



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**  
Instituto Tecnológico de Apizaco



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“Sistema Experto Difuso aplicado al diagnóstico de fallas industriales mediante el conocimiento experto obtenido de la herramienta RCM”**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN INGENIERÍA ADMINISTRATIVA**

PRESENTA

**Ing. Daniel Hernández Mendieta**

DIRECTOR

**Dr. Perfecto Malaquías Quintero Flores**

CODIRECTOR

**Mtro. Crisanto Tenopala Hernández**

APIZACO, TLAXCALA FEBRERO 2016



Apizaco, Tlax., 19 de Enero de 2016

No. OFICIO: DEPI/005/16

**ASUNTO:** Se Autoriza Impresión de Tesis de Grado.

**ING. DANIEL HERNANDEZ MENDIETA,**  
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO  
EN INGENIERÍA ADMINISTRATIVA  
No. de Control: **M13370015**  
P R E S E N T E.

Por este medio me permito informar a usted, que por aprobación de la Comisión Revisora asignada para valorar el trabajo, mediante la Opción: **I Tesis de Grado por Proyecto de Investigación**, de la **Maestría en Ingeniería Administrativa**, que presenta con el tema: **"Sistema Experto Difuso Aplicado al Diagnóstico de Fallas Industriales mediante el Conocimiento Experto obtenido de la Herramienta RCM"** y conforme a lo establecido en el Procedimiento para la Obtención del Grado de Maestría en el Instituto Tecnológico, la División de Estudios de Posgrado e Investigación a mi cargo le emite la:

#### AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Debiendo entregar un ejemplar del mismo debidamente encuadernado y seis copias en CD en formato PDF, para presentar su Acto de Recepción Profesional a la brevedad.

Sin otro particular por el momento, le envío un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

*PENSAR PARA SERVIR, SERVIR PARA TRIUNFAR®*

  
**M.A.D. MA. A. ACÉLA DAVILA JIMENEZ**  
**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS**  
**DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN.**



Secretaría de Educación Pública  
Instituto Tecnológico de Apizaco  
División de Estudios de Posgrado  
e Investigación

C.p.- Consecutivo.

MAADJ/mebr



Carretera Apizaco-Tehuacan Tepic, 15 km. Carretera Apizaco-Tehuacan 5.74  
Carretera Apizaco-Tehuacan, Tlaxiaco, Méx.  
CP 90300 Apizaco, Tlaxiaco, Méx. 01 341 41 7 26 10. Correo: [depi@itapizaco.mx](mailto:depi@itapizaco.mx)  
[www.itapizaco.edu.mx](http://www.itapizaco.edu.mx)



"2015. Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Apizaco, Tlax., 10 de Diciembre de 2015

ASUNTO: Aprobación del trabajo de Tesis de Maestría.

M.A.D. MA. A. ACELA DAVILA JIMENEZ  
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN.  
P R E S E N T E.

Por este medio se le informa a usted, que los integrantes de la **Comisión Revisora** para el trabajo de tesis de maestría que presenta el Ing. **DANIEL HERNANDEZ MENDIETA**, con número de control **M13370015** candidato al grado de **Maestro en Ingeniería Administrativa** y egresado del **Instituto Tecnológico de Apizaco**, cuyo tema es: "**Sistema Experto Difuso Aplicado al Diagnóstico de Fallas Industriales mediante el Conocimiento Experto obtenido de la Herramienta RCM**", fue:

**APROBADO**

Lo anterior, al valorar el trabajo profesional presentado por el candidato y constatar que las observaciones que con anterioridad se le marcaron así como correcciones sugeridas para su mejora ya han sido realizadas.

Por lo que se avala se continúe con los trámites pertinentes para su titulación.

Sin otro particular por el momento, le envió un cordial saludo.

LA COMISIÓN REVISORA

  
DR. P. MALAQUÍAS QUINTERO FLORES

  
M.C. CRISANTO TENOPALA HERNANDEZ

  
DR. JOSE FEDERICO CASCO VASQUEZ

  
DR. ALAN AUGUSTO GALLEGOS CUELLAR

C. p.- Interesado



## **DEDICATORIA**

**Principalmente a Dios por permitir culminar un reto más en mi vida profesional, regalándome salud y la compañía de las maravillosas personas que estuvieron a mi lado apoyándome y animándome a seguir adelante**

**A mi querida madre, gracias a la valiosa educación que me inculco desde pequeño a los valores y a las herramientas que me enseñó con las que he logrado enfrentar a la vida, este trabajo es un reto más concluido el cual dedico a ti**

**A mis dos pequeños tesoros Dany y Pau por quien lucho día a día para poder brindarles un mejor futuro y una mejor calidad de vida, ustedes son el combustible de mi motor para jamar darme por vencido**

**A mi comité tutorial principalmente a mi director Dr. Malaquías gracias por esos regaños y consejos sin ellos tal vez este proyecto no estaría desarrollado, gracias a CONACYT por el apoyo para estudiar mis estudios de posgrado**

**A la mujer más linda que la vida me presento Mari, gracias por todos esos ánimos, por creer en mí, por brindarme la confianza y ver en mi alguien que ni yo mismo creía que fuera, gracias a ti logre dar ese último paso que me estaba costando tanto, me enseñaste que la vida tiene mucho que dar solo es cuestión de aplicarnos para alcanzar los objetivos**

# INDICE

INDICE .....	VI
RESUMEN.....	XI
Abstract.....	XI
INTRODUCCION.....	XII
<b>1.0 CARACTERISTICAS DEL PROYECTO .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Antecedentes del problema.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Planteamiento del problema. ....</b>	<b>5</b>
<b>1.3 Justificación. ....</b>	<b>7</b>
<b>1.4 Objetivos. ....</b>	<b>7</b>
<b>1.4.1 Objetivo general. ....</b>	<b>7</b>
<b>1.4.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>7</b>
<b>1.5 Alcance. ....</b>	<b>8</b>
<b>1.6 Tipo de estudio o Investigación.....</b>	<b>8</b>
<b>1.7 Hipótesis.....</b>	<b>8</b>
<b>1.8 Limitaciones. ....</b>	<b>8</b>
<b>1.9 Técnicas e instrumentos de investigación.....</b>	<b>9</b>
<b>2.0 MARCO TEORICO .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Introducción. ....</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Inteligencia artificial. ....</b>	<b>11</b>
2.2.1 Sistemas Expertos.....	11
<b>2.2.2 Método heurístico. ....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.3 Método algorítmico .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.4 Organización de un sistema experto .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 Lógica difusa .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.2 Sistemas difusos .....</b>	<b>21</b>
<b>2.4 Mantenimiento.....</b>	<b>22</b>
<b>2.5 Metodología para una buena gestión del mantenimiento.....</b>	<b>25</b>
<b>2.6 Gestión del mantenimiento asistido por computadora. ....</b>	<b>27</b>
<b>3.0 MARCO REFERENCIAL FEMSA .....</b>	<b>35</b>

3.1	Introducción a FEMSA.....	36
3.2	Presencia global.....	37
3.3	Planta Apizaco.....	38
3.3.1	Estructura organizacional.....	38
3.3.2	Cultura organizacional.....	39
3.3.4	Política integral.....	41
3.3.5	Normativas de operación.....	42
3.3.6	Entorno.....	43
4.0	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>45</b>
4.1	Metodología empleada.....	45
4.2	Análisis y descripción del problema.....	46
4.3	Identificación de fuentes de información.....	46
4.4	Entrevista con expertos humanos y usuarios.....	46
4.5	Recopilación de información referente al problema.....	47
4.6	Organización y análisis de la información.....	49
4.6.1	Estudios de tiempos con técnicos de automatización y control.....	51
4.7	Arquitectura del sistema propuesto.....	52
4.8	Procedimiento de diagnóstico de fallos.....	53
4.8.1	Recopilación de información del problema.....	53
4.8.2	Identificación del sistema.....	54
4.8.3	Revisión de condiciones operativas.....	54
4.8.4	Aplicación VOSO.....	55
4.8.5	Análisis de la información.....	56
4.9	Desarrollo del sistema Difuso e implementación.....	56
5.0	<b>IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO.....</b>	<b>59</b>
5.1	Implementación equipo rechazador.....	59
5.1.1	Definición de variables lingüísticas.....	59
5.1.2	Creación de la base del conocimiento.....	62
5.2	Aplicación del modelo en Shell Fis Pro.....	63
6.0	<b>TRABAJO EXPERIMENTAL E INTERPRETACION DE RESULTADOS.....</b>	<b>71</b>
6.1	Evaluación del proyecto.....	71
7.0	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>78</b>

<b>7.1 Conclusiones</b> .....	78
<b>7.2 Recomendaciones</b> .....	79
<b>7.3 Trabajos futuros</b> .....	79
Referencias.....	80

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Minutos Perdidos por paro de equipo por líneas 2013.....	5
Figura 1.2 Puntos perdidos por paro de equipo en líneas 2013.....	6
Figura 2.1 Sistema Experto.....	12
Figura 2.2 Componentes de un Sistema Experto.....	14
Figura 3.1 Unidades de negocio FEMSA. ....	36
Figura 3.2 Porcentaje de distribución FEMSA.....	37
Figura 3.3 Presencia global .....	37
Figura 3.4 Planta Apizaco.....	38
Figura. 3.5 Organigrama estructural Planta Apizaco. ....	39
Figura 3.6 Ubicación planta Apizaco. ....	43
Figura 4.1 Metodología del sistema.....	45
Figura 4.2 Estado de diagramas en equipos.....	48
Figura 4.3 Porcentaje de paros mayores y menores a 20 minutos.....	49
Figura 4.4 Minutos de paro por líneas.....	50
Figura 4.5 Tiempo total de falla desglosado.....	51
Figura 4.6 Arquitectura del sistema.....	52
Figura 4.7 Estructura general del sistema difuso.....	57
Figura 5.1. Relaciones de fallas y causas.....	59
Figura 5.2 Expresión gráfica de variable lingüística.....	61
Figura 5.3 Estructura general de la base del conocimiento.....	62
Figura 5.4. Aplicación de Mamdani a reglas difusas. ....	63
Figura 5.5.Modelo aplicado en Fis-Pro. ....	64
Figura 5.6 Conjuntos difusos de la variable Altura Cabezal.....	64

<b>Figura 5.7 Conjuntos difusos de la variable Cuentas .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 5.8 Conjuntos difusos de la variable Obtudador.....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 5.9 Reglas evaluadas en Fis Pro.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 5.10 Inferencia de reglas implementadas en Fis-Pro primer Sistema Experto.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 5.11 Conjuntos difusos de las variables del sistema Rechazo Desfasado.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 5.12 Reglas evaluadas en Fis Pro del segundo Sistema Experto.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 5.13 Inferencia de reglas implementadas en Fis-Pro Segundo Sistema Experto.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 5.14 Conjuntos difusos de las variables del sistema Rechazo Tapa.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 5.15 Reglas evaluadas en Fis Pro del tercer Sistema Experto.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 5.16 Inferencia de reglas implementadas en Fis-Pro tercer Sistema Experto.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 6.1. Reglas difusas de Sistema Unión.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 6.2. Reglas difusas implementadas en Fis-Pro.....</b>	<b>75</b>

## **RESUMEN**

En este trabajo de tesis se presentan los resultados del modelado y aplicación de un Sistema Experto Difuso en la toma de decisiones del mantenimiento correctivo, además se propone una metodología para la búsquedas de fallas basada en la herramienta VOSO, La metodología se divide en dos partes la primer parte se basa en la sistematización de la búsqueda de las fallas y la segunda se basa en la extracción del conocimiento del personal experto y la conversión a variables lingüísticas para poder ser analizadas por un sistema difuso tipo Mamdani, en el estudio del caso se analiza un sistema rechazador de la industria embotelladora de bebidas. Se busca que el sistema pueda dar un diagnóstico de la falla de acuerdo a la información extraída de los expertos para así lograr una decisión correcta al aplicar el mantenimiento correctivo y así evitar pérdidas de tiempo que para la industria representa pérdidas económicas. El Sistema Experto Difuso se prueba mediante la Shell Fis-Pro en donde los resultados obtenidos son bastante favorables.

## **Abstract**

In this thesis the results of the modeling and implementation of a Fuzzy Expert System in decision making of corrective maintenance are presented, plus a methodology for searches based tool failures VOSO proposed methodology is divided into two parts The first part is based on the systematic search for faults and the second is based on the extraction of knowledge from experienced staff and the conversion to linguistic variables to be analyzed by a Mamdani type fuzzy system, the study of the case rejector system analyzes a beverage bottling. It is intended that the system can make a diagnosis of the fault according to the information from experts in order to achieve proper to apply corrective maintenance decision and avoid losses while industry accounts for economic losses. Fuzzy Expert System is tested by Fis-Pro Shell where the results are quite favorable.

## INTRODUCCION

Los métodos usados para fijar la política de mantenimiento son insuficientes, por sí mismos, para asegurar la mejora continua en mantenimiento. Será la experiencia quién nos mostrará desviaciones respecto a los resultados previstos. Por tal motivo se impone establecer una estrategia que, además de corregir las citadas desviaciones, asegure que todos los involucrados en el proceso de mantenimiento se impliquen en la mejora continua del mismo.

En el mercado competitivo actual la gestión del mantenimiento juega cada vez más, un papel importante en la lucha contra la competencia al reducir tiempo de inactividad de equipos. El mantenimiento es el conjunto de actividades que se realizan en un sistema para mantenerlo en condiciones operativas. Los problemas son la reducción de la disponibilidad y el tiempo de inactividad no programado debido a las averías imprevistas (Ranganath 2007).

Las averías se definen como la salida de rango de valores aceptables de una variable o parámetro observada o calculada asociado con el equipo. Criticar el diagnóstico se conoce como el reconocimiento de la operación anormal del equipo (Burak Ozyurt, 1996), dichas averías tienen un costo económico muy elevado para la industria, las aplicaciones de software avanzadas basadas en los sistemas expertos tienen el potencial de ayudar a los ingenieros en la vigilancia, detección y diagnóstico de las condiciones anormales (Cen Nan 2008), por tanto proporcionar información para la toma de decisiones ante estas condiciones de proceso inesperadas.

## **CAPITULO 1**

# **CARACTERISTICAS DEL PROYECTO**

## **1.0 CARACTERISTICAS DEL PROYECTO**

### **1.1 Antecedentes del problema.**

El mantenimiento tiene como objetivo: asegurar la competitividad de la empresa por medio de esfuerzos, acciones y decisiones porque debe mantener la disponibilidad y confiabilidad de las funciones deseadas, el cumplimiento de los requisitos del sistema de calidad de la empresa, el cumplimiento con todas las normas de seguridad y medio ambiente y el máximo beneficio global.

Esto significa que para ser competitivos, además de los factores clave que son la calidad, la productividad, la seguridad y el medio ambiente, existe otro que es la confiabilidad, que garantiza que los demás factores continuarán con un desempeño adecuado (Jaramillo, 2010).

Para maximizar la funcionalidad operativa de cualquier sistema o la efectividad de cualquier misión, es necesario que las fallas sean detectadas tan pronto como sea posible. La capacidad para diagnosticar un fallo cuando se presenta es el primer paso para minimizar el tiempo de interrupción (L.M. Bartlett, 2009).

La forma de solucionar los problemas muchas veces se basa en el conocimiento experto pero para lograr transformar la experiencia en conocimiento, al igual que para cualquier propósito estricto de producción de conocimientos se requiere trabajar con un método; es decir, con una herramienta que nos ayude a hacer mejor las cosas y que nos permita llegar más fácilmente al resultado que buscamos (Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y la Alimentación, 2004).

En la actualidad, y debido a la alta competitividad de los mercados, se hace fundamental implementar una adecuada función de Gestión de Mantenimiento, la cual consiste en rebajar el trabajo correctivo hasta el nivel óptimo de rentabilidad para la empresa e implementar de manera eficiente un plan de trabajo preventivo.

Debido a que el mantenimiento correctivo no se puede eliminar en su totalidad, una adecuada gestión y sistematización de los procedimientos obtendrá conclusiones de cada detención de equipos y/o maquinarias e intentará realizar la reparación de manera definitiva, ya sea en el mismo momento o programando una detención, de modo de evaluar la falla y definir los pasos a seguir para que ésta no se repita (Maldonado, 2010).

La gestión de mantenimiento ha evolucionado en forma dinámica y permanente. Hacer mantenimiento implica estar acorde con nuevos desarrollos tecnológicos, nuevos retos para los sectores industrial, comercial, servicios y agrario. Estos retos están asociados con la necesidad de optimizar la eficiencia y eficacia en la producción de bienes y/o en la prestación de los servicios, el mejoramiento de la calidad y la integridad de las personas y su ambiente.

Por eso, la gestión de mantenimiento exige al personal que labora en el área, no sólo conocer las técnicas y aprenderlas, sino también identificarlas para decidir cuáles son útiles en consideración a las necesidades específicas de la empresa y a sus características particulares. La elección adecuada permitirá mejoras en la práctica del mantenimiento y la optimización de costos. Si por el contrario, la elección de la técnica no corresponde a las necesidades y problemas determinados, se contribuirá a agudizar las dificultades (Jaramillo, 2010).

Hoy en día, las tendencias en la industria de procesos son hacia aumento de la complejidad y la automatización. Estas tendencias dan a luz a las necesidades de fiabilidad en línea de los sistemas de diagnóstico, que eliminarán o reducir la dependencia del operador humano en el tiempo real, para la detección de fallas.

El fallo se define como la salida de rango de valores aceptables de una variable o parámetro observada o calculada asociado con el equipo. Criticar el diagnóstico se conoce como el reconocimiento de la operación anormal del equipo (Burak Ozyurt, 1996).

La evaluación cuantitativa de riesgos es particularmente difícil de saber en ámbitos en los que los eventos no deseados son extremadamente raros, y la causal

son factores difíciles de cuantificar y no relacionados linealmente (Hadjimichael, 2009).

La metodología del conocimiento experto sistematiza la obtención y la encapsulación de la experiencia humana en un modelo de riesgo, y establece un entorno natural para la representación de ese conocimiento en un sistema experto, y automatiza el proceso de evaluación de riesgos (Hadjimichael, 2009).

Si el comportamiento de los componentes del sistema se considera como mecanismo de diagnóstico de fallas de forma apropiada se puede utilizar para detectar esta actividad defectuosa. En consecuencia, el desarrollo de métodos fiables de detección de fallos y aislamiento se ha convertido en un importante campo de investigación en el control ingeniería (Mendonca, 2005) .

El método de diagnóstico de fallas comenzó a principios de 1970 y está recibiendo cada vez más atención en las dos últimas décadas (Dash, 2004). Los intereses crecientes se aplican para dos aplicaciones principales, la aplicación académica e industrial debido a asuntos relacionados con la seguridad, Y la detección y el diagnóstico de fallos en los sistemas de proceso es de gran importancia. La detección de fallas ayudan a evitar incidentes, alteraciones en el proceso, deterioro del producto, la degradación del rendimiento, mayor daño a la propia maquinaria y daños a la salud humana o incluso la pérdida de vidas (Wolfram, 2001).

En este trabajo se enfocara la aplicación a la detección de fallas basado en el procesamiento del conocimiento del personal experto que interactúa con la maquinaria analizada.

## 1.2 Planteamiento del problema.

El diagnóstico de fallas en la maquinaria industrial representa tiempo perdido para la industria, la duración de este tiempo dependerá de la habilidad del técnico, su experiencia y conocimientos referentes a la máquina.

En el estudio del caso (Coca Cola FEMSA planta Apizaco) durante el año 2013, se tuvieron un total de 201400 minutos perdidos por paro de equipo repartidos en las diferentes líneas, como se muestra en la figura 2.1 en donde se muestra que la línea de mayor área de oportunidad es línea 4..

