función de pertenencia. En el caso de la ecuación (4), puesto que en la operación lógica "Y" el peso de la regla es el valor mínimo de entre los grados de pertenencias de los conjuntos difusos de la parte de la condición de la regla, al considerar el inverso, aquella condición con mayor grado de pertenencia tendrá proporcionalmente un menor ajuste en su crédito (como debería ser).

2.4. El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)

El MCC busca definir cuáles son las tareas de **mantenimiento preventivo** que se deben aplicar a una planta, dónde aplicarlas, y cuándo aplicarlas, con el fin de mantener la confiabilidad inherente de cada equipo [12, 13]. Los objetivos básicos de esta metodología son: preservar la función del sistema, identificar fallas funcionales (pérdida de función), analizar las consecuencias de los modos de falla, seleccionar las tareas de mantenimiento que sean técnicamente aplicables y económicamente factibles.

Existen cuatro tipos de tareas de mantenimiento preventivo: Tareas Dirigidas a Tiempo, que consisten en tareas de revisión de los equipos y/o reemplazo de sus partes; Tareas Dirigidas a Condiciones, que consisten en tareas de monitoreo de condiciones físicas asociadas a alguna falla; Tareas Encontrando Fallas, que consisten en tareas específicas que buscan determinar fallas escondidas; y Pasar la Falla, que consiste en no tomar ninguna de las tareas anteriores. La finalidad de estas tareas es evitar o detectar modos de falla de los equipos y establecer sus posibles causas.

Las aplicaciones de esta metodología se iniciaron en la aeronáutica civil norteamericana. Otras aplicaciones pueden revisarse en [14, 15].

3. Definición del SCD para el Manejo de Fallas

En esta sección, se definen todos los elementos que permitirán caracterizar el problema, de tal manera de implementar la herramienta de manejo de fallas, basada en el MCC y los SCDs.

3.1. Reglas de Control Genéricas

En esta sección, se presenta el grupo de reglas de control genéricas, las cuales son derivadas de la metodología MCC.

1. Si <estado funcional> y <contexto operativo> entonces <falla funcional>
2. Si <falla funcional> entonces <equipo>
3. Si <equipo> entonces <modo de falla>
4. Si <modo de falla> entonces <causa del modo de falla>
5. Si <modo de falla> entonces <impacto en la calidad> y <impacto en la producción> y <impacto en los costos de operación> y <nivel de riesgo> y <nivel de evidencia>
6. Si <impacto en la calidad> ó <impacto en la producción> ó <impacto en los costos de operación> entonces <impacto operacional>
7. Si <nivel de riesgo> y <impacto operacional> entonces <categoria A> y <categoria B> y <categoria C>
8. Si <variable crítica> y <conocimiento del proceso de falla> y <amplitud del intervalo P-F> entonces <aplicabilidad de tarea SC>

9. Si <conocimiento del limite de vida> entonces <aplicabilidad de tarea ST>
10. Si <nivel de evidencia> entonces <sugerir tareas EF>
11. Si <categoria A> y <categoria B> y <categoria C> entonces <costo consecucional>
12. Si <costo de mano de obra> ó <costo de material> entonces <costo de reparación>
13. Si <costo de reparación> ó <costo de observación> entonces <costo de mantenimiento>
14. Si <costo de mantenimiento> y <costo consecucional> entonces <factibilidad de tarea*>
15. Si <aplicabilidad de tarea *> y <factibilidad de tarea *> entonces <realizar tarea *>
16. Si <modo de falla> y <realizar tarea SC> entonces <acción>
17. Si <causa del modo de falla> y <realizar tarea ST> entonces <acción>
18. Si <modo de falla> y <costo consecucional> y <acción> entonces <alarma>

donde: Intervalo P-F = intervalo de tiempo que dura un proceso de falla; Categoría A = consecuencias de seguridad humana y ambiental; Categoría B = consecuencias operacionales; Categoría C = consecuencias no operacionales; * = SC ó ST; SC= Dirigida a Condiciones; ST= Dirigida a Tiempo; y EF= Encontrando Fallas.

3.2. Variables Difusas y Conjuntos Difusos

En esta sección, se define el conjunto de variables difusas que son usadas en las reglas de control genéricas derivadas del MCC. Daremos la definición de las principales variables difusas, las demás pueden verse en [11].

