

01149  
9

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA  
EL DESARROLLO DE UN SISTEMA  
EXPERTO EN ANÁLISIS DE FALLA DE  
ELEMENTOS MECÁNICOS METÁLICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA  
(ÁREA MECÁNICA)

P R E S E N T A:

SARA MERCEDES CERRUD SÁNCHEZ



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

DIRECTOR DE TESIS

M. en I. ARMANDO ORTIZ PRADO

CD. Universitaria

Febrero, 2002



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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

### **Capítulo 1. Importancia del análisis de falla y su problemática en México**

1.1 Generalidades	1
1.2 Causas de falla en materiales metálicos	3
1.3 Metodología del análisis de falla	5
1.4 Problemática del análisis de falla	8
1.5 La experiencia como factor fundamental	9
1.6 El problema de la escasez de expertos	11
1.7 La problemática nacional	12

### **Capítulo 2. Sistemas expertos, su aplicación para análisis de falla**

2.1 Sistemas expertos	13
2.2 Razonamiento basado en casos (RBC)	23
2.3 Sistema de RBC para la identificación de mecanismos de falla	24
2.4 Sistema para análisis de falla de corrosión	26
2.5 Sistema experto para análisis de falla utilizando RBC	28

### **Capítulo 3. Factibilidad del desarrollo de un sistema experto en análisis de falla**

3.1. Introducción	29
3.2 Metodología de Beckman	30
3.3 Determinación de la viabilidad del sistema	33
3.4 Análisis de resultados	35

### **Capítulo 4. Metodología para el desarrollo del sistema**

4.1 Generalidades	37
4.2 Metodología para el desarrollo del sistema experto en análisis de falla	38
4.3 Desarrollo de la metodología	39
4.4 Organización de la estructura de la información para el sistema experto en análisis de falla	54

### **Capítulo 5. Desarrollo del Sistema experto para análisis de falla de ejes**

5.1 Introducción	61
5.2 Desarrollo del sistema	61
5.3 Reglas para inspección visual	61
5.4 Operación del sistema experto para ejes	63
5.5 Observaciones	64

<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>70</b>
---------------------------------------	-----------

<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>72</b>
-----------------------------------	-----------

<b>Anexo. Análisis del Estado de Esfuerzos</b>	<b>73</b>
--	-----------

## **PRÓLOGO**

El Análisis de Falla es una de las líneas de trabajo que se desarrollan en la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales de la Facultad de Ingeniería. La experiencia, de más de 15 años, en la solución de problemas dentro de este campo de conocimiento, ha permitido conocer las necesidades de la industria nacional en este ámbito así como los inconvenientes para que la práctica de análisis de falla se lleve a cabo por personal de la propia empresa, sin recurrir a otras instituciones. Uno de los puntos clave es que en lo general no se tiene el personal capacitado para realizar los estudios en la propia empresa teniendo que recurrir a expertos de centros de desarrollo y universidades. Este tipo de profesionales son escasos, por lo que se requiere la formación de nuevos cuadros para satisfacer la demanda de la industria nacional.

Los sistemas expertos resultan ser una alternativa para resolver esta problemática, ya que si se confina la experiencia de expertos en el área en un sistema de computo, se puede reproducir el conocimiento.

El objetivo planteado para el presente trabajo es definir una metodología para el desarrollo de un sistema experto para análisis de falla de elementos mecánicos metálicos, partiendo de la base de la teoría para el desarrollo de sistemas expertos, los desarrollos de grupos de investigación en sistemas inteligentes para análisis de falla y de las experiencias del grupo de expertos de la UDIATEM.

En este trabajo se presenta la metodología propuesta. Con el fin de proporcionar un marco teórico se incluye un capítulo relacionado a la importancia del análisis de falla y la problemática en México. Asimismo, se desarrollan algunos conceptos clave sobre sistemas expertos y se mencionan algunos enfoques que grupos de investigación han desarrollado sobre sistemas inteligentes para análisis de falla. Por otro lado, se realizó el análisis de factibilidad para determinar la viabilidad del desarrollo del sistema experto en este campo, para lo anterior se aplicó la metodología para evaluación de aplicaciones potenciales de sistemas expertos propuesta por Beckman [11].

A partir del análisis de la operación del sistema se llegó a la conclusión que debido a la complejidad del conocimiento, éste se desarrollara por módulos, habiendo sido seleccionado en primer término el sistema para ejes. Sin embargo, la metodología propuesta no es exclusiva para este elemento sino que se plantea en el marco del sistema global que involucra además la solución a otro tipo de elementos mecánicos convencionales como engranes, pernos, resortes, etc.

La importancia de este planteamiento radica en el diseño de los procedimientos para la construcción del sistema, el planteamiento de la estrategia para el desarrollo del sistema global, las experiencias adquiridas en el desarrollo del sistema sobre ejes y las consiguientes ventajas que éste brinda para la expansión del sistema.

Para finalizar es conveniente señalar que el sistema no solo se orienta a la solución de problemas, sino que además representa una valiosa herramienta para capacitar personal dentro de este campo.

**Ing. Sara M. Cerrud Sánchez**

## CAPÍTULO 1

### IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS DE FALLA Y SU PROBLEMÁTICA EN MÉXICO

#### 1.1 GENERALIDADES

La falla de un elemento se puede manifestar de diferentes maneras las cuales es posible clasificar como:

- Deformación plástica.- El elemento ya no puede cumplir con el servicio que se le está demandando debido a que sus dimensiones y/o forma han cambiado.
- Fisura o fractura.- La pieza ya no cumple con el trabajo que se le demanda debido a que se ha separado en 2 ó más elementos.
- Cambio en las características del material (metalúrgicas y/o químicas).- El elemento no puede soportar las sollicitaciones y/o deformaciones a las que está sometido.

Las manifestaciones de una falla son inducidas por diferentes agentes como es el esfuerzo al que está sometido el elemento (cargas cíclicas, aleatorias, estables y/o transitorias), las temperaturas de trabajo (ambiente, bajo cero, cercanas a las de fusión, etc), el tiempo de funcionamiento bajo ciertas características y las reacciones químicas que tiene con el medio ambiente.

Un estudio de análisis de falla (AF) tiene varios objetivos, uno de estos es encontrar las causa(s) de la falla, así como también determinar la vida útil de un elemento en uso y señalar la confiabilidad del producto para evitar que el elemento llegue a la falla y esto cause costos adicionales por paros no programados o accidentes. Esto es de primordial importancia ya que una falla intempestiva que se presente en los aviones, trenes, etc. puede cobrar muchas vidas humanas, originar enormes costos y daños a la propiedad privada. Afortunadamente muchas fallas en elementos metálicos pueden ser analizadas de manera adecuada por técnicas de la ciencia de los materiales, para lo cual se requiere generalmente de un grupo de ingenieros y en ocasiones expertos en diferentes áreas, esto es, un grupo multidisciplinario.

A la fecha se han realizado diversos estudios en diferentes áreas de la ingeniería en el cual se han reportado la frecuencia de las fallas según su origen y sus causas (tabla 1.1 a 1.4).

Origen	%
Selección inadecuada de material	38
Defectos de fabricación	15
Falla por tratamiento térmico	15
Falla por diseño mecánico	11
Condiciones de operación imprevistas	8
Inadecuado control ambiental	6
Inapropiada o carente inspección de calidad	5
Inadecuada sustitución de material	2

**Tabla 1.1 Frecuencia de falla según su origen.**

1 G J.Davies, "Performance in Service" tomado de Brooks Ch , Metallurgical Failure Analysis

Origen	%
Mantenimiento no adecuado	44
Defectos de fabricación	17
Deficiencias en el diseño	16
Daño anormal por servicio	10
Material defectuoso	7
Causa indeterminada	6

<sup>1</sup>Tabla 1.2 Frecuencia de falla, según su origen, en componentes de aviones.

Causas	%
Corrosión	29
Fatiga	25
Fractura frágil	16
Sobrecarga	11
Corrosión a alta temperatura	7
Corrosión bajo esfuerzos / Corrosión-fatiga/	
Fragilización por hidrógeno	6
Fluencia lenta	3
Desgaste, abrasión y erosión	3

<sup>1</sup>Tabla 1.3 Frecuencia de falla según sus causas.

Causa	%
Fatiga	61
Sobrecarga	18
Corrosión bajo esfuerzos	8
Desgaste excesivo	7
Corrosión	3
Oxidación a alta temperatura	2
Fractura	1

<sup>1</sup>Tabla 1.4 Frecuencia de falla según sus causas, de componentes de aviones.

El análisis de fallas es como jugar al detective con objetos inanimados. Esto es, el experto tiene que predecir con exactitud los tiempos a los cuales el elemento va a fallar o en su defecto por que falló, todo esto a través de un uso adecuado de los conocimientos de los materiales, diseño y fabricación, a través de la conjunción de estos factores se puede llegar a la conclusión del problema. Sin embargo, en algunos casos es imposible hallar un elemento de unión en una ruta lógica. Es por esto necesario que el experto tenga un pensamiento lógico y ordenado en el cual éste sigue en general las siguientes directrices que le ayudan a llegar a la raíz de la causa de falla o a la determinación de la vida de una manera sistemática:

1. Información de los antecedentes de trabajo los cuales permiten conocer la historia del elemento mecánico o pieza, antes y durante la falla. Así como también los antecedentes de manufactura del componente, a través de entrevista con el usuario, manuales de mantenimiento, etc.

<sup>1</sup> G J Davies, "Performance in Service" tomado de Brooks Ch , Metallurgical Failure Analysis

2. Examen visual. Este considera visita(s) a la planta o sitio de la falla, de tal manera que se puedan elaborar bosquejos, mediciones, registrando observaciones y fotografías. Esto permitirá definir las partes que serán seleccionadas para realizar una primera etapa de examen y así lograr la comprensión del fenómeno.
3. Realización de ensayos no destructivos para obtener información de defectos en la superficie así como en el interior del componente que falló.
4. Estudios fractográficos que permitan identificar el tipo y naturaleza de la fractura.
5. Pruebas destructivas para asegurar la calidad del material conforme a las especificaciones en lo que se refiere composición química, propiedades de la microestructura, etc.
6. Análisis de todos los datos para llegar a conclusiones de la causa de falla y recomendaciones para su prevención.

## 1.2 CAUSAS DE FALLA EN MATERIALES METÁLICOS

Para realizar un adecuado análisis de falla se tienen que determinar las causas de falla y estas se podrían dividir en las siguientes categorías:

- Uso inapropiado: El componente es utilizado en condiciones para las que no fue diseñado.
- Errores de ensambles y un mantenimiento inapropiado: Los errores de ensamble pueden ser desalineamiento de flechas o el uso del lubricante incorrecto, así como piezas fuera de tolerancias, etc. En cuanto al mantenimiento si se tiene un mantenimiento preventivo, si éste ha sido adecuado, por ejemplo, cambio de aceite en tiempo y calidad, limpieza de superficies, pintura, etc.
- Errores de diseño, esta es una causa muy usual y estas se podrían subdividir en:

*Tamaño y forma de las partes.* La experiencia del grupo de trabajo (UDIATEM) indica que la deficiencia de diseño que se comete con más frecuencia es la presencia de concentradores de esfuerzo, los cuales se pueden generar por una mala decisión en lo que se refiere a los radios de cambios de sección ó también por no haber precisado el diseñador su dimensión. Por ejemplo los ejes, que son sometidos a cargas cíclicas de flexión en una sola dirección, pueden fracturarse por fatiga en el radio de filete; este hecho puede ser prevenido, si se rediseñan los ejes con un radio más suave o más grande en el cambio de sección transversal donde se ha formado la fractura o la grieta. Otra característica geométrica que lleva a la falla y debe ser evitada es la intersección de muescas mecánicas y radio de filete.

Las muescas, provocan que el esfuerzo en un miembro cargado se incremente abruptamente en la raíz de éstas. Para elementos cargados elásticamente la magnitud del incremento de los esfuerzos en la raíz de la muesca es una función del tamaño, del contorno y, sobre todo, del ángulo de la muesca.

**Material.** Esto es por deficiencia en la selección de materiales y por problemas provenientes de los mismos.

*Deficiencias en la selección.* La selección del material se realiza de acuerdo con los requerimientos de la pieza o sistema en cuestión, para esto hay que considerar no solo las propiedades que éste pudiera tener sino también sus posibilidades de manufactura y desde luego no olvidar su comportamiento con relación al ambiente de trabajo en el que va a operar.

Es relativamente común que se cometan errores al considerar de manera inadecuada determinadas propiedades tanto mecánicas como eléctricas o químicas, ya que en ocasiones no se da énfasis a aquellas características que tendrán efecto ya en servicio, por ejemplo, en el caso de tuberías de polietileno las pruebas de resistencia al reventamiento no conllevan a determinar las condiciones de falla que se podrán esperar para un conducción hidráulica que estará en servicio por espacio de más de 20 años, la cual presentará problemas por corrimiento lento de grieta bajo esfuerzos de baja intensidad ( en este caso habrá que considerar que la tubería durante su servicio nunca soportará esfuerzos del orden de los de reventamiento, a menos de que su diseño sea inadecuado).

*Problemas provenientes del material.* El empleo de materiales que han sido mal seleccionados o que no corresponden a lo indicado por el diseñador es una de las posibles causas de que se presente un problema en el sistema. La experiencia de este grupo de trabajo indica que es poco usual que el material no corresponda con lo especificado, sin embargo es común que imperfecciones del material sean la causa o uno de los elementos que han conllevado a la falla. Las imperfecciones pueden favorecer el crecimiento de una fractura o reducir la resistencia del material, ya que brindan sitios o zonas preferenciales para la propagación de la grieta al actuar como concentradores de esfuerzo, o al servir como lugares propicios para que se desarrollen ataques preferenciales por picaduras o al brindar las condiciones para desarrollar corrosión intergranular, esto último en el caso de que sean de tipo superficial

*Problemas consecuencia de la manufactura.* La susceptibilidad de los materiales a presentar falla, también está relacionada a procedimientos de manufactura impropios.

Los procesos de trabajo en frío y operaciones relacionadas a estos como el embutido profundo, estirado, el aplastamiento y doblado producen una gran cantidad de esfuerzos residuales. Estas operaciones también, en algunas ocasiones, alteran de manera general o localizada las propiedades produciendo microfisuras o macrogrietas, todo lo cual afecta la resistencia y confiabilidad del material. Los efectos en la superficie y los cambios metalúrgicos causados por el proceso tienen influencia en la resistencia a la fatiga, resistencia máxima y la resistencia a la corrosión.

La generación de propiedades anisotrópicas, de heterogeneidad en el material, así como los cambios en la orientación de esfuerzos residuales son también posibilidades latentes que pueden producir efectos dañinos en el producto terminado o durante su servicio.

Corte, troquelado y punzonado dejan esfuerzos residuales, además de que introducen asperezas y rasgan los bordes, los que después se convierten en concentradores de esfuerzos.

El maquinado y esmerilado, con regularidad dejan esfuerzos residuales y superficies rugosas. El desbaste y esmerilado severo son una fuente de sobrecalentamiento y en consecuencia pueden ablandar algunos puntos localizados; los efectos antes mencionados, pueden producir fisuras, sin un patrón determinado, en aceros templados.

Inconvenientes provenientes del tratamiento térmico. Pueden ocurrir diversos errores al aplicar un tratamiento térmico tales como, sobrecalentamiento, no alcanzar la temperatura austenítica, no dar el revenido adecuado, gradientes de temperatura excesivos o uso de medios de temple inadecuados, tiempos de calentamiento excesivos o en deficiencia, etc. Entre los problemas que más comúnmente se presentan se pueden contar las grietas por temple, transformaciones posteriores al temple, descarburación, formación de capas gruesas de óxido, esfuerzos residuales, distorsión, etc.

Soldadura. Ésta puede producir fallas por distorsión, esfuerzos remanentes, sensibilización por efecto de la precipitación de carburos (en el caso de aceros inoxidable), entre otros fenómenos.

Propiedades. Esto es referente al análisis de esfuerzos pero algunas otras propiedades que son requeridas como es la resistencia a la corrosión no es tomada en cuenta y por esto el material puede fallar.

### **1.3 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE FALLA**

La metodología del AF fue desarrollada en el transcurso del siglo XX, siendo actualizada y optimizada mediante la aplicación de nuevas herramientas de análisis e inspección. El análisis de falla es una técnica por medio de la cual se reúnen datos y se analizan para determinar las causas de falla. Hablando ampliamente estas se pueden atribuir a una causa o una combinación de éstas como selección inapropiada de los materiales, diseño, manufactura, operación, reparación, mantenimiento y exposición a ambientes hostiles los cuales no fueron considerados en el diseño.

Louthan [7] propuso la técnica del árbol de falla en 1978 como una metodología para analizar fallas de servicio y mecanismos de falla, pero esta idea aun debe obtener un buen fundamento en el campo de análisis de falla de componentes mecánicos. En el análisis de falla se deben contestar primero las siguientes preguntas para diseñar la metodología a seguir:

- ¿Qué datos deben recopilarse de las piezas que fallaron?
- ¿En qué orden deben obtenerse los datos para no destruir ninguna evidencia?
- ¿Cómo debe relacionarse la información recopilada?
- ¿Qué información debe solicitarse al usuario, que pueda ser útil en el análisis de falla?
- ¿Cómo prevenir la recurrencia de las fallas?

La construcción del árbol de falla para la pieza ayuda al analista a obtener pistas para contestar estas preguntas. Aunque el árbol de falla no señala la causa real de falla, provee directrices para enfocar y continuar el análisis de una manera más organizada. Los principios generales inmersos en la construcción y evaluación del árbol de falla junto con su uso, méritos y limitaciones de las técnicas han sido descritos por Shamala y Raghuram [7].

Un árbol de falla es una técnica gráfica que provee una descripción sistemática de la combinación de posibles ocurrencias en un sistema, que puede resultar en una falla o evento no deseado. Es una representación esquemática de las interrelaciones entre los eventos básicos y un evento no deseado.

Se puede evaluar el árbol de falla de manera cualitativa y cuantitativa. La cualitativa consiste en determinar las secuencias más cortas del árbol de falla. La secuencia es un conjunto de eventos básicos que ocasionan la ocurrencia del evento en análisis. Esta secuencia es mínima cuando cada uno de los eventos básicos es necesario y su combinación es suficiente para provocar el evento superior. La lista de mínimas secuencias es útil para propósitos de diseño para determinar los eslabones más débiles en el sistema. Como el árbol de falla consiste de cientos de puertas y eventos básicos, la determinación de las secuencias mínimas por inspección es impráctica. Por esta razón, es esencial el uso de la computadora para construir árboles de falla para sistemas complejos, además de ahorrar tiempo, dinero y esfuerzo. La evaluación cuantitativa del árbol de falla se realiza para determinar la importancia de diferentes eventos y secuencias que originan el problema bajo estudio. También se realiza para establecer la importancia que los diferentes eventos tienen en la secuencia que lleva a la falla del elemento. Sin embargo, no ha sido posible explotar completamente el potencial de la evaluación cuantitativa, debido a la falta de datos relevantes de falla.

El análisis del árbol de falla tiene aplicaciones multifacéticas. Puede usarse como una herramienta de diagnóstico, de diseño, como un método de análisis de seguridad en sistemas y como una herramienta administrativa. Sobre todo, puede usarse como un método sencillo que facilita la comprensión y documentación de la lógica del sistema.

Una pobre documentación, organización inapropiada y falta de accesibilidad a la información de la falla son, con frecuencia, causas de subutilización de los datos obtenidos a partir de fallas anteriores. En la práctica, el espacio existente entre defectos aceptables y no aceptables puede reducirse solamente con la experiencia en el servicio. En la actualidad, las condiciones son tales que se pueden efectuar cálculos, con auxilio de la computadora, que permiten determinar la velocidad de crecimiento de grieta, análisis del estado de esfuerzos, etc. Sin embargo, la incertidumbre en el diseño, las propiedades del material, las condiciones de operación y medio ambiente continúan reduciendo la confiabilidad del sistema bajo condiciones de trabajo real.

En el pasado no se podía hacer uso de la experiencia anterior en fallas por la forma desorganizada en que la información se recopilaba y la falta de disponibilidad y acceso a la misma. Lo más importante en un reporte de falla es la precisión que se tenga y la rapidez con que se entregue. Los cinco conceptos básicos que debe cumplir cualquier AF son:

- Claridad
- Detalle
- Coherencia
- Visión integral
- Validez

Una vez que se han realizado y contestado las preguntas anteriores y se ha desarrollado el árbol de falla, se tiene que aplicar una metodología para desarrollar estudios adicionales que ayuden a resolver el caso, por ejemplo:

- Pruebas no destructivas
- Pruebas mecánicas
- Examen macroscópico
- Examen microscópico
- Análisis químico
- Desarrollo de ensayos bajo condiciones simuladas de servicio

Con los datos anteriores se puede completar y/o adicionar datos al árbol de falla y después formular las hipótesis, analizar todas las evidencias y elaborar las conclusiones.

Es de vital importancia reportar y archivar datos de manera organizada, de tal forma que resulten sencillos de localizar y que puedan ser utilizados por aquellos que sufren problemas similares. La matriz de experiencia de falla (MEF) representa un método para alcanzar este fin.

La MEF es un arreglo tridimensional obtenido al definir, en un eje, funciones mecánicas elementales, los modos de falla se indican en el segundo y en el último eje, las acciones correctivas. De acuerdo con lo anterior una celda en el espacio se define por una combinación de modo de falla, función mecánica básica y acciones correctivas. Si un elemento mecánico que falló encaja en una de las celdas, entonces se tienen los detalles de las acciones correctivas y de su efectividad.

La MEF tiene aplicaciones en los campos de análisis de falla, diseño, confiabilidad e investigación y desarrollo, los problemas de falla en el servicio pueden ser resueltos fácilmente. La única tarea de un ingeniero en el campo del servicio es identificar la función mecánica básica, acceder a la matriz y examinar los distintos modos por los que el componente pudo fallar, y por último, estudiar la acción correctiva correspondiente que pueda prevenir de mejor manera la recurrencia de la falla. Toda predicción de confiabilidad es tan buena como lo sean los datos, la MEF sirve como un almacén del cual se pueden obtener datos de falla provenientes de experiencias reales.

## 1.4 PROBLEMÁTICA DEL ANÁLISIS DE FALLA

Como ya se mencionó anteriormente, el AF permite prever el comportamiento del elemento mecánico, sistema o equipo evitando de esta manera que se presenten futuros inconvenientes, incrementando entonces la confiabilidad y disminuyendo los costos. Si bien el AF tiene reglas y procedimientos perfectamente definidos por diversos autores [2,3,5,7,8], es indudable que en la determinación de la causa de falla influyen varios aspectos, como son:

- Procesos de análisis, síntesis y toma de decisiones. En la solución de un problema se requiere de una amplia experiencia pues se tienen que definir las variables que es necesario explorar a profundidad (capacidad de análisis). Posteriormente, tomando en cuenta la información proporcionada con relación a la falla, así como la obtenida en el proceso de análisis, se plantean las soluciones al problema (Capacidad de síntesis). El experto debe tener la capacidad de tomar decisiones, para que dentro de una serie de posibles juicios, plantear las acciones correctivas.
- Complejidad del conocimiento. En un problema de análisis de falla están involucradas una gran cantidad de variables relacionadas con factores como materiales, diseño, manufactura, condiciones de servicio, etc, lo que hace necesario que se tenga un determinado nivel de experiencia para definir las variables que más influyen en el problema, determinar los factores involucrados, y proponer las correspondientes acciones correctivas a partir de información compleja. Cabe hacer mención que debido a esto el analista establece cadenas de razonamiento en múltiples niveles de conocimiento. Esto mismo deberá ser desarrollado por el sistema experto.
- Conocimiento numérico y simbólico. El analista no solo estudia información cuantitativa, como la relacionada con las propiedades mecánicas del material, sino que además tiene que considerar la información que se desprende de la inspección a simple vista y la relacionada con imágenes macro y microscópicas. Se debe tener la capacidad de relacionar la información para poder generar una visión integral del problema.
- Falta de información y, o ambigüedad de la misma. Cuando se realiza análisis de falla, en la mayoría de las veces, no se cuenta con la información suficiente para describir al problema o bien ésta resulta ambigua, por lo que el analista deberá ser capaz de dar solución al problema a pesar de este inconveniente, razón por la que deben tener antecedentes en la solución de varios casos de falla. Esto será efectuado por el sistema experto por medio de su base de conocimientos (base de datos).
- Razonamiento lógico y probabilístico. Cuando realiza sus apreciaciones, el analista comúnmente evalúa las variables con base en ponderaciones difusas y probabilísticas. Dicho de otra manera, en ocasiones tiene incertidumbre en lo que observa o bien establece un determinado nivel de confianza en los juicios y conclusiones intermedias. Al presentarse lo anterior también se tiene cierto nivel de incertidumbre en la propuesta de solución final. Para poder establecer las ponderaciones correctas se

requiere de una amplia experiencia resultado de haber solucionado diversos problemas de AF.

- Explicación y justificación de procedimientos El analista debe tener la capacidad de plantear metodologías de acuerdo con el tipo de problema a solucionar, asimismo, debe tener la habilidad de explicar los resultados y la forma en que se llegó a ellos.
- *Heurística*\*. En general, en el análisis de falla se emplea la heurística, en el sentido de que normalmente se plantean soluciones empíricas basadas en la experiencia de solución de casos similares. De hecho es práctica común que los expertos en análisis de falla recurran a experiencias previas para resolver un determinado caso.