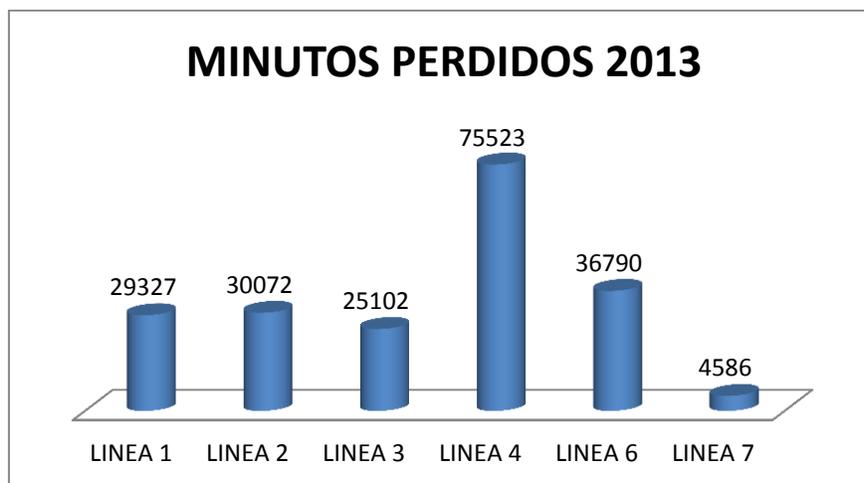


Figura 1.1 Minutos Perdidos por paro de equipo por líneas 2013

Los minutos perdidos por paro de equipo se reflejan directamente en puntos de eficiencia perdidos en las líneas de producción e impacta directamente en la eficiencia de la planta, de forma general los puntos de eficiencia perdidos para el año 2013 por paro de equipo se muestran en la figura 2.2.

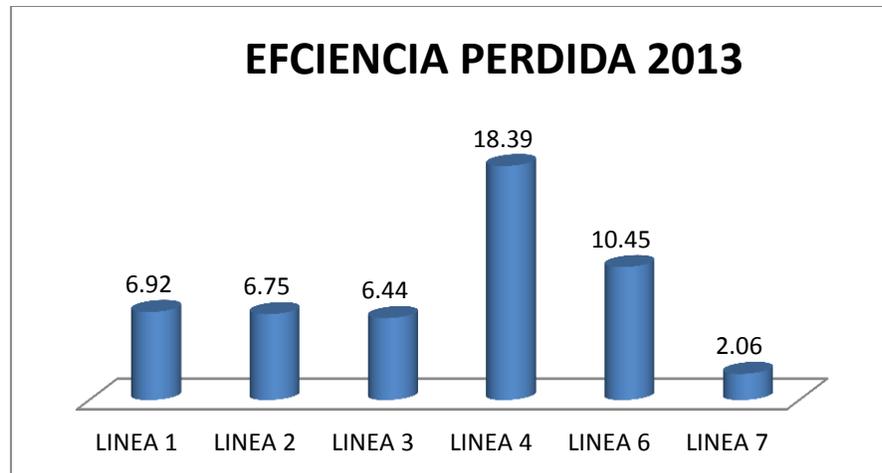


Figura 1.2 Puntos perdidos por paro de equipo en líneas 2013

El diagnóstico de la falla es la actividad que más tiempo requiere, ya sea por falla funcional del equipo o por errores operativos, una vez diagnosticado el problema la solución es más rápida.

La velocidad del diagnóstico depende de la persona que atienda la falla, una persona con mayor conocimiento será más eficiente que una con menor conocimiento o experiencia, este problema radica en que no está sistematizado el proceso de solución de averías en fallas correctivas, entonces existe la necesidad de sistematiza la búsqueda de soluciones basada en procedimientos y la aplicación de un sistema computacional como lo son los sistemas expertos difusos.

Al utilizar un sistema computacional se recopilara la información del personal experto volcándolo sobre una base de datos la cual alimentara a un sistema experto difuso de manera que al presentarse alguna falla el sistema arrojará posibles soluciones al problema disminuyendo así el tiempo de diagnóstico por parte del personal no experto.

### **1.3 Justificación.**

La reducción del tiempo de diagnóstico y solución de fallas es de gran importancia para la industria debido a los costos que se generan tanto en eficiencia de la productividad, calidad del producto y mano de obra parada, es por ello la importancia de un sistema computacional para atacar la problemática disminuyendo el tiempo de diagnóstico de las fallas mediante la inferencia de las reglas de la base del conocimiento del sistema.

### **1.4 Objetivos.**

#### **1.4.1 Objetivo general.**

Desarrollar un sistema computacional (Sistema Experto Difuso) y un procedimiento de diagnóstico de fallas que ayuden a minimizar el tiempo de diagnóstico de fallas para la reducción de puntos perdidos por paro de equipo y aumento a la eficiencia de producción en la industria refresquera (estudio de caso).

#### **1.4.2 Objetivos específicos.**

- Proponer una sistematización al proceso del diagnóstico de fallas en el mantenimiento correctivo
- Extraer el conocimiento experto, analizarlo y convertirlo a variables lingüísticas.
- Realizar el modelado del Sistema Experto Difuso, mediante el sistema tipo Mamdani y de forma escalonada.
- Aplicar el modelo en un inspector de botellas en la empresa para validar su funcionalidad y certeza ante el diagnóstico de las fallas.

### **1.5 Alcance.**

El alcance incluye un procedimiento para el diagnóstico de fallas y el modelado del Sistema Experto Difuso aplicado a un equipo de la industria embotelladora de bebidas.

### **1.6 Tipo de estudio o Investigación.**

El tipo de estudio es de campo, Descriptiva-Exploratoria-Explicativa. (Fernandez, 2008).

### **1.7 Hipótesis**

El desarrollo de un procedimiento para el diagnóstico de fallas y el modelado de una Sistema Expertos Difusos permitirá reducir el tiempo de diagnóstico y solución de fallas correctivas en maquinaria de la industria refresquera (estudio de caso), lo que aumentara la efectividad del mantenimiento.

### **1.8 Limitaciones.**

En todo proyecto existen problemas que tratan de impedir su realización dentro de los cuales se citan los que se tuvieron.

- Información de calidad. Es un factor muy importante para la efectividad del sistema y la aplicación del procedimiento, ya que en muchas máquinas no existe personal experto ni un análisis centrado en confiabilidad RCM (por sus siglas en ingles *Reliability Centered Maintenance*) lo cual limita la creación de un Sistema Experto Difuso
- Creación de una aplicación propia. Solo se llega hasta el modelado ya que no se cuenta con la habilidad en la programación para la creación de una aplicación propia del sistema que pudiese usar dentro de la empresa sin tener problemas de licencia del software.

- Credibilidad. Cuando se crea algo nuevo el cliente directo no confía plenamente en la efectividad del sistema lo que afecta en la interacción para su desarrollo y aplicación.

### **1.9 Técnicas e instrumentos de investigación.**

- Se utilizara la aplicación administrativa SAP para realizar el histórico de fallos y tiempos de corrección de la falla.
- Se utilizaran los resultados de la metodología RCM para obtener conocimientos acerca del funcionamiento y fallas de los equipos.
- Se realizara un estudio de tiempos y movimientos para verificar el método actual de solución de fallas.
- Se usara el software Fis-pro para verificar la funcionalidad del modelo difuso creado.

## **CAPITULO 2**

### **MARCO TEORICO**

## **2.0 MARCO TEORICO**

### **2.1 Introducción.**

Los métodos de diagnóstico de fallas comenzaron a principios de los 70's y ha estado recibiendo cada vez más atención en las últimas dos décadas, la detección y diagnóstico de fallas en sistemas de proceso es de gran importancia, una detección temprana de falla podrá evitar sorpresas, incidentes, deterioro de un producto o daños importantes a la propia maquinaria y daños a la salud humana (Wolfram et al., 2001).

Para maximizar la funcionalidad operativa de cualquier sistema o la efectividad de cualquier misión, es necesario que las fallas sean detectadas tan pronto como sea posible. La capacidad para diagnosticar un fallo cuando se presenta es el primer paso para minimizar el tiempo de interrupción (L.M. Bartlett, 2009).

Los problemas cuya solución depende de reglas empíricas asimiladas por un experto a lo largo de su experiencia son bastante comunes en la tecnología, tanto a lo que se refiere a los procesos de análisis de diseño y de fabricación como en lo relacionado con la gestión planeación y toma de decisiones (Rosano 2003). El diagnóstico de fallos basado en el conocimiento se realiza en base a la evaluación y monitoreo de datos de acuerdo a un conjunto de reglas que el experto humano ha aprendido mediante su experiencia. En este trabajo se propone un método de diagnóstico de fallos basado en el conocimiento de los expertos y operadores, dicho método se modela mediante un Sistema Experto Difuso (S E D) y es aplicado en la toma de decisiones en el mantenimiento correctivo.

### **2.2 Inteligencia artificial.**

#### **2.2.1 Sistemas Expertos**

Uno de los proyectos clásicos de la Inteligencia Artificial ha sido la simulación del razonamiento humano representado con la figura 2.1 con el fin de dotar a una máquina, un ordenador o un robot, con dicha cualidad. En el ser humano un

razonamiento es el resultado de una fase de percepción a la que sigue una fase de comprensión del problema o situación, concluyendo con una fase en la que la persona toma una decisión. La simulación o síntesis artificial del mecanismo de razonar requiere de una fase previa de análisis en la que adoptemos un modelo acerca de cómo se aborda un proceso de esta naturaleza en el ser humano. En este sentido, adoptaremos el enfoque conductista característico en Inteligencia Artificial sustituyendo la pregunta: ¿Qué es un razonamiento? por: ¿Cómo razonamos?, diseñando a partir de la respuesta el correspondiente modelo. Los programas que simulan el razonamiento humano se conocen con el nombre de sistemas expertos, siendo uno de los productos de más éxito de la Inteligencia Artificial.

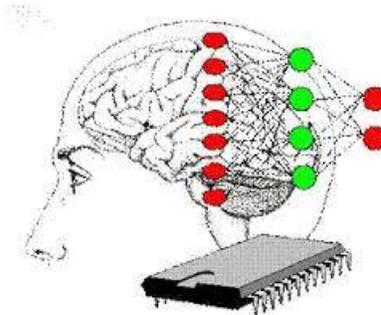


Figura 2.1 Sistema Experto

Los sistemas expertos encuentran su ámbito natural de aplicación en aquellas situaciones o problemas para los que no es posible obtener por métodos convencionales una solución estándar o algoritmo. El diagnóstico médico, la determinación taxonómica de una especie o la clasificación de un individuo problema, ya sea una planta, animal o microorganismo, la gestión medioambiental de un cierto recurso natural, el control de plagas, el seguimiento o monitorización del funcionamiento de equipos e instalaciones como centrales nucleares, depuradoras y piscifactorías ilustran situaciones en las que las soluciones no pueden ser encontradas de forma algorítmica. La estrategia adoptada en estos casos consiste en simular el mecanismo de razonamiento que seguiría un experto humano ante las situaciones anteriores, recurriendo a lo que se conoce como método heurístico (Lahoz 2004).

### **2.2.2 Método heurístico.**

El método heurístico consiste en aplicar los mecanismos que subyacen en el razonamiento, y que conducen a un experto humano a un cierto resultado o conclusión. En un algoritmo el conocimiento es completo, no encontrándose fragmentado. Por el contrario, en el método heurístico el conocimiento se encuentra fragmentado en módulos, aunque relacionados entre sí. En un problema de diagnóstico, ya sea médico o sobre la avería que presenta un vehículo, el experto humano solamente requerirá una parte de los datos, en particular los relativos a la parte del cuerpo o del vehículo afectadas, llegando tras el razonamiento pertinente a un determinado resultado o conclusión. En consecuencia, tanto en el método algorítmico como heurístico el experto humano necesitará que describamos el problema, sin embargo en el método heurístico bastará con su descripción parcial, cuáles son los síntomas que presenta la parte del cuerpo o del vehículo afectados, no siendo necesaria una descripción completa y en la que detallásemos el estado de otras partes de nuestro cuerpo o del vehículo como sería pertinente en el método algorítmico.

### **2.2.3 Método algorítmico**

Una vez que un programa ha concluido su tarea, no es posible retener el camino o ruta seguido durante su ejecución: cuando en el diagrama de flujo de un programa hay ramas procedentes de distintas expresiones condicionales que conducen a una misma subrutina, una vez alcanzada la subrutina, ¿cuál de las ramas ha conducido el flujo de datos hacia dicha subrutina? Por el contrario, en el método heurístico siempre se conserva la ruta que ha seguido un cierto razonamiento y que conduce a un cierto resultado o conclusión: si preguntamos a un médico cómo ha deducido la enfermedad que padecemos a partir de los síntomas que presentamos, el médico será capaz de detallarnos el camino que ha seguido durante el razonamiento, es decir durante el proceso de diagnóstico.

El método algorítmico sólo requiere datos, como los valores de X e Y para efectuar su suma, mientras que en el método heurístico se tiene en cuenta tanto los datos como el contexto en el que estos se presentan. No es lo mismo presentar ciertos síntomas en condiciones de estrés que en condiciones normales. Establecidas las diferencias entre ambos métodos, estaremos en condiciones de definir con mayor precisión qué es un sistema experto (Lahoz 2004).

#### 2.2.4 Organización de un sistema experto

Un sistema experto está constituido por distintos componentes, relacionados entre sí de acuerdo con el esquema representado en la figura 2.2. El motor de inferencia es el elemento principal, siendo el componente encargado de la simulación del razonamiento. Por consiguiente, es el elemento que obtiene un resultado o conclusión a partir de un proceso de deducción en el que se tiene en cuenta la información suministrada por el usuario y la información almacenada en la base de conocimiento, otro de los componentes característicos de un sistema experto. El usuario accede y establece comunicación, es decir un diálogo, con el sistema experto a través del interface de usuario, ya sea con la ayuda de un sistema de menús o cualquier otro sistema de petición y adquisición de datos.

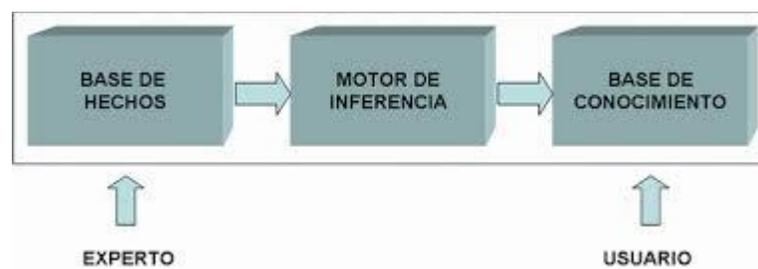


Figura 2.2 Componentes de un Sistema Experto

En el caso más sencillo la información suministrada por el usuario son respuestas elementales, sí o no, a las preguntas formuladas por el sistema, denominándose a la información que el usuario proporciona como conocimiento

concreto. La base de conocimiento es la parte del sistema experto que alberga la información procedente del conocimiento de uno o más expertos humanos.

La información almacenada en la base de conocimiento recibe el nombre de conocimiento abstracto, estando organizada, estructurada, según unas ciertas normas de estilo, conteniendo los hechos y relaciones más significativos sobre un tema en particular. Un error frecuente es la confusión entre base de conocimiento y base de datos, siendo dos conceptos distintos en su definición y ámbito de aplicación. El sistema experto se completa con un cuarto elemento denominado base de hechos, y que tiene por función el almacenamiento de la ruta, traza o camino seguido por el motor de inferencia en la simulación del razonamiento. Recuérdese que una de las características del método heurístico es precisamente la función desempeñada por la base de hechos. En un sistema experto la base de hechos suele consistir en un archivo al que el usuario accede una vez concluida la consulta.

Los sistemas expertos presentan varias ventajas desde el punto de vista de su utilización. En primer lugar, su organización en componentes permite incorporar nueva información o corregir la existente, simplemente editando la base de conocimiento y modificando su contenido. Esto implica que en la práctica no sea necesario acceder y programar de nuevo ningún otro de sus componentes, dotando a los sistemas expertos de gran flexibilidad, especialmente en la gestión y actualización del conocimiento abstracto.

En segundo lugar, un sistema experto es capaz de explicar su razonamiento, una de las características más importantes del método heurístico, sin más que acceder tras la consulta a la base de hechos. Más aún, la ruta seguida por el motor de inferencia durante el razonamiento expresa cómo se comporta el sistema experto durante la simulación del razonamiento.

En tercer, y último lugar, el mecanismo de deducción utilizado por el motor de inferencia, y con el que es, simulado un razonamiento, es aplicable a distintas bases

de conocimiento independientemente de su contenido. Esto significa que un cierto motor de inferencia puede ser aplicado a un problema de diagnóstico médico, en el diagnóstico de averías mecánicas, en la determinación taxonómica de una especie animal o vegetal o para la consulta de decisiones financieras, sencillamente cambiando en cada caso la base de conocimiento.

### **2.2.5 Diseño y desarrollo de un sistema experto**

El desarrollo de un sistema experto es un proceso que requiere tiempo y dedicación, así como coordinación y equipo de trabajo

#### **1) Reunión de expertos**

En primer lugar se debe reunir a un grupo de expertos o especialistas conocedores del tema para el que se desea desarrollar el sistema experto. Un problema no trivial es el número de expertos, es decir el tamaño del grupo de especialistas.

Una vez formado el grupo de expertos, estos deberán resolver uno de los problemas más importantes en el desarrollo de un sistema experto. Los expertos dedicarán el tiempo necesario para reunirse y organizar sus conocimientos sobre la materia que versará el sistema experto.

Una vez resuelta la formación del grupo de expertos, y organizados los conocimientos de su especialidad, los conocimientos destinados al sistema experto, es decir la información que más tarde constituirá la base de conocimiento, deberá ser representada por medio de alguna de las técnicas disponibles de representación del conocimiento.

#### **2) Métodos de representación del conocimiento**

Las técnicas de representación del conocimiento tienen por finalidad el modelado del esquema por el que un experto humano relaciona un conjunto de

observaciones y experiencia con un resultado o conclusión. Establecido el esquema el experto en cuestión seguirá un cierto mecanismo de razonamiento que le conducirá a un resultado, y en función del cual el experto adoptará una cierta decisión sobre cómo actuar sobre el problema inicialmente planteado.

### **3) Redes semánticas**

Las redes semánticas fueron introducidas por Quilliam (1968) como un método declarativo de representación del conocimiento en el que un grafo representa visualmente el conocimiento. La red se encuentra formada por nodos que representan objetos, sucesos o características, estando conectados entre sí por arcos o enlaces que representan las relaciones entre los nodos y por tanto entre los objetos. Los objetos y enlaces de una red semántica se encuentran etiquetados, los objetos por un nombre o sustantivo y los enlaces por un verbo. Sin embargo, aunque la representación visual del conocimiento es una de las características más llamativas de este método de representación, el método fue recibido inicialmente con críticas debido a la libertad con la que nodos, arcos y etiquetas pueden ser utilizados durante el diseño de las redes.

Una vez que ha sido diseñada una red semántica, la red es traducida por medio de un programa traductor, como un compilador, a un formato de texto en el que la red es representada en un cierto lenguaje declarativo y que será el formato en que se incorporará a la base de conocimiento de un sistema experto.

### **4) Árbol de decisión**

Los árboles de decisión constituyen una de las técnicas más populares de representación del conocimiento utilizándose en aquellas situaciones en las que para una cierta pregunta hay únicamente dos posibles respuestas, sí o no, verdadero o falso. Un árbol de decisión es un grafo arborescente binario en cuyos nodos se formula una pregunta relativa a alguna cualidad o hecho observable, y en función de que la respuesta sea sí/verdadero o no/falso el flujo se desviará por una u otra de las

ramas. Su estructura es similar a las claves dicotómicas empleadas por los zoólogos, botánicos y microbiólogos en la clasificación de animales, plantas y microorganismos. Las claves dicotómicas fueron introducidas en Botánica por Lamarck determinando la especie de una planta a partir de la verificación de la presencia o no de caracteres, presentados en forma de proposiciones contradictorias.

### **5) Reglas de producción**

Es uno de los métodos declarativos de representación del conocimiento más utilizado en el diseño de la base de conocimiento de un sistema experto. Las reglas de producción son expresiones lógicas que describen el conocimiento de acuerdo con la lógica preposicional:

IF {expresión lógica 1} THEN {expresión lógica 2}

Donde la «expresión lógica 1» recibe el nombre de premisa y la «expresión lógica 2» el nombre de conclusión. En una premisa simple un cierto objeto recibe un valor el cual representa alguna cualidad presente en el objeto. Las premisas pueden ser complejas, estando constituidas por dos o más premisas simples relacionadas entre sí con los operadores booleanos AND, OR, XOR y NOT.

### **6) Diseño y construcción de la base de conocimiento**

En segundo lugar, una vez que los expertos se han reunido y el conocimiento ha sido representado aplicando una o varias de las técnicas se desarrolla la base de conocimiento.

La base de conocimiento almacena el conocimiento organizado y representado de forma declarativa, utilizándose para tal un lenguaje de representación. Una vez que se haya representado el conocimiento por alguno de los métodos descritos, traducida a un cierto lenguaje de representación creándose para tal un archivo en formato de texto.