1. Estado Funcional (EF). Representa la condición del estado físico asociado a una función del sistema respecto a un comportamiento estándar o punto de operación. Esta variable tiene tres posibles caracterizaciones, cada una con sus conjuntos difusos:

- a) Normal (**N**), Anormal Alto (**AA**), Anormal Bajo (**AB**).
- b) Normal (**N**), Anormal Alto (**AA**).
- c) Normal (**N**), Anormal Bajo (**AB**).

El tipo de caracterización, así como los valores de la variable, serán definidas por el experto. En el sistema existirán n variables EF_x ($x = 1, 2, \dots, n$) asociados a las funciones del sistema.

2. Contexto Operativo (CO). Representa la condición del ambiente que rodea al estado funcional y su valor viene dado por el experto. En el sistema existirán n variables CO_x ($x = 1, 2, \dots, n$) asociados a los estados funcionales del sistema. El conjunto difuso considerado es: Normal (**N**), Anormal (**AN**).

3. Falla Funcional (FF). Representa la probabilidad de ocurrencia de una falla funcional y depende de los valores del estado funcional y del contexto operativo, según lo considerado por el MCC. Cada estado funcional anormal tiene a lo sumo dos Fallas Funcionales FF_{xv} ($x = 1, 2, \dots, n$; $v = 1, 2$) asociadas. El conjunto difuso definido es: Ninguna (**N**), Baja (**B**), Mediana (**M**), Alta (**A**).

4. Equipo (EQ). Representa la probabilidad de falla en un equipo, y su valor, el cual es definido por el experto, depende de la relación que exista entre la falla funcional y el equipo en cuestión. En el sistema existirán p variables EQ_i ($i = 1, 2, \dots, p$), correspondientes a cada equipo. El conjunto difuso considerado es: Ninguna (**N**), Baja (**B**), Mediana (**M**), Alta (**A**).

5. Modo de Falla (MF). Representa la probabilidad de ocurrencia de un modo de falla, y su valor depende de la relación entre un equipo y el modo de falla posible para tal equipo, según lo considerado por el experto. Cada equipo posible tendrá asociado q modos de falla posibles, descritos por las variables MF_{ij} ($i = 1, 2, \dots, p$; $j = 1, 2, \dots, q$). El conjunto difuso definido para esta variable es: Ninguna (**N**), Baja (**B**), Mediana (**M**), Alta (**A**).

6. Causa del modo de falla (CMF). Representa la probabilidad de ocurrencia de una causa de modo de falla, y su valor esta dado por el experto. Dicho valor depende de la relación existente entre un modo de falla y una posible causa definida para tal modo de falla. Cada modo de falla posible para cada equipo tendrá r causas de modo de falla posibles, descritas por las variables CMF_{ijk} ($i = 1, 2, \dots, p$; $j = 1, 2, \dots, q$; $k = 1, 2, \dots, r$). El conjunto difuso considerado para esta variable es: Ninguna (**N**), Baja (**B**), Mediana (**M**), Alta (**A**).

3.2.1. Funciones de Pertenencia

A continuación, se definen las funciones de pertenencia de cada uno de los conjuntos difusos asociados a cada variable difusa. Se propone, de manera general, el uso de funciones de pertenencia del tipo trapezoidal. Sólo serán presentadas algunas, para el resto ver [11].

1. La variable difusa **EF** puede estar caracterizada por la función de pertenencia mostrada en la Figura 2. Tanto el universo de discurso, [min, max], como las coordenadas a_i , son dados por el experto como entradas al sistema.
2. Las variables difusas **FF, EQ, MF, CMF** están caracterizadas por las funciones de pertenencia mostradas en la Figura 3. El universo de discurso es [0%, 100%].

3.2.2. Comportamiento de las reglas difusas (instancias)

En esta sección, se definen algunas de las instancias de las reglas de control genéricas. Algunas de ellas se extraen directamente del MCC, otras asumen valores iniciales dados por el experto, los cuales posteriormente serán adaptados por los AGs. En este trabajo, se definieron un total de 170 posibles comportamientos válidos de las reglas difusas. Algunos ejemplos de tales instancias son:

- Si EF1 es N y CO es * entonces FF11 es N
- Si EF2 es AB y CO es N entonces FF21 es A
- Si FF11 es N entonces EQ1 es N
- Si FF21 es A entonces EQ2 es A
- Si EQ1 es N entonces MF11 es N
- Si EQ2 es A entonces MF21 es A
- Si MF11 es N entonces CMF111 es N y CMF112 es N
- Si MF21 es A entonces CMF211 es A

donde el símbolo * representa cualquier valor dentro del conjunto difuso de tal variable. En [15] pueden verse el resto de las instancias definidas.