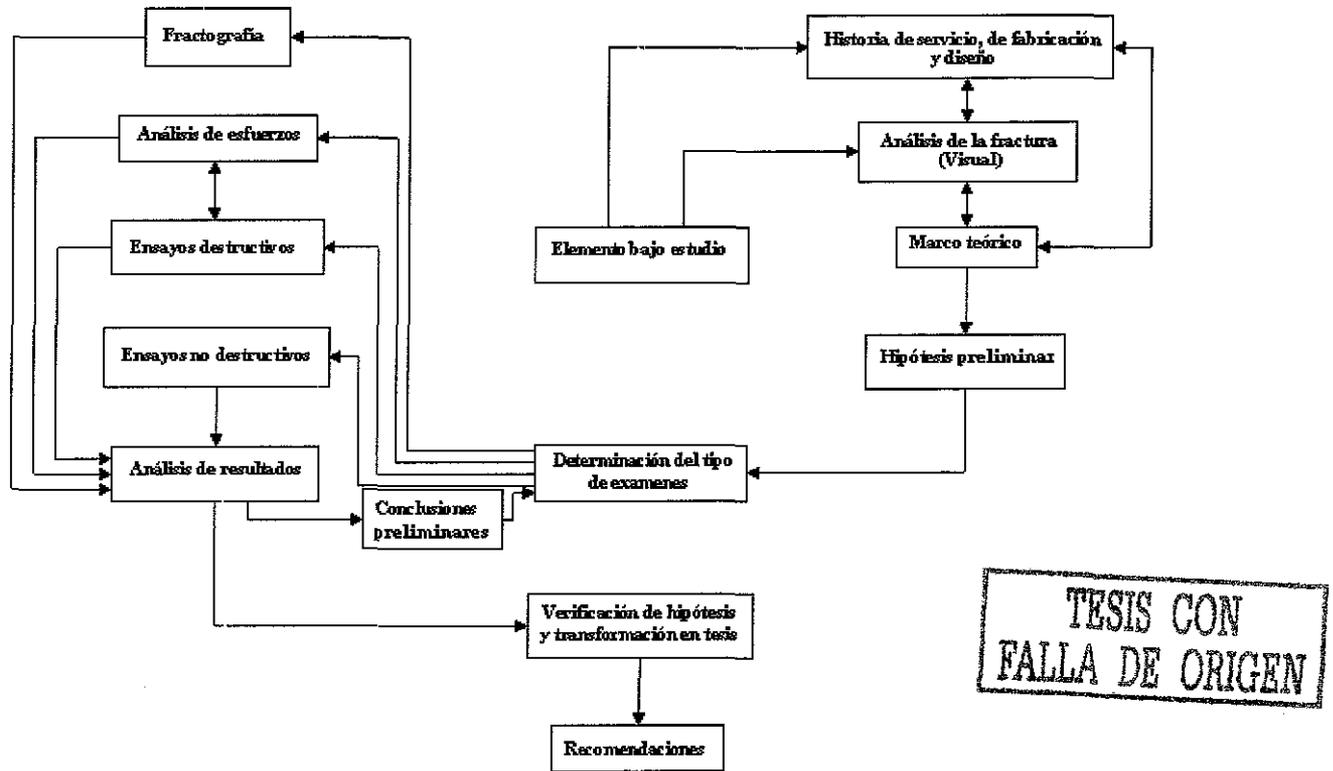
Se ha visto que el análisis de falla es muy complejo y depende en gran medida de la experiencia previa del experto. Esto no solamente se aplica desde el punto de vista de las conclusiones sino también de la rapidez y métodos empleados para validar las propuestas. En virtud de que la técnica, en la mayoría de las ocasiones, tiene por objetivo final evitar que los inconvenientes se repitan es necesario que vaya acompañada de las explicaciones y justificación de los procedimientos y conclusiones que se desprenden

## **1.5 LA EXPERIENCIA COMO FACTOR FUNDAMENTAL**

Para establecer la causa y secuencia correctas de una falla, se requiere un enfoque sistemático y científico. La cantidad de información de utilidad recabada en el procedimiento de examen depende en gran medida de la experiencia, conocimiento, habilidad de análisis y metodología del analista; así como la disponibilidad de detalles y de la infraestructura. La experiencia muestra que un ingeniero experimentado puede manejar cualquier tipo de investigación de falla en productos metálicos usando los mismos instrumentos e instalaciones disponibles en los laboratorios de metalurgia, siempre y cuando tenga el ingenio y la capacidad para enfrentar problemas complejos.

La existencia de un sistema de retroalimentación de los avances, resultado de la investigación, en cualquier organización orientada a este fin, es de primordial importancia (ver figura 1.1)

\**Heurística* Búsqueda o investigación de documentos o fuentes históricas *Diccionario de la lengua española Real Academia de la lengua, 1984*



**Figura. 1.1. Mapa Conceptual de retroalimentación de la investigación de fallas.**

La realización de una adecuada recolección de información del contexto en que ocurre, constituye uno de los primeros pasos de gran importancia para lograr la comprensión de los factores básicos que pueden estar asociados con la falla. Una inadecuada o escasa recopilación de información llevará a un análisis erróneo o un exceso de tiempo para el análisis del caso en cuestión. Por esta razón, siempre que sea posible se debe recolectar información tal como nombre de la pieza, número, tipo de equipo, localización de la falla con respecto a toda la máquina, dibujos importantes, especificaciones, historia del servicio o mantenimiento, reportes de accidentes previos y evidencia comprobable por parte de testigos oculares.

Si la información que se ha obtenido del contexto es inapropiada, el investigador debe visitar el lugar de la falla para familiarizarse con los detalles asociados al componente que falló. Primero, se deben estudiar los aspectos funcionales relativos al diseño y a los parámetros de servicio, tales como la carga estática, los esfuerzos de servicio y las condiciones de ensamble. A continuación, hay que examinar las condiciones ambientales, tales como las fluctuaciones de temperatura o la presencia de agentes corrosivos, que deben analizarse y registrarse. Por último, se deben tener discusiones con el personal de campo con relación al testimonio del operador.

En caso de investigaciones de accidentes, las fotografías de la situación real del sitio del percance son indispensables.

## **Ventajas**

Cuando el grupo de trabajo tiene ya experiencia, la recolección de información es más completa y esto brinda ventajas tales como limitar el campo del análisis del problema. El investigador debe responder varias preguntas para definir la estrategia de estudio, por ejemplo:

- Tipo de material
- Propiedades físicas, químicas y mecánicas del material.
- ¿Cómo se fabricó?
- ¿Cuánto tiempo lleva en servicio?
- ¿Para qué fue diseñado?
- ¿A qué ambiente fue expuesto?

Por otro lado el conocimiento del investigador en cuanto al análisis del aspecto de la superficie del material que falló y del tipo de pieza del estudio en cuestión es importante, tanto para el análisis de la estrategia como para la recopilación de datos, ya que en la actualidad se tiende a caracterizar a cada elemento en una forma distinta. Por ejemplo, en el caso de fallas de engranes, se sabe que la falla se debe ya sea al desgaste, flujo plástico o ruptura debido a sobrecarga, fatiga o materiales defectuosos.

## **1.6 EL PROBLEMA DE LA ESCASEZ DE EXPERTOS**

Históricamente, el énfasis del análisis de falla se ha orientado a problemas catastróficos con un elevado costo. De ahí que las empresas del ramo aeronáutico y los militares fueran los primeros a los que les interesó contar con grupos de técnicos que les permitieran en el menor tiempo posible determinar las causas de un accidente y por ende, definir las acciones correctivas. Por su importancia económica y por la difusión que sus problemas pueden tener a nivel mundial han sido las empresas del ramo automotriz quienes también han formado grupos de expertos que con base en análisis técnicos y económicos les permitan definir bajo que condiciones son llamados a revisión aquellos modelos de vehículos que han presentado algún inconveniente (sobre todo, desde luego, si se han visto involucrados en accidentes) para realizar alguna modificación (recalls). Como ejemplo de esto es conveniente recordar el caso de las camionetas que presentaron una serie de accidentes los cuales se atribuyeron a los neumáticos, los que bajo ciertas condiciones de operación sufrían desprendimiento de la capa de rodamiento con resultados funestos para la unidad; asunto que por cierto estuvo a punto de provocar la quiebra de la empresa fabricante de los neumáticos.

En la industria en general, la cultura del análisis de falla poco ha permeado, ya que hasta nuestros días la práctica indica que si una pieza sufre daño o deterioro lo que deberá realizarse es la reparación a la brevedad posible. Cuando dichas fallas se presentan con relativa frecuencia, lo más común es modificar la parte o sistema a partir de la percepción particular del técnico encargado, lo cual, al corregir el problema, lo convierte en procedimiento común. En algunas ocasiones por la gravedad del problema, ya sea en lo económico o por las consecuencias que éste provoca, las empresas se deciden por contactar con aquellos grupos (universidades u bufetes) que tienen la capacidad para poder determinar las causas de los problemas que se han presentado; aún

entonces existen problemas, por los costos que cualquier estudio de análisis de falla representa, ya que los administradores (normalmente sin formación técnica) consideran un desperdicio de dinero el dedicar recursos para saber las causas de sus problemas. Solo en muy pocos casos existe en la empresa los ingenieros con la inquietud y los conocimientos adecuados como para realizar el análisis de falla de un sistema ó componente.

## **1.7 LA PROBLEMÁTICA NACIONAL**

Todo lo comentado en los párrafos anteriores aplica para el entorno mexicano de inicio del siglo XXI, pero desde luego con mayores proporciones en los aspectos negativos, esto por los antecedentes bajo los cuales se ha desarrollado la industria instalada en nuestro país. Las grandes industrias son en general transnacionales que no tiene departamentos de ingeniería, ya que solo se orientan a aquellas actividades que están más identificadas con la maquila que con el desarrollo de técnicas y procesos. Este tipo de empresa cuando tienen algún problema lo que hacen es enviar el caso a su matriz y esperar las recomendaciones que de ésta emanen. Por otra parte, está la industria, generalmente mediana y pequeña, de capital nacional; en ésta lo más común es que el tiempo y los recursos dedicados al análisis de las causas que pueden ser causa de problemas tiende a cero; esto no por falta de importancia sino porque sencillamente se desconocen las posibilidades del AF, y por razones evidentes no se dispone del personal capacitado para emprender estas acciones.

Por tal motivo se requiere de acciones orientadas a la formación y actualización de personal, ya que, en algunas ocasiones, al no utilizar la metodología adecuada y por la falta de elementos técnicos se llegan a plantear conclusiones, y por ende soluciones que solo agravan más la situación; además dada la escasez de expertos, el costo que sus servicios representa y la dificultad de disponer de éstos con la rapidez requerida, hace interesante la opción de diseñar y poner a disposición de la industria un sistema experto de AF cuya plataforma esté basada en el equipo de cómputo de tipo PC, que es el que toda empresa dispone.

## CAPÍTULO 2

### SISTEMAS EXPERTOS. SU APLICACIÓN AL ANÁLISIS DE FALLA

#### 2.1 SISTEMAS EXPERTOS (SE)

Un sistema experto es un programa de computadora que simula la forma en que resuelven problemas los expertos humanos en una determinada área del conocimiento. Es decir, con los SE puede almacenarse el conocimiento de expertos en un dominio de especialización delimitado y solucionar problemas mediante la simulación de los procesos de razonamiento.

El concepto de SE se ha venido desarrollando desde principios de la década de los setentas, su aplicación se orientó sobre todo hacia aquellos aspectos en donde la cantidad de información requerida para llegar a una decisión provocaba en muchos de los casos, soluciones diferentes, y en ocasiones hasta contradictorias. Sus principales aplicaciones se orientaron a la medicina, la jurisprudencia, la geología y posteriormente la ingeniería.

La técnica ha sido tanto infravalorada como sobrevaluada, ya que en sus inicios se llegó a idealizar pensando en sistemas que pudieran sustituir al médico, al abogado y al ingeniero de diseño; por otra parte, otros los conceptualizaron como simples bases de datos que agilizaban la búsqueda de información, pero que de ninguna manera representaban la sustitución del experto humano. En la actualidad el concepto se ha precisado y extendido su aplicación a diferentes ramas de la ciencia, dando como principales ventajas su facilidad de difusión, su rapidez y su bajo costo. Lo anterior aunado a su habilidad de empleo como elemento de entrenamiento para personal sin experiencia, ha dado como consecuencia un empleo cada vez más intenso; actuando en ocasiones como colega y en otras como experto.

Las bases teóricas de los SE fueron sentadas a partir de 1974. De 1974 a 1984 se considera la década de los SE, donde se ponen en marcha grandes proyectos de investigación y desarrollo, aquí se construyeron los SE; MYCIN, PROSPECTOR y DENTRAL. A partir de 1984 tienen una gran difusión las herramientas para el desarrollo de SE (Shells).

#### *Clasificación de los sistemas expertos*

Los SE, se dividen, en cuanto a su tamaño, en tres clases generales:

1. Asistente. Un pequeño sistema que realiza algunos procesos de una tarea experta, no es muy costoso, pero es muy limitado. Normalmente, se implementan en una computadora tipo PC.
2. Colega. Un sistema mediano que realiza una parte significativa de una tarea experta, se implementan tanto en PC como en estaciones de trabajo y grandes computadoras.
3. Experto. Un sistema grande que se acerca al nivel de desempeño de grupos expertos. Normalmente se implantan en potentes instalaciones utilizando complejas herramientas de desarrollo.

Los SE se clasifican también en categorías, dependiendo del tipo de problema que resuelven, estas son las siguientes:

- a) De interpretación de datos: Infieren el significado de un conjunto de datos dependiendo del problema a resolver
- b) Predicción: Infieren las probables consecuencias de una situación dada.
- c) De diagnóstico: Identifican la naturaleza y las causas del mal funcionamiento de un sistema a partir de ciertos signos y síntomas
- d) De diseño: Desarrollan las configuraciones que resuelven problemas satisfaciendo sus restricciones
- e) De planeación: Diseñan estrategias para lograr un objetivo, utilizando ciertos recursos y sujetándose a ciertas restricciones.
- f) De monitoreo: Analizan observaciones del comportamiento de un sistema para detectar posibles desviaciones de la norma y tomar eventuales medidas correctivas en tiempo real.
- g) De depuración: Describen soluciones para los casos en que programas de computadoras o equipos de toda índole muestran condiciones anómalas en su comportamiento.
- h) De reparación: Desarrollan y ejecutan planes para corregir fallas.
- i) De instrucción o tutoriales: Ayudan en el aprendizaje, no solo presentando la información necesaria al usuario sobre el tema específico, sino también haciendo un seguimiento del aprendizaje mismo
- j) De control: Compara la situación actual de un sistema con una norma predefinida y corrige las variables conforme sea necesario.

### ***Comparación entre sistemas expertos y expertos humanos***

A continuación se indican las características que poseen los SE relacionándolos con expertos humanos (EH).

- a) Adquisición de conocimientos.

Un experto humano adquiere su conocimiento de una forma práctica, y esa experiencia es difícil de transmitir de una a otra persona, ya sea de la forma oral o escrita. Además el EH sigue perfeccionándose, asiste a reuniones, cursos, seminarios, etc.

Los SE en general no son capaces de obtener el conocimiento por si solos mediante la práctica, así pues no son realmente expertos, y sería más correcto denominarlos sistemas basados en el conocimiento.

- b) Fiabilidad.

La fiabilidad que le da al experto humano es en función del grado de explicación que proporciona tras haber resuelto un problema, y a la fama que cuenta por la resolución de problemas anteriormente propuestos.

En los SE por lo tanto, esta fiabilidad se debe demostrar por medio de sus explicaciones y por sus éxitos en la resolución de problemas.

c) Dominio de conocimientos

Un experto humano tiene una limitación clara, que es el tiempo necesario para el aprendizaje

Un sistema experto, tiene por razones físicas una limitación en el conocimiento que puede obtener. No solamente por la capacidad de su memoria, sino también por el tiempo requerido para su procesamiento.

d) Resolución de problemas.

Un EH es capaz de resolver de una forma más rápida y eficaz un problema completamente nuevo dentro de su campo que un experto teórico, esto es debido a que el experto posee además de un conocimiento y unas estrategias básicas de resolución, numerosas tácticas que le permiten evitar pruebas inútiles, el orden de las mismas y también suelen realizar con gran seguridad, cálculos aproximados.

En un SE, la estrategia general de resolución es realmente el control del sistema, que se denomina motor de inferencia.

En la tabla 2.1 Se muestran las principales diferencias entre un SE y un EH.

	<i>sistema experto</i>	<i>experto humano</i>
<b>Conocimiento</b>	<i>adquirido</i>	<i>adquirido+innato</i>
<b>Adquisición del conocimiento</b>	<i>teórico</i>	<i>teórico+práctico</i>
<b>Campo</b>	<i>único</i>	<i>múltiples</i>
<b>Explicación</b>	<i>siempre</i>	<i>a veces</i>
<b>Limitación en capacidad</b>	<i>si</i>	<i>si, no evaluable</i>
<b>Reproducible</b>	<i>si, idéntico</i>	<i>No</i>
<b>Vida</b>	<i>infinita</i>	<i>finita</i>

**Tabla 2.1 Diferencias entre un sistema experto y un experto humano**

***Comparación entre sistemas expertos y programas tradicionales***

Las diferencias existentes entre un SE y un programa de cómputo convencional se muestran de manera concisa en la tabla 2.2.

	<i>Sistema experto</i>	<i>programa tradicional</i>
<b>Conocimiento</b>	<i>En programa e independiente</i>	<i>En programa y circuitos</i>
<b>Tipo de datos</b>	<i>Simbólicos</i>	<i>Numéricos</i>
<b>Resolución</b>	<i>Heurística</i>	<i>Combinatoria</i>
<b>Def. de problema</b>	<i>Declarativa</i>	<i>Procedimental</i>
<b>Control</b>	<i>No secuencial</i>	<i>Dependiente secuencial</i>
<b>Conocimientos</b>	<i>Imprecisos</i>	<i>Precisos</i>
<b>Modificaciones</b>	<i>Frecuentes</i>	<i>Raras</i>
<b>Explicaciones</b>	<i>Si</i>	<i>No</i>
<b>Solución</b>	<i>Satisfactoria</i>	<i>Optima</i>
<b>Justificación</b>	<i>Si</i>	<i>No</i>
<b>Resolución</b>	<i>área limitada</i>	<i>Específico</i>
<b>Comunicación</b>	<i>Independiente</i>	<i>En programa</i>

**Tabla 2.2 Diferencias entre un sistema experto y un programa tradicional**

### ***Participantes en el desarrollo de un sistema experto***

El equipo para desarrollar un SE está compuesto por un experto, un ingeniero de conocimiento y un usuario.

El experto pone sus conocimientos especializados a disposición del SE mediante el ingeniero de conocimientos como canalizador de esa información. Es imperativo que un experto apropiado esté disponible si un proyecto de SE va tener éxito, nos referimos con “apropiado” a la persona que cumpla los siguientes requisitos:

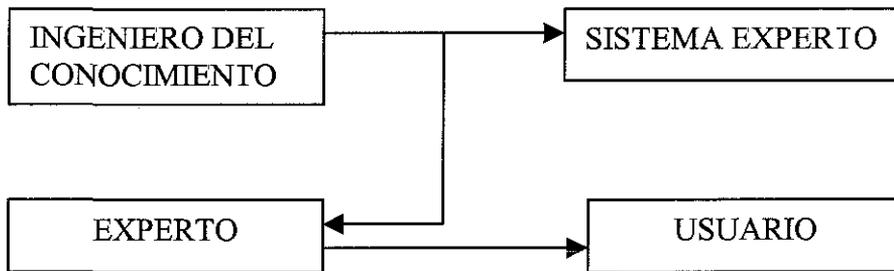
- I. Deberá estar en posibilidad de resolver problemas en el dominio del tema. Existe la tendencia a crear SE que intenten resolver problemas que los expertos son incapaces de resolver.
- II. Deberá de estar disponible, se le requerirá de varias horas diarias de principio a fin del desarrollo del prototipo y hasta 10 horas/semana para el resto del proyecto. Éste es uno de los criterios más difíciles de cubrir.
- III. Debe ser capaz de describir el conocimiento y como debe aplicar éste.
- IV. Debe estar dispuesto a dar conocimiento, esto no es fácil ya que el conocimiento es escaso y por lo tanto valioso tanto para la organización como para el experto.
- V. Debe disfrutar de muy buena reputación entre los usuarios potenciales del sistema. Si ese no es el caso, los futuros usuarios no aceptarán el sistema.
- VI. Múltiples expertos deberán estar de acuerdo con las técnicas de solución de problemas. Esto posibilita la verificación final del sistema por parte de varios expertos. Aunque no todos los expertos estén de acuerdo con las técnicas del experto principal, deben por lo menos reconocerlo como una autoridad en la materia.



El ingeniero de conocimiento es el que plantea las preguntas al experto y estructura esa información en el sistema. El ingeniero del conocimiento juega un papel crítico en la construcción de un SE, aunque es el conocimiento del experto el que se está modelando, es el ingeniero del conocimiento el que realmente construye el sistema, ya que lleva el conocimiento del experto al sistema.

El usuario aporta sus deseos y sus ideas, determinando especialmente el escenario en el que debe aplicarse el SE.

En la figura 2.1 se muestra la interacción entre los diferentes participantes en el desarrollo de un sistema experto



**Figura 2.1 Interacción entre los participantes en la construcción de un sistema experto**

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

Los componentes se estructuran de la siguiente forma:

1. Base de conocimientos: Contiene el conocimiento de los hechos y de las experiencias de los expertos en un dominio determinado.
2. Mecanismo de inferencia: Son aquellos por medio de los cuales se simula el razonamiento de la estrategia que el experto aplicará en la solución de algún problema, es la unidad lógica con la que se extraen conclusiones de la base de conocimientos, según el método de solución de problemas que esté configurado. Los razonamientos que efectúan se dan a través de la evaluación de reglas lógicas, y a partir de estas se generan nuevas premisas.

Dentro del mecanismo de inferencia existen dos estrategias de evaluación de las reglas, estas son:

#### **a) Encadenamiento hacia adelante**

Se buscan en la base de conocimientos reglas para los hechos conocidos y se ejecutan, Este proceso se realizará tantas veces sea necesario hasta alcanzar el objetivo o hasta que no existan reglas que aplicar.

La base de conocimientos contiene algunas reglas y hechos conocidos. El objetivo es crear los hechos derivables de ello. En la figura 2.2 se muestra la estructura del mecanismo de inferencia.

b) Encadenamiento hacia atrás

Se parte de un objetivo (una hipótesis). Todas las reglas que contienen esta hipótesis son comprobadas, para ver si se cumplen las condiciones de estas reglas.

La base de conocimientos contiene las mismas reglas y los mismos hechos que en el ejemplo del encadenamiento hacia adelante. El objetivo es la verificación de la hipótesis.

3. Solución de conflictos ante la presencia de varias reglas

Las estrategias de elección, en el caso de llegar a un punto donde pueden aplicarse varias reglas, son:

- Se elige la regla que más vaya a influir en la hipótesis más importante.
- Se elige la regla donde la recopilación de los hechos necesarios sea más fácil
- Se elige las reglas cuyos hechos puedan determinarse con el menor riesgo posible
- Se elige la regla de espacio de búsqueda más corto.
- Se elige la regla de la que ya se conozcan la mayoría de las condiciones.

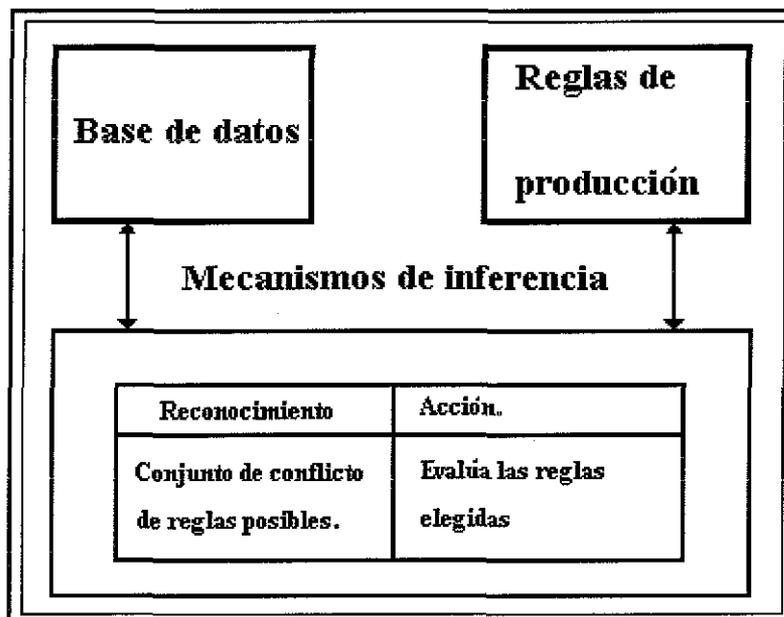


Figura 2.2 Mecanismo de inferencia

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

3. Componente explicativo: Explica al usuario la estrategia de solución encontrada y el por qué de las decisiones tomadas. Las soluciones descubiertas por los expertos deben ser repetibles tanto por el ingeniero en la fase de la comprobación como por el usuario. La exactitud del resultado podrá ser validada por el experto.

4. Interfase: Sirve para que el usuario pueda realizar una consulta en un lenguaje de la forma más sencilla posible. Este componente establece la forma en que se presentarán las preguntas al usuario. La Interfase debe cumplir con los siguientes requisitos:

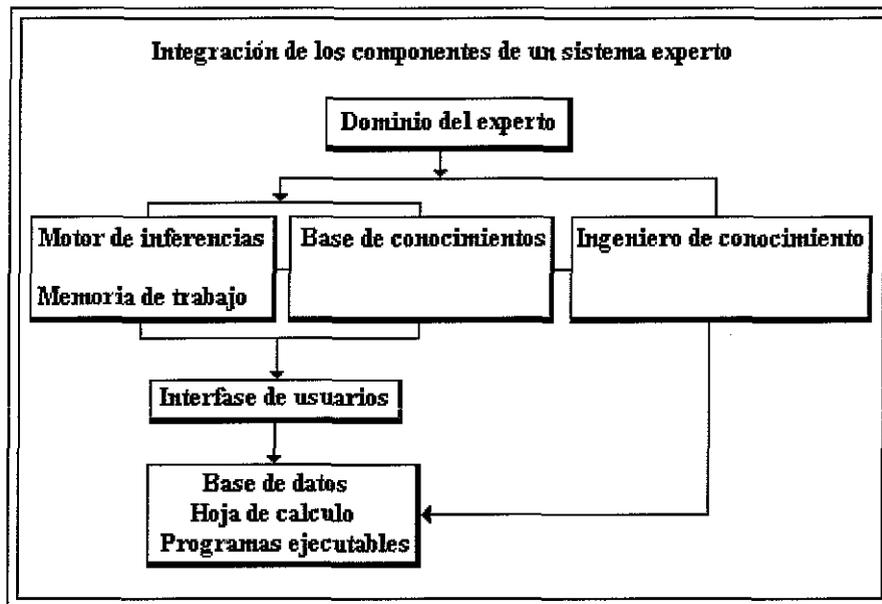
- El aprendizaje del manejo del SE debe ser rápido
- Debe evitarse la entrada de datos erróneos
- Los resultados deben presentarse en una forma clara para el usuario.
- Las preguntas y explicaciones deben ser comprensibles.

5. Componente de adquisición: Ofrece ayuda a la estructuración e implementación del conocimiento en el sistema, esta ayuda puede concentrarse en la estructuración del conocimiento sin tener que dedicar tiempo a programar.

Un componente de adquisición posee:

- El conocimiento, es decir las reglas, los hechos, las relaciones entre los hechos, etc. Y debe introducirse de la forma más sencilla.
- Posibilidad de presentación clara de la información contenida en la base de conocimientos.
- Comprobación automática de sintaxis

En la figura 2.3 se muestran las relaciones entre los componentes de un sistema experto



**Figura 2.3 Integración de los componentes del sistema experto**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### ***Shell: herramienta para el desarrollo de sistemas expertos***

Shell es un programa desarrollado en lenguajes de programación, tales que faciliten la labor de implementación de los SE para determinados requisitos. El concepto de shell se aplica en un sentido muy amplio; contiene entornos de programación y otros sistemas auxiliares.

