



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

## FACULTAD DE INGENIERÍA

“Sistema experto prototipo para el análisis de fallas en tornillos  
ferrosos”

### TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO**

PRESENTA:

**Martínez Zarco Gregorio Iván**

DIRECTOR DE TESIS:

DR. VÍCTOR HUGO JACOBO ARMENDÁRIZ

México, D.F. Noviembre, 2014





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: ANÁLISIS DE FALLA Y SISTEMAS EXPERTOS .....</b>	<b>5</b>
1.1) Análisis de falla y su metodología .....	6
1.2) Metodología de análisis de falla en tornillos mediante inspección visual macroscópica .....	7
1.3) Sistemas expertos y sus componentes .....	9
<b>CAPÍTULO 2: FALLAS EN TORNILLOS .....</b>	<b>14</b>
2.1) Definición de tornillo .....	15
2.2) Tipos de tornillos .....	15
2.3) Fallas en tornillos causas y tipos .....	18
2.4) Fractura dúctil a tensión .....	21
2.5) Fractura dúctil a flexión.....	23
2.6) Fractura frágil a tensión .....	24
2.7) Fractura frágil a flexión .....	26
2.8) Fractura frágil a tensión torsión .....	28
2.9) Corrosión en tornillos.....	29
2.10) Falla por corrosión uniforme .....	30
2.11) Corrosión por picadura .....	31
2.12) Ludimiento .....	33
2.13) Falla de rosca en tornillos.....	34
2.14) Falla de tuerca.....	36
2.15) Fractura por fatiga a flexión .....	39
2.16) Fractura por fatiga a tensión.....	41
2.17) Deformación a tensión.....	42
2.18) Deformación a flexión .....	43
<b>CAPÍTULO 3: DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMA EXPERTO PARA ANÁLISIS DE FALLAS EN TORNILLOS .....</b>	<b>45</b>
3.1) Características del sistema experto de análisis de fallas en tornillos .....	46
3.2) Parámetros de selección de Shell .....	47
3.3) Shell seleccionado para desarrollo de sistema experto en análisis de falla en tornillos .....	48
3.4) Representación del conocimiento.....	50
3.5) Implementación del sistema experto en análisis de fallas en tornillos.....	52
3.6) Definición de la interfaz de usuario y mecanismo de selección.....	54
3.7) Entrega de resultados del sistema .....	56

<b>CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL PROTOTIPO .....</b>	<b>58</b>
4.1) Comportamiento en fatiga de uniones roscadas .....	59
4.2) Comportamiento en fatiga de uniones roscadas segundo caso .....	61
4.3) Caso de falla en tornillo de grúa industrial.....	64
4.4) Análisis de falla en tornillo de mausoleo.....	67
<b>Conclusiones .....</b>	<b>74</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>74</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>75</b>
<b>Anexo.....</b>	<b>76</b>

## **Introducción**

Un tornillo es un elemento mecánico de sujeción cuya configuración es cilíndrica y roscada en una porción de su longitud, su función consisten unir elementos, que cuentan con alojamientos o agujeros roscados equivalentes, mediante la aplicación de un par de torsión, su uso es sumamente recurrente ya que proporciona la ventaja de poder unir y desunir con relativa facilidad, generalmente se componen de materiales metálicos y en algunos casos de polímeros.

Como cualquier elemento mecánico en uso los tornillos llegan a presentar fallas, las cuales se encuentran referidas a cuatro posibles variables principalmente: material, manufactura, diseño y condiciones de operación.

Es posible determinar cuál de estas variables está involucrada en una situación de falla mediante la inspección visual de la pieza deteriorada, pero ello requiere del conocimiento de expertos en la materia capaces de emitir un diagnóstico además de recomendaciones preventivas y/o correctivas al respecto, pero en la realidad la disponibilidad de expertos enfocados al tema es escasa en comparación a los casos de falla en tornillos que pudieran presentarse y es por ello que surge la idea de desarrollar un sistema experto en análisis de fallas en tornillos capaz de apoyar a un humano no experto en la resolución de casos de falla permitiéndole corregir y/o prevenir la indeseada situación únicamente con la ayuda de una computadora.

## **Hipótesis**

-Es posible construir un sistema experto de análisis de fallas en tornillos capaz de identificar un tipo de falla mediante inspección visual y emitir recomendaciones al respecto.

## **Objetivo general**

-Desarrollar un sistema experto prototipo de análisis de falla en tornillos ferrosos.

## **Objetivos específicos**

-Desarrollar una base de conocimientos orientada a la determinación de tipos de falla en tornillos y las causas que los originan.

-Programar un sistema experto de análisis de falla en tornillos ferrosos.

-Validar la funcionalidad del sistema experto de análisis de falla en tornillos a partir de casos reportados en la literatura.

-Generar una herramienta de apoyo que permita resolver problemas básicos de fallas en tornillos a partir de información obtenida de la inspección visual

**Alcances del proyecto**

- El sistema experto trabaja con 16 tipos de falla en tornillos.
- Se enfoca a tornillos ferrosos.
- El análisis de falla se limita a la inspección visual macroscópica de una pieza que ha fallado.
- Las recomendaciones emitidas por el programa son generales ya que solamente contemplan las causas más comunes de falla en tornillos.
- El conocimiento experto presentado en este proyecto se tomó de lo reportado en la literatura.
- El sistema será validado con 5 casos de falla reportados en la literatura.

## **CAPÍTULO 1: ANÁLISIS DE FALLA Y SISTEMAS EXPERTOS**

En el capítulo se analizarán los aspectos relevantes del análisis de falla, describiendo su metodología haciendo énfasis en como ésta facilita identificar las causas de una falla, también se analizarán los aspectos relevantes del concepto de sistema experto haciendo énfasis en la descripción de sus componentes así como la descripción de las funciones de cada uno de estos.

### **Alcances**

- Se presenta el concepto de análisis de falla*
- Se describirá la metodología de análisis de falla*
- Se definirá la metodología de análisis de falla en tornillos mediante inspección visual macroscópica*
- Se presentará el concepto de sistema experto*
- Se enlistarán los componentes de sistema experto*

### 1.1) Análisis de falla y su metodología

#### Definición de falla

Es la situación en la que un elemento no es capaz de desempeñar su función a plena capacidad [1].

#### Análisis de falla

Es una metodología de estudio orientada a la determinación de las causas de la falla que ha presentado una pieza, componente o sistema. En ésta se analizan aspectos de la falla a través de la inspección visual y del análisis de laboratorio, esto se realiza en diferentes etapas (Ver Fig.1.1)

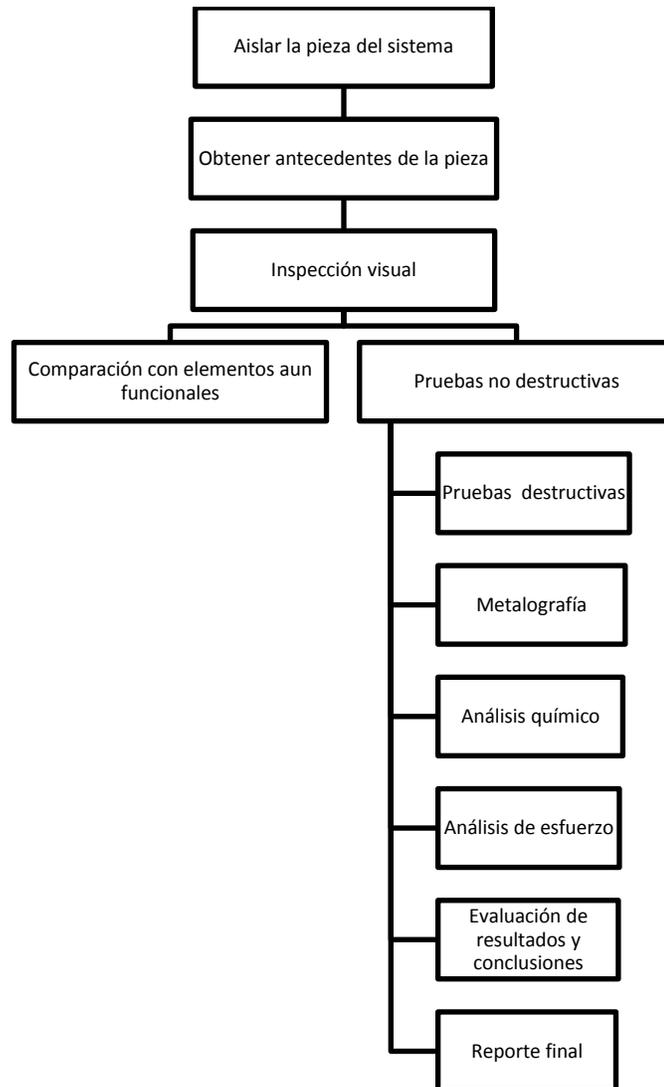


Fig1.1: Metodología de Análisis de Falla

1) *Aislar la pieza del sistema.*

Se refiere a tomar a la pieza como elemento único de interés dejando a un lado el resto de los componentes del sistema al que pertenece.

2) *Obtener antecedentes de la pieza.*

Se refiere a recabar información referente a las condiciones de uso de la pieza, método de manufactura y diseño así como datos de operación históricos.

3) *Inspección visual*

Implica analizar a nivel macroscópico a la pieza en busca de características con las cuales se pueda elaborar una hipótesis preliminar.

4) *Comparación con elementos aun funcionales*

Se refiere a analizar elementos iguales a la pieza en conflicto pero en condiciones funcionales con el objeto de identificar parámetros de interés en etapas previas a la situación de falla tales como defectos de manufactura, geométricos o condiciones del desarrollo de la falla.

5) *Pruebas no destructivas*

Implica analizar a la pieza mediante pruebas superficiales que no afecten su estructura física o química, tales como medición dimensional u observación microscópica, es aplicada en situaciones en las cuales la pieza analizada debe mantenerse integra debido a su costo o a la imposibilidad de reemplazarla.

6) *Pruebas destructivas*

Implica realizar pruebas que modifican la estructura física o química de la pieza tales como análisis metalográfico, ataques con sustancias químicas y ensayos de tracción o compresión las cuales proporcionarán parámetros más confiables en relación al análisis visual.

7) *Evaluación de resultados y conclusiones*

En esta etapa se analizan e interpretan los resultados de la totalidad de las pruebas realizadas en complemento con la información histórica y de operación de la pieza pudiendo emitir una conclusión fundamentada y confiable además de recomendaciones preventivas o correctivas.

8) *Reporte final*

Implica presentar la información generada durante el resto del proceso de análisis de falla así como conclusiones y recomendaciones de forma puntual y concisa.

## **1.2) Metodología de análisis de falla en tornillos mediante inspección visual macroscópica**

La metodología aplicada al desarrollo del presente proyecto corresponde al análisis de falla en tornillos mediante inspección visual macroscópica y se plantea a continuación (Ver Fig.1.2) la inspección visual macroscópica implica el análisis de las características superficiales de la pieza fallada sin el uso de instrumentos ópticos centrandose su atención en características como: geometría, tipo general de material, textura y marcas superficiales, pérdida de material, marcas de playa y orígenes de la fractura si fuera el caso.

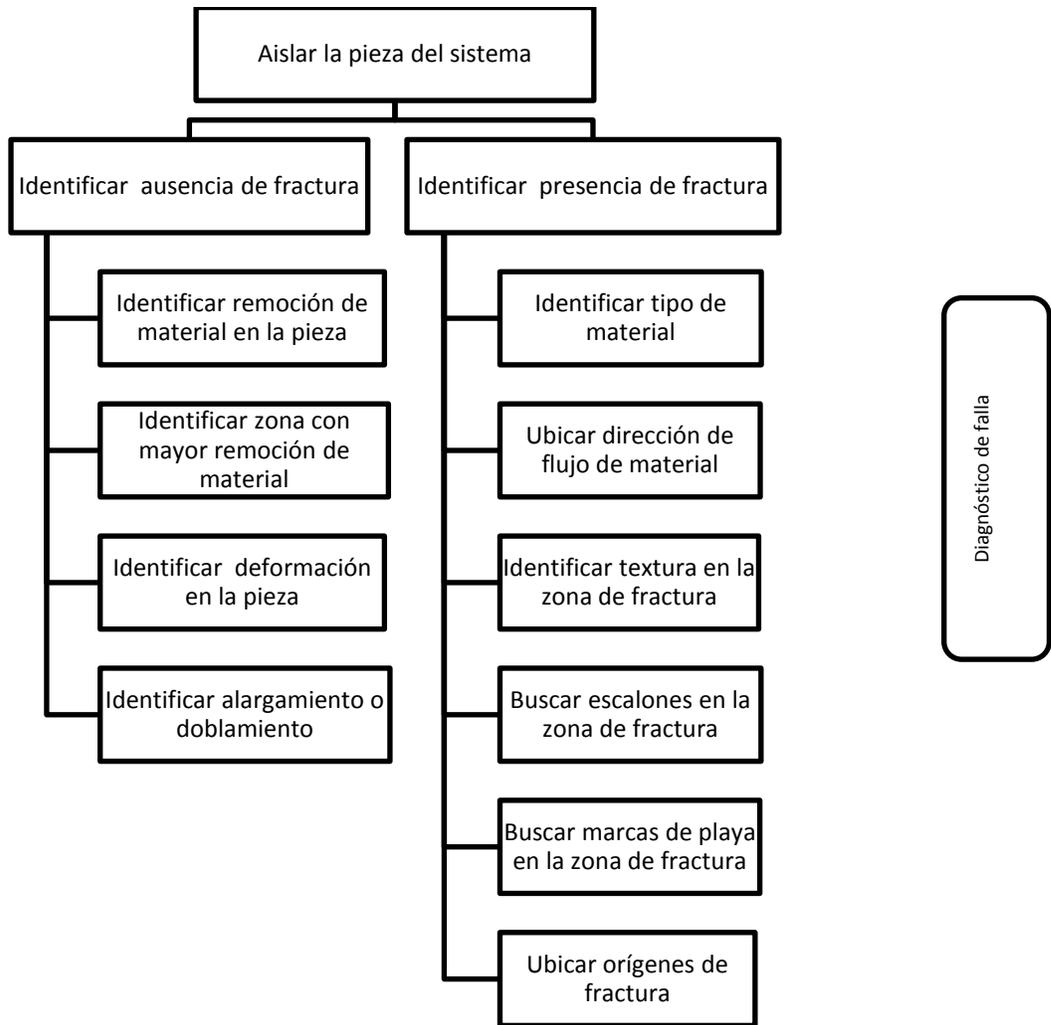


Fig.1.2: Metodología de análisis de falla en tornillos mediante inspección visual macroscópica

### *Identificar presencia de fractura*

- 1) Identificar presencia de fractura  
Se ha determinado que la falla de la pieza está asociada a una fractura.
- 2) Identificar tipo de material  
Se determina si existe flujo perceptible de material en etapas previas a la fractura, pudiendo establecer si se trata de material dúctil o frágil.
- 3) Ubicar dirección de flujo de material

En caso de que el material haya presentado flujo perceptible en etapas previas a la fractura se determina si dicho flujo se da en dirección paralela o perpendicular al eje principal del cuerpo cilíndrico del tornillo.

- 4) Identificar textura en la zona de fractura  
Se determina si la textura en la zona de fractura es fibrosa, granular o sus combinaciones.
- 5) Buscar escalones en la zona de fractura  
Se define si existen superficies con diferente nivel que conforman escalones en la zona de fractura haciendo énfasis en el tamaño de las mismas.
- 6) Buscar marcas de playa  
Se buscan marcas elípticas irregulares con patrón de media luna (marcas de playa) localizadas en alguna área de la zona de fractura.
- 7) Ubicar orígenes de fractura  
Se localizan los puntos de la circunferencia que presenten un desprendimiento de material mayormente pronunciado con respecto a los demás definiéndolos como puntos de inicio de fractura.

#### *Identificar ausencia de fractura*

- 1) Identificar ausencia de fractura  
Se ha determinado que la falla de la pieza no está asociada a una fractura.
- 2) Identificar remoción de material en la pieza  
Se define si la falla de la pieza se encuentra asociada a la pérdida de porciones de material
- 3) Identificar zona con mayor remoción de material  
Se localiza la zona o zonas en las cuales se concentra la remoción de material pudiendo ser dicha zona la superficie total del tornillo analizado.
- 4) Identificar deformación de la pieza  
Se determina que la falla en la pieza está asociada a una pérdida de geometría ajena a la remoción de material.
- 5) Identificar alargamiento o doblamiento de la pieza  
Se define si la pérdida de geometría de la pieza está asociada a un flujo de material en dirección paralela o perpendicular al eje principal de cuerpo cilíndrico del tornillo.

### **1.3) Sistemas expertos y sus componentes**

#### **Definición de sistema experto**

Un sistema experto es un emulador del proceso de razonamiento humano aplicado a la obtención de respuestas y resolución de problemas. Es una de las principales vertientes de la inteligencia artificial ya

que se vale de la utilización de una plataforma de conocimientos ordenada por reglas de inferencia que permiten realizar un proceso cognoscitivo artificial. [2]

El objetivo del sistema experto es apoyar la labor humana de resolución de problemas en ausencia de expertos humanos en un determinado campo.

### **Componentes de un sistema experto**

Un sistema experto, consta de componentes cuya función individual estructura aspectos fundamentales del proceso de razonamiento humano [3] los cuales se muestran a continuación (Ver Fig.1.3).

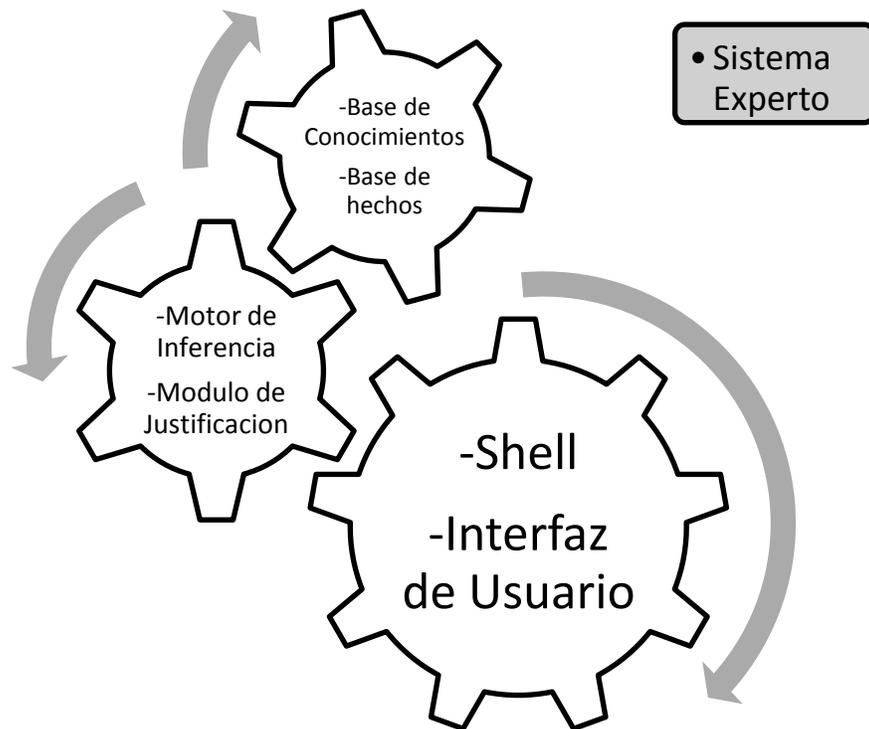


Fig.1.3: Componentes de un sistema experto

#### *Base de conocimientos*

Es el componente que contiene el conocimiento experto referente a un tema específico el cual es representado principalmente mediante reglas de inferencia, sentencias y definiciones desarrolladas [4], sus fuentes pueden ser la consulta directa con un experto humano, manuales, libros o fuentes virtuales (Ver Fig.1.4).