El lenguaje de representación es el instrumento con el que se expresa el conocimiento de acuerdo con ciertos operadores y órdenes, debiendo ajustarse a ciertas reglas sintácticas que dependerán y deberán ser entendibles por el motor de inferencia.

## **7) Elección del motor de inferencia**

En tercer, y último lugar, la elección del motor de inferencia es uno de los aspectos más delicados en el desarrollo de un sistema experto, ya que el resto dependen del mecanismo de deducción, estrategia de razonamiento o principio con el que el motor de inferencia simula un razonamiento. Puesto que unos motores difieren de otros en el mecanismo de deducción, esto significa que unos serán más eficaces o mostrarán mayor destreza que otros durante su utilización en determinados casos prácticos.

Uno de los mecanismos deductivos más elementales es el denominado razonamiento cierto. En un razonamiento de esta clase el motor de inferencia de un sistema experto elegirá en cada etapa de un razonamiento una determinada regla de entre un conjunto de reglas, analizando una vez que se haya llegado a un cierto resultado o conclusión. Hay sistemas expertos en los que el motor de inferencia devuelve asociado al resultado un valor de probabilidad, o en el caso de MYCIN, orientado al diagnóstico médico, un coeficiente de verosimilitud comprendido entre dos valores extremos, siendo el resultado más falso o más verdadero cuanto más se aproxime el coeficiente a -1 o a 1, respectivamente.

Algunos sistemas expertos incluyen un motor de inferencia en el que el mecanismo de deducción utiliza una estrategia a la que se denomina como razonamiento no monótono. La estrategia consiste en simular un razonamiento a partir de la eliminación progresiva de los hechos almacenados en la base de hechos, evaluándose tras su eliminación si el motor de inferencia llega a un resultado o conclusión contradictorios (Martin del Brio, 2002).

## **2.3 Lógica difusa**

La denominada lógica difusa (fuzzy logic) permite tratar información imprecisa, como estatura media, temperatura baja o mucha fuerza, en términos de conjuntos borrosos o difusos (imprecisos, en definitiva). Estos conjuntos difusos se combinan en reglas para definir acciones, como por ejemplo, Si la temperatura es alta entonces enfría mucho. De esta manera, los sistemas de control basados en lógica difusa combinan unas variables de entrada (definidas en términos de conjuntos difusos), por medio de grupos de reglas que producen uno o varios valores de salida.

Los sistemas difusos permiten modelar cualquier proceso no lineal, y aprender de los datos haciendo uso de determinados algoritmos de aprendizaje (a veces tomados de otros campos, como las propias redes neuronales o los algoritmos genéticos). No obstante, a diferencia de los sistemas neuronales, los basados en lógica difusa permiten utilizar fácilmente el conocimiento de los expertos en un tema, bien directamente, bien como punto de partida para una optimización automática, al formalizar el conocimiento a veces ambiguo de un experto (o el sentido común) de una forma realizable.

Además, gracias a la simplicidad de los cálculos necesarios (sumas y comparaciones, fundamentalmente), normalmente pueden realizarse en sistemas baratos y rápidos.

### **2.3.1 Introducción al control difuso.**

Los sistemas expertos de control difuso basados en reglas, conocidos como son sin duda la aplicación más extendida de la lógica difusa.

Las operaciones más importantes de la lógica difusa son:

- Complemento.
- Unión.
- Intersección.

Es importante resaltar que el funcionamiento de estas operaciones básicas coincide con el de las correspondientes a las de la teoría clásica de conjuntos de hecho, la teoría de conjuntos borrosos se reduce a la teoría clásica si reducimos la incertidumbre a 0, y admitimos sólo los valores 0 y 1 para las funciones de pertenencia a un conjunto (0, no pertenece; 1, pertenece). Es decir, la teoría clásica de conjuntos puede considerarse un caso particular de la teoría difusa. Operaciones difusas.

A los subconjuntos borrosos se les puede aplicar determinados operadores, o bien pueden realizarse operaciones entre ellos. Al aplicar un operador sobre un solo conjunto difuso se obtiene otro conjunto difuso; de la misma manera al combinar dos o más subconjuntos mediante alguna operación, se obtendrá otro conjunto.

Sean los subconjuntos difusos identificados por las etiquetas A y B, asociados a una variable lingüística x, para ellos pueden definirse tres operaciones básicas: complemento, unión e intersección. Estas operaciones básicas pueden expresarse de la siguiente manera en términos de las funciones de pertenencia de los conjuntos borrosos A y B (que coinciden con las operaciones del mismo nombre que se definen habitualmente para los conjuntos clásicos)

### **2.3.2 Sistemas difusos**

**A) Fusificación.** Tiene como objetivo convertir valores Crisp o valores reales en valores difusos. En la Fusificación se asignan grados de pertenencia a cada una de las variables de entrada con relación a los conjuntos difusos previamente definidos utilizando las funciones de pertenencia asociadas a los conjuntos difusos.

**B) Desdifusificación.** Después de la inferencia tendremos una conclusión difusa, una variable lingüística cuyos valores han sido asignados por grados de pertenencia, sin embargo usualmente se necesita un escalar que corresponda a estos grados de pertenencia, ha este proceso se le llama

desdifusificación, para realizar esta operación se utilizan diferentes métodos matemáticos simples como:

- Método del centroide
- Método promedio máximo
- Método del promedio ponderado
- Método de membresía del medio del máximo

En la ecuación 3.1 se muestra el cálculo del Método del promedio máximo.

$$\text{Método promedio máximo} = \frac{x \max_1 + x \max_2}{2} \quad (3.1)$$

En la ecuación 3.2 se muestra el cálculo del método de promedios ponderados.

$$= \sum_{i=1}^n \frac{(x \max_i (\mu(x \max_i)))}{\sum \mu(x \max_i)}$$

Donde (3.2)

- n= número de máximos
- $x \max_i$  = Valor de x del máximo
- $\mu(x \max_i)$  = Valor de pertenencia del máximo

## 2.4 Mantenimiento.

Se entiende por Mantenimiento a la función empresarial a la que se encomienda el control del estado de las instalaciones de todo tipo, tanto las productivas como las auxiliares y de servicios. En ese sentido se puede decir que el mantenimiento es el conjunto de acciones necesarias para conservar ó restablecer un sistema en un estado que permita garantizar su funcionamiento a un coste mínimo. Conforme con la anterior definición se deducen distintas actividades:

- Prevenir y/o corregir averías.
- Cuantificar y/o evaluar el estado de las instalaciones.
- Aspecto económico (costes).

En los años 70, en Gran Bretaña nació una nueva tecnología, la Terotecnología (del griego conservar, cuidar) cuyo ámbito es más amplio que la simple conservación: "La Terotecnología es el conjunto de prácticas de Gestión, financieras y técnicas aplicadas a los activos físicos para reducir el "coste del ciclo de vida".

El concepto anterior implica especificar una disponibilidad de los diferentes equipos para un tiempo igualmente especificado. Todo ello nos lleva a la idea de que el mantenimiento empieza en el proyecto de la máquina. En efecto, para poder llevar a cabo el mantenimiento de manera adecuada es imprescindible empezar a actuar en la especificación técnica (normas, tolerancias, planos y demás documentación técnica a aportar por el suministrador) y seguir con su recepción, instalación y puesta en marcha; estas actividades cuando son realizadas con la participación del personal de mantenimiento deben servir para establecer y documentar el estado de referencia. A ese estado nos referimos durante la vida de la máquina cada vez que hagamos evaluaciones de su rendimiento, funcionalidades y demás prestaciones (Mantenimiento industrial)

Son misiones de mantenimiento:

- la vigilancia permanente y/ó periódica.
- las acciones preventivas.
- las acciones correctivas (reparaciones).
- el reemplazamiento de maquinaria.

Los objetivos implícitos son:

- Aumentar la disponibilidad de los equipos hasta el nivel preciso.
- Reducir los costes al mínimo compatible con el nivel de disponibilidad necesario.
- Mejorar la fiabilidad de máquinas e instalaciones.
- Asistencia al departamento de ingeniería en los nuevos proyectos para facilitar la mantenibilidad de las nuevas instalaciones.

## ¿Cuándo hacer Mantenimiento?

Esta pregunta está relacionada con el nivel mínimo de las propiedades cualitativas de cada elemento, nivel máximo de las propiedades cualitativas que deban elevarse, tiempo de uso o de funcionamiento durante el cual las propiedades cualitativas bajan del nivel alto al bajo y modo en el que los elementos están metidos a tensión, que causan pérdida de las propiedades cualitativas o de la capacidad de los elementos para resistirlas. Resumiendo, la cantidad de mantenimiento está relacionado con el uso de los equipos en el tiempo, por la carga y manejo de los mismos (Prando 1996).

La gestión consiste en aplicar en el área de mantenimiento la excelencia como práctica sistemática e integral que busque el mejoramiento constante de resultados, utilizando todos los recursos disponibles al menor costo, teniendo presente que cada empresa y sus sistemas se encuentran en un nivel diferente de desarrollo y que poseen características propias que las diferencian de las demás.

En consecuencia cada departamento o área de mantenimiento debe tener una solución propia, utilizando también todas aquellas herramientas desarrolladas en países avanzados (Prando 1996).

Hace ya tiempo que casi todo lo que se publica sobre temas de la Gestión está dominado por el argumento de cambio. Se exhorta a todas las disciplinas a adaptarse a cambios en organización, diseño, tecnología, capacidad de liderazgo, comunicaciones; es decir virtualmente en todos los aspectos de la actividad laboral. Tal vez donde esto se percibe con mayor extensión y profundidad es en el campo de la administración de los activos físicos.

Una característica impactante de este fenómeno es la cantidad de cambios que han ocurrido simultáneamente. Algunos han ocurrido a nivel estratégico, casi filosófico, mientras otros son más tácticos o técnicos en su naturaleza. La extensión de los cambios resulta aún más sorprendente. No solo implican cambios radicales de dirección (a veces diametralmente opuestos a como se hacían las cosas en el

pasado): algunos pretenden enfrentarnos con conceptos totalmente novedosos (Moubray 2004).

## **2.5 Metodología para una buena gestión del mantenimiento.**

El RCM se centra en la relación entre la organización y los elementos físicos que la componen. Antes de que se pueda explorar esta relación detalladamente, es necesario saber qué tipo de elementos físicos existen en la empresa, y decidir cuáles son las que deben estar sujetas al proceso de revisión del RCM. En la mayoría de los casos, esto significa que debe realizarse un registro de equipos completo si no existe ya uno.

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) es una nueva metodología de gestionar el mantenimiento de instalaciones industriales. Desarrollada en la industria de la aviación civil, esta metodología busca determinar las actividades de mantenimiento necesarias para que los activos sigan realizando las funciones para las que fueron construidos, considerando la seguridad de las personas y la integridad del medio ambiente. El proceso de RCM involucra la identificación de cuáles son las funciones que debe realizar un activo fijo bajo las condiciones particulares en que opera. La aplicación del proceso de RCM involucra el análisis de causas de los estados de falla y sus efectos, estableciendo una actividad de mantenimiento que elimine o reduzca los efectos de las fallas a un valor aceptable. Dichas tareas de mantenimiento deben ser técnicamente factibles de realizarse y su ejecución debe resolver adecuadamente las consecuencias que se pretende prevenir (Duran 2003).

El trabajo se realiza con equipos de trabajo multidisciplinarios liderados por un facilitador que responde de manera sistemática las siguientes siete preguntas:

1. ¿De qué forma puede fallar?
2. ¿Qué causa que falle?
3. ¿Qué sucede cuando falla?
4. ¿Qué ocurre si falla?

5. ¿Qué se puede hacer para prevenir las fallas?
6. ¿Qué sucede si no puede prevenirse la falla?
7. ¿Cuáles son las funciones?

El proceso de RCM aumenta la disponibilidad de las instalaciones industriales, disminuye el volumen de producto no conforme y disminuye los costos de operación y mantenimiento. Así mismo, el proceso de RCM reduce el riesgo de accidentes ocupacionales y de incidentes al medio ambiente (Poveda 2011) también RCM se enfoca en identificar lo que se debe hacer para garantizar las funciones del sistema en forma segura, rentable, confiable. Por lo tanto, el primer paso en el proceso RCM es identificar claramente las funciones del activo desde el punto de vista del usuario. Las funciones: Las funciones de cada sistema son las que él hace, sea en modo activo o pasivo. Las funciones que se consideran principales o esenciales son comúnmente las obvias algunos sistemas también tienen funciones secundarias RCM: menos obvias y generalmente de protección. Cada función también tiene una serie de límites operativos. Estos parámetros definen la operación normal de la función.

**A) Falla funcional:** Es aquella que sucede cuando el sistema opera por fuera de estos parámetros normales o deseados entonces, se considera que tiene una falla. Las fallas funcionales, o la forma en la cual el activo puede fallar para satisfacer las expectativas del usuario, son identificadas.

**B) Modos de falla:** Los modos de falla son el tercer paso a identificar en el proceso RCM. Un modo de falla es definido como un evento que causa una falla funcional. Un modo de falla es un por qué el sistema falla al desempeñar su función. Por supuesto, hay muchas causas posibles que para cada falla deben considerarse, y así poder determinar la acción correcta de mantenimiento a ser tomada, para evitar la falla o sus consecuencias.

**C) Efectos de las fallas:** Luego de los modos de falla, lo siguiente es describir los efectos de las fallas asociados a éstos. Un efecto de falla escrito adecuadamente permitirá hacer un buen análisis de las consecuencias de la falla. Consecuencias de las fallas: Cuando una falla ocurre en cualquier sistema, equipo o dispositivo el resultado es que pueden existir varios grados de impacto, como no todas las fallas son iguales, las consecuencias de las fallas tienen repercusiones diferentes en el resto del sistema, la empresa y el entorno operativo en el cual ocurren (Moubray 2004).

## **2.6 Gestión del mantenimiento asistido por computadora.**

La cantidad de informaciones cotidianas disponibles en un servicio de mantenimiento implica medios de recogida, almacenamiento y tratamiento que solo lo permite el útil informático. Un programa de mantenimiento asistido por ordenador (GMAO) ofrece un servicio orientado hacia la gestión de las actividades directas del mantenimiento, es decir, permite programar y seguir bajo los tres aspectos, técnico, presupuestario y organizacional, todas las actividades de un servicio de mantenimiento y los objetos de esta actividad a través de terminales distribuidos en oficinas técnicas, talleres, almacenes y oficinas de aprovisionamiento.

Deberá tener una concepción modular que permita una implantación progresiva, aunque en cualquier caso hay que contar con un esfuerzo importante para la "documentación completa de las nomenclaturas" antes de poder ser utilizados.

Un programa GMAO puede implicar una "eficaz modificación de las funciones del mantenimiento". Lo ideal es que, en un primer momento, no modifique demasiado los procedimientos, pero ayude a precisarlos.

La tendencia actual es su desarrollo en lenguajes de 4a generación (entornos gráficos), sobre bases de datos relacionadas.

- Exige que se ponga orden en el servicio de mantenimiento.
- Mejora la eficacia.

- Reduce los costos de mantenimiento.
- Es una condición previa necesaria para mejorar la disponibilidad de los equipos.
- En cuanto a los gastos de su implantación, indicar que no es sólo el costo del programa.

## **2.7 Análisis de Fallas**

### **2.7.1 Fallos y averías en los sistemas.**

Antes de proceder al análisis de averías hay que delimitar el alcance del mismo. Esto se consigue definiendo los límites del sistema. El sistema es un conjunto de elementos discretos, denominados generalmente componentes, interconectados o en interacción, cuya misión es realizar una o varias funciones, en unas condiciones predeterminadas.

El análisis de averías debe contemplar una fase en que se defina el sistema, sus funciones y las condiciones de funcionamiento. El fallo de un sistema se define como la pérdida de aptitud para cumplir una determinada función. En este sentido podemos clasificar los fallos atendiendo a distintos criterios:

- Según se manifiesta el fallo:
  1. -Evidente
  2. -Progresivo
  3. -Súbito
  4. -Oculto
- Según su magnitud:
  1. Parcial

2. Total
- Según su manifestación y magnitud:
    1. Cataléptico: Súbito y Total
    2. Por degradación: Progresivo y Parcial
  
  - Según el momento de aparición:
    1. Infantil o precoz.
    2. Aleatorio o de tasa de fallos constante.
    3. De desgaste o envejecimiento.
  
  - Según sus efectos:
    1. Menor
    2. Significativo
    3. Crítico
    4. Catastrófico
  
  - Según sus causas:
    1. Primario: la causa directa está en el propio sistema.
    2. Secundario: la causa directa está en otro sistema.
    3. Múltiple: Fallo de un sistema tras el fallo de su dispositivo de protección.

El Modo de fallo es el efecto observable por el que se constata el fallo del sistema. A cada fallo se le asocian diversos modos de fallo y cada modo de fallo se genera como consecuencia de una o varias causas de fallo; de manera que un modo de fallo representa el efecto por el que se manifiesta la causa de fallo.

## **2.8 Antecedentes de investigaciones.**

Se realizó una revisión de artículos dentro del estado del arte en donde se realizan diferentes aplicaciones de los sistemas expertos difusos comienza el análisis con (Santoli 2005) en donde ataca la necesidad de evaluar el rendimiento energético de los edificios. La importancia del proyecto es desarrollar una evaluación del desempeño de los edificios a la vez completa y flexible, y que podría extenderse a diferentes condiciones ambientales, en donde se han obtenido resultados ya que el sistema ha sido adaptado para la producción de certificados de eficiencia energética de edificios en Italia, teniendo en cuenta las condiciones climáticas, los requisitos del ambiente interior y la rentabilidad. Locales y de invierno residenciales se han considerado en una primera etapa.

También se tiene el trabajo de Ranganath 2007 en donde presenta un modelado neuro-difuso enfocado al mantenimiento basado en la condición (CBM) para vigilar los equipos que utilizan varios sensores y permitir un diagnóstico en tiempo real de fallos inminentes y el pronóstico en los equipos la salud. La condición de un sistema se cuantifica por los parámetros que se supervisan de forma continua, en conclusión los sistemas CBM están diseñados para proporcionar avisos y alarmas avanzadas, o para cerrar un proceso. Los operadores humanos son necesarios para evaluar la situación y tomar las decisiones apropiadas. En otras palabras, los sistemas de CBM y los operadores humanos deben colaborar para resolver problemas.

Wang et al. 2010 por su parte propone una forma de diagnóstico de fallas de máquina pesada basado en sistema experto "mixto", que combina reglas de razonamiento y el razonamiento de caso de registros de fallas.

Es un sistema experto mixto basado en reglas de estructura de árbol de fallos y los casos de registros de fallas y mantenimiento. RBR consigue un resultado claro e intuitivo, y la experiencia que es difícil de formular puede expresarse en CBR

auxiliar. Ambos métodos se complementan. Las reglas de fallo y los registros de los casos son recogidos, lo que hace que este sistema de gran viabilidad

Chen, 1993 presenta un sistema experto difuso para el diagnóstico de fallas en la distribución eléctrica en donde las reglas heurísticas son adquiridas de los reportes de problemas e históricos de esta forma basándose en la descripción de los síntomas derivados de los clientes, el sistema desarrollado se basa en la experiencia pasada de los sistemas de distribución de reportes históricos de problemas para determinar el grado de pertenencia, lo que indica el grado en que los componentes específicos sean defectuosos de manera prioritaria. Así, una lista de prioridades de los componentes sospechosos será el resultado, si se le da un informe de problema.

En el área médica son muy comunes las aplicaciones de los sistemas expertos tal es el caso de (Etic et al. 2009) que proponen el diseño de un sistema experto difuso (FES) para el control del aire acondicionado dentro de una sala de operaciones. Esto ayuda a reducir el número de partículas en el aire, que previene la infección del paciente y ayuda a proporcionar comodidad térmica para que las funciones biológicas puedan trabajar correctamente.

En el estudio, se obtuvieron excelentes resultados en el control del quirófano prototipo con FES. Los análisis de los resultados realizados indicaron que los controles realizados con FES proporcionan mejor economía, comodidad, fiabilidad y control constante además que son factibles en un quirófano real (Etik et al. 2009).

Otra área interesante para la aplicación de sistemas expertos es el área de la aviación como lo presenta (Hadjimichael, 2009), donde evalúa riesgos durante el aterrizaje de los aviones mediante un Sistema Experto Difuso. La investigación se enfoca a las operaciones de vuelo ya que son extremadamente complejas, que involucra muchos componentes: humano, mecánico, tecnológico y ambiental. En consecuencia, los riesgos asociados con las operaciones de vuelo son igualmente complejas y diversas.

El Sistema de Evaluación del Riesgo de Operaciones de Vuelo (Foras) es una metodología de modelado de riesgos que representa los factores de riesgo y sus interrelaciones como un sistema experto difuso. Un modelo de riesgo Foras proporciona un índice de riesgo relativo que representa una estimación cuantitativa de los efectos acumulativos de los peligros potenciales en una sola operación de vuelo.

En total, alrededor de 44 nodos que no son hojas y 80 nodos hoja representan la estructura del modelo de riesgo. Las relaciones de las variables se expresan en aproximadamente 200 tablas que representan aproximadamente 1.500 normas del sistema experto. El software ha sido escrito para compilar un modelo de riesgo de expertos especificados. Además, el software y una interfaz gráfica de usuario se han escrito para empatar el modelo de riesgo aplicado a las bases de datos que suministran los datos de entrada, aceptar consultas de los usuarios (Hadjimichael, 2009).

En el área eléctrica se tiene el trabajo de (Abdelaziz et al. 2010) quien propone mejorar el perfil de tensión y minimizar las pérdidas totales del sistema en los alimentadores de distribución radial esto consiste en la instalación de condensadores de derivación fija y reguladores de voltaje de grifo cambiante a lo largo de líneas de distribución, en su trabajo propone 2 métodos los cuales como resultado arrojan que el FES aplicado a este alimentador elige nodos 4, 8, 5, 2 como nodos candidatos para condensadores para ser instalado. La técnica variacional elige 3450, 450, 600, 4050 kVA para los nodos 4, 8, 5, 2, respectivamente. Esto se traduce en la reducción de la pérdida total de 108.036 kW, por lo tanto una reducción de costes de \$ 16.530 con una tensión mínima de 0,8845 p. u., por bus (Abdelaziz et al. 2010).

En la petroquímica también se tienen aplicaciones (Sheremetov 2008) propone un Sistema experto difuso para la solución de los problemas de pérdida de circulación. La propuesta es un sistema experto que utiliza un modelo de incertidumbre con escalas cualitativas de los valores de plausibilidad y basada en álgebra difusa de estrictas operaciones monótonas. Su realización en los

procedimientos de inferencia permite tomar en cuenta el cambio de la verosimilitud de los locales en las reglas de los sistemas expertos.

El sistema fue instalado en PEMEX para pruebas de campo. Las pruebas de validación realizadas hasta el momento por los diferentes campos de petróleo de PEMEX mostraron la alta fiabilidad del sistema para identificar correctamente el LCP mediante el mecanismo implementado de inferencia difusa. Como otra característica importante, Smart- Drill se implementa en un entorno distribuido, de forma escalable lo que entrega mayor valor a los operadores de perforación que trabajan con dispositivos móviles a través de interfaces Web seguras.

Existen también aplicaciones híbridas (Burak Ozyurt, 1996) quien propone un sistema experto híbrido jerárquico red neuronal difusa enfoque para el diagnóstico de fallos proceso químico. En este trabajo se enfoca al diagnóstico de fallos. Bajo el enfoque de sistemas expertos. Varios expertos sistemas y métodos de inferencia para hacer frente a la incertidumbre involucrada en las mediciones que los sensores tienen, y que han sido desarrollados para el diagnóstico de fallos de ingeniería química

Las principales ventajas de los sistemas expertos son el procesamiento, la decisión, y la toma del conocimiento. Por lo general son sistemas basados en reglas.

La tarea en la creación de una base de conocimiento es por lo general el tiempo y el requerimiento de muchos expertos de procesos. También los sistemas expertos son conocidos por ser frágiles en el diagnóstico de condiciones nuevas.

El sistema introducido supera en el diagnóstico a los sistemas expertos difusos y red neuronal jerárquica cuando las estructuras son usadas solas. También se ocupa de los problemas relacionados con las redes neuronales artificiales, problemas de extrapolación, problemas de reconocimiento de la clase de falla novedosos, etc

**CAPITULO 3**  
**MARCO REFERENCIAL**

### 3.0 MARCO REFERENCIAL FEMSA

La historia de FEMSA inicia en el año de 1890 con la fundación de la Cervecería Cuauhtémoc en Monterrey, N.L., gracias a un grupo de entusiastas empresarios encabezados por Don Isaac Garza, José Calderón, José A. Muguerza, Francisco G. Sada, y Joseph M. Schnaider.

La primera marca que salió al mercado fue Carta Blanca y después Salvator, una marca que duró poco tiempo y posteriormente desapareció.

El 12 de mayo de 1936 fue fundada Valores Industriales S.A. (VISA), empresa dueña de las compañías de Cuauhtémoc.

En 1979 grupo VISA adquiere las franquicias de *The Coca Cola Company* para producir y comercializar en el valle de México y el suroeste de la República Mexicana.

En 1998 se cambia el nombre de VISA a FEMSA, después de un intercambio de acciones entre los tenedores de ambas empresas.

En 2001 entra un contrato de franquicia para producción y distribución de productos de la marca Mundet en el valle y suroeste de la República Mexicana.

En 2003 se integra grupo Panamco constituyéndose así como la principal empresa embotelladora de Productos de Coca Cola en América Latina con presencia en 9 países.

En 2006 FEMSA Cerveza adquiere el control de la cervecera brasileña Kaiser, mediante la compra del 68% de ésta, por 68 millones de dólares. FEMSA es ahora la única empresa con operaciones cerveceras en dos de los mercados más atractivos en el mundo: México y Brasil.

El 8 de noviembre de 2007, Coca-Cola FEMSA (KOF) y The Coca-Cola Company (TCCC) adquieren el 100% de Jugos del Valle, que opera en México y Brasil, ocupando el segundo y primer lugar de estos mercados. Esta operación consolida la posición de KOF en bebidas no carbonatadas, garantizando a sus consumidores bebidas con calidad y servicio excepcionales.

En julio de 2008, se adquiere Agua de los Ángeles, negocio de agua embotellada en el Valle de México, esta transacción duplicó la presencia en este mercado en la Ciudad de México.

En 2011 Coca-Cola FEMSA anuncia el cierre satisfactorio de la adquisición conjunta con The Coca-Cola Company, de Grupo Industrias Lácteas en Panamá (“Estrella Azul” y “Del Prado”), una empresa fabricante y comercializadora de productos lácteos, jugos y bebidas refrescantes con más de 50 años de liderazgo en el mercado de Panamá.

Coca-Cola FEMSA S.A.B. de C.V. y Corporación de los Ángeles S.A. de C.V. y sus accionistas, anuncian la fusión exitosa de la división de bebidas de Grupo CIMSA con Coca-Cola FEMSA. Esta transacción obtuvo todas las autorizaciones requeridas, entre otras, la aprobación de la Comisión Federal de Competencia y la de The Coca-Cola Company.

Coca-Cola FEMSA S.A.B. de C.V. y Grupo Fomento Queretano, S.A.P.I. de C.V. y sus accionistas, anuncian la fusión exitosa de la operación de bebidas de Grupo Fomento Queretano con Coca-Cola FEMSA.

### 3.1 Introducción a FEMSA.

FEMSA (**F**omento **E**conómico **M**exicano **SA.** de CV) es una empresa líder en América Latina, integrada por 5 unidades de negocio.

Las unidades de negocio de Empaques y Logística operan facilitando la función de las otras tres unidades de negocio.



Figura 3.1 Unidades de negocio FEMSA.

Por lo que el porcentaje de contribución FEMSA se distribuye como lo indica la figura 1.2.

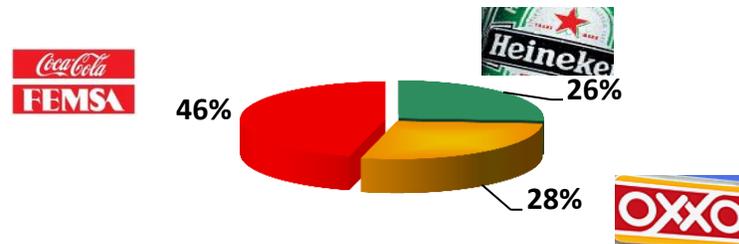


Figura 3.2 Porcentaje de distribución FEMSA

La unidad de negocio Coca-Cola FEMSA (RC), es el mayor embotellador público de productos Coca-Cola a nivel mundial en términos de ventas, representando uno de cada diez productos Coca-Cola vendidos en el mundo.

### 3.2 Presencia global.

Es el embotellador líder de las marcas de Coca-Cola en el mundo.

- Coca Cola FEMSA tiene presencia en **9 países** de América Latina (figura 1.3).
- Con más de **30 plantas** en sus operaciones.



Figura 3.3 Presencia global

### **3.3 Planta Apizaco.**

Dentro de las 26 Plantas embotelladoras de la división se encuentra Coca Cola FEMSA Planta Apizaco que representa actualmente el 12% de la producción de Coca Cola FEMSA en México.



Figura 3.4 Planta Apizaco

#### **3.3.1 Estructura organizacional.**

Su gestión de actividades está liderada por dos Comités; el CDC (Comité Directivo de Calidad) quien está integrado por las diferentes gerencias de cada una de las áreas de Planta y por el Gerente de Planta; y el CoOper (Comité Operativo) que está integrado por las diferentes coordinaciones de cada una de las áreas de Planta.

El comité sindical está encargado de vigilar los derechos y responsabilidades de los trabajadores sindicalizados.

El organigrama estructural de planta Apizaco (figura 1.5) muestra las múltiples relaciones e interacciones que tienen los diferentes órganos que se representan en la organización.

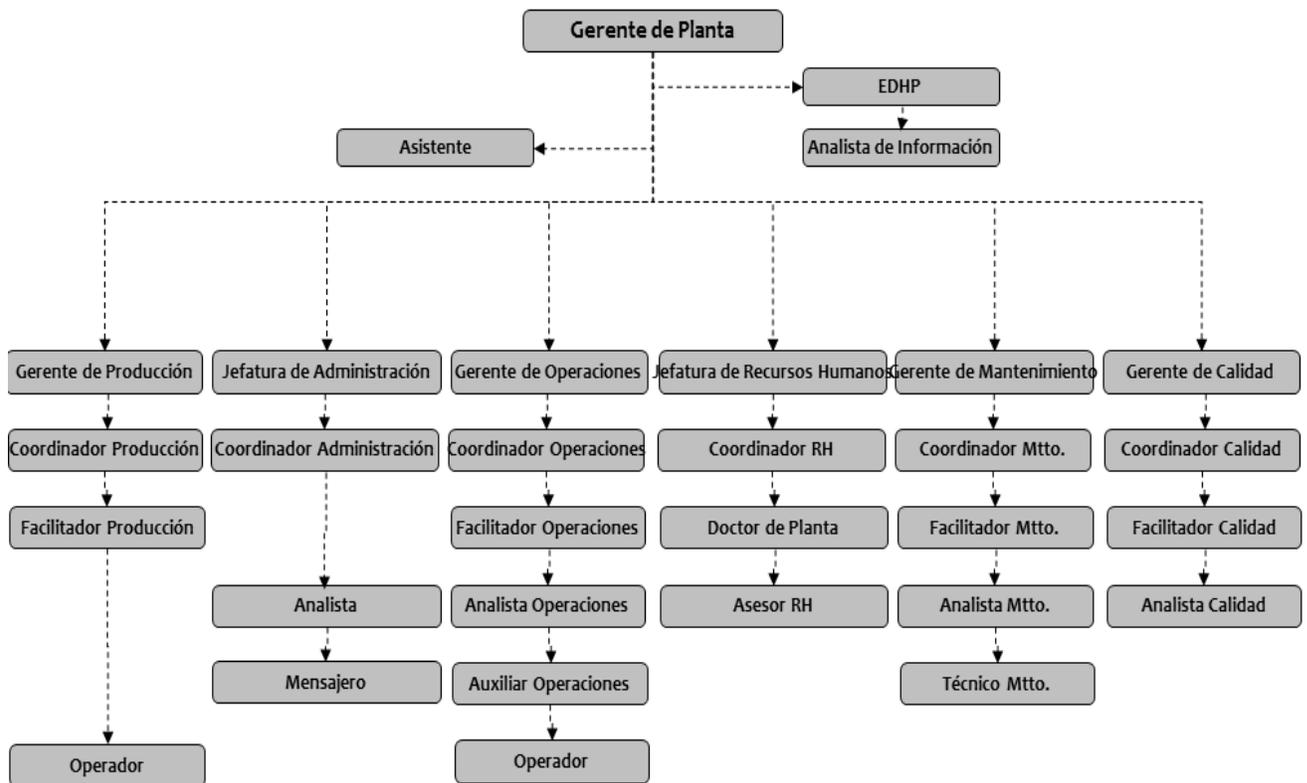


Figura. 3.5 Organigrama estructural Planta Apizaco.

### 3.3.2 Cultura organizacional.

Para Planta Apizaco su cultura es la manera particular que tiene de hacer las cosas y de responder a las exigencias del entorno con origen en un conjunto de valores y creencias compartidos.

Estos valores y creencias son conocidos, aceptados y puestos en práctica por los miembros de la organización reflejándose en su actuación cotidiana en el trabajo y toma de decisiones.

Mantener la congruencia entre la filosofía y las acciones a todos los niveles es una prioridad para Coca Cola FEMSA Planta Apizaco, dichos valores son los siguientes:

- **Mision** Satisfacer y agradar con excelencia al consumidor de bebidas.
- **Vision** Ser el mejor embotellador del mundo reconocido por su excelencia operativa y la calidad de su gente

A través de la vivencia diaria de los valores y el Código de Ética de Negocios se asegura que la cultura favorezca la construcción de un ambiente de trabajo armonioso, respetuoso e íntegro.

### **3.3.3 Valores FEMSA.**

#### **Innovación y creatividad.**

Garantiza la completa satisfacción de clientes internos, externos y consumidores, ofreciendo productos y servicios que cumplen con los más altos estándares de calidad.

#### **Pasión por el servicio y enfoque al cliente consumidor.**

Enfoca el talento y esfuerzo personal y profesional hacia el desarrollo de ideas nuevas y creativas para el logro de los objetivos de la empresa, en un ambiente de aprendizaje continuo.

#### **Calidad y productividad.**

Se hace uso adecuado de los recursos de la organización manteniendo un enfoque hacia los procesos, procedimientos y sistemas de calidad para minimizar costos y maximizar resultados.

### **Respeto y desarrollo integral y excelencia del personal.**

Fomenta un ambiente propicio para las relaciones basadas en la consideración y el respeto, en el que el desarrollo resulte la clave de la competitividad de la organización y de sus integrantes.

### **Honestidad integridad y austeridad.**

Se actúa de manera congruente con los valores y principios de la empresa, asumiendo nuestras responsabilidades morales, económicas y sociales.

#### **3.3.4 Política integral.**

Esta política es difundida e implantada a todo el personal de Planta y está disponible al público en general a través de los medios de difusión establecidos en el procedimiento Comunicación de Estrategias y Fomento a la Vivencia de la Cultura Organizacional, la política es la siguiente:

En la dirección de cadena de suministro de Coca Cola FEMSA se compromete a:

- **Cumplir** los requisitos legales aplicables y otros suscritos, de los clientes, de Coca Cola FEMSA y The Coca Cola Company en materia de seguridad, salud, inocuidad, calidad y medio ambiente.
- **Mejorar** continuamente la eficacia del desempeño del sistema de gestión integral, la calidad e inocuidad de los productos que manufacturamos y almacenamos en los centros productores
- **Gestionar** y cumplir los programas para mantener la salud e integridad con un enfoque de mejora y prevención minimizando el riesgo a través del compromiso de nuestro personal.
- **Minimizar** los impactos ambientales a través del control y mejora de nuestros procesos, productos, empaques y servicios; manteniendo

programas de prevención para la conservación de los recursos naturales.

### **3.3.5 Normativas de operación.**

**ISO 9001** un sistema de gestión de calidad proporciona el marco necesario para supervisar y mejorar el rendimiento de cualquier área que se elija. ISO 9001 es con diferencia el marco de calidad más sólido del mundo.

Ayuda a todo tipo de organizaciones a alcanzar el éxito por medio de una mayor satisfacción de cliente, motivación de los empleados y mejora continua.

**ISO 22002** es una normativa internacional que define los requisitos de un sistema de gestión de la seguridad alimentaria que abarca a todas las organizaciones de la cadena alimentaria.

**ISO 14001** es una normativa aceptada internacionalmente que establece como implementar un sistema de gestión medioambiental (SGM) eficaz. La norma se a concebido para gestionar el delicado equilibrio entre el mantenimiento de la rentabilidad y la reducción del impacto medioambiental. Con el compromiso de toda organización, permite lograr ambos objetivos.

**OHSAS 18001** (*Occupational Health and Safety Assessment Series*, Sistemas de Gestión de Salud y Seguridad Laboral), es la especificación de evaluación reconocida internacionalmente para sistemas de gestión de la salud y la seguridad en el trabajo. Una selección de los organismos más importantes de comercio, organismos internacionales de normas y certificación la han concebido para cubrir los vacíos en los que no existe ninguna norma internacional certificable por un tercero independiente.

### 3.3.6 Entorno.

La ubicación de Planta Apizaco Coca Cola FEMSA (figura 3.6) se encuentra en la comunidad de San Luis Apizaquito sobre la calzada Apizaquito km 2.5 S/N, esta comunidad pertenece al municipio de Apizaco, Tlaxcala.

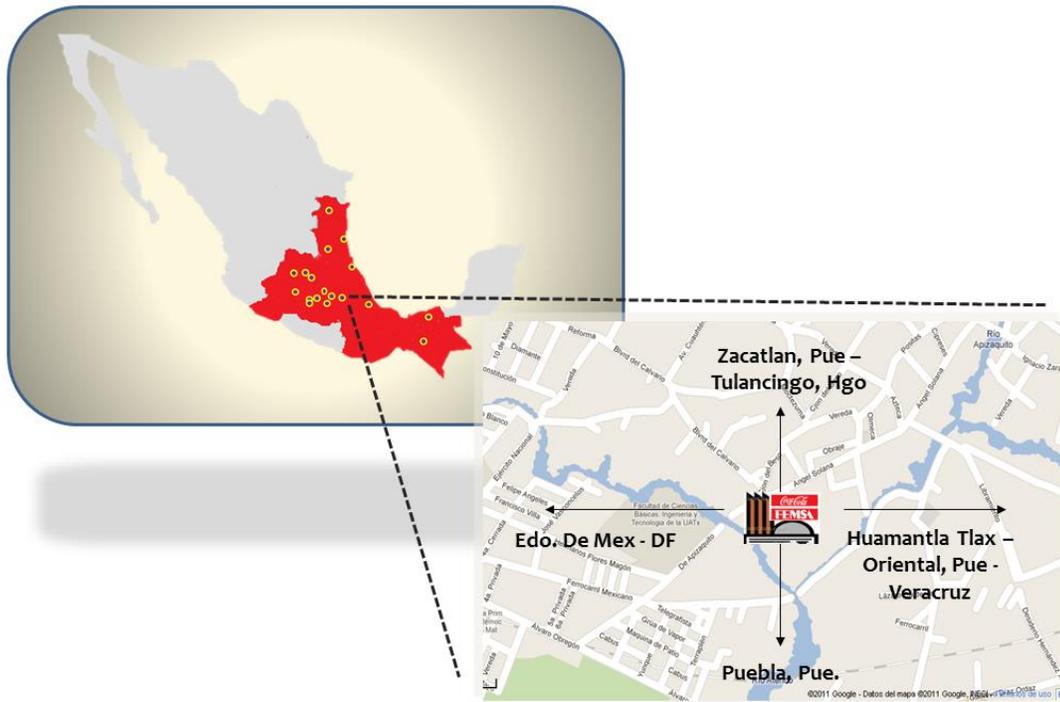


Figura 3.6 Ubicación planta Apizaco.

Planta Apizaco limita al sur con dos ríos, río Texcalac y río Atenco, los estados y municipios cercanos que nos rodean son Zacatlán / Puebla, Estado de México, Tulancingo / Hidalgo, Huamantla / Tlaxcala, Oriental / Puebla y Puebla / Puebla (Femsa)

**CAPITULO 4**  
**METODOLOGIA, ANALISIS Y DESARROLLO**

## 4.0 METODOLOGÍA

### 4.1 Metodología empleada.

Se propone realizar la investigación el desarrollo e implementación de un proyecto que abarca 2 secciones la primera es la sistematización para la búsqueda del diagnóstico de la falla que se presente, mediante técnicas extraídas de los expertos del área, de esta manera se pretende reducir los tiempos de paro de los equipos ante una falla.