Los primeros Shells se diseñaron extrayendo la información de un SE ya creado, utilizando su estructura para desarrollar otros SE.

Los componentes más importantes en un Shell son:

- Formalismos para la presentación del conocimiento.
- Medios de estructuración para la base de conocimientos.
- Mecanismos de inferencia.
- Interfase con el usuario.
- Apoyo en la creación de un componente explicativo.
- Mecanismos para la comprobación, o búsqueda de errores.
- Ayudas en la adquisición de conocimientos.

La utilización de Shells reduce el esfuerzo de desarrollo de un SE. La ventaja es que no se requiere el dominio de lenguajes de Inteligencia artificial (IA)

Ningún Shell sirve para todas las aplicaciones, sino que hay que buscar un Shell apropiado para cada aplicación.

Es posible que haya que desarrollar adicionalmente mecanismos de inferencia dependiendo del tamaño de la base de conocimientos. A menudo el Shell contiene marcos previamente preparados en los cuales sólo se introduce el nombre del objeto y sus cualidades con sus valores correspondientes y así puede aumentar la base de conocimientos dependiendo de las necesidades que se vayan creando.

Los inconvenientes de un Shell son:

- No puede ser la base de cualquier SE, sino que sólo es aplicable para determinados entornos.
- El encargado debe aprender el lenguaje y la sistemática del Shell elegido.
- La introducción de funciones nuevas o de su modificación sólo es posible en Shells que ofrezcan interfase para un determinado lenguaje de programación.
- Su utilización está limitada a determinado equipo de cómputo.

El poder de un Shell también dependerá del Hardware utilizado. Algunos Shells de gran potencia sólo se pueden utilizar en estaciones de trabajo y en grandes computadoras.

### *Consulta en sistemas expertos*

En la interfase de usuario del SE están a disposición del usuario dos componentes:

- Un componente activo que determina el resultado en la interacción con el usuario.
- Un componente pasivo que justifica el resultado (componente explicativo).

No es suficiente conformarse con ver el componente activo. Si el usuario no obtuviese la ayuda del componente explicativo, que le permitiera reproducir la vía de solución tomada, sería muy difícil conseguir la aceptación de la respuesta ofrecida por el sistema (caja negra).

La consulta misma transcurre, en general, según el esquema siguiente:

Primero se plantean al usuario algunas preguntas generales para alcanzar una determinación aproximada del contexto. Una primera valoración, que se produce dependiendo del método prefijado del procesamiento de los conocimientos del SE en uso, desemboca entonces en el verdadero diálogo con el usuario, orientado al objetivo. El diálogo por parte del sistema está a menudo dimensionado para ir confirmando o rechazando hipótesis (por ejemplo, comprobación de una causa de falla), o para realizar una aproximación sucesiva hacia un objetivo introducido de antemano (por ejemplo, una configuración perfecta de una red de cómputo).

En el marco de este diálogo, el sistema realiza constantemente las actividades necesarias para alcanzar la solución del problema y para explicar el estado del sistema.

El sistema se comporta como un experto y

- Plantea preguntas precisas,
  - Informa (según el caso sólo a petición del usuario) sobre los resultados intermedios y las hipótesis modificadas.
  - Determina el resultado, por ejemplo, un diagnóstico,
  - Justifica el resultado y
  - Explica (según el caso sólo a petición) también el rechazo de las hipótesis.
- Una vez finalizado el diálogo, el componente explicativo suministra, si es necesario, la historia completa de la consulta.

De esta manera es posible:

- Visualizar todas las entradas de información proporcionadas por el usuario,
- Confrontar el resultado obtenido con todos otros resultados posibles
- Visualizar las reglas activas y las no utilizadas; incluso las reglas activadas, que sin embargo fueron rechazadas en una misma hipótesis, estas pueden elegirse y visualizarse.

El resultado alcanzado por el SE dependerá de la calidad de las respuestas del usuario. En general, el SE no puede comprobar la consistencia de las diferentes respuestas del usuario.

Especialmente, cuando el usuario se ve obligado a realizar correcciones respecto a algún dato introducido con anterioridad, el sistema no puede determinar qué otras respuestas dadas y procesadas pueden estar afectadas. La responsabilidad de la consistencia de este entorno desde el punto de vista del sistema, recae naturalmente en el usuario y no en el sistema.

### ***Adquisición del conocimiento y conceptualización***

El objetivo consiste en identificar todos los elementos que intervienen en la solución del problema (Conceptos, procedimientos, reglas de inferencia, heurísticos, casos especiales, métodos de razonamientos, restricciones, etc.).

La información puede obtenerse de distintas fuentes: diálogo directo con expertos, información escrita (libros, revistas, manuales, informes, etc.), datos empíricos proporcionados por aparatos de medida o por observaciones, datos gráficos (imágenes, diagramas, dibujos, etc.) A medida que se obtiene el conocimiento es necesario depurarlo, seleccionando los conceptos básicos que harán posible el funcionamiento del sistema.

La realización de esta fase implica llevar a cabo diferentes procesos:

- a) Análisis del conjunto de información que proporcionan las fuentes de conocimiento.
- b) Abstracción para la obtención de conceptos.
- c) Selección y clasificación de la información.
- d) Inferencia de nuevos conceptos, relaciones o propiedades a partir de los ya existentes.
- e) Generalizando a partir de casos concretos.
- f) Inducción, etc.

En la práctica, la adquisición del conocimiento requiere una buena metodología, y sobre todo, gran habilidad y experiencia por parte del diseñador.

Éste es sin duda la fase más compleja del ciclo y donde se requiere de todas las herramientas que existen por ejemplo, para ayudar en tareas como: interrogar con habilidad y paciencia a los expertos en el área de aplicación, extraer información de textos, clasificar y filtrar datos etc.

### ***Ventajas del uso de sistemas expertos***

- *Autonomía*. Una vez desarrollado es independiente tanto del experto como del desarrollador del sistema
- *Productividad*. El experto humano puede dedicar su tiempo a problemas cada vez más complejos.
- *Manejo de gran cantidad de información*. Por la capacidad de almacenamiento de los actuales sistemas de cómputo
- *Rapidez*. La velocidad de respuesta en ocasiones es mayor que la del experto humano
- *Homogeneización de criterios*. El conocimiento puede ser resultado de la consulta a un grupo de expertos.

- *Imparcialidad.* Los juicios emitidos son imparciales, aun si se opera con información ambigua
- *Reproducibilidad.* El sistema puede multiplicarse, debido a la facilidad de transmitir la información por vía magnética.
- *Bajo costo de adquisición y de operación.* Disponer de un experto humano en una área representa costos elevados en comparación con las erogaciones que representan el diseño, construcción y operación del SE
- *Facilidad de distribución.* Puede aplicarse en diferentes zonas geográficas por alejadas que estén unas de otras.

## 2.2 RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS (RBC)

El RBC es una metodología para solucionar problemas y una teoría de razonamiento y memoria que está basada en la forma en que los expertos humanos razonan con base a la experiencia. El experto tiende a tomar decisiones sobre nuevas situaciones con base en sus experiencias o las de otros. Un sistema de RBC funciona de manera inteligente buscando casos similares al que se pretende solucionar, en una base de casos que contiene soluciones a problemas de un campo de conocimiento delimitado. Esta teoría apareció entre 1982 y 1983, por lo que es una disciplina reciente dentro de la IA.

La metodología consiste en lo siguiente

1. Definir la estructura del caso, definiendo las palabras clave con las que operara el sistema. Asimismo se determinan los campos clave para llevar a cabo la indexación.
2. Localizar casos similares en la memoria (base de casos) que sean relevantes para la solución del problema en estudio.
3. Aplicar los procedimientos de solución de los casos relevantes identificados en el punto 2, para solucionar el problema en estudio
4. Evaluar la solución
5. Almacenar el nuevo caso solucionado

Esta metodología y la interacción entre los elementos de un sistema CBR se presentan en la figura 2.4

Los sistemas de CBR son una alternativa a los sistemas expertos basados en reglas, debido a que se disminuyen los inconvenientes de la construcción de las bases de reglas. El más crítico de los problemas es la adquisición del conocimiento. Para construir un sistema experto tiene que intervenir un ingeniero del conocimiento como intermediario entre el sistema y el experto humano, y modelar en forma de reglas el razonamiento de los expertos. El conocimiento es complejo y poco disponible. Es complicado que el experto defina la relación de cientos de reglas que aplica para solucionar los problemas en su campo de estudio. Por lo anterior, del proceso de adquisición se generan reglas que en ocasiones son incorrectas o incompletas por que el experto se ve forzado a expresar sus razonamientos en un formato discreto (reglas deductivas), que se aleja del procedimiento que el sigue para solucionar un problema. Por otro lado, el RBC busca modelar el proceso de razonamiento del experto considerando una serie de casos donde se encuentran almacenadas experiencias de la solución de casos dentro del ámbito de conocimiento.

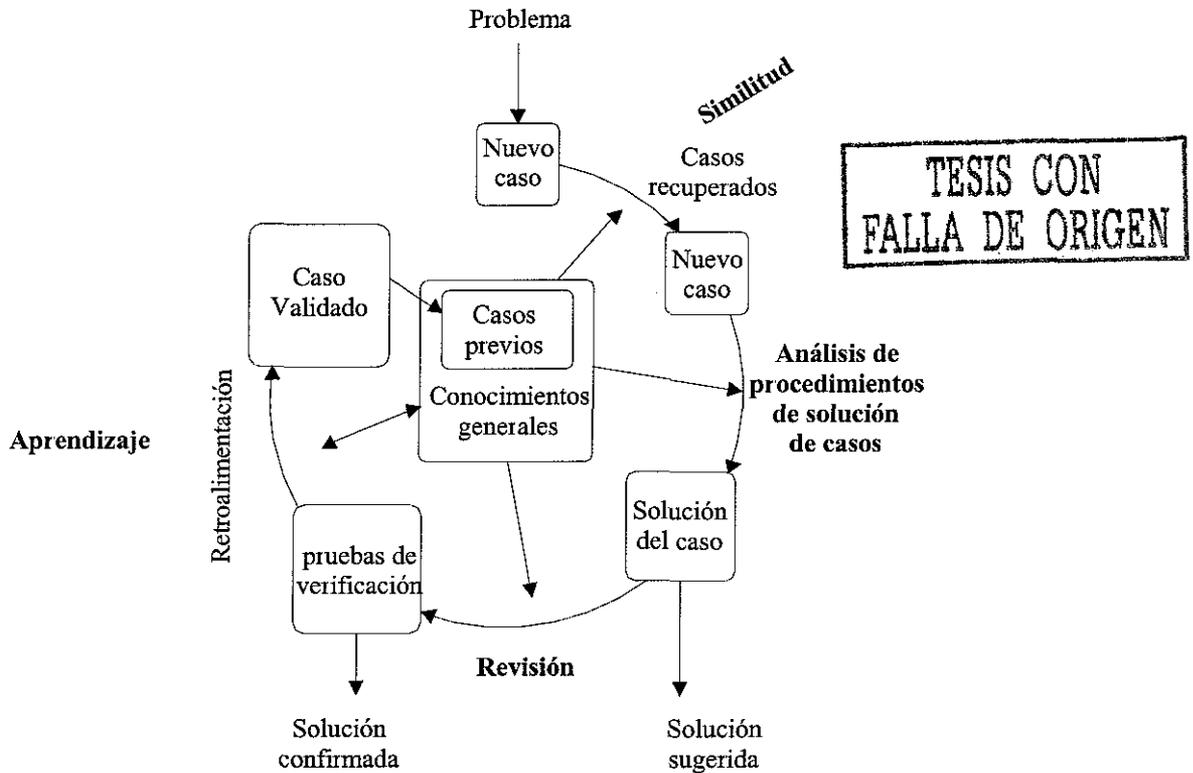


Figura 2.4 Proceso de razonamiento basado en casos

### 2.3 SISTEMA DE RBC PARA LA IDENTIFICACIÓN DE MECANISMOS DE FALLA

T.W. Liao, Z.M. Zhang y C.R. Mount del Departamento de ingeniería industrial y sistemas de manufactura de la Universidad de Louisiana desarrollaron este sistema utilizando Microsoft Access para archivar la base de casos históricos y Visual Basic para construir los algoritmos de búsqueda del software. El programa es capaz de determinar el mecanismo de falla de un caso nuevo, utilizando su base de casos y medidas de relevancia, para esto puede distinguir entre dos tipos de casos: los comunes y los excepcionales. Si se encuentra un caso excepcional, se realiza una búsqueda secundaria. Los desarrolladores incluyeron un módulo con algoritmos genéticos diseñado para encontrar la ponderación que se debe dar a los distintos atributos de los casos para encontrar la similitud total que hay entre dos casos, el módulo es capaz de obtener generaciones de ponderaciones cada vez mejores.

El sistema está orientado a las fallas de elementos metálicos mecánicos y se especializa en usar casos anteriores para determinar el mecanismo de falla, no las causas de falla. Establecen este enfoque debido a que las causas de falla pueden ser muy abundantes. El sistema opera con 15 mecanismos, y tiene una base de datos con alrededor de 500 casos.

En la operación al activar la búsqueda se entra a una pantalla donde están clasificados distintos grupos de atributos, para definir las características del problema actual, una vez realizado esto es

cuando el sistema comienza la búsqueda y exhibe los casos que más similitud muestren con el actual, así como el mecanismo de falla sugerido.

Para las medidas de la similitud se usan tres métodos generales para obtenerlos, que son el estadístico, el heurístico y el analítico, En este sistema se utilizan algoritmos genéticos para mejorar la ponderación para las búsquedas. En el caso de que existan dos mecanismos de falla con similitud parecida y elevada, es necesario refinar la búsqueda. El sistema está diseñado para efectuar esta tarea.

**Estructura del sistema**

1. Base de casos. Se construyó utilizando 477 casos reales, de los cuales se clasificaron 375 como normales y 102 como excepcionales. Un caso normal es aquel que puede llevar a la inferencia de reglas. La estructura de un caso es la siguiente:

Condición general	Condición superficial	Fracturas y grietas	Sección transversal sub-superficie
Fractografía	Composición	Propiedades físicas	Datos generales
S O L U C I O N: Mecanismo de falla			

2. Medidas de similitud. Se aplica ponderación a cada uno de los elementos de los casos, que es lo más usual. La similitud se obtiene como:

$$SIM(X,Y) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i * sim(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

donde n es el número de atributos de un caso,  
 X,Y son los casos que se comparan,  
 xi,yi son atributos número i de los casos,  
 w es el peso dado a cada atributo (Este es el mayor problema dentro de esta técnica)

La medida de la similitud es determinante en la técnica de CBR. Existen diversas formas para medirla, una de ellas es la distancia euclidiana y otra es la distancia de Hamming.

$SIM(X,Y)=1-DIST(X,Y)$

$$DIST(X, Y) = 1 - \sqrt{\sum (w_i^2 * dist(x_i, y_i))} \quad \text{Euclidiana}$$

$$DIST(X, Y) = 1 - \sum_i w_i * dist(x_i, y - i) \quad \text{Hamming}$$

Generalmente el valor de la distancia entre atributos (dist) se debe normalizar:

$$dist(x_i, y_i) = \frac{|x_i - y_i|}{|max(x_i) - min(y_i)|}$$

Para manejar el concepto de distancia, los datos pueden ser numéricos o no numéricos. En el caso de valores numéricos, se puede manejar utilizando los valores de variable física o propiedad, sin embargo hay valores lógicos que son "igual", "distinto" o "desconocido". Existen varias teorías para considerar el valor de "inexistente" o "desconocido".

(dist)	Motivo
0	Igual
1	Diferente
1/Li*(1-1/Li)	Li es el número de valores discretos que puede tener un atributo, ecuación de Agre.
sim(xi,yi)=0.5	Xi o yi son desconocidos. (Ricci y Avesani)
dist(xi,yi)=0	Si ambos valores son desconocidos.
dist(xi,yi)=1	Si un valor es conocido y el otro desconocido (Surma y Vanhoof)

### 3. Interfase de usuario.

El usuario puede manejar el sistema de una manera muy sencilla, existen diversas pantallas que muestran cada uno de los grupos de atributos para ser vaciados o consultados

## 2.4 SISTEMA PARA ANÁLISIS DE FALLA DE CORROSIÓN (ROBERGE [21])

El sistema fue desarrollado para el área específica de la corrosión, no toca defectos como los de manufactura como tales, sino como causantes de una corrosión; tampoco es capaz de determinar mecanismos de falla como sobrecarga. Maneja la técnica de razonamiento basado en casos justificando que en muchos casos de análisis de falla, la información está incompleta, una característica que dificulta el uso de otras áreas de la inteligencia artificial como los sistemas expertos.

El sistema fue construido para apoyar al experto humano brindándole una base de datos con casos históricos siempre disponible y organizada, de manera que le ayude a una de las primeras actividades en una investigación de falla: comparar el caso con algunos anteriores y elaborar la hipótesis de que el mecanismo de falla fue el mismo.

En Cuanto al Modo de operación. El usuario introduce parámetros de comparación al sistema, tales como el tipo de material, la temperatura y el ambiente de operación, esfuerzos, etc., el sistema efectúa una búsqueda dentro de su base de casos históricos y presenta los más similares y su solución, además de las recomendaciones que se hicieron en el pasado. Estas recomendaciones son lo que el cliente espera de un analista de falla como resultado último.

### ***Estructura del sistema***

#### **1. Base de casos.**

Se definieron ciertas palabras clave, que son esenciales para precisar un caso de falla y la causa de la corrosión. Las palabras clave o atributos más repetidos fueron:

Medio ambiente  
Geometría  
Material  
Temperatura  
Tiempo  
Esfuerzos

#### **2. Biblioteca de índices.**

Se hace énfasis en este elemento del sistema por su alta importancia, y es que de un buen indexado depende una buena búsqueda y por ende, una buena operación del sistema.

Para realizar el indexado revisaron artículos sobre casos de AF y se extrajeron relaciones entre las palabras claves, las cuales se indican en la tabla 2.3

	Ambiente	Geometría	Material	Temperatura	Tiempo	Esfuerzos
Ambiente	254	22	38	44	0	10
Geometría	22	66	17	2	0	3
Material	38	17	400	64	0	21
Temperatura	44	2	65	111	0	3
Tiempo	0	0	0	0	2	0
Esfuerzos	10	3	21	3	0	117

Tabla 2.3 Relaciones entre palabras clave

La tabla 2.3 indica que los factores más repetitivos son el ambiente y el material, mientras que el tiempo es de los más escondidos, a pesar de que en muchas ocasiones es el tiempo quien determina la ocurrencia de las fallas por corrosión.

#### **3. Medidas de relevancia**

Para las medidas, se comparó el libro ASM Handbook of Failure Analysis con una lista de palabras clave relacionadas con esfuerzos. Al hacer las mediciones, se encontró que, en el 53%

de casos concuerdan exactamente las palabras de ASM Handbook con las palabras claves que se utilizaron para elaborar los índices del sistema. Algunas de éstas son:

Fractura por corrosión bajo tensión  
Esfuerzos residuales  
Alivio de esfuerzos

En otros casos (36%) coincidieron con una variante de la palabra clave como: (la palabra clave está entre paréntesis angulares)

Concentración de <esfuerzos>  
Dirección de <esfuerzos>  
<esfuerzo> de ajuste con interferencia

El resto de los casos contiene una palabra clave, que se encuentra entre paréntesis cuadrados

No hay [deformación]  
No hay evidencia de [sobrecarga]  
No hay pérdida de [resistencia]

## **2.5 SISTEMA EXPERTO PARA ANALISIS DE FALLA UTILIZANDO RBC.**

Este sistema fue desarrollado por Graham Jones y Brian G. Mellor [12, 13,14] de la Universidad de Southampton. El sistema trabaja en dos niveles, con relación a si el análisis de falla se hace antes de una falla o para elevar la confiabilidad de un sistema o si el análisis se efectúa luego de la falla. La diferencia está en que las preguntas de la superficie de fractura no tienen sentido si aún no se da la falla. Con una elección adecuada de preguntas, este asunto no implica gran diferencia, pero es obvio que los datos sobre la superficie de fractura son de gran importancia si la falla ha ocurrido.

El primer paso es introducir una descripción completa del componente, haya fallado o no, especificando el material, medio ambiente y condiciones de carga. Luego se presenta un cuestionario al estudiante o consultor, que puede tener hasta 50 preguntas dependiendo de la descripción inicial para extraer información, se utiliza un buscador multimedia para obtener datos más precisos de las preguntas. Las respuestas a las preguntas dependen de qué tipo de pregunta se formule: "Sí, no, no se sabe" o una alternativa de varias a elegir. La descripción y las preguntas se archivan como un caso de búsqueda al que se le asigna una calificación numérica (en porcentaje), resultado de comparar el caso de búsqueda con los ya existentes. Ahora el consultor elige la calificación más alta o examina los casos con calificaciones inferiores, que pueden servir mejor para el problema, dado que puede existir más de una respuesta.

Si no se puede hallar un caso similar al presente en la base de casos, el sistema lo registra como un caso no resuelto que requiere mayor investigación. Un consultor de análisis de falla puede investigar posteriormente el caso no resuelto a partir de la descripción del caso que guardó el sistema experto, y así producir un caso revisado.

## **CAPÍTULO 3.**

### **FACTIBILIDAD DEL DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO EN ANÁLISIS DE FALLA**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

En cualquier área del conocimiento existen problemas a los que se busca dar solución, siendo la experiencia un factor básico para tener éxito en la obtención de resultados. Sin embargo, se puede hablar de que el nivel de conocimientos previamente adquiridos que se requieren varían de acuerdo con el tipo de aplicación, Por ejemplo, si se habla de una actividad técnica repetitiva, evidentemente se requiere involucrar cierto nivel de experiencia y de conocimiento, pero este nivel no es comparable con la base que debe tener un profesional que se dedica a la selección de materiales para el campo de la industria aeroespacial. Por otro lado, dentro del área científico-tecnológica existen diversos problemas a los que se les puede dar solución a través de procedimientos secuenciales (procedimentales) o bien mediante la aplicación de una serie de fórmulas o algoritmos. En éstos, el nivel de experiencia, no es muy elevado. Con base en lo anterior es conveniente señalar que los sistemas expertos tienen un dominio de aplicaciones amplio, pero no en todos los campos del conocimiento es factible su desarrollo. Dicho de otra manera, para desarrollar sistemas expertos, se deben ubicar las áreas en donde la experiencia juegue un factor fundamental y donde el tipo de conocimiento involucrado sea complejo, considerando además que aunque el experto humano utilice algoritmos, tablas de datos, normas, etc. el razonamiento y la emisión de juicios lo distinguen de la realización de actividades puramente rutinarias.

Cuando se analiza la viabilidad de desarrollar un sistema experto no solo hay que considerar lo expresado con antelación, sino también se deben considerar los beneficios que traerá a la organización que lo empleará, en términos de; reducción de costos, mejora de la calidad de las evaluaciones realizadas, incremento de la productividad, etc.

De manera adicional, para decidir si se lleva a cabo una aplicación se debe considerar la disponibilidad de expertos en el área, siendo importante no solo su nivel de experiencia, sino que si tendrá el suficiente tiempo para las diversas sesiones y entrevistas requeridas. Asimismo se debe tomar en cuenta si el ingeniero del conocimiento (diseñador del sistema) tiene las habilidades en computación, para realizar la revisión de la literatura y para el planteamiento de metodologías para la obtención de información. Por último, es conveniente considerar el impacto que traerá al usuario final del sistema.

Para analizar la factibilidad del desarrollo de sistemas expertos, Beckman [11] propone una metodología para evaluación, es por esto y considerando que el objetivo de este trabajo es el desarrollo de un SE para AF de elementos mecánicos metálicos, en el presente capítulo se procederá al análisis que garantice la viabilidad de desarrollo de tal sistema. Finalmente se analizan los resultados obtenidos en este proceso.

### 3. 2 METODOLOGÍA DE BECKMAN

La justificación del desarrollo de SE se da con base en el análisis del tipo de problema, para lo cual Beckman propone una ponderación de los parámetros a considerar de acuerdo a lo establecido en las tablas (3.1-3.6).

CATEGORÍA	PONDERACIÓN
1. Tipo de problema	30
2. Resultados finales	25
3. Diseñador del sistema	20
4. Dominio del experto	15
5. Usuario final	10
Puntos totales	100

**Tabla 3.1 Lista de control para evaluar aplicaciones de sistemas expertos**

El tipo de problema y los resultados finales son las categorías esenciales para el éxito del proyecto, para que una aplicación sea prometedora, el puntaje en lo que se refiere a tipo de problema y resultados finales deberá ser de 50% ó mayor. En caso de no cumplir con esto, los SE no son la solución idónea. El problema debe involucrar procesamiento simbólico, complejidad, aplicación de juicio y solución de tipo probabilístico. Si los puntos en este caso son menores de 15 se deberán aplicar métodos convencionales de programación para dar solución al problema. En cuanto al resultado final se deberán considerar las ventajas acerca de la reproducción de la experiencia, a la vez de las posibilidades de aprendizaje y capacitación que estas técnicas abren. El éxito técnico depende, en forma primordial, de la capacidad del diseñador, y en un segundo plano del dominio del experto; una ponderación menor del 50% en este rubro será un indicador de posibles problemas potenciales. El dominio del experto no se refiere exclusivamente a la amplia disponibilidad y capacidad del experto, sino en su conjunto, a todas las fuentes de información disponibles. El usuario final es el menos crítico de los puntos a considerar en la evaluación; este deberá estar motivado respecto al uso del sistema y convencido de las bondades del mismo.