La correcta estructuración de una base de conocimientos es indispensable en la construcción de un sistema experto ya que de la validez del compendio de conocimientos contenido en ella partirá la validez de los resultados presentados por el sistema experto en cuestión. [4]

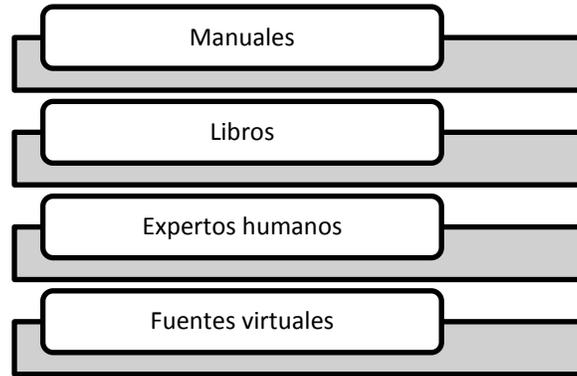


Fig.1.4: Fuentes de la base de conocimientos

#### *Base de hechos*

Es un compendio de conocimientos producto de la observación y análisis de fenómenos que ya han ocurrido, por ejemplo ensayos de falla llevados a cabo en laboratorio o casos de falla registrados en campo, su validez radica en el hecho de que un fenómeno al repetirse varias veces bajo las mismas condiciones tiende a presentar un mismo resultado [5], algunas de sus fuentes se enlistan a continuación (Ver Fig.1.5)

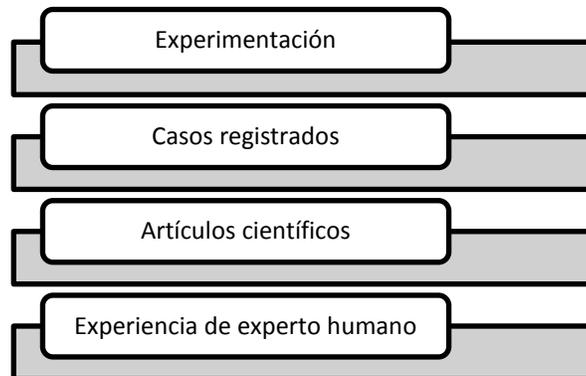


Fig.1.5: Fuentes de la base de hechos

### *Motor de inferencia*

Es el módulo del sistema experto en el que se realiza el proceso de razonamiento, durante la consulta se encarga de analizar las reglas contenidas en las bases de conocimientos y de hechos hasta encontrar aquella que es válida a las solicitudes del usuario y en base a ello realiza una acción específica [5], para el tema específico en estudio el motor de inferencia permitirá la generación del diagnóstico de falla esto se ilustra de un modo esquemático a continuación (Ver Fig.1.6)

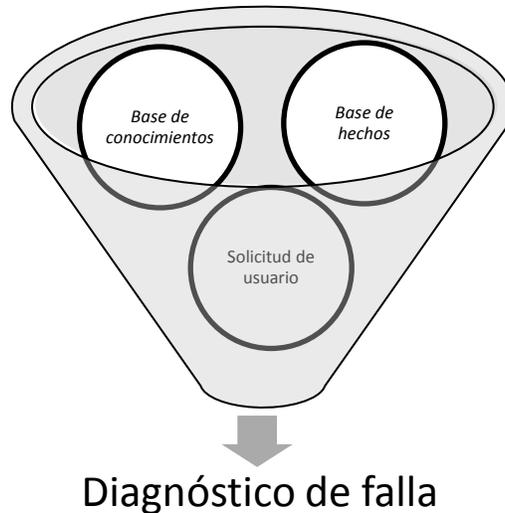


Fig.1.6: Proceso de inferencia

### *Módulo de justificación*

Es el módulo proveedor de argumentos de sustentación que tiene como objeto otorgarle formalidad y legitimidad al resultado obtenido [2].

### *Shell*

Es una herramienta informática orientada al desarrollo de sistemas expertos por lo que cuenta con funciones básicas pre programadas referidas al ordenamiento de información mediante reglas, con su aplicación se facilita y acelera la estructuración y programación de un sistema de razonamiento artificial. [5]

### *Interfaz de usuario*

La interfaz de usuario es el canal de comunicación inmediata entre el usuario y el sistema experto, se vale de medios atractivos al proceso de comprensión humana tales como imágenes, colores y comandos intuitivos, en ella se recibirán los datos provenientes del usuario y en ella se entregarán los resultados provenientes del sistema experto. [6] su función se ilustra a continuación (Ver Fig.1.7)

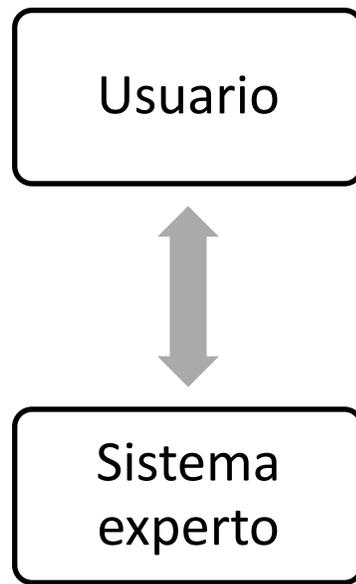


Fig.1.7: Interacción bidireccional entre usuario y sistema experto

## **CAPÍTULO 2: FALLAS EN TORNILLOS**

### ***Introducción***

El capítulo abordará conceptos fundamentales referentes a la terminología de los tornillos además de presentar los tipos de falla con los cuales trabajará el sistema experto mencionado sus causas y recomendaciones pertinentes.

### ***Alcances***

- Se definirán la función de un tornillo así como los componentes básicos de su estructura.
- Se desarrollarán conceptos teóricos referentes a cada tipo de falla de tornillos.
- Se realizarán recomendaciones preliminares referidas a la solución a cada tipo de falla en tornillos.

## 2.1) Tornillo

La función del tornillo como elemento mecánico consiste en acoplarse a un elemento roscado internamente, equivalente a un orificio de diámetro ligeramente superior al del diámetro nominal de la rosca del tornillo mediante la aplicación de un momento, implicando la transformación de movimiento circular en movimiento rectilíneo, generando el proceso de unión deseado (Ver Fig.2.1).

Se define como cabeza del tornillo a una geometría compuesta que permite la interacción con una herramienta de agarre.

Se define como rosca del tornillo a una sucesión de picos y valles definidos como filetes dispuestos en configuración helicoidal en torno al cuerpo cilíndrico del tornillo.

Se define como avance del tornillo a la distancia recorrida por un punto cualquiera del filete del tornillo cuando el elemento realiza una vuelta completa.

Como complemento de su función el tornillo puede acoplarse a un segundo elemento conocido como tuerca, cuya configuración roscada interna permite la interacción de roscas creando así el acoplamiento y la unión deseada de elementos mecánicos.

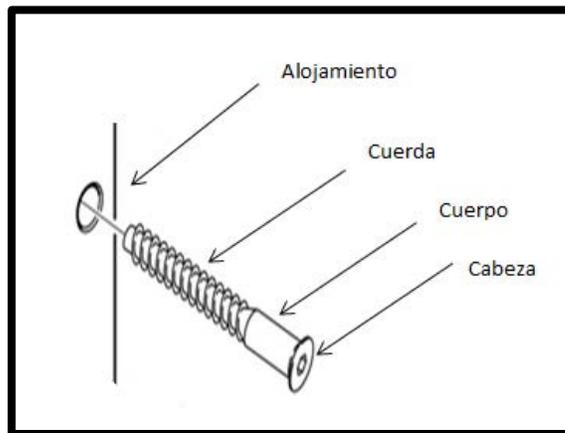


Fig.2.1: Esquema de tornillo

## 2.2) Tipos de tornillos

Existen distintos criterios de caracterización para un tornillo (tipo de cabeza, tipo de geometría, tipo de cuerda, tipo de material de trabajo) pero dado el enfoque del presente proyecto referido a tornillos ferrosos se plantea una clasificación en función a la resistencia de tornillos definida por las normas A-307 (H-118) para tornillos comunes y las normas A-325 (NOM-H-118) y A-490 (NOM-H-123) para tornillos de alta resistencia.

### **Tornillos comunes A-307 (H-118)**

Son aquellos cuyas condiciones de operación se restringen a aplicaciones de esfuerzos uniaxiales estáticos lo cual los excluye de usos que involucren esfuerzos alternados de compresión y tracción así como de esfuerzos dinámicos o cíclicos, la longitud de la unión también los limitará a poseer una base mínima del 25% de la longitud de la pieza y en aplicaciones de unión estructural de proyecto civil su longitud no podrá rebasar 60 cm.

Cuentan con la ventaja de ser elementos económicos ya que no requieren de procesos de manufactura especializados y su manejo y colocación es relativamente simple en comparación a los tornillos de alta resistencia.

### **Tornillos comunes calibrados**

Son aquellos que se distinguen de los tornillos comunes por sus relaciones dimensionales y características geométricas específicas, definidas por un diámetro de agujero específico en relación al vástago del tornillo, proponiendo un esquema de apriete ajustado el cual constituye un sistema sin deslizamiento relativo o rejuego resultando en una transmisión de esfuerzos uniforme eliminando la necesidad de modificar el material que compone la pieza.

### **Tornillos de alta resistencia A-325 (NOM-H-118) y A-490 (NOM-H-123)**

Son aquellos cuya aplicación específica plantea la presencia reiterada de factores causantes de falla, tales como cargas cuya magnitud no es constante, cargas cuya naturaleza a tracción o compresión no es constante, condiciones ambientales que favorecen corrosión y longitudes prolongadas de unión, por lo cual las piezas deberán presentar características especializadas tales como una composición química específica, tratamientos térmicos que aumentan su resistencia involucrando contenidos de carbono o manganeso en proporciones específicas usualmente fijando el contenido de carbono y dejando abierto el elemento de aleación para manipular las propiedades mecánicas específicas requeridas.

La instalación de tornillos de alta resistencia necesita considerar parámetros de forma precisa tales como el apriete que define una tensión específica la cual está sujeta a una magnitud mínima usualmente el 70 % de la resistencia del tornillo y requiere de herramientas tales como llaves calibradas e indicadores directos de esfuerzos así como de métodos que siguen un protocolo específico tales como el método de llaves calibradas y el método de la vuelta de tuerca, los agujeros o empotramientos en los que se colocará el tornillo de alta resistencia deberán presentar una proporción específica con respecto al diámetro del tornillo ya que la distribución de esfuerzos a lo largo de la pieza depende de dicha variable, las anteriores características aumentan significativamente el costo de los tornillos especializados con respecto a sus contrapartes no especializados.

### **Clasificación por grado de tornillo SAE**

El grado de tornillo es un indicador de las propiedades mecánicas de un tornillo y se encuentra referido al tipo de acero, punto de fluencia, punto de ruptura y dureza de la pieza, con la ayuda de este indicador es posible seleccionar un tornillo cotejando sus propiedades mecánicas con los requerimientos de la aplicación que se le vaya a dar.

En general un grado de tornillo ubicado en las escalas 1,2 y 3 indicará una composición de acero con bajo porcentaje de carbono lo cual implica una baja dureza del material, equivalente a alta ductilidad y

flexibilidad, un alto porcentaje de elongación, un bajo punto de fluencia y un bajo punto de cedencia. En contraste un grado de tornillo ubicado entre las escalas 5 y 8 se compondrá de aleaciones de acero de medio carbono lo cual implica una alta dureza del material asociada a baja ductilidad y flexibilidad en la pieza además de un alto punto de fluencia, un alto punto de cedencia y un bajo porcentaje de elongación.

Se deduce que en medida que aumenta el grado de un tornillo, éste será más duro y más resistente a cargas uniaxiales elevadas, pero su ductilidad y flexibilidad disminuirán ver (Tabla 2.1, 2.2, 2.3).

Tabla 2.1: Grados de tornillo sistema SAE [PBMC]

SISTEMA IMPERIAL AMERICANO SAE				
GRADO SAE	ACERO	DIÁMETRO TORNILLO	FLUENCIA (N/mm <sup>2</sup> )	ROTURA (N/mm <sup>2</sup> )
1	Bajo carbono	1/4 a 1-1/2	227,6	413,8
2	Bajo carbono	1/4 a 3/4	379,3	510,3
		3/4 a 1-1/2	227,6	413,8
3	Acero al carbon trabajado en frío	1/4 a 1-1/2	586,2	758,6
		> 1-1/2	551,7	689,7
4	Acero al carbono	1/4 a 1-1/2	689,7	793,1
5	Acero al carbon templado y revenido	1/4 a 1-1/2	634,5	827,6
		> 1-1/2	558,6	724,1
5.1	Acero al carbon templado y revenido	< 3/8	724,1	917,2
5.2	Acero al carbon templado y revenido	1/4 a 1	634,5	827,6
7	Acero aleado templado y revenido -Laminado-	1/4 a 1-1/2	793,1	917,2
8	Acero al carbon templado y revenido	1/4 a 1-1/2	896,6	1034,5
8.2	Acero al carbon templado y revenido	1/4 a 1-1/3	896,6	1034,5
ALLEN	Acero aleado templado y revenido -Laminado-		965	1240

Tabla 2.2: Propiedades mecánicas de tornillo según SAE J429 [PBMC]

Grado	Tamaño nominal (in)	Carga provada (psi)	Esfuerzo de fluencia mínimo (psi)	Esfuerzo a tracción mínimo (psi)	Elongación mínima (%)	RA mínima (%)	Dureza Rockwell de núcleo	Temperatura de templado mínima (F)
1	¼ a 1-1/2	33,000	36,000	60,000	18	35	B7 a B100	N/A
2	¼ a 3/4	55,000	57,000	74,000	18	35	B80 a B100	N/A
2	¾ a 1-1/2	33,000	36,000	60,000	18	35	B70 a B100	N/A
5	¼ a 1	85,000	92,000	120,000	14	35	C25 a C34	800
5	1 a 1-1/2	74,000	81,000	105,000	14	35	C19 a C30	800
8	¼ a 1-1/2	120,000	130,000	150,000	12	35	C33 a C39	800

Tabla 2.3: Tipos y composición de acero según SAE J429 [PBMC]

Grado	Material	Carbón (%)	Fosforo (%)	Sulfuro (%)
1	Acero de bajo o medio carbón	.55 max	.030 max	.050 max
2	Acero de bajo o medio carbono	.15-.55	.030 max	.050 max
5	Acero de medio carbón	.28-.55	.030 max	.050 max
8	Acero de medio carbón aleado	.28-.55	.030 max	.050 max

### 2.3) Fallas en tornillos causas y tipos

Un tornillo como elemento de unión estructural presentará una falla cuando la función de unión entre elementos no sea llevada a cabo a plena capacidad. Existen una serie de variables involucradas en el correcto desempeño de un tornillo y por ende pueden presentarse igual número de deficiencias capaces de impedir o disminuir su capacidad operativa [7]. Las variables más relevantes a considerar se encuentran señaladas a continuación (Ver Fig.2.1).

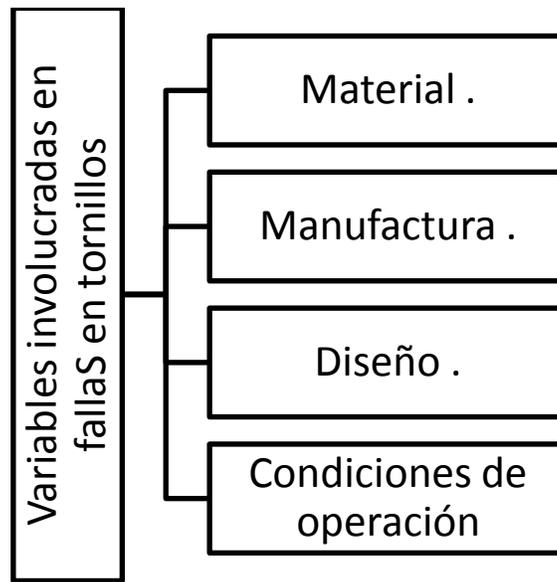


Fig.2.1: Variables involucradas en fallas de tornillos

#### **Tipos de falla tornillos**

Los tipos de falla más comunes de acuerdo a lo reportado en la literatura se presentan a continuación (Ver Fig.2.2).

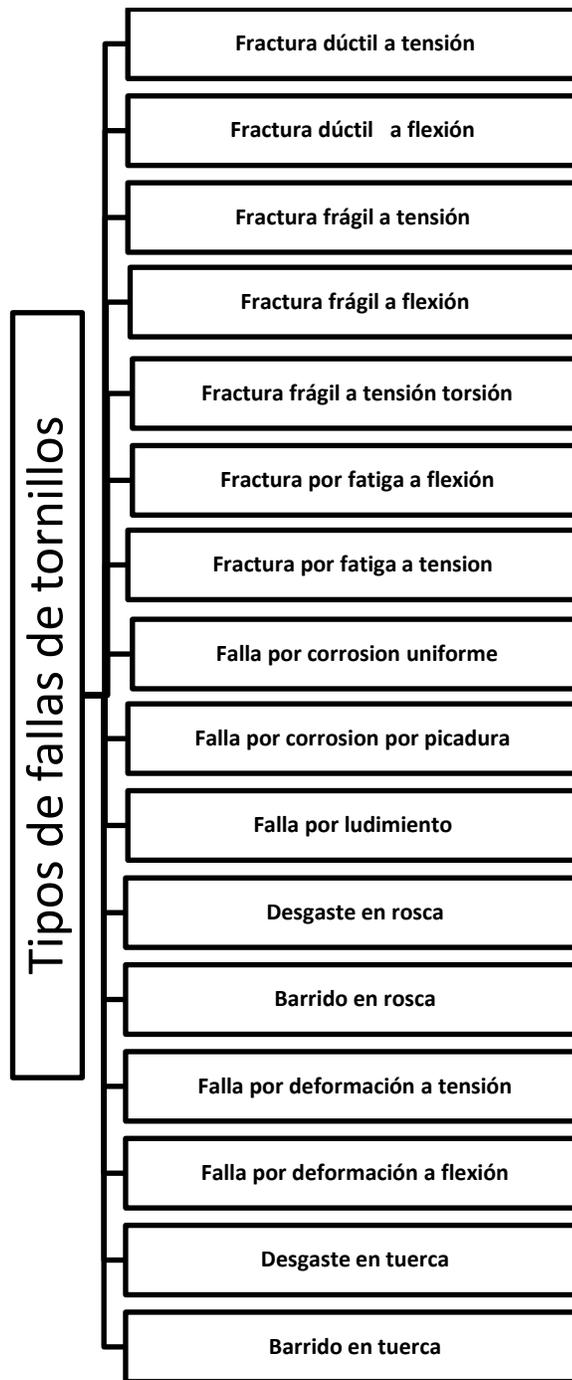


Fig.2.2: Tipos de fallas en tornillos

## 2.4) Fractura dúctil a tensión

### Fractura

La fractura es la separación estructural de una pieza mecánica en dos o más segmentos, generalmente esta situación es producto de la aplicación de cargas a tracción, torsión, flexión o sus combinaciones en un determinado punto de la pieza de interés [7] esto se ilustra a continuación (Ver Fig.2.3)

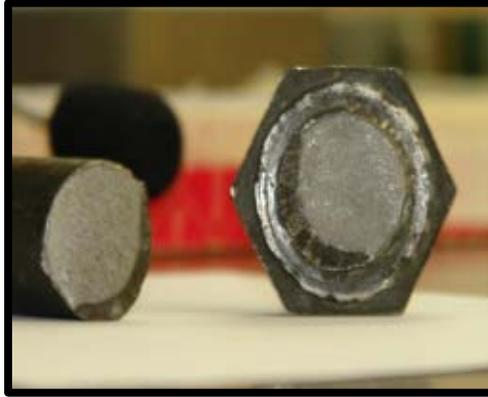


Fig.2.3: Ejemplo de fractura en elemento mecánico [UDIATEM].

### Fractura dúctil

Una fractura dúctil es aquella que presenta flujo de material perceptible, es decir una deformación plástica sostenida de la pieza como resultando del sometimiento de la misma a cierta carga a tracción, flexión o sus combinaciones, el flujo de dicho material será en el mismo sentido de la aplicación de la carga [7]. La deformación crecerá de forma sostenida en relación a los esfuerzos involucrados y aumentará aún bajo la acción de una carga constante hasta alcanzar el punto de cedencia del material y finalmente el seccionamiento de la pieza como se ilustra a continuación (Ver Fig.2.4)



Fig.2.4: Ejemplo de fractura dúctil [IDDP].

Este fenómeno se presenta en materiales que cuentan con características de alta ductilidad y por ende una fragilidad reducida.

### **Fractura dúctil a tracción**

Es una fractura caracterizada por el sometimiento del elemento mecánico a cargas paralelas al eje del del tornillo e implica una reducción progresiva del diámetro del mismo, además de un alargamiento de la geometría de la pieza planteando así condiciones de deformación previa que derivan en un grado de falla parcial del elemento antes de alcanzar la fractura considerada como falla total.

Se identifica al observar un desgarre periférico en la zona de fractura el cual abarcará la mayor parte de la circunferencia externa del tornillo, aunado a una textura fibrosa en el centro la cual será producto del desprendimiento de una determinada porción de materia[ 17] como se muestra a continuación (Ver Fig.2.5).

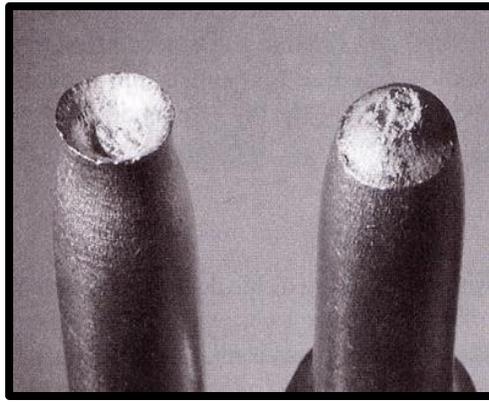


Fig.2.5: Fractura dúctil a tensión en tornillo [IDDP].

### **Elementos involucrados**

-Bajo grado de tornillo: Este favorece el tipo de fractura dúctil a tracción, considerando que el grado de tornillo es un parámetro del tipo de acero y por ende del esfuerzo de fluencia y esfuerzo de ruptura presentados por el mismo, siendo mayor la resistencia mientras mayor sea el grado del tornillo. Los criterios de clasificación se presentan en las tablas anteriores (Ver Tablas 1, 2,3)

-Cargas a tracción superiores a las permitidas por el diseño y material del tornillo: Las sobrecargas generan esfuerzos excesivos en el material que compone el tornillo favoreciendo la fluencia y eventual fractura del mismo.

-Presencia de cargas cíclicas: Implica el sometimiento de la pieza a cargas intermitentes aun menores a las soportadas por la pieza en cuestión, las cuales generan esfuerzos adicionales en el sistema.

-Una alta temperatura de operación en relación al material que compone al tornillo: Esta situación disminuye el punto de cedencia y de fluencia del material que conforma la pieza en función del reblandecimiento descontrolado que se presenta.

-Irregularidades geométricas o superficiales presentes en el cuerpo de la pieza: Estas derivan en la creación de concentradores de esfuerzos favoreciendo el inicio de una ruptura.