3.3. Interacción entre el SCD y su entorno

Es esta sección se indica que información debe ser dada como entrada al sistema. El experto participa en la definición de las instancias de

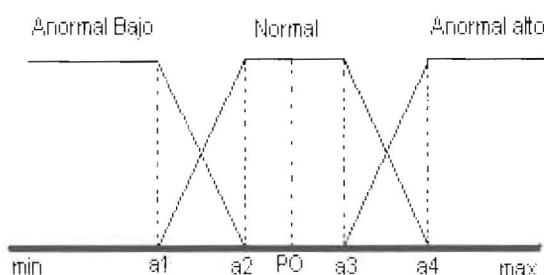


Figura 2. Funciones de pertenencia de la variable difusa EF.

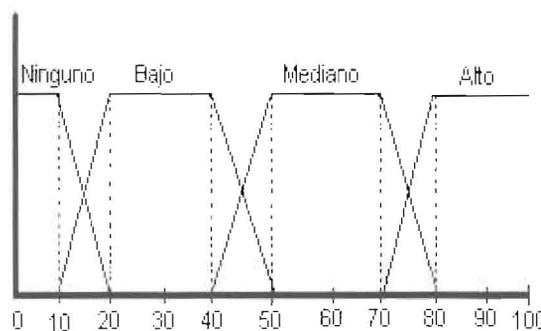


Figura 3. Funciones de pertenencia de las variables difusas FF, EQ, MF, CMF.

algunas de las reglas difusas, otras son asumidas inicialmente por el sistemas, para luego ser optimizadas por los AG.

3.3.1. Información inicial

La información inicial es obtenida según lo propuesto en la metodología MCC, y constituye la información necesaria para el funcionamiento del SCD manejador de fallas.

1. Se debe conocer los dominios de los equipos de la planta, los modos de falla asociados a tales equipos, las causas asociadas a tales modos de falla, y las Tareas Sobre Condiciones y Sobre Tiempo con sus características técnicas y de costo.
2. El experto debe especificar inicialmente los equipos asociados a cada falla funcional, los modos de falla asociados a cada equipo con sus impactos, riesgo y evidencia, las causas asociadas a cada modo de falla, los contextos operativos para cada estado funcional, la caracterización de cada estado funcional (función de pertenencia y rangos), y las posibles consecuencias de los modos de falla especificados inicialmente.

Es aquí donde se realiza el proceso de recopilación y tabulación de la información que tiene el experto. Esta fase es crucial, ya que a partir de la información tabulada en esta fase se definirá tanto al conjunto de reglas iniciales (población inicial que será mejorada por el mecanismo adaptativo), como al espacio en el cual se moverá el AG para proponer nuevas reglas. Para facilitar este proceso de captura de la información, se podrían usar varias técnicas, tales como los Mapas Cognitivos, etc. [16].

El principal costo de llevar a cabo esta fase, reside en el tiempo que se tiene que invertir para seleccionar la información verdaderamente significativa para el sistema y en la disposición del personal para ofrecer su conocimiento.

3.3.2. Interacción con el usuario

El usuario debe informar al sistema sobre cambios en el punto de operación de cada estado funcional, cambios en la caracterización de algún estado funcional, cambios en los rangos de las funciones de pertenencia que no están sujetas a modificaciones por los AGs, cambios imprevistos del contexto operacional, inclusión de nuevos equipos, modos de falla, causas y tareas de mantenimiento desconocidas por el sistema.

3.4. Proceso adaptativo usando los AGs

A continuación, se define cómo se utilizarán los operadores genéticos para lograr la adaptación de ciertas reglas del modelo difuso, así como de ciertas funciones de pertenencia.

3.4.1. Modificación de las reglas difusas

La codificación de las reglas difusas como individuos está basada en lo propuesto en [10], según el modelo mostrado en la Figura 4.