ATRIBUTO	PONDERACIÓN
1. Problema que requiere análisis, síntesis y toma de decisiones	3
2. Involucra principalmente conocimientos simbólicos y razonamiento	3
3. Es complejo, involucrando muchos parámetros	3
4. Involucra cadenas de razonamiento en múltiples niveles de conocimiento	2
5. Usa heurística o reglas de dedo y requiere juicios o razonamientos acerca de factores subjetivos	2
6. No puede ser resuelto usando métodos de computación convencionales	2
7. Frecuentemente puede resolverse con información incompleta y datos inexactos	2
8. Frecuentemente requiere explicar y justificar los resultados de los razonamientos por parte del usuario final	2
9. Estado intermedio de formalización de conocimientos que usa principalmente la heurística en lugar de registros, búsquedas y algoritmos	1
10. El problema del conocimiento está confinado a un estrecho campo o dominio	1
11. El conocimiento es estable (se basa en principios), es decir no sufre cambios frecuentes en el tiempo	1
12. El incremento progresivo es posible, el problema puede ser subdividido	1
13. No requiere razonamiento acerca del tiempo y espacio	1
14. No es intensivo en lenguaje natural, se identifican elementos simbólicos	1
15. Requiere poco o nada de sentido común o conocimiento general	1
16. No requiere el sistema para aprender de la experiencia	1
17. Es similar a un SE existente	1
18. Están disponibles Datos y casos de estudio.	1
19. La ejecución del sistema puede ser exacta y fácilmente medido	1
Puntos totales	30

**Tabla 3.2. Evaluación del tipo de problema**

ATRIBUTO	PONDERACIÓN
1. El sistema incrementará significativamente los ingresos	3
2. Reducción de costos	3
3. Mejora la calidad	3
4. Captura de experiencia no documentada	2
5. Distribución accesible de la experiencia a usuarios novatos	2
6. Proporciona aprendizaje a usuarios novatos	2
7. Supera las barreras de la comercialización	1
8. No necesita más datos para operar que los que se utilizan regularmente	1
9. Será desarrollado usando shell's comerciales	2
10. El mantenimiento del sistema será bajo	1
11. Se cuenta con los recursos computacionales	2
12. Puede ser desarrollado por fases, siendo útil cualquier terminación parcial	1
13. Producirá una relación Beneficio/Costo de al menos 10:1	2
Puntos totales	25

**Tabla 3.3. Evaluación de resultados finales**

ATRIBUTO	PONDERACIÓN
1. El diseñador tiene experiencia en el diseño y el desarrollo de SE	3
2. Conoce como usar la herramienta apropiada para el sistema y ha usado el shell elegido	2
3. Tiene experiencia en la adquisición y selección del conocimiento de fuentes escritas y de expertos	3
4. Tiene experiencia en inteligencia artificial para reconocer cuales técnicas serán útiles para el desarrollo del sistema	3
5. Comprende la psicología cognoscitiva*	1
6. Ha dirigido y desarrollado más aplicaciones de computación tradicional	2
7. Está informado o es un experto en el campo del problema	2
8. Tiene hardware y software disponible para ser empleado en el desarrollo del sistema	1
9. Puede asignar al menos 6 meses a tiempo completo para el desarrollo, evaluación e implementación del sistema	3
Puntos totales	20

**Tabla 3.4 Evaluación del diseñador del sistema**

ATRIBUTOS	PONDERACIÓN
1. Existen expertos reconocidos	3
2. El desempeño experto es probablemente mejor que el de un amateur	3
3. El problema es habitual para enseñar a principiantes	1
4. Los expertos son accesibles por tiempos prolongados	2
5. Los expertos son cooperativos	2
6. Los expertos son muy comunicativos	2
7. Disponibles para desarrollar casos de evaluación y ayuda a evaluar el sistema	2
Puntos totales	15

**Tabla 3.5 Evaluación del dominio del experto**

ATRIBUTOS	PONDERACIÓN
1. Los usuarios sienten una fuerte necesidad por el uso del sistema	2
2. El usuario no será desplazado o reemplazado como resultado de la implementación del sistema	2
3. Desea ser involucrado en el desarrollo del sistema	1
4. No tener elevadas o irreales expectativas	2
5. Los niveles de experiencia del usuario deben ser similares	3
Puntos totales	10

**Tabla 3.6 Evaluación del usuario final**

\* La *psicología cognoscitiva* es el estudio de los procesos mentales en su acepción más general; se centra en la manera en que el ser humano percibe, interpreta y recupera la información.

### 3.3 DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD DEL SISTEMA

Con base en lo antes expuesto, se presenta el análisis que justifica el desarrollo e implantación del SE para AF de elementos mecánicos metálicos. Asimismo, de los resultados obtenidos se demuestran las ventajas y viabilidad del sistema, quedando por definir el mecanismo de programación a emplear.

ATRIBUTO	PONDERACIÓN
1. El AF requiere de análisis y juicio sobre la información disponible	3/3
2. Aún cuando demanda de cálculos que permitan afinar las conclusiones, el problema es fundamentalmente simbólico y de razonamiento	3/3
3. El problema involucra muchos parámetros, no siendo perfectamente cuantificables todos	3/3
4. El problema requiere de razonamiento encadenado e involucra cadenas de razonamiento	2/2
5. El problema demanda juicios de razonamiento.	2/2
6. El problema no se puede plantear en términos de programación convencional	2/2
7. Normalmente para el AF no se tienen todos los datos	2/2
8. El AF demanda la justificación de los resultados obtenidos así como la propuesta de alternativas de solución	2/2
9. Esta en un estado intermedio de formalización de conocimiento que usa la heurística y la clasificación; en lugar de registros, búsquedas y algoritmos	0/1
10. El problema está encuadrado en un campo muy preciso del conocimiento.	1/1
11. La metodología del AF es prácticamente estable	1/1
12. El incremento progresivo es posible, el problema puede ser subdividido	0/1
13. No requiere razonamiento acerca del tiempo y espacio	0/1
14. El sistema emplea lenguaje simbólico	1/1
15. Requiere poco o nada de sentido común o conocimiento general	0/1
16. No requiere el sistema para aprender de la experiencia	0/1
17. Es similar a un SE existente	1/1
18. Existe una cantidad de casos documentados a disposición	1/1
19. La calidad de respuestas dadas por el sistema puede ser fácilmente comprobable	1/1
Puntos totales	25/30

**Tabla 3.7 Evaluación del tipo de problema**

ATRIBUTO	PONDERACIÓN
1. El sistema incrementará significativamente los ingresos	2/3
2. Reducción de costos	3/3
3. A través de AF se puede mejorar la calidad	3/3
4. Apoya en la captura de experiencia no documentada	2/2
5. Es de fácil distribución y empleo por su tipo de plataforma	2/2
6. Se puede emplear como elemento de apoyo al aprendizaje	2/2
7. No hay sistemas comerciales en la actualidad	1/1
8. El SE para AF no necesita más datos para operar que los que se utilizan regularmente	1/1
9. El SE para AF será desarrollado usando shell's comerciales	2/2
10. Prácticamente no requiere de mantenimiento el sistema	1/1
11. Se necesitará una computadora dedicada exclusivamente a la operación del sistema	1/1
12. Puede ser desarrollado por etapas, siendo útil cualquier módulo	1/1
13. A la fecha no se tiene un análisis de mercado que permita determinar cuál será la relación Beneficio/Costo	0/2
<b>Puntos totales</b>	<b>21/25</b>

**Tabla 3.8 Evaluación de resultados finales**

ATRIBUTO	PONDERACIÓN
1. El diseñador tiene experiencia en el diseño y el desarrollo de SE	1/3
2. Conoce como usar la herramienta apropiada para el sistema y ha empleado el shell elegido	1/2
3. Tiene experiencia en la adquisición y selección del conocimiento de fuentes escritas y expertos	3/3
4. Tiene experiencia en inteligencia artificial para reconocer cuales técnicas serán útiles para el desarrollo del sistema	1/3
5. Comprende la psicología cognoscitiva	1/1
6. Ha dirigido y desarrollado más aplicaciones de computación tradicional	2/2
7. Está informado ó es un experto en el campo del problema	1/2
8. Tiene hardware y software disponible para ser empleado en el desarrollo del sistema	1/1
9. Puede asignar al menos 6 meses de tiempo completo para el desarrollo, evaluación e implementación del sistema	3/3
<b>Puntos totales</b>	<b>14/20</b>

**Tabla 3.9 Evaluación del diseñador del sistema**

ATRIBUTOS	PONDERACIÓN
1. Existe la necesidad del sistema en México	2/2
2. El usuario no será desplazado o reemplazado como resultado de la implementación del sistema	2/2
3. Desea ser involucrado en el desarrollo del sistema	0/1
4. No se tienen altas ó irreales expectativas	2/2
5. Aunque se requiere de una preparación mínima de parte de los usuarios, el sistema será operado por personas con diferente capacidad	0/3
<b>Puntos totales</b>	<b>6/10</b>

**Tabla 3.10 Evaluación del usuario final**

ATRIBUTOS	PONDERACIÓN
1. Existen expertos reconocidos	3/3
2. El desempeño del experto en el campo es mejor que el del novato	3/3
3. El problema es habitual para enseñar a principiantes	1/1
4. Los expertos están accesibles por tiempos prolongados	2/2
5. Los expertos son cooperativos	2/2
6. Los expertos tienen habilidad para transmitir sus ideas	2/2
7. Los expertos estarán a disposición para la evaluación del sistema	2/2
Puntos totales	15/15

**Tabla 3.11 Evaluación del dominio del experto**

CATEGORÍA	PONDERACIÓN
1. Tipo de problema	25
2. Resultados finales	20
3. Diseñador del sistema	16
4. Dominio del experto	15
5. Usuario final	6
Puntos totales	82/100

**Tabla 3.12 Lista de control para evaluar aplicaciones de sistemas expertos**

### 3.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De lo antes expuesto se comprueba la viabilidad de desarrollo del SE para AF, los valores propuestos para la ponderación en las diversas opciones se han determinado a partir la experiencia que en AF tiene no sólo la autora del presente sino el grupo de trabajo de la Facultad de Ingeniería, mismo que desde hace más de tres lustros ha desarrollado este tipo de actividades. La metodología seguida se basa en la calificación del procedimiento a través de adjetivos que definan sus condiciones.

Los resultados enumerados mediante la tabla 3.7 se pueden interpretar en el sentido de que se trata de un campo cuya solución es conveniente a través de sistemas expertos.

Lo indicado en la tabla 3.8 (Evaluación de resultados finales), permite precisar cuales son los beneficios que la integración del sistema experto tenga para los potenciales usuarios, esto desde un punto de vista técnico y económico. En esta conclusión se toma en cuenta las ventajas que brindará el sistema tanto a la industria como al desarrollo del los grupos que empleen el sistema. Por su parte, los resultados obtenidos con relación a la evaluación del diseñador del sistema (tabla 3.9) permiten concluir que en el grupo de trabajo abocado a la solución de este problema se cuenta con el personal capacitado para fungir como ingenieros de conocimiento en el proyecto. Asimismo es conveniente hacer notar que los resultados se pueden interpretar en el sentido de que es necesario capacitar a aquellos que van a realizar la labor antes mencionada (14 puntos de 20 posibles). Una cuestión fundamental en el desarrollo de un SE es contar con los expertos no solo capacitados sino también motivados para que se integren al proyecto estando dispuestos a dedicar un elevada cantidad de horas durante el tiempo de desarrollo de proyecto, circunstancia

que en este caso se considera del orden de tres años, este tipo de análisis se presenta a través de los resultados de la tabla 3.10 (evaluación del dominio del experto). De los datos presentados se constata (100% de los puntos posibles) lo antes expuesto, ya que los expertos existen en la propia área de trabajo (Departamento de Ingeniería Mecánica de la UNAM).

De los datos obtenidos, cuyos resultados se presentan en la tabla 3.11, se concluye que al poder manejar ambientes gráficos para la solución de un problema el usuario a la vez de motivarse por la facilidad y precisión con la que obtienen resultados a través del SE, no se siente desplazado ya que estará trabajando con un colega electrónico que le transmite sus opiniones y le apoya en su desarrollo.

Aunque ya fue mencionado, vale la pena recalcar que los resultados que se presentan en la tabla 3.12 (82 puntos de 100 posibles) son muy favorables para el desarrollo de un sistema experto en el análisis de falla. También, por otra parte, vale la pena mencionar que dicho análisis no permite definir el grado de complejidad que el problema involucra, ni tampoco hace mención a los lenguajes de programación simbólica que será necesario emplear.

## CAPÍTULO 4

### METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA

#### 4.1 GENERALIDADES

En las fases del proceso de desarrollo de un SE, en general, la que demanda una mayor cantidad de tiempo es la de adquisición del conocimiento y se considera el cuello de botella debido a que se invierte entre un 60 y 70% del tiempo de desarrollo (figura 4.1). Además de ser la primera fase del proceso, es una actividad neurálgica [16]. Por otro lado, en el AF el conocimiento que se involucra para el análisis y la toma de decisiones es muy complejo, razón por la que se debe definir un método que permita la extracción, selección, estructuración, organización y validación del conocimiento, de manera confiable; dado que la forma en que se realice repercutirá en las fases subsecuentes del desarrollo del sistema.

Para realizar el proceso señalado se requiere de expertos que además de tener un alto nivel de conocimientos tengan la voluntad para involucrarse en las dinámicas que el ingeniero del conocimiento (IC) defina para recuperar la experiencia. Otra de las fuentes de conocimiento a las que se recurre es a casos resueltos documentados en la literatura.

Los métodos aplicados de adquisición son de dos tipos:

*Manuales* donde se extrae el conocimiento de las fuentes y de expertos y estos son; la observación, entrevista, formas de análisis y casos resueltos.

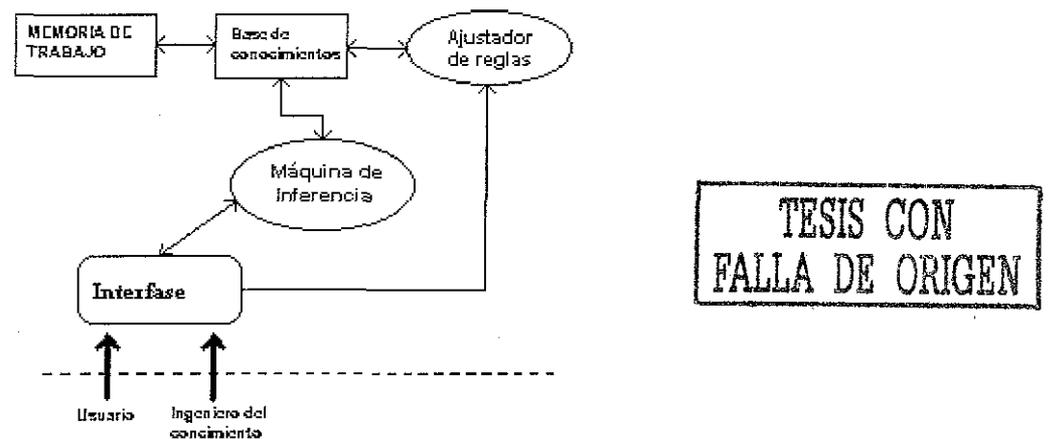
*Automáticos* son sistemas en donde a través de la computadora se induce al experto a incorporar su conocimiento a través de una interfase diseñada para tal fin.

Cuando la fase de adquisición del conocimiento ha sido concluida es conveniente que, para la estructuración de las diferentes reglas y/o casos que se manejarán, se definan las interfases de usuario a través de las cuales el sistema solicita información sobre el problema a resolver. Cuando ya se tiene definida la interfase que maneja la información en términos de variables críticas y palabras clave, se procede a generar las reglas y/o casos para el razonamiento del sistema.

Cuando el conocimiento se ha adquirido el siguiente paso es transportarlo a la computadora, siendo conveniente utilizar estructuras que faciliten la discretización del mismo, para esto se aplican los mapas de conocimiento que son representaciones gráficas que manejan relaciones causa-efecto; entre estos se encuentran las listas, tablas de decisión, diagramas de Ishikawa, árboles de decisión y diagramas de precedencia.

La representación del conocimiento en la computadora es de tipo simbólico, razón por la cual se utilizan estructuras lógicas para el manejo de la información, tales como reglas de decisión, marcos, redes semánticas, entre las más conocidas. Las estructuras que mejor representan el conocimiento en general son las llamadas estructuras de control de decisiones, principalmente la IF-THEN-ELSE (Sí-entonces-de lo contrario), ésta se adapta a la representación de reglas de decisión, y posee una sintaxis que ayuda a interpretar, desde el código, la estructura de

conocimiento a la que hace referencia. En la siguiente figura 4.1 se muestran las interacciones entre los diferentes elementos que componen el sistema experto.



**Figura 4.1 Interacción entre los elementos de un SE**

En el caso concreto del AF, es totalmente factible desarrollar una estructura de reglas de este tipo. La práctica general del AF parte de conocer ciertas premisas, éstas a su vez son suficientes para encontrar algunas conclusiones intermedias que vayan delimitando la solución del problema [2,3,7,8,16,17]. Dado que la solución de un caso de AF es factible que posea varias respuestas tentativas, un SE se convierte en una herramienta idónea que puede dar solución a la disyuntiva que éstas representan. Determinar las causas de falla en elementos simples sometidos a cargas uniaxiales, es relativamente sencilla, ya que las características de las zonas de falla son fácilmente identificables. En las situaciones donde los elementos mecánicos se someten a sollicitaciones triaxiales, además de condiciones dinámicas de carga, variaciones de temperatura, desgaste y corrosión, la determinación de la causa de falla se vuelve compleja requiriendo de un grupo multidisciplinario coordinado por un experto en AF. En campos donde el conocimiento y las inferencias son muy complejos, en la actualidad se utiliza la técnica de RBC. Este método inicialmente se puede emplear como un sistema que realiza búsquedas inteligentes de información dentro de una base de casos resueltos sobre determinado tipo de problemas. En la exploración dentro de la base se buscan casos parecidos al problema que se pretende resolver utilizando para esto criterios de similitud. Para el desarrollo de un SE utilizando RBC en general se realiza un sistema híbrido que maneja casos y reglas de decisión.

## **4.2 METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA EXPERTO EN ANÁLISIS DE FALLA.**

Las etapas para el desarrollo de un sistema experto se muestran en la figura 4.1, estas representan la metodología general para la elaboración del sistema. Sin embargo, para el caso específico del análisis de falla y considerando las condiciones del grupo de trabajo de la UDIATEM se planteó la siguiente metodología:

## 1ª etapa

- ❖ Desarrollo del ingeniero de conocimiento
- ❖ Integración del grupo de expertos en AF
- ❖ Establecimiento de las características de operación del sistema experto
- ❖ Desarrollo del SE
  - Determinación de los mecanismos de adquisición del conocimiento
  - Estructuración del conocimiento del experto.
  - Determinación de las estructuras de representación del conocimiento
    - Reglas de decisión
  - Selección del lenguaje o la herramienta de desarrollo
  - Construcción de la base de conocimientos
  - Determinación de la secuencia de operación del sistema
  - Construcción del prototipo
    - Verificación y validación del prototipo
    - Recomendaciones

## 2ª Etapa

- ❖ Estrategia para la expansión del sistema global
  - Definición de los subsistemas (elementos mecánicos)
  - Metodología para el desarrollo de un módulo de análisis de esfuerzos
  - Metodología para el desarrollo de un módulo auxiliar de análisis de imagen
  - Metodología para el desarrollo de un módulo para el análisis de deterioro ambiental
  - Metodología para el desarrollo de un módulo para la determinación de propagación de grietas.
  - Determinación de la interacción de los módulos
- ❖ Desarrollo de los subsistemas (elementos mecánicos)
- ❖ Desarrollo de un módulo de análisis de esfuerzos
- ❖ Desarrollo de un módulo auxiliar de análisis de imagen
- ❖ Desarrollo de un módulo para el análisis de deterioro ambiental
- ❖ Desarrollo de un módulo para la determinación de propagación de grietas.
- ❖ Integración del sistema
- ❖ Verificación y validación del sistema.
- ❖ Documentación del sistema y procedimiento para la actualización del mismo.

### 4.3 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

#### *Desarrollo del ingeniero del conocimiento.*

Para lograr integrar un soporte de ingeniería del conocimiento se capacitó a estudiantes de ingeniería mecánica y computación en lo relativo a sistemas expertos y análisis de falla. Esta preparación incluyó el involucrarlos en la determinación de las características de operación del sistema, estudiar los procedimientos para la adquisición del conocimiento, conocer las estructuras para la representación del conocimiento, analizar las ventajas y desventajas de las herramientas para desarrollo de SE's, asimismo, para tener un lenguaje común para comunicarse con los expertos se les capacitó en el procedimiento general del análisis de falla, la determinación de los

mecanismos, la descripción de las diferentes causas de falla, etc. De este proceso se obtuvo a dos ingenieros del conocimiento, que posteriormente se capacitaron en el uso del shell Visual Rule Studio [9] y en el lenguaje visual basic.

### ***Integración del grupo de expertos en AF.***

En el grupo de trabajo se cuenta con 3 expertos en análisis de falla. Por otro lado existe la asesoría externa de dos expertos del Departamento de Metalurgia y Ciencia de los Materiales de la Universidad de Gante. Para integrar al grupo de expertos se definió la forma de interacción con el ingeniero del conocimiento, así como los tiempos dedicados para las entrevistas.

### ***Establecimiento de las características de operación del sistema experto***

Para establecer las características se tuvieron reuniones donde participó el grupo de expertos, los ingenieros del conocimiento y usuarios potenciales del software a desarrollar. Las consideraciones que se definieron fueron las siguientes:

1. *Ambiente de interacción con el usuario.* Para llevar a cabo un estudio de AF de un elemento mecánico, el experto realiza en primera instancia una serie de preguntas relacionadas al tipo, características del elemento (material, forma de fabricación, diseño, etc), uso de la pieza, después efectúa una inspección visual de la pieza, define el tipo de análisis de laboratorio que requiere y una vez obtenida la información de las pruebas emite conclusiones. Por lo que, además de datos numéricos también utiliza información gráfica y fotográfica. Considerando lo anterior se estableció que los módulos de interacción deben incluir imágenes típicas de aspectos de la región de fractura a nivel macro y microscópico, efectos de corrosión, localización de concentradores de esfuerzos, etc. Este tipo de ambiente le facilita al usuario la captura de datos para la descripción de la falla, ya que en el momento de operar el sistema aparecen como opciones una serie de imágenes y selecciona la que represente el aspecto que está observando de la pieza en estudio.
2. *Etapas de solución de un problema.* Se determinó que el sistema debe tener la capacidad de llegar a conclusiones intermedias. Por lo que debe tener un primer nivel de razonamiento a partir de la inspección visual y de la información de la pieza fallada (tipo de pieza, material, conformado de la pieza, historia de la falla, etc), en donde se llegue a una primer conclusión y se definan las pruebas de laboratorio. Un segundo nivel de razonamiento en donde se relacionen las reglas deductivas de la inspección visual con la información de las pruebas, con el fin de validar la conclusión o en su defecto proponer nuevas pruebas para pasar a un último nivel de razonamiento. Si de este último no se llega a una conclusión se deberá replantear el problema. Si después de replantearlo no se llega a una conclusión satisfactoria el problema rebasa el ámbito del sistema y tendrá que ser resuelto por un experto.
3. *Factores de confianza.* Debido a la ambigüedad de la información y a la complejidad del conocimiento, siempre existe incertidumbre en los juicios de los expertos, por lo que las reglas que se definan deben tener un factor de confianza, logrando con esto que en las conclusiones que se van obteniendo se refleje el nivel de incertidumbre.
4. *Modularidad.* Se estableció que el sistema debe ser construido por módulos ya que de esta manera se puede garantizar su futura expansión, por lo que la herramienta computacional para su construcción debe ser orientada a objetos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- 5 *Plataforma computacional.* Tomando en cuenta que el sistema pueda ser operado en cualquier lugar, éste debe ser desarrollado en un ambiente PC-windows.
- 6 *Base de casos.* De manera adicional se debe involucrar un módulo de casos, la idea es tener un elemento para la comparación de problemas similares, incrementando de esta forma el nivel de confianza.
- 7 *Limitaciones.* Se definió que el sistema podrá ser operado por personas con estudios mínimos de ingeniería. Podrá resolver aquellos casos que para los expertos son rutinarios. Por otro lado es conveniente señalar que existen casos con un elevado grado de complejidad, cuya frecuencia de ocurrencia es baja, este tipo de situaciones no podrán ser resueltas por el sistema.

### ***Determinación de los mecanismos de adquisición del conocimiento***

En un principio la metodología que se siguió fue la que se desarrolla en gran cantidad de textos relacionados con el tema, este consistía principalmente en realizar una especie de cuestionario al experto respecto a la forma en como resuelve el problema del AF. Sin embargo para el caso específico y las condiciones que se tenían dicho método no produjo los resultados deseados. Por el contrario se tenía una gran cantidad de información, la cual difícilmente podría constituirse en reglas útiles que mostraran la mecánica del razonamiento seguida por el experto en la práctica del AF.

El método que se aplicó consistió básicamente en realizar una serie de sesiones en donde se confrontó a expertos en AF con casos no resueltos, sin la observación de la pieza fallada, tal y como se realizará la interacción con la computadora en la operación del SE. El objeto de esto fue definir el método de análisis de los expertos y la forma en que realizan su razonamiento. Para esto los expertos realizaban preguntas para identificar las características del caso, hasta lograr su conceptualización, identificar las causas y proponer acciones para remediar la falla. Con lo anterior, se logró establecer el grupo de preguntas que contendrá la interfase de usuario y se llegó a definir la forma en que los expertos generan las reglas de razonamiento.

Para lo anterior fue conveniente que los expertos tuvieran la capacidad de reconocer la lógica que siguen para la realización de casos de AF.

Dado que el conocimiento obtenido del experto se traduce en una serie de reglas, es de vital importancia que el conocimiento adquirido del experto sea conciso y de la mejor calidad y cantidad disponibles.

### ***Selección del Shell para el desarrollo del sistema***

Para seleccionar una herramienta (shell) para desarrollar el sistema es necesario considerar los siguientes factores:

*Costo.* De acuerdo con las posibilidades de la organización

*Mecanismos de adquisición del conocimiento.* Se refiere a las posibilidades en cuanto a las estructuras de representación; reglas, marcos, etc, así como al tipo de encadenamiento que manejan ya sea hacia delante o hacia atrás.

*Interfases externas.* Se refiere a la posibilidad de interacción con sistemas de bases de datos,

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

hojas de cálculo, lenguajes de programación, etc.

*Generación de reportes.* Se consideran los tipos de reportes que puede generar la herramienta, éstos incluyen listado de reglas, programas ejecutables, árboles de reglas, etc.

*Calidad de la documentación.* Se toma en cuenta la claridad, consistencia, extensión y profundidad de la documentación de la herramienta.

*Facilidad de aprendizaje.* Se refiere a las ayudas que brinda el sistema para facilitar su aprendizaje como ayudas o tutoriales, demos, etc

*Facilidad de uso.* Se evalúan los tipos de formatos para captura de información, construcción de la base de reglas, así como a las facilidades en cuanto a la importación de archivos de bases de datos.