### **Recomendaciones preliminares**

- Realizar una selección adecuada del grado de tornillo, fundamentada en cálculos referidos a las cargas a las cuales será sometido y a la naturaleza de las mismas (cíclicas o no cíclicas).
- Eliminar vibraciones en el sistema eliminando así cargas cíclicas.
- Reconfigurar la distribución de cargas de tal forma que el número de tornillos que soportan la carga en cuestión sea incrementado, planteando así una menor carga para cada elemento.
- Buscar eliminar defectos geométricos o de acabado presentes en la pieza, eliminando así puntos de concentración de esfuerzos.

### **2.5) Fractura dúctil a flexión**

Este tipo de fractura implica la aplicación de una carga lateral perpendicular al eje del tornillo, deformando la pieza de tal manera que el eje principal del tornillo presenta una desviación importante con respecto a su configuración recta inicial, curvándose de forma perceptible, dicha curvatura se tornará cada vez más pronunciada hasta alcanzar la separación del material y por ende la fractura. [3]

Se identifica al observar un labio metálico sobre la circunferencia del tornillo, el cual se encontrará en la dirección de la carga aplicada, exhibiendo un arrastre de material con un desgarre en el extremo del mismo labio Ver Fig.8. En el extremo opuesto del labio se observará una zona con textura fibrosa sobre la zona de fractura, esta textura fibrosa es característica del desprendimiento de material dúctil [7] como se muestra en la figura (Ver fig.2.6)

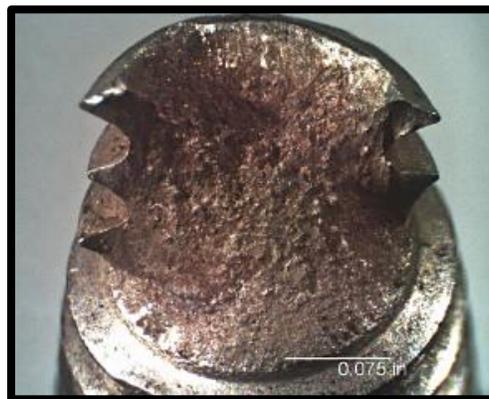


Fig.2.6: Fractura dúctil a flexión en tornillo [IDDP].

### **Elementos involucrados**

- Bajo grado de tornillo: Este es un factor que favorece la fluencia del material de la pieza sometida a cargas laterales.
- Una elevada carga lateral: Esta situación derivará en la deformación lateral del elemento mecánico, lo cual es planteado por condiciones de altos esfuerzos a flexión.
- La aplicación de esfuerzos cíclicos laterales: La naturaleza intermitente de las cargas aplicadas generan esfuerzos adicionales como respuesta del material que compone la pieza, esto a pesar de que las mencionadas cargas sean menores a las soportadas por el tornillo.
- Defectos en el acabado superficial de la pieza: Estos implican concentración de esfuerzos en algún punto de la geometría de la pieza, lo cual fomenta el inicio de la ruptura del material que conforma a la pieza en dicho punto.
- Una alta temperatura de operación en relación al material que compone la pieza:

### **Recomendaciones preliminares**

- Realizar cálculos referidos a las cargas laterales a las cuales será sometido el elemento mecánico, planteado de esta forma una correcta selección de grado del tornillo.
- Realizar correcciones referidas a la eliminación de posibles cargas cíclicas a las cuales es sometida la pieza.
- Seleccionar piezas de material acorde a las condiciones de temperatura de operación del sistema.
- Eliminar defectos geométricos o de acabado presentes en la pieza
- Redistribuir las cargas laterales

## **2.6) Fractura frágil a tracción**

### **Fractura frágil**

Es una fractura que considera una deformación o fluencia de material imperceptible y prácticamente nula en sus etapas de desarrollo, es decir no habrá una condición de falla parcial que sea posible apreciar, la falla en cuestión solo se podrá notar en el punto culminante de la misma que implica el seccionamiento total de la pieza [7] como se observa en la figura (Ver Fig.2.7).



Fig.2.7: Ejemplo de fractura frágil [UDIATEM].

Esta condición de fractura se ve favorecida por un material con baja ductilidad, alta fragilidad y dureza, lo cual implica una baja capacidad de deformación del mismo y una baja capacidad de absorber energía por unidad de volumen.

Al igual que su contraparte dúctil, la fractura frágil de un tornillo es clasificable en función de los ejes del tornillo respecto a los cuales actúa la carga a la que es sometida la pieza de interés, esto ocasionará rasgos distintivos en la zona de fractura y también será producto de circunstancias específicas a las cuales ha sido sometida la pieza.

#### **Fractura frágil a tracción**

Se caracteriza por ser producto de una carga uniaxial en dirección paralela al eje principal del cuerpo cilíndrico del tornillo, y exhibirá una zona de fractura con textura granular y formación mínima de escalones de tamaño moderado, la estructura granular es característica de un material frágil [7] como se ilustra a continuación (Ver Fig.2.8).



Fig.2.8: Fractura frágil a tensión en tornillo [IDDP].

### **Elementos involucrados**

-Presencia de cargas cíclicas paralelas al eje del tornillo: La naturaleza cíclica de dichas cargas aún menores a la carga máxima soportada por el material del elemento mecánico en cuestión puede culminar en una fractura frágil a flexión producto de esfuerzos adicionales generados.

-Selección de un alto grado de tornillo: Implica la selección de un tornillo de material excesivamente duro con respecto a su aplicación, se presenta en sistemas que involucran la aplicación de cargas a tensión remarcadas y en intervalos y que por ende exigen cierta elasticidad en los tornillos que están sometidos a las mismas.

-Presencia de discontinuidades geométricas y defectos superficiales en la pieza: Esta situación genera concentradores de esfuerzos que favorecen el inicio de fracturas.

-Una baja temperatura de operación en relación al material del tornillo: Esta situación tiende a aumentar la dureza del material que compone al tornillo derivando en condiciones de fragilidad en la pieza.

### **Recomendaciones preliminares**

-Aplicar tornillos de alto grado no garantiza que estos no fallarán por fractura, por ende es recomendable realizar un análisis mecánico y estructural que respalde la selección del tornillo en cuestión empleando materiales adecuados la carga soportada.

-Limitar la magnitud de cargas a tracción aplicadas al elemento mecánico al introducir un mayor número de tornillos o al disminuir los elementos de carga a soportar.

-Balancear los dispositivos mecánicos que contienen al tornillo evita la presencia de cargas cíclicas que fomentan las fallas por fractura en el elemento mecánico.

-Seleccionar un material acorde a la temperatura de operación

-Eliminar defectos superficiales y geométricos presentes en la pieza

-Evitar el aplicar y retirar cargas de forma descontrolada en el sistema.

### **2.7) Fractura frágil a flexión**

Es una fractura producida por el sometimiento de la pieza a cargas laterales elevadas y se presenta de forma súbita sin exhibir signos apreciables en sus etapas iniciales.

Se identifica por presentar una zona de fractura con textura granular brillante como característica principal del material que la compone indicando un grado de dureza relativamente alto que le resta flexibilidad y flujo de material al área de desprendimiento, además de escalones de tamaño considerable en relación al diámetro del cuerpo cilíndrico del tornillo [7] como se muestra a continuación (Ver Fig.2.9)



Fig.2.9: Fractura frágil flexión en tornillo [IDDP].

### **Elementos involucrados**

-La presencia de cargas cíclicas laterales: Aun cuando estas son menores a la carga máxima soportada por el elemento mecánico en cuestión pueden culminar en una fractura frágil a flexión.

-Presencia de una carga superior al límite de fluencia del material: Una carga que genere esfuerzos superiores a los soportados por el material de la pieza culminará en la fluencia descontrolada del material que la compone pudiendo desarrollar fracturas.

-Selección de un alto grado de tornillo:

-Presencia de discontinuidades geométricas y defectos superficiales en la pieza

-Baja temperatura de operación en relación al material del tornillo

### **Recomendaciones preliminares**

-Seleccionar un material de tornillo con una elevada tenacidad con el objeto de disipar así la energía producto de una carga cíclica que provoca la fractura en el tornillo.

-Eliminar cargas cíclicas a flexión.

-Seleccionar un material acorde a la temperatura de operación.

-Eliminar defectos superficiales y geométricos presentes en la pieza.

-Disminuir la magnitud de la carga aplicada a la pieza.

## **2.8) Fractura frágil a tracción torsión**

Es un tipo de fractura producida por cargas aplicadas sobre diferentes ejes y direcciones del cuerpo del tornillo en un mismo intervalo de tiempo, es posible caracterizarle en función del grado de tornillo que se ha utilizado. La forma de establecer esta relación será la siguiente: Con un bajo grado de tornillo se observará una superficie de fractura mixta predominantemente fibrosa con adición granular. Con un alto grado de tornillo se observará una superficie de fractura mixta predominantemente granular con adición fibrosa [8] como se muestra en la imagen (Ver Fig.2.10)



Fig.2.10: Fractura frágil a tensión torsión en tornillo predominantemente fibrosa [UDIATEM].

### **Elementos involucrados**

- Sobrecargas a tracción y a torsión en servicio: Esto implica el sometimiento de la pieza a cargas de magnitud elevada con respecto al material de la misma y en múltiples direcciones con respecto al eje del tornillo.
- Selección de un grado de tornillo muy alto o muy bajo: Esto con respecto a la magnitud de carga a la cual será sometido el elemento roscado.
- Sobre torque aplicado al momento de instalar el elemento mecánico: Esto favorece la aparición de esfuerzos adicionales a los soportados por la carga a la que se encuentra sometido el tornillo.

### **Recomendaciones preliminares**

- Realizar un análisis referente a las cargas que actúan en más de un eje del cuerpo cilíndrico del elemento mecánico.
- Investigar la posible existencia de cargas no deseadas en la pieza esto en cualquiera de sus ejes.
- No exceder el torque proporcionado en la instalación del dispositivo.
- Seleccionar un grado de tornillo acorde a la magnitud de las cargas aplicadas.

-Eliminar cargas cíclicas

## **2.9) Corrosión en tornillos**

### **Corrosión**

Es un fenómeno electroquímico que implica la pérdida de masa cuando el material busca su estado de mínima energía. Básicamente consta de tres etapas 1.Oxidación, en esta pasa del estado metálico al iónico (aumenta la valencia). 2. Transferencia de electrones, para lo cual se requiere un medio conductor. 3. Reducción o disminución de la valencia, en esta se consumen los electrones liberados en la oxidación, los efectos se aprecian a continuación. (Ver Fig.2.11)



Fig.2.11: Ejemplo de corrosión en elemento mecánico [UDIATEM].

Los elementos involucrados en el fenómeno de corrosión son los siguientes:

-Ánodo: Es el elemento que suministra electrones, un tornillo metálico actúa como ánodo.

-Cátodo: En este elemento se produce la reacción de reducción.

Electrolito: Este elemento funge como medio de transporte de electrones entre el ánodo y el cátodo

En combinación estos tres factores permiten el desarrollo de la corrosión en un sistema dado, aunado a esto existen otro tipo de factores tales como la temperatura, el pH, la presión y las condiciones geométricas de la pieza. Dado que el ambiente de operación de un tornillo es sumamente variable se clasificarán los tipos de corrosión en función de la afectación.

### **Falla por corrosión en tornillos**

Implica la remoción de material propia de la corrosión lo cual deriva en desgaste químico de la pieza en cualquiera de sus zonas, dicho desgaste es progresivo y tiende a deteriorar las capacidades mecánicas

o geométricas del tornillo, de esta manera puede provocar una situación de fractura o de deformación llevando al elemento a condiciones de inoperatividad [9] como se muestra a continuación (Ver Fig.2.12).



Fig.2.12: Falla por corrosión general en tornillos [IDDP].

### **2.10) Falla por corrosión uniforme**

Se refiere a la pérdida de material en el tornillo caracterizada por encontrarse distribuida en la totalidad de la superficie de la pieza, está pérdida de material puede ocasionar concentradores de esfuerzos y pérdida de la geometría inicial de la pieza, lo cual limita su capacidad operacional de sujeción o puede generar otros tipos de falla tales como deformación y fractura.

Se identifica por presentar una capa color marrón de óxido característica de una pieza sometida al fenómeno de corrosión, además de presentar en ocasiones humedad perceptible al tacto [10]. Esto se observa a continuación (Ver Fig.2.13).



Fig.2.13: Falla por corrosión uniforme en tornillo [IDDP].

### **Elementos involucrados**

- Medio corrosivo severo: Esta situación implica una alta presencia de iones y humedad en el ambiente.
- Filtración de fluidos externos o pertenecientes a algún componente del dispositivo mecánico general: Dichos fluidos fungirán como electrolito favoreciendo el proceso de oxidación.
- Una incorrecta selección de material: Esta situación se refiere a la aplicación de un material energéticamente inestable y propenso al fenómeno de oxidación.
- Ausencia de recubrimientos: Esta situación se refiere a la ausencia de capas de algún elemento protector sobre el tornillo, tales como polímero, pintura o metales anticorrosión, dejando a la pieza expuesta a los elementos necesarios para llevar a cabo el fenómeno de oxidación.
- La falta de mantenimiento a elementos de recubrimiento: Se refiere al descuido y falta de renovación de capas protectoras de la pieza, lo cual la deja expuesta a los efectos de la corrosión.

### **Recomendaciones preliminares**

Las condiciones necesarias pueden ser inhibidas por una serie de métodos que tiene como fin eliminar alguno de los tres elementos requeridos para llevar a cabo el proceso de corrosión.

- Ánodo de sacrificio: Mediante la colocación de un elemento químicamente más inestable que el tornillo, este elemento cederá sus propios electrones, reduciendo así la corrosión en el elemento mecánico.
- Aplicación de recubrimientos: Esta medida es aplicable en sistemas que presentan derrames de fluidos precursores de corrosión e implica la implementación de una capa protectora sobre la pieza la cual puede ser de algún polímero o metal anticorrosivo.
- En casos necesarios es posible la aplicación de materiales no proclives a la corrosión, tales como los aceros inoxidable.

### **2.11) Corrosión por picadura**

Es un tipo de corrosión que afecta únicamente ciertos puntos de la pieza y por ende los convierte en concentradores de esfuerzos, en casos severos deriva en una situación de porosidad pronunciada en la pieza y perceptible a simple vista, lo cual culmina en el desprendimiento de una porción importante de material, estas condiciones implican una grave deficiencia de propiedades mecánicas del tornillo las cuales pueden culminar en una falla total del elemento mecánico [9] como se muestra. (Ver Fig.2.14)



Fig.2.14: Falla por corrosión por picadura en tornillo [IDDP].

### **Elementos involucrados**

-Falta de homogeneidad en la composición del material en el interior o la superficie de la pieza: Esto implica la existencia de zonas más propensas a la corrosión en función de su inestabilidad química, por ello el fenómeno se presentará primeramente en dicha zona generando picaduras con distintas geometrías, las cuales pueden llegar a formar poros.

-Presencia de incrustaciones de materiales externos: Esto es factor en la aparición de picaduras en un tornillo, debido a que generan un ataque corrosivo concentrado en un punto.

-Pérdida de recubrimiento en una zona determinada de la pieza: Esta situación deja una área específica de la pieza expuesta a elementos corrosivos presentes en el entorno.

-Medio corrosivo severo:

-Filtración de fluidos externos o pertenecientes a algún componente del dispositivo mecánico general

### **Recomendaciones preliminares**

-Remover las incrustaciones presentes en la superficie del tornillo, mediante la aplicación de sustancias especializadas o procesos adaptados de pulido.

-Evitar la filtración de sustancias externas al dispositivo mecánico en cuestión.

-Seleccionar un material que presente una composición uniforme, especialmente si será expuesto a un ambiente corrosivo severo.

-Proporcionar mantenimiento adecuado al recubrimiento del elemento mecánico previniendo así la acción de elementos que favorezcan el fenómeno de corrosión en puntos de la pieza.

## **2.12) Ludimiento**

El ludimiento es una forma de desgaste químico concentrado fomentado por la prolongada exposición de una pieza a condiciones de desgaste mecánico, este fenómeno tiende a agrietar la superficie de la pieza en cuestión favoreciendo la corrosión en las cavidades formadas derivando en la expansión de la corrosión desde adentro y por ende deteriorando las propiedades mecánicas del tornillo.

A diferencia del fenómeno de corrosión por picadura, el ludimiento es una combinación de desgaste mecánico y químico, llegando a etapas en las cuales se favorecen entre sí, acelerando la pérdida de material en la pieza. Exhibe una cantidad inferior de depósito que en un fenómeno de corrosión uniforme en la zona superficial del tornillo, aunado a agrietamientos distribuidos por la superficie de la pieza como se observa en la imagen (Ver Fig.2.15).



Fig.2.15: Falla por ludimiento en tornillos [IDDP].

### **Elementos involucrados**

-Excesiva fricción del tornillo contra algún elemento mecánico de mayor dureza: Esto considera deslizamiento relativo entre superficies aunado a exposición a un entorno corrosivo.

-Incorrecta selección en las dimensiones del tornillo o un insuficiente torque al momento de ser instalado: Esta situación deriva en rejuego del tornillo al interior de su alojamiento aunado a exposición a un entorno corrosivo.

-Exposición del cuerpo del tornillo a condiciones dinámicas: Esta situación implica el desarrollo de desgaste concentrado que favorece la aparición de ludimiento en esa zona específica aunado a la exposición a un entorno corrosivo.

### **Recomendaciones preliminares**

-Seleccionar un grado de tornillo adecuado a las condiciones de fricción dinámica a las cuales se someterá la pieza, puede ser un grado entre 5 y 8 de escala SAE J429.

-Utilizar solo piezas con condiciones superficiales óptimas, referentes a la ausencia de incrustaciones y grietas sobre la misma

-Plantear una selección adecuada del tornillo referente a las dimensiones requeridas por el sistema en cuestión, así como proporcionar un correcto torque de apriete, lo cual evitara juego en el tornillo en condiciones de uso.

-No someter al tornillo a una cantidad de ensambles y desensambles mayores a los estrictamente requeridos según la aplicación.

-Aplicar medidas preventivas y correctivas a situaciones de corrosión.

### **2.13) Falla de rosca en tornillos**

Las fallas presentadas en una rosca se encuentran comúnmente referidas a una situación de remoción de material en alguna porción de la misma, esto debido a condiciones químicas o mecánicas que inhabilitan la cuerda impidiendo su correcto acoplamiento con una tuerca o alojamiento.

#### **Desgaste en rosca de tornillo**

Se caracteriza por exhibir pérdida de material a lo largo de la rosca del tornillo en zonas diversas y sin condiciones de uniformidad derivando en la pérdida de la geometría o perfil original, usualmente presenta depósitos correspondientes al material desprendido ya sea en forma de óxido o metal como se ilustra a continuación (Ver Fig.2.16).

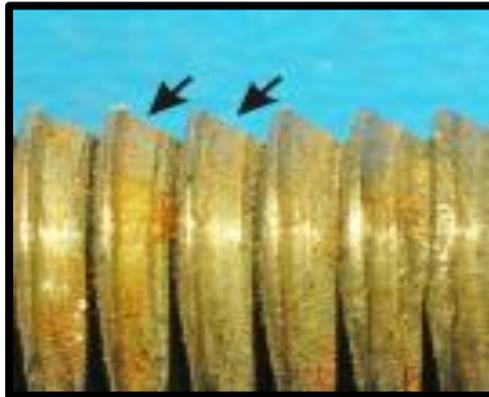


Fig.2.16: Falla de rosca por desgaste en tornillos [IDDP].

#### **Barrido en rosca de tornillo**

El barrido de roscas es un tipo de pérdida de material en cantidades mayores al desgaste común y en intervalos de tiempo menores, ya que la cuerda puede ser desprendida desde su base de manera súbita, como consecuencia de un abuso mecánico de la misma o deterioro químico del material que la compone los efectos se muestran a continuación (Ver Fig.2.17.)



Fig.2.17: Falla de rosca por barrido en tornillos [AFIS].

### **Elementos involucrados en falla por desgaste y barrido en rosca de tornillo**

-Presencia de los elementos que favorecen a los fenómenos de ludimiento y corrosión: Estos afectan a la rosca de la pieza en cuestión y pueden ser desgaste por fricción y/o presencia de elementos favorables a la corrosión.

-Diferencia dimensional con la tuerca o el alojamiento del tornillo: Esto genera condiciones dinámicas que implican desgaste descontrolado sobre la pieza.

-Grado de tornillo bajo respecto al material del alojamiento: Esta condición implica que el alojamiento desgasta la cuerda del tornillo en situaciones de ensamble y desensamble, dada su mayor dureza con respecto a la del tornillo.

-Existencia de un ángulo de desfase respecto a la correcta orientación del tornillo: Esta situación fomenta la falla de la rosca del mismo en su posterior desensamble debido a que genera un agarre inadecuado entre el tornillo y su alojamiento.

-Pocos hilos de la rosca ensamblados con el alojamiento del tornillo: Esto tiende a incrementar la carga soportada por aquellos hilos que si han sido ensamblados y por ende los hace susceptibles de falla por desprendimiento de material.

-Diferencias dimensionales entre el diámetro del tornillo y el diámetro de su tuerca o alojamiento: Esto puede generar situaciones de fricción no deseada sobre la cuerda de la pieza producto del rejuego o de la entrada forzada del tornillo en su alojamiento.