Para lograr la adaptación, se utilizarán los operadores *cruzamiento* y *mutación*. Se propone modificar:

a) Modificar las relaciones entre una falla funcional en particular y los equipos asociados: La regla a modificar es la número 2, la cual, en su forma explícita viene dada por:

Si FF_{xv} es Rango entonces EQ_a es Rango_a y EQ_b es Rango_b y...y EQ_i es Rango_i, donde: $a, b, i = 1, 2, \dots, p$; $x = 1, \dots, n$; $v = 1, 2$.

b) Modificar las relaciones entre un equipo en particular y sus modos de falla: La regla a modificar es la número 3, la cual, en su forma explícita viene dada por:

Si EQ_i es Rango entonces MF_{ia} es Rango_ia y MF_{ib} es Rango_ib y...y MF_{ij} es Rango_ij, donde: $i = 1, 2, \dots, p$; $a, b, j = 1, 2, \dots, q$

c) Modificar las relaciones entre un modo de falla en particular y sus causas: La regla a modificar es la número 4, la cual, en su forma explícita viene dada por:

Si MF_{ij} es Rango entonces CMF_{ija} es Rango_ija y CMF_{ijb} es Rango_ijb y...y CMF_{ijk} es Rango_ijk, donde: $i = 1, 2, \dots, p$; $j = 1, 2, \dots, q$; $a, b, k = 1, 2, \dots, r$

d) Modificar los impactos de un modo de falla: La regla a modificar es la número 5, la cual, en su forma explícita, viene dada por:

Si MF_{ij} es Rango entonces IC_{ij} es Rango_ij y IP_{ij} es Rango_ij y ICO es Rango_ij y NE_{ij} es Rango_ij y NR_{ij} es Rango_ij, donde: $i = 1, 2, \dots, p$; $j = 1, 2, \dots, q$

Para ello se propone el cambio de los siguientes elementos:

- Los subbloques de rangos asociados a cada una de los atributos de las acciones, esto es, los valores difusos de las variables de la acción.
- Los bloques de acción (atributo y rango).
- El subbloque de rango en la condición, esto es, el valor difuso de las variables de la condición.

3.4.2. Modificación de los rangos de las funciones de pertenencia

La función de pertenencia del conjunto difuso asociado a una variable difusa será codificada como un individuo según el modelo mostrado en la Figura 5, donde: los x_i representan las coordenadas sobre el dominio de discurso de la función de pertenencia para cada valor difuso defini-

Crédito	Operador	Atributo Condición 1	Rango Condición 1	----	Fin Condición	Atributo Acción 1	Rango Acción 1	----	Fin Acción
---------	----------	-------------------------	----------------------	------	------------------	----------------------	-------------------	------	---------------

Figura 4. Codificación de una regla como individuo.

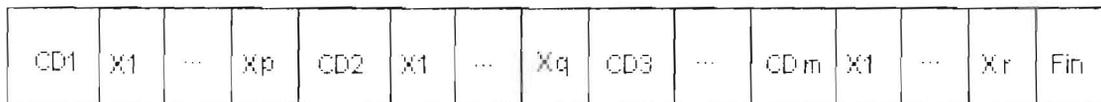


Figura 5. Codificación de la función de pertenencia como individuo.

do, los CD_j identifican a tales valores difusos, y los subíndices p , q y r representan el número de coordenadas asociadas a la función de pertenencia para un valor difuso en particular.

Para lograr la modificación deseada, se propone el cambio de los valores x_i que definen las coordenadas de la función de pertenencia. Para esto, se propone el uso del operador mutación, validando después de cada cambio que $x_{i-1} < x_i < x_{i+1}$.

Las funciones de pertenencia a modificar son las asociadas a las variables difusas involucradas en las reglas mencionadas en la sección 3.4.1

3.4.3. Funcionamiento de los operadores genéticos

Los operadores genéticos utilizados son el cruzamiento y la mutación, los cuales funcionarán como se describe a continuación. En cada caso, los individuos a manipular serán aquellos con un alto valor de crédito.

Operador Cruzamiento:

1. Seleccionar los padres aleatoriamente.
2. Seleccionar cuál elemento se cambiará aleatoriamente.
3. Seleccionar uno de tales elementos en cada uno de los padres y realizar el intercambio.

Operador Mutación:

1. Seleccionar un individuo aleatoriamente.
2. Seleccionar cuál elemento se cambiará aleatoriamente.
3. Cambiar aleatoriamente el elemento seleccionado dentro de sus valores permisibles.

4. Descripción del Prototipo Computacional

En esta sección, se muestra la descripción del prototipo del SCD. Para desarrollar este prototipo, se utilizó como herramienta computacional el paquete de manipulación simbólico-gráfica *Mathematica*.

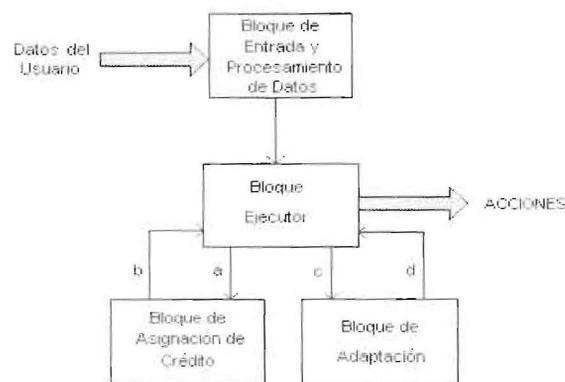


Figura 6. Diagrama de bloques funcional.

4.1. Diseño funcional

El diagrama de bloques del prototipo computacional se muestra en la Figura 6.

El *bloque de entrada y procesamiento de datos* recibe todos los datos especificados por el usuario y los almacena adecuadamente. Estos datos serán utilizados por el sistema durante su ejecución. El *bloque ejecutor* es el encargado de coordinar el ciclo de activación de reglas y generación de mensajes. Recibe los mensajes generados dentro y fuera del sistema, y los procesa bajo un mecanismo de inferencia difusa. El *bloque de asignación de crédito* recibe del bloque ejecutor las reglas activas y las funciones de pertenencia de dichas reglas (etiqueta "a" de la Figura 6). A partir de esa información, es el encargado de calcular el crédito de las reglas y de las funciones de pertenencia activadas. Luego, envía al bloque ejecutor estos nuevos valores de crédito de las reglas y funciones de pertenencia (etiqueta "b" de la Figura 6). El *bloque de adaptación* es el que ejecuta el mecanismo adaptativo usando los AG. Aquí se decide cuáles reglas y funciones de pertenencia serán modificadas, seleccionando aquellas con alto valor de crédito (etiqueta "c" de la Figura 6). Luego, las nuevas reglas y funciones de pertenencia (etiqueta "d" de la Figura 6) sustituyen a aquellas reglas y funciones de pertenencia con bajo rendimiento.

4.2. Pruebas del Prototipo

En esta sección, se presenta un ejemplo de aplicación utilizando el prototipo diseñado en este trabajo. En este ejemplo, se considera la existencia de un solo estado funcional cuyo comportamiento fuera de los rangos deseados, genera la aparición de fallas funcionales. Aquí sólo se presenta alguna información inicial disponible, así como solo las salidas del prototipo correspondientes a la regla número 1. Finalmente, se muestra una llamada a los AG, en el ciclo de reglas-mensajes número 10.

Para la ejecución del prototipo, se supone la llegada de mensajes provenientes del ambiente en distintos instantes de tiempo. Dichos mensajes contienen distintos valores del estado funcional dentro de su dominio, así como del contexto operativo. Se considera como un "instante de tiempo", al tiempo real que le toma a la herramienta computacional en procesar la lista de mensajes y generar las acciones (un ciclo de reglas-mensajes).

4.2.1. Aplicación del SCD para el manejo de fallas en el subsistema de bombeo de agua de una piscina

El subsistema en cuestión, es el encargado de mantener el agua circulante en todo el sistema de la piscina. De esta manera, tener un control sobre las fallas que se puedan generar en dicho subsistema permitiría garantizar el correcto funcionamiento de la piscina para atender la demanda de usuarios en las épocas de calor. La función de este subsistema es mantener el flujo de agua circulante desde la piscina a los subsistemas de calentamiento y acondicionamiento de agua sobre los 7 GPM (FF11). Así, el estado funcional es el flujo de agua denotado como EF1.

a) Dominio de equipos

1. Bomba principal
2. Filtro principal
3. Filtro de bloqueo
4. Timers electromecánicos
5. Tuberías de agua
6. Válvulas

b) Dominio de modos de falla para cada equipo

- 1.1 Rodamientos deteriorados
- 1.2 Corte de tierra del motor
- 1.3 Filtración en las juntas del motor
- 2.1 Cesta rota
- 2.2 Junta rota
- 2.3 Bloqueo

c) Dominio de las causas para cada modo de falla

- 1.1.1. Etapa fuera de uso
- 1.2.1 Envejecimiento del material aislante
- 1.3.1 Juntas rotas
- 1.3.2 Pernos flojos
- 2.1.1 Etapa fuera de uso
- 2.2.1 Etapa fuera de uso
- 2.3.1 Acumulación de escombros

El resto de los dominios pueden verse en [11]. La información inicial necesaria respecto a los dominios considerados son:

1. Equipos involucrados en la falla funcional 11: 1
2. Modos de falla involucrados: 1.1, 1.2
3. Causas involucradas: 1.1.1, 1.2.1, 1.2.2
4. Los niveles de impacto en calidad, en producción, en costos de operación, nivel de riesgo, nivel de evidencia de los modos de falla, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1
Consecuencias de los Modos de Fallas del ejemplo 4.2.1

MF	Impacto en la calidad IC	Impacto en la producción IP	Impacto en los costos de operación IC	Nivel de Riesgo NR	Nivel de Evidencia NE
1.1	Alto (A)	Bajo (B)	Ninguno (N)	Alto (A)	Ninguno (N)
1.2	Medio (M)	Medio (M)	Ninguno (N)	Ninguno (N)	Ninguno (N)

Los impactos de los modos de falla no considerados inicialmente, serán inicializados en cualquier valor, cuando dichos modos de falla se incorporen debido a los AGs.

5. La función de pertenencia que caracteriza al estado funcional EF1, se muestra en la Figura 7.
6. Las funciones de pertenencia de las variables FF, EQ, MF, CMF son definidas como se mostró en la Figura 3.

A continuación se muestra la salida del prototipo para un solo ciclo de reglas-mensajes del bloque ejecutor. Se consideró una tasa de pago para el ajuste de crédito de las reglas, de 0.3. El resto de la salida puede verse en [11].

```
(***** Inicio *****)
PROCESANDO LA LISTA DE MENSAJES
TIEMPO t=1
MENSAJE DEL AMBIENTE: EF=5.8 - CO=10
MENSAJE 1:
EF=5.8 - CO=10
MENSAJES DIFUSOS:
EF=AB - CO=NO
EF=N - CO=NO
ACCIONES:
FF1=55.6
LISTA DE MENSAJES:
FF1=55.6
MENSAJES DE SALIDA:
NO HAY
MENSAJES EN ESPERA:
NO HAY
Se procesan 10 ciclos de reglas-mensajes antes de llamar a los AGs.
(***** Llamado a los Algoritmos Genéticos *****)
(***** Modificando las Reglas *****)
SE MODIFICARAN LAS REGLAS 2
MODIFICANDO LA REGLA 2
AJUSTE 1.
REALIZANDO MUTACION
PADRE {1.32487, A, FF1, M, FinC, EQ1, M, FinA}
MODIFICANDO RANGO CONDICION
HIJO {1.32487, A, FF1, N, FinC, EQ1, M, FinA}
```

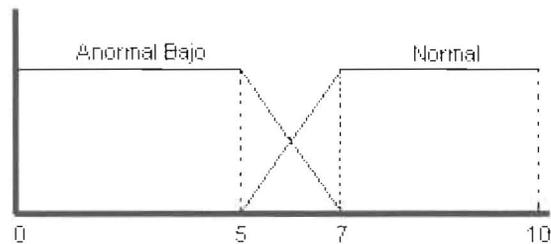


Figura 7. Función de pertenencia de EF1.

```
SUSTITUYENDO HIJO
REALIZANDO MUTACION
PADRE {1.09513, A, FF1, B, FinC, EQ1, B, FinA}
MODIFICANDO BLOQUE ACCION
HIJO {1.09513, A, FF1, B, FinC, EQ1, B, EQ2, M, FinA}
SUSTITUYENDO HIJO
(***** Regresando al Bloque Ejecutor *****)
```

4.3 Análisis de resultados

Aunque los SCDs contemplan un procesamiento paralelo de los mensajes generados por parte del bloque ejecutor, el prototipo diseñado realiza un procesamiento secuencial. En consecuencia, el tiempo real de ejecución se hace lento. Este tiempo de ejecución, depende del número de reglas y de la cantidad de variables presentes en los bloques de la condición y de la acción de las reglas consideradas, pues esto significa invertir cierto tiempo en el mecanismo de inferencia difusa.

Por otro lado, se debe recordar que al considerarse una baja probabilidad de ocurrencia de fallas funcionales, el número de instantes de tiempo necesarios para generar la salida es mucho mas corto en relación con el número de instantes de tiempo necesarios para el procesamiento de fallas funcionales con alta probabilidad de ocurrencia.

5. Conclusiones

El uso de las herramientas ofrecidas por el área de la computación inteligente representa una alternativa para lograr la automatización en las industrias. El SCD propuesto en este trabajo, es solo una parte de lo que puede ser un esquema para la automatización de la Gerencia de Mantenimiento en aquellas empresas donde la presen-

cia de fallas en los procesos representa pérdidas a todo nivel. Este SCD permite la manipulación de una cantidad de información que es imposible de manejar manualmente, cuando la cantidad de equipos involucrados es numerosa.

Debido a la naturaleza del funcionamiento del SCD, es necesario disponer del hardware que permita el procesamiento paralelo de la información que llega del ambiente y que fluye a través del sistema. Por otro lado, los requerimientos de memoria pueden llegar a ser elevados, si la cantidad de información que está procesándose paralelamente es significativa.

El prototipo diseñado en este trabajo, fue construido con la finalidad de probar nuestro diseño del SCD, sin embargo, es necesario disponer de estructuras de datos adecuadas para mejorar el tiempo de búsqueda de reglas activas, así como de una plataforma de desarrollo para el SCD más efectiva. Actualmente estamos trabajando en esta dirección.

Referencias Bibliográficas

1. Wireman T.: "World Class Maintenance Management", Industrial Press Inc., New York, 1990.
2. Higgings L.R.: "Maintenance Engineering Handbook", 5th ed., McGraw Hill, New York, 1994.
3. Levitt J.: "Managing Factory Maintenance", Industrial Press Inc., New York, 1996.
4. Goldberg D.: "Genetic Algorithms in Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Company Inc., New York, 1989.
5. Davis L.: "Handbook of Genetic Algorithms", Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.
6. Zadeh L. A.: "Fuzzy Sets", Information and Control, No. 8 (1965), 338-353.
7. Dubois D. and Prade H.: "Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications", Academic Press, New York, 1980.
8. Chen Y.Y. and Tsao T.C.: "A Description of the Dynamic Behavior of Fuzzy Systems", IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 19, No. 4 (1989), 745-755.
9. Jhy-Shing R.J., Chuen-Tsai S.: "Neuro-Fuzzy Modeling and Control", Proceedings IEEE, Vol. 83 (1995), 378-406.
10. Berbesí H. y Aguilar J.: "Sistema Clasificador de Reglas Borrosas", Reporte Técnico, CEMISID 97-07, Postgrado en Computación, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 1997.
11. Cerrada M.: "Diseño e Implementación de un Sistema Clasificador Difuso para el Manejo de Fallas Basado en la Metodología MCC", Tesis de Maestría, Postgrado en Ingeniería de Control, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 1998.
12. Moubray J.: "Reliability-Centered Maintenance", Industrial Press Inc., New York, 1992.
13. Smith A.: "Reliability-Centered Maintenance", McGraw-Hill Inc., New York, 1993.
14. Nowlan F. and Heap H.: "Reliability-Centered Maintenance Report", Technical Report AD/AO66579, National Technical Information Service, U.S.A, 1978.
15. Chockie A.D., Hauth J.T. and Morgenstern M.H.: "Survey of US Nuclear Reliability-Centered Maintenance Practices", Technical Report, Battelle Human Affairs Research Center, U.S.A, 1989.
16. Aguilar J. and Roa N.: "Diseño de Mapas Cognitivos Borrosos Aleatorios", Sometido a Publicación. Diciembre 1999.

Recibido el 26 de Abril de 1999

En forma revisada el 19 de Mayo de 2000