*Características generales.* Se consideran los requerimientos en cuanto al sistema operativo, procedimientos para el respaldo de información, velocidad de ejecución, etc

*Requerimientos de Hardware.* Evaluación de requerimientos de equipo como tipo de procesador, memoria, dispositivos para almacenamiento, etc

*Soporte técnico.* Se evalúa principalmente si se dispondrá de asesoría técnica así como la reputación del vendedor

### **Procedimiento para la selección del shell**

Para seleccionar el shell más adecuado se aplicó una matriz de selección en donde se consideraron los factores mencionados, y se evaluaron algunos paquetes comerciales. A continuación se indica paso a paso el procedimiento para la selección de esta herramienta computacional

1. Asignación de porcentajes  $w_i$  (pesos) a los diferentes factores considerando que se cumpla que la suma de éstos sea igual a 100%. Para lograr lo anterior se construyó una matriz en donde se compara cada una de las propiedades contra todas las demás, si la propiedad evaluada es más importante que la otra se le asigna un valor de "1" a la celda correspondiente, en caso contrario el valor será "0". En las tabla 4.1 y 4.2 se muestra la matriz de comparación así como los porcentajes obtenidos.

<b>Factores</b>	<b>Letra</b>
Costo	A
Mecanismos de representación del conocimiento	B
Interfases externas	C
Generación de reportes	D
Calidad de la documentación	E
Facilidad de Aprendizaje	F
Facilidad de uso	G
Características generales	H
Requerimientos de Hardware	I
Soporte técnico	J

**Tabla 4.1 Asignación de letras a los factores**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J		%
A		0	0	0	1	0	0	1	0	1	3	6.67
B	1		1	1	1	1	1	1	1	1	9	20.01
C	1	0		0	0	1	1	1	1	1	6	13.34
D	1	0	1		1	1	1	1	1	1	8	17.77
E	0	0	1	0		0	0	1	1	1	4	8.88
F	1	0	0	0	1		0	1	1	1	5	11.11
G	1	0	0	0	1	1		1	1	1	6	13.34
H	0	0	0	0	0	0	0		1	1	2	4.44
I	1	0	0	0	0	0	0	0		1	2	4.44
J	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
											45	100

**Tabla 4.2 Matriz de comparación y porcentajes obtenidos**

2. Identificación de las herramientas a evaluar. En primera instancia se consideraron shells con los que se han desarrollado aplicaciones en la ingeniería. Estos fueron los siguientes

EXSYS Profesional.                      NEXPERT OBJECT                      KEE  
 CLIPS    VISUAL RULE STUDIO

3. Se describieron las características de cada shell de acuerdo con cada uno de los factores a evaluar, esto se indica en la tabla 4.3

	EXSYS	NEXPERT	KEE	CLIPS	Visual Rule
<b>A</b>	\$10,000	\$50,000	\$90,000	Gratuito	\$7,500.00
<b>B</b>	Reglas, clases, objetos marcos Encadenamiento hacia adelante y hacia atrás	Reglas, clases, objetos marcos Encadenamiento hacia adelante y hacia atrás	Reglas, clases, objetos marcos Encadenamiento hacia adelante y hacia atrás	Reglas, clases, objetos marcos. Encadenamiento hacia atrás	Reglas, clases, objetos marcos, encadenamiento hacia adelante y hacia atrás de manera simultanea
<b>C</b>	Dbase, Gráficos,	C, Dbase, Fortran, pascal	UNIX-Ms-dos	C, Fortran	Visual basic, access, excel, sistemas cad
<b>D</b>	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena
<b>E</b>	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena
<b>F</b>	Sencillo	Sencillo	Complejo	Complejo	Sencillo
<b>G</b>	Regular	Buena	Buena	Regular	Excelente
<b>H</b>	Diversas sistemas operativos, ms-dos, windows, unix, mac	Ms-Dos	Ms-DoS y unix	Dos y Unix	Windows, ambiente de visual basic
<b>I</b>	Pentium I- o estación de trabajo	Pc 386-	Pentium I-	486-	Pentium I-
<b>J</b>	Si	Si	Si	Si	Si

**Tabla 4.3 Características de los shell's**

4. Para realizar la evaluación de los factores se definió la siguiente escala

Malo	1
Regular	2
Bueno	3
Muy bueno	4
Excelente	5

5. Se asignaron calificaciones para cada factor en los diferentes shells. Los resultados se indican en la tabla 4.4

	EXSYS	NEXPERT	KEE	CLIPS	Visual Rule	W
A	4	2	1	5	4	6.67
B	4	4	4	3	5	20.01
C	3	4	1	3	5	13.34
D	3	3	3	3	3	17.77
E	3	3	3	3	3	8.88
F	4	4	2	2	4	11.11
G	2	3	3	2	5	13.34
H	4	2	3	3	5	4.44
I	4	4	4	4	4	4.44
J	3	3	3	3	3	0

**Tabla 4.4 Calificaciones de los factores en cada shell**

6. Se multiplicó cada calificación por el correspondiente peso de cada factor y se obtuvieron los totales. Los factores D,E, I y J se eliminan pues significan ponderaciones iguales. En la tabla 4.5 se indica el resultado final de la evaluación

	EXSYS	NEXPERT	KEE	CLIPS	Visual Rule
<b>A</b>	26.68	13.34	6.67	33.5	26.68
<b>B</b>	80.04	80.04	80.04	60.03	100.05
<b>C</b>	40.02	53.36	13.34	40.02	66.67
<b>F</b>	44.44	44.44	22.22	22.22	44.44
<b>G</b>	26.68	40.02	40.02	26.68	53.36
<b>H</b>	17.76	8.88	13.32	13.32	22.22
<b>Total</b>	235.62	240.08	175.61	195.77	313.14

**Tabla 4.5 Evaluación final**

Como resultado de este ejercicio resulto seleccionado el shell Visual Rule Studio

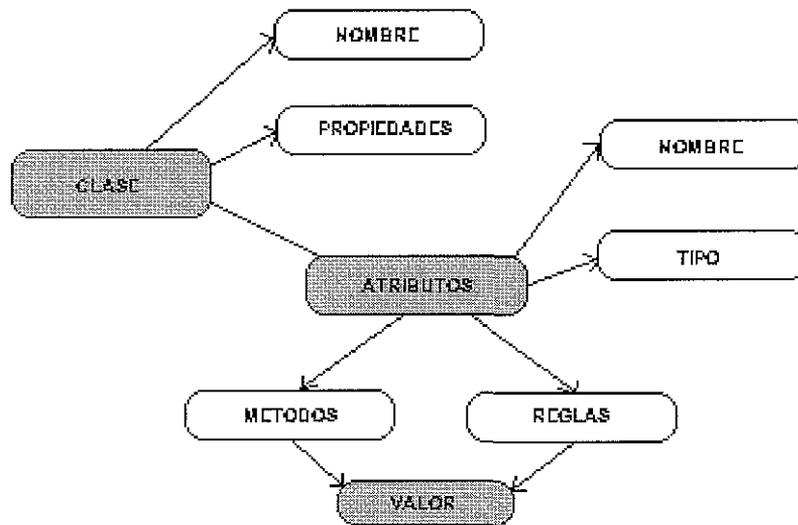


### *Visual Rule Studio*

Este shell es la nueva versión de Level 5 object que fue de los primeros sistemas que manejaron ambientes visuales bajo la plataforma de windows. El shell funciona dentro del lenguaje de programación Visual Basic, mismo que se orienta al desarrollo de ambientes gráficos y es amigable con el usuario, cumple además con las expectativas de capacidad de programación orientada a objetos. Visual Rule Studio tiene características que lo hacen muy competitivo con respecto a otros paquetes similares, especialmente en lo relacionado a la capacidad de implementar métodos de inferencia con encadenamiento hacia atrás (backward chaining) y con encadenamiento hacia delante (forward chaining) además de permitir que ambos tipos de encadenamientos funcionen al mismo tiempo, lo cual le da una gran ventaja sobre otro tipo de shells. Esta herramienta de desarrollo se caracteriza por tener estructurados varios métodos y procedimientos que permiten un control total sobre la forma en como el sistema va a procesar la base de reglas, de manera que el programador solamente se ocupe de construir ésta.

### *Determinación de las estructuras de representación del conocimiento*

Trasladar conocimiento del experto a una computadora es otro obstáculo que se presentó en la creación del SE. Concretamente, la propuesta es integrar de manera eficiente la mayor cantidad posible de reglas obtenidas de los expertos, así como también toda la información contenida en los casos ya resueltos y documentados, de manera que se tenga un sistema híbrido que maneje tanto reglas como conocimientos previos. Las reglas que se aplican deben estar organizadas por lo que en el desarrollo de este sistema se utilizan las estructuras de información orientadas a objetos, que se muestran en la figura 4.2



**Figura 4.2 Estructuras orientadas a objetos**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cabe señalar que una de las características más deseable de un SE es que posea la capacidad de aprender de la experiencia, el sistema que se propone en este trabajo cumple en cierta medida con esta característica al permitirle al usuario guardar el caso resuelto en la base de casos que se integra dentro del sistema

Si bien primeramente la estructuración de las reglas que representan el conocimiento del AF, está enfocada a determinar las características intrínsecas de la falla, principalmente el tipo de falla que se presenta, la función principal, y la más deseada del SE para AF, es determinar las condiciones que provocaron la falla. Así, fue necesario encontrar y desarrollar reglas que involucran los diferentes tipos de fallas y demás información contenida en ellas, con condiciones que las posibilitan. Esto es una tarea compleja, dado que existen dentro del AF condiciones diversas que conducen a la determinación de no sólo un tipo de falla, sino a varios tipos y además a diversas condiciones de operación que promueven que se presente un tipo de falla en particular. Sin embargo, aunque la representación del conocimiento involucrado en el AF hace de éste una tarea no tan sencilla, no resulta una tarea imposible.

Una descripción más detallada de la estructuración del conocimiento para el SE en AF, se da en el subcapítulo 4.4

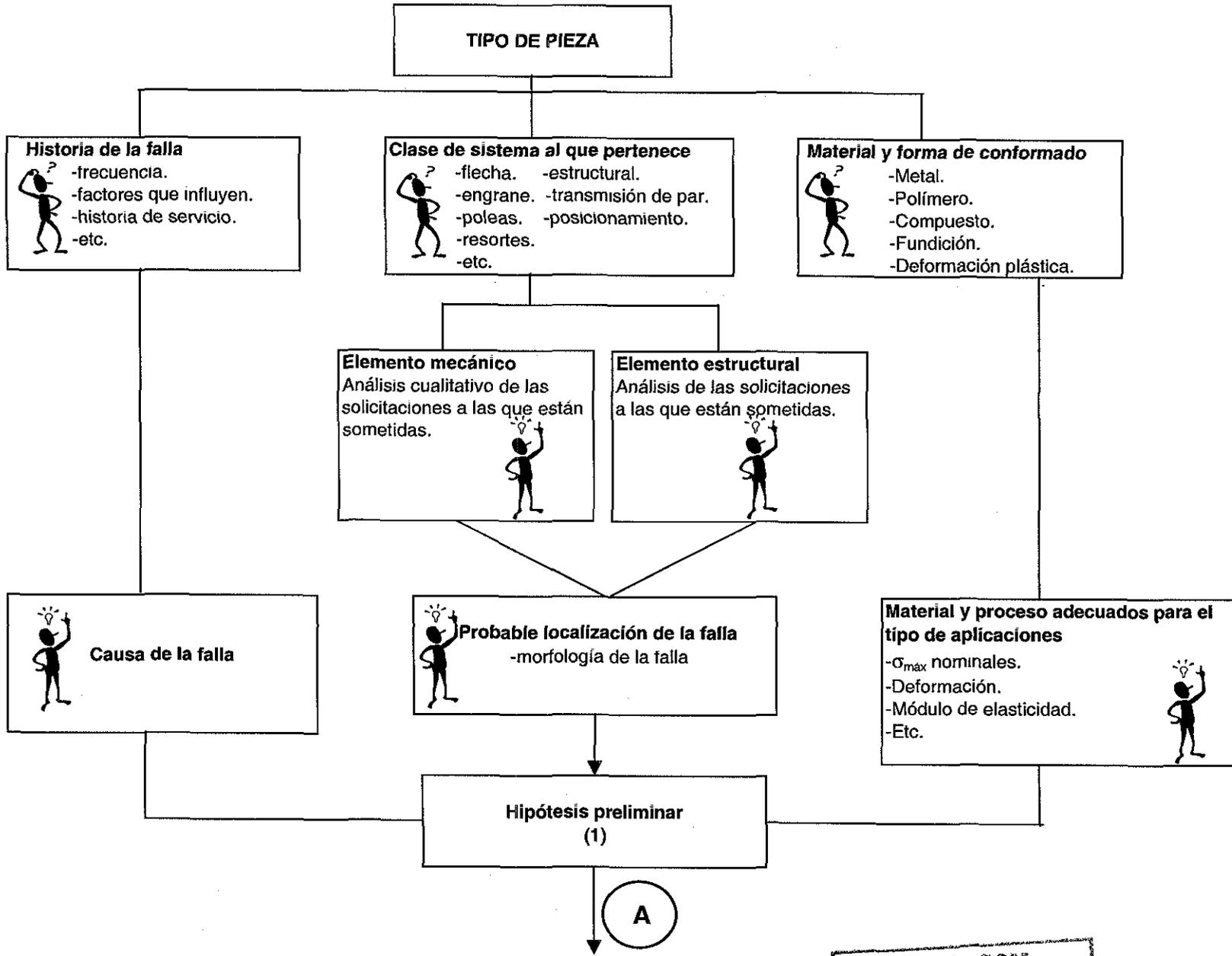
#### ***Estructuración de la base de conocimientos***

Dentro de los SE desarrollados se tiene una división que ha servido para distinguir entre los métodos de inferencia que los sistemas expertos utilizan para analizar y diagnosticar un posible resultado o consecuencia de ciertas premisas con las cuales el SE es alimentado. Así tenemos los llamados SE Basados en Reglas y por el otro lado los SE Basados en Casos; inclusive existe una tercera variante que los desarrolladores de tales sistemas han definido como un SE híbrido.

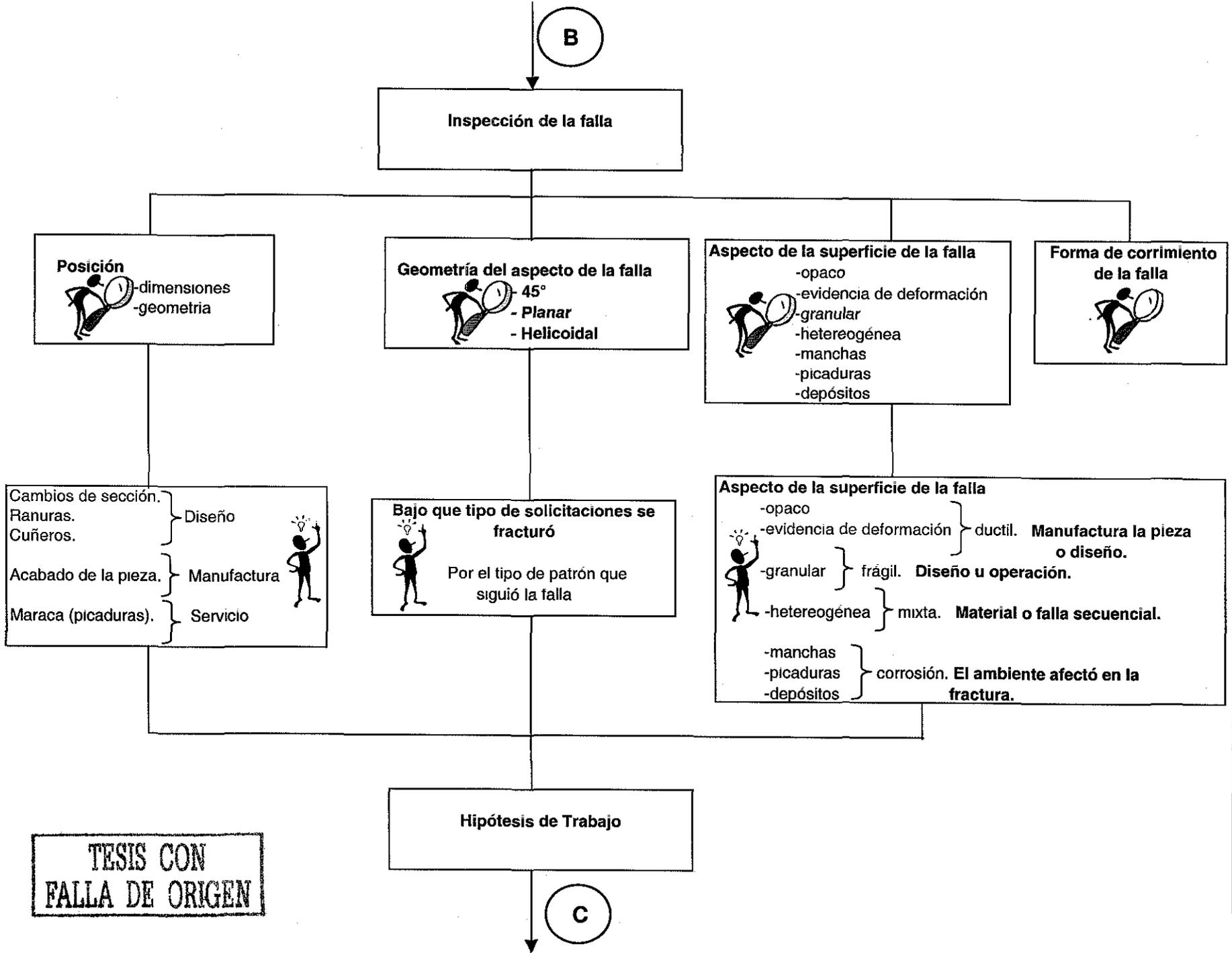
En este caso, el sistema que se plantea utiliza una base de reglas con las cuales se realizan las inferencias y se resuelve el problema. Además se incorpora una base de casos, con el fin de que una vez que se resolvió el problema, se realice una búsqueda dentro de la base de casos, a través de criterios de similitud, con el fin de tener un elemento adicional para la toma de decisiones. El nuevo caso resuelto y validado se incorpora como un nuevo registro dentro de la base de casos

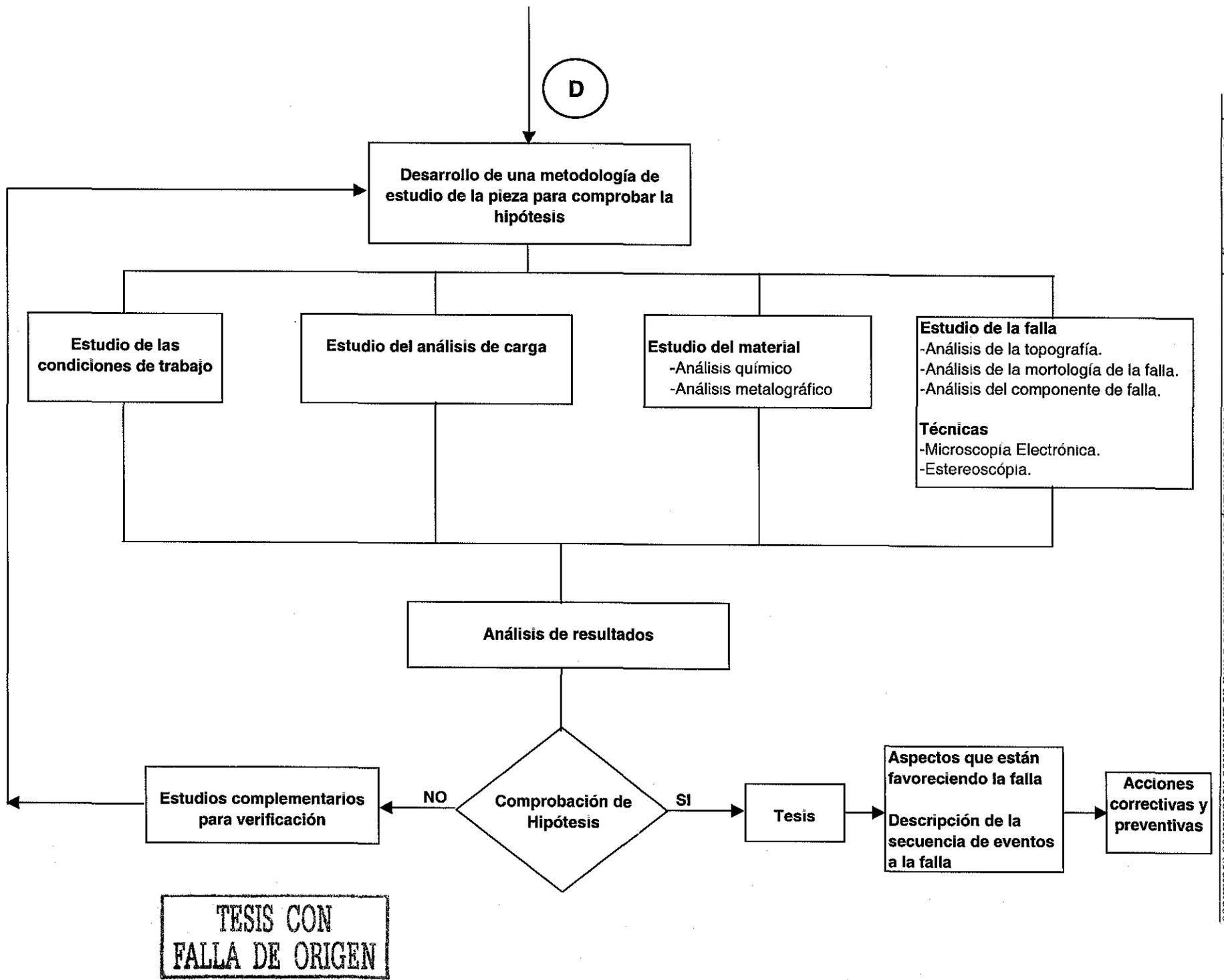
Para plantear la estructura se tomo como base la secuencia que sigue el experto en análisis de falla para la solución de un problema, este procedimiento se explica de manera clara en el esquema que se muestra en la figura 4.3

Figura 4.3 Procedimiento para la solución de un problema de análisis de falla por parte de un experto.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN





### ***Determinación de la secuencia de operación del sistema***

Dada la importancia de escoger un modo para operar un SE, se tomó la decisión de buscar cierta jerarquía en el modo de preguntar, es decir, buscar algún método u orden para abordar el problema. A modo de un primer intento de jerarquización, se plantean tres preguntas relevantes, que conjuntamente aportan una gran cantidad de información, éstas son referentes a:

- Material
- Tipo de pieza
- Sistema al que pertenece

Si se tienen estas características, ya se cuenta con un marco característico de tres condiciones simultáneas. De esta manera se tiene la primera impresión junto con la información que corresponde a este conjunto de preguntas. Debido a que con la información anterior no es suficiente para dar juicio al análisis del caso, es necesario pedir al usuario detalles más precisos relacionados a la falla, lo cual se realiza a partir de éstas tres primeras premisas, orientando la ejecución del programa en la dirección correcta dependiendo de la información proporcionada previamente.

Cabe mencionar que en éste sistema se tiene uno de estos tres tópicos ya seleccionado y este es el del *material*, ya que sólo se analizan *materiales metálicos*, y en esta clasificación existe el primer rango, la selección entre *metales ferrosos y los no ferrosos*. Posteriormente de los *materiales ferrosos*, una ramificación más donde se bifurcan las opciones de tipos de materiales ferrosos, en este caso pueden ser considerados las fundiciones, aceros inoxidables, aleados, de herramientas, microaleados, etc. De la misma manera sucede con el caso de los materiales no ferrosos, en donde se pueden considerar, los bronce, aluminio, latón, etc.

En cuanto a los tipos de pieza, se muestra una lista de elementos tales como: flechas, engranes, resortes, etc., donde el usuario escoge la pieza a estudiar. Una vez capturado el tipo de pieza, se define el sistema al que pertenece, y en este rubro se localizan: sistemas de transmisión de potencia, de transmisión de movimiento, de soporte, etc. Estas clasificaciones dan una idea de las posibles causas de la falla. Por ejemplo: En el caso de una pieza que es un eje, que pertenece a un sistema de transmisión de potencia; metálica, ferrosa y de acero; ya representa características que son comunes a cierto tipo de casos de falla. Sin embargo, las preguntas que se hacen contemplan todos los casos, sin tomar en cuenta un tipo de material específico, porque eso implicaría hacer preguntas para cada caso, lo cual no sería muy funcional. Continuando con la operación del sistema lo que sigue es una serie de preguntas, en un segundo plano, pero ligadas a las respuestas obtenidas en la primer categoría de preguntas. Estas cuestiones estarán relacionadas con características físicas, tipos de carga, geometría (ya sea su sección transversal, continuidad en el diámetro, características de diseño, etc). De este modo, se dan detalles cada vez más precisos del caso, lo cual permitirá lograr mejores aproximaciones en la obtención del resultado final. Cuando se llega a la solución del caso se busca uno similar en la base de casos y se compara con el objetivo de validar o desechar la conclusión a la que llegó el sistema. En la figura 4.4 se muestra la secuencia que sigue el sistema comenzando con la interacción con el usuario, siguiendo con la solución del problema y la validación del caso para incorporarlo de manera opcional a la base de casos.

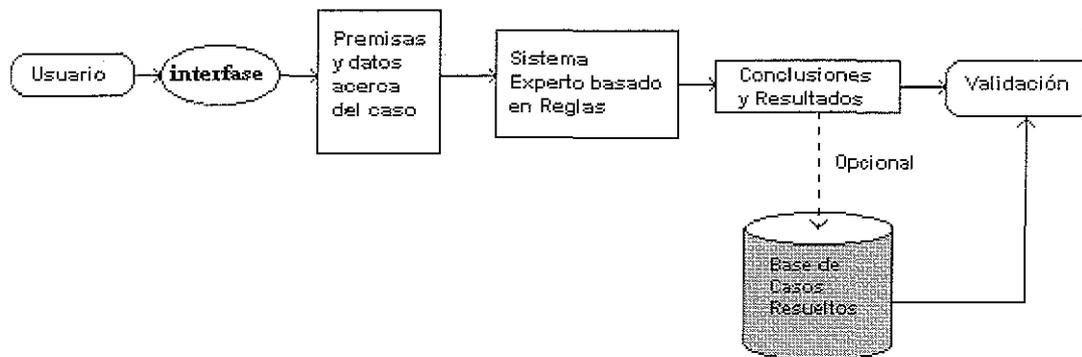


Figura 4.4 Secuencia general de ejecución del sistema

En la tabla 4 6 se muestra la descripción de los pasos genéricos en la solución de un caso:

<i>Paso</i>	Procedimiento
1	Adquisición de la información del caso.
2	Vinculación simultánea con el Shell.
3	Revaloración continua de la información.
4	Activación y validación de Reglas.
5	Inferencia sobre premisas desconocidas.
6	Procesamiento de información relacionada.
7	Detección de contradicciones entre reglas.
8	Validación por medio de factor de confianza.
9	Confrontación de resultados con entradas.
10	Presentación de conclusiones.