### **Recomendaciones preliminares para falla por desgaste y barrido en rosca de tornillo**

-Seleccionar un grado correcto de tornillo con respecto a la tuerca y empotramiento que utiliza.

-Seleccionar un tornillo dimensionalmente correcto con respecto a la tuerca y alojamiento que utiliza.

- Considerar acciones preventivas referidas a corrosión y ludimiento
- Ensamblar todos los hilos de la rosca en el correspondiente alojamiento
- Introducir el tornillo con una correcta orientación respecto a su alojamiento, evitando ángulos de desfase.

#### **2.14) Falla de tuerca**

##### **Tuerca**

La tuerca es un complemento a la función de unión y empotramiento de un tornillo se caracteriza por tener una zona hueca circular con un diámetro compatible al diámetro del cuerpo cilíndrico del tornillo e incluye una cuerda interna que interactúa con la cuerda externa del tornillo como se ilustra a continuación (Ver Fig.2.18)



Fig.2.18: Ejemplo de tuerca [IDDP].

##### **Falla por desgaste en tuerca**

Implica la remoción progresiva de material generalmente localizada en la rosca de la tuerca y concentrada en un área determinada pudiendo ocasionar pérdida del perfil en la geometría de la rosca, esta situación es perceptible a simple vista en función de la presencia de leves irregularidades en la forma de la cuerda interna además de caracterizarse por ocasionar rejuego en el sistema de unión tuerca tornillo en casos severos [1] los danos se muestran a continuación. (Ver Fig.2.19)

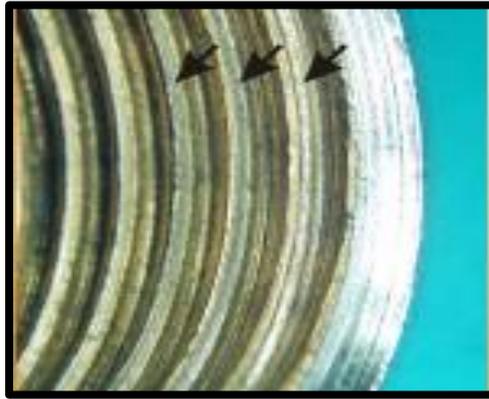


Fig.2.19: Falla por desgaste de tuerca en tornillo [IDDP].

### **Elementos involucrados**

-Dureza de tuerca inferior a la del tornillo: la diferencia de dureza ocasionará desgaste en la cuerda de la tuerca al ensamblar y desensamblar el sistema, arrancando así porciones de la misma.

-Constantes ensambles y desensambles del sistema tuerca tornillo: Cuando el sistema se ensambla y desensambla constantemente las roscas de tuerca y tornillo tienden a desgastarse en función de la fricción inherente al proceso.

-Pocos hilos de rosca ensamblados con el tornillo: Se presenta un ensamble parcial del sistema lo cual implica la concentración de la totalidad de la carga en los pocos hilos ensamblados de la tuerca, con ello se supera la resistencia de los mismos y por ende tienden a desgastarse notablemente.

-Presencia de diferencias dimensionales entre tuerca y rosca del tornillo: El tornillo y la tuerca no ensamblan de forma correcta y se genera movimiento en el sistema lo cual ocasiona fricción de forma constante sobre la rosca de cualquiera de los dos elementos derivando en desgaste de la misma.

### **Recomendaciones preliminares**

- Utilizar tuercas acordes al tornillo seleccionado
- Limitar el ensamble y desensamble del sistema
- Revisar el correcto y total ensamblaje del sistema tornillo tuerca.
- Utilizar tuercas dimensionalmente acordes al tamaño del tornillo

### **Falla por barrido en tuerca de tornillo**

El hilo de rosca se encuentra incompleto exhibiendo desprendimiento súbito de material en el área afectada considerando una zona de superficie irregular y con rebabas de material derivando en un acoplamiento defectuoso del sistema tuerca tornillo como se muestra (Ver Fig.2.20).



Fig.2.20: Barrido en tuerca de tornillo [IDDP].

### **Elementos involucrados**

- La rosca del tornillo presenta una dureza inferior a la del tornillo: La diferencia remarcada de durezas entre las piezas que componen el sistema tuerca tornillo deriva en el desgaste descontrolado del elemento con menor dureza.

-Constantes ensambles y desensambles del sistema tuerca tornillo: Cuando el sistema se ensambla y desensambla constantemente las roscas de tuerca y tornillo tiende a desgastarse en función de la fricción inherente al proceso.

-Pocos hilos de rosca ensamblados con el tornillo: Se presenta un ensamble parcial del sistema tornillo empotramiento lo cual implica la concentración de la totalidad de la carga en los pocos hilos ensamblados de la tuerca, con ello se supera la resistencia de los mismos y por ende tienden a desprenderse súbitamente.

-Presencia de diferencias dimensionales entre tuerca y rosca del tornillo: El tornillo y la tuerca no ensamblan de forma correcta generando movimiento en el sistema lo cual ocasiona fricción de forma constante sobre la rosca de cualquiera de los dos elementos derivando en desgaste de la misma.

### **Recomendaciones preliminares**

-Reemplazar la pieza por una que presente parámetros adecuados de resistencia en función al nivel de carga, grado de tornillo y patrón de ensambles y desensambles.

-Limitar el ensamble y desensamble del sistema

-Revisar el correcto y total ensamblaje del sistema tornillo empotramiento.

-Utilizar tuercas acordes al tornillo seleccionado

## **2.15) Fractura por fatiga a flexión**

### **Fractura por fatiga**

Es un tipo de fractura ocasionado por la presencia de esfuerzos intermitentes o cíclicos aun menores al esfuerzo de cedencia del material que compone a la pieza en cuestión y son producto de cargas de naturaleza igualmente cíclicas, generalmente se presenta en elementos que conforman sistemas dinámicos cuyo funcionamiento favorece la generación de vibraciones o movimientos irregulares indeseados[11] resultando en el daño mostrado a continuación (Ver Fig.2.21).



Fig.2.21: Ejemplo de fractura por fatiga [IDDP].

### **Fractura por fatiga a flexión**

Es una fractura producida por cargas laterales cíclicas que pueden ser menores al límite de cedencia del material que la compone, pero dada su naturaleza intermitente son capaces de ocasionar esfuerzos adicionales que fomentan situaciones de fractura.

La zona de fractura presentará marcas elípticas provocadas por cargas cíclicas, además de orígenes de fractura situados en lados opuestos de la periferia del cuerpo cilíndrico de la pieza, ocasionados por cargas perpendiculares al eje principal del tornillo [11] la superficie der fractura se muestra a continuación (Ver Fig.2.22)



Fig.2.22: Falla por fractura por fatiga a flexión [UDIATEM].

### **Elementos involucrados**

-Rejuego de tornillo en acoplamiento: Esto puede ser producto de diferencias dimensionales entre el tornillo y su alojamiento, de la falta de torque en el sistema tornillo acoplamiento, o de irregularidades dinámicas que tienden a aflojar un tornillo a pesar de haber proporcionado un adecuado torque inicial generando movimiento descontrolado en el sistema y cargas intermitentes sobre la pieza.

-Concentración de esfuerzos: Esto suele ser producto de irregularidades geométricas o superficiales originadas por defectos de manufactura o daños provocados por corrosión generando áreas vulnerables a situaciones dinámicas presentes en el sistema.

-Presencia de cargas laterales cíclicas:

-Un grado de tornillo menor al necesario:

### **Recomendaciones preliminares**

-Eliminar vibraciones irregulares en el sistema

-Seleccionar dimensiones correctas de tornillo

-Eliminar defectos superficiales y geométricos presentes en la pieza.

-Eliminar agentes favorecedores de corrosión.

### **2.16) Fractura por fatiga a tracción**

Es una ruptura de la pieza producida por cargas paralelas al eje principal del cuerpo cilíndrico del tornillo, de naturaleza cíclica que pueden ser menores al límite de fluencia del material, la zona de fractura se caracteriza por exhibir marcas elípticas sucesivas a manera de pliegue conocidas como marcas de playa, lo que define la naturaleza intermitente de los esfuerzos que ocasionaron la ruptura, además de orígenes de fractura distribuidos por toda la periferia del cuerpo cilíndrico del tornillo considerados indicadores de aplicación de esfuerzos paralelos al eje principal del cuerpo cilíndrico de la pieza [8] como se muestra en la imagen. (Ver Fig.2.23).



Fig.2.23: Falla por fractura por fatiga a tensión [UDIATEM].

#### **Elementos involucrados**

-Presencia de cargas cíclicas uniaxiales en dirección paralela al eje principal del tornillo: Se refiere a la presencia de cargas cíclicas irregulares producto de vibraciones en el sistema o de anomalías dinámicas del mismo.

-Tornillos flojos en acoplamiento: Esta situación puede ser producto de diferencias dimensionales entre el tornillo y su alojamiento, de la falta de torque en el sistema tornillo acoplamiento, o de irregularidades dinámicas que tienden a aflojar un tornillo a pesar de haber proporcionado un adecuado torque inicial.

-Concentración de esfuerzos en algún punto: Esto es producto de irregularidades geométricas o superficiales originadas por defectos de manufactura o danos provocados por agentes removedores de material no deseados en el sistema tales como aquellos que favorecen situaciones de corrosión.

-Un grado de tornillo inferior al requerido por la pieza en condiciones operativas: Las condiciones de operación dinámicas planteadas por un determinado sistema exigen materiales del tornillo con una resistencia mayor a las cargas soportadas por la pieza, ya que la naturaleza intermitente de dichas cargas genera esfuerzos adicionales que erróneamente pueden ser omitidos del análisis del sistema.

### **Recomendaciones preliminares**

- Seleccionar dimensiones correctas de tornillo con respecto a su alojamiento además de proporcionarle un torque inicial adecuado, esto con el objeto de eliminar rejuego del tornillo al interior de su acoplamiento.
- Eliminar defectos superficiales y geométricos presentes en la pieza.
- Eliminar agentes removedores de material ajenos al funcionamiento del sistema tornillo alojamiento.
- Eliminar vibraciones irregulares en el sistema

### **2.17) Deformación a tracción**

#### **Deformación**

Es un estado de la pieza en el cual se encuentra inhabilitada a operar al máximo de su capacidad debido a la pérdida de su geometría original sin considerar desprendimiento de material.

#### **Deformación a tensión**

Se refiere a la pérdida de la geometría original del tornillo debida a un flujo uniaxial de material en dirección paralela al eje principal del tornillo, esto implica alargamiento de la pieza y una disminución en la sección transversal del cuerpo cilíndrico del tornillo (encuellamiento) como se muestra en la imagen (Ver Fig.2.24)



Fig.2.24: Falla por deformación a tensión en tornillos [AFIS].

### **Elementos involucrados**

- Torque de apriete es muy elevado en el tornillo o en la tuerca: Esto produce esfuerzos a torsión adicionales a los generados por la carga que el tornillo soporta en operación y por ende contribuyendo a su deformación.
- Una elevada temperatura de operación en relación al material que compone la pieza
- Elevada carga a tensión en servicio.
- Grado de tornillo inferior al necesario
- Presencia de cargas cíclicas a tracción

### **Recomendaciones preliminares**

- Seleccionar una pieza de material adecuado a la temperatura a la cual opera el sistema
- Añadir tornillos adicionales al sistema
- Seleccionar un grado de tornillo acorde a la magnitud de la carga máxima que se soportará en operación.
- Eliminar vibraciones en el sistema.
- No sobre ajustar el tornillo.

### **2.18) Deformación a flexión**

Se refiere a la pérdida de la geometría del tornillo debida a un flujo lateral de material en dirección perpendicular al eje principal del cuerpo cilíndrico del tornillo, esto implica doblamiento de la pieza generando una curvatura sobre la geometría de la pieza como se ilustra (Ver Fig.2.25).



Fig.2.25: Falla por deformación a flexión en tornillos [IDDP].

### **Elementos involucrados**

- Elevada carga a flexión en servicio:
- Grado de tornillo inferior al necesario:
- Tornillo flojo en acoplamiento:
- Cargas cíclicas a flexión en servicio:
- Una elevada temperatura de operación en relación al material que compone la pieza:

### **Recomendaciones**

- Ajustar la selección de dimensiones de la pieza o en su caso aplicar el torque suficiente con el objeto de que no exista movimiento de la misma con respecto a su acoplamiento.
- Añadir tornillos adicionales si es posible
- Considerar la selección de un tornillo compuesto por material con mayor punto de fluencia al de la pieza actual.
- Eliminar vibraciones en el sistema.
- Eliminar defectos superficiales y geométricos presentes en la pieza.

### **CAPÍTULO 3: DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMA EXPERTO PARA ANÁLISIS DE FALLAS EN TORNILLOS**

#### **Introducción**

En este capítulo se explicará cómo fue posible introducir la base de conocimientos y ordenarla a manera de programa computacional mediante la implementación de reglas deductivas contenidas en un lenguaje de programación y presentadas en un ambiente gráfico interactivo.

#### **Alcances**

-Se expondrán los componentes elementales del sistema experto de análisis de falla en tornillos justificando el uso de los mismos.

-Se describirá la interacción de los componentes elementales del sistema experto de análisis de falla en tornillos.

-Se describirá a detalle y esquemáticamente la estructura del sistema experto de análisis en tornillos.

### 3.1) Características del sistema experto de análisis de fallas en tornillos

Las características deseadas para el sistema experto de análisis en tornillos [5] se presentan a continuación (Ver Fig.3.1).

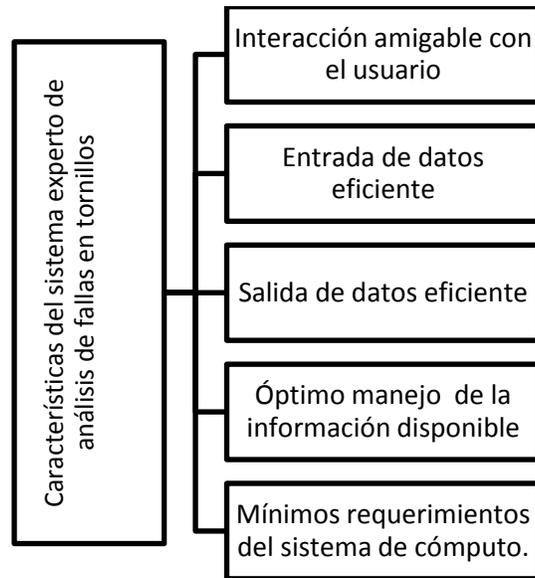


Fig.3.1: Características del sistema experto de análisis de fallas en tornillos

#### *Interacción amigable con el usuario:*

Implica proveer al usuario de un ambiente virtual simple pero eficaz, enriquecido con imágenes y apoyo descriptivo haciendo uso de términos comunes con el objeto de no limitar el aprovechamiento de la herramienta.

#### *Entrada de datos eficiente*

Implica la capacidad del programa de solicitar al usuario de forma puntual y específica información útil, con el objeto de diagnosticar correctamente una falla en tornillos.

#### *Salida de datos eficiente*

Implica la capacidad del programa de entregar al usuario un resultado desglosado con información útil y concisa y por ende fácil de comprender con el fin de resolver el problema de falla analizado.

#### *Óptimo manejo de la información disponible*

Implica la capacidad de llegar a un resultado de diagnóstico de falla en tornillos con la mínima cantidad de información posible, ya que el usuario no siempre contará con una amplia gama de información.

*Mínimos requerimientos de sistema de cómputo*

Implica la posibilidad de ejecutar el programa en la mayoría de los equipos de cómputo disponibles, ya que los requerimientos del software no plantean la necesidad de una alta capacidad en memoria RAM.

**3.2) Parámetros de selección de Shell**

Una vez definidas las características operativas del software de análisis de falla en tornillos en su versión final, se definirá el tipo de herramienta de programación e interacción virtual (Shell) que hará posible su construcción [4], los parámetros que deberán ser cumplidos por el Shell se presentan a continuación (Ver Fig.3.2).

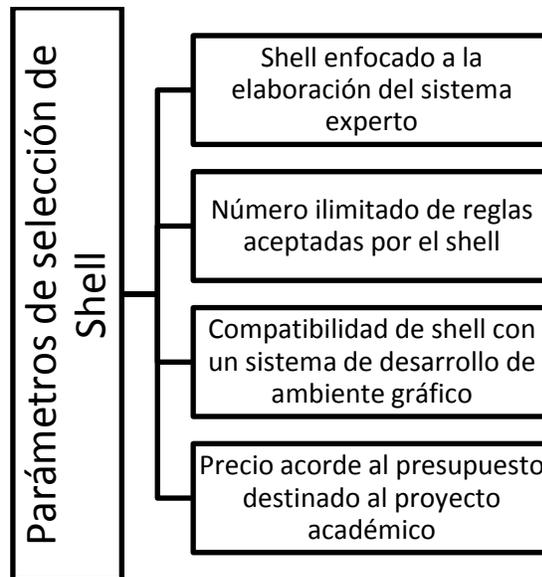


Fig.3.2: Parámetros de selección de shell

*Shell enfocado a la elaboración de sistema experto*

El Shell deberá encontrarse orientado a la programación de sistemas expertos, considerando así funciones pre programadas que facilitarán la construcción de la herramienta final, ahorrando tiempo y permitiendo la introducción de diseñadores que no requieran conocimientos avanzados de programación.

*Número ilimitado de reglas aceptadas por el Shell*

El Shell como lenguaje de programación deberá permitir la introducción de un número prácticamente ilimitado de reglas, con el objeto de no limitar el número de vías de desarrollo de un diagnóstico de falla así como proporcionar la posibilidad de expansión ilimitada del sistema en un futuro.

*Compatibilidad de Shell con un sistema de desarrollo de ambientes gráficos*

Las reglas desarrolladas en el Shell inicial deberán plantear la posibilidad de integración a un sistema que le proporcione aspectos gráficos de presentación con fines estéticos y de funcionalidad.

*Precio acorde al presupuesto destinado al proyecto académico*

El precio de la herramienta de diseño computacional deberá acotarse al mínimo posible con el objeto de mantener su licencia de uso vigente el mayor tiempo posible haciéndola accesible al uso y posible modificación en proyectos posteriores.

**3.3) Shell seleccionado para desarrollo de sistema experto en análisis de falla en tornillos**

**Shells considerados**

Existe una amplia gama de Shells orientados a la estructuración de sistemas expertos que cumplen con los parámetros señalados en la Fig.36: de los cuales se destacan los presentados en el diagrama (Ver Fig.3.3) dado que son aquellos cuyas características se aproximan a la herramienta deseada.

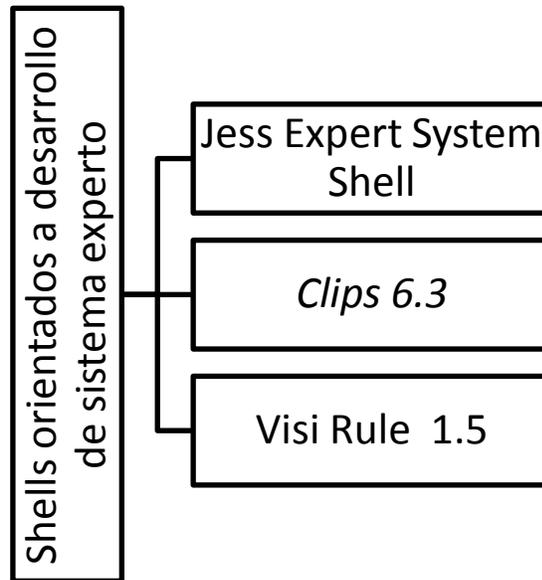


Fig.3.3: Shells orientados al desarrollo de sistema experto

*Características de Shells considerados para la elaboración de sistema experto de análisis de fallas en tornillos.*

1. *Jess expert system Shell:*

- Plataforma en java con complemento gráfico de interacción con eclipse.
- Compatibilidad con sistemas de desarrollo de ambientes gráficos.
- Presentación de características pre programadas para desarrollo del sistema experto.
- Amplia cantidad aplicaciones desarrolladas con esta herramienta.
- Número limitado de reglas aceptadas por el sistema en función de la licencia disponible.
- Alto costo de licencia para uso académico temporal.

2. *Clips 6.3*

- Plataforma en C++ sin necesidad de complemento gráfico de interacción.
- Compatibilidad con sistemas de desarrollo de ambiente gráfico tales como Visual Basic y Netbeans.
- Posibilidad de introducción de grandes cantidades de reglas y definición de variables para las mismas.
- Posibilidad de introducción de cadenas de razonamiento lógico basado en métodos inductivos y deductivos (Encadenamiento hacia atrás y hacia adelante).
- Disponibilidad de licencia libre para uso académico sin límite de tiempo.

3. *Visi Rule 1.5*

- Plataforma en Win Prolog sin necesidad de complemento gráfico de interacción
- Ambiente gráfico sumamente amigable
- Número limitado de introducción de reglas y variables.
- No se encontraron precedentes de aplicación en proyectos académicos.
- Alto costo de licencia para uso académico temporal.

**Shell seleccionado**

En función a las características presentadas, el Shell seleccionado fue Clips 6.3 aunado a Netbeans como software de complemento gráfico y Java como compilador de código y de ambiente virtual, esto se enlista en el diagrama (Ver Fig.3.4).

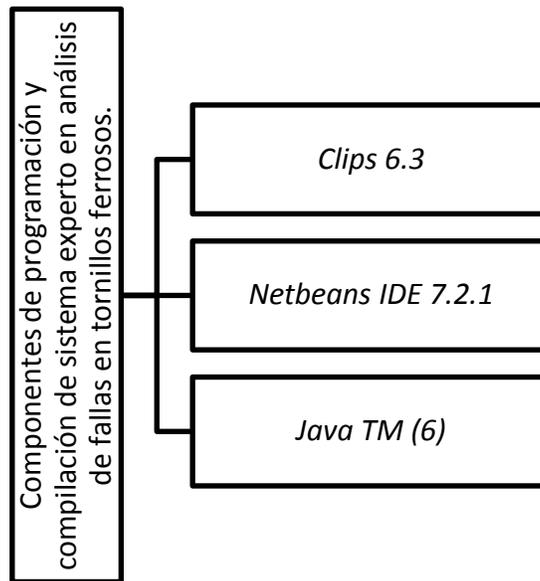


Fig.3.4: Componentes de programación y compilación de sistema experto en análisis de fallas en tornillos

#### *Clips 6.3*

Su función consiste en estructurar la red de razonamiento lógico que conforma al sistema experto para análisis de fallas en tornillos ya que su código permite la introducción de parámetros y la combinación de los mismos derivando en la generación de reglas para su posterior encadenamiento.

#### *Netbeans IDE 7.2.1*

Este módulo recibe instrucciones de Clips 6.3 y proporciona un esquema de presentación estética y funcional al programa ya que en él se desarrolla el ambiente de interacción directa con el usuario el cual está compuesto por elementos gráficos que facilitan la introducción de información proporcionada por el usuario así como la entrega de respuestas emitidas por el programa.

#### *Java TM (6)*

En este módulo se compilará la integración de los dos componentes anteriores presentando un esquema funcional al usuario.

### **3.4) Representación del conocimiento**

Tomando como referencia los conocimientos presentados en el capítulo 2 se estructuraron las reglas de inferencia que conforman la base de conocimientos que permiten diagnosticar las fallas en tornillos ferrosos [6] como se ilustra a continuación (Ver Fig.3.5).

*Parámetro*

Un parámetro es el elemento más básico involucrado en el desarrollo o identificación de un caso de falla en tornillos y se refiere a una característica puntual y específica observada en la pieza, para efectos de este proyecto es posible definir un parámetro solo por inspección visual macroscópica. El parámetro puede asumir valores discretos como por ejemplo la existencia o ausencia de una fractura.

*Regla*

Representa una sentencia que partiendo de parámetros de entrada permite generar conclusiones acerca del tipo de falla.

*Diagnóstico de falla*

Es el resultado que se presenta al usuario y se genera a partir de las conclusiones que se desprenden de las reglas de inferencia.

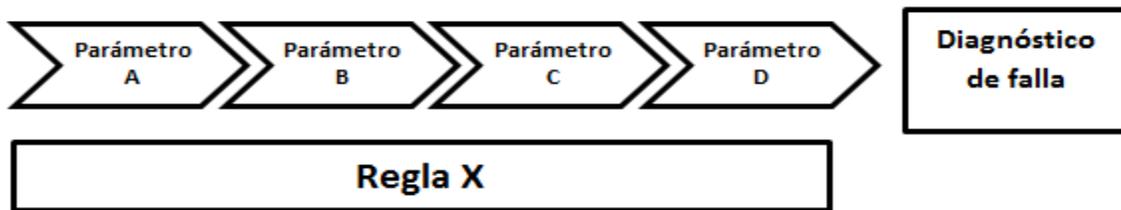


Fig.3.5: Esquema de inferencia que implica la activación de una regla a partir de parámetros y la generación de un diagnóstico

A continuación se muestra un ejemplo aplicado en el sistema experto para diagnosticar fractura dúctil a tensión (Ver Fig.3.6)



Fig.3.6: Ejemplo de una regla de inferencia sobre análisis de falla en tornillos ferrosos.

Los diagnósticos en el sistema se pueden generar a partir de la activación de una o de varias reglas, lo cual permite obtener conclusiones aun cuando la información este incompleta. Este sistema experto es capaz de diagnosticar 16 fallas de tornillos a partir de 58 reglas principales de inferencia además de las reglas de compilación asociadas a éstas (Ver Anexo).

**Árbol de falla**

El árbol de falla (Ver Fig.3.7) permite visualizar desde una perspectiva general se estructuran las fallas en tornillos, siendo éste el esquema del que se partió para generar la base de conocimientos en forma de reglas de inferencia.

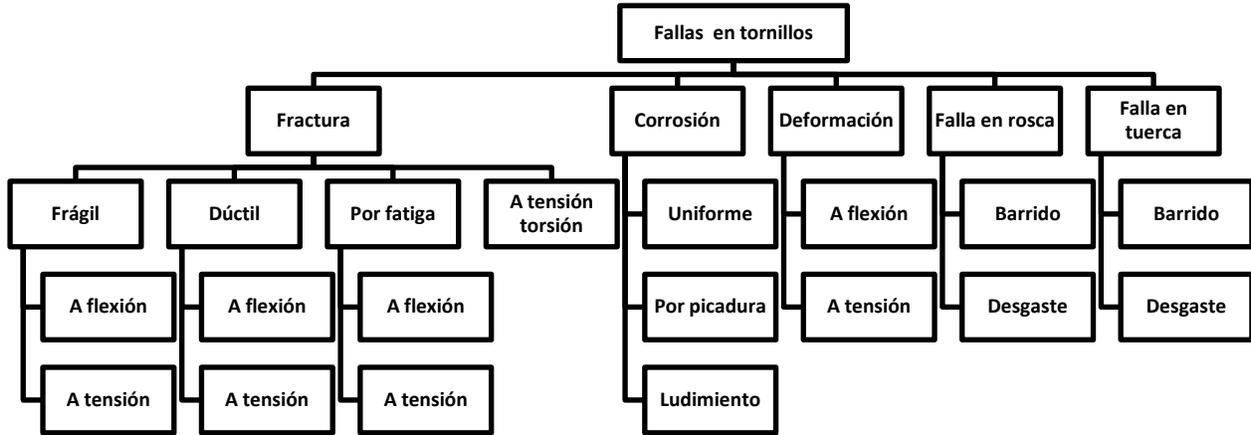


Fig.3.7: Árbol de fallas en tornillos

**3.5) Implementación del sistema experto en análisis de fallas en tornillos**

**Código en CLIPS 6.3**

Una vez definida la estructura de razonamiento lógico que rige al sistema experto el total de las reglas que componen la base de conocimientos fue trasladado al lenguaje de programación de CLIPS 6.3, en este lenguaje las reglas pueden ser activadas selectivamente por el usuario mediante la introducción de parámetros a través de Netbeans, de tal manera que cuando una de dichas reglas sea activada un comando específico será emitido de vuelta a Netbeans desplegando así un diagnóstico de falla un fragmento del código se presenta a continuación (Ver Fig.3.8).

```

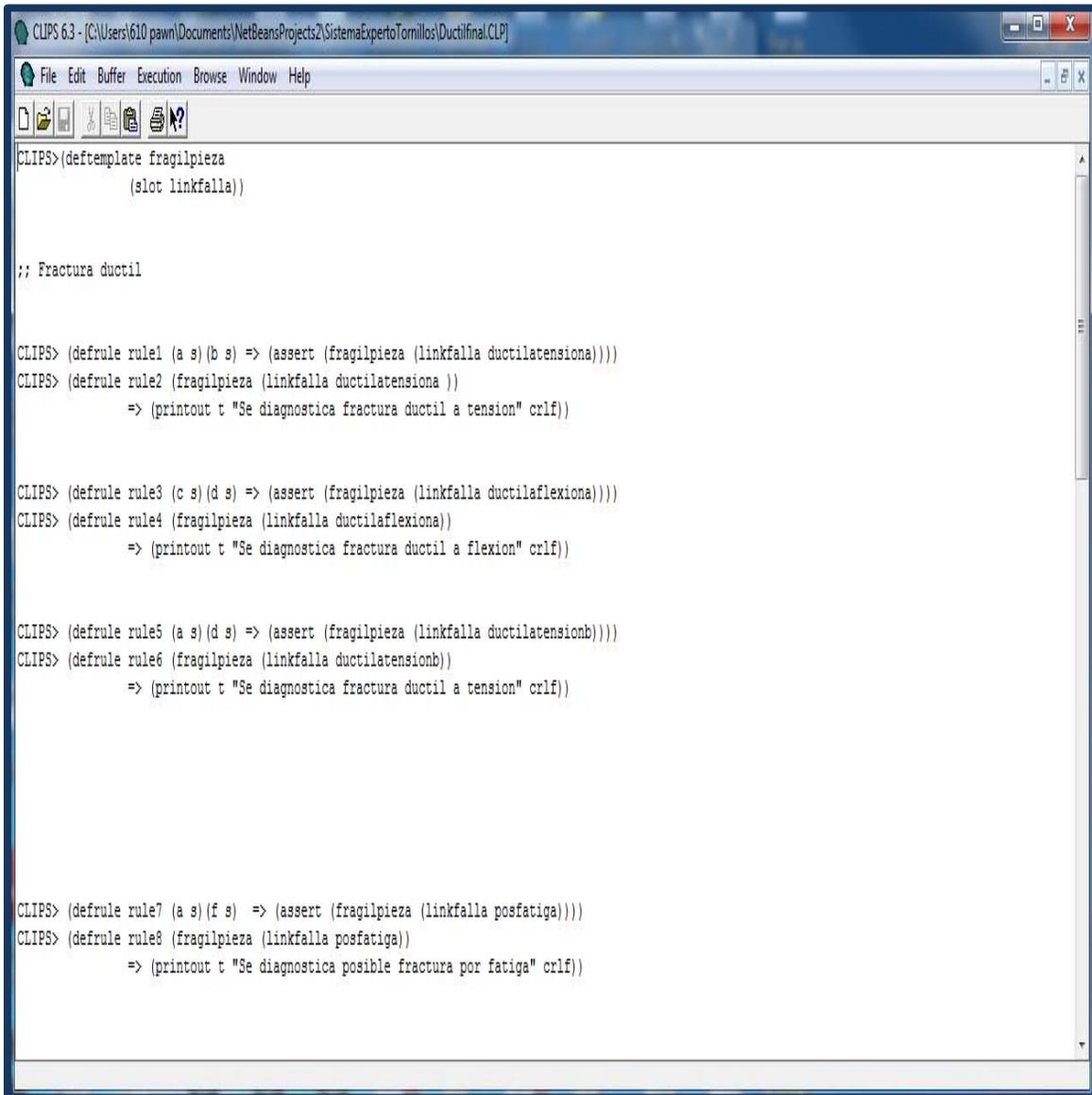
CLIPS> (defrule rule1 (A s) (B s) => (assert (X (Y C))))
CLIPS> (defrule rule2 (X (Y C)) => (printout t "SE DIAGNOSTICA FALLA EN ELEMENTO MECANICO" crlf))
    
```

Fig.3.8: Ejemplo de código en CLIPS

En el primer renglón se ilustra la combinación de dos parámetros “A” y “B” almacenados en una librería “Y” que posee una dirección “X” dando como resultado una regla “C”.

En el segundo renglón se invoca a la regla “C” definida con anterioridad desde la librería “Y” en la que se encuentra, y que posee una dirección “X”, con la condicional de que al invocar la regla “C” se debe imprimir mediante el comando “printout t” la leyenda: "SE DIAGNOSTICA FALLA EN ELEMENTO MECANICO".

Bajo este esquema se introdujeron la totalidad de atributos y reglas del sistema (Anexo). En la figura (Ver Fig.3.9) se presenta parte de la edición de las reglas.



```
CLIPS 6.3 - [C:\Users\610 pawn\Documents\NetBeansProjects2\SistemaExpertoTornillos\Ductilfinal.CLP]
File Edit Buffer Execution Browse Window Help
CLIPS> (deftemplate fragilpieza
      (slot linkfalla))

;; Fractura ductil

CLIPS> (defrule rule1 (a s) (b s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ductilatensiona))))
CLIPS> (defrule rule2 (fragilpieza (linkfalla ductilatensiona ))
      => (printout t "Se diagnostica fractura ductil a tension" crlf))

CLIPS> (defrule rule3 (c s) (d s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ductilaflexiona))))
CLIPS> (defrule rule4 (fragilpieza (linkfalla ductilaflexiona))
      => (printout t "Se diagnostica fractura ductil a flexion" crlf))

CLIPS> (defrule rule5 (a s) (d s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ductilatensionb))))
CLIPS> (defrule rule6 (fragilpieza (linkfalla ductilatensionb))
      => (printout t "Se diagnostica fractura ductil a tension" crlf))

CLIPS> (defrule rule7 (a s) (f s) => (assert (fragilpieza (linkfalla posfatiga))))
CLIPS> (defrule rule8 (fragilpieza (linkfalla posfatiga))
      => (printout t "Se diagnostica posible fractura por fatiga" crlf))
```

Fig.3.9: Porción de código de programación en CLIPS 6.3

### 3.6) Definición de la interfaz de usuario y mecanismo de selección

#### Construcción de la interfaz de usuario en Netbeans

Netbeans permitió elaborar la interfaz de usuario, permitiendo en un ambiente amigable, la introducción de títulos, imágenes, botones de selección y recuadros de texto. Esta herramienta permite elaborar con facilidad el diseño de esquemas virtuales, lo cual permite contar con ventajas en cuanto a la presentación y funcionalidad del sistema. En la Figura (Ver Fig.3.10) se presenta una ventana en donde se plasma el ambiente de desarrollo de Netbeans para la creación de la interfaz gráfica.

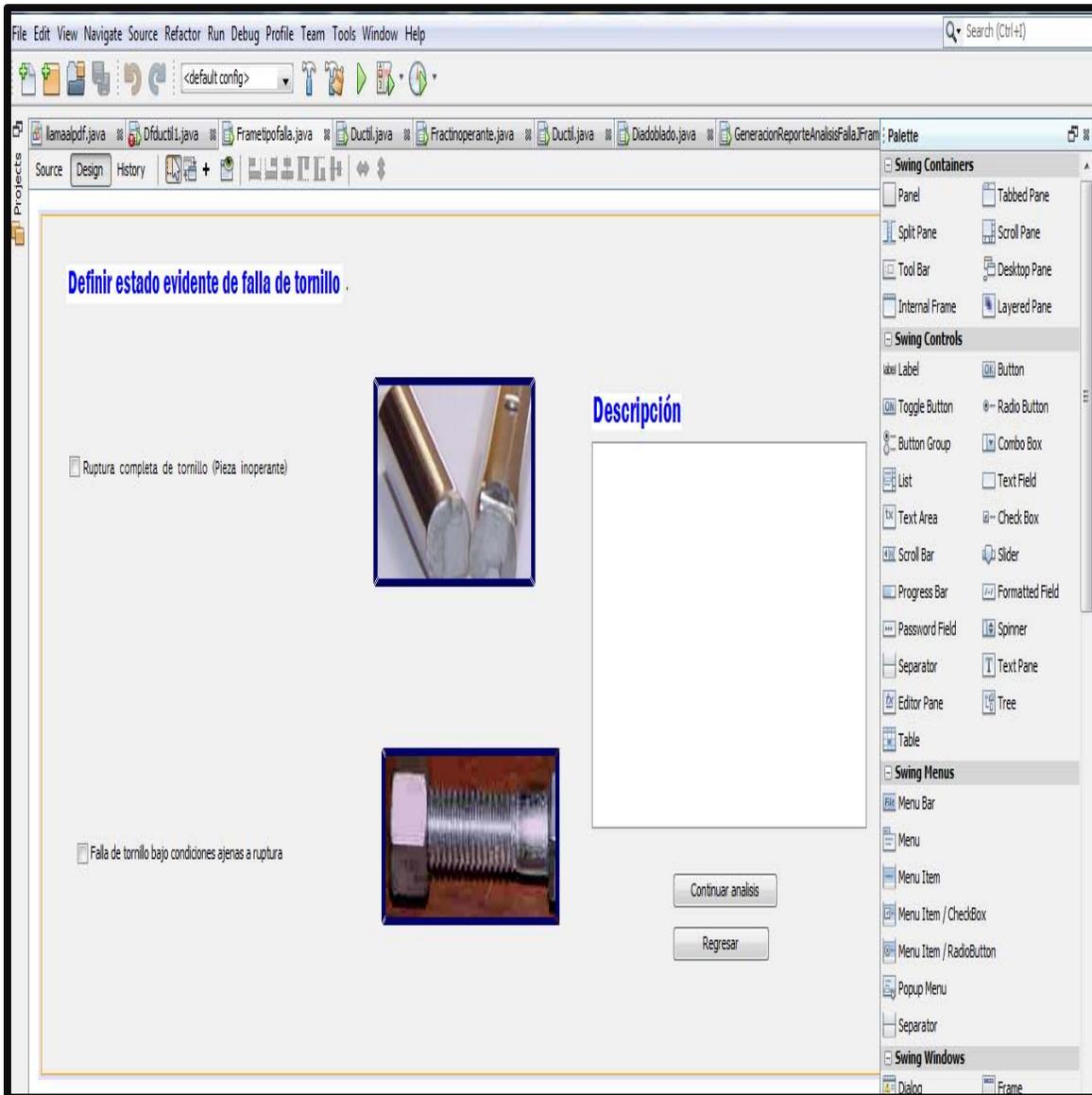


Fig.3.10: Creación de interfaz gráfica en Netbeans

### Implementación de interfaz de usuario

La interfaz de usuario tiene como objetivo el facilitar al individuo que usa el programa, la definición de atributos para poder introducirlos al sistema y que active las reglas a partir de ellos. Esta interfaz está constituida de imágenes descriptivas y texto. El usuario selecciona las opciones que requiera en función de la falla que está analizando como se muestra en la imagen (Ver Fig.3.11). Los recuadros e imágenes referidos a parámetros se presentan al usuario de partiendo de lo general hacia lo particular. Cuando el usuario selecciona alguna opción aparece un descripción referente a la opción seleccionada.

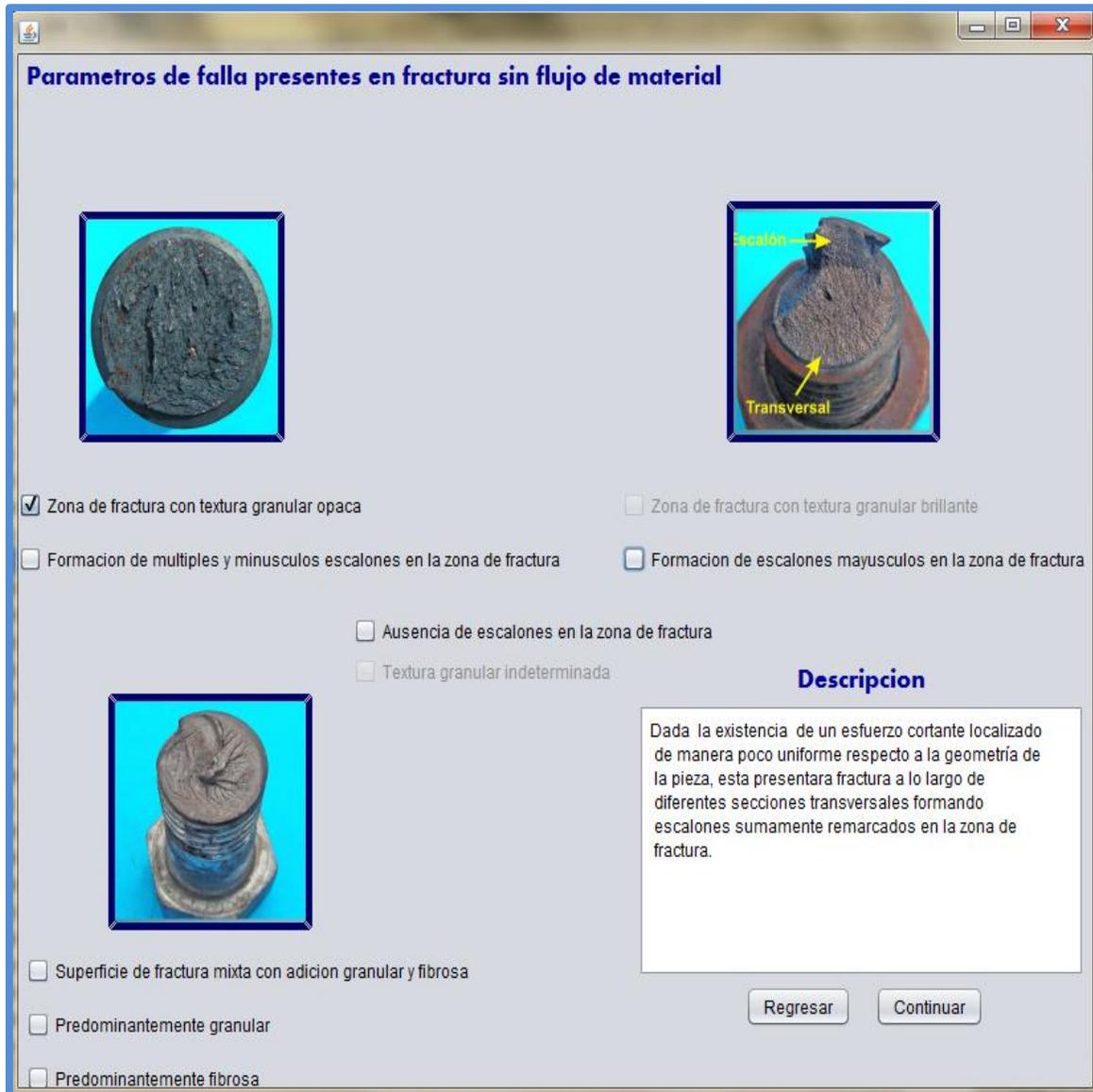


Fig.3.11: Interfaz de usuario

### 3.7) Entrega de resultados del sistema

En la pantalla de resultados se indica el tipo de falla y las posibles causas que la originaron. Le permite al usuario elegir las causas que el considere convenientes para su caso de estudio y en función de su elección se desplegarán las recomendaciones correspondientes como se muestra en la imagen (Ver Fig.3.12).

**Se diagnostica fractura por fatiga a flexión**

**Señalar parámetros de incidencia observados**

- Carga lateral cíclica en operación
- Tornillo flojo en acoplamiento
- Grado de tornillo menor al requerido
- Deterioro por acción de algún agente químico en la pieza
- Acabado superficial defectuoso de la pieza
- Discontinuidades geométricas de la pieza
- Cambios bruscos de temperatura de la pieza en operación

Tipo de servicio:	jLabel9	Horas estimadas de operación:	jLabel9
Sistema:	jLabel9	Fecha de falla:	jLabel9
		Material de la pieza:	jLabel9

**Estado**

Se presentan características de remoción de material por acción de alguna sustancia corrosiva, dicha remoción de material crea una zona de concentración de esfuerzos que dará comienzo a la ruptura de la pieza en cuestión.

**Recomendaciones**

Se recomienda tomar acciones preventivas contra corrosión como son evitar la filtración de sustancias ajenas al dispositivo mecánico, recubrir la pieza en cuestión o seleccionar la composición de la misma en función del factor de corrosión presente en el medio de operación.

Regresar   Construir   Datos   Generar Reporte en PDF

Fig.3.12: Ventana de diagnóstico de falla

En la imagen (Ver Fig. 3.13) se muestra la pantalla del reporte final, en donde se presenta el resultado del diagnóstico, acompañada de los datos de la pieza, se indican causas probables de la falla y su descripción, finalmente se presentan también las recomendaciones pertinentes (Ver Fig. 30). Con esta información del reporte final se genera un archivo en formato PDF.

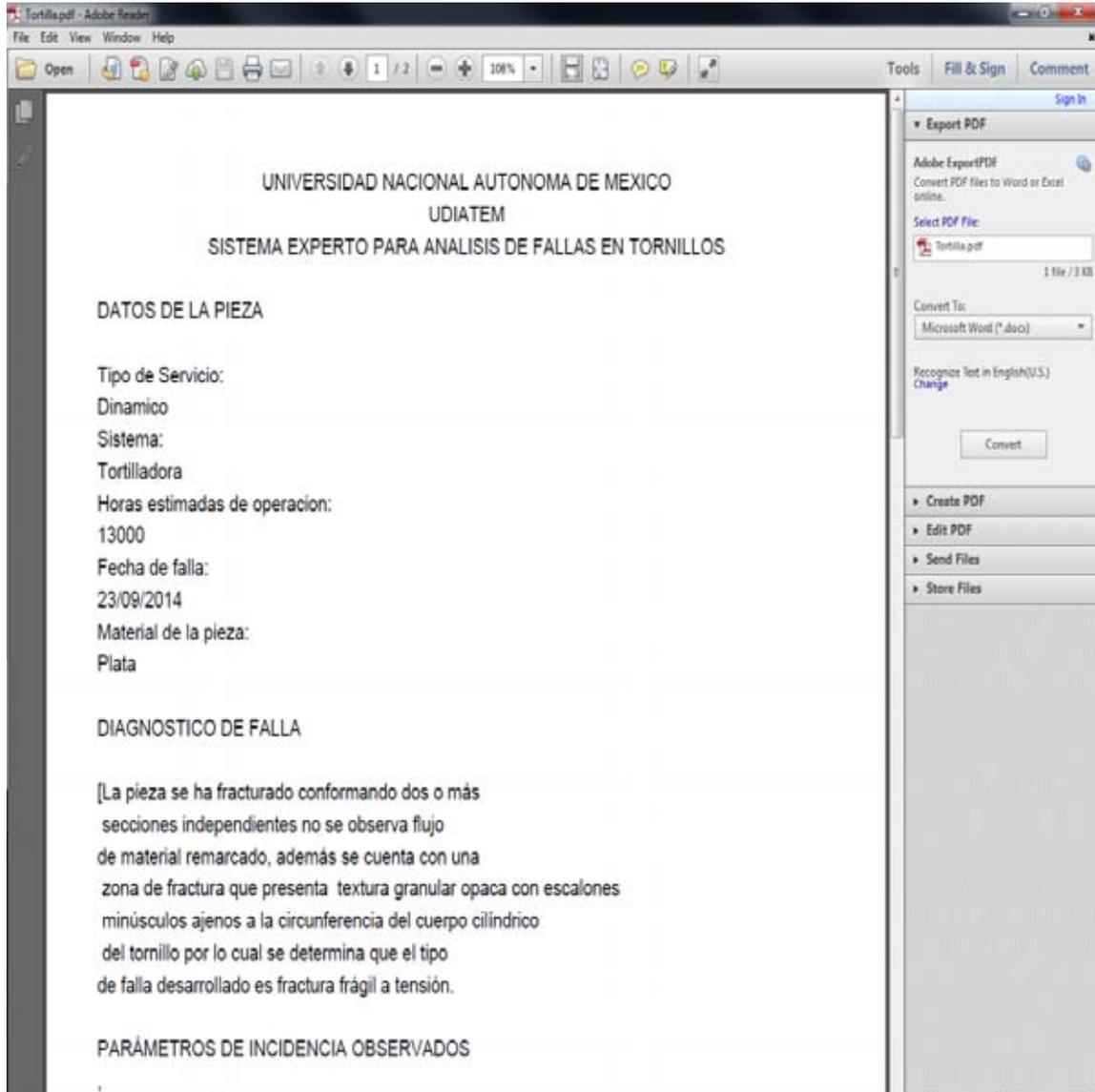


Fig.3.13: Reporte de análisis de caso de falla en tornillo formato PDF

## **CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL PROTOTIPO**

### ***Introducción***

Una vez constituido el prototipo de sistema experto de análisis de falla en tornillos se resolverán casos de falla en tornillos que ya han sido resueltos en artículos académicos y publicaciones ingenieriles con el objeto de determinar si los resultados obtenidos por el sistema experto y la publicación son equivalentes. Dado que el sistema experto de análisis de falla en tornillos se basa en la inspección física visual a nivel macroscópico de una pieza que ha fallado se eligieron artículos que incluyen imágenes claras del caso de falla en tornillo analizado, presentando características de material, operacionales y geométricas bien definidas.

### ***Alcances***

-Se resolverán 4 casos disponibles de falla en artículos referentes al tema.

Debieron dejarte algo más útil jaja saludos monas

#### 4.1) Comportamiento en fatiga de uniones roscadas

Comportamiento en fatiga de uniones roscadas, B. González, J.C. matos, F.F. Ayaso, J. Toribio Ingeniería de materiales (universidad de salamanca) 2008. [14]

La falla presentada fue generada en laboratorio mediante el sometimiento de un tornillo a cargas cíclicas a tensión con una frecuencia y magnitud definidas hasta alcanzar la fractura de la pieza como se muestra en la imagen (Ver Fig.4.1)

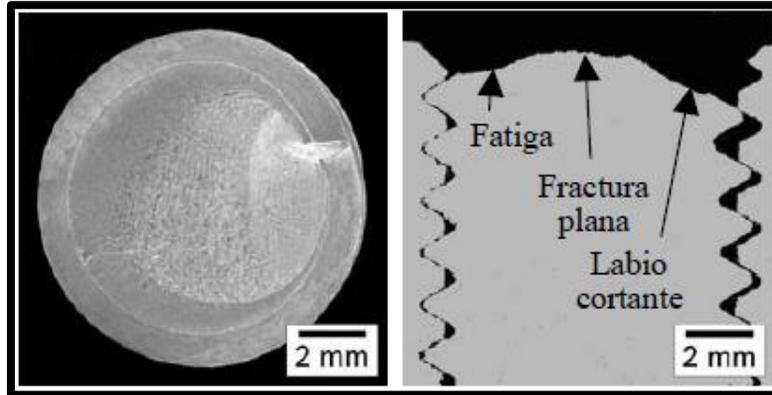


Fig.4.1: Corte transversal de fatiga en uniones roscadas caso 2 [14]

Dado que la pieza se fracturó por la acción de cargas a cíclicas de tracción, del artículo se concluye que la falla presentada es una fractura por fatiga a tensión.

#### Resolución mediante sistema experto

En la imagen de la zona de fractura de la pieza fallada (Ver Fig. 4.1) se observan fisuras cortas a manera de luna creciente (Marcas de playa) además de una superficie tersa con orígenes de fractura ubicados en un extremo de la circunferencia del cuerpo cilíndrico del tornillo, estas características fueron introducidas como los siguientes parámetros al sistema experto (Ver Fig. 4.2)

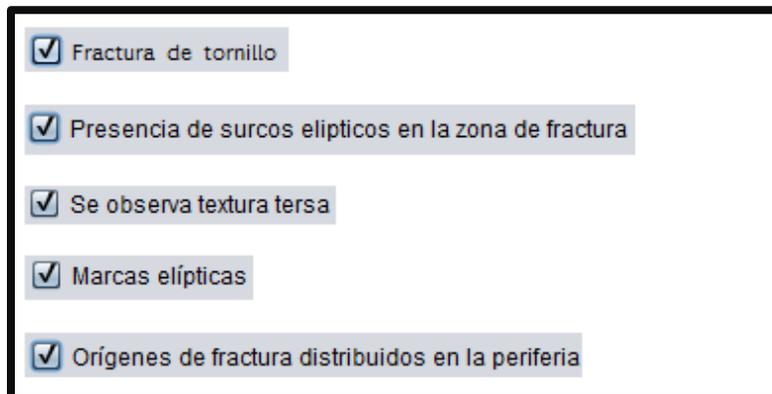


Fig.4.2: Parámetros de sistema experto caso 2

## Diagnóstico de falla

La regla activada por la colección de parámetros señalados concluye que se trata de una fractura por fatiga a tensión desplegándose la siguiente ventana de diagnóstico (Ver Fig.4.3):

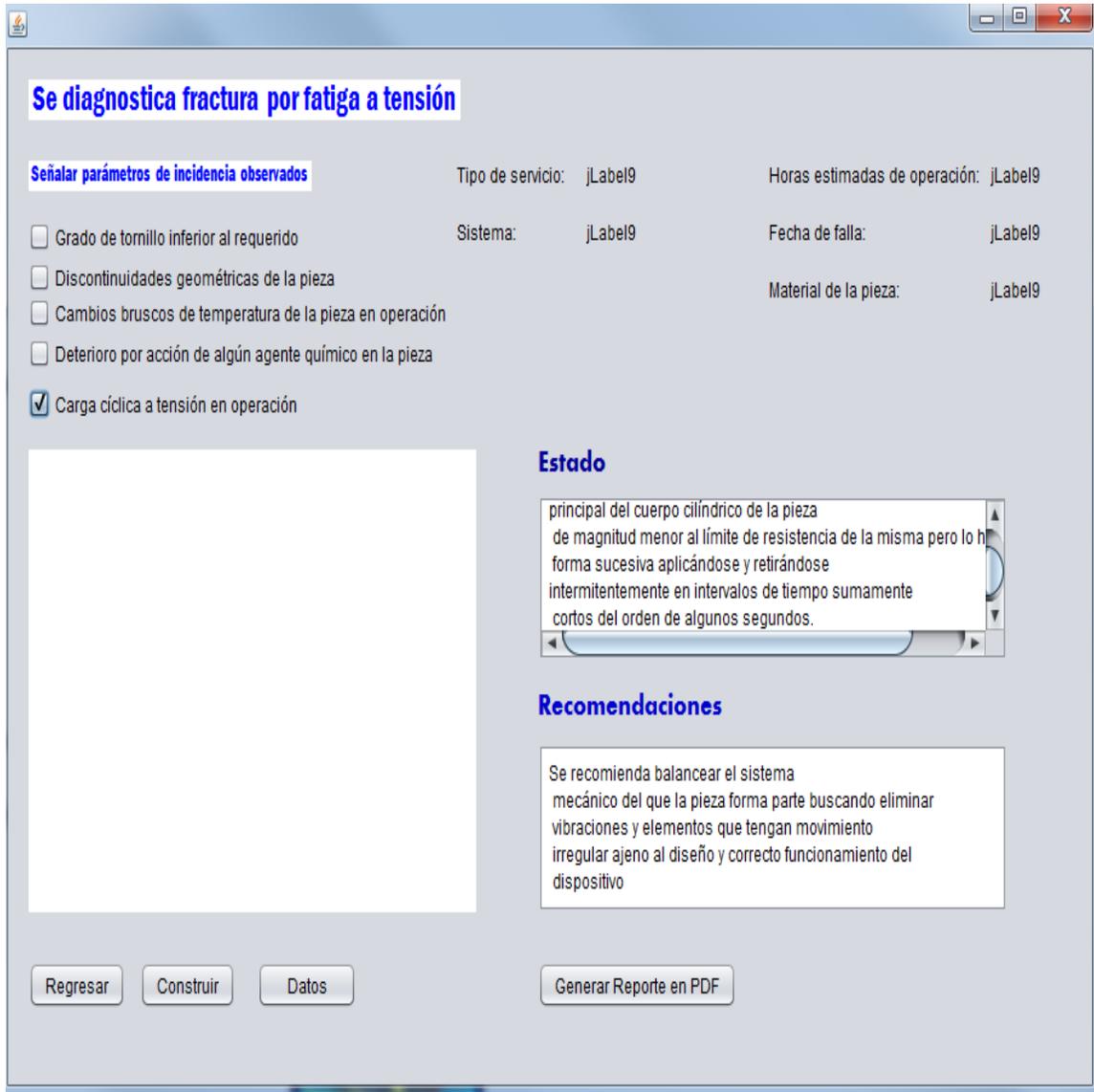


Fig.4.3: Ventana de diagnóstico de falla caso 2

## Conclusión

El resultado del artículo referido y el diagnóstico de falla emitido por el sistema experto coinciden en que se trata de una fractura por fatiga a tensión, de esta manera se llega a resultados equivalentes por métodos diferentes validando así la funcionalidad del sistema experto.

#### 4.2) Comportamiento en fatiga de uniones roscadas segundo caso

**Comportamiento en fatiga de uniones roscadas, B. González, J.C. matos, F.F. Ayaso, J. Toribio Ingeniería de materiales (universidad de salamanca) 2008. [14]**

La falla analizada fue generada en laboratorio, sometiendo tornillos idénticos a una carga constante de tracción excesiva resultando en el seccionamiento total de las piezas como se muestra en la figura (Ver Fig.4.4).

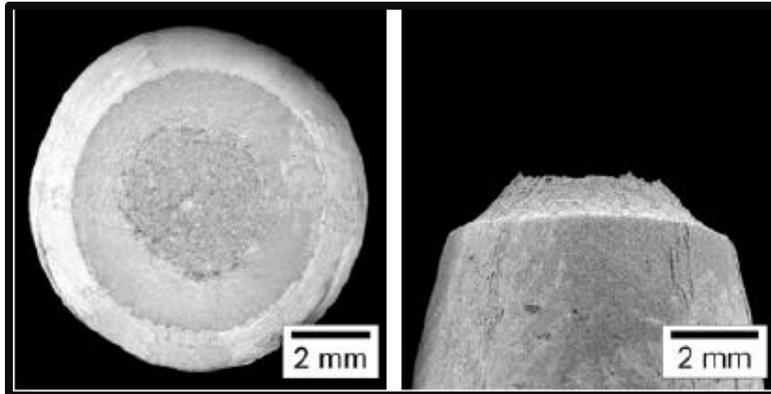


Fig.4.4: Corte transversal de falla analizada caso 1 [14]

El comportamiento del material durante 3 ensayos de tracción se muestra en gráfica (Ver Fig. 4.5) en ella se aprecia una deformación sostenida de las piezas con respecto al esfuerzo aplicado lo que implica que el tornillos se compone de un material dúctil.

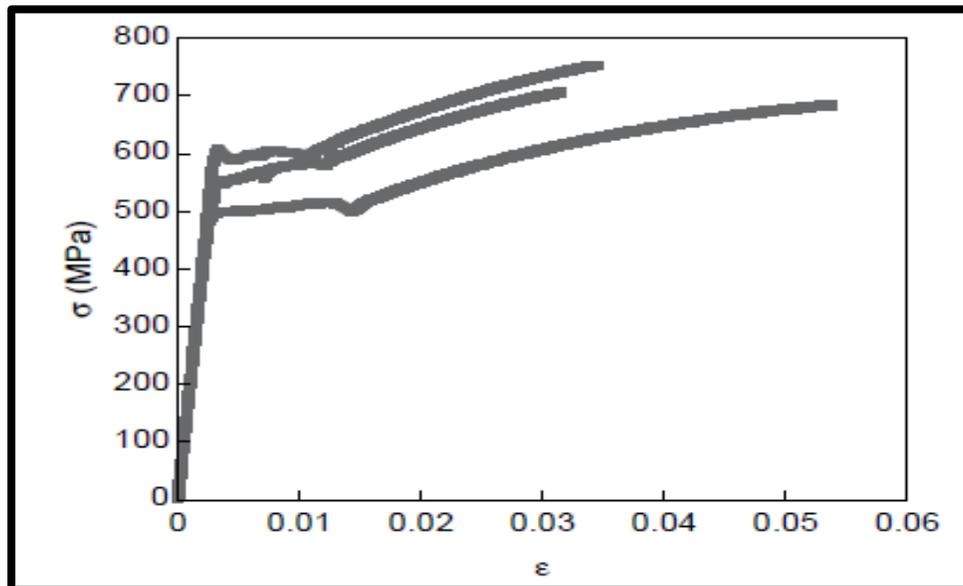


Fig.4.5: Grafica esfuerzo vs deformación de tornillo prueba [14]

Dado que el material de las piezas se ha definido como dúctil y las cargas aplicadas fueron resultado de un ensayo de tracción que derivó en la fractura de la pieza, del artículo se concluye que el tipo de falla analizado es fractura dúctil a tensión debida a la aplicación de una carga excesiva.

### **Resolución mediante sistema experto**

Las características visuales de la falla presentadas en la imagen (Ver Fig.34) se describen a continuación: Se tiene una fractura total y la zona en la que esta se desarrolló cuenta con un cono producto de flujo de material que presenta desgarres en su circunferencia, además de ello se observa una superficie plana y fibrosa que incluye microhuecos irregulares y alargados, estas características fueron introducidas en forma de parámetros al sistema experto como se muestra en la imagen (Ver. Fig.4.6)

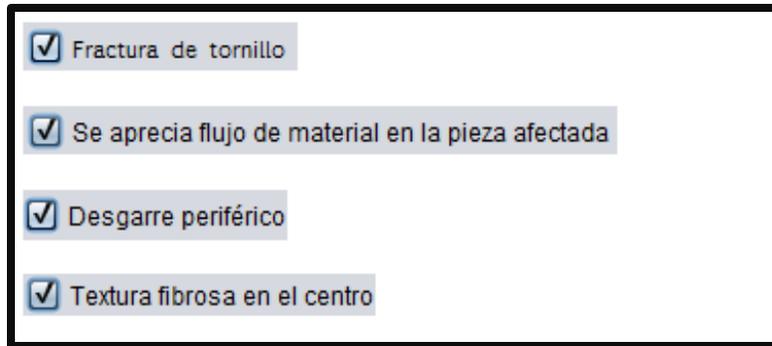


Fig.4.6: Parámetros introducidos a sistema experto caso 1

Las reglas activadas por la colección de parámetros señalados concluyen que se trata de una fractura dúctil a tensión de tornillo desplegando la siguiente ventana de diagnóstico (Ver Fig.4.7):



### 4.3) Caso de falla en tornillo de grúa industrial

**An Introduction to Failure Analysis for Metallurgical Engineers, TMS outstanding studding publication, Thomas Davidson, 1999 [15]**

Se presenta la fractura de un tornillo perteneciente a una grúa en operación industrial [15] con las condiciones exhibidas a continuación (Ver Fig.4.8)



Fig.4.8: Corte transversal de falla analizada caso 3 [15]

La pieza fue sometida a cargas cíclicas a flexión como parte de su operación normal y la fractura se generó en función a la incorrecta selección del grado SAE de tornillo ya que este fue inferior al grado 5 necesario, en el artículo se plantea la corrección a esta situación mediante la introducción de un nuevo tornillo con grado SAE superior al 5, la tabla comparativa entre el nuevo y el viejo tornillo se presenta a continuación (Ver Tabla 5.1)

Tabla 5.1: Parámetros mecánicos de material de tornillo caso 3 [15]

Table 1.2--Results and standard requirements of tensile tests.					
	Original Broken Bolt		New Sample Bolt		Standard Grade 5 SAE
	1	2	1	2	
Sample #	1	2	1	2	
Ultimate Tensile Strength (KSI)	69.5	69.5	148	146	100
Yield Strength (KSI)	42.7	44.4	134	133	80
Elongation (%)	26	24	20	20	16 min.
Surface Reduction (%)	67	67	59	59	50 min.

De la publicación se concluye que la falla fue una fractura por fatiga a flexión debida a una incorrecta selección de grado de tornillo.

### **Resolución mediante sistema experto**

Mediante inspección visual de la imagen a disposición (Ver Fig. 38) se observa que la pieza presenta fractura total, con una superficie de ruptura tersa y con parámetros de fluencia indefinidos aunados a la presencia de marcas de playa, además de orígenes de fractura en algunas secciones de la circunferencia del cuerpo cilíndrico del tornillo y no en la totalidad de la misma.

Los parámetros seleccionados para el análisis de falla dentro del sistema experto fueron los siguientes (Ver Fig.4.9).

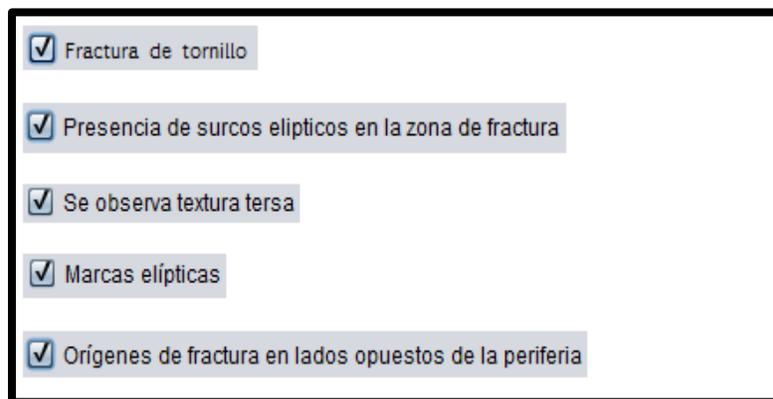


Fig.4.9: Parámetros introducidos a sistema experto caso 3

### **Diagnóstico de falla**

La regla activada por la colección de parámetros señalados concluye que se trata de una fractura por fatiga a flexión de tornillo desplegando la siguiente ventana de diagnóstico (Ver Fig.4.10.)

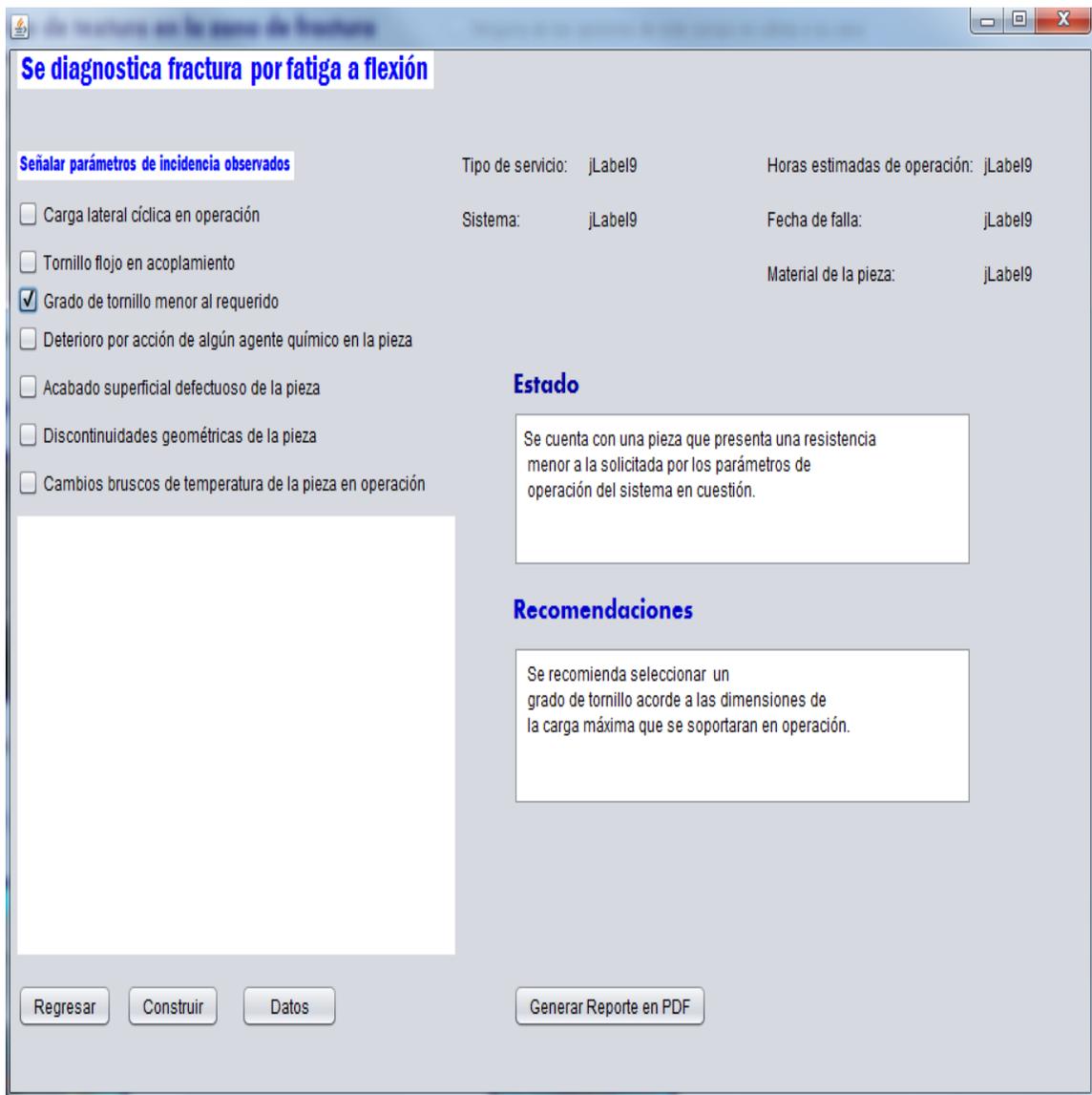


Fig.4.10: Ventana de diagnóstico de falla caso 3

### Conclusión

El resultado generado en el artículo y el diagnóstico de falla son congruentes entre sí, la causa establecida en el artículo referida a la incorrecta selección de tornillo se encuentra en la lista de posibles causas presentada por la pantalla de diagnóstico de sistema experto (Ver Fig.40) apareciendo como grado de tornillo menor al requerido, por lo que queda validada la funcionalidad del sistema experto.

#### **4.4) Análisis de falla en tornillo de mausoleo**

##### ***Failure analysis of brass bolt from mausoleum***

***Reitz, ASM International 2005 [16]***

En este caso se plantea la posibilidad de extender la aplicación del sistema a elementos metálicos no ferrosos y corresponde a las fallas presentadas por tornillos de latón cuya función consiste en sostener placas de mármol ornamentales en fachadas arquitectónicas, las condiciones de operación planteadas para la pieza implican un periodo de servicio previo y continuo de 12 años en un ambiente rural húmedo y rico en minerales que llevo a la pieza a un deterioro progresivo por efecto de la corrosión, el cual culminó con una fractura, las características de la pieza en estado de falla son las siguientes (Ver Fig.4.11).



Fig.4.11: Corte transversal de falla analizada caso 4 [16]

Se sabe que el material es latón 260, cuyo módulo de elasticidad es de 110 gpa el cual se considera alto en relación a materiales dúctiles como se muestra en la siguiente tabla comparativa (Ver Tabla 4.2) por lo cual el latón queda definido como material duro propenso a fracturas frágiles.

Tabla 5: Tabla comparativa de material de pieza caso 4.2 [16]

Material	$E^{1, 2, 3}$ [ MPa ]	$E$ [ kp/cm <sup>2</sup> ]
Goma	7	85
Cartilago (humano)	24	240
Tendón (humano)	600	6000
Polietileno, Nylon	1400	14000
Madera (laminada)	7000	70 000
Madera (según la fibra)	14 000	140 000
Hueso (fresco)	21000	210 000
Hormigón / Concreto	27 000	270 000
Aleaciones de Mg	42 000	420 000
Granito	50 000	500 000
Vidrio	70 000	700 000
Aleaciones de Al	70 000	700 000
Latón	110 000	1 100 000

Aunado a ello se sabe que la carga soportada por las piezas se encontraba en dirección paralela al eje principal del cuerpo cilíndrico de las mismas como se aprecia en la imagen (Ver Fig. 4.12) anexa en la publicación del caso de falla en cuestión.

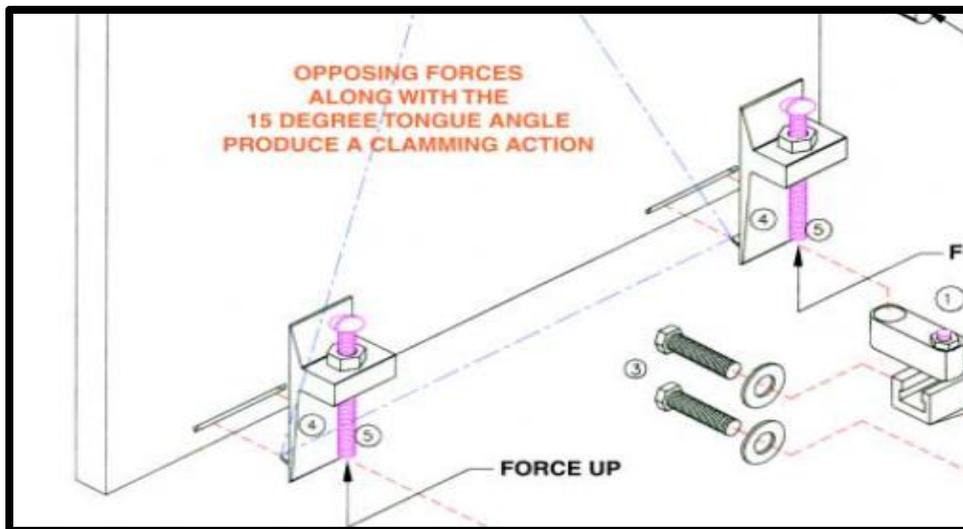


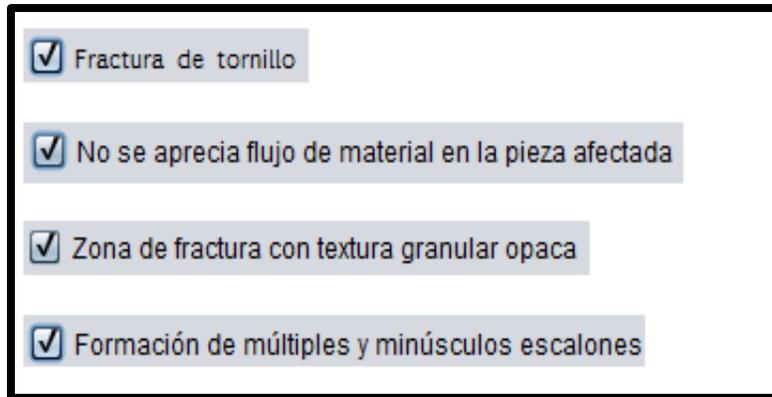
Fig.4.12: Condiciones de operación de tornillo caso 4 [16]

De la información presentada en el artículo se concluye que el tipo de falla analizado es fractura frágil a tensión fomentada por el deterioro de la pieza debida a la corrosión producto del ambiente altamente corrosivo en el que operaba.

### Resolución mediante sistema experto

En la pieza se evidencia una superficie con textura granular opaca en la zona de fractura, no existe flujo de material ya que no es posible localizar alargamientos o terminaciones cónicas además se aprecian escalones de material distribuidos de manera irregular en la superficie (Ver Fig.41).

Los parámetros seleccionados para el análisis de falla dentro del sistema experto para análisis de falla en tornillo fueron los siguientes (Ver Fig.4.13).



The image shows a rectangular window with a black border containing four checked checkboxes. Each checkbox is a small square with a white checkmark on a blue background, followed by a text label in a light gray box. The labels are: 'Fractura de tornillo', 'No se aprecia flujo de material en la pieza afectada', 'Zona de fractura con textura granular opaca', and 'Formación de múltiples y minúsculos escalones'.

- Fractura de tornillo
- No se aprecia flujo de material en la pieza afectada
- Zona de fractura con textura granular opaca
- Formación de múltiples y minúsculos escalones

Fig.4.13: Parámetros introducidos a sistema experto caso 4 A

### Diagnóstico de falla

La regla activada por la colección de parámetros señalados concluye que se trata de una fractura frágil a tensión de tornillo desplegando la siguiente ventana de diagnóstico (Ver Fig.4.14).

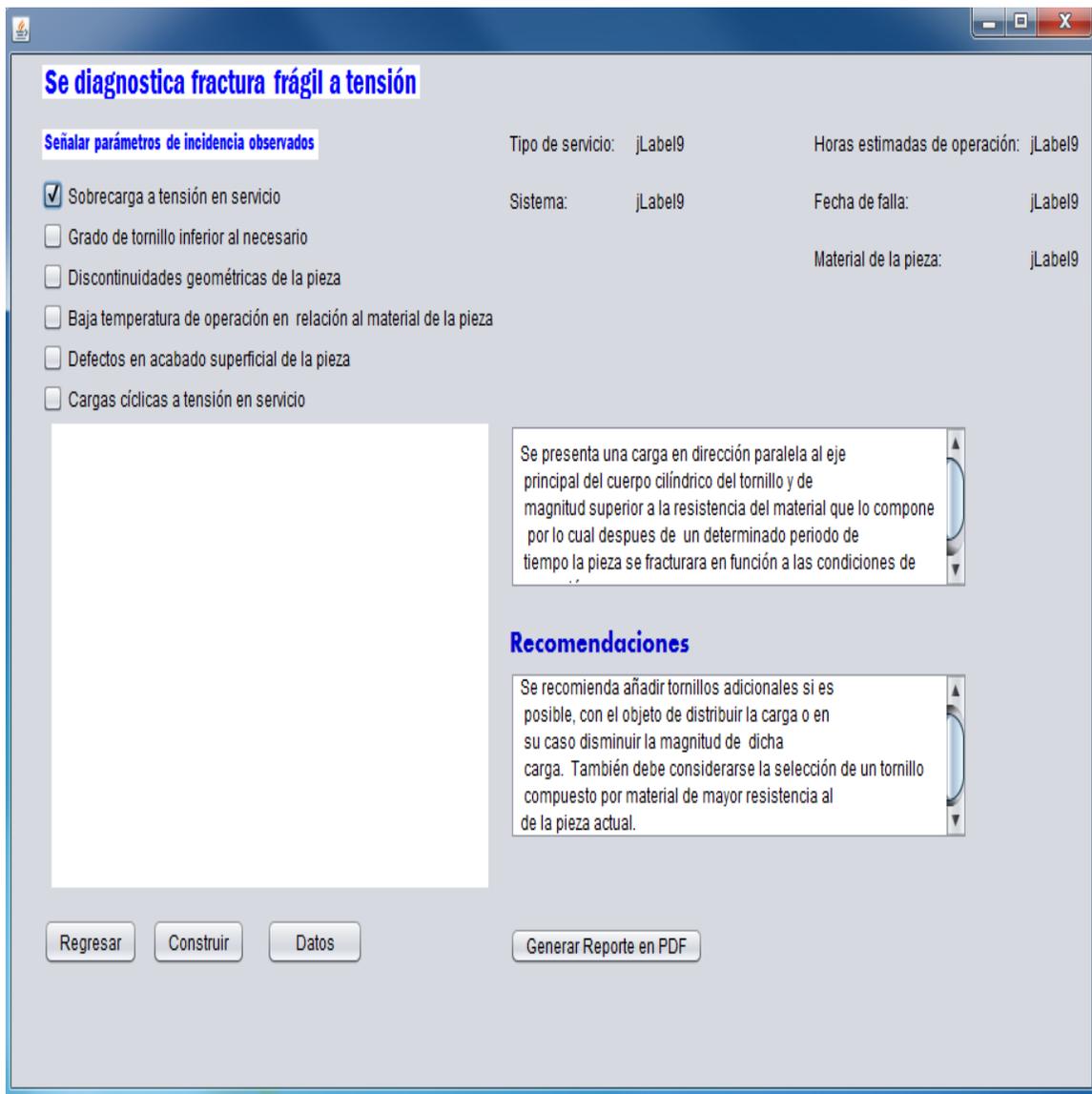


Fig.4.14: Ventana de diagnóstico de falla caso 4

Como complemento al análisis se analizó el caso desde otra perspectiva la cual considera la siguiente imagen de la falla para efectos de inspección visual macroscópica (Ver Fig.4.15)



Fig.4.15: Corte transversal de caso de falla caso 4 complemento [16]

En ella se observan condiciones de deterioro referidas a la pérdida de material en la pieza además de la presencia de depósito de un color marrón ajeno al color del material original, con estas características los siguientes parámetros fueron seleccionados en el sistema experto (Ver Fig.4.16)

<input checked="" type="checkbox"/>	No Fractura de tornillo
<input checked="" type="checkbox"/>	Se presenta remoción de material en el tornillo
<input checked="" type="checkbox"/>	La remoción de material se da en el cuerpo del tornillo
<input checked="" type="checkbox"/>	Se observa depósito marrón en la superficie
<input checked="" type="checkbox"/>	Se observa depósito marrón en torno al área de operación

Fig.4.16: Diagnostico de falla caso 4 complemento

El resultado entregado por el sistema experto fue falla por corrosión uniforme y se desplegó la siguiente pantalla de diagnóstico (Ver Fig.4.17)

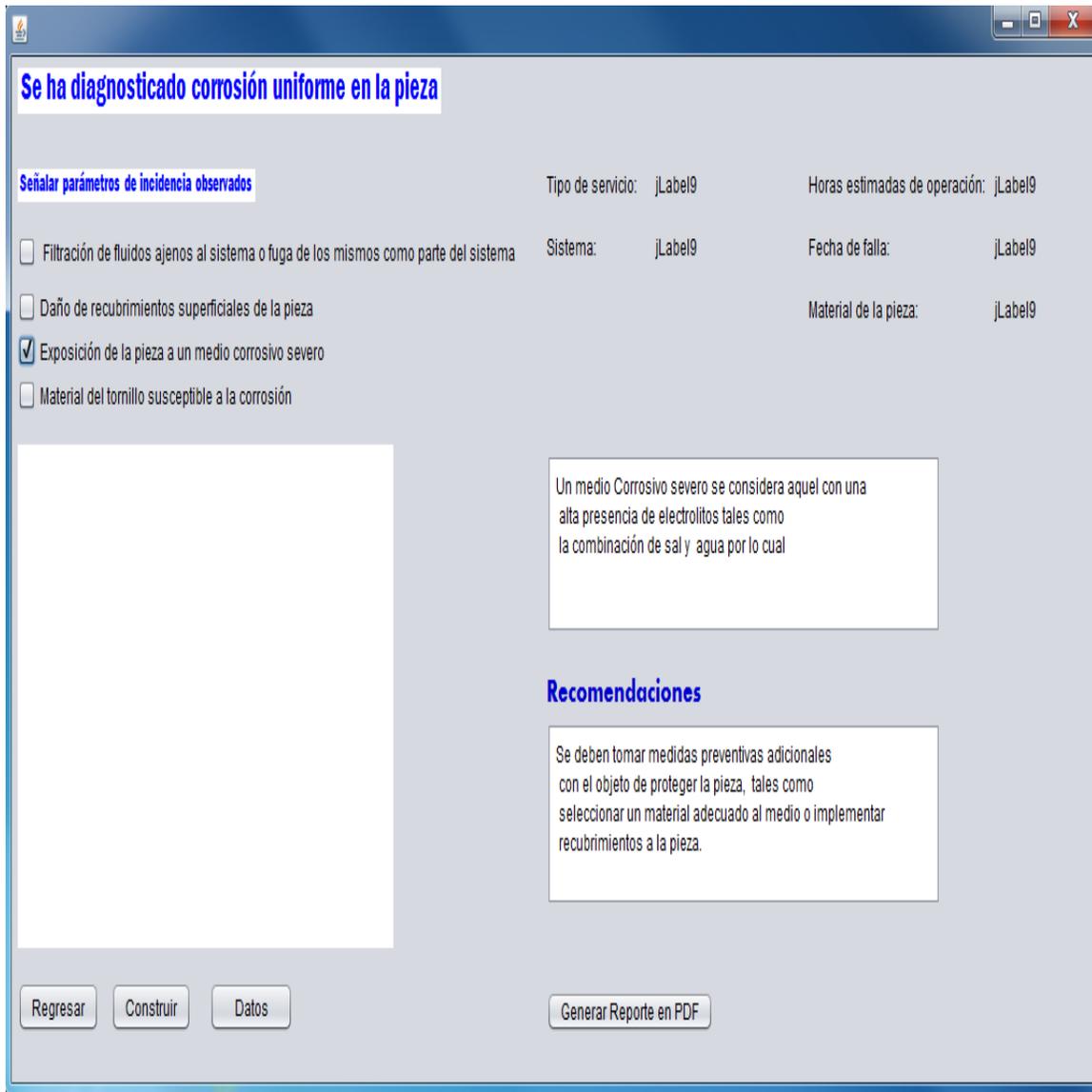


Fig.4.17: Ventana de diagnóstico de falla caso 4 complemento

## Conclusión

El resultado del artículo y los diagnósticos de falla emitidos por el sistema experto coinciden razonablemente a pesar de que el análisis realizado por el sistema se efectuó en dos partes, una para la fractura y otra para el deterioro por corrosión, con ello queda demostrado que si el sistema experto se utiliza con un criterio adecuado es capaz de determinar más de un aspecto involucrado en un caso de falla además de extender su campo de aplicación a tornillos metálicos no ferrosos, cabe mencionar que en la primera pantalla de diagnóstico (Ver Fig.44) se menciona deterioro por algún agente químico en la pieza, equivalente a la acción de la corrosión como posible causa de la fractura frágil a tensión diagnosticada por lo que el análisis pudo concluirse satisfactoriamente en ese nivel.

Por otro lado en la ventana de diagnóstico correspondiente a corrosión uniforme en la pieza (Ver Fig.47) se muestra exposición de la pieza a un medio corrosivo severo como posible causa de falla, lo cual coincide con los planteamientos del artículo validando así la funcionalidad del sistema experto.

### **Conclusiones**

- Se ha implementado exitosamente el método de análisis de falla aplicado a tornillos mediante un sistema computacional, derivando en la estructuración de un sistema experto capaz de diagnosticar 16 tipos de fallas generales en tornillos mediante inspección visual y emitir recomendaciones preliminares preventivas y correctivas al respecto.
- Mediante la implementación del sistema experto en análisis de falla en tornillos ferrosos se ha mitigado la necesidad de recurrir a un experto humano en el área de fallas en elementos mecánicos para resolver casos simples y generales de fallas en tornillos.
- Se ha demostrado la factibilidad de aplicación de software de licencia libre al diseño de un sistema experto funcional y competitivo con un esquema de mínimos costos de desarrollo.
- Se ha aplicado exitosamente un esquema de programación sencillo que permite a personal no especializado en el área de programación estructurar sistemas expertos aplicables a cualquier área del conocimiento.
- Se ha constituido una base para el análisis de falla en tornillos la cual es expandible a un esquema de análisis que no se limite a la inspección visual macroscópica.
- El actual sistema experto de análisis de fallas en tornillos se encuentra sujeto a actualizaciones y ampliaciones en su esquema.

### **Recomendaciones**

En función a la posibilidad de agregar un número ilimitado de reglas al sistema experto de análisis de fallas en tornillos se plantean las siguientes recomendaciones.

- Aprovechar el sistema de análisis de fallas base elaborado en el presente proyecto y expandirlo congruentemente.
- Aumentar el nivel de análisis de fallas en tornillos mediante el diseño e implementación de una metodología de análisis de falla que no se limite a inspección visual macroscópica y considere además pruebas de laboratorio tales como: metalografías, pruebas de dureza y ensayos de tracción y compresión en la pieza estudiada.
- Aumentar o actualizar las recomendaciones preventivas y correctivas referidas a cada falla analizada por el sistema experto de análisis de fallas en tornillos.
- Anexar tipos de fallas en tornillos diferentes a los contenidos en el presente proyecto.
- Anexar casos de falla referidos a elementos mecánicos distintos a los tornillos.
- Conversión del sistema experto de análisis de fallas en tornillos a una aplicación en línea que sea del dominio público.
- Anadir factores de certeza al sistema mediante la comparación de los diagnósticos de falla emitidos por el programa contra resultados obtenidos por otros medios como pruebas de laboratorio o publicaciones.

## Bibliografía

- 1) Charlie R. Brooks. (2002). Failure Analysis of engineering materials. McGraw Hill.EU.
- 2) John Durkin. (1994). Expert Systems: Design and Development. Macmillan Publishing Company EU.
- 3) Enrique Castillo. (2003). Sistemas expertos y modelos de redes probabilistas. Academia española de ingeniería. España.
- 4) Paul Harmon, David King. (2002). Sistemas expertos. S.A. España
- 5) Peter S. Sells. (2007). Sistemas expertos para principiantes. Limusa. México
- 6) R. Frost. (1989). Bases de datos y sistemas expertos. Eclipse libros. España
- 7) Jack A. Collins. (1993). **Failure** of Materials in mechanical design: analysis. Wiley .EU
- 8) Stanislaw Kocanda (1978). Fatigue **failure of metals. Fatigue and fracture Series. EU**
- 9) Denny A. Jones. (2004). Principles and prevention of corrosion.Universidad de Nevada. EU
- 10) Zaki Ahmad. (2006). Principles of corrosion engineering and corrosion control. Editorial BH.EU.
- 11) Michael Henthorne. (1972). Localized corrosion cause of **metal failure**. American society for testing and materials. Atlantic City
- 12) Antonio Benítez. (2002). Fundamentos de inteligencia artificial. Escolar y mayo. España
- 13) David R. Heffelfinge.(2007). Development with Netbeans 7: Develop Professional. EU
- 14) B. Gonzales, J.C. Matos. (2008) Comportamiento en fatiga de uniones roscadas. Universidad de Salamanca. España
- 15) Thomas Davidson (1999). Introduction to failure analysis from metallurgical engineers. Outstabding student Magazine .EU.
- 16) W. Reitz. (2005). Failure analysis of brass bolt from mausoleum. Alabama.
- 17) A.J. Mc Evily (2002) Metal Failures: Mechanisms Analysis Prevention. Wiley inter science. EU
- 18) J. J. Mecholsky. (1984). Fractography of Ceramic and **Metal Failures. Varner. EU**
- 19) Vermont. (2003).**Failure** Analysis Case Studies. Minezota. Masta . EU
- 20) American Society for Metals, (2006) Metals Handbook: Failure analysis and prevention. American Society for Metals.EU
- 21) Heiko Böck, (2008). Definitive Guide to NetBeans Platform 7.Apress.EU
- 22) Guiarratano Joseph C., Gary D. Riley (2005).Expert Systems: Principles and programming. EU.
- 23) Sánchez A. S. (1998). Apuntes de Sistema CLIPS. IA. España.
- 24) Tovar G. (1997). Análisis de falla de componentes de ingeniería, Colombia. Universidad de los Andes
- 25) Guiarratano J. C. (2007).Clips users guide, EU
- 26) Gustavo Tovar Sanchez. (2006).Fundamentos del análisis de falla. España
- 27) Norma Pasos Peinado. 2005). Tecnología de los metales y procesos de manufactura Universidad católica Andrés Bello, Chile
- 28) A. Kucher. (2004). Tecnología de Metales. Editorial Mir Moscow. Georgia
- 29) P. Beer, T De Wolf. (2008). Mecánica de materiales. Mc Graw Hill: México.
- 30) P.M. French. (2003). Metallography in failure analysis. Microstructural scienece book.EU

## Imágenes

[UDIATEM] Udiatem Facultad de Ingeniería UNAM

[IDDP].Imagen de dominio público recuperada de [www.google.com](http://www.google.com)

[AFIS].Imagen con derechos reservados propiedad de AFIS Universidad de Colombia recuperada de <http://www.bdigital.unal.edu>.

[PBMC].Imagen con derechos reservados propiedad de Portland bolt and manufacturing company Recuperada de <http://www.portlandbolt.com/>

## **Anexo**

Reglas del sistema experto de análisis de fallas en tornillos en su versión de código fuente de programación.

### *Fractura dúctil*

```
CLIPS> (defrule rule1 (a s)(b s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ductilatensiona))))
```

```
CLIPS> (defrule rule2 (fragilpieza (linkfalla ductilatensiona ))
```

```
    => (printout t "Se diagnostica fractura ductil a tension" crlf))
```

```
CLIPS> (defrule rule3 (c s)(d s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ductilaflexiona))))
```

```
CLIPS> (defrule rule4 (fragilpieza (linkfalla ductilaflexiona))
```

```
    => (printout t "Se diagnostica fractura ductil a flexion" crlf))
```

```
CLIPS> (defrule rule5 (a s)(d s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ductilatensionb))))
```

```
CLIPS> (defrule rule6 (fragilpieza (linkfalla ductilatensionb))
```

```
    => (printout t "Se diagnostica fractura ductil a tension" crlf))
```

```
CLIPS> (defrule rule7 (a s)(f s) => (assert (fragilpieza (linkfalla posfatiga))))
```

```
CLIPS> (defrule rule8 (fragilpieza (linkfalla posfatiga))
```

```
    => (printout t "Se diagnostica posible fractura por fatiga" crlf))
```

```
CLIPS> (defrule rule9 (b s)(e s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ductnoespecificadaa))))
```

```
CLIPS> (defrule rule10(fragilpieza (linkfalla ductnoespecificadaa))
```

```
    => (printout t "Se diagnostica posible fractura fragil a tension" crlf))
```

```
CLIPS> (defrule rule11 (c s)(f s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ductilaflexionc))))
```

```
CLIPS> (defrule rule12 (fragilpieza (linkfalla ductilaflexionc))
```

```
    => (printout t "Se diagnostica fractura ductil a flexion" crlf))
```

```
CLIPS> (defrule rule13 (d s)(e s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ductnoespecificadab))))
```

```
CLIPS> (defrule rule14 (fragilpieza (linkfalla ductnoespecificadab))
```

```
    => (printout t "Se diagnostica fractura ductil no especificada" crlf))
```

```
CLIPS> (defrule rule15 (e s)(f s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ductnoespecificadac))))
```

```
CLIPS> (defrule rule16 (fragilpieza (linkfalla ductnoespecificadac))
=> (printout t "Se diagnostica fractura ductil no especificada" crlf))
CLIPS> (defrule rule17 (h s)(i s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ductildesgarrea))))
CLIPS> (defrule rule18 (fragilpieza (linkfalla ductildesgarrea))
=> (printout t "Se diagnostica fractura ductil por desgarre" crlf))
CLIPS> (defrule rule19 (h s)(e s) => (assert (fragilpieza (linkfalla posfatigb))))
CLIPS> (defrule rule20 (fragilpieza (linkfalla posfatigb))
=> (printout t "Se diagnostica posible fractura por fatiga" crlf))
CLIPS> (defrule rule21 (c s)(b s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ductilaflexionz))))
CLIPS> (defrule rule22 (fragilpieza (linkfalla ductilaflexionz))
=> (printout t "Se diagnostica fractura ductil a flexion" crlf))
CLIPS> (defrule rule23 (i s)(f s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ductildesgarrec))))
CLIPS> (defrule rule24 (fragilpieza (linkfalla ductildesgarrec))
=> (printout t "Se diagnostica fractura ductil por desgarre" crlf))
```

#### *Fractura frágil*

```
CLIPS> (defrule rule1 (a s)(b s) => (assert (fragilpieza (linkfalla fragilatensiona))))
CLIPS> (defrule rule2 (fragilpieza (linkfalla fragilatensiona ))
=> (printout t "Se diagnostica fractura fragil a tension" crlf))
CLIPS> (defrule rule3 (c s)(d s) => (assert (fragilpieza (linkfalla fragilaflexiona))))
CLIPS> (defrule rule4 (fragilpieza (linkfalla fragilaflexiona))
=> (printout t "Se diagnostica fractura fragil a flexion" crlf))
CLIPS> (defrule rule5 (a s)(e s) => (assert (fragilpieza (linkfalla fragilatensionb))))
CLIPS> (defrule rule6 (fragilpieza (linkfalla fragilatensionb))
=> (printout t "Se diagnostica posible fragil a tension" crlf))
CLIPS> (defrule rule7 (b s)(f s) => (assert (fragilpieza (linkfalla posfragilatensionk))))
CLIPS> (defrule rule8 (fragilpieza (linkfalla posfragilatensionk))
```

```
=> (printout t "Se diagnostica posible fractura fragil a tension" crlf)
CLIPS> (defrule rule9 (c s)(e s) => (assert (fragilpieza (linkfalla posfragilatensionc))))
CLIPS> (defrule rule10(fragilpieza (linkfalla posfragilatensionc))
=> (printout t "Se diagnostica posible fractura fragil a tension" crlf))
CLIPS> (defrule rule11 (d s)(f s) => (assert (fragilpieza (linkfalla fragilaflexionb))))
CLIPS> (defrule rule12 (fragilpieza (linkfalla fragilaflexionb))
=> (printout t "Se diagnostica fractura fragil a flexion" crlf))
CLIPS> (defrule rule13 (e s)(f s) => (assert (fragilpieza (linkfalla fragilatensionc))))
CLIPS> (defrule rule14 (fragilpieza (linkfalla fragilatensionc))
=> (printout t "Se diagnostica fractura fragil a tension" crlf))
CLIPS> (defrule rule15 (a s)(d s) => (assert (fragilpieza (linkfalla fragilaflexionc))))
CLIPS> (defrule rule16 (fragilpieza (linkfalla fragilaflexionc))
=> (printout t "Se diagnostica fractura fragil a flexion" crlf))
CLIPS> (defrule rule17 (c s)(b s) => (assert (fragilpieza (linkfalla fragilatensiond))))
CLIPS> (defrule rule18 (fragilpieza (linkfalla fragilatensiond))
=> (printout t "Se diagnostica fractura fragil a tension" crlf))
CLIPS> (defrule rule19 (g s) (h s) => (assert (fragilpieza (linkfalla altogrado))))
CLIPS> (defrule rule20 (fragilpieza (linkfalla altogrado))
=> (printout t "Se diagnostica altogrado de tornillo" crlf))
CLIPS> (defrule rule21 (g s) (i s) => (assert (fragilpieza (linkfalla bajogrado))))
CLIPS> (defrule rule22 (fragilpieza (linkfalla bajogrado))
=> (printout t "Se diagnostica bajogrado de tornillo" crlf))
```

#### *Fractura por fatiga*

```
CLIPS> (defrule rule1 (a s)(b s)(c s) => (assert (fragilpieza (linkfalla fatigaflexiona))))
CLIPS> (defrule rule2 (fragilpieza (linkfalla fatigaflexiona))
=> (printout t "Se diagnostica fractura por fatiga a flexion" crlf))
```

CLIPS> (defrule rule3 (d s)(e s)(f s) => (assert (fragilpieza (linkfalla fatigatensiona))))

CLIPS> (defrule rule4 (fragilpieza (linkfalla fatigatensiona))

=> (printout t "Se diagnostica fractura por fatiga a tension" crlf))

CLIPS> (defrule rule5 (i s)(a s)(b s) => (assert (fragilpieza (linkfalla fatiganopa))))

CLIPS> (defrule rule6 (fragilpieza (linkfalla fatiganopa))

=> (printout t "Se diagnostica fractura por fatiga no puntualizada" crlf))

CLIPS> (defrule rule7 (i s)(d s)(e s) => (assert (fragilpieza (linkfalla fatiganob))))

CLIPS> (defrule rule8 (fragilpieza (linkfalla fatiganob))

=> (printout t "Se diagnostica fractura por fatiga no puntualizada" crlf))

CLIPS> (defrule rule9 (h s)(d s)(f s) => (assert (fragilpieza (linkfalla fatigatensionb))))

CLIPS> (defrule rule10 (fragilpieza (linkfalla fatigatensionb))

=> (printout t "Se diagnostica fractura por fatiga a tension" crlf))

CLIPS> (defrule rule11 (h s)(a s)(c s) => (assert (fragilpieza (linkfalla fatigaflexionb))))

CLIPS> (defrule rule12 (fragilpieza (linkfalla fatigaflexionb))

=> (printout t "Se diagnostica fractura por fatiga a flexion" crlf))

CLIPS> (defrule rule13 (b s)(c s)(g s) => (assert (fragilpieza (linkfalla posfragia))))

CLIPS> (defrule rule14 (fragilpieza (linkfalla posfragia))

=> (printout t "Se diagnostica posible fractura fragil sin fatiga" crlf))

CLIPS> (defrule rule15 (f s)(e s)(g s) => (assert (fragilpieza (linkfalla posfragib))))

CLIPS> (defrule rule16 (fragilpieza (linkfalla posfragib))

=> (printout t "Se diagnostica posible fractura fragil sin fatiga" crlf))

CLIPS> (defrule rule17 (a s)(h s)(i s) => (assert (fragilpieza (linkfalla fatinocaa))))

CLIPS> (defrule rule18 (fragilpieza (linkfalla fatinocaa))

=> (printout t "Se diagnostica fractura por fatiga no caracterizada" crlf))

CLIPS> (defrule rule19 (d s)(h s)(i s) => (assert (fragilpieza (linkfalla fatinocab))))

CLIPS> (defrule rule20 (fragilpieza (linkfalla fatinocab))

=> (printout t "Se diagnostica fractura por fatiga no caracterizada" crlf))

CLIPS> (defrule rule21 (b s)(g s)(i s) => (assert (fragilpieza (linkfalla posfragic))))

CLIPS> (defrule rule22 (fragilpieza (linkfalla posfragic))

=> (printout t "Se diagnostica posible fractura fragil sin fatiga" crlf))

CLIPS> (defrule rule23 (e s)(g s)(i s) => (assert (fragilpieza (linkfalla posfragid))))

CLIPS> (defrule rule24 (fragilpieza (linkfalla posfragid))

=> (printout t "Se diagnostica posible fractura fragil sin fatiga" crlf))

CLIPS> (defrule rule25 (c s)(g s)(h s) => (assert (fragilpieza (linkfalla posfragioducta))))

CLIPS> (defrule rule26 (fragilpieza (linkfalla posfragioducta))

=> (printout t "Se diagnostica otro tipo de falla por fractura" crlf))

CLIPS> (defrule rule27 (f s)(g s)(h s) => (assert (fragilpieza (linkfalla posfragioductb))))

CLIPS> (defrule rule28 (fragilpieza (linkfalla posfragioductb))

=> (printout t "Se diagnostica otro tipo de falla por fractura" crlf))

#### *Ludimiento*

CLIPS> (defrule rule1 (a s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ludienvastagos))))

CLIPS> (defrule rule2 (fragilpieza (linkfalla ludienvastagos))

=> (printout t "Se diagnostica ludimiento en vastago" crlf))

CLIPS> (defrule rule3 (b s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ludienrosca))))

CLIPS> (defrule rule4 (fragilpieza (linkfalla ludienrosca))

=> (printout t "Se diagnostica ludimiento en rosca" crlf))

#### *Daño en Tuerca*

CLIPS> (defrule rule1 (a s) => (assert (fragilpieza (linkfalla desgaroscaa))))

CLIPS> (defrule rule2 (fragilpieza (linkfalla desgaroscaa))

=> (printout t "Se diagnostica desgaste de rosca de tuerca" crlf))

CLIPS> (defrule rule3 (b s) => (assert (fragilpieza (linkfalla desgaroscab))))

CLIPS> (defrule rule4 (fragilpieza (linkfalla desgaroscab))

=> (printout t "Se diagnostica desgaste de rosca de tuerca" crlf))

CLIPS> (defrule rule5 (c s) => (assert (fragilpieza (linkfalla barrirosca))))

```
CLIPS> (defrule rule6 (fragilpieza (linkfalla barrirosca))
      => (printout t "Se diagnostica barrido en rosca de tuerca" crlf))
```

*Daño en rosca*

```
CLIPS> (defrule rule1 (a s) => (assert (fragilpieza (linkfalla barridorosca))))
CLIPS> (defrule rule2 (fragilpieza (linkfalla barridorosca))
      => (printout t "Se diagnostica barrida de rosca" crlf))
CLIPS> (defrule rule3 (b s) => (assert (fragilpieza (linkfalla desgasteroscaa))))
CLIPS> (defrule rule4 (fragilpieza (linkfalla desgasteroscaa))
      => (printout t "Se diagnostica desgaste de rosca" crlf))
CLIPS> (defrule rule5 (c s) => (assert (fragilpieza (linkfalla desgasteroscab))))
CLIPS> (defrule rule6 (fragilpieza (linkfalla desgasteroscab))
      => (printout t "Se diagnostica desgaste de rosca" crlf))
```

*Remoción de material en la superficie*

```
CLIPS> (defrule rule1 (a s)(c s) => (assert (fragilpieza (linkfalla oxidaciona))))
CLIPS> (defrule rule2 (fragilpieza (linkfalla oxidaciona))
      => (printout t "Se diagnostica oxidacion" crlf))
CLIPS> (defrule rule3 (a s)(e s) => (assert (fragilpieza (linkfalla oxidacionb))))
CLIPS> (defrule rule4 (fragilpieza (linkfalla oxidacionb))
      => (printout t "Se diagnostica oxidacion" crlf))
CLIPS> (defrule rule5 (a s)(d s) => (assert (fragilpieza (linkfalla preventivo))))
CLIPS> (defrule rule6 (fragilpieza (linkfalla preventivo))
      => (printout t "Se diagnostica condicion preventiva de oxidacion" crlf))
CLIPS> (defrule rule7 (b s)(c s) => (assert (fragilpieza (linkfalla oxipicaduraa))))
CLIPS> (defrule rule8 (fragilpieza (linkfalla oxipicaduraa))
```

=> (printout t "Se diagnostica posible oxidacion por picadura" crlf))

CLIPS> (defrule rule9 (b s)(e s) => (assert (fragilpieza (linkfalla oxipicadurab))))

CLIPS> (defrule rule10 (fragilpieza (linkfalla oxipicadurab))

=> (printout t "Se diagnostica oxidacion por picadura" crlf))

CLIPS> (defrule rule11 (b s)(d s) => (assert (fragilpieza (linkfalla preventivoz))))

CLIPS> (defrule rule12 (fragilpieza (linkfalla preventivoz))

=> (printout t "Se diagnostica condicion preventiva de oxidacion" crlf))

CLIPS> (defrule rule13 (f s)(d s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ludimientoa))))

CLIPS> (defrule rule14 (fragilpieza (linkfalla ludimientoa))

=> (printout t "Se diagnostica estado de ludimiento" crlf))

CLIPS> (defrule rule15 (f s)(e s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ludimentob))))

CLIPS> (defrule rule16 (fragilpieza (linkfalla ludimentob))

=> (printout t "Se diagnostica estado de ludimiento" crlf))

CLIPS> (defrule rule17 (f s)(c s) => (assert (fragilpieza (linkfalla ludimentoc))))

CLIPS> (defrule rule18 (fragilpieza (linkfalla ludimentoc))

=> (printout t "Se diagnostica estado de ludimiento" crlf))