La segunda parte incluye un sistema experto alimentado con el conocimiento de un grupo multidisciplinario que por medio de la herramienta RCM analiza el funcionamiento y diversas fallas que presenta la maquinaria de proceso, esta información es recopilada y será la base de datos de la segunda parte del proyecto.

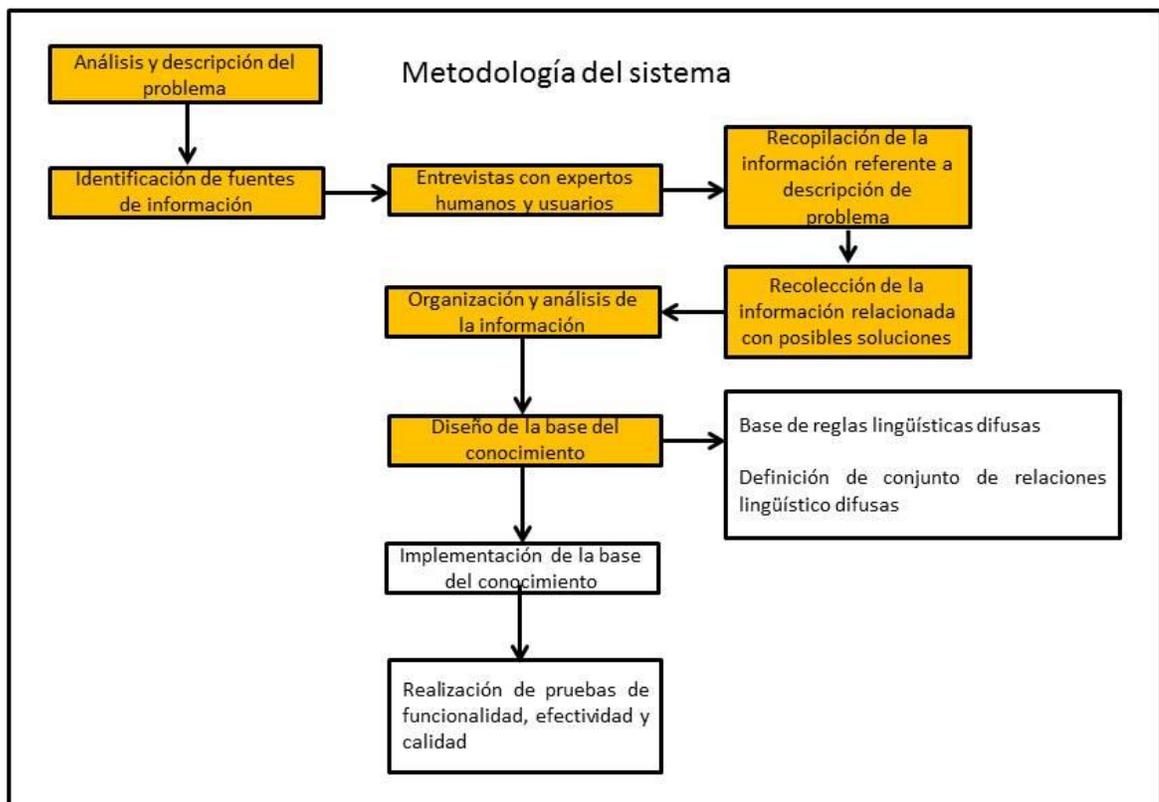


Figura 4.1 Metodología del sistema

Lo anterior se desarrolla bajo la metodología mostrada en la figura 4.1 en donde se observa que son 10 partes principales del sistema con las primeras 6 partes se termina la primera sección del proyecto y las últimas 4 se enfocarán al modelado y pruebas del sistema experto difuso que es la segunda sección del proyecto.

## **4.2 Análisis y descripción del problema**

El estudio se realiza dentro de las instalaciones de la planta embotelladora de bebidas del grupo FEMSA ubicada en San Luis Apizaquito municipio de Apizaco Tlaxcala. En esta planta se tienen detectados problemas con el aumento de la eficiencia en las líneas de producción, una de las áreas de oportunidad se encuentra en los puntos de eficiencia perdidos por paros de equipo.

## **4.3 Identificación de fuentes de información**

Las fuentes de información que serán útiles en la realización del proyecto serán:

- Datos de SAP
- Datos de bitácoras de fallos del equipo natural de trabajo analizado.
- Datos de RCM
- Manuales de equipos
- Procedimientos de operación y mantenimiento
- Estudios de tiempos de fallas en piso
- Análisis del entorno actual de trabajo

## **4.4 Entrevista con expertos humanos y usuarios**

La entrevista con los expertos humanos se realiza con el fin de lograr documentar toda su experiencia y poder usar esa información para alimentar al sistema experto.

La realización de esta documentación se realiza por medio de la metodología RCM la cual involucra el análisis de causas de los estados de falla y efectos. El trabajo se realiza con equipos de trabajo multidisciplinarios liderados por un facilitador que responde de manera sistemática las siguientes siete preguntas:

1. ¿De qué forma puede fallar?
2. ¿Qué causa que falle?
3. ¿Qué sucede cuando falla?
4. ¿Qué ocurre si falla?
5. ¿Qué se puede hacer para prevenir las fallas?
6. ¿Qué sucede si no puede prevenirse la falla?
7. ¿Cuáles son las funciones?

Como resultado de este análisis se obtienen bases de datos con información relacionada a las fallas que pudiera presentar el equipo analizado.

#### **4.5 Recopilación de información referente al problema**

Se realizan verificaciones en piso para determinar áreas de oportunidad que existen para mejorar el desempeño y además facilitar la aplicación del procedimiento propuesto.

Durante el primer mes de investigación se realizan un análisis de los elementos involucrados al realizar un diagnóstico de falla encontrando áreas de oportunidad que ayudarían a realizar un diagnóstico más rápido y certero.

- No existe un procedimiento para la solución de fallas de forma general y solo algunos de soluciones a problemas ya definidos en algunos equipos.
- No existen diagramas eléctricos de todos los equipos de planta solo en los de instalación más reciente.
- No existen diagramas eléctricos a pie de máquina en todos los equipos y en algunos casos existen pero están muy deteriorados e incompletos.

- Los diagramas eléctricos no están actualizados o no se actualizan por nuevas modificaciones.
- Falta de seguimiento a arreglos provisionales además de priorizar de cuando se debe hacer una reparación provisional y cuando reparar adecuadamente al momento.
- Falta de comunicación entre usuario y técnicos de correctivo al solicitar apoyo en falla.
- En ciertos casos falta de conocimiento por parte de los operadores en máquinas por existir rotación de personal

Al realizar la investigación referente a diagramas los datos encontrados se muestran en la figura 3 en donde el 100% equivale a 68 tableros revisados en planta

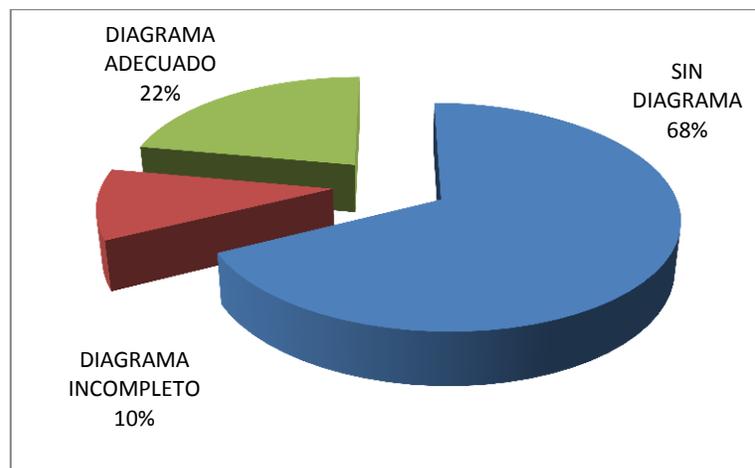


Figura 4.2 Estado de diagramas en equipos

En la figura 4.2 se muestra que existe una gran área de oportunidad ya que un 68% del total de los tableros están sin diagrama lo cual en una falla eléctrica dificulta la búsqueda del problema, y tan solo el 22% tienen diagramas completos y en buen estado. En la tabla 4.1 se muestran los datos por áreas.

AREA	ESTADO DE LOS TABLEROS		
	FALTA	INCOMPLETO	CORRECTO
JARABES	9	0	1
LINEA 1	1	1	4
LINEA 2	12	1	1
LINEA 3	3	1	4
LINEA 4	7	3	3
LINEA 6	7	0	2
LINEA 7	3	1	0
OZONIFICADO	4	0	0
TOTAL	46	7	15

Tabla 4.1. Estado de diagramas en tableros por áreas

#### 4.6 Organización y análisis de la información.

Se realiza el análisis de la información referente a los minutos perdidos por paro de equipo de los meses de agosto y septiembre lo cual se muestra en las siguientes figuras.

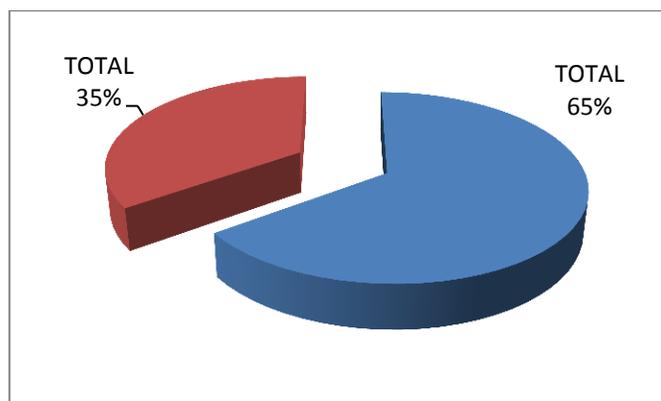


Figura 4.3 Porcentaje de paros mayores y menores a 20 minutos

En la figura 4.3 de un total de 30301 minutos perdidos en el mes de agosto y septiembre el 65% corresponden a paros menores a 20 minutos lo que indica que son fallas sencillas pero repetitivas en algunos casos y solo el 35% de los minutos

perdidos fueron por fallas más complejas, con un grado de diagnóstico y reparación mayor.

Se coloca como referencia 20 minutos de paro ya que es el tiempo en lo que se realiza el diagnóstico de fallas propuesto más adelante, y después de este tiempo se tendrá la información necesaria para alimentar a la segunda parte del proyecto.

En la figura 4.4 se muestran los paros por líneas de producción con un comparativo de paros mayores y menores a 20 minutos.

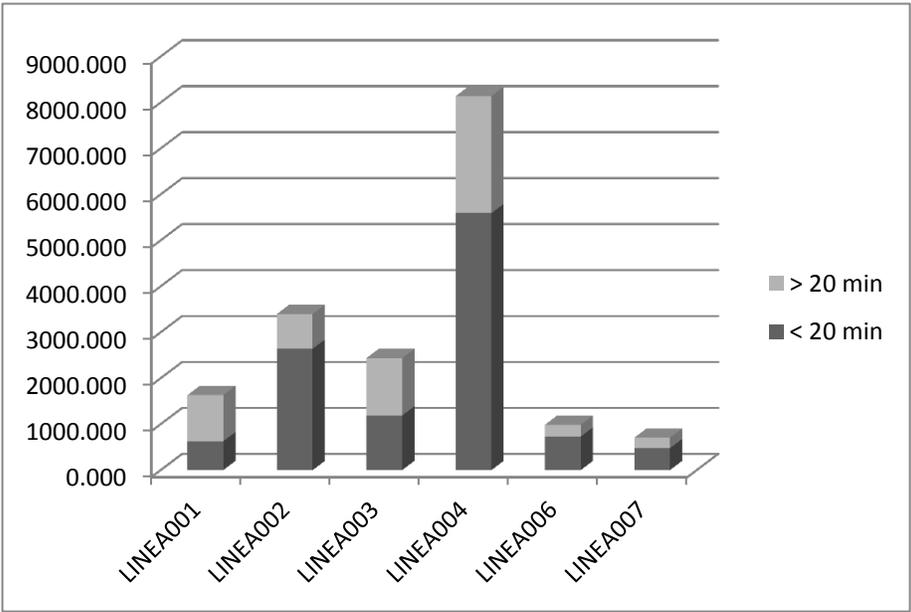


Figura 4.4 Minutos de paro por líneas

En la figura 4.4 también se observa que la mayoría de las líneas tiene fallos que son menores a 20 minutos y que es ahí en donde aplica la primera parte del proyecto, pero en el caso de líneas 1 y 3 que es donde la mayor cantidad de minutos perdidos es por paros mayores a 20 minutos es en donde se aplicaría la segunda parte del proyecto.

#### 4.6.1 Estudios de tiempos con técnicos de automatización y control

Durante el mes de agosto y septiembre se realizan estudios de tiempos de 35 fallas que fueron atendidas por los técnicos del área de automatización de la planta para determinar algunos datos.

En la figura 4.5 se observa que de un total de 1180 minutos perdidos en las fallas el 63% se ocupó para el diagnóstico de la falla y tan solo el 28% para su reparación, lo que indica que el diagnóstico de las fallas es el área de oportunidad que se debe de atacar.

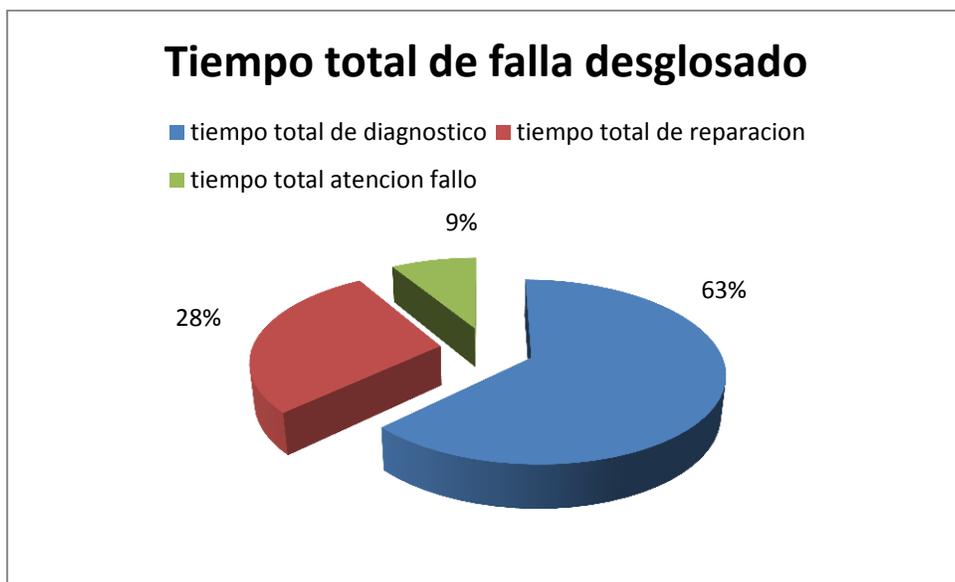


Figura 4.5 Tiempo total de falla desglosado

Un dato muy importante del análisis fue descubrir la forma o la técnica con la que los expertos logran rastrear y encontrar las fallas, se elige este equipo de trabajo ya que son los que tienen mayor conocimiento en cuanto a variedad de equipos ya que atienden a toda la planta.

Como resultado de este análisis se observó que tienen más desarrollado la lógica al buscar una solución ya que a pesar de no conocer bien todos los equipos analizan con ayuda de la información recopilada de los usuarios y además son más

perceptivos con los sentidos humanos (Ver, Oír, Sentir, Oler) lo cual apoyado del conocimiento técnico les facilita la búsqueda de los fallos.

#### 4.7 Arquitectura del sistema propuesto

En la figura 4.6 se muestra la arquitectura del sistema propuesto en donde se explicaran las 2 partes que lo componen.

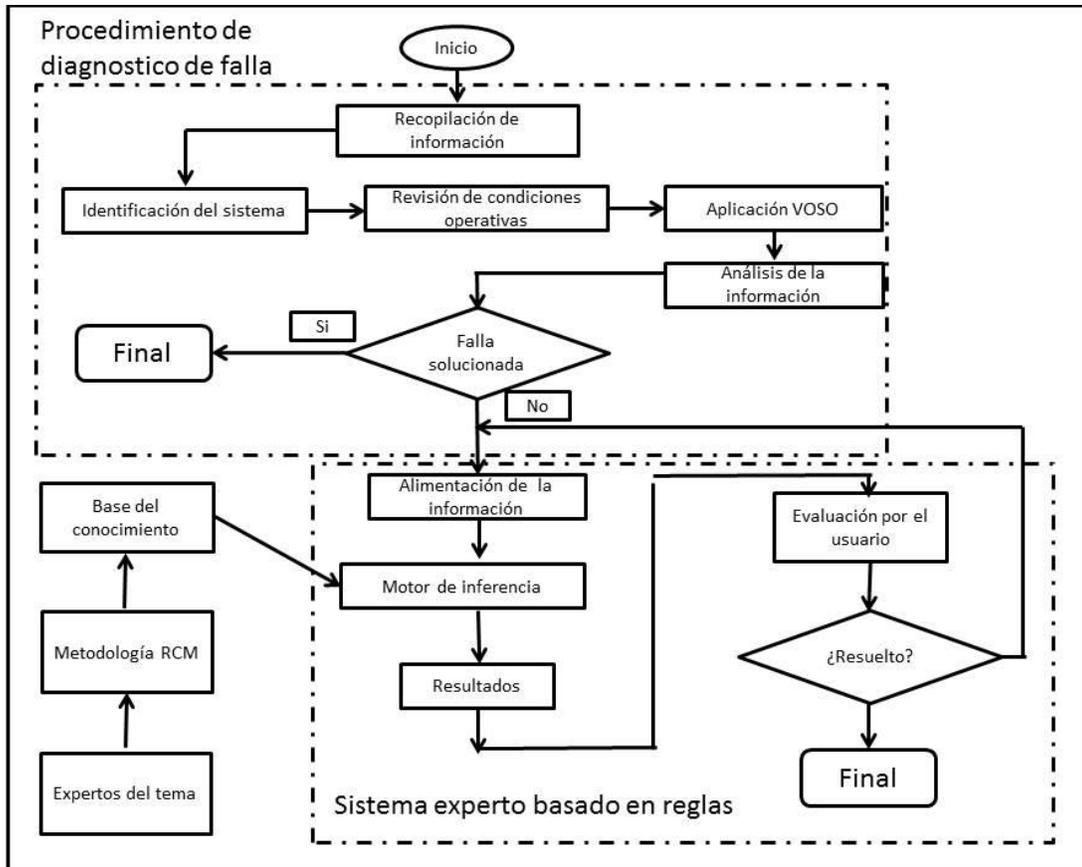


Figura 4.6 Arquitectura del sistema

El procedimiento para el diagnóstico de fallas se encuentra dentro de la primera parte del sistema en donde el análisis debe centrarse primero en el problema, segundo la causa y tercero la solución.

Las condiciones que debe reunir para garantizar su eficacia son:

- Ser bien estructurada desarrollada en un orden lógico.
- No debe dar opción a pasar por alto ninguna etapa fundamental.

- Ser completa, es decir, que cada etapa sea imprescindible por sí misma y como punto de partida para la siguiente.

Teniendo en cuenta estos aspectos fundamentales y condiciones se propone un Procedimiento de diagnóstico de fallos, estructurado en 5 etapas las cuales se muestran en la figura 8:

#### **4.8 Procedimiento de diagnóstico de fallos**

El procedimiento de diagnóstico de fallo se basa en cinco pasos esenciales iniciando en una búsqueda de la información referente al problema, la ubicación de la falla y el análisis basado en las percepciones de cuatro de los cinco sentidos humanos

##### **4.8.1 Recopilación de información del problema**

Se debe concretar el problema, antes de realizar alguna acción primero debemos conocer el problema, para ello debemos realizar una recopilación de toda la información necesaria para realizar un análisis del problema y se divide en dos puntos.

###### **1 Cuestionario inicial**

El objetivo de realizar un cuestionario inicial es el de recopilar información del personal directamente involucrado ya que ellos son las personas que interactúan diariamente con el equipo y lo conocen muy bien y tienen la experiencia de otras fallas iguales o similares, es por ello que se debe explotar esta información.

Al llegar a la falla se deberán de realizar ciertas preguntas:

- ¿Qué ocurre?
- ¿Dónde ocurre?
- ¿Cómo ocurre?
- ¿Cuándo ocurre ó cuándo comenzó?
- ¿Quién la provoca?
- ¿Cómo se ha venido resolviendo?

## 2 Uso de diagramas y manuales.

Es necesario el uso de los diagramas y manuales del equipo a analizar para conocer más acerca del equipo saber que sistemas lo conocen, y de qué manera interactúan referentes a la falla.

### **4.8.2 Identificación del sistema**

Con la información obtenida del cuestionario inicial y del diagrama de operación podemos realizar la identificación del sistema que está fallando, conocer sus límites de operación, funciones, características técnicas y también de los componentes que están involucrados dentro del sistema.

- Sistemas eléctricos
- Sistemas neumáticos
- Sistemas hidráulicos
- Sistemas mecánicos
- Sistemas de instrumentación y control

### **4.8.3 Revisión de condiciones operativas**

La revisión de condiciones de operación es de gran importancia debido a que una gran parte de los problemas son operacionales, errores de dedo o falta de conocimiento del operador, para lograr más eficiente este paso del diagnóstico es necesario el uso de apoyos visuales que muestren los valores de operación de las diferentes variables de los equipos por ejemplo presiones de aire y medidas de alturas.

Estos apoyos visuales ayudaran a detectar parámetros fuera de rangos normales y facilitaran el diagnóstico de las fallas.

#### 4.8.4 Aplicación VOSO

Una vez sabiendo que está pasando y donde está pasando es momento de aplicar la metodología VOSO.

Para recopilar mayor información y descubrir la falla, ya que todas las fallas presentan síntomas y es por ello que los equipos pierden la afectividad de operación, de la misma manera que las personas cuando nos enfermamos presentamos síntomas y el medico inicialmente realiza una inspección física, para determinar en base a la experiencia, conocimientos y síntomas la enfermedad que padecemos, de esta misma manera se realizara al equipo con la falla.

- **Ver** Es necesario concentrarnos en el problema y realizar una inspección visual sin dejar de tomar en cuenta todos los elementos relacionados y tampoco obviarlos, la intención de esta inspección es visualizar elementos dañados superficialmente, elementos quemados, rotos, sucios que estén dentro del sistema en donde estamos buscando la avería ya que se pueden encontrar elementos viejos y fuera de uso que fueron parte de otros sistemas y que solo aumentaran el tiempo de la inspección.
- **Oír** Ruidos extraños, que estén fuera de los rangos de operación de los equipos, por ejemplo el zumbido de un motor indica que se está quedando a 2 fases y que posiblemente se quemara posteriormente
- **Sentir** La acción de sentir es de gran importancia ya que podemos detectar vibraciones anormales o nuevamente como ejemplo en un motor una temperatura alta indica un mal funcionamiento
- **Oler** Esta acción es usada sobre todo cuando tenemos algún elemento quemado y por medio de este sentido podemos encontrarlo más fácilmente después de haber realizado los pasos anteriores al procedimiento propuesto.
- **Mixtos** Para el análisis de la falla es necesario realizar mezclas de en el VOSO, se tiene que ser muy observador para detectar ciertas anomalías en los equipos por ejemplo en el rastreo de una falla súbita y repentina por decir un corto circuito donde cada vez que la maquina realiza X movimiento el termo magnético del sistema de control se dispara, poniendo atención del ciclo de la

máquina y escuchando el momento en el que se dispara la protección, podemos saber que el problema está dentro de los elementos de ese paso del ciclo de la máquina y de esta manera delimitamos el área de la búsqueda del problema.

#### **4.8.5 Análisis de la información**

Ya con toda la información recopilada en los pasos anteriores se podrá dar un diagnóstico inicial si en su caso aún no se haya encontrado el problema, y si después de aplicar el procedimiento se continua con el fallo ya se tendrá la información necesaria para alimentar a la segunda parte del proyecto que es el modelado de un sistema experto difuso.

#### **4.9 Desarrollo del sistema Difuso e implementación**

Un sistema experto está constituido como se muestra en el esquema presentado en la Figura 4.7, el motor de inferencia es el elemento principal, siendo el componente encargado de la simulación del razonamiento. Por consiguiente, es el elemento que obtiene un resultado o conclusión a partir de un proceso de deducción en el que se tiene en cuenta la información suministrada por el usuario y la información almacenada en la base de conocimiento, siendo otro de los componentes característicos de un sistema experto. El usuario accede y establece comunicación, es decir un diálogo, con el sistema experto a través del interface de usuario, ya sea con la ayuda de un sistema de menús o cualquier otro sistema de petición y adquisición de datos (Bonifacio Martin del Brio, 2002)

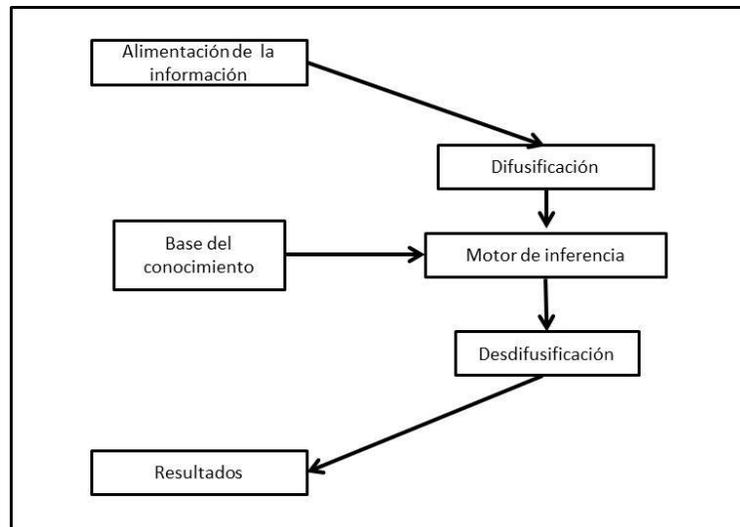


Figura 4.7 Estructura general del sistema difuso

La arquitectura general del modelo difuso fue tipo Mamdani la cual se muestra en la figura 4.7, como en este sistema a mayor número de variables de entrada la cantidad de probables reglas aumenta exponencialmente, se realiza una selección de las entradas de acuerdo a los sistemas del equipo para generar diferentes sistemas difusos que trabajaran por separado y que al final las salidas se concentraran en un solo sistema difuso para dar un diagnóstico de la falla, con esta acción evitamos tener un exceso de reglas y simplicidad en cada sistema difuso.

Dada la complejidad del modelamiento, se hizo uso de la herramienta FisPro, esta herramienta permito definir los resultados del modelamiento del sistema experto mediante las diferentes ventanas de la Shell.

**CAPITULO 5**  
**IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO**

## 5.0 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

### 5.1 Implementación equipo rechazador

Como prueba piloto se realiza el análisis de un equipo rechazador, en donde se identifican los sistemas principales del equipo así como las fallas más comunes y su relación con las causas más probables las cuales se muestran en la figura 5.1, toda esta relación se basó en el conocimiento extraído de los expertos y en base a la información de su RCM

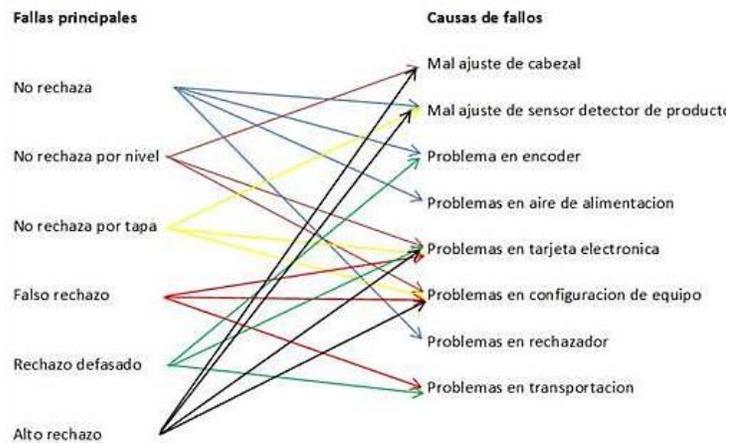


Figura 5.1. Relaciones de fallas y causas

#### 5.1.1 Definición de variables lingüísticas

De forma matemática en el universo de discurso  $U$  el subconjunto difuso  $A$  de  $U$  es definido como una función de membresía  $\mu_A(x)$  que asigna a cada elemento  $x$  en  $U$  para un número real en el intervalo  $[0, 1]$ . El valor de la función  $\mu_A(x)$  denotan los grados de pertenencia de  $x$  en  $A$ . Cuanto mayor sea el valor de  $\mu_A(x)$  más fuerte es el grado de pertenencia para  $x$  en  $U$  (Chatterjee, Sutradhar, & B, 2008)

En base a lo anterior y a la información analizada se declaran las variables lingüísticas de cada sistema difuso en la tabla se muestran los 3 sistemas en los que se dividió el equipo que se analizó para esta implementación, cada sistema cuenta con sus respectivos conjuntos difusos en su universo de discurso mostrados en la tabla 5.1

Sistema Difuso	Variable Lingüística	Conjunto difuso	Universo de discurso
Nivel	Altura de cabezal (A.C.)	Bajo, Correcto, Alto	0 – 10 mm
	Cuentas (Cu.)	Bajas Normales, Altas	0 – 400 cuentas
	Compuerta (Co.)	Cerrado, Semi, Abierto	0 – 1
	Rechazo nivel (R.N.)	Nulo, Bajo, Normal, Alto	0 – 10
Desfasamiento	Altura detector Prod. (A.D.)	Baja, Correcta	-5 – 2 mm
	Dif. de velocidad (D.F.)	Bajo, Correcto, Alto	5 – 5 Hz
	Param. Distancia (D)	Cerrado, Semi, Abierto	-100 – 100 mm
	Rechazo desfasado (R.D.)	Aleatorio, Antes, Correcto, Después	0 – 10
Tapa	Altura sensor tapa (A. T.)	Bajo, Correcto, Alto	-5 – 5 mm
	Sensibilidad sensor tapa (S.T.)	Bajas Normales, Altas	0 – 10

Tabla 5.1 Declaración de variables lingüísticas con sus elementos

Los grados de pertenencia pueden ser determinados usando la función de pertenencia triangular la cual asume que  $A = A(a^L, a^C, a^R)$  es un numero triangular donde  $a^L, a^C$  y  $a^R$  denotan los limites bajos el centro y el limite alto de  $A$  respectivamente (Ramirez & V., 2008). El grado de pertenencia de  $A$  está determinada por la ecuación 5.1

$$\mu_A(x) \begin{cases} 0 & \text{de otra manera} \\ \left(\frac{x - a^L}{a^C - a^L}\right) & \text{Para } a^L < x < a^C \\ \left(\frac{a^R - x}{a^R - a^C}\right) & \text{Para } a^C < x < a^R \end{cases} \quad (5.1)$$

De la ecuacion 5.1 se desprenden las ecuaciones lara todas las variables linguisticas a continuacion se muestran las de variable Altura **Cabezal "AC"**:

$$\mu_{\text{Bajo}}(x) \begin{cases} 1 & \text{If } x < 2 \text{ mm} \\ \left(\frac{4 - x}{2}\right) & \text{If } 2 \leq x \leq 4 \text{ mm} \\ 0 & \text{If } x > 4 \text{ mm} \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\mu_{\text{Normal}}(x) \begin{cases} \left(\frac{x-3}{3}\right) & \text{If } 2 \leq x \leq 5 \text{ mm} \\ \frac{8-x}{3} & \text{If } 5 \leq x \leq 8 \text{ mm} \\ 0 & \text{If } x > 8 \text{ mm and } x < 2 \text{ mm} \end{cases} \quad (5.3)$$

$$\mu_{\text{Alto}}(x) \begin{cases} 0 & \text{If } x < 6 \text{ mm} \\ \frac{x-6}{2} & \text{If } 6 \leq x \leq 8 \text{ mm} \\ 1 & \text{If } x > 8 \text{ mm} \end{cases} \quad (5.4)$$

En base a las ecuaciones 5.2, 5.3 y 5.4 se obtienen las gráficas de la figura 5.2

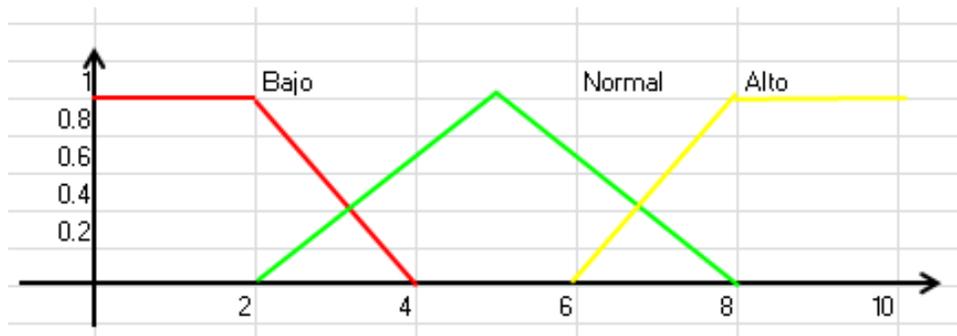


Figura 5.2 Expresión gráfica de variable lingüística.

El mismo procedimiento se realiza para todas las variables lingüísticas, de modo que se puedan interactuar entre ellas dependiendo del sistema difuso.

### 5.1.2 Creación de la base del conocimiento.

Con el fin de gestionar la gran cantidad de fallas y síntomas se dividen en tres sistemas difusos “Rechazo Nivel”, “Rechazo Desfasado” y “Rechazo por Tapa”, entonces la base del conocimiento se crea en tres secciones en función de las condiciones o síntomas de operación de cada sistema del equipo y como repercuten en el tipo de rechazo, como se muestra en la figura 5.3, cada sistema estará compuesto por reglas lingüísticas que relacionan las variables de entrada para proporcionar una salida, al final se unirán las salidas en un nuevo S.E.D. para buscar obtener un diagnóstico de la falla y probables soluciones.

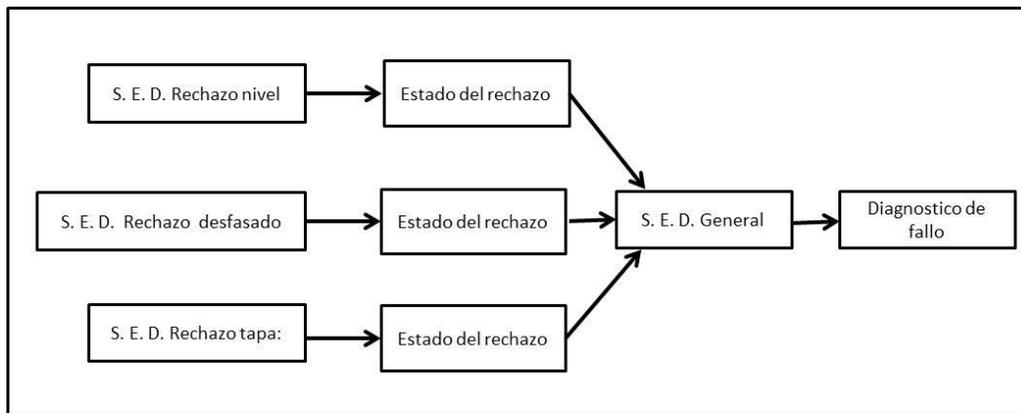


Figura 5.3 Estructura general de la base del conocimiento

Ya definidas las variables lingüísticas de entrada y de salida, los conjuntos difusos de cada variable y el universo de discurso, se crean las reglas para cada sistema, bajo la arquitectura mamdani la estructura de la regla será:

$$\text{Si } X \text{ es } A \text{ entonces } Z \text{ es } B \quad (5.5)$$

Donde tanto X como Z son variables lingüísticas y A y B son conjuntos difusos, y se divide en dos partes, la función de pertenencia antecedente resultante y la función de pertenencia consecuente (Bonifacio Martin del Brio, 2002), de la expresión anterior y de las variables lingüísticas del sistema se derivan 27 reglas difusas para el sistema difuso Nivel, se toman solo tres reglas para mostrar procedimiento de solución. En la figura 5 se muestran las 3 reglas ya con valores definidos a cada

variable, para aplicar Mamdani el conectivo Y se reemplaza por la intersección, el mínimo de las 2 funciones de pertenencia se evalúa por la parte antecedente de las reglas difusas y los resultados de cada regla se suman formando un polígono que posteriormente se desdifusificara para obtener un resultado numérico.

Una vez teniendo el polígono mostrado en la figura 5.4 se aplica uno de los diferentes métodos de desdifusificación en este caso se aplicó el de promedios ponderados tomando la ecuación 3.3 del capítulo 3 de esta manera se resuelve mediante la ecuación 5.6

$$\frac{(3)(0.25)}{0.5+0.5+0.25} + \frac{(6.65)(0.5)}{0.5+0.5+0.25} + \frac{(6.65)(0.5)}{0.5+0.5+0.25} = 5.98 \quad (5.6)$$

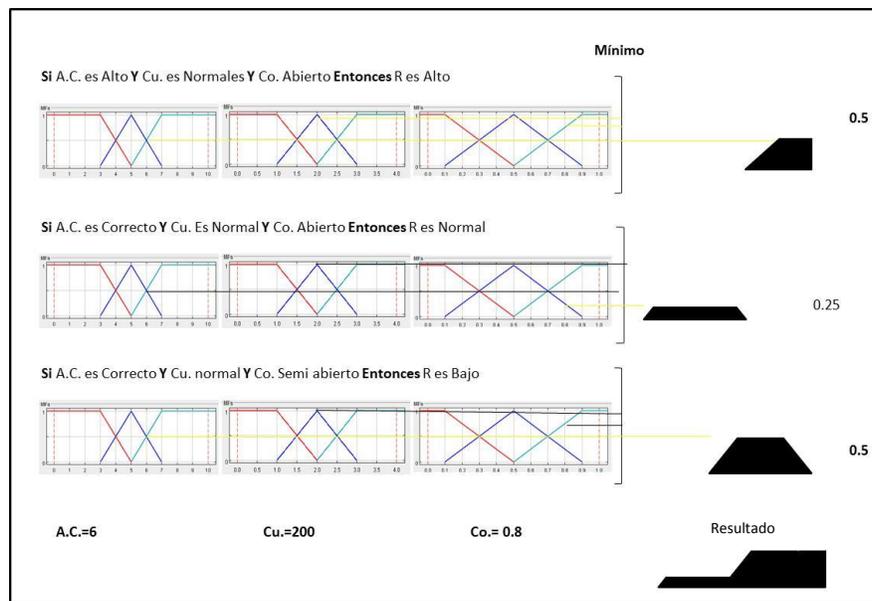


Figura 5.4. Aplicación de Mamdani a reglas difusas.

## 5.2 Aplicación del modelo en Shell Fis Pro

Se aplica el modelado del sistema en la Shell Fis Pro la cual es un software libre y además solo se emplea para fines educativos para la comprobación del modelo

propuesto esta aplicación se muestra en la figura 5.5 en donde se puede apreciar únicamente el sistema difuso Rechazo Nivel.

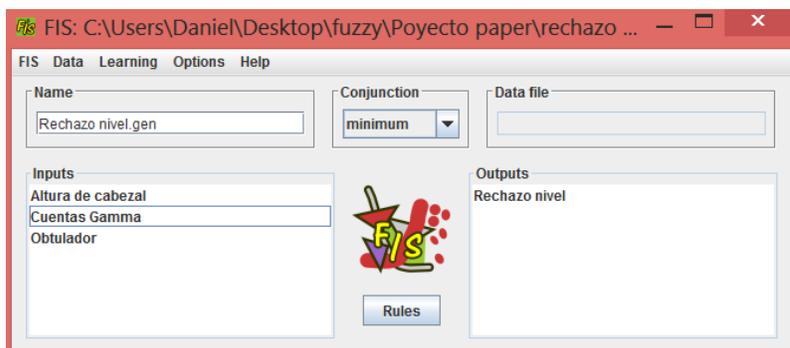


Figura 5.5. Modelo aplicado en Fis-Pro .

Dentro de este sistema se encuentran las variables lingüísticas como se muestran en las figuras 5.6, 5.7 y 5.8

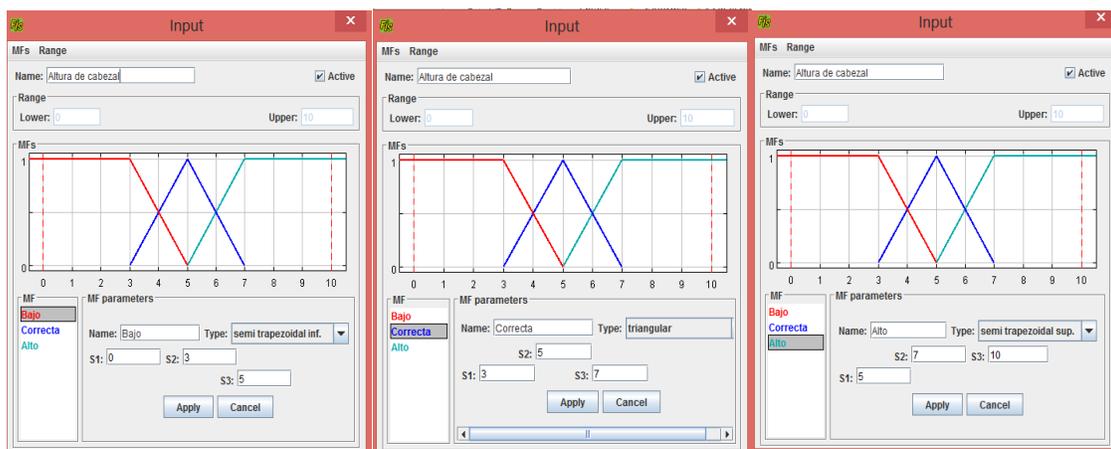


Figura 5.6 Conjuntos difusos de la variable Altura Cabezal

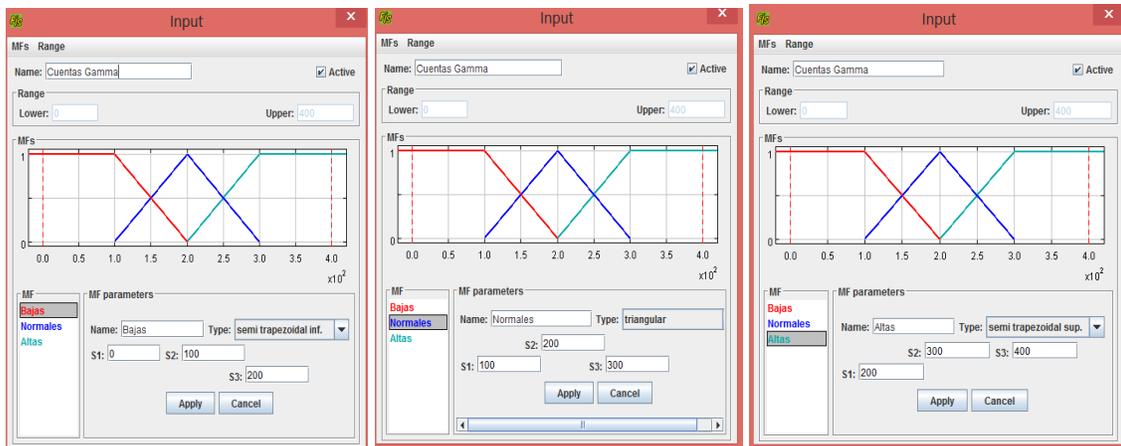


Figura 5.7 Conjuntos difusos de la variable Cuentas

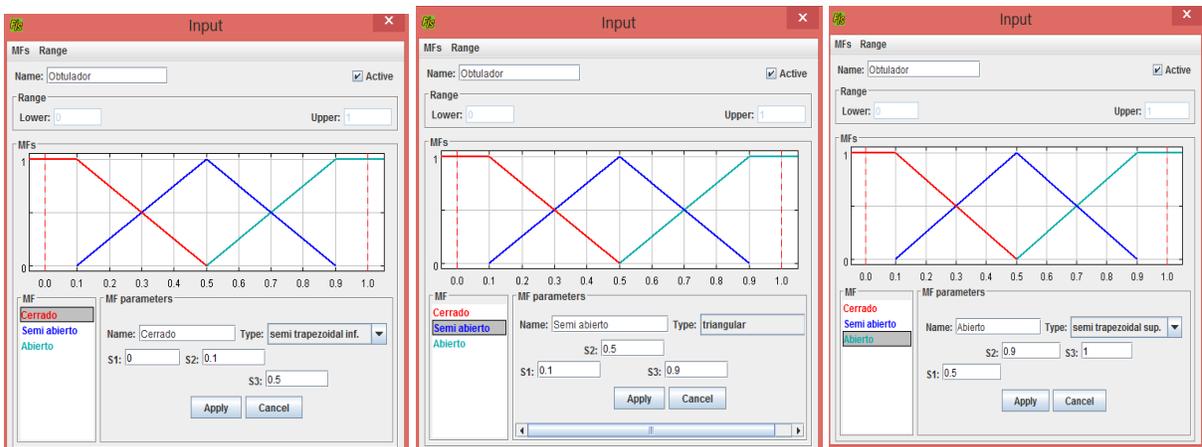


Figura 5.8 Conjuntos difusos de la variable Obtudador

Se colocan los mismos datos de las variables en Fis-Pro y se obtienen resultados muy similares como se muestra en la figura 5.10, la diferencia entre los resultados radica en que solo se evaluaron 3 reglas y Fis-Por evaluó las 27 reglas como se muestra en la figura 5.9, es por ello que el resultado final es de 6.67 sin embargo el polígono de salida es muy similar al que se obtuvo en la figura 5.4

Rule	Active	IF Altur...	AND Cu...	AND Ob...	THEN R...
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Bajas	Cerrado	Nulo
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Bajas	Semi abierto	Nulo
3	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Bajas	Abierto	Bajo
4	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Normales	Cerrado	Nulo
5	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Normales	Semi abierto	Bajo
6	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Normales	Abierto	Bajo
7	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Altas	Cerrado	Nulo
8	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Altas	Semi abierto	Alto
9	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Altas	Abierto	Normal
10	<input checked="" type="checkbox"/>	Correcta	Bajas	Cerrado	Nulo
11	<input checked="" type="checkbox"/>	Correcta	Bajas	Semi abierto	Bajo
12	<input checked="" type="checkbox"/>	Correcta	Bajas	Abierto	Bajo
13	<input checked="" type="checkbox"/>	Correcta	Normales	Cerrado	Nulo
14	<input checked="" type="checkbox"/>	Correcta	Normales	Semi abierto	Bajo
15	<input checked="" type="checkbox"/>	Correcta	Normales	Abierto	Normal
16	<input checked="" type="checkbox"/>	Correcta	Altas	Cerrado	Nulo
17	<input checked="" type="checkbox"/>	Correcta	Altas	Semi abierto	Bajo
18	<input checked="" type="checkbox"/>	Correcta	Altas	Abierto	Alto
19	<input checked="" type="checkbox"/>	Alto	Bajas	Cerrado	Nulo
20	<input checked="" type="checkbox"/>	Alto	Bajas	Semi abierto	Bajo
21	<input checked="" type="checkbox"/>	Alto	Bajas	Abierto	Normal
22	<input checked="" type="checkbox"/>	Alto	Normales	Cerrado	Nulo
23	<input checked="" type="checkbox"/>	Alto	Normales	Semi abierto	Bajo
24	<input checked="" type="checkbox"/>	Alto	Normales	Abierto	Alto
25	<input checked="" type="checkbox"/>	Alto	Altas	Cerrado	Nulo
26	<input checked="" type="checkbox"/>	Alto	Altas	Semi abierto	Alto
27	<input checked="" type="checkbox"/>	Alto	Altas	Abierto	Alto

Figura 5.9 Reglas evaluadas en Fis Pro

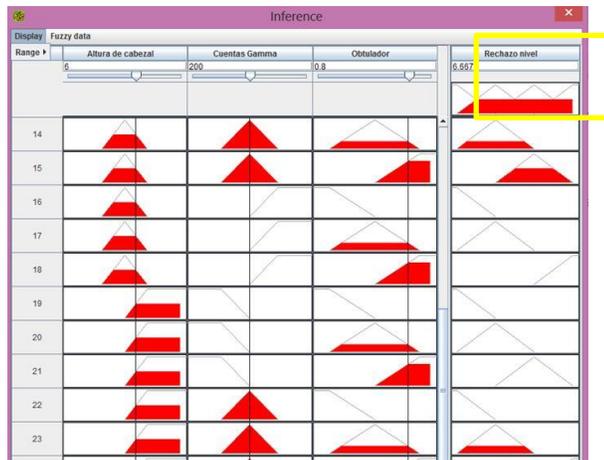


Figura 5.10 Inferencia de reglas implementadas en Fis-Pro primer Sistema Experto

Para el sistema Experto Difuso “Rechazo Desfasado” también se tienen las variables lingüísticas las cuales se muestran en la figura 5.11 y las diferentes reglas mostradas en la figura 5.12.

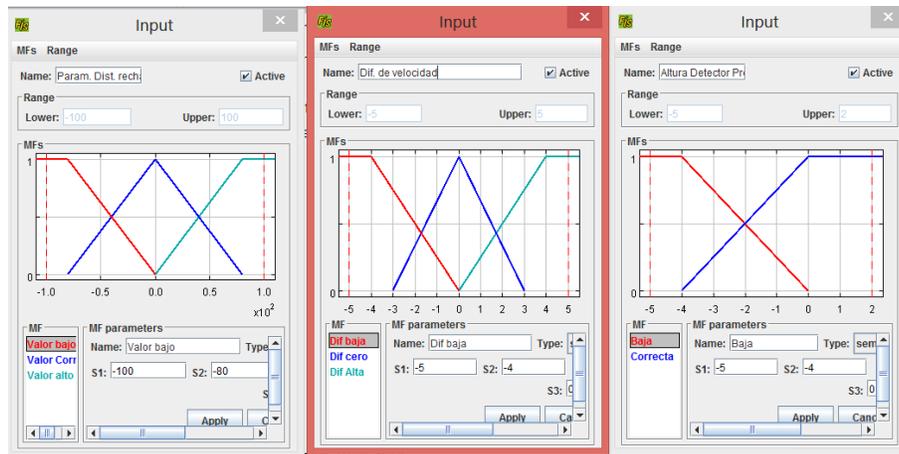


Figura 5.11 Conjuntos difusos de las variables del sistema Rechazo Desfasado

Rule	Active	IF Dif. de v...	AND Para...	AND Altura...	THEN Rech...
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif baja	Valor bajo	Baja	Aleatorio
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif baja	Valor bajo	Correcta	Aleatorio
3	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif baja	Valor Correcto	Baja	Aleatorio
4	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif baja	Valor Correcto	Correcta	Despues
5	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif baja	Valor alto	Baja	Despues
6	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif baja	Valor alto	Correcta	Despues
7	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif cero	Valor bajo	Baja	Aleatorio
8	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif cero	Valor bajo	Correcta	Antes
9	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif cero	Valor Correcto	Baja	Aleatorio
10	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif cero	Valor Correcto	Correcta	Correcto
11	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif cero	Valor alto	Baja	Aleatorio
12	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif cero	Valor alto	Correcta	Despues
13	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif Alta	Valor bajo	Baja	Antes
14	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif Alta	Valor bajo	Correcta	Antes
15	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif Alta	Valor Correcto	Baja	Aleatorio
16	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif Alta	Valor Correcto	Correcta	Antes
17	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif Alta	Valor alto	Baja	Aleatorio
18	<input checked="" type="checkbox"/>	Dif Alta	Valor alto	Correcta	Aleatorio

Figura 5.12 Reglas evaluadas en Fis Pro del segundo Sistema Experto

En el segundo sistema experto solo se tienen 18 reglas debido a que los conjuntos difusos de las variables propuestas son en menor cantidad comparadas con el primer sistema difuso.

Realizando la inferencia de las reglas difusas y asignando un valor a cada variable se obtienen los resultados del sistema como se muestra en la figura 5.13

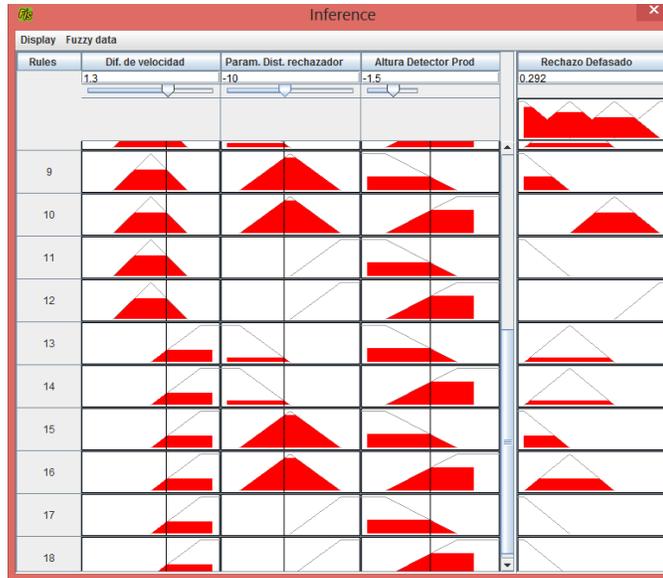


Figura 5.13 Inferencia de reglas implementadas en Fis-Pro Segundo Sistema Experto

Para el tercer sistema Experto solo se tienen 2 variables lingüísticas de entrada y una de salida las cuales se muestran en la figura 5.14, como se mencionó con anterioridad al tener menos conjuntos difusos en las variables lingüísticas las reglas que se pueden formar disminuyen por lo tanto en este sistema solo se tienen 9n reglas como se muestra en la figura 5.15

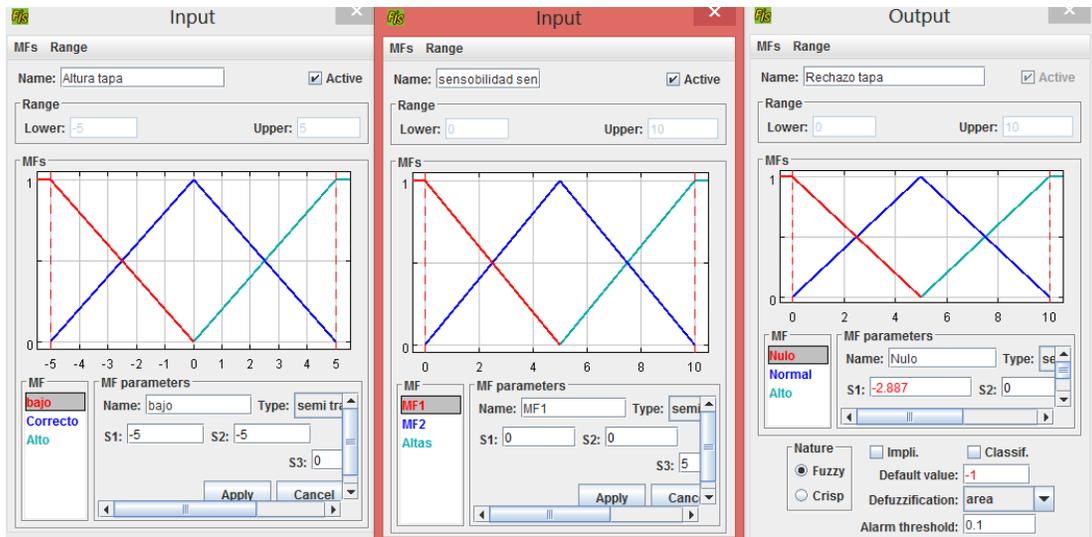


Figura 5.14 Conjuntos difusos de las variables del sistema Rechazo Tapa

Rule	Active	IF Altura tapa	AND sensibili...	THEN Rechazo ...
1	<input checked="" type="checkbox"/>	bajo	Bajo	Normal
2	<input checked="" type="checkbox"/>	bajo	Normal	Alto
3	<input checked="" type="checkbox"/>	bajo	Altas	Nulo
4	<input checked="" type="checkbox"/>	Correcto	Bajo	Alto
5	<input checked="" type="checkbox"/>	Correcto	Normal	Normal
6	<input checked="" type="checkbox"/>	Correcto	Altas	Normal
7	<input checked="" type="checkbox"/>	Alto	Bajo	Alto
8	<input checked="" type="checkbox"/>	Alto	Normal	Normal
9	<input checked="" type="checkbox"/>	Alto	Altas	Normal

Figura 5.15 Reglas evaluadas en Fis Pro del tercer Sistema Experto

De la misma manera que en los sistemas anteriores se realiza la inferencia de las reglas, esta inferencia se muestra gráficamente en la figura 5.16 en donde muestra valores correctos de operación y a la salida una pertenencia completamente de rechazo normal en la variable difusa con un valor de 5 mostrando la relación de pertenencia exclusiva al conjunto Rechazo normal de la variable lingüística Rechazo Tapa.

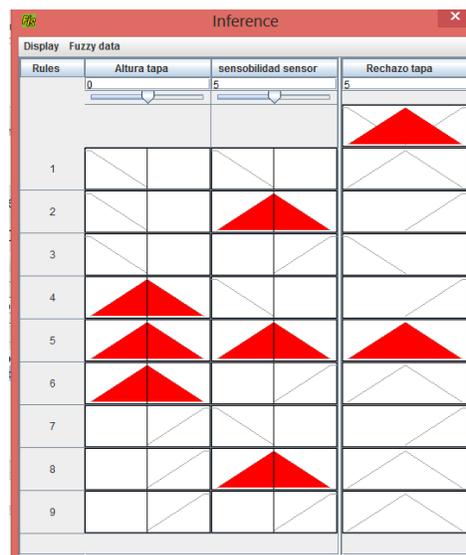


Figura 5.16 Inferencia de reglas implementadas en Fis-Pro tercer Sistema Experto

**CAPITULO 6**

**TRABAJO EXPERIMENTAL E INTERPRETACION DE  
RESULTADOS**

## 6.0 TRABAJO EXPERIMENTAL E INTERPRETACION DE RESULTADOS.

### 6.1 Evaluación del proyecto.

Se obtienen resultados favorables por cada sistema, en la figura 6.1, 6.2 y 6.3 se muestran los resultados de los Sistemas Expertos de Nivel, Desfasamiento y Tapa en donde se obtiene el tipo de rechazo que se tendría de acuerdo a los valores de las variables de entrada y también el valor numérico que representa hacia donde es la tendencia del rechazo de acuerdo a los conjuntos difusos de salidas

Sistema Experto Difuso "Rechazo Nivel"						
variable lingüística entrada			Variable lingüística salida		Diagnostico sistema propuesto	Diagnóstico de técnico experto
A. C.	C.	O	R.D.			
			Termino Difuso	Termino numérico		
6.1	200	0.82	Normal/Alto	8.5	Rechazo alto	Rechazo alto
5	148	1	Bajo/Normal	4.93	Rechazo Normal	Rechazo Normal
5	264	1	Normal/Alto	9.4	Rechazo Alto	Rechazo Alto
5	264	0.32	Nulo/Bajo	0.06	Rechazo Nulo	Rechazo Nulo
3.9	200	1	Bajo/Normal	4.8	Rechazo Bajo	Rechazo Normal
2.5	200	1	Bajo	3.33	Rechazo Bajo	Rechazo Bajo
3.3	48	0.5	Nulo/Bajo	0.25	Rechazo Nulo	Rechazo Nulo
3.3	48	0.2	Nulo/Bajo	0	Rechazo Nulo	Rechazo Nulo
3.3	48	0.81	Nulo/Bajo	3.33	Rechazo Bajo	Rechazo Bajo
6.9	280	0.84	Bajo/Alto	10	Rechazo Alto	Rechazo alto
5	200	1	Normal	6.667	Rechazo Normal	Rechazo Normal
5	200	0	Nulo	0	Rechazo Nulo	Rechazo Nulo

Tabla 6.1. Resultado de la implementación del modelo en Fis-Pro

En la tabla 6.1 se observa la relación que existen entre las variables de entrada con la respectiva salida del sistema, la validación del sistema se realiza a pie de equipo con la compañía de dos técnicos expertos los cuales apoyan a validar la efectividad del sistema y también nos apoyan a colocar al equipo con los valores de las variables de entrada de esa manera se corrobora un bloque de 12 pruebas en

donde solo en 1 prueba el resultado no fue el correcto sin embargo dentro de la salida difusa estuvo contemplado el resultado certero.

De esta manera se tiene una efectividad del Sistema Experto Difuso por Nivel del 91.66% ya que solo 1 de 11 pruebas fallo.

Sistema Experto Difuso "Rechazo Desfasamiento"						
variable lingüística entrada			Variable lingüística salida		Diagnostico sistema propuesto	Diagnóstico de técnico experto
D. F.	D.	A. D.	R.D.			
			Termino Difuso	Termino numérico		
1.3	-36	-3.74	Aleatorio/Antes	0	Rechazo aleatorio	Rechazo aleatorio
0	-36	0	Antes/Correcto	6.667	Rechazo antes aun correcto	Rechazo antes aun correcto
0	44	0	Correcto/Después	9.25	Rechazo después	Rechazo después tocando botella
0	0	0.88	Correcto	6.667	Rechazo Correcto	Rechazo Correcto
-3.2	0	0.6	Después	9.667	Rechazo después	Rechazo después
2.6	0	0.6	Antes/Correcto	3.333	Rechazo antes	Rechazo antes
1.8	40	0.6	Todos iguales	0.917	Rechazo Aleatorio	Rechazo aleatorio
1.7	40	0.67	Todos iguales	7.389	Rechazo Correcto	Rechazo después
0	0	-3.47	Aleatorio/Antes	0.108	Rechazo Aleatorio	Rechazo aleatorio
0	-48	-0.87	Aleat./Antes/Corr.	3.33	Rechazo Normal	Rechazo Aleatorio
0	-48	0	Antes/Correcto	3.33	Rechazo antes	Rechazo Antes
0	50	0	Correcto/Después	9.375	Rechazo después	Rechazo Después

Tabla 6.2. Resultado de la implementación del modelo en Fis-Pro

En la tabla 6.2 se tienen los resultados del Sistema Experto Difuso Rechazo Desfasado, aplicando el mismo esquema de prueba que el primer sistema también solo se tiene un error en las 12 pruebas realizadas, por lo tanto también se tiene una efectividad de 91.66%.

Para el tercer Sistema de Rechazo por Tapa se muestran los resultados en la figura 6.3 en este sistema solo se tienen 9 pruebas ya que solo son 9 reglas difusas las que contiene, la efectividad del sistema disminuye ya que de las 9 pruebas en dos ocasiones se tienen errores del tipo de rechazo, por lo que se tiene una efectividad del 77.77% lo cual muestra un área de oportunidad para el modelado de la base del conocimiento del sistema

Sistema Experto Difuso "Rechazo Tapa"					
variable lingüística entrada		Variable lingüística salida		Diagnostico sistema propuesto	Diagnóstico de técnico experto
A. T.	S. T.	R.D.			
		Termino Difuso	Termino numérico	Rechazo	Rechazo
-4.1	5	Normal/Alto	5	Normal	Normal
-2.7	5	Normal/Alto	7.282	Normal	Alto
3.5	5	Normal	8.069	Alto	Alto
0	1	Normal/Alto	8.495	Alto	Alto
0	5	Normal	5	Normal	Normal
0	8	Normal	5	Normal	Normal/Nula
2	3.7	Normal/Alto	7.716	Alto	Alto
2	6.1	Normal Alto	6.57	Normal	Normal
3.5	9	Normal/Alto	5.955	Normal	Normal

Tabla 6.3. Resultado de la implementación del modelo en Fis-Pro

Por medio de los tres sistemas expuestos se puede simular el razonamiento de un técnico experto en referencia a la búsqueda de un fallo de rechazo dependiendo de sus variables de entrada.

El Sistema Experto Difuso Unión contiene las variables lingüísticas así como datos numéricos de las salidas las cuales son mostradas en la tabla 6.4.

Sistema Difuso	Variable Lingüística	Conjunto difuso	Universo de discurso
Unión	Rechazo nivel	Bajo, Correcto, Alto	0 – 10
	Rechazo Tapa	Bajas Normales, Altas	0 – 10
	Rechazo desfasado	Cerrado, Semi, Abierto	0 – 10
			0 – 10
	Problema encoder		0-1
	Problema tarjeta		0-1
	Problema rechazador		0-1
	Problema puente		0-1
	Problema parámetros		0-1

Tabla 6.4 Declaración de variables lingüísticas con sus elementos

Ya definidas las variables lingüísticas de entrada y de salida, los conjuntos difusos de cada variable y el universo de discurso, se crean las reglas para cada sistema, pero para la obtención de valores numéricos a la salida se realiza una desfusificación de tipo Sugeno, de esta manera obtenemos un valor numérico de 0 a 1 para poder realizar la ponderación de las fallas dependiendo de las entradas de la expresión anterior y de las variables lingüísticas del sistema se derivan 48 reglas las cuales son analizadas, en este paso se crearon 5 salidas diferentes con un nivel de ponderación de 0 a 1 esto con el fin de que dependiendo de los datos de entrada será la posibilidad de falla el valor cercano a 1 y de 0 la posibilidad de que no exista una falla por ello las salidas ya no arrojaran un valor difuso.

De la relación de entradas y salidas el sistema arroja un total de 48 reglas difusas las cuales son analizadas por los expertos para determinar la ponderación de relación con las fallas determinadas algunas reglas se muestran en la figura 6.1, en donde se observa que dependiendo de los datos de entrada el sistema activara las diferentes reglas previamente ponderadas por los expertos.

12	<input checked="" type="checkbox"/>	Nulo	Despues	Alto	0.4	0.1	0.9	0.7	1
13	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Aleatorio	Nulo	1	0.8	0.6	0.2	0.2
14	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Aleatorio	Normal	1	0.8	0.9	0.3	0.2
15	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Aleatorio	Alto	1	0.7	0.8	0.1	0.4
16	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Antes	Nulo	0.5	0.1	1	0.4	0.7
17	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Antes	Normal	0.5	0.1	1	0.1	0.6
18	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Antes	Alto	0.5	0.1	0.9	0.1	0.8
19	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Correcto	Nulo	0	0.3	1	0.2	0.5
20	<input checked="" type="checkbox"/>	Bajo	Correcto	Normal	0	0.1	1	0.1	0.8
21	<input checked="" type="checkbox"/>	Baio	Correcto	Alto	0	0.2	1	0.1	0.7

Figura 6.1. Reglas difusas de Sistema Unión.

Se continua con la realización de las pruebas del sistema para verificar su eficacia para ello se realiza la inferencia entre las reglas y se colocaron los datos de las variables en Fis-Pro, en la figura 6.2 se muestra la pantalla de salida de la inferencia en donde indica que al tener un rechazo por nivel normal, además un rechazo por tapa normal y un rechazo desfasado correcto/antes entonces la salida del sistema experto arroja que se activan las ponderaciones más altas de las salidas

de Problema Parámetros y Problema encoder con valores de 0.631 y 0.413 respectivamente, de esta manera indica el sistema que al tener estas condiciones de entrada o mejor llamados síntomas de funcionamiento entonces lo que se tiene que revisar inicialmente son los parámetros de la distancia del rechazo y que después se revise el encoder por un probable daño del componente.

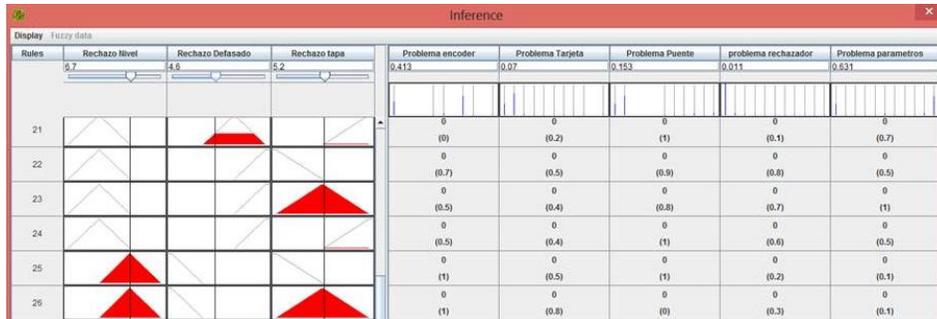


Figura 6.2. Reglas difusas implementadas en Fis-Pro

Se realiza una corrida de 12 pruebas comparando el diagnóstico del sistema experto contra el del personal experto, los resultados se muestran en la tabla 6.5. Los resultados de la tabla se contrastan con el funcionamiento del equipo rechazador simulando diferentes condiciones de operación obteniendo resultados muy parecidos a los obtenidos por el Sistema Experto Difuso propuesto.

En la tabla 6.5 se observan los resultados contrastados con el experto humano, de las 12 pruebas solo en 2 de ellas el sistema no fue capaz de diagnosticar el lugar del problema sin embargo como segundo punto de ponderación acertó con el problema real detectado por el experto, se muestra la ponderación en orden tomando en cuenta que los números cercanos al cero significan que es poco probable que la falla se presente y al 1 significa que la falla es muy probable que se presente, en la primer prueba se observa que como todas las variables de entrada se encuentran en operación correcta en las salidas ninguna se acerca al 1 ya que indica que el equipo opera de forma correcta.

Entradas del Sistema Experto						Ponderación de fallas principales					Diagnóstico del Experto
Nivel		Desfasado		Tapa		Encoder	Tarjeta	Puente	Rechazador	Parámetros	
Real	Difuso	Real	Difuso	Real	Difuso						
6.7	Normal	6.7	Correcto	5	Normal	0.013	0.01	0.02	0.017	0.023	No existen fallas en el sistema
6.7	Normal	0	Aleatorio	5	Normal	1	0.799	0.008	0.299	0.101	Falla en encoder
6.7	Normal	4.5	Antes/Correcto	5	Normal	0.45	0.067	0.081	0.004	0.656	Falla en ajuste de parámetro dist. Rechazador
4.3	Bajo	6.7	Correcto	5	Normal	0.013	0.104	0.97	0.113	0.786	Ajuste en altura en puente de inspección
8.9	Alto/Normal	6.7	Correcto	5	Normal	0.013	0.074	0.668	0.146	0.606	Ajuste en altura en puente de inspección
0	Nulo	10	Después	10	Alto	0.4	0.1	0.9	0.7	1	Problema en puente y en parámetros
6.7	Normal	1.1	Aleatorio/Antes	10	Alto	0.833	0.636	0.803	0.232	0.43	Problema en puente de inspección
0	Nulo	0	Aleatorio	0	Nulo	1	0.5	0	0	0	Falla en encoder
4.1	Bajo/Normal	6.7	Correcto	0	Nulo	0.012	0.304	0.997	0.118	0.594	Problema en puente de inspección
3.3	Bajo	8.6	Correc./Desp.	7.1	Normal/Alto	0.227	0.284	0.937	0.404	0.774	Daño en sensor detector de producto en puente
3.3	Bajo	6.7	Correcto	7.1	Normal/Alto	0.018	0.149	0.995	0.123	0.763	Ajuste de altura de puente y ajuste de parámetros
4	Bajo/Normal	6	Antes/Correcto	5.5	Normal/Alto	0.189	0.094	0.772	0.072	0.694	Problema en altura de puente y parámetro de dist.
7.3	Normal/Alto	2.1	Aleatorio/Antes	6.1	Normal/Alto	0.769	0.462	0.491	0.151	0.586	Problema en parametros y Fallo en sensor detector en puente
7.3	Normal/Alto	6.8	Correc./Desp.	4.2	Nulo/Normal	0.062	0.137	0.404	0.153	0.369	Problema en altura y sensor detector en puente

Tabla 6.5. Resultado de la implementación del modelo en Fis-Pro

En la prueba 2 se muestra una ponderación de 1 en falla encoder lo que muestra que el problema definitivamente se encuentra en el encoder sin embargo en la prueba 5 se observa que la ponderación está muy cercana entre falla puente y falla parámetro ya que ambas tienen la posibilidad de estar teniendo problemas se observa que la de mayor ponderación es la que resulta la correcta.

El valor que asigna el experto será el nivel de importancia al buscar en donde se encuentra la falla lo que indica que se debe de comenzar la búsqueda de la falla a partir del valor mayor hacia el menor.

**CAPITULO 7**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **7.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1 Conclusiones**

Un sistema Experto Difuso tiene grandes aplicaciones en donde los sistemas lineales resulta muy complejo modelarlos. El modelado del Sistema Experto Difuso presentado en este trabajo tiene gran utilidad en el diagnóstico de fallas en el equipo analizado, la efectividad del sistema depende de la veracidad o de la calidad de información con el que sea alimentada la base del conocimiento; este modelado puede ser replicado en otros equipos y con la unión de sistemas en cascada se obtendrán mejores resultados sin aumentar la complejidad del sistema, el número de sistemas por cada equipo en el caso de una réplica estará definido por la cantidad de sistemas que los expertos determinen en el análisis de la base del conocimiento, la información que proporciona estos tipos de sistemas ayudan a lograr obtener un diagnóstico más eficiente cuando el personal experto no se encuentra en la falla, al tener un diagnóstico más certero la toma de decisiones será más adecuada para la solución del problema.

En este trabajo se logró almacenar la información experta de los técnicos expertos en una base del conocimiento que inferirá sus reglas por medio de lógica difusa, esto con el fin de que no sea necesaria la presencia de un técnico experto para la solución de la falla únicamente se basara en los síntomas presentados en el equipo analizado en la forma de rechazo para que el sistema determine en base a esas condiciones en donde está el problema de un rechazo inadecuado, como se observó en los resultados el índice de asertividad del sistema comparado con el personal experto es alto, lo que ayuda a disminuir el tiempo en que se solucione una falla ya que cualquier técnico con conocimiento básico del equipo lograra diagnosticar la falla con apoyo del sistema y no se tendrá que esperar hasta la llegada del experto.

Una de las ventajas de un Sistema Experto es que no omite condiciones, reglas y tampoco obvia situaciones como muchas veces los técnicos lo hacen por la ceguera de taller.

## **7.2 Recomendaciones**

Se debe tener precaución al momento de definir las variables lingüísticas, sus conjuntos y los universos de discurso ya que es la estructura de como funcionara la lógica del sistema, también se debe tener mucha precaución con la calidad de la información experta ya que esta aumentara la efectividad del sistema o en su caso la disminuirá.

## **7.3 Trabajos futuros**

- Replicación del modelo a otros equipos.
- Creación de la aplicación propia para realizar las inferencias difusas con su interface gráfica hacia el usuario.
- Modelado con sistemas difusos híbridos.
- Implementación del modelo difuso dentro de la programación de controladores lógicos programables.

# Referencias

1. Abdelaziz, A., Mekhamer, S., & Nada, M. (2010). A fuzzy expert system for loss reduction and voltage control in radial. *Electric Power System Research*, 80(8), 893 a 897.
2. Bonifacio Martin del Brio, A. S. (2002). *Redes aneuronales y Sistemas Difusos*. Madrid, España: Alfaomega.
3. Burak Ozyurt, A. K. (1996). A hybrid hierarchical neural network-fuzzy expert system. *Fuzzy Sets and Systems*, 11-25.
4. Cen Nan, F. K. (2008). Real-time fault diagnosis using knowledge-based. *Procces safety and environmental protection*, 55-71.
5. Chatterjee, D., Sutradhar, G., & B, & O. (2008). Fuzzy rule-based prediction of hardness for sintered HSS components. *Journal of Materials Processing Technology*, , 212-220.
6. Chen, J.-L., & Rao, N. (1993). A FUZZY EXPERT SYSTEM FOR FAULT DIAGNOSIS IN ELECTRIC DISTRIBUTION SYSTEMS. *Ingeniería Informática Conferencia Canadiense sobre Productos Eléctricos*, 1283-1286.
7. Dash, S. M. (2004). A novel interval-halving framework for automated. *identification of process trends*, 149–162.
8. Duran, J. B. (2003). Nuevas Tendencias del Mantenimiento en la Industria Electrica. *SIMCE-CIER*.
9. Eliseo G., D. G. (1997). *Cuadernos de ingeniería de proyectos 1*. Valencia: servicio de publicaciones.
10. Etik, N., Allahverdi, N., Sert, I. U., & Saritas, I. (2009). Design of fuzzy expert system for the control of air conditioning system in an operating room. *Expert Systems with Applications*, 36(6), 9753-9758.
11. Femsa, C. C. (s.f.). *Coca Cola Femsa*. Recuperado el 23 de Octubre de 2012, de Conociendo Coca Cola Femsa: [www.femsa.com/es](http://www.femsa.com/es)
12. Fernandez, D. G. (2008). *Metodología de la investigación guía practica*. Mexico: trillas.
13. Hadjimichael, M. (2009). A fuzzy expert system for aviation risk assessment. *Expert Systems with Applications*, 6512–6519.
14. Humanos, R. (2011). *Caso Organizacional Coca Cola FEMSA Planta Apizaco*. Apizaco.
15. Jaramillo, C. M. (2010). *RCM CASOS DE ÉXITO Y SUS FACTORES CLAVE*. Recuperado el 24 de Marzo de 2014, de <http://www.rcm2-soporte.com/component/flippingbook/book/7>

16. Kandil, M., Elmitwally, A., & Elnaggar, G. (2006). NEW EXPERT SYSTEM FOR FAULT DIAGNOSIS. *Pendiente*, 140-145.
17. L.M. Bartlett, E. E. (2009). Integrated system faultdiagnostics utilising digraphand fault. *Reliability Engineering and System Safety*, 1107–1115.
18. Lahoz-Beltrá, R. (2004). *Bioinformática, simulación, vida artificial e inteligencia artificial*. Madrid: Díaz de Santos.
19. Lai, Y., Li, X., Xiong, Y., & Du, P. (2006). Design of an Efficient Intelligent Instrument Fault Diagnosis Expert System. *Ingeniería Computacional de Sistemas Aplicaciones, IMACS* , 1756-1761.
20. Leonid Sheremetov, I. B. (2008). Fuzzy expert system for solving lost circulation problem. *Applied Soft Computing*, 14-29.
21. Liu, B., Pan, H., & Li, X. (2010). An Expert System for Fault Diagnosis in Diesel Engine Based on Wavelet Packet. *Computación Inteligente y cognitiva Informática (ICICCI)*, 29-32.
22. Lotfi. A Zadeh, J. K. (1992). *Fuzzy Logic for the management of uncertainty*. Estados Unidos: John Wiley & Sons Inc.
23. M.H. Fazel Zarandi \*, P. A. (2009). Fuzzy agent-based expert system for steel making process. *Expert Systems with Applications*, 9539–9547.
24. Maldonado, M. A. (Diciembre de 2010). *Electro Industria*. Recuperado el 22 de Marzo de 2014, de <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1527&srch=mantenimiento%20correctivo&act=4&tip=7>
25. Mendonca, L. S. (2005). Fault detection and isolation of industrial processes using. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems.*, 851–856.
26. Mingbo Zhao, X. J. (01 de Junio de 2014). Fault diagnosis of rolling element bearings via discriminative subspace. *Expert Systems with Applications*, 41(7), 3391-3401.
27. Moubray, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. Soporte CIA LTDA.
28. Rafael, L. B. (2004). *Bioinformatica, Simulacion, Vida Artificial e Inteligencia Artificial* . Madrid España: Diaz de Santos.
29. Ramirez, E. M., & V., M. R. (2008). On the parmeter optimization of fuzzy inference systems. *International Journal of Computational Intelligence*.
30. R anganath Kothamasu, S. H. (2007). Adaptive Mamdani fuzzy model for condition-based maintenance. *Fuzzy Sets and Systems*, 2715 – 2733.
31. Rosano, F. L. (s.f.). *Posgrados UNAM*. Recuperado el 02 de Mayo de 2014, de [http://www.posgrado.unam.mx/publicaciones/ant\\_omnia/25/03.pdf](http://www.posgrado.unam.mx/publicaciones/ant_omnia/25/03.pdf)

32. Sheremetov, L., Batyrshin, I., Martinez, D. F., & Rodriguez, H. (2008). Fuzzy expert system for solving lost circulation problem. *Applied Soft Computing*, 14-29.
33. Tetsuhei Nakashima-Paniagua, J. D. (2014). Fabrication process suitability ranking for micro-electro-mechanical systems using a fuzzy inference system. *Expert Systems with Applications*, 4123–4138.
34. Wang, Y. H., Deng, C., Xiong, Y., & Wu, J. (2010). A Mixed Expert System for Fault Diagnosis. *Industrial Engineering and Engineering Management (IE&EM), 2010 IEEE 17Th International Conference*, 916-919.
35. Wikipedia. (7 de Febrero de 2013). *Wikipedia la enciclopedia libre*. Recuperado el 10 de Febrero de 2013, de [http://es.wikipedia.org/wiki/Interfaz\\_gr%C3%A1fica\\_de\\_usuario](http://es.wikipedia.org/wiki/Interfaz_gr%C3%A1fica_de_usuario)
36. Wolfram, A. F. (2001). Component-based multi-model approach for fault detection and diagnosis of a centrifugal pump. *Proc Am Control Conf*, 4443–4448.
37. Xian-ming, S., He-yong, Y., & Peng, Z. (2010). Fault Diagnosis Expert System of Artillery Radar Based on Neural Network. *International Conference On Computer Design And Applications (ICCCA 2010)*, 426-429.