Tabla 4.6 Secuencia para la solución de un caso

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

### Construcción del prototipo [17,18]

Para observar la interacción de los elementos del sistema se desarrolló un primer prototipo con una base de conocimientos limitada, esto con el fin de probar las características de operación definidas y llevar a cabo los ajustes correspondientes. Para construirlo se realizó lo siguiente:

*Primera aproximación* Se desarrolló a partir de consideraciones de la práctica del AF rutinario, un sistema que determinaba, a partir de información relativa a la apariencia de la región de falla, el tipo de fractura asociada a dicha información. De esta manera fue posible desarrollar un módulo experimental que a través de una interfase con elementos gráficos pudiese determinar de manera sencilla el tipo de falla que se presentaba, con base en los datos proporcionados por una inspección visual por parte del usuario. La construcción de la base de reglas para este caso fue sencilla, dado que la información con la que se llega a las conclusiones a través de la inspección visual no es abundante. Sin embargo, a través de esta primera aproximación fue posible percatarse de la necesidad de encontrar una estructura lógica para el desarrollo de los cuestionamientos por parte del sistema hacia el usuario de manera que existiese una secuencia lógica que guiase al usuario de manera amigable y no contradictoria evitando principalmente caer en cuestionamientos redundantes o repetitivos.

*Segunda aproximación* Se planteó la posibilidad de integrar dentro del sistema una base de casos conteniendo las experiencias en la solución de problemas de fallas. La base se accesa para realizar consultas directas o bien para comparar las soluciones obtenidas por el sistema basado en reglas. En la medida que esta base de casos crece el sistema puede tener una mayor posibilidad de éxito al realizar las comparaciones. Para facilitar la búsqueda se establece un conjunto de palabras clave que identifican aspectos relevantes del caso en particular, siendo de esta manera la inferencia y comparación más acertada. De ésta manera, con la comparación de los resultados obtenidos en el análisis del caso que el sistema está resolviendo mediante reglas, y los resultados que se tienen en el caso almacenado en la base, se cuenta con una herramienta adicional para la toma de decisiones, además de acrecentar la base de casos incorporando el nuevo caso resuelto a ésta.

*La construcción del prototipo permitió definir la estrategia que se menciona más adelante. Asimismo se tomó como base para la construcción de un módulo de ejes hasta la fase de inspección visual (ver capítulo 5)*

### **Interfase de usuario.**

Para el sistema en AF se estructuraron pantallas de tal forma que el usuario tenga la posibilidad de describir la mayor cantidad posible de variables. A manera de ejemplo, en la figura 4.5 se presenta la primer pantalla de captura de información relacionada con la inspección visual. Por otro lado en la figura 4.6 se muestra la estructura propuesta para la base de casos

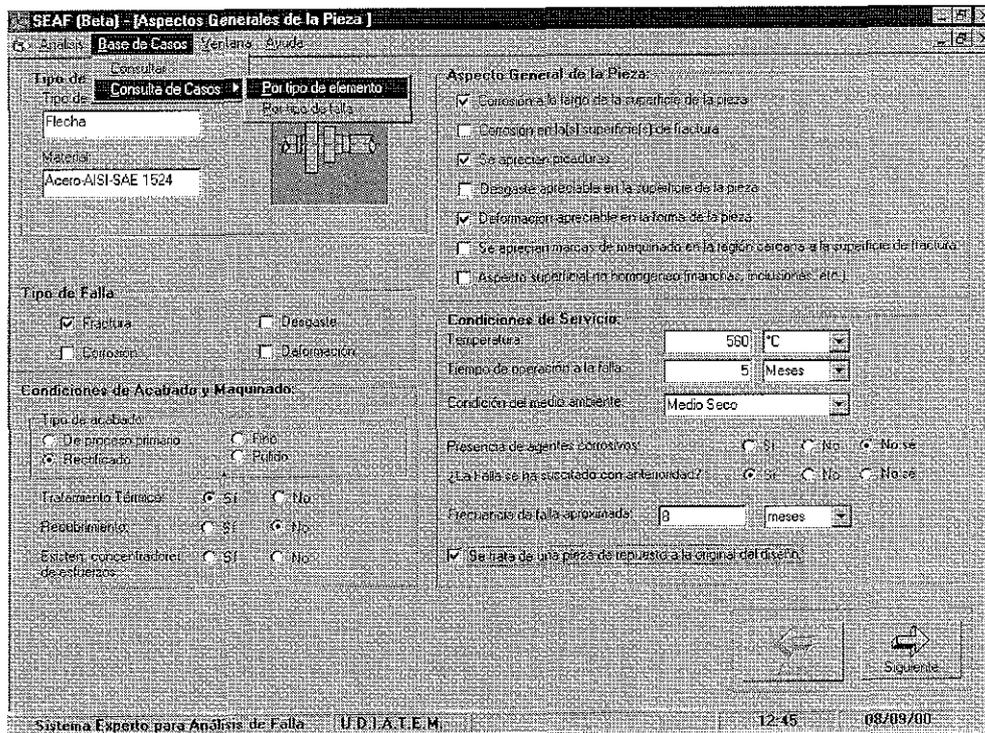


Figura 4.5. Interfase del Sistema

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

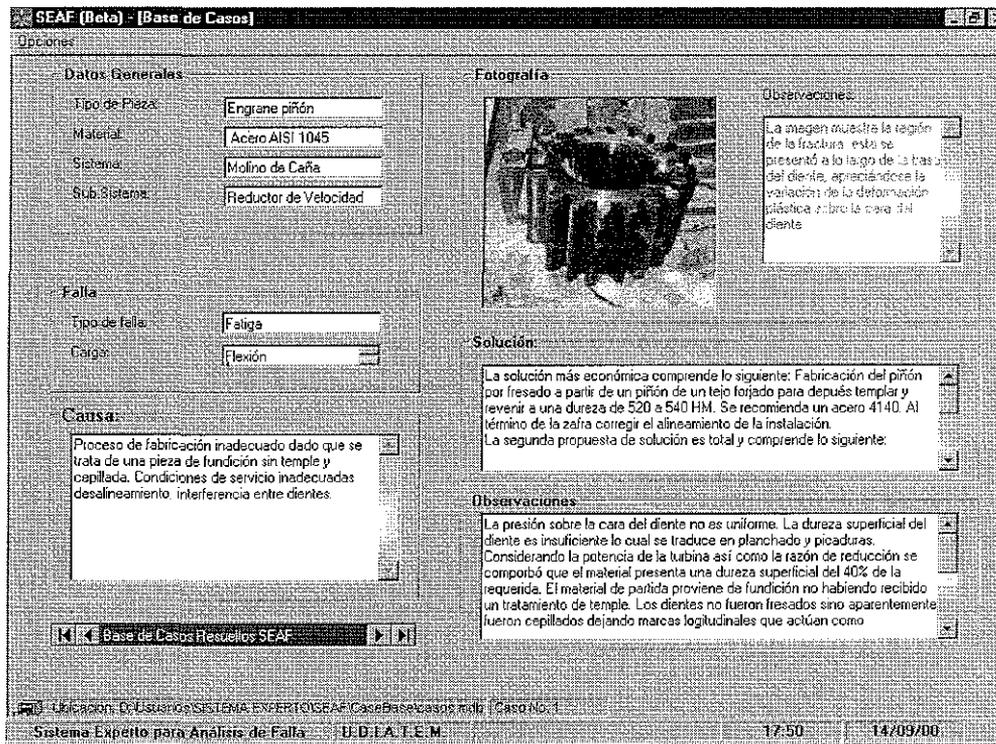


Figura 4.6. Visor de la Base de Casos

### ***Estrategia para el desarrollo del sistema global***

El sistema experto para análisis de falla de elementos mecánicos metálicos (SEAFEM), busca dar solución a problemas relativos al AF de diversos elementos mecánicos como ejes, pernos, engranes, etc, por lo que, desde un principio se estructuró el sistema con una visión global. Se diseñó la interfase de usuario y la estructura de la base de conocimientos de acuerdo con este planteamiento. Si bien es cierto esta es la base estructural del sistema, buscar construirlo como un todo resulto problemático y se manifestó en el propio desarrollo del prototipo, ya que debido a lo robusto del sistema todas las acciones se complican. Por lo anterior, se planteó como estrategia la construcción del sistema módulo por módulo; ya que teniendo la experiencia de este primer subsistema, los demás se facilitan, pues ya se tiene conocimiento sobre los inconvenientes que se presentan en la adquisición y representación del conocimiento.

Acciones:

1. Con base en la frecuencia de falla de los elementos mecánicos definir los módulos que se desarrollarán. *Estos fueron Ejes, Engranes, Pernos, Resortes*
2. Selección del primer módulo a desarrollar. *Debido a la cantidad de información de la que se dispone y de la experiencia de solución de casos prácticos el primer módulo a desarrollar es el relativo a ejes*
3. Definir una metodología para el desarrollo de un módulo de análisis de esfuerzos
4. Desarrollo del módulo auxiliar de análisis de imagen

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

5. Orientar la estructura general del sistema de tal manera que permita la futura integración de módulos de análisis de deterioro ambiental, de mecánica de la fractura y de análisis de imágenes
6. Determinación de la interacción de los módulos

#### **4. 4 ORGANIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA INFORMACIÓN PARA EL SE EN AF [16,17,18,19]**

Para organizar la información, el shell actúa como administrador de la información recopilada, manteniendo el intercambio de datos entre la interfase y propiamente el sistema, para poder realizar estas funciones, la información tiene que ser clasificada o “categorizada” por cualidades que tenga en común, estas categorías están formadas por *clases* donde se almacena información desde un punto de vista bastante general. Conforme las características de la información se hacen más específicas es más difícil utilizar las clases mencionadas por lo que existe una manera de clasificar más particular que las clases, ésta es por *atributos*.

Las clases y los atributos son determinados por el equipo de trabajo según sean los intereses del manejo de la información y de las facilidades que esto represente para la programación de los algoritmos.

Los atributos, a su vez, pertenecen a las clases y una clase puede tener cientos de atributos, un atributo es una característica que diferencia la información del resto de la clase. Los atributos pueden estar compuestos por uno o varios elementos (*variables que toma el atributo*)

Los atributos son variables que pueden ser de la siguiente forma:

- Simple - Este tipo de atributo solo puede tener dos valores Sí o no, existencia o carencia, etc  
Una vez que el atributo es invocado adquiere el valor positivo, esto es: existencia, sí, etc
- Compound.- Este tipo de atributo puede tomar una variable o característica de una lista de dos o más elementos.
- Multicompound.- Este tipo de atributo puede tomar de uno a “n” elementos de una lista de “n” elementos.
- String - Este tipo de atributo puede tomar una variable introducida por el usuario externamente, esto es, la variable no tiene que estar determinada en el código del programa fuente. El atributo tomará una cadena de caracteres de texto.
- Numeric.- Este tipo de atributo toma valores numéricos que pueden ser determinados por el usuario o por el programa.

En el Sistema existen atributos que son seleccionados directamente por el usuario, esto es, que el usuario los selecciona a través de una lista que le es presentada por medio de la interfase, los valores que tomen los atributos en el programa son determinados únicamente por el usuario

No todos los atributos e inclusive algunas clases son determinadas de esta manera, existen algunas clases y atributos que fueron creadas para el buen funcionamiento del programa en donde

el usuario no los selecciona directamente. En estos casos, los atributos toman sus valores por medio de las inferencias de las premisas contenidas en las reglas del sistema y el usuario solo interviene de manera indirecta.

Existe una serie de clases y atributos que fueron creados para hacer más eficiente el programa, las variables que toman los atributos en estos casos son solo técnicas de programación que ayudarán al desempeño del algoritmo del código y finalmente al sistema en general en tiempo de ejecución.

### **Clases y atributos en el SE en AF**

A continuación se presenta la estructura de clases y atributos realizada para el sistema, así como las características correspondientes a cada uno de estos. Para su rápida identificación, a cada atributo es asignado un cuadro de la forma ( , ) en donde el primer carácter indica la forma en que será determinado dicho elemento, si el usuario lo determina directamente el carácter presente será una U y si es determinado por otro método el carácter presente será P.

El segundo carácter del cuadro indica el tipo del atributo:

S.- Simple

C.- Compound

M - Multicompound

St - String

N - Numeric.

**Clase.- Part:** Es la clase más general del programa, esta clase proporciona la información necesaria para la correcta identificación de los elementos a analizar y sus características más generales, esta clase permanece activa para cualquier elemento seleccionado.

### *Atributos:*

Material.-	Clasificación del material según la clasificación de ingeniería. Metales, cerámicos, polímeros, etc. (U,C) Tipo de elemento.- Tipo de elemento que se desea analizar. (eje, perno, engrane ,etc.)(U,C)
Función realizada -	Función que desempeña el elemento dentro del sistema en donde operaba. (transporte de líquido, transmisión de potencia, etc ) (U,C)
Tipo determinado.-	Atributo creado para determinar si el elemento buscado por el usuario fue encontrado. (P,S)
Tipo de carga práctica.-	Tipo de carga a la que el elemento estuvo sometido, determinada por el usuario. (flexión, torsión,etc.)(U,C)
Tipo de carga teórica.-	Tipo de carga determinada por el usuario a través de imágenes de fractura. (flexión, torsión,etc ) (U,C)
Campo de esfuerzos.-	Determina el número de ejes necesarios para definir el esfuerzo el elemento (uniaxial, biaxial, etc.)(U,C)

Concentradores de esfuerzos.- Existencia de concentradores de esfuerzos, la existencia de este atributo accesa a la siguiente lista de atributos individualmente. (U,S)  
Agujeros.- Existencia de agujeros. (U,S)  
Cambios de sección.- Existencia de cambios de sección. (U,S)  
Estriados - Existencia de estriados. (U,S)  
Estampados.- Existencia de estampados. (U,S)  
Roscas - Existencia de roscas. (U,S)  
Cuñeros.- Existencia de cuñeros (U,S)  
Ranuras - Existencia de ranuras (U,S)  
Marcas de maquinado.- Existencia de marcas de maquinado visibles (U,S)

Concentrador de esfuerzos cerca de la zona de falla,- Determina si el concentrador de esfuerzos está situado cerca de la falla. (U,S)

Recubrimiento - Determina si el elemento presenta algún tipo de recubrimiento. Este atributo permite el acceso a la siguiente lista de atributos. (U,S)  
Tipo de recubrimiento.- Determina el tipo de recubrimiento presente en el elemento. (orgánico, fosfatado, etc.) (U,C)  
Corrosión en el recubrimiento - Determina la presencia de corrosión en el elemento analizado. (U,S)  
Daño en el recubrimiento - (U,S)  
Corrosión en el elemento - Determina si existen muestras de corrosión en el elemento en general. (U,S)  
Corrosión en la fractura - Determina si existen muestras de corrosión específicamente en la zona de la fractura (U,S)  
Picaduras por corrosión - Determina si existen picaduras originadas por corrosión en el elemento. (U,S)

Apariencia de la pieza - Determina las características generales de una primera inspección visual sobre el estado de la pieza. (deformación, desgaste, etc.) (U,M)  
Existencia de cargas cíclicas.- (U,S)

**Clase.- Información sobre el material:** Esta clase fue creada para poder recabar información acerca del material que está compuesto el elemento que se va a analizar. La información contenida en esta clase sigue siendo general por lo que existen clases acerca del material más específicas

Atributos:

Materiales.- Permite seleccionar entre distintos metales y aleaciones como acero, aluminio, etc. (U,C)

Material identificado.- Atributo creado para determinar que el material buscado por el usuario fue encontrado. (P,S)

Tipo de acero -	Permite determinar el tipo de acero bajo la clasificación SAE. (1010, 4410, etc.) (U,C)
Porcentaje de carbono -	Permite determinar el porcentaje de carbono en el material de forma cualitativa. (alto, medio, bajo) (P,C)
Nivel de aleación -	Permite determinar el nivel de aleación presente en el acero como baja aleación, media aleación y alta aleación. (P,C)
Comportamiento del material -	Permite definir las propiedades mecánicas según sea el material elegido (frágil, dúctil) (P,C)
Existencia de tratamiento térmico.	Determina la existencia de tratamiento térmico del material, si el valor adquirido es positivo, permite acceder y dar valores a los siguientes atributos. (U,S) Revenido (U,S) Templado (U,S) Recocido (U,S)
Medio de temple -	Permite determinar el medio con el que fue templado el elemento. (agua, aceite, salmuera, etc.) (U,C) Templado con flama. (U,S) Cementado (U,S) Nitruado. (U,S)
Dureza-	Adquiere el valor de la magnitud de la dureza, supuesto para las condiciones del elemento en la bibliografía.

**Clase.- Falla:** Esta clase tiene como objetivo almacenar la información correspondiente a la falla como es geometría, apariencia, etc.

Atributos:

Tipo de falla -	Permite identificar el mecanismo de falla (deformación, fractura, desgaste, etc) (U,C)
Crecimiento de la fractura -	Permite identificar el crecimiento de la fractura (unidireccional, bidireccional, etc) (U,C)
Existencia de una zona de deformación -	Permite identificar una zona de deformación en la fractura (U,S)
Tipo de fractura -	Permite identificar el mecanismo de fractura. (frágil, dúctil, fatiga) Para el caso de fatiga, relaciona el tipo de carga. (flexión bilateral, torsión, etc.) (U,M)
Plano de fractura -	Permite identificar el plano donde se generó la fractura, respecto al eje axial en el caso de ejes, (90°, 45°, helicoidal.) (U,C)
Apariencia de la superficie de fractura -	Determina la apariencia de la superficie de fractura. (brillosa, terrón de azúcar, áspera, etc.) (U,M)

Textura de la superficie -	Determina la textura de la superficie de fractura. (rugoso, liso, etc.) (U,M)
Tamaño de la fractura -	Permite determinar el tamaño de la fractura de forma cualitativa. (metros, pies, pulgadas, etc ) (U,C)
Marcas en la superficie de fractura.-	Permite determinar la existencia de marcas existentes en la superficie de fractura. (chevron, playa) (U,C)
Tiempo de operación.-	Permite cuantificar el tiempo en que el elemento estuvo en servicio. (U,N)

**Clase.- Medio de operación:** Esta clase fue creada para recabar información correspondiente al medio en donde se desempeñaba el elemento antes de la falla.

Atributos:

Temperatura.-	Permite cuantificar la magnitud de la temperatura media en °C a la que operaba el elemento. (U,N)
Temperatura atmosférica -	Permite cuantificar la magnitud de la temperatura media en °C en el lugar donde operaba el elemento (U,N)
Humedad relativa -	Permite determinar de forma cualitativa el nivel de humedad presente en el lugar de operación del elemento. (alto, medio, bajo.) (P,C)
Presencia de agentes corrosivos.-	Permite seleccionar los distintos agentes corrosivos presentes en el medio de operación (SOx, NOx, ácidos, etc.) (U,M)
Líquidos en contacto -	Permite determinar las sustancias líquidas que empapaban la pieza. (hidrocarburos, ácidos, agua, etc ) (U,M)
PH.-	Permite determinar cualitativamente el pH presente en el medio de operación (ácido, neutro, alcalino ) (U,C)

**Clase.- Ejes:** Esta clase fue creada para obtener información correspondiente al elemento eje, evidentemente su uso es exclusivo para el análisis de éstos.

Atributos:

Proporción diámetro-longitud.-	Permite determinar cualitativamente la relación existente entre el radio del eje y su longitud para ejes circulares. (alto, medio, bajo) (P,C)
--------------------------------	--

Sección transversal - Permite identificar la forma geométrica de la sección transversal del eje. (Circular, agujerada, etc.) (U,C)

**Clase.- Conclusiones intermedias:** Esta clase a diferencia de las anteriores fue creada para dar salida a los datos concluidos por el programa para una primera aproximación de la inspección visual, también funciona para administrar variables internas del programa.

Atributos:

Material seleccionado para el diseño - Determina si el material seleccionado tiene las características necesarias para la función a la que estuvo comisionada. (P,S)

Problema de diseño - Determina si la falla está asociada a un problema de diseño. (P,S)

Causas de la falla - Atributo creado para tomar el valor de una cadena de texto proveniente de una base de datos para después presentarla al usuario por la interfase. (P,St)

Fatiga asociada a la carga - Determina a través de una serie de imágenes presentadas al usuario el tipo de carga presente. Solo funciona para mecanismo de falla por fatiga. (U,C)

Tipo de carga A.E: Este atributo adquiere un valor del tipo de carga procedente del análisis de esfuerzos asociado. (P,C)

Fractura por fatiga - Determina si el mecanismo de falla fue fatiga. (P,S)

**Clase.- Recomendaciones:** Esta clase tiene como fin almacenar la información correspondiente a las recomendaciones realizadas a el usuario

Atributo:

Rec - Toma el valor procedente de una cadena de texto proveniente de una base de datos, para después ser presentada en pantalla. (P,S)

**Clase.- Aceros:** Esta clase pretende determinar de una manera precisa el tipo de acero en el caso que fuera seleccionado, contiene información correspondiente al acero seleccionado proveniente de una base de datos.

Atributos -

Aceros AISI - Determina el tipo de acero utilizado y las propiedades mecánicas correspondientes al acero seleccionado según las dos primeras cifras de la clasificación AISI (P,C)

Tipos de aceros - Permite clasificar el tipo de acero de forma específica según la clasificación AISI. (U,C)

**Clase.- Bronces:** Esta clase fue creada para poder identificar el material si se tratara de bronce así como sus propiedades mecánicas.

Atributos:

Bronces- Permite clasificar el bronce (U,C)

**Clase.- Información visual de la falla.-** Esta clase actúa solo a nivel programación y su finalidad es procesar la información correspondiente a la inspección visual de la falla.

Atributos: falla frágil, dúctil, fatiga - Estos atributos fueron creados para actuar a nivel código, jamás podrán adquirir sus valores a través de la interfase, son utilizados para asumir el resultado de la inspección visual

## **CAPÍTULO 5**

### **DESARROLLO DEL SISTEMA EXPERTO PARA ANÁLISIS DE FALLA DE EJES**

#### **5.1 INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se presenta el desarrollo de un primer módulo orientado a la solución de problemas en ejes, mismo que servirá como plataforma para la expansión de la base de conocimientos del sistema global. Este módulo de ejes se desarrolló dentro de la estructura de lo que será el sistema global e incluye un programa auxiliar para la determinación del estado de esfuerzos, para con esto definir las condiciones críticas

#### **5.2 DESARROLLO DEL SISTEMA**

El enfoque inicial para su construcción fue desarrollar un módulo experimental con base en los datos proporcionados por la inspección visual del usuario, con el fin de determinar de manera sencilla, a través de una interfase con elementos gráficos, el tipo de falla que se presenta en los ejes. La base de reglas para este caso no es muy amplia, dado que la información requerida para llegar a las conclusiones a partir de la inspección visual no es abundante. Sin embargo mediante esta primera aproximación fue posible darse cuenta de la necesidad de encontrar una estructura lógica para el desarrollo de los cuestionamientos por parte del sistema hacia el usuario, de manera que existiese una secuencia que guíe al usuario de manera amigable y no contradictoria, evitando caer en cuestionamientos redundantes o repetitivos en el desarrollo de las preguntas

#### **5.3 REGLAS PARA INSPECCIÓN VISUAL**

En la metodología que fue propuesta en el capítulo anterior se indica, en el *“Diagrama de procedimiento para la solución de un problema de análisis de falla por parte de un experto”* figura 4.3, que el primer paso es la inspección visual preliminar, en donde se debe examinar la superficie de fractura en su totalidad para identificar la localización del sitio o sitios de inicio, si lo permite el tamaño de la pieza, se debe examinar ésta con ayuda de un estereoscopio.

El análisis visual revela concentradores de esfuerzos, imperfecciones del material, presencia de recubrimientos superficiales, zonas endurecidas, cordones de soldadura y otros detalles estructurales que contribuyen al agrietamiento, además de indicar el ángulo del plano de fractura y la morfología de la superficie de fractura.

El análisis macroscópico revela con frecuencia grietas secundarias que se han propagado de manera parcial a través de una pieza. Estas grietas se pueden terminar de abrir en el laboratorio y muchas veces se encuentran en mejores condiciones (para su inspección y análisis) que la fractura principal. Es factible identificar las áreas a seccionar con la intención de realizar en éstas una inspección metalográfica, análisis químico ó determinación de las propiedades mecánicas.

Con los datos iniciales de la inspección visual se puede determinar si el material falla de modo frágil (esfuerzo normal máximo) o dúctil (esfuerzo cortante máximo).

Para desarrollar las reglas de inspección visual se analizaron cuales de los atributos anteriormente definidos estaban involucrados, esto mediante el análisis del estado de esfuerzos (tensión, torsión pura, flexión, etc) ver *anexo* , de cada elemento.

Para el módulo de flechas se decidió que el mínimo indispensable de atributos que debe cumplirse en una regla de inspección visual son cinco, para determinar si el material falla de forma frágil o dúctil, dándole a esto un nivel de confianza, valor que es determinado por el experto, en el cual después se realizó un módulo de reglas de comparación en donde se certifica el nivel de confianza.

Los atributos mínimos que se tomaron en consideración son: tipo de componente, morfología de la falla, tipo de carga, plano de fractura, apariencia de la superficie de fractura.

La forma de elaboración de las reglas es a partir de estos cinco atributos en donde regla a regla se aumenta el número de atributos y por otro lado se diseñan nuevas por funciones combinatorias de estos atributos, de tal forma que a cada regla se le asigna un nivel de confianza. Cabe mencionar que para que se active la regla es necesario que todos los puntos se cumplan, por otro lado la activación de éstas no sigue un orden secuencial.

La conclusión que se obtiene es según el nivel de confianza que se le solicitó, esto es que solo desplegará la conclusión de aquellas reglas que se hallan activado y que tengan igual nivel de confianza al que se le indicó en el programa o en su defecto sea mayor a éste.

A continuación se da un ejemplo de una de las reglas.

#### Regla # 1

! Falla frágil

!

Rule 1

If Material\_Info.MaterialFound

And Type Of Part Is Shaft

And FClass Of Failure Is Crack

And PracticeLoadType Of Part Is Tension

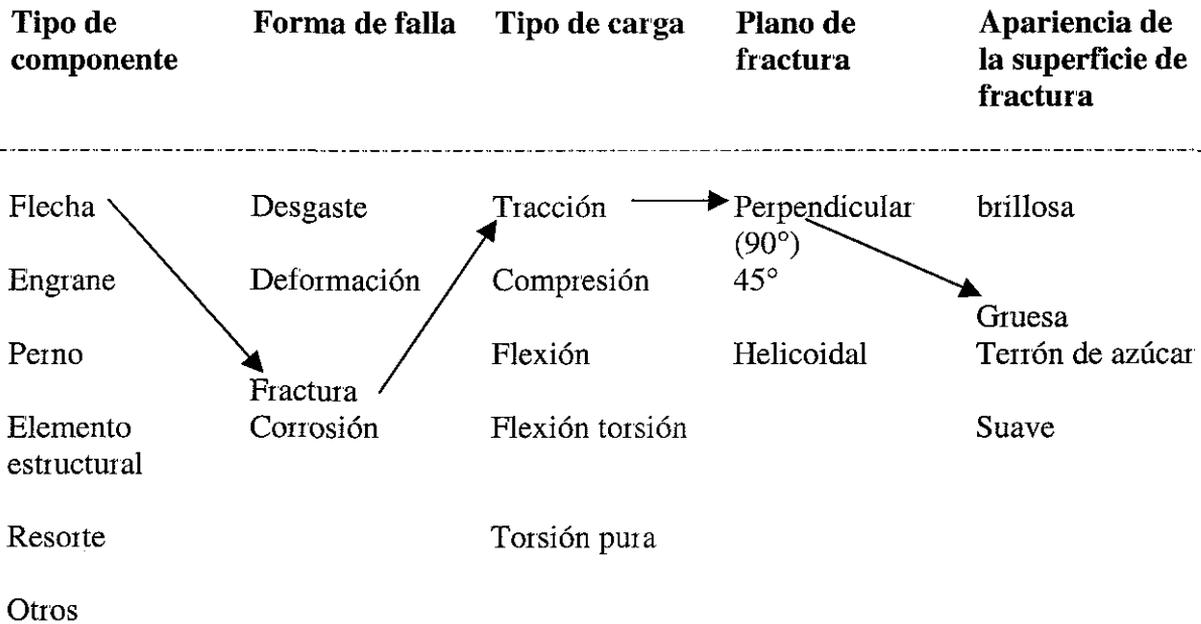
And Failure\_Plane\_Apparence Of Failure Is Planar

And Failure\_Surface\_Apparence Of Failure Is Coarse

Then Failure.Type Is Brittle Cf 80

And Failure\_VisualInformation Type1 Is Brittle Cf 80

**Representación gráfica de la regla 1**



Conclusión: Es una falla de tipo frágil (ver anexo)

**5.4 OPERACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO PARA EJES**

La secuencia de operaciones que sigue el usuario en su interacción con el sistema para dar solución a un problema de análisis de falla de ejes es la siguiente:

1. Al inicio el sistema cuestiona al usuario con relación al tipo de material y de elemento mecánico. La interfase utilizada es del tipo de documento múltiple, lo cual facilita el movimiento a través de los distintos módulos por un menú principal. Se cuenta con la opción de elegir entre una gran gama de aceros y de elementos mecánicos como ejes, pernos, engranes, etc.
2. Una vez que se seleccionó al elemento eje, se activa la siguiente pantalla (Figura 5 1) en donde se solicita información relativa al tipo de falla, maquinado, acabados, aspecto general de la pieza, condiciones de servicio y presencia de concentradores de esfuerzos. Esta pantalla funciona para cualquier elemento, puesto que almacena información genérica en donde el único cambio que existe es el icono del elemento analizado.
3. Si se activa la opción de concentradores de esfuerzos, aparece una nueva ventana que contiene información sobre los distintos tipos existentes de concentradores para este elemento (Figura 5 2), de esta manera se puede cuantificar el coeficiente de seguridad para el diseño.

4. Una vez que se precisa la información requerida por la ventana principal (aspectos relativos a las condiciones de servicio y parámetros de diseño) se activa una ventana adicional en donde se captura información específica (geometría, dimensiones, condiciones de carga) relacionada con las condiciones de servicio.(Figura 5.3)
5. En la siguiente ventana (Figura 5.4) se solicita información relativa al aspecto de la zona de fractura (textura, apariencia, marcas) asimismo se demandará información al usuario con respecto al tipo de carga. Con esta información se determina la primer conclusión de la inspección visual (Figura 5.5)
6. En la Figura 5.6 se presenta un ventana que se activa cuando la conclusión obtenida en el punto anterior fue que la falla del eje se debe a fatiga y se presentan una serie de imágenes que muestran los distintos patrones de fractura causados por fatiga dependiendo del tipo de carga y la concentración de esfuerzos, buscando con esto corroborar el estado de esfuerzos y el tipo de carga suministrados por el usuario anteriormente en la forma de información visual
7. En la siguiente ventana (Figura 5.7), de acuerdo con la información obtenida en el punto anterior se establece una deducción en base al tipo de carga y su relación con la superficie de fractura, cuando se trata de fatiga como resultado de mayor probabilidad de ocurrencia.
8. Existe un módulo auxiliar orientado hacia el cálculo de esfuerzos (Figura 5.8), el objetivo de este módulo es encontrar la magnitud del esfuerzo máximo, su ubicación y orientación en el elemento, para así poder comparar esta información con la recopilada por el usuario o la procedente de la bibliografía
9. Se cuenta con un módulo adicional en donde el usuario puede comparar el caso resuelto, con los contenidos en una base de casos sobre fallas en ejes (Figura 5.9), esta rutina le sirve para tener información adicional y validar las conclusiones obtenidas por el sistema experto

## **5.5 OBSERVACIONES**

El sistema presentado busca dar solución a casos relativos a fallas de ejes con base en lo que se desprende de la inspección visual sobre el fenómeno, la siguiente etapa sería adicionar una serie de reglas que evalúen aspectos relativos a la información de laboratorio como pueden ser observaciones metalográficas, mediciones de dureza, etc , con esto se tendrán mayores niveles de certeza en las conclusiones que se desprendan del análisis

La experiencia adquirida en la elaboración de este sistema, permite que los módulos de análisis de falla de otros elementos se puedan desarrollar con mayor facilidad, para integrar de manera gradual el sistema global de análisis de falla de elementos mecánicos metálicos.

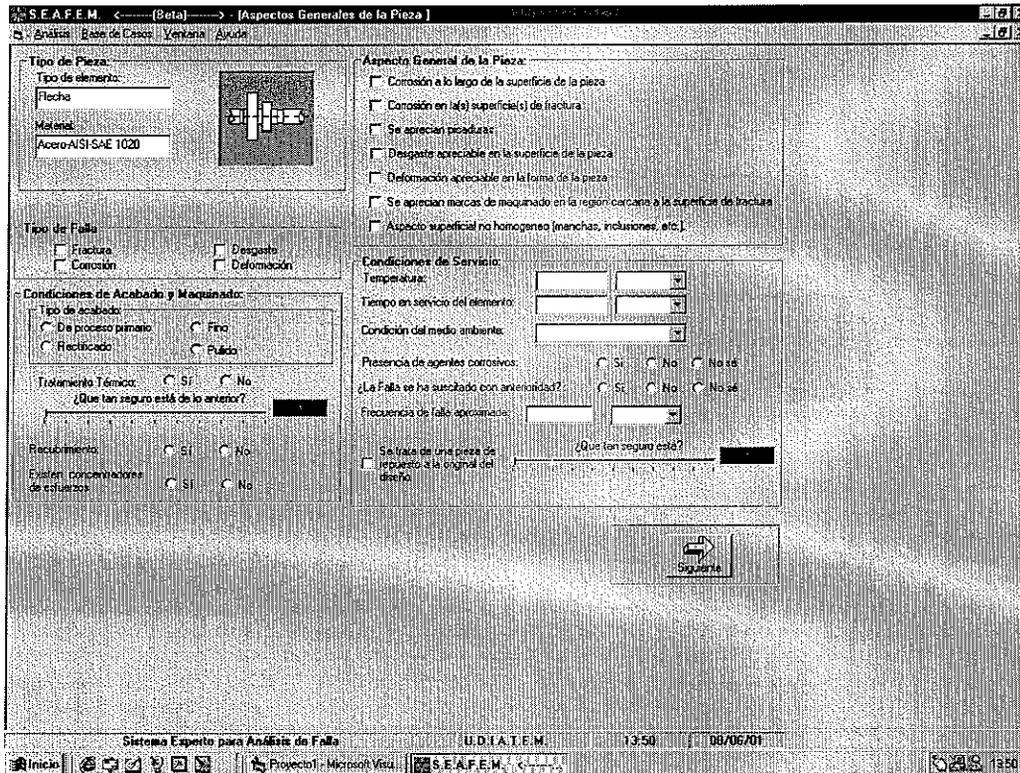


Figura 5.1 Información general sobre elementos mecánicos

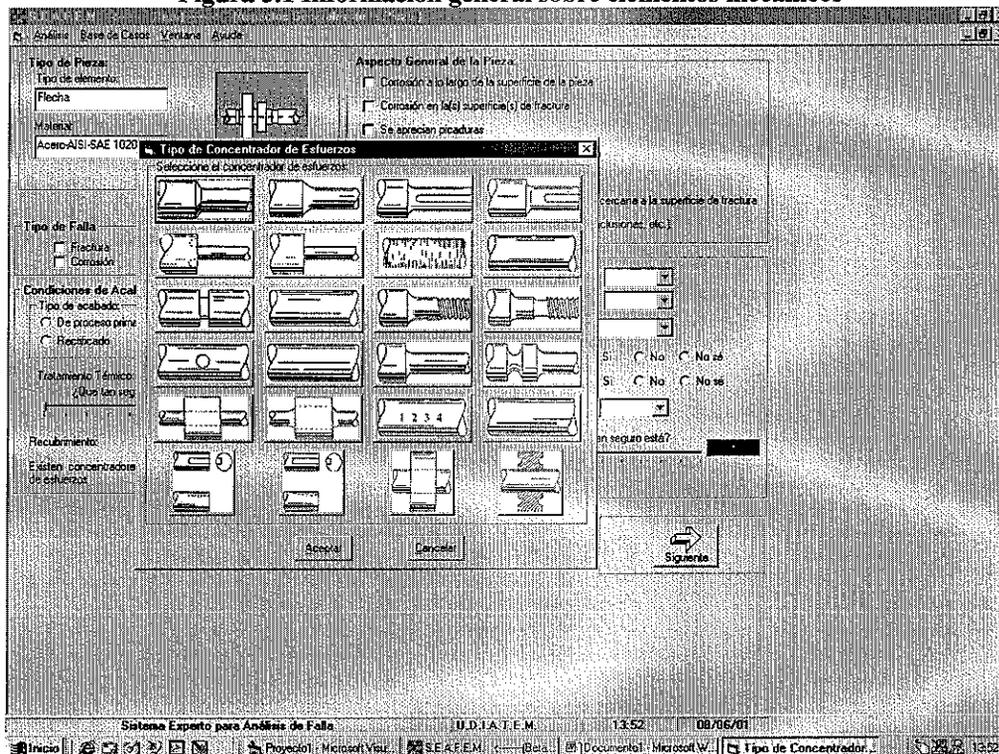


Figura 5.2 Opciones de concentradores de esfuerzos sobre ejes

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

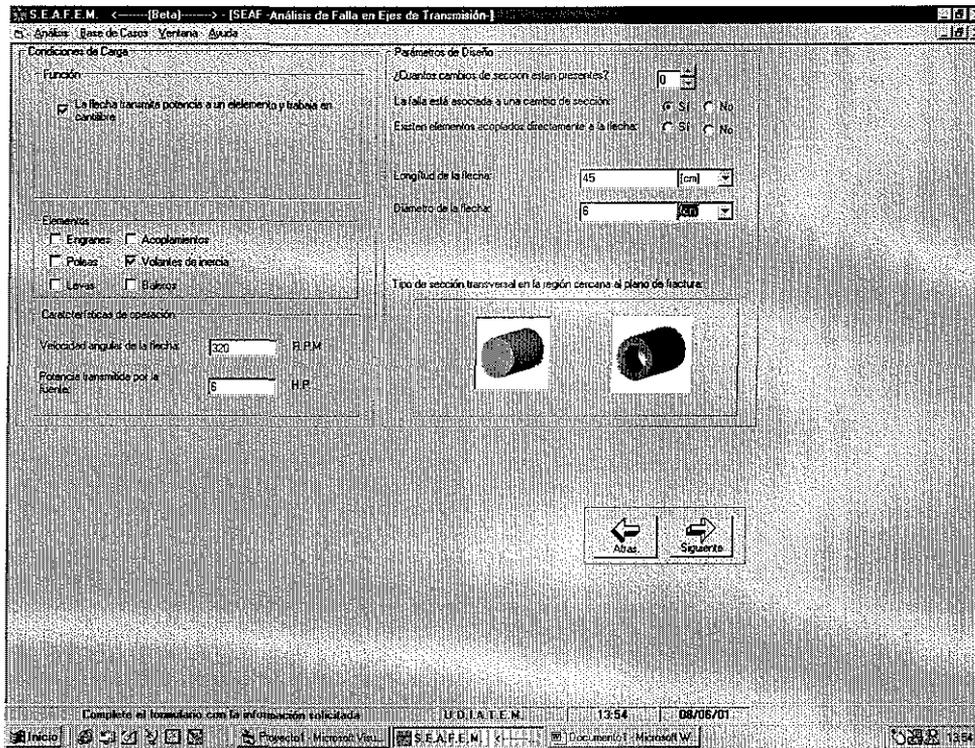


Figura 5. 3 Información sobre condiciones de servicio de ejes

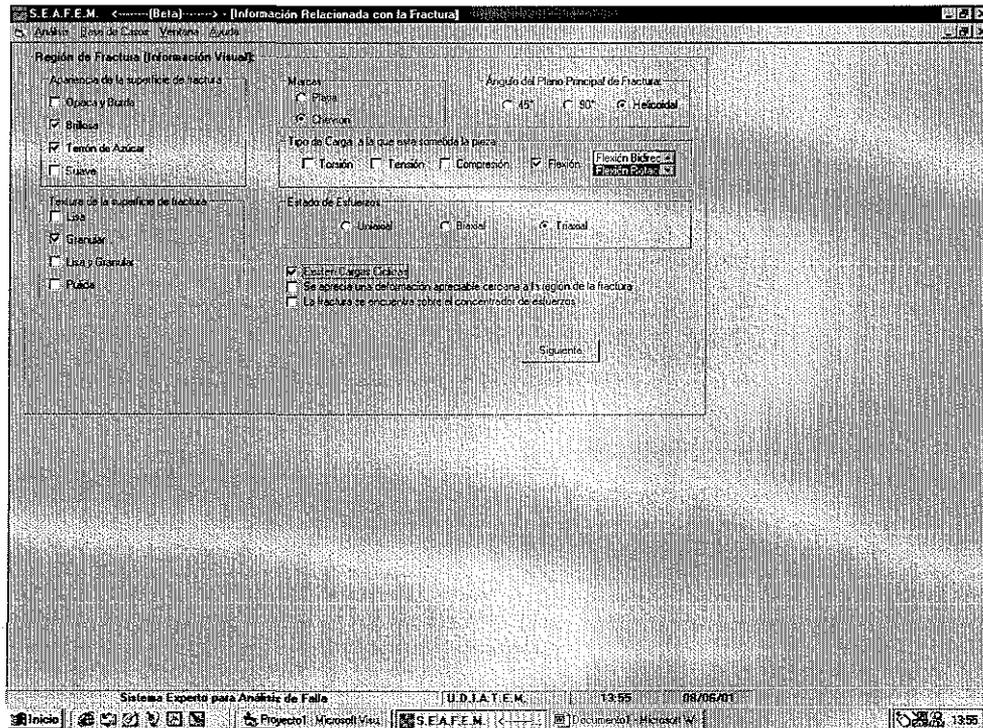


Figura 5.4. Información relativa a la apariencia de la fractura del eje

TFESIS CON FALLA DE ORIGEN

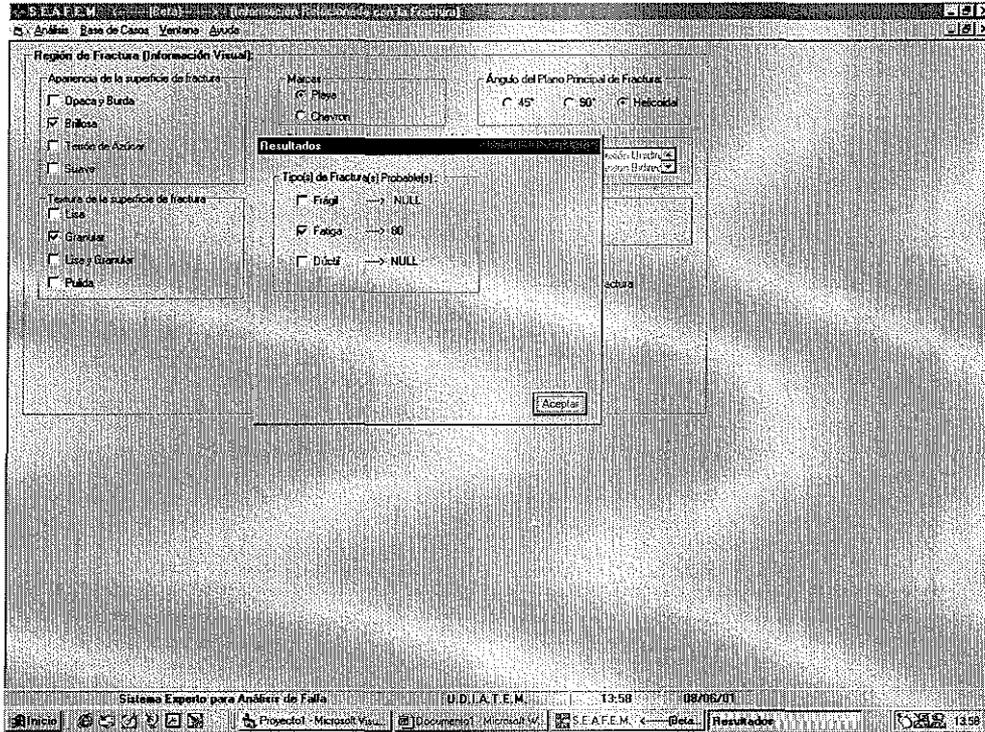


Figura 5.5 Conclusiones de la inspección visual

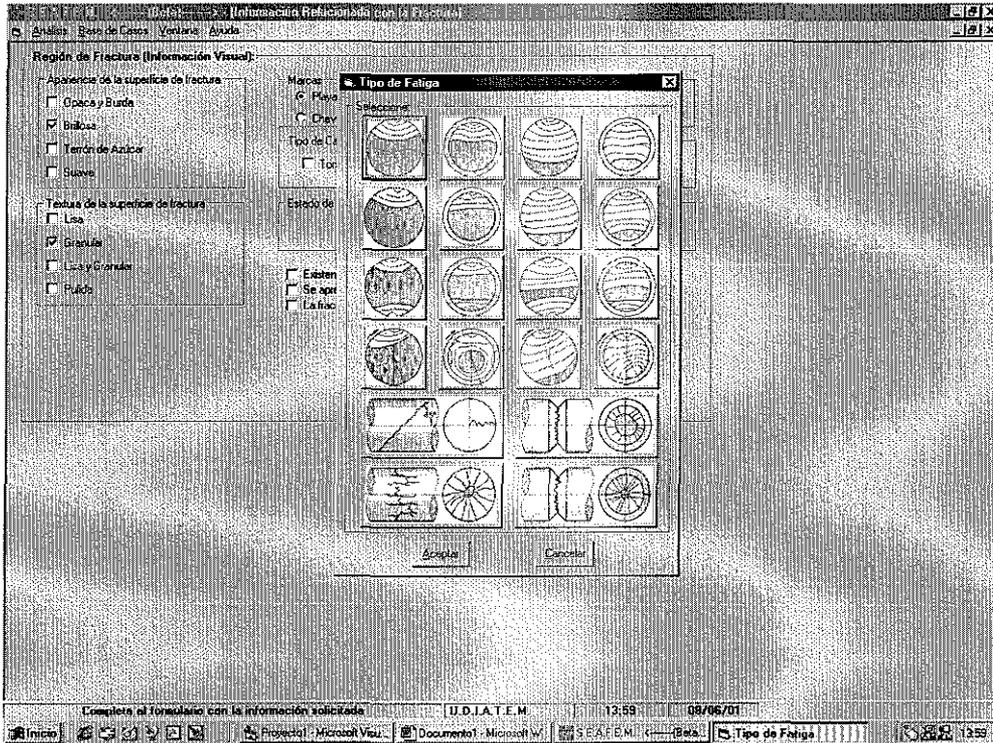


Figura 5.6 Muestrario de probetas con fracturas por fatiga a diferentes condiciones de carga

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

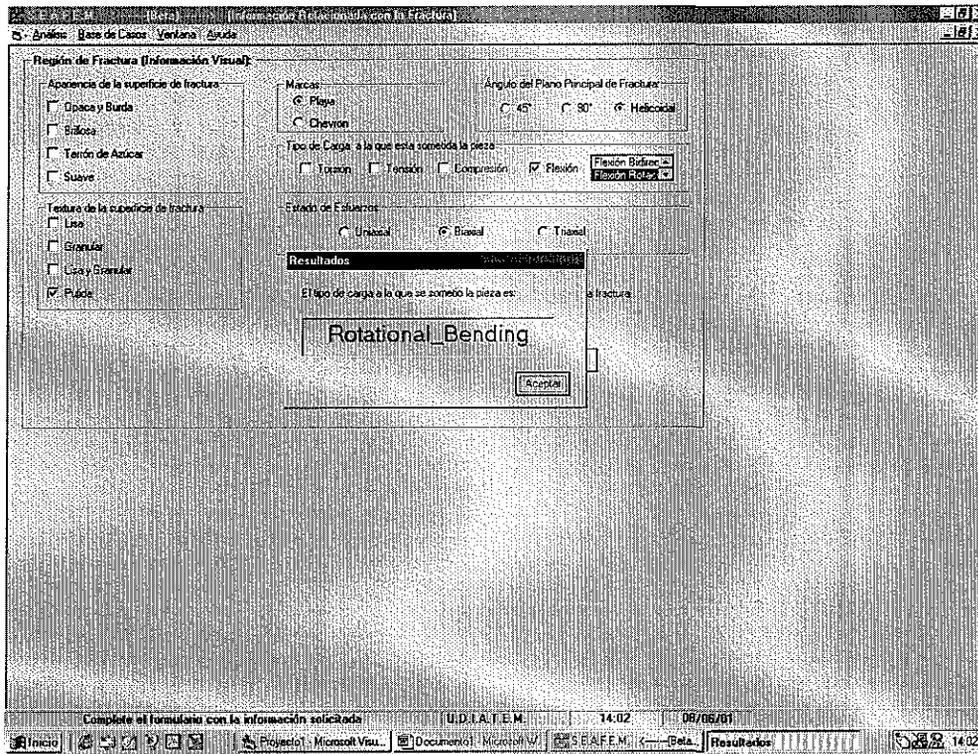


Figura 5.7 Deducción sobre el tipo de carga

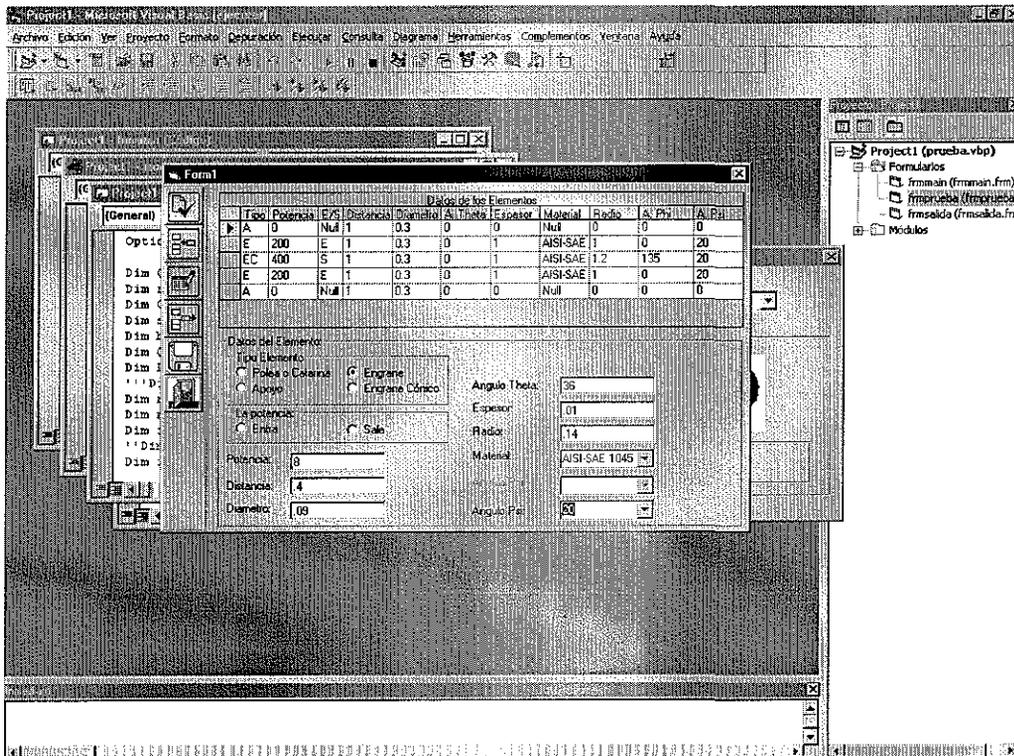
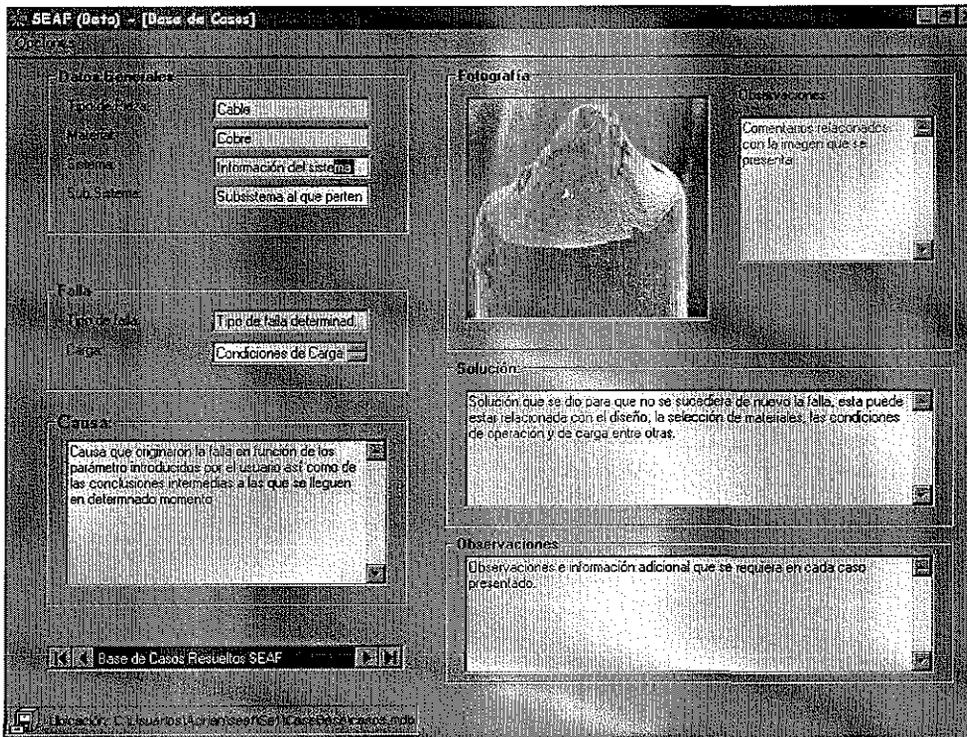


Figura 5.8. Módulo de cálculo de esfuerzos.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



**Figura 5.9 Estructura de un registro de la base de casos**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

ESTA TESIS NO SALI  
DE LA BIBLIOTECA

## CONCLUSIONES

De acuerdo con la experiencia del grupo de expertos de la UDIATEM se ha podido identificar que la aplicación de los sistemas expertos en el análisis de falla resulta ser una alternativa viable en la solución de casos de tipo rutinario. Esto es, debido a su complejidad la mayoría de situaciones que se presentan en la práctica industrial no requieren de la existencia de un experto; sin embargo, las empresas en lo general no cuentan con personal calificado para llevar a cabo de manera exitosa la solución de un problema en este campo por simple que éste sea.

Con relación a lo anterior si se busca desarrollar un sistema que solucione la amplia gama de problemas que el experto puede resolver, la programación de éste se vuelve demasiado compleja, traduciéndose esto en un costo elevado y extendiendo el tiempo para su desarrollo. Por tanto, el programa se limita a resolver aquellos casos que con mayor frecuencia se presentan en la industria, ya que con esto se facilitará el mantenimiento correctivo de los sistemas en donde se involucran elementos mecánicos.

Con base en lo anterior es necesario señalar que debido a la conjunción de conocimientos que están vertidos en el sistema, no se puede permitir que este sea operado por personal que no cuente con los conocimientos básicos de la ciencia de los materiales, de procesos de manufactura y de metalurgia mecánica. Es decir, el sistema debe fungir como un colega.

Por otro lado, la forma en que el experto realiza los procesos de razonamiento, es difícil de representar por simples reglas deductivas, ya que en el momento de solucionar un problema el experto utiliza tanto procedimientos bien definidos como de conocimientos inducidos. Sin embargo, aunque con ciertas limitaciones, la programación simbólica que manejan los shells permite que se realicen inferencias simulando el proceso en paralelo, además de que permiten el manejo de procedimientos algorítmicos.

Para evitar ambigüedades en la entrada de datos al sistema de AF resulta indispensable, el manejo de medios visuales, ya que de esta manera el usuario cuenta con una ayuda que lo induce a introducir el dato más adecuado, que es necesario para que el sistema proporcione resultados lo más cercano a la realidad.

Incorporar una base de casos a la que se pueda acceder para consultar las experiencias sobre casos similares al que se este resolviendo, resulta ser un elemento que permite validar las soluciones obtenidas por el procedimiento tradicional de solución mediante reglas deductivas, logrando de esta manera incrementar la confiabilidad del sistema. Cabe señalar que mientras más grande sea la cantidad de información que contenga la base mayor será el beneficio como herramienta para la toma de decisiones.

En problemas como en el caso del análisis de falla en donde el conocimiento es bastante complejo resulta conveniente desarrollar el sistema módulo por módulo, ya que si se pretende construir el sistema como un todo; es decir considerar a la vez ejes, engranes, poleas, resortes, etc., será necesario invertir una gran cantidad de tiempo, obteniendo resultados con un alto grado de incertidumbre. La estrategia para lograr el desarrollo de manera exitosa requiere que se defina la plataforma general de operación y que sobre esta base se desarrollen de manera individual los

módulos que componen el sistema. Por otro lado, las experiencias obtenidas en la construcción de un módulo de ejes facilitan el desarrollo de los demás subsistemas.

Al considerar la futura expansión de un sistema se debe pensar en una plataforma de programación que permita la incorporación de nuevos elementos, en este caso el ambiente de Visual Basic, permite por un lado la ejecución de Visual Rule Studio y por el otro el desarrollo de nuevos programas que auxilien el proceso de análisis de falla. Así, se pueden desarrollar bajo esta base módulos de mecánica de la fractura, análisis del estado de esfuerzos, análisis del deterioro ambiental y en un momento dado un subsistema para el análisis de imágenes.

Aunque la orientación del sistema va directamente hacia la solución de una problemática particular de la empresa metalmecánica, tiene la versatilidad de ser empleado para capacitar personal no solo de la industria sino que además resulta ser una valiosa herramienta didáctica para preparar a los futuros ingenieros mecánicos.

El sistema propuesto no pretende sustituir al experto humano, sino que se busca actúe como colega. La idea es que dé soluciones con un elevado nivel de confianza a problemas rutinarios de AF. La razón de lo anterior es que si se buscará la solución de todos los casos la construcción del sistema se vuelve muy compleja y por ende incosteable. En la práctica la mayor cantidad de casos caen en el ámbito de lo convencional, condición a la que se enfoca el presente sistema.

La importancia de este trabajo es el planteamiento de una metodología para el desarrollo del sistema experto que permita dar solución a problemas de elementos mecánicos metálicos. Se planteó una estructura que permite desarrollar paso a paso, sobre la base del sistema global, los diferentes módulos (ejes, engranes, resortes, etc) que integrarán el SEAFEM. Asimismo dentro del ambiente se facilita la incorporación de otros módulos auxiliares tales como análisis de esfuerzos, de deterioro ambiental, de imágenes, entre otros. Las experiencias obtenidas en el desarrollo del subsistema de ejes permiten que los módulos restantes se desarrollen más fácilmente, asimismo la metodología planteada sienta las bases para la expansión del sistema.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Libros

1. Adedeji B. Expert Systems Applications in Engineering and Manufacturing. Ed. Prentice Hall, 1991
2. ASM. Source Book in Failure Analysis. American Society for Metals, 1974
3. Brooks C Metallurgical Failure Analysis. Ed. McGraw-Hill, 1993
4. De Ferri Metallographia, Volume V. Microfractography. Verlag Stahleisen, 1979
5. Failure Analysis and Prevention Metals Handbook Vol. X American Society for Metals
6. Fractography and Atlas of Fractographs. Metals handbook Vol. IX American Society for Metals, 1987
7. Kas A. Metallurgy of failure analysis. Ed. McGraw-Hill, 1996
8. Vender Voort. Conducting the failure examination, Metals Engineering 1975
9. Visual Rule Studio. Developers Guide Rules Machine Corporation, 1998
10. Dieter. Engineering Design. McGraw-Hill 1991

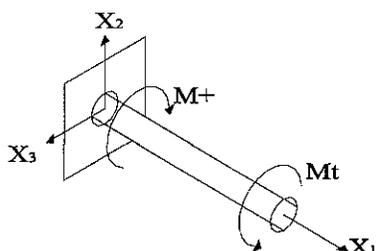
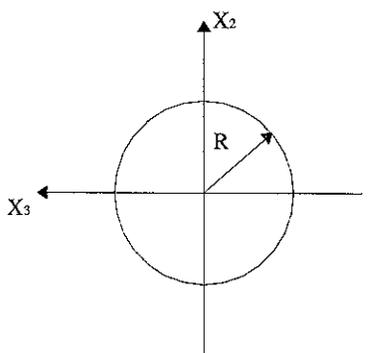
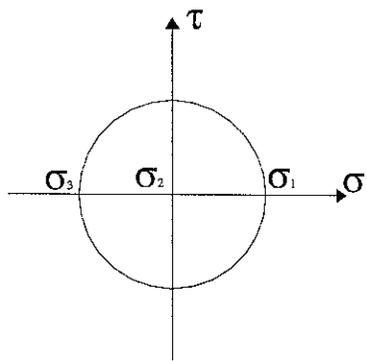
### Artículos

11. Beckman T.J. AI-Expert, The Magazine of Artificial Intelligence in Practice, February 1991
12. Graham-Jones, Mellor B. The Development of a Generic Failure Analysis Expert System Based on Case-Based Reasoning Part of the Engineering Materials Failure Series. Southampton, University U.K. 1996
13. Graham-Jones, Mellor B. Expert & Knowledge Based Systems in Failure Analysis. Part of the Engineering Materials Failure Series. Southampton, University U.K. 1997
14. Graham-Jones, Mellor B. Expert Systems in Failure Analysis. Part of the Engineering Materials Failure Series. Southampton, University U.K. 1997
15. Cerrud S., Márquez E. Jacobo V.H., Ortiz P.A., Propuesta para el desarrollo de un sistema experto en análisis de falla de elementos mecánicos metálicos. Memorias del IV Congreso anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Ciudad Juárez Chih. octubre 1998
16. Cerrud S., Márquez E. Jacobo V.H., Quiroz H., Adquisición y representación del conocimiento en un sistema experto en análisis de falla. Memorias del VI Congreso anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Colima, Colima, octubre 2000
17. Jacobo V.H. Cerrud Sánchez, Ortiz A., Ramírez M. Sistema experto para análisis de falla de ejes. Memorias del VII Congreso anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Celaya, Gto, octubre 2001
18. Jacobo V.H., Cerrud S. Marquez U., Ortiz P.A. Prototipo de un sistema experto tipo colega para el análisis de falla de elementos mecánicos metálicos. Memorias del X Congreso Latinoamericano de Investigación de Operaciones y Sistemas, del 4 al 8 de septiembre del 2000
19. Jacobo V.H., Ortiz P.A., Cerrud S. Aplicación de los sistemas expertos en la enseñanza a distancia de la ingeniería en el inicio del siglo XXI Memorias del 3er. Seminario Internacional de Ingeniería de Sistemas, Ixtapa Zihuatanejo, noviembre 2000
20. Penny R. K. Failures 96' Economy and Safety. Failure minimisation and analysis, 1996
21. Roberge P.R. Failure Analysis by Case-Based Reasoning. Proceedings of the International Congress InterCorr/96.
22. Walton H. W. Failure diagnostics- Applications of expert systems. Proceedings of the international Conference on Failure Analysis, 1991

## **ANEXO**

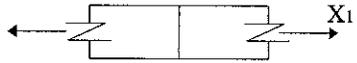
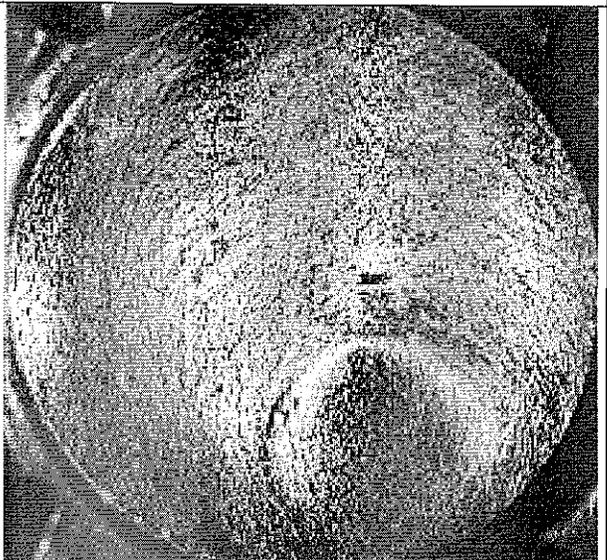
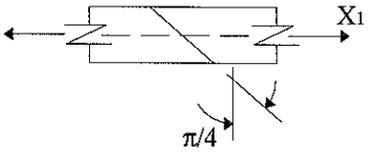
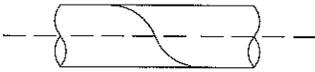
### **Análisis del Estado de Esfuerzos**

## FLECHA: SOBRECARGA POR TORSIÓN PURA

DIAGRAMA	ESTADO DE ESFUERZOS	CIRCULO DE MOHR
<div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">Torsión pura</p> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  </div>	<p>Flecha sólida de sección circular</p> $\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & x_3 & x_2 \\ -x_3 & 0 & 0 \\ x_2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{Mt}{I_p}$ <p>Esfuerzo principal</p> $\sigma_{1,3} = \pm \frac{MtR}{I_p}; \quad \sigma_2 = 0$ <p>Direcciones principales</p> $n = \frac{1}{\sqrt{2}} e_1 - \frac{1}{\sqrt{2}} e_2$	<div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;">Cortante puro direcciones principales a <math>\frac{\pi}{4}</math> del estado de cortante puro</p>

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

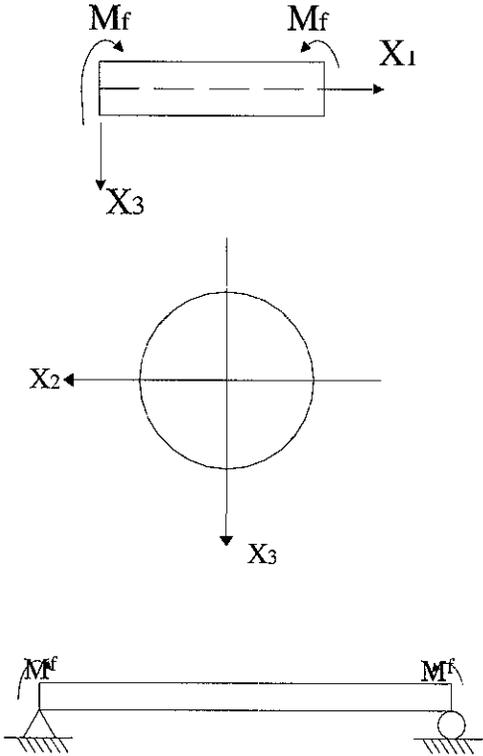
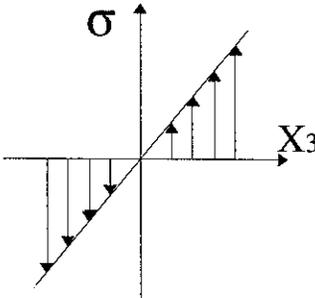
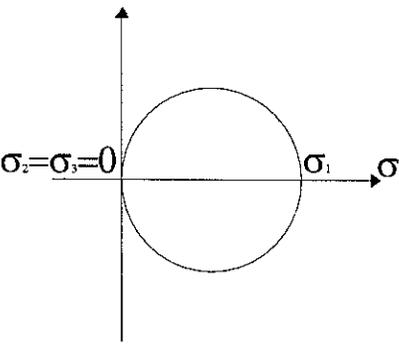
**(CONTINUACIÓN)**  
**FLECHA: SOBRECARGA POR TORSIÓN PURA**

ANGULO DEL PLANO PRINCIPAL DE FRACTURA	CARACTERÍSTICA DE LA SUPERFICIE DE FALLA	
<p>Material dúctil Falla por cortante máximo</p>  <p>Superficie de fractura Superficie normal a <math>X_1</math></p>	<p>La superficie externa muestra deformación en la dirección de rotación. La cual no existirá en el caso de fatiga.</p>  <p>A nivel microscópico las microcavidades están orientadas en el sentido de los esfuerzos de corte.</p>	
<p>Material frágil Falla por esfuerzo normal máximo</p> 	<p>La superficie de fractura da lugar a un plano helicoidal.</p>  <p>El aspecto de la superficie es granular y brillante</p>	

**TELIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

25

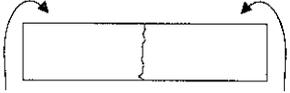
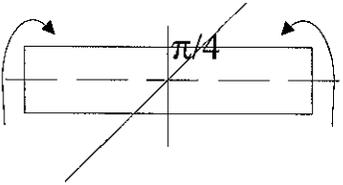
## FLECHA: SOBRECARGA POR FLEXION PURA

DIAGRAMA	ESTADO DE ESFUERZOS	CIRCULO DE MOHR
 <p style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <math>M = M_2 \hat{e}_2 + M_3 \hat{e}_3</math> </p>	<p style="text-align: center;">Flecha sólida de sección circular</p>  $\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{Mx_3}{I} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$  <p style="text-align: center;">Esfuerzo máximo</p> $\sigma = \pm \frac{MR}{I}$	

96

**TESIS CON  
FALSA DE ORIGEN**

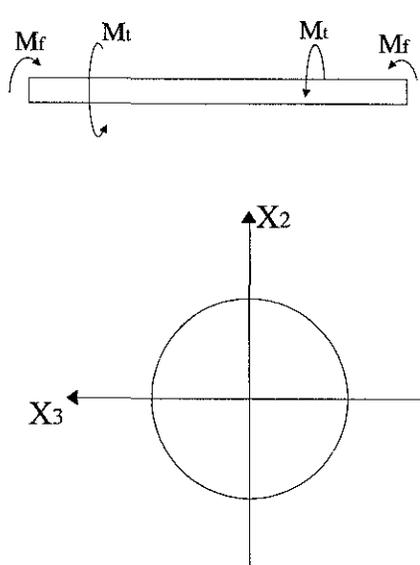
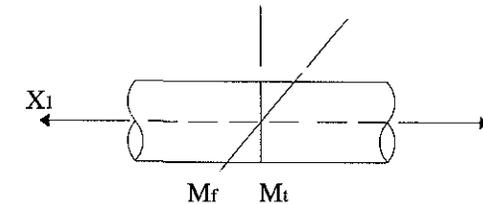
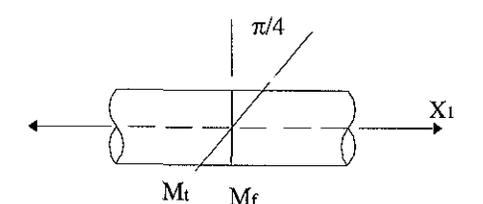
**(CONTINUACIÓN)**  
**FLECHA: SOBRECARGA POR FLEXION PURA**

Angulo del plano principal de fractura	Característica de la superficie de falla
<p>Material frágil</p>  <p>La fractura se presenta sin evidencia de deformación plástica.                      No existen marcas de playa</p>	<p>Superficie brillante con aspecto de terrón de azúcar</p>
<p>Material dúctil</p> <p>Deformación adyacente a la zona de fractura.</p> <p>Zona superior semejante a la superficie que se produce en una falla a tracción, zona inferior característica de falla a compresión.</p> 	<p>La microestructura en una sección longitudinal indica flexión de fibras</p>

zz

**TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN**

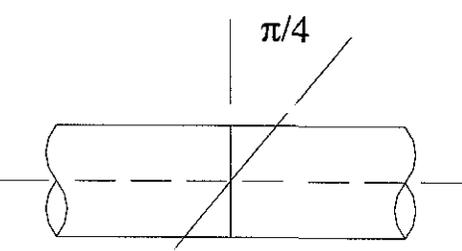
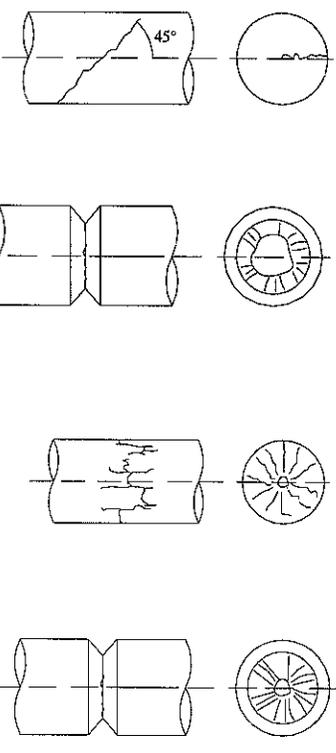
## FALLA POR SOBRECARGA

DIAGRAMA	ESTADO DE ESFUERZOS	ASPECTO
 <p>The diagram shows a horizontal beam with bending moments <math>M_t</math> and torsional moments <math>M_f</math> applied at both ends. Below it, a Mohr's circle is plotted in the <math>X_2</math>-<math>X_3</math> plane, centered at the origin.</p>	$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{M_f x_2}{I} & -\frac{M_t x_3}{I_p} & \frac{M_t x_3}{I_p} \\ -\frac{M_f x_3}{I_p} & 0 & 0 \\ \frac{M_t x_2}{I_p} & 0 & 0 \end{pmatrix}$ $\sigma = \frac{M_f R}{I_p} \pm \frac{2R}{I_p} [M_f^2 + M_t^2]^{\frac{1}{2}}$ <p>Angulo de Esfuerzos principales de <math>0^\circ</math> a <math>45^\circ</math> con respecto al plano normal a "X<sub>1</sub>"</p> $\sigma_{\max} = \frac{2R}{I_p} [M_f^2 + M_t^2]^{\frac{1}{2}}$	<p>Dúctil</p>  <p>Aspecto Opaco Fibroso Microcavidades</p> <p>Frágil</p>  <p>Aspecto Brillante Rugoso Granular Marcas de rio Superficies de clivaje</p>

87

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

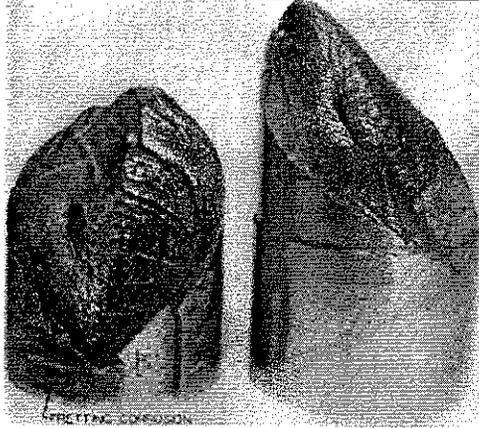
## FATIGA A TORSIÓN

DIAGRAMA	DESCRIPCIÓN GENERAL	ASPECTOS GENERALES
<p>Esfuerzo alternativo</p> $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_t R}{I_p}$ <p>orientación a 45° del plano normal al eje</p> 	<p>Las grietas de fatiga debidas a esfuerzos de torsión presentan las mismas marcas tipo concha y características superficiales que las debidas a fatiga por flexión, debido a que la grieta crece por normales máximos ésta tendera a orientarse a 45°.</p>	<p>Aspectos generales de fallas típicas por fatiga a torsión.</p>  <p>(a)</p> <p>(b)</p> <p>(c)</p> <p>(d)</p> <p>a) Patrón de falla por fatiga a torsión  b,d) Efecto de la presencia de concentradores de esfuerzo  c) Esfuerzos nominales bajo corrimiento axial y transversal  d) Concentrador de esfuerzo, bajo nivel de sollicitaciones</p>

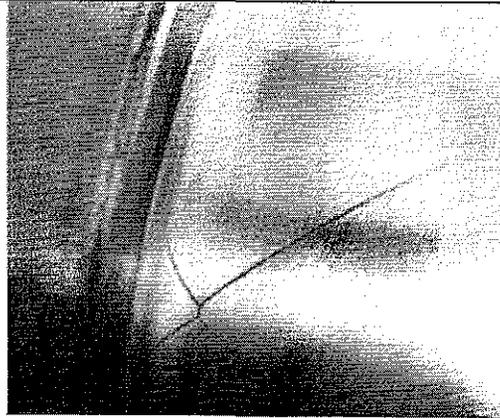
64

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

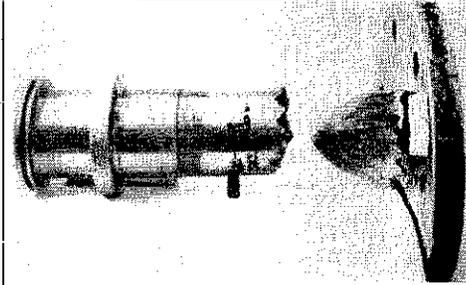
## FATIGA A TORSIÓN



Aspecto de la fractura de una flecha sometida a torsión con inversión de esfuerzos



Fractura por fatiga en flecha sometida a torsión



Geometría de la grieta por fatiga a torsión en una flecha de acero 1045

Brillante

Rugoso

Granular

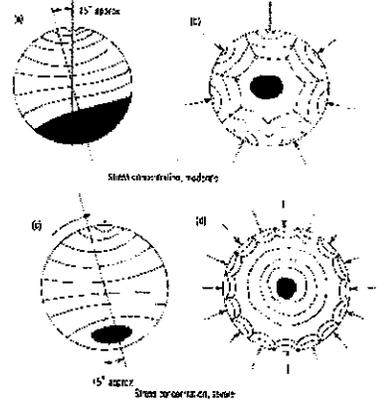
Marcas de río

Superficies de clivaje

28

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

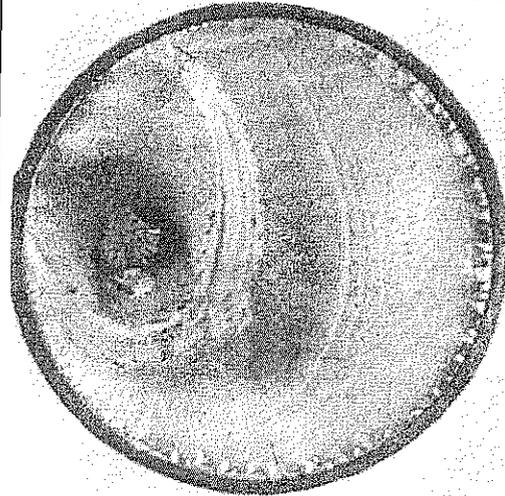
## FATIGA A FLEXIÓN ROTATORIA

ESFUERZOS	DESCRIPCIÓN GENERAL	ASPECTO
<p>Esfuerzo alternativo</p> $\sigma_f = \frac{M_f R}{I}$	<p>La grieta se inicia por uno o varios puntos de la periferia y se extiende en dirección opuesta a la de rotación con un retardo de 15° o más.</p>	<div style="text-align: center;">  </div> <p>Aspectos de la superficie de fractura en función de la concentración de esfuerzos                      (a,b) Baja a moderada.                      (c,d) Severa                      y considerando un punto de inicio de la grieta de fatiga (a,c) y múltiples zonas de inicio (b,d) la rotación es en dirección de las manecillas del reloj</p>

18

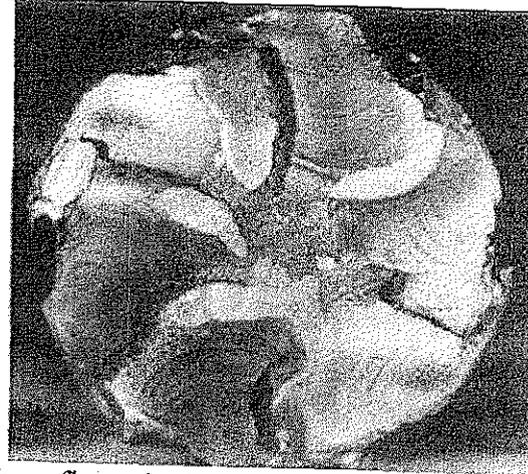
TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

## FATIGA A FLEXIÓN ROTATORIA



Aspecto de la superficie de fractura de una flecha de acero 1045 templado y revenido (35Rc)

El patrón concéntrico de las marcas de concha indican que la carga no estaba balanceada.



Superficie de fatiga la cual se genera a partir de 6 puntos diferentes en la periferia. Acero 4817 cementado y templado a 60 Rc

28

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN