

61



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

*DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO PARA
ANALISIS DE FALLAS EN COMPONENTES MECANICOS*

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO EN COMPUTACION**

P R E S E N T A N:

**RAUL LOPEZ LOPEZ
VICTOR EDUARDO ROSAS ACOSTA**

Director de Tesis: Dr. Arturo Reinking Cejudo



MEXICO, D. F.

2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: López López Pablo

FECHA: 26. Ago. 2002

FIRMA: [Firma manuscrita]

A mis padres.

Doy gracias a Dios por darme la oportunidad de tenerlos a mi lado, de poder cumplir uno de mis objetivos en la vida y de poder compartir este triunfo personal con ustedes mis padres, Refugio y Teresa López, igualmente con mis hermanos Eduardo, Adriana y Victor, mis sobrinos Eric y Jessica y mi cuñada Laura, dárles a todos las gracias por todo el apoyo, los consejos y la comprensión que me brindaron durante este tiempo, por otra parte también un especial agradecimiento a E, Z y S, decirles a todos que tenerlos a mi lado me hacen una persona mas fuerte y feliz, esperando que sigamos estando unidos en todo momento, aquí y en el lugar que nos hiciste favor de enseñar madre, en el cual estaré orgulloso de pertenecer con todos ustedes.

De igual manera le doy las gracias a cada uno de los profesores que depositaron en mi su confianza y de transmitirme su conocimiento, de agradecerles a cada uno de ellos todos sus consejos y de darme el apoyo incondicional durante mi trayectoria académica.

También a cada uno de mis compañeros de la FI, Félix, Rolando, Miguel, Arturo, Joel y todos los que me faltan, por estar conmigo apoyándome en todo momento para poder seguir trabajando y superando cada uno de mis objetivos y nuevos retos, y en especial a mi compañero de tesis Eduardo, gracias por el apoyo obtenido de su parte, y que esto sea solo el primer logro de todos los planes y objetivos que tendremos mas adelante.

*Gracias a todos por estar conmigo.
Su hijo, su hermano
Y su amigo Raúl.*

A mi Madre:

*Gracias por darme la vida, por guiarme por el buen camino.
Gracias por creer en mí, por cuidarme en mis enfermedades.
Gracias por celebrar mis triunfos, por darme un regaño cuando era necesario, por estar conmigo.
Gracias por muchas cosas y etapas de mi vida, que por el momento no recuerdo.
Pero que tú, siempre llevaras . . . en tus recuerdos.*

Con cariño y respeto a: GUADALUPE ACOSTA MANCILLA

A mi Abuelita:

Porqué sabes que para mí, eres como otra Madre. Gracias por tus consejos, sabiduría y experiencia que compartes conmigo.

Con cariño y admiración a: ENRIQUETA MANCILLA CAMACHO

A mi hermana Jacqueline:

Por crecer juntos. Por que sigas siendo la niña que eres. Y conserves ese buen corazón.

Al Ing. Juan Gerardo Acosta Mancilla:

Por el ejemplo; porque cuando algo se quiere y se desea, se logra. Gracias por brindarme tu ayuda.

A Mis Tíos y Primos:

Por preocuparse por mí, por sus consejos, por su ayuda incondicional.

Para alguien especial:

*Para alguien especial que llegó; de manera inesperada, sin pensarlo, sin buscarla; sólo llegó.
Para alguien especial que llegó; y me cautivó con su alegría, y la sonrisa de sus labios.
Para alguien especial que sabe cuando ser mujer, y cuando niña.
Para alguien especial que me enseñó lo que no sabía, y me despertó a lo que ya sabía.*

Para alguien especial; porqué sigas siendo así... especial.

A mis Amigos:

De los que aprendí mucho, por estar siempre en las buenas y en las malas. Por compartir horas de desvelo, trabajo y triunfos.

Victor Eduardo Rosas Acosta

A la Universidad

A la Facultad de Ingeniería

Al Centro de Diseño y Manufactura (CDM)

Al M. en I. Armando Ortiz Prado, experto en análisis de falla. Por el conocimiento brindado en el presente trabajo.

A Marco Antonio Ramírez Rodríguez, por el apoyo brindado en el acceso al material e ideas relacionados con el análisis de falla.

Y muy en especial al Dr. ARTURO REINKING CEJUDO por su acertada dirección en el presente trabajo. Gracias por el apoyo recibido en todo momento.

*Todo tiene un principio y un fin.
Pero siempre ... siempre hay un sol,
y una cima más alta que alcanzar.*

iarei

PRÓLOGO	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 ANTECEDENTES.....	3
1.2 OBJETIVO.....	3
1.3 ALCANCES.....	3
2. SISTEMAS EXPERTOS	5
2.1 HISTORIA.....	5
2.2 RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS.....	5
2.3 REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO.....	8
2.4 LOS SISTEMAS EXPERTOS.....	8
2.4.1 <i>Diferencias entre experto humano y experto artificial</i>	9
2.4.2 <i>Características esenciales</i>	10
2.4.3 <i>Características deseables</i>	11
2.4.4 <i>Clasificación de Sistemas Expertos</i>	12
2.5 LOS SISTEMAS EXPERTOS Y SU ENTORNO.....	12
2.5.1 <i>Lenguajes de representación del conocimiento</i>	13
2.5.2 <i>Reglas</i>	13
2.5.3 <i>Representación del conocimiento mediante reglas</i>	13
2.5.4 <i>Mecanismos de inferencia para reglas</i>	14
2.6 COMPONENTES QUE FORMAN UN SISTEMA EXPERTO.....	16
2.7 CÓMO SE CONSTRUYEN LOS SISTEMAS EXPERTOS.....	17
2.7.1 <i>La base de conocimientos</i>	17
2.7.2 <i>La máquina inferencial</i>	18
2.8 TIPOS DE SISTEMAS EXPERTOS.....	19
3. ANÁLISIS DE FALLA	21
3.1 DEFINICIÓN DE RESISTENCIA Y FRACTURA.....	21
3.1.1 <i>Los factores que afectan a las fallas</i>	22
3.2 FUENTES FUNDAMENTALES DE FALLAS.....	22
3.2.1 <i>Deficiencia en la Selección del Material</i>	24
3.2.2 <i>Deficiencias en el Diseño</i>	24
3.2.3 <i>Cambios en el Diseño</i>	25
3.2.4 <i>Selección del Material</i>	25
3.2.5 <i>Deficiencias en la Manufactura</i>	25
3.2.6 <i>Fallas como Resultado de la Fragilización</i>	26
3.2.7 <i>Arietamientos por Corrosión Bajo Tensión</i>	26
3.2.8 <i>Fallas Resultantes de Daños en Servicio</i>	26
3.3 MECANISMOS DE FALLA.....	27
3.3.1 <i>Identificación del Tipo de Fallas</i>	27
3.3.2 <i>Fracturas Dúctiles</i>	30
3.3.3 <i>Fracturas Frágiles</i>	31
3.3.4 <i>Fallas por Fatiga</i>	31
3.3.5 <i>Fallas por Deformación</i>	32

3.3.6 Fallas por Desgaste.....	33
3.3.7 Fallas por Frotación.....	33
3.3.8 Agrietamiento por Corrosión Bajo Tensión.....	34
3.3.9 Fluencia (o Termofluencia) "Creep".....	34
3.4 PRÁCTICA GENERAL DEL ANÁLISIS DE FALLA.....	35
3.4.1 El Propósito General del Análisis.....	35
3.4.2 Estado del Análisis.....	35
3.4.3 Recopilación de Información de Respaldo así como de la Historia de Servicio.....	36
3.4.4 Examen Preliminar de las Partes en las que se ha Presentado Falla.....	37
3.4.5 Determinación del Tipo de Fractura.....	37
3.4.6 Registro Fotográfico de las Partes que han Sufrido Fallas.....	38
3.4.7 Ensayos.....	38
3.4.8 Ensayos Mecánicos.....	39
3.4.9 Selección, Conservación y Limpieza de la Superficie de Fractura.....	40
3.4.10 Análisis Volumétrico del Material.....	42
3.4.11 Análisis y Determinación del Mecanismo de Fractura.....	42
3.4.12 Pruebas de Simulación de Servicio.....	42
3.4.13 Análisis de los Resultados y Formulación de las Conclusiones.....	43
3.4.14 Redacción del Reporte.....	44
3.4.14 Conservación de los Registros.....	44
4. SELECCIÓN DE RECURSOS.....	46
4.1 ANÁLISIS DE RECURSOS.....	46
4.1.1 Bases de Datos.....	47
4.1.2 Lenguajes de Programación.....	48
4.1.3 Sistemas Operativos.....	49
4.1.4 Shells para Sistemas Expertos.....	50
4.2 SELECCIÓN DE RECURSOS A UTILIZAR.....	51
4.2.1 Base de Datos Access 2000 como DBMS.....	51
4.2.2 Visual Basic 6.0 como entorno de desarrollo.....	51
4.2.3 Visual Rule Studio como Máquina de Inferencias.....	52
4.2.4 Windows 95 como Sistema Operativo.....	52
4.2.5 Metodología de Desarrollo.....	53
4.2.6 Técnicas de Adquisición de Conocimiento.....	53
5. ANÁLISIS.....	55
5.1 REQUERIMIENTOS (MÓDULOS).....	55
5.1.1 Requerimientos operativos generales.....	55
5.1.2 Requerimientos Funcionales.....	56
5.2 ANÁLISIS DETALLADO.....	58
5.2.1 Diagrama de Contexto.....	58
5.2.2 Diagrama Jerárquico Funcional.....	60
5.2.3 Diagrama de Flujo de Datos.....	61

6. DISEÑO Y DESARROLLO	68
6.1 MENÚ DEL SISTEMA	68
6.2 MÓDULO DE ANÁLISIS DE FALLA	69
6.2.1 <i>Pantalla principal</i>	69
6.2.2 <i>Catálogo de fallas</i>	71
6.2.3 <i>Concentrador de esfuerzos</i>	72
6.2.4 <i>Cálculo de esfuerzos</i>	72
6.3 MÓDULO DE SEGURIDAD	75
6.3.1 <i>Clave de acceso</i>	75
6.3.2 <i>Catálogo de usuarios</i>	76
6.3.3 <i>Cambio de contraseña</i>	76
6.4 MÓDULO DE REPORTES	77
6.5 MÓDULO DE AYUDA	78
CONCLUSIONES	79
A. BASE DE CONOCIMIENTOS	81
A.1 VISUAL RULE STUDIO Y VISUAL BASIC	81
A.2 CÓDIGO DE LA BASE DE CONOCIMIENTOS	83
B. CÓDIGO FUENTE	89
C. CÁLCULO DE ESFUERZOS	95
C.1 SISTEMA DE REFERENCIA	95
C.2 FÓRMULAS	95
BIBLIOGRAFÍA	101

Prólogo

El concepto de Inteligencia Artificial y en particular el de Sistemas Expertos se ha venido desarrollando desde principios de la década de los setenta, 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.

La técnica ha sido tanto minimizada como sobrevaluada, ya que en sus inicios se llegó a idealizar pensando en sistemas que pudieran sustituir al médico, al abogado, al ingeniero; 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, dando como consecuencia un empleo cada vez más intenso; en ocasiones como colega y en otras como experto.

En particular la implementación de un Sistema Experto es conveniente cuando no existe un modelo matemático preciso. Además de que en este tipo de problemas la experiencia es determinante en el tiempo y recursos necesarios, así como la confiabilidad de la solución. Otro aspecto que conlleva a los Sistemas Expertos, es la falta de expertos humanos en el área o bien, cuando su apoyo resulta oneroso.

En el diseño de elementos metálicos mecánicos se requiere de la disponibilidad de datos sobre las propiedades mecánicas, así como de la simulación de las condiciones de trabajo. Esto implica inversión de tiempo y recursos económicos. Por otra parte, las propiedades de los materiales no son uniformes, ni siquiera en un mismo lote de producción; las condiciones de servicio tampoco son invariantes con el tiempo, además de que muchos parámetros ambientales y de daño acumulado no siempre son predeterminados correctamente o, en ocasiones ni siquiera son considerados. Esto da lugar a fallas, entendiéndose como tal; no sólo la fractura del material, sino la incapacidad de la pieza o sistema para cumplir adecuadamente con la función para la que fue diseñada.

El Análisis de Falla permite corregir el comportamiento del material o elemento mecánico evitando de esta manera que se presenten futuros inconvenientes, incrementando entonces la confiabilidad y disminuyendo los costos. En el Análisis de Falla, es indudable que sus resultados no son exactos y dependen en gran porcentaje de la experiencia del experto. Esto no solamente se aplica desde el punto de vista de las conclusiones sino 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 desprendan.

CAPÍTULO

1

1. Introducción

En este capítulo introductorio se verá el propósito de la realización de esta tesis.

El presente trabajo, se plantea como respuesta a una necesidad de contar con un elemento de software (Sistema Experto); a partir del cual se puedan emitir conclusiones en torno a un tipo de falla presentada en un elemento mecánico, en específico de *ejes de transmisión*.

El Sistema Experto, se basará en el conocimiento y experiencia de un experto humano en el Análisis de Falla en elementos metálicos mecánicos, dicho Análisis de Falla es una herramienta que correctamente empleada permite establecer, con un bajo margen de error, la causas que provocan que los sistemas no cumplan con las funciones, para las cuales fueron diseñados. Pudiendo de tal forma, prever en futuros diseños mecánicos dichas fallas.

La factibilidad de determinar las causas de la falla en elementos sencillos sometidos a cargas uniaxiales, es elevada y simple; ya que las características de las zonas de falla son fácilmente identificables. En las situaciones donde los elementos mecánicos se someten a solicitaciones triaxiales, además de condiciones dinámicas de carga, variaciones de temperatura, desgaste y corrosión; la determinación de la causa de la falla se vuelve compleja requiriendo de uno o más expertos en el Análisis de Falla.

Cuando el dominio del conocimiento está concentrado en pocas personas, se necesita recurrir a ellos para solucionar problemas complejos, que para los expertos humanos dichas complejidades se llegan a volver una rutina; lo anterior en base a sus experiencias. Pero hay ocasiones en que este conocimiento no está al alcance de todos, por lo que se tiene que obtener por otros medios.

De lo expuesto en párrafos anteriores, se presenta la conveniencia y factibilidad de desarrollar el proyecto; denominado: *Sistema Experto para el Análisis de Falla en Elementos Mecánicos (SEAFEM – Módulo ejes de transmisión)*. El cual pueda actuar como colega o como experto dependiendo de la complejidad del problema. Cabe señalar que el sistema total, contempla la expansión a más elementos metálicos mecánicos (engranes, pernos, resortes, miembros estructurales).

SEAFEM contendrá el conocimiento necesario y los mecanismos para aplicarlo con el fin de simular la labor del experto ante determinadas situaciones. Dicho conocimiento será extraído de un experto humano. SEAFEM – Módulo de ejes de transmisión, será desarrollado en conjunto con el grupo de expertos humanos; del Centro de Diseño y Manufactura, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El trabajo se encuentra dividido en seis capítulos: Introducción, Sistemas Expertos, Análisis de Falla, Selección de Recursos, Análisis, Diseño y Desarrollo.

El primer capítulo nos presenta un panorama de la necesidad de desarrollar dicho Sistema Experto, objetivo y alcances.

El segundo capítulo hace referencia al marco teórico de los Sistemas Expertos.

El tercer capítulo se ocupa de una breve pero completa visión del Análisis de Falla. Como se verá: son muchos los factores que intervienen en concluir el tipo de falla que pueda tener un elemento mecánico, por lo que este campo es muy susceptible de ser abordado por medio de sistemas expertos.

A partir del capítulo cuatro y los subsecuentes se aborda y se describe la forma en la cual se eligió la estrategia de solución, selección de recursos, análisis, diseño y desarrollo de SEAFEM.

Finalmente se presentan las conclusiones, así como tres anexos A, B y C incluyendo respectivamente, la base de conocimientos, parte del código fuente del sistema y un análisis de cálculo de esfuerzos.

1.1 Antecedentes

La inquietud por desarrollar este trabajo y presentarlo como tesis, nació de la invitación hecha por Ingenieros del Centro de Diseño y Manufactura, de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, a colaborar en el grupo de trabajo que se había planteado la necesidad de contar con un sistema de software, el cual pudiera resolver la problemática con la que se encontraban. Es decir, un Sistema Experto en Análisis de Falla.

1.2 Objetivo

Proponer una alternativa de solución a través de un Sistema Experto que permita dar una conclusión de las causas que originaron la falla, así como la o las posibles medidas a tomar para que dicha falla no se vuelva a presentar o en su defecto, no se presente con la misma regularidad.

1.3 Alcances

El presente proyecto, tiene como propósito principal la obtención de un Sistema Experto, que permita establecer una conclusión referente a las causas que originaron que dicha falla. Se presentara, además de las acciones y medidas a tomar para que no se vuelva a presentar la falla.

El proyecto sólo abarca el módulo referente a ejes de transmisión.

La determinación del tipo de falla, así como las causas y acciones a seguir serán, evaluadas, a partir de dos niveles.

El primero; a partir de datos generales de la pieza en estudio, además de una inspección visual de la misma, proporcionando como primer salida una recomendación de pruebas a realizar en función de los datos proporcionados por el usuario.

El segundo, el cual no es tratado en este tema de tesis, pero que a partir de los resultados obtenidos de las pruebas recomendadas en el primer nivel, se ingresaran al sistema para verificar o bien descartar la conclusión que se tenía en ese primer nivel, obteniendo como salida de este segundo nivel, una recomendación de las acciones a llevar a cabo para que la falla no se vuelva a presentar, las causas que lo originaron, entre otras.

Este segundo nivel de análisis se recomienda sea tratado en otro tema de tesis. Pudiendo con ello realizar una extensión de la versión actual de SEAFEM.

CAPITULO

2

2. Sistemas Expertos

El objetivo de este capítulo es analizar el concepto de sistemas expertos. Sería satisfactorio que se pudiera empezar con una definición exacta que sirviera como punto de partida. Sin embargo la Inteligencia Artificial es una disciplina tan novedosa – no tiene siglos de antigüedad sino tan sólo unos decenios – y los sistemas expertos son una aplicación tan reciente de esta disciplina, que no ha habido tiempo suficiente para que cristalice su terminología. Los conceptos de este campo todavía están en proceso de cambio y sus límites son difusos. En las siguientes secciones se profundiza sobre estos conceptos para una mejor comprensión de los sistemas expertos.

2.1 Historia

A la gente siempre le ha fascinado la idea de los artefactos inteligentes. Pero con la llegada de las computadoras durante la Segunda Guerra Mundial, por primera vez fue plausible la inteligencia creada por el hombre. En 1950 Alan Turing publicó su artículo *Can a Machine Think?* (¿Puede pensar una máquina?) mostrando así que el tema era legítimo, al menos para la especulación filosófica. Pero mientras que su interés era el de un lógico y matemático, el de los científicos en computación era mucho más práctico. Al verse cuán fácilmente podrían utilizarse las computadoras para resolver problemas que les resultaban demasiado tediosos a los seres humanos, comenzó a especularse si también podrían usarse para resolver aquellos que las personas encontraban en extremo difíciles. De la especulación se pasó a los experimentos, y transcurridos otros seis años surgieron los primeros programas de inteligencia artificial. Los éxitos iniciales alentaron a la investigación: en pocos años ya existían programas que jugaban ajedrez y damas, demostraban teoremas de lógica y geometría, resolvían integrales y aprendían conceptos, en suma efectuaban tareas que hasta entonces eran privativas del hombre. Había nacido la Inteligencia Artificial (IA).

Algunos aclamaron a la IA como al más grande avance jamás visto por la humanidad, y vieron el día – en un futuro no muy lejano – en que las computadoras podrían ayudar al pensador de la misma forma en que las máquinas ayudan al obrero.

El primer logro significativo llegó con el GPS (General Problem Solver) un programa creado por Newell, Shaw y Simon en 1957. Dicho programa podía resolver rompecabezas y adivinanzas – como misioneros y caníbales o Torres de Hanoi – y abordar problemas significativos, como la demostración de teoremas en el cálculo de predicados. El GPS, como lo sugiere su nombre, se creó para servir como resolvidor general de problemas (donde general significa independiente del campo de actividad). Aunque tuvo éxito en ciertas áreas, existían muchos problemas que no podía resolver.

2.2 Resolución de problemas

El interés en los modelos del conocimiento humano y en los artefactos inteligentes tienen una finalidad práctica: la resolución de problemas. Según se espera, lo que pueda aprenderse de ambos proporcionará la capacidad para resolver problemas de una mejor manera. Pero, ¿qué hace el ser humano o los programas para resolver problemas?

Así comenzó un proceso de exploración que aún continúa, pero incluso el corto trecho que se ha recorrido proporciona un mejor panorama de este tema fascinante.

Ahora se sabe que la gente utiliza varios métodos diferentes para resolver problemas. Al más sencillo de ellos podría llamarse *método algorítmico*. Este método se usa diariamente. Todas las personas poseen algoritmos ya preparados para resolver problemas tales como atar las agujetas de los zapatos, multiplicar números, planear unas vacaciones, hacer una llamada telefónica, resolver ecuaciones simultáneas y conducir un automóvil. Algunos algoritmos son muy sencillos, y otros bastante complejos, pero todos ellos están formados por secuencias de acciones — las cuales tal vez incluyen puntos de decisión o de bifurcación — que deben descubrirse o aprenderse.

Hasta cierto punto, estos problemas son bastante rutinarios. Los problemas interesantes a menudo no poseen soluciones algorítmicas; sin embargo, es necesario resolverlos. Cuando no se dispone de una solución preparada, se recurre a la exploración por ensayo y error. Dependiendo del grado de sistematización que se utilice, el método puede variar de lo errático a lo riguroso: puede conducir a que se hagan algunos intentos al azar para llegar a la solución, o bien a que se examinen metódicamente todos los pasos posibles. Su forma más rigurosa se conoce como *método de generación y prueba*. La idea que le sirve de sustento es muy simple: se generan soluciones factibles para el problema y se prueba la aceptabilidad de cada opción. El método es poderoso en el sentido de que si existe una solución se tiene también la garantía de encontrarla, pero existe el peligro de que se presente una *proliferación de combinaciones*: podrían haber más casos por generar y probar, que los recursos para hacerlo.

En la práctica es necesario restringir el número de casos que se generan y prueban. La restricción puede variar. En un método se usan criterios de evaluación que permiten ignorar subconjuntos de opciones. Esta forma de restricción se utiliza con frecuencia en los programas de juegos electrónicos para "podar" el árbol de posibilidades. Mientras que este método evita la generación de opciones, en otro método se emplean criterios de evaluación similares para influir sobre la generación de nuevas opciones. Este es el método que se utiliza en los algoritmos por eliminación, en los que cada nueva opción debe ser mejor que la anterior para que sea tomada en cuenta. También esto reduce el número de opciones generadas. Los ejemplos anteriores son sólo dos entre muchas posibilidades, pero comparten con ellas el mismo objetivo: hacer que la variedad del ámbito de solución esté dentro de las capacidades de la máquina.

La variante más atrayente es un tercer método en el que la restricción proviene del conocimiento de la situación. Esta es la forma en que los sistemas expertos evitan la proliferación de combinaciones.

Sistema experto como su nombre lo dice es un sistema computarizado que emula el proceso de razonamiento de un experto humano en un área o campo específico.

Este área o campo puede estar en cualquiera de las siguientes categorías:

- Interpretación e identificación
- Predicción
- Diagnóstico
- Diseño
- Planeación
- Monitoreo
- Depuración de información
- Instrucción y entrenamiento
- Control

Los programas convencionales utilizan datos exactos lo que es una indudable ventaja de las computadoras. Esta clase de datos se denomina *conocimiento factual o preciso*.

Los humanos usamos una mezcla de ese conocimiento factual y de *conocimiento heurístico* (o sea la intuición lógica), que es una indisputable ventaja de los humanos. Los sistemas expertos tratan de emular ese conocimiento heurístico, lo que los hace superiores a los programas convencionales ya que pueden tratar con datos "inciertos", o sea no precisos.

Los sistemas expertos son bastante específicos en su campo de acción. Por ejemplo si se desarrolla un sistema experto caza-fallas para Radioayudas, no se puede pretender que este sistema se aplique para diagnóstico medica. Sin embargo, en el desarrollo de este sistema experto caza-fallas, la base de conocimientos debe ser diferente para cada radioayuda y aun diferente para cada modelo.

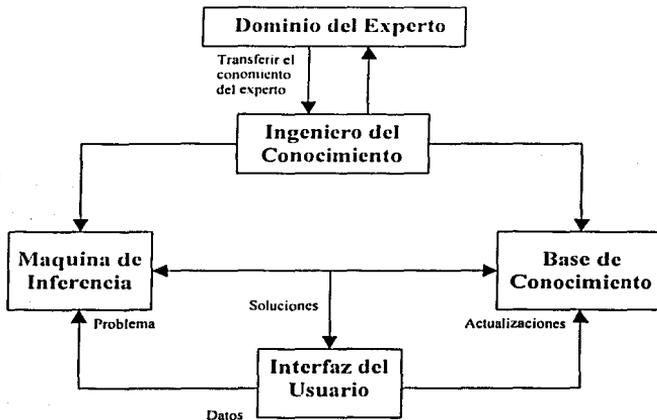


Figura 2.1 Estructura del sistema experto

Básicamente el Sistema Experto esta compuesto por los siguientes módulos:

1. Base de conocimientos: Consiste en las reglas, procedimientos y datos intrínsecos al área del problema. Generalmente se construye a través de consulta con uno o varios expertos del área, para incluir el *conocimiento heurístico*, manuales, base de datos, etc.
2. Motor de inferencia: Es el mecanismo usado para extraer el conocimiento de la base de conocimientos, para alcanzar una solución o conclusión determinada.
3. Interfase con el usuario: Es el medio de comunicación entre el sistema experto y el usuario.

2.3 Representación del Conocimiento

Como hablamos mencionado antes existen dos clases de conocimiento a tratar:

1. Conocimiento factual, o sea aquel que por naturaleza es preciso y libre de "ruido". Se caracteriza también por ser objetivo y fácil de representar.
2. Conocimiento heurístico, es el conocimiento que usamos intuitivamente pero en forma conciente. No es preciso ya que generalmente es subjetivo y es difícil de representar.

Existen varias maneras de representar el conocimiento, tales como:

- Redes semánticas
- Marcos
- Reglas de producción
- Lógica de predicados
- Libretos
- Híbridos

En la construcción de los sistemas expertos el modelo más usado es el de las reglas de producción por su versatilidad. Sin embargo recientemente los modelos híbridos, o sea la combinación de algunos de los modelos, han tenido mucho éxito en su aplicación, especialmente para la representación del conocimiento heurístico.

Las reglas de producción generalmente son escritas en la forma IF-THEN, donde:

- IF premisa, THEN conclusión
- IF entrada, THEN salida
- IF condición, THEN acción
- IF antecedente, THEN consecuente
- IF datos, THEN resultados
- IF acción, THEN meta.

La parte IF generalmente contiene varias cláusulas unidas por los conectivos lógicos AND, OR. La parte THEN consiste en una o más frases que especifican la acción a tomar.

2.4 Los sistemas expertos

Los Sistemas Expertos son programas que simulan el comportamiento de expertos humanos a la hora de resolver problemas. Por norma general, los expertos solucionan los problemas de su especialización basándose en la experiencia. Muy brevemente, esta experiencia consta de hechos y de soluciones de problemas de tal forma, que sean almacenados en una computadora y procesables por un programa. Por lo tanto, los Sistemas Expertos son programas para computadora, en los que se han reflejado conocimientos humanos. Pero ya que el conocimiento humano es extremadamente complejo, tenemos que limitarnos, en estas "imitaciones técnicas", a campos de especialización muy delimitados.

Los Sistemas Expertos son una clase relativamente joven de software. En su mayor parte sólo son realizables desde que se han desarrollado las herramientas y los métodos de software adecuados, con los que ha sido posible tratar el conocimiento. La investigación y el desarrollo de las técnicas apropiadas para la realización de Sistemas Expertos pertenece hoy al campo de la Inteligencia Artificial (IA). El conocimiento de los expertos es, en general, demasiado complejo y amplio para poder especificarlo primero en su totalidad e implementarlo luego en forma de software con los

métodos convencionales de desarrollo. La implementación del conocimiento de los expertos debe realizarse, más bien, de forma sucesiva, hay que comprobar, estructurar, mejorar y ampliar el conocimiento paso a paso.

Para la representación del conocimiento de los expertos, los formalismos tienen que ser claros, comprensibles, fáciles de modificar, eficientes y capaces de ser procesados por una computadora. Con estos formalismos deberíamos poder describir también, dado el caso, un conocimiento vago o ambiguo.

Al observar los Sistemas Expertos como una nueva técnica, hay que tener en cuenta que se trata de programas de computadora. Los programas no tienen nada de humano ni de místico. Están en situación de almacenar el conocimiento en forma de hechos, objetos y reglas, y de buscar respuestas dentro de este cúmulo de conocimientos, de forma casi inteligente. En esta "simple" capacidad superan al cerebro humano sólo en lo que atañe a cantidad de memoria, velocidad de búsqueda y procesamiento. A pesar de ello, los Sistemas Expertos quedan irremediabilmente sujetos al ser humano. Ni la creatividad, ni la originalidad ni la conciencia de irresponsabilidad son implementables como cualidades del sistema. Esto sigue siendo dominio del hombre.

Los Sistemas Expertos son sistemas auxiliares que pueden ofrecer una ayuda muy efectiva en los puestos de trabajo existentes. Los trabajos rutinarios se realizan con menos errores, las grandes cantidades de datos se analizan más rápidamente y las conclusiones complejas se captan con mayor claridad. Los Sistemas Expertos no son una amenaza, sólo por parecer técnicamente refinados y, por lo tanto, casi inteligentes. La sustitución de profesiones por máquinas que requieren intuición o tacto (camareros, vendedores, profesores) – o de alta calificación (científicos, médicos, ingenieros) – resulta inimaginable. Pero sí pueden verse apoyadas por unos buenos sistemas auxiliares – y este es precisamente el objetivo de los Sistemas Expertos.

Cuanta más responsabilidad, competencia e intuición requiera un puesto de trabajo, tanto más complejos deben ser los medios auxiliares para apoyar la labor. Parece entonces, que los Sistemas Expertos tienen un futuro técnicamente prometedor.

2.4.1 Diferencias entre experto humano y experto artificial

EXPERTO HUMANO	EXPERTO ARTIFICIAL
No perdurable	Permanente
Difícil de transferir	Fácil
Difícil de documentar	Fácil
Impredecible	Consistente
Caro	Alcanzable
Creativo	No inspirado
Adaptativo	Necesita ser enseñado
Experiencia personal	Entrada simbólica
Enfoque amplio	Enfoque cerrado
Conocimiento del sentido común	Conocimiento técnico

2.4.2 Características esenciales

La Inteligencia Artificial ofrece dos productos diferentes: modelos del conocimiento humano y artefactos inteligentes. Los sistemas expertos pertenecen a estos últimos. Fueron creados no tanto para modelar la manera en que los expertos resuelven problemas, y por consiguiente para entender mejor el funcionamiento del cerebro de un experto, sino con el objetivo práctico de cosechar los beneficios que aporta el pensamiento de los expertos integrado a un sistema de computación. La construcción de sistemas expertos equivale, en cierto sentido, a crear un modelo del pensamiento de los expertos, y esto permite producir mejores modelos de conocimiento. Tales modelos mejorados, obtenidos tal vez de un campo diferente, permiten a su vez construir mejores sistemas expertos, pero todo eso es la fase final del proceso.

Los artefactos inteligentes se producen primordialmente para resolver problemas, y ésa es la razón más importante para construir sistemas expertos. De los dos métodos principales para resolver problemas que utilizan los artefactos inteligentes, o sea los generales o independientes del campo de actividad y los especiales o específicos del campo de actividad, los sistemas expertos pertenecen a la segunda categoría, la de los específicos del campo de actividad. Una numerosa clase de estos métodos específicos del campo de actividad se apoya en el conocimiento obtenido de seres humanos expertos; tales métodos se conocen como *sistemas inteligentes basados en el conocimiento* (sus siglas correspondientes son KBS e IKBS, del inglés *knowledge-based systems e intelligent knowledge-based systems*). Los sistemas expertos forman una subclase de los sistemas basados en el conocimiento, subclase centrada en una sola área que se reduce a un solo campo de conocimiento especializado.

Si el sistema no está basado en el conocimiento, no debe denominarse sistema experto. La principal dificultad con este precepto es cómo diferenciar los sistemas basados en el conocimiento de los demás sistemas. Los profesionales consideran conocimiento todas las reglas, los hechos, las verdades, las razones y los datos heurísticos recopilados por expertos, que han resultado útiles en el campo de la resolución de problemas.

El campo de actividad en el que opera un sistema experto es un campo *particular*. Más aún, los campos de actividad de los sistemas expertos son áreas de conocimiento especializado, en contraste con el sentido común. Si el área de conocimiento especializado de los sistemas expertos es estrecha, igual lo es su ámbito. Estos sistemas se ocupan de un problema a la vez, abordan preguntas de sus usuarios u obtienen información de entrada mediante sensores, y a partir de los datos llegan a alguna clase de conclusión. En cierto sentido, un sistema experto es simplemente un enorme sistema de transformación, y las plantillas en las que está expresado su conocimiento son solamente reglas de transformación; no obstante, el poder de un sistema experto radica precisamente en estas reglas. Para llevar a cabo su trabajo, un sistema experto necesita efectuar relativamente pocos cálculos numéricos, pero mucho procesamiento simbólico. El procesamiento simbólico implica que los hechos, las observaciones y la hipótesis se representan mediante símbolos y se manipulan como tales. Mediante estas reglas de transformación es capaz de convertir sus datos de entrada en alguna conclusión.

Así en términos de características esenciales es posible ofrecer la siguiente definición funcional:

Un sistema experto es un sistema basado en el conocimiento que emula el pensamiento de los expertos para resolver problemas significativos en un campo específico de conocimiento especializado.

2.4.3 Características deseables

Aunque la definición funcional refleja lo esencial de un sistema experto, los sistemas expertos prácticos deben poseer, en la mayoría de los casos, otras características para que puedan ser utilizables.

Ante todo, un sistema experto debe funcionar bien en los problemas difíciles, si bien el requisito es prudente, no se le debe llevar al extremo: no es razonable esperar un mejor desempeño de un sistema experto que de alguien experto. Si se presenta el caso de que el sistema supere a los expertos, significa un beneficio adicional y no una expectativa correcta. Por supuesto, al estar instalado en una computadora puede esperarse que esté disponible y plenamente funcional las 24 horas del día, que no se canse, que no sufra de desgano el lunes por la mañana, ni de impaciencia los viernes por la tarde; pero no se puede esperar legítimamente que todas sus respuestas sean siempre correctas, y menos aún pedir una demostración de su veracidad. Cuando se recurre a una persona experta no se reciben tales garantías o demostraciones.

El segundo requisito práctico es que el sistema debe ser eficaz. Anteriormente se observó que el campo de actividad de un sistema experto está claramente delimitado. La razón de esto es que en la actualidad se requiere de mucho esfuerzo para adquirir, clasificar y corregir incluso el conocimiento en un campo de actividad estrecho. Actualmente se realizan investigaciones en esta área tan urgente de las aplicaciones de la Inteligencia Artificial, la de *adquisición del conocimiento*, pero hasta que no se encuentren mejores métodos es necesario esforzarse por lograr un equilibrio bastante delicado: mantener el campo de actividad lo suficientemente estrecho para que sea funcional y sin embargo lo suficientemente amplio para que sea útil.

El tercer requisito proviene del hecho de que los sistemas expertos interactúan con los seres humanos: plantean preguntas, emiten conclusiones y dan opiniones. Para hacer esto con eficacia, el sistema debe conversar en términos que el usuario pueda comprender y en términos relevantes al problema en cuestión.

Sin embargo, el siguiente requisito es fundamental. Los sistemas expertos deben ser capaces de justificarse, particularmente en tres aspectos. En primer lugar, y el más importante, un sistema debe ser capaz de explicar cómo extrajo sus conclusiones a partir de los datos proporcionados, ya que la explicación permitirá al usuario ya sea corregir su propia opinión del caso o rechazar la del sistema, al menos recibirá la suficiente información para hacer una cosa o la otra de manera sensata. El segundo requisito, y que a veces resulta igualmente importante, es que el sistema sea capaz de explicar por qué necesita un dato en particular. El usuario querrá saber esto en los casos donde la obtención de la información sea costosa. Si cuenta con dicha facilidad, el usuario podrá evaluar el mérito de cada caso y tomar una decisión en consecuencia. El tercer requisito en esta área no es absoluto, pero puede resultar sumamente útil. Consiste en la capacidad del sistema para explicar por qué no ha llegado a una determinada conclusión, por que no ha hecho una recomendación en particular. Esta clase de información en ocasiones puede ser más reveladora que cualquier otra información de salida.

También existen requisitos en cuanto a la manera en que debe elaborarse la base de conocimientos. Los sistemas expertos, al igual que las obras de arte, jamás están terminados, simplemente están abandonados, y serán abandonados con rapidez si no existe un mecanismo fácil para modificar y aumentar su base de conocimientos.

2.4 Clasificación de Sistemas Expertos

Clasificación jerárquica:

1. Análisis (interpretación)

- Identificación
- Monitoreo
- Diagnóstico
- Predicción
- Control

2. Síntesis (construcción)

- Especificación
- Diseño
- Configuración
- Planeación
- Ensamble
- Modificación

2.5 Los Sistemas Expertos y su entorno

El mayor capital de un departamento de desarrollo de Sistemas Expertos está en los *shells* y en las herramientas, con las que se crean estos sistemas. Un shell es lo que queda cuando se le extrae el conocimiento almacenado en la base de conocimientos. – shell significa concha. De esta forma es posible utilizar un shell con varias bases de conocimientos. Los problemas que pueden solucionarse con Sistemas Expertos, son demasiado distintos entre sí. Por ello siempre hace realizar adaptaciones específicas para cada proyecto. No es el shell el que marca la forma de procesar el conocimiento basándose en las posibilidades técnicas, sino el experto, que decide cómo y en qué secuencia se procesa el conocimiento. Pues el Sistema Experto tiene que adaptarse al comportamiento del experto y no a la inversa. El experto ha de poder reconocer su forma habitual de trabajo. A menudo resulta también ser el usuario del Sistema Experto. El experto no es sustituido, sino sólo apoyado en parte de su trabajo diario por la experiencia acumulada en la base de conocimientos.

La realización técnica de Sistemas Expertos precisa de unas herramientas y de unos métodos apropiados:

- Los llamados lenguajes de representación del conocimiento permiten una representación sencilla, clara y compresible del conocimiento.
- La separación sistemática del conocimiento y de su control.
- Herramientas especiales de software para la implementación, verificación, modificación y ampliación del conocimiento.

2.5.1 Lenguajes de representación del conocimiento

El conocimiento de los expertos debe formularse de tal forma, que pueda ser almacenado en computadoras y procesado y analizado por programas. Esta imagen del conocimiento recibe el nombre de *Representación del conocimiento*.

Los lenguajes de representación del conocimiento son herramientas auxiliares que permiten una representación clara y comprensible del mismo. Actualmente, la mayoría de ellos hacen una clara distinción entre el conocimiento y su procesamiento. Una de las divisiones nos permite diferenciar entre un conocimiento descriptivo (declarativo) y otro de conclusión. La parte declarativa y fácilmente representable del conocimiento se separa de las conclusiones que se extraen con el mismo.

Existen unos mecanismos de procesamiento que valoran el conocimiento y extraen conclusiones de la parte declarativa. Los lenguajes de representación del conocimiento se describen mediante:

- La cantidad de los formalismos disponibles en cada paso para la representación del conocimiento
- El funcionamiento de los correspondientes mecanismos de valoración.

No existe un formalismo estándar para la representación. La razón salta a la vista: los formalismos necesarios para representar el conocimiento son tan variados y flexibles, como variado y flexible es el conocimiento humano

Existen algunos formalismos de representación, que son básicos para la mayoría de los Sistemas Expertos actuales. En muchos casos puede encontrarse una forma apropiada de representación del conocimiento, modificando y ampliando individualmente formalismos ya existentes y prácticos, o aplicándolos de forma combinada.

2.5.2 Reglas

El conocimiento práctico se formula a menudo, en lenguaje coloquial, en forma de un "si...entonces".

El experto también capta su conocimiento en parte o en su totalidad en forma de reglas, por ejemplo "si la cantidad de fallas es mayor que 2, entonces la pieza es inservible".

La intención de las formas de representación del conocimiento basadas en reglas es reproducir esta formulación natural. La forma de funcionamiento de estos mecanismos de valoración se apoya aquí en el proceso pragmático del hombre a la hora de extraer sus conclusiones mediante reglas.

2.5.3 Representación del conocimiento mediante reglas

Bajo el concepto genérico de *Regla* se esconden muchas variantes. Una descripción detallada de los formalismos basados en reglas sólo podrá valer para una única variante.

La parte "si..." de una regla se definirá, en adelante como la *Premisa* y la parte "entonces..." como la parte de las *Conclusiones*. La parte de las conclusiones puede contener *Conclusiones* y *Acciones*.

Un mecanismo de valoración de reglas recibe el nombre de *Mecanismo de Inferencia*.

Una regla especialmente sencilla es la siguiente:

"si *Hecho 1* es válido, entonces también es válido *Hecho 2*".

Esta sencilla forma de regla es, sin embargo, poco potente para aplicaciones reales. Sólo mediante ampliaciones de esta forma básica se alcanzan formalismos útiles en la representación del conocimiento.

Una ampliación de las reglas consiste en permitir la anudación lógica de hechos y acciones en la premisa y en la parte de las conclusiones. Entonces, una regla podría tener este aspecto:

"si *Hecho 1* es válido o *Hecho 2* no es válido, entonces vale *Hecho 3* y además hay que realizar *Acción 1*".

Otra ampliación del formalismo de reglas es la posibilidad de indicar valores de probabilidad (por ejemplo para los hechos). Una regla podría ser:

"si *Hecho 1* es válido o *Hecho 2* no es válido, entonces vale *Hecho 3* con más del 50% de probabilidad".

Naturalmente, con esta representación está también implícitamente ligada la capacidad del mecanismo de inferencia de manipular correctamente las probabilidades.

Otra ampliación frecuentemente utilizada del formalismo de reglas consiste en la posibilidad de utilizar variables en lugar de hechos. El mecanismo de inferencia correspondiente controla entonces la forma en que se otorgan valores a las variables.

2.5.4 Mecanismos de inferencia para reglas

El conocimiento del experto estará configurado, en parte o en su totalidad, por una cantidad de reglas y hechos. La interrelación de las distintas reglas y sus efectos se controla a través del mecanismo de inferencia correspondiente. El cual tiene que estar sintonizado con la variante especial del formalismo concreto.

En adelante se explicarán de nuevo sólo los principios básicos para la valoración de reglas.

Los mecanismos de inferencia más utilizados en la actualidad se basan en dos principios que también pueden estar combinados:

- Valoración por encadenamiento hacia delante (accionado por datos).
- Valoración por encadenamiento hacia atrás (accionado por hipótesis y orientado al objetivo)

Estos dos principios básicos pueden describirse mediante una forma especialmente sencilla de reglas. Estas reglas son del tipo:

"si *Hecho x* es válido y *Hecho y* es válido, entonces vale también *Hecho z* y además tiene que realizarse *Acción a*".

Valoración por encadenamiento hacia delante.

En la valoración por encadenamiento hacia delante se parte de los hechos conocidos (datos). Si las premisas se pueden concluir con estos hechos, entonces se realiza la parte de las conclusiones. Se dice también que la regla "se dispara".

Si se cumplen todas las premisas de varias reglas a la vez, dependerá de la versión del mecanismo de inferencia cuál de las reglas concurrentes tiene que dispararse. Existen diferentes estrategias para solucionar este conflicto, propias de la forma de representación del conocimiento basada en reglas. En reglas con indicación de probabilidad se podrían disparar, por ejemplo, aquellas reglas cuyas conclusiones contengan el valor de probabilidad más elevado.

El resultado de "disparar" estas reglas puede acarrear la creación de nuevos hechos (datos).

Así mismo, estos últimos pueden disparar, a su vez, nuevas reglas.

La valoración por encadenamiento hacia delante finaliza cuando ya no se pueden disparar más reglas o cuando el mecanismo de inferencia encuentra otro criterio de finalización.

La solución buscada del problema a través de la valoración de las reglas sólo puede consistir, por ejemplo, en haber alcanzado un determinado objetivo o una última regla por disparar, que ofrezca, por ejemplo, un diagnóstico.

La solución del problema puede elaborarse y memorizarse de forma sucesiva a través del conjunto de reglas disparadas. Este procedimiento permite, más adelante, hacer un seguimiento de lo acontecido y proporcionar una explicación de las conclusiones obtenidas.

Valoración por encadenamiento hacia atrás.

En la valoración por encadenamiento hacia atrás se parte de la suposición de una conclusión (hipótesis). La elección de esta hipótesis la realiza el mecanismo de inferencia. Para ello utiliza datos obtenidos generalmente mediante preguntas hechas al usuario.

Si la primera hipótesis no es confirmada directamente por los hechos ya existentes en la base de conocimientos, se procede de la forma siguiente.

Se buscan reglas que contengan esta hipótesis – de arranque – en la parte de las conclusiones.

Cuando se encuentren varias reglas hará falta también estrategias de solución de conflicto. Estas estrategias determinan en qué secuencia deben analizarse las reglas afectadas. Podría, por ejemplo, procederse de tal forma, que se trataran las primeras reglas encontradas.

Según la estrategia de solución de conflicto presente, se analizan las reglas que contengan la hipótesis como conclusión, buscando si se cumplen o pueden cumplirse sus premisas.

Una premisa se considera concluida, cuando existen los hechos que la confirman.

Si éste no fuera el caso para todos los hechos no confirmados como hipótesis provisionales. Estas hipótesis temporales se analizarán primero como las hipótesis de salida y, dado el caso, se confirmarán.

Por regla general se tienen que analizar varias hipótesis hasta que una de ellas se pueda confirmar. Se alcanza una solución del problema cuando una o, según el planteamiento, varias hipótesis de partida pueden ser confirmadas. Incluso el hecho de no haber podido confirmar ninguna hipótesis puede ser considerado como resultado de una valoración.

2.6 Componentes que forman un Sistema Experto

De la distinción entre, por un lado, el conocimiento y, por el otro, de su mecanismo de valoración, tal como se ha mencionado resulta la partición de los sistemas expertos en una base de conocimientos y en un shell. Casi todos los sistemas expertos desarrollados hasta la fecha, tienen básicamente esta composición.

La base de conocimientos es la parte de un sistema experto en la que se almacena el conocimiento. Los demás componentes del sistema experto configuran el shell.

El shell de un sistema experto no sólo contiene el mecanismo de valoración, sino también herramientas para el mantenimiento de la base de conocimientos (estructura, verificación, modificación...). Todos estos componentes están caracterizados por los formalismos de representación del conocimiento en que se basa el sistema experto.

Para la estructuración de un shell no existe ningún esquema general. Los planteamientos de funciones y las condiciones margen para cada proyecto son demasiado diferentes. Por ello precisamos sistemas expertos que, por ejemplo, intercambien información sólo con el usuario durante la consulta, mientras que los componentes de otro tipo (componentes de diálogo, explicativos) se comunican, como sistemas expertos "empotrados", principalmente con otros sistemas de software, como bases de datos.

A pesar de que hay un núcleo común para la construcción de shells, muchos se basan en una combinación de componentes, entre los cuales se pueden distinguir:

- Componentes de resolución de problemas.
- Componente de adquisición de conocimientos.
- Componente explicativo.
- Componente de diálogo.

El *componente de resolución de problemas* contiene los mecanismos de valoración del conocimiento como, por ejemplo, mecanismos de inferencia para la valoración de reglas. Extrae conclusiones del conocimiento representado y canaliza acciones de forma implícita, como, por ejemplo, el diálogo con el usuario.

El *componente de adquisición de conocimientos* abarca las funciones necesarias para la estructuración y mejora del conocimiento en la base de conocimientos. Los componentes de adquisición de la generación actual apoyan la edición del conocimiento. En este proceso se verifican las entradas identificando errores o inconsistencias. Al componente de adquisición hay que sumarle varios medios auxiliares para la comprobación del conocimiento.

El *componente explicativo* sirve para que las vías de solución de un problema puedan ser reproducibles. Un componente explicativo da información a la pregunta ¿Por qué se han tomado ciertas decisiones?. Apoya con ello al ingeniero de conocimientos y al experto cuando quieren comprobar el proceso de solución de un problema.

El *componente de diálogo* forma la base de las interfaces de usuario de un sistema experto. Estas suelen ser módulos fijos de software – para formatos de pantalla, gráficos, menús, etc.

Un sistema experto posee varias interfaces de usuario:

- La del componente de adquisición del conocimiento, para el ingeniero de conocimiento y para el experto.
- La del componente explicativo, para el ingeniero de conocimiento, el experto y el usuario.
- Para la consulta, es decir, como se plantean las preguntas, se aceptan las respuestas y se emiten los resultados.

2.7 Cómo se construyen los sistemas expertos

Una vez obtenida cierta comprensión de los sistemas expertos, ahora es posible ocuparse de la forma en que se construyen. Al igual que los sistemas convencionales de computación, los sistemas expertos se crean, utilizan, modifican, reutilizan y con el tiempo se descartan casi de la misma manera que cualquier otro sistema.

Un sistema experto se compone esencialmente de una base de conocimientos, una máquina de inferencias y algunos programas de apoyo. La parte medular es la máquina de inferencias. La *base de conocimientos* contiene toda la información que se considere apropiada para resolver problemas en el campo de actividad elegido; es específica para la aplicación particular. Los programas de apoyo constituyen la interfaz con el entorno. La *máquina de inferencias*, como su nombre lo indica, proporciona la fuerza motriz del sistema; sus funciones son: determinar qué datos requiere para resolver el problema en cuestión, obtener dichos datos a través de los programas de apoyo, almacenarlos, utilizar el contenido de la base de conocimientos para extraer inferencias y registrar también estas inferencias, realiza repetidamente estas funciones hasta que ya no puede, o no necesita continuar.

2.7.1 La base de conocimientos

El enfoque más común para representar el dominio del conocimiento que se requiere para un SE son las reglas de producción. Estas pueden ser referidas como reglas "situación-acción" o "if-then". De esta forma, con frecuencia una base de conocimientos está fraguada principalmente de reglas, las cuales son invocadas por un casamiento de patrones con las particularidades de las tareas circunstanciales que van apareciendo en la base de datos global.

Las reglas en una base de conocimientos representa el dominio de hechos y acciones a tomar cuando uno llega a situaciones específicas. La fuerza de un SE yace en el conocimiento específico del dominio del problema. Casi todos los sistemas existentes basados en reglas contienen un centenar de ellas y generalmente se obtienen de entrevistas con expertos durante un tiempo largo. En cualquier SE, las reglas se conectan una a otra por ligas de asociación para formar redes de reglas. Una vez que han sido ensambladas tales redes, entonces tenemos una representación de un *cuerpo de conocimientos* que es substancial.

Generalmente, un experto tiene muchas reglas de criterio o empíricas por lo que el soporte suele ser incompleto para la evidencia que se dispone. En tales casos una técnica es la de vincular valores numéricos a cada regla para indicar el grado de certidumbre que ésta tiene. En la operación de SE los valores de certidumbre se combinan unos a otros a través de la red, considerando también, la certidumbre de los datos de entrada del problema, para llegar finalmente a un valor de certidumbre de la solución final.

2.7.2 La máquina inferencial

El modelo de problema solución y sus métodos organizan y controlan las etapas que se van tomando para la resolución de problemas. Un modelo muy poderoso y común es el de encadenar las reglas "if-then-else" con el fin de formar alguna línea de razonamiento. Si el encadenamiento se inicia a partir de un conjunto de condiciones y se mueve hacia alguna conclusión, el método se llama encadenamiento hacia adelante y, en caso contrario, el encadenamiento es hacia atrás. Un problema de encadenamiento hacia adelante, sin una apropiada heurística de poda, derivará muchas soluciones de las cuales no todas son necesarias. En el caso de encadenamiento hacia atrás, es necesario también trabajar con una heurística apropiada, con la finalidad de poder manejar submetas conjuntivas. En general, para atacar el problema de conjunción, es necesario encontrar un caso en donde todas las submetas interactuantes se satisfagan. Pero con frecuencia una búsqueda de tal naturaleza nos da una explosión combinatoria de posibilidades. Es por esta razón, que el dominio apropiado de la heurística y su esquema inferencia deberán ser encontrados para cada tipo de problemas, para que de esta manera se tenga un SE eficaz y eficiente.

En realidad el conocimiento de una tarea es el que domina el curso de las etapas que se van tomando para la solución del problema. En algunos casos cuando el conocimiento es bastante abstracto (dominio de un modelo simbólico), la inferencia que se produce del modelo de abstracción a relaciones de mas detalle (menos abstractas), es llamado el modelo de "manejo de inferencias". Siempre y cuando uno se mueva de las relaciones simbólicas más abstractas a relaciones menos abstractas, uno está generando expectativas y el comportamiento del problema-solución es denominado "manejo de expectación". Con frecuencia se tiene que la solución de los problemas se trabajan hacia arriba, es decir, de los detalles o de los datos del problema específico a niveles más altos de abstracción. En este caso, las etapas en esta dirección se llaman "manejo de datos". Si la etapa siguiente se elige en base de algún dato nuevo o en base a la última etapa tomada dentro del problema-solución, la actividad es llamada "manejo de eventos".

Como se indicó anteriormente, un SE consiste de tres componentes principales: a) un conjunto de reglas, b) una base de datos global y, c) un interpretador de reglas. Las reglas actúan por medio de patrones dentro de la base de datos global y depende de la dirección de búsqueda la cual pasa en ambos lados con las reglas con un if o un then.

La aplicación de las reglas cambian el estado del sistema y por consiguiente la base de datos, habilitando algunas reglas y deshabilitando algunas otras. El intérprete de reglas usa una estrategia de control para encontrar las reglas disponibles y decidir que regla debe aplicar. Las estrategias básicas de control usualmente son las de encadenamiento hacia atrás o encadenamiento hacia adelante. En el caso de una combinación de los dos, es necesario un proceso de convergencia parecido al de relajación para poder unir las líneas opuestas de razonamiento en algún punto intermedio y así poder ofrecer una solución al problema.

2.8 Tipos de Sistemas Expertos

Interpretación: infieren la descripción de situaciones por medio de sensores de datos, estos SE usan datos reales, con errores, con ruidos, incompletos etc. Ejemplos: medición de temperatura, reconocimiento de voz, análisis de señales etc.

Predicción: infieren probables consecuencias de situaciones dadas. Algunas veces usan modelos de simulación para generar situaciones que puedan ocurrir. Ejemplos: predecir daños a cosechas por algún tipo de insecto.

Diagnóstico: infieren las fallas de un sistema en base a los síntomas. Utilizan las características comportamiento, descripción de situaciones o conocimiento sobre el diseño de un componente para inferir las causas de la falla. Ejemplos: diagnostico de enfermedades en base a síntomas, encontrar componentes defectuosos o fallas en circuitos.

Diseño: configuración de objetos. Utilizan un conjunto de limitaciones y restricciones para configurar objetos. Utilizan un proceso de análisis para construir un diseño parcial y una simulación para verificar o probar las ideas. Ejemplos: configuración de equipos de oficina, de equipos de computo.

Planeación: diseñan un curso completo de acción, se descompone la tarea en un subconjunto de tareas. Ejemplo: transferir material de un lugar a otro, comunicaciones, ruteo, planificación financiera.

Monitoreo: comparan observaciones del comportamiento del sistema con el comportamiento estándar, se compara lo actual con lo esperado. Ejemplo: asistir a un paciente de cuidados intensivos, tráfico aéreo, uso fraudulento de tarjetas de créditos

Depuración: (debugging) sugieren remedios o correcciones de una falla. Ejemplo: sugerir el tipo de mantenimiento a cables dañados, la prescripción medica a un paciente.

Reparación: sigue un plan para administrar un remedio prescrito. Poco se ha hecho, requiere planeación, revisión y diagnostico.

Instrucción: diagnostican, revisan y reparan el comportamiento de un estudiante. Ejemplo: educar a un estudiante de medicina, usa un modelo del estudiante y planea la corrección de deficiencias.

Control: gobierna el comportamiento del sistema. Requieren interpretar una situación actual, predecir el futuro, diagnosticar las causas de los problemas que se pueden anticipar, formular un plan para remediar estas fallas y monitorear la ejecución de este.

CAPITULO 3

3. Análisis de Falla

En los últimos años se han realizados múltiples estudios que han resultado fundamentales con relación a la comprensión de fenómenos relativos a la resistencia de los materiales y la mecánica de la fractura. Los principios fundamentales básicos de aspectos como la transformación en metales y aleaciones, la deformación plástica y la fractura, así como la de otros factores que influyen en las propiedades de los metales son adecuadamente tratados en una gran cantidad de libros de texto sobre metalurgia mecánica y ciencia de materiales. Estos fundamentos son la base para el desarrollo de los materiales, aunque la influencia del procesamiento metalúrgico y de fabricación, así como, las condiciones de servicio son, también, de primordial importancia.

El fabricante deberá tener cuidado en lo concerniente a la composición del material, el tratamiento térmico y el diseño de la construcción, para que no se presente un sobre dimensionamiento que repercute negativamente en los costos de producción, pero que tampoco estén por debajo de un valor mínimo necesario, lo que resultaría en una baja resistencia y confiabilidad.

Por otro lado es de igual manera esencial que tanto el ensamble como el maquinado sean realizados bajo condiciones apropiadas y con un mantenimiento adecuado. Sin embargo, la forma en que estos fundamentos son empleados para la ingeniería de materiales desarrolla a menudo las bases para artículos de investigación pura, los cuales son frecuentemente restringidos para un caso particular dentro de un tipo general.

3.1 Definición de resistencia y fractura

Esfuerzo de Cedencia y Resistencia a la Tensión

El punto (llamado de cedencia) en el cual la deformación deja de ser elástica y se convierte en plástica, representa el valor del esfuerzo a cual la pendiente de la curva esfuerzo deformación deja de ser el módulo elástico. Debido a la dificultad de determinar con precisión el punto de cedencia, se han hecho varias aproximaciones, la más común de estas es la compensación del esfuerzo de cedencia como el esfuerzo al 0.2% de la deformación plástica.

Los resultados de los ensayos de tensión son muy valiosos para el diseñador, por diversas razones. Por ejemplo ya que en la mayoría de las estructuras de ingeniería sólo la deformación elástica es deseable, es importante conocer el esfuerzo de cedencia del material para establecer la máxima carga que puede ser empleada de manera segura (la cual seguramente será reducida a un factor de seguridad). De cualquier modo es importante mencionar que los resultados obtenidos de las pruebas son sólo útiles si se llevan a cabo bajo las mismas condiciones (temperatura, condiciones de carga, etc.) a las que el material será empleado.

Definición de Fractura

Una fractura es la separación de un cuerpo en dos o más partes. La naturaleza de una fractura es distinta dependiendo del tipo de material y se encuentra frecuentemente afectada por el origen de los esfuerzos aplicados, las características geométricas de la muestra, y las condiciones de temperatura, así como, la velocidad de deformación. Las diferencias entre los tipos de fracturas producidas en materiales dúctiles y frágiles, sometidos a esfuerzos alternados o a altas temperaturas, varían desde su nucleación hasta su propagación, debido a cada una de estas condiciones.

Definición de Falla

Una parte de un montaje considerado habrá fallado:

Cuando la parte llega a ser completamente inoperable.

Cuando la parte esta aún en operación pero no estará durante mucho tiempo funcionando satisfactoriamente.

Cuando serios deterioros han hecho a la parte inconfiable ó inseguro para un uso continuo y por lo tanto es necesario removerla inmediatamente de servicio para repararla o cambiarla.

3.1.1 Los factores que afectan a las fallas

Los factores que afectan a las fallas son:

Estado de esfuerzos:	Tracción, compresión, torsión y cortante.
Condiciones de carga:	Estática, impacto, cíclico, constante.
Condiciones térmicas:	Calentamiento rápido o enfriamiento cíclico.
Condiciones ambientales:	Atmósfera oxidante o reductora, corrosiva, con presencia de organismos biológicos, etc.

Esto lleva a diferentes fallas tales como:

Falla por distorsión, por fatiga, por corrosión, por desgaste, por corrosión bajo tensión, por elevadas temperaturas, etc.

3.2 Fuentes Fundamentales de Fallas

Las fuentes fundamentales de fallas incluyen muchos aspectos tales como el diseño, la selección del material, las imperfecciones del mismo, la fabricación y/o el procesamiento, el montaje, pruebas, control de calidad, revisión, almacenamiento, transporte, condiciones de servicio, mantenimiento y la exposición no prevista a sobre cargas o daños mecánicos y/o químicos al estar en servicio. A menudo son más de una las causas que provocan una falla.

Imperfecciones en el Material

Muchas fallas se originan debido a imperfecciones en el material. Tanto las imperfecciones internas como las superficiales podrían reducir la resistencia total del material, ya que brindan sitios o zonas preferenciales para la propagación de la fractura al actuar como muescas, o al servir como lugares propicios para que se desarrollen ataques preferenciales por picaduras o al brindar las condiciones para desarrollar corrosión intergranular.

La segregación, laminación, inclusiones, porosidad, huecos o grietas y otros tipos de imperfecciones son relacionados con varios tipos de mecanismos de fallas y/o que se producen en piezas específicas.

Algunos ejemplos son:

Fundiciones: pliegues fríos, inclusiones, porosidades, huecos y cavidades por contracción pueden presentar problemas especiales en las fundiciones.

Forja: pliegues o traslape, cavidades y el patrón de las líneas de flujo son frecuentemente relacionadas a las fallas en forja.

Efectos de Muestras

Los efectos de muesca, sin atender por ahora lo que la produjo, llevan a que el esfuerzo en un miembro cargado se incremente abruptamente en la raíz de ésta. 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, de lo agudo de la muesca.

Concentración de Esfuerzos

En uno de los métodos empleados para representar campos de esfuerzos, se utilizan unas líneas para representar la dirección del esfuerzo principal, tal método es ilustrado en la Figura (a) para una muesca en la circunferencia en una muestra cilíndrica bajo tracción axial.

Bajo condiciones provocadas por esfuerzos elásticos; las condiciones de esfuerzos y la concentración de esfuerzos en la raíz de la muesca llega a ser extremadamente altas cuando el radio formado en la raíz se aproxima a cero. De cualquier modo, cuando el esfuerzo en la raíz excede el esfuerzo de cedencia del material entonces se presenta flujo plástico, tendiendo éste a disminuir lo agudo de la muesca, reduciendo la concentración de esfuerzos en la raíz de la misma.

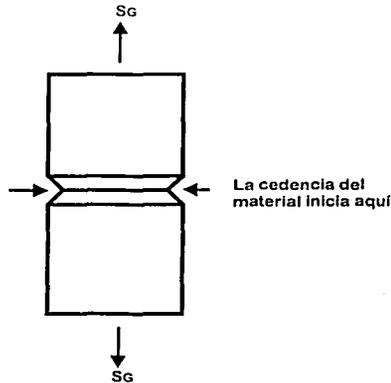


Figura 3.1 Una muestra con muesca sujeta a tracción presenta cedencia primero en el área de la muesca.

Iniciadores de Fracturas

Muestras de cualquier tipo pueden ser encontradas en casi cualquier estructura, según los cánones del diseño las muescas deben ser confinadas a las zonas de bajos esfuerzos nominales. De igual forma y en caso de que las muescas no puedan ser evitadas, un diseño correcto restringe la concentración de esfuerzos en pequeñas regiones comparadas con el tamaño total del elemento estructural.

De cualquier forma, si se tiene la presencia de una muesca, ya sea accidental o intencionalmente, lo cierto será que cuando una fractura ocurra casi siempre se iniciará en esa muesca. Es importante saber que muchas estructuras hechas con materiales dúctiles pueden fracturarse rápidamente si existen muescas presentes.

3.2.1 Deficiencia en la Selección del Material

La selección de materiales como una parte de todo el procedimiento de diseño debe hacerse considerando las características dimensionales y geométricas.

Uso Inadecuado de los Resultados de Pruebas Mecánicas

Aunque la mayoría de las especificaciones estándares se obtienen de ensayos de tracción, éstos son sólo indicativos en parte de la resistencia mecánica inherente a una pieza bajo ciertas condiciones específicas de servicio.

El amplio uso de ensayos estándares de tracción son útiles en un principio como una rutina para verificar la calidad relativa de diferentes lotes de un material dado; los datos generados por las pruebas se usan en un principio como un índice de calidad del lote o para conocer la variabilidad del lote de material. Con excepción de algunas cuantas situaciones donde la fractura dúctil o con una gran deformación podría ser la condición limitante para la falla, la resistencia a la tracción y a la cedencia no son sólo criterios inadecuados para evitar las fallas sino también podrían llevar a la selección de un material que resultara con el tiempo insatisfactorio.

Frecuentemente usar material con alta resistencia a la tracción es perjudicial en piezas donde existen concentradores severos de esfuerzos, para las cuales los mecanismos que podrían provocar la falla son comúnmente:

- Fatiga.
- Fractura frágil.
- Corrosión posiblemente combinadas con cargas estáticas o cíclicas.

Adicionalmente a lo anterior, se debe mencionar que el ensayo de tracción es generalmente realizado a temperatura ambiente con una relativa baja velocidad de deformación, lo que será algunas veces diferente a las características reales.

3.2.2 Deficiencias en el Diseño

Algunas fallas resultan de deficiencias en el diseño que proceden de una falta de atención en la determinación de las características óptimas de la pieza. La deficiencia en el diseño que se comete con más frecuencia y que también con facilidad podría ser evitada es la presencia de muescas en las zonas donde se localizan los altos esfuerzos.

Una característica del diseño que de manera especial lleva a la falla y debe ser evitada es la intersección de dos muescas mecánicas y un radio de filete incorporados en el eje, como en el caso de un chavetero.

3.2.3 Cambios en el Diseño

Existen posibilidades de que una máquina o componente hallan sido fabricados sin hacer adecuadamente el análisis relativo al efecto de introducir posibles concentradores de esfuerzos en la forma de concentradores de esfuerzo. Esto se puede deber a:

- *Adecuación de una Máquina*
- *Insuficiencia en el Diseño*
- *Sobrecarga de las Estructuras*

3.2.4 Selección del Material

Para cada mecanismo de fractura previsible, hay tan sólo unos cuantos criterios de importancia primaria para la selección del material óptimo. Estas son las características específicas del material a través de las cuales se mide cuantitativamente su resistencia a las fallas por un mecanismo dado. En algunos casos deberá ser necesario hacer un balance o intercambio entre las características o propiedades de los materiales y entre los factores tales como costo, facilidad de fabricación, disponibilidad y vida de servicio esperada en la aplicación específica. No puede hacerse una generalización que sea válida para todos los problemas de selección de materiales, cada problema debe ser considerado individualmente o con base a experiencias muy similares a estas.

3.2.5 Deficiencias en la Manufactura

La susceptibilidad de los materiales a presentar falla, también está relacionada a los procedimientos de manufactura impropios, de que estos sean incompletos o ambiguos, de cambios hechos en los procedimientos sin una evaluación completa, fallas al seguir el proceso especificado, errores humanos o daños accidentales.

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

Dentro de las deficiencias en la manufactura se pueden encontrar:

- *Maquinado y Esmerinado*
- *Marcas de Identificación por Impacto*
- *Maquinado a Través de Descargas Eléctricas*
- *Fallas al Realizar un Tratamiento Térmico*
- *Grietas por Temple*
- *Retraso del Agrietamiento en el Temple*
- *Fallas Debidas a Recubrimientos Electrolíticos*
- *Arcos Electrolíticos*
- *Fallas Debidas a Esfuerzos Residuales*
- *Descarburización*
- *Decapado para los Recubrimientos Electrolíticos*
- *Soldadura*

3.2.6 Fallas como Resultado de la Fragilización

Hay diversas formas de fragilizar partes de hierro y acero que llevan a una fractura de este tipo, y al menos de 6 a 8 de éstas pueden ocurrir durante los tratamientos térmicos o en servicio a altas temperaturas.

Estas formas de fragilización son:

Fragilización por envejecimiento por deformación.
 Fragilización por envejecimiento en el temple.
 Fragilización azul.
 Fragilización por revenido (aceros aleados).
 Fragilización 350°C (aceros de baja aleación y de alta resistencia).
 Fragilización de 400 a 500°C (aceros inoxidables ferríticos).
 Fragilización por fase sigma.
 Fragilización por grafitización.
 Fragilización debida a compuestos intermetálicos (aceros galvanizados).

En adición a las formas anteriores de fragilización de aceros (y otros metales y aleaciones), también pueden sufrir fragilización debido a las condiciones ambientales.

Las cuatro formas de fragilización ambiental son:

Corrosión bajo tensión.
 Fragilización por hidrógeno.
 Fragilización por metal líquido.
 Fragilización por neutrones.

3.2.7 Agrietamientos por Corrosión Bajo Tensión

El agrietamiento de corrosión bajo tensión es un proceso de falla debido a condiciones mecánicas y ambientales, con la combinación de esfuerzos mecánicos y un ataque químico para iniciar y propagar la fractura en un metal.

Las fallas causadas por agrietamiento por corrosión bajo tensión son frecuentemente producidas por la exposición simultánea a un medio ambiente químico aparentemente no muy agresivo y un esfuerzo de tensión abajo del esfuerzo de cedencia del material. Bajo tales condiciones grietas finas pueden penetrar profundamente en la pieza, mientras la superficie exhibe apenas una insignificante cantidad de corrosión, por lo que no existe evidencia macroscópica de una inminente falla.

3.2.8 Fallas Resultantes de Daños en Servicio

Los daños que ocurren en una pieza durante su servicio pueden causar fracturas dúctiles o frágiles en la misma. La fractura frágil o dúctil es el proceso a través del cual la separación final ocurre en partes que han sido agrietadas en el servicio por otros mecanismos como fatiga y corrosión bajo tensión. Estas fracturas también podrían provenir por efectos de temperatura, como:

- Fragilización por fase sigma: pérdida de dureza en tratamientos térmicos o aleaciones endurecidas por deformación, y en servicio a temperaturas inferiores a la de la temperatura de transición dúctil, frágil, el calentamiento o enfriamientos rápidos durante el servicio.
- El servicio induce a ciertas imperfecciones, por ejemplo, fisuras poco profundas por fatiga, marcas por efectos térmicos, y rayas, que podrían llevar a fracturas dúctiles debido a la

reducción del área transversal y porque actúan como concentradores de esfuerzos, o podrían llevar a una fractura frágil si el tamaño del defecto o imperfección excede al crítico.

- Falla Resultante de muy Bajas Temperaturas
- Un material dúctil puede fallar de manera frágil cuando la temperatura de servicio llega a ser más baja que la del rango de temperatura de transición dúctil – frágil.

3.3 Mecanismos de Falla

3.3.1 Identificación del Tipo de Fallas

El realizar un análisis de falla de una estructura o pieza metálica requiere en primer lugar del examen de la falla, la cual puede ocurrir debido a uno o más mecanismos, incluyendo los daños superficiales como corrosión o desgaste y distorsión elástica o plástica. Ya que existen diversos tipos de fallas por fracturas, incluyendo aquellas producidas por medios ambientes químicos o térmicos, se describirán y clasificarán, los diversos métodos de fractura.

Clasificación por Condiciones de Carga

Una fractura que es producto del incremento en la carga a una velocidad baja o moderada hasta el punto de fractura del material, es comúnmente llamada fractura por sobrecarga; pero cuando la carga es incrementada a alta velocidad, la fractura que resulta se denomina por impacto. La fractura por esfuerzo de ruptura se produce al aplicarse y mantenerse una carga estable. La fractura por fatiga es generada por la aplicación repetida o cíclica de la carga. Mientras en todos los casos la dirección de la carga se describe en términos tales como tracción, compresión, torsión, flexión y cortante.

Clasificación por la Velocidad de Crecimiento de Grieta

Las grietas que llevan a una fractura dúctil crecen generalmente a bajas velocidades a menos de 5 ó 6 metros por segundo. Este agrietamiento "LENTO" (conocido como crecimiento de grieta estable) crece sólo cuando se aplica una carga.

La fisura de crecimiento inestable puede crecer a velocidades tan altas como del orden de 100 metros por segundo. Este agrietamiento "RAPIDO" puede continuar bajo esfuerzos elásticos internos, sin necesidad de que se le este aplicando una carga externa, y puede llevar a una catastrófica falla frágil de la estructura. La velocidad de crecimiento de la grieta disminuye de manera significativa con el aumento de la temperatura, por lo que a algunas temperaturas podríamos tener deformación plástica y fractura frágil o dúctil.

La velocidad de crecimiento de grieta además de ser afectada por la temperatura, es también afectada por.

- La composición química
- La microestructura
- El tamaño de grano de la aleación
- El tamaño de la pieza
- La dirección de la carga
- La velocidad de deformación
- La composición del medio ambiente

Clasificación por Factores del Medio Ambiente

Una falla resultado de factores térmicos, tales como altas o bajas temperaturas pueden ser clasificados como sigue:

- fluencia o termofluencia: distorsión plástica a carga constante
- fatiga térmica: agrietamiento debido a cambios cíclicos de temperatura
- choque térmico: agrietamiento debida a un rápido calentamiento o enfriamiento

Una falla relacionada con la atmósfera esta frecuentemente relacionada con altos esfuerzos residuales, tal es el caso de:

- corrosión bajo tensión
- fragilización por hidrógeno, etc.

Clasificación por Examinación Macroscópica (fractografía con luz superficial)

La apariencia macroscópica de la superficie de una fractura superficial es descrita en función de la reflexión de la luz (brillosa u opaca) y de la textura (suave o áspera, cristalina o sedosa, granular o fibrosa). El uso de los términos frágil y dúctil se usan para describir la deformación macroscópica que ocurre antes de la separación final y en los términos de la cara plana y cara de esfuerzo cortante para describir la dirección macroscópica de la fractura. Los términos que describen los modos macroscópicos de la fractura, son la deformación gruesa (en sección neta), esfuerzos planos, deformación plana y el modo mixto.

Las características macro fractográficas de las fracturas dúctiles o frágiles son:

Dúctil

- | | |
|--|-----------------------------|
| • Gris, opaco, un solo color | por la reflexión de la luz. |
| • Lisa, sedosa | por su textura. |
| • Labios copa y cortante | dirección de la fractura. |
| • Deformación: Zona radial, zona fibrosa | por la deformación. |

Frágil

- Brillante, uno solo o varios colores
- Rugosa, cristalina
- Granular
- Sin deformación
- Marcas Chevron (espinazo de pescado)

Clasificación de Observación Microscópica (micro fractografía)

Este análisis incluye a la apariencia mediante microscopía electrónica de una superficie que es descrita en términos de las características microscópicas presentes, tales como microhuecos o clivaje. Los mecanismos microscópicos de la fractura incluyen separación de límite de grano, coalecencia de microhuecos, clivaje y fatiga. Los patrones microscópicos seguidos por cualquier fractura en un metal sirven para clasificarlas como transgranular (por unión de microhuecos, clivaje o fatiga) o intergranular (por separación de límite de grano con o sin unión de microhuecos).

Hay dos modos cristalográficos por medio de los cuales los materiales pueden fracturarse por clivaje y por deslizamiento.

Características de la micro fractográficas

Dúctiles:

- Hoyuelos
- Micro grietas

Frágil:

- Clivaje
- Piedra de azúcar
- Patrón de marcas de río
- Lenguas

Todas las fracturas que suceden en metales de ingeniería pueden ser agrupadas dentro de dos o más de las siguientes clasificaciones generales, en la base dual del trabajo microscópico de la fractura y en el mecanismo microscópico de la fractura:

Fractura transgranular

- Unión de microcavidades ó microgrietas
- Clivaje
- Cuasi clivaje (Combinación de clivaje y unión o coalescencia de micro huecos)

Fractura intergranular por

- Separación de limite de grano, con o sin unión (coalescencia) de micro huecos



Figura 3 2 Aspecto de la fractura dúctil en muestras de sección cuadrada y rectangular

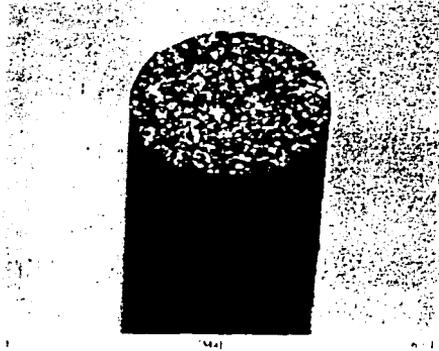


Figura 3.3 Fractura frágil de acero de bajo carbono a -195°C bajo cargas de tracción.

3.3.2 Fracturas Dúctiles

Las fracturas dúctiles se caracterizan por desgarrar el metal, produciendo una gran cantidad de deformación plástica y un gasto considerable de energía. La fractura dúctil por tracción casi siempre tiene una apariencia fibrosa y gris (opaca) y se clasifican en una escala macroscópica tanto como fractura de cara plana (cuadrada), como fractura de cara cortante (cortante inclinado).

La fractura por tracción de caras planas en materiales dúctiles se produce bajo condiciones de deformación plana, con formación del cuello en la sección, y se lleva a cabo comúnmente en dirección perpendicular a la dirección de la carga. Mientras que por otro lado, alguno de los llamados labios cortantes se forman de la superficie de fractura a la superficie de la pieza. La relación del área de la región de cara plana con el área del labio cortante, generalmente llega a ser más grande de acuerdo a como aumenta el espesor de la pieza.

Fracturas por tracción de cara cortante en materiales dúctiles se forman bajo condiciones de esfuerzos planos (esto es, en secciones delgadas o cerca de las superficies), con o sin adelgazamiento de la sección, y típicamente ocurre en ángulos alrededor de los 45 grados con respecto a la superficie de la pieza. El ángulo de la inclinación de la superficie de fractura (de aproximadamente 45 grados), así como la apariencia fina, sedosa, gris y opaca de la fractura, son características de una fractura por tracción con caras de esfuerzo cortantes en materiales dúctiles. La reducción de la sección es ligeramente visible en el área roscada cerca a la superficie de la fractura.

Fractografía de Fractura Dúctil

El examen de la fractografía de superficies de fracturas dúctiles de superficies planas comúnmente revelan hoyuelos equiaxiales, que por lo general presentan evidencias de las partículas que iniciaron la fractura. Fracturas inclinadas o dúctiles envuelven componentes de los esfuerzos cortantes, como la torsión, dando lugar a hoyuelos alargados. Cuando éstos son producidos por un componente cortante los puntos de coincidencia de la superficie de fractura están en dirección opuesta. En las superficies de fractura dúctil producidas por desgarre, las grietas produce hoyuelos alargados sobre las superficies de coincidencia, que son como imágenes en un espejo.

Otras características fractográficas que podrían ser observadas incluyen la presencia de clivaje en planos conjugados, planos de clivaje unidos a desgarres dúctiles en diferentes niveles y "lenguas" que resultan de fracturas en planos simétricos formados durante el avance de la grieta.

3.3.3 Fracturas Frágiles

Estas son caracterizadas por la rápida propagación de la grieta con un bajo gasto de energía y sin una apreciable deformación plástica. Las fracturas frágiles presentan una superficie brillante y granular así como un aspecto de caras planas, en caso de una carga de tracción se presentará una restricción muy pequeña o simplemente esta no existe. Una marca de Chevron puede presentarse en la superficie orientándose éste hacia el punto de inicio de la grieta.

El examen microscópico de las fallas frágiles revelarán facetas intergranulares o transgranulares. Las intergranulares son superficies de grano que han sido expuestas por la propagación de la grieta a lo largo de los límites de grano. Mientras las transgranulares observadas en fracturas frágiles, son producidas por clivaje a lo largo de numerosos planos cristalográficos paralelos, creando así una superficie de fractura en formas de terrajas, los niveles individuales de la superficie en forma de terrajas son separados por etapas de clivaje, que se forman por la fractura de uniones delgadas en los segmentos de las grietas de clivaje; por la forma como la grieta transgranular se propaga los segmentos de ésta se juntan a través de una cada vez menor cantidad de plano, como resultado las etapas de clivaje convergen en la dirección de la propagación local de la grieta. Dando lugar a un patrón de marcas de río.

3.3.4 Fallas por Fatiga

La fatiga es el cambio progresivo, localizado y permanente de estructura que ocurre en un material sujeto a deformaciones repetidas o fluctuantes, cuando se aplican esfuerzos que tienen un valor máximo por debajo de la resistencia a la tracción del material. La fatiga podría terminar con la presentación de una grieta o fractura del material después de un cierto número de ciclos (fluctuaciones).

Las fracturas por fatiga son causadas por la acción simultánea de esfuerzos cíclicos, de esfuerzos de tracción y de la deformación plástica. Si cualquiera de estos tres factores no esta presente no se iniciara ni se propagará la fisura, ya que, los esfuerzos cíclicos inician la fisura y los de tracción la hacen crecer, es decir, la propagan.

En los procesos de fatiga se podrían considerar tres etapas:

1. Daño inicial de la fatiga que conduce a la iniciación de la grieta.
2. Propagación de la grieta hasta que la sección transversal, que queda sin agrietarse, llegue a ser excesivamente débil para soportar la carga.
3. Final, rompimiento repentino de la sección transversal que se mantenía sin daño.

Marcas de Playa

Generalmente la característica más representativa de las que son encontradas en las superficies de las fracturas por fatiga son las marcas de playa, que son marcas concéntricas a un punto y este punto corresponde al origen de la grieta por fatiga. Son también llamadas marcas de concha; las marcas de playa pueden ocurrir como un resultado de los cambios de carga o de frecuencia o por oxidación de la superficie de fractura durante los periodos que se detiene la grieta, por servicio intermitente de la pieza o componente.

Zona de Fractura Final

Esta es una zona que de manera frecuente se denota fibrosa en la superficie de la fractura por fatiga, pareciéndose a la superficie de fractura por impacto o una probeta en la que se realizó un ensayo de tenacidad, para el mismo material. El tamaño de esta zona depende de la magnitud de la carga y su forma de la dirección, tamaño y geometría de la carga sobre la pieza fracturada. En materiales tenaces de sección redonda o delgada la zona de fractura final consistirá de una fractura en dos distintos modos.

- a) Fractura por tracción (modo de deformación plana)
- b) Fractura por cortante (modo de esfuerzos en el plano)

Se deben observar las dos características en la zona de fractura final que ayudan a determinar el origen de la misma:

- a) La fatiga se origina generalmente en la superficie y de aquí que, el origen de la fractura no este incluido en el fractura del labio de cortante, y
- b) La presencia de las características marcas de Chevron en las fracturas por tracción, que señalan hacia atrás a el origen de la fractura.

Rasgos Característicos de Fatiga Revelados por Microscopía

El examen de un fractura por fatiga a través de microscopía con luz visible es difícil algunas veces, debido a que la altura de ciertos rasgos en la superficie de fractura que pueden llegar a exceder la profundidad de campo del microscopio, especialmente a grandes magnificaciones.

Los exámenes metalográficos de la sección transversal de una muestra, sospechosa de haber fallado por fatiga, muestra típicamente que el trazo de la grieta fue transgranular. El examen de la sección transversal que contiene una fisura que no ha crecido lo suficiente para provocar la separación de las partes nos sirve, ya que muestra las deficiencias del diseño o la manufactura, así como el resultado de condiciones de servicio no consideradas previamente.

Estriaciones

En el examen a través del microscopio electrónico de una superficie de fractura por fatiga, la principal característica encontrada son como parches de marcas paralelas finamente espaciadas, llamadas estriaciones de fatiga.

Agrietamiento por fatiga

El agrietamiento por fatiga normalmente se obtiene como resultado de esfuerzos cíclicos de un valor muy por debajo del de la resistencia a la cedencia del material. Por lo regular, una grieta por fatiga se inicia en una región de altos esfuerzos de una pieza que esta sometida a un gran número de esfuerzos cíclicos. Posteriormente la fisura se propaga bajo los esfuerzos aplicados a través del material hasta que resulta en una fractura completa.

3.3.5 Fallas por Deformación

Sobrecarga

Cada estructura tiene una carga límite que cuando se sobrepasa la convierte en insegura. Las cargas aplicadas que rebasan el límite se denominan sobrecargas y algunas veces dan como resultado la distorsión o fractura de uno o más miembros de la estructura. La estimación de los límites de carga es una de las tareas más importantes del diseño y es comúnmente calculada a través de uno de los dos métodos clásicos ya sea el análisis de diseño o análisis de límite.

Una falla por distorsión ocurre cuando una estructura o componente es deformado, de tal forma que este:

- (a) no puede soportar más tiempo la carga para la que fue producido.
- (b) es incapaz de desarrollar la función para la que fue fabricado
- (c) interfiere con la operación de otro componente.

Las fallas por distorsión pueden ser tanto plásticas como elásticas y podrían o no ser acompañadas por fracturas. Existen dos tipos principales de distorsión: distorsión de tamaño, la que se refiere a un cambio en el volumen (crecimiento o reducción) y distorsión de forma (doblada o torcida), la que se refiere a cambios en la geometría.

3.3.6 Fallas por Desgaste

El desgaste es un fenómeno superficial que ocurre por desplazamiento y separación del material. Debido a que el desgaste usualmente implica una pérdida progresiva de peso y la alteración de dimensiones en un periodo de tiempo, el problema del desgaste generalmente difiere de los demás e implica, sin duda, posibles daños por fractura. Aunque es posible que la parte desgastada se cambie por no poder continuar desarrollando su función satisfactoriamente o ya que la calidad de su función es parcial.

Todo componente mecánico que trabaja por deslizamiento o contacto por rodamiento está sujeto a un cierto grado de desgaste.

Tipos de Desgaste

Por lo general el desgaste es definido como el daño sufrido por una superficie sólida por la remoción o desplazamiento de material debido a la acción mecánica que se produce al ponerle un contacto con un sólido, líquido o gas. El desgaste es comúnmente dañino, pero en forma suave podría ser benéfico. Cuando una falla es causada primordialmente por un tipo de desgaste, el análisis podría ser relativamente fácil, pero muchos de los casos provienen de la combinación de los diferentes modos o tipos de desgaste. Además, el tipo de desgaste podría cambiar de acuerdo a la forma en la que se vaya progresando desde el principio, haciendo difícil el análisis por estas condiciones. Los especialistas en este campo distinguen diversos tipos de desgaste:

- a) *Desgaste Adhesivo*
- b) *Desgaste Abrasivo*
- c) *Desgaste Erosivo*
- d) *Desgaste Corrosivo*
- e) *Corrosión Erosión*

3.3.7 Fallas por Frotación

Este es un fenómeno de desgaste que ocurre entre dos superficies que coinciden; es de naturaleza adhesiva y la vibración es su principal factor de causa, además de ser generalmente acompañado por corrosión. Por lo general ocurre entre dos superficies perfectamente juntas y apretadas que son sometidas a movimientos cíclicos relativos de una amplitud extremadamente pequeña.

Características de la Frotación

La diferencia entre la frotación y el desgaste ordinario es generalmente que la frotación ocurre en la superficie de contacto que se intentan fijar una a otra, aunque se experimente un diminuto movimiento relativo alternado, llamado "deslizamiento" que se produce comúnmente por vibración. Existen excepciones, tales como el contacto entre las bolas y las pistas de los rodamientos y entre superficies que coinciden en rodamientos oscilantes y coples flexibles. El frotamiento también

difiere del desgaste normal en que la masa de deshecho producidos es retenida en el lugar de frotación; para los materiales ferrosos se crea una masa de óxido.

Un problema con frotación es que este podría provocar grietas por fatiga, que en ejes u otros componentes sometidos a altos esfuerzos es frecuente concluya en una fractura por fatiga.

3.3.8 Agrietamiento por Corrosión Bajo Tensión

El agrietamiento por corrosión bajo tensión es un proceso de falla mecánica y ambiental en el que se combinan los esfuerzos mecánicos y el ataque químico en la iniciación y propagación de la fractura en una pieza de metal.

Las fallas por agrietamiento de corrosión bajo tensión son frecuentemente provocadas por la exposición a medios ambientes aparentemente suaves, al mismo tiempo que es sometido un esfuerzo de tracción que es menor al esfuerzo de cedencia del material. Bajo estas condiciones fracturas finas pueden penetrar profundamente en la pieza, aunque en la superficie se tenga la apariencia de una insignificante cantidad de corrosión, por lo tanto no podría haber indicaciones macroscópicas de una inminente falla. Los casos más comunes de falla por corrosión bajo tensión son probablemente aquellos asociados con los siguientes metales y aleaciones.

1. Aleaciones de aluminio de alta resistencia, especialmente las del tipo aluminio-cinc-magnesio, bajo condiciones de corrosión atmosférica. Los esfuerzos internos y los de montajes son con frecuencia importantes.
2. Aceros inoxidables austeníticos y aleaciones de níquel del tipo Inconel en la presencia de muy bajas concentraciones de iones de cloro, el ion hydrozyl es también reportado como causante de falla, aunque esto es tema de disputa entre algunos autores.
3. Los aceros de bajo contenido de carbono generalmente en la presencia de nitrato concentrado caliente o soluciones alcalinas cáusticas.
4. Los aceros de alta resistencia en una amplia variedad de medios ambientes, probablemente con fragilización por hidrógeno juega un papel dominante.
5. Aleaciones de cobre, de manera notable el latón de cartuchería 70-30 en medios ambientes con amoniaco, generalmente en la presencia de esfuerzos internos.

3.3.9 Fluencia (o Termofluencia) "Creep"

La fluencia es el cambio en la dimensión de un metal o aleación a la que se le esta aplicando un esfuerzo a una temperatura que es mayor que $0.5 T_m$, donde T_m es la temperatura de fusión medida en escala absoluta. La deformación por fluencia puede producir, claramente, grandes cambios en las dimensiones de un componente, lo que representa no poderse seguir empleándose durante más tiempo en servicio antes que ocurra la fractura. Por otro lado, la deformación por fluencia podría llevar a fractura, este tipo de falla es llamado esfuerzo de ruptura.

Las fallas por fluencia y por esfuerzo de ruptura son generalmente fáciles de identificar, con frecuencia, ellos pueden reconocerse por la ductilidad local y la capacidad de multiplicar las grietas intergranulares que están presentes, además las fallas por esfuerzo de ruptura pueden ser identificadas por inspección óptica de microsecciones ya que, por lo general, existen una gran cantidad de cavidades por fluencia alrededor de la fractura principal.

3.4 Práctica general del análisis de falla

3.4.1 El Propósito General del Análisis

Aquí se orienta principalmente a la presentación de los procedimientos generales, las técnicas y las precauciones empleadas en la investigación y análisis de fallas de elementos mecánicos durante su servicio. Las características de las fallas a la vez de ser descritas serán también explicadas en cuanto a sus mecanismos.

La investigación de la fractura y el subsecuente análisis deberá llevar a la determinación de las causas de la falla, y conocido esto será factible establecer las acciones correctivas que eviten que dicha falla se vuelva a presentar. Con frecuencia es necesario determinar el peso con el que contribuye cada causa, ya que de otra manera se plantearán seguramente acciones ineficientes, en algunos casos se deberá desarrollar nuevas técnicas experimentales que nos permitan precisar la relación causa efecto. La investigación de un accidente de muy alto costo en vidas humanas o en el aspecto económico, como el caso del transbordador espacial, da como consecuencia la necesidad de involucrar especialistas en diferentes campos de la ingeniería, la física y la metalúrgica.

3.4.2 Estado del Análisis

Debido a que el procedimiento de análisis puede variar en función de la naturaleza de la falla y de las características del propio material, se presentarán las etapas principales, quedando a juicio del investigador la secuencia e importancia de estas que son:

1. Recopilación de toda la información posible sobre el sistema. Esto significa datos de diseño, condiciones de servicio para lo cual fue diseñada, materiales y procesos de fabricación. Así mismo será necesario conocer las condiciones bajo las cuales trabajó durante su vida útil y en particular las condiciones de servicio en el momento de la falla.
2. Examen preliminar del o los elementos que sufrieron la falla. Para esto será necesario efectuar un examen visual con su correspondiente toma de imágenes fotográficas, de vídeo y diagramas, lo cual nos podrá permitir un estudio más detallado ya en gabinete.
3. Selección de muestras. Es muy común que las piezas sean de un tamaño inconveniente para su preparación y observación metalográfica, o para el análisis de sus propiedades, es por esto necesaria la toma de muestras representativas del material y de la propia falla.
4. Pruebas no destructivas. La detección de grietas superficiales y sub-superficiales, así como de discontinuidades internas puede proporcionar información invaluable en cuanto a la secuencia de eventos, el origen de la falla y problemas en la propia manufactura, por lo que será necesario aplicar una o varias técnicas no destructivas como pueden ser líquidos penetrantes o ultrasonido.
5. Pruebas mecánicas. Es necesario no solo conocer si el material que se ha empleado corresponde con lo demandado en el diseño, es también de fundamental importancia confirmar que este cumple con las propiedades mecánicas que le fueron especificadas.
6. Examen macroscópico. Para saber qué tipo de falla se presentó es necesario realizar un análisis de la superficie de fractura.
7. Examen Microscópico. Es fundamental conocer si el material presenta la estructura que corresponde a su producción y servicio, lo cual podrá ser efectuado a través de un estudio metalográfico.

8. Análisis Químico. Esto se refiere no solo a la determinación de la composición promedio del material, también es trascendente en muchas ocasiones conocer el tipo de depósitos de corrosión formados en la pieza, el recubrimiento superficial de ésta y la composición puntual o por zonas.
9. Determinación del mecanismo de falla.
10. Implementación de ensayos bajo condiciones simuladas de servicio.
11. Análisis de todas las evidencias y elaboración de conclusiones.
12. Elaboración de reporte el cual debe considerar recomendaciones ya que de otra manera de poco serviría. Es obligatorio se conserve una copia de todo el expediente con todos los datos y procedimiento seguido, para que en caso de cualquier duda o inconveniente futuro se pueda revisar el estudio.

Efectuar un análisis de falla confiable requiere de tres conceptos básicos que son:

- a) Conocimientos del tema.
- b) Capacidad de observación y síntesis.
- c) Ser metódico.

3.4.3 Recopilación de Información de Respaldo así como de la Historia de Servicio

Antecedentes

Inicialmente la investigación sobre la falla se orienta a la obtención de la mayor cantidad de datos y detalles relativos a la fractura. Es conveniente por lo tanto recopilar información relativa a la fabricación de las piezas y reconstruir tanto como sea posible la secuencia de eventos que condujeron a la falla.

La recolección de datos relativos a la historia de fabricación de los componentes debe considerar desde la obtención de las especificaciones y dibujos y deberá considerar todos los aspectos de diseño del componente. Los datos relativos a la fabricación deberán agruparse en:

- a) Procesamiento Mecánico, el cual incluye operaciones de deformación, de maquinado y de pulido.
- b) Procesamiento Térmico. Quedan aquí involucrados los tratamientos térmicos, así como las operaciones en soldadura y trabajo en caliente.
- c) Procesamiento químico, esto involucra detalles de limpieza, aplicación de recubrimientos, operaciones de difusión y electroplateados.

Historia de Servicio del Elemento

La obtención de la historia de servicio del elemento o equipo en estudio dependerá en gran medida del cuidado que en la planta se tuvo para elaborar la bitácora de servicio. Es evidente que mientras más detallada sea esta se simplificará, en mucho, el análisis de falla. Para la determinación de los datos de servicio se deberá prestar atención especial a condiciones tales como:

- Carga normal y anormal, sobrecargas accidentales, cargas cíclicas, vibraciones, variación de la temperatura de servicio.

- Presencia de gradientes de temperatura y
- Operación en ambientes corrosivos, entre otros elementos a considerar.

La correcta deducción de las condiciones de falla en mucho dependerán de la habilidad, conocimientos y buen juicio del analista, y será tanto más difícil como mínima sea la información recabada.

Condiciones Anormales

Además de establecer la historia de los componentes que han fallado, es aconsejable determinar si prevalecieron condiciones anormales de operación, o que eventos ocurrieron que pudieron haber contribuido a provocar la falla, es también necesario conocer si se llevaron a efecto reparaciones o reconstrucciones, y por qué y quiénes realizaron estas.

Es también necesario determinar si la falla representa un ejemplo aislado o si en otras ocasiones esto ha sucedido ya, en este último caso es fundamental determinar si las condiciones bajo las cuales se ha presentado han sido similares.

3.4.4 Examen Preliminar de las Partes en las que se ha Presentado Falla

Inspección Visual

Antes de proceder a la aplicación de cualquier método de limpieza es conveniente realizar un examen visual, ya que esto nos podrá dar idea del tipo de depósitos de corrosión, qué tiempo tiene que estos se han formado, entre otros aspectos. Esta inspección preliminar deberá partir de un análisis visual, ya que debemos considerar que el ojo humano tiene una excepcional profundidad de foco así como la habilidad para examinar grandes áreas rápidamente pudiendo detectar variaciones de color y textura, todo lo cual sería impráctico de efectuar con cualquier equipo óptico y electrónico.

Determinación del Origen de la Grieta

Particular atención deberá darse al análisis de las superficies de fractura así como a los patrones de las grietas, esto debe conducir a la determinación del estado inicial de la grieta.

En las características de crecimiento de la grieta se deberán buscar evidencias de condiciones anormales o abusos durante el servicio (sobrecargas), así como también servirá esto como evaluación básica del diseño (presencia de concentradores de esfuerzo) y fabricación de la pieza (acabados imperfectos).

Todas las características importantes, incluyendo las dimensiones deberán ser registradas ya sea en los croquis o en las fotografías. No sobra insistir en el énfasis que se deberá dar al examen ya que los indicios de la causa de falla frecuentemente están presentes pero no son considerados cuando el observador no analiza con detalle, de preferencia con un microscopio óptico de bajos aumentos (macroscopio de 6X a 40X) de tipo binocular.

3.4.5 Determinación del Tipo de Fractura

Varios procedimientos analíticos son empleados para distinguir los diferentes tipos de fractura, por ejemplo la presencia o ausencia de características de macro deformación plástica pueden ser determinados con una observación a simple vista o con un microscopio de bajos aumentos. Diferencias en espesor en la zona adyacente con respecto a los puntos alejados a ésta pueden servir perfectamente para precisar la existencia previa a la falla de deformación plástica.

De ser posible es recomendable juntar de nueva cuenta las partes de la pieza que se ha fracturado ya que esto también dará información precisa para determinar la presencia de deformación plástica, se debe en todo caso evitar que las superficie de falla hagan contacto, ya que esto puede dar como consecuencia la alteración de evidencias microscópicas con todos los inconvenientes que esto acarrea.

Los exámenes macro y microscópico de una fractura pueden revelar características que auxilien en la determinación no solo de la presencia de cargas cíclicas sino que también del efecto del medio ambiente. Características como las marcas de playa indican aparentemente la presencia de fatiga, lo cual se deberá conjugar con las regiones granular y brillante así como con las estrías típicas de tal fractura, ya que por ejemplo las marcas de playa son observadas en ocasiones en fracturas de corrosión bajo tensión. Se debe también considerar que la ausencia de alguna de las características de la fatiga no representa obligatoriamente que la falla se deba a algún otro mecanismo.

La presencia de picaduras o de productos de corrosión en la zona de crecimiento de la grieta (fatiga) significa que el ambiente ha tenido un efecto importante en el mecanismo de falla. Sin embargo si estos productos de corrosión se encontraran también en la zona granular (de falla por sobrecarga) representan una evidencia irrefutable de que cuando menos parte del ataque corrosivo se presentó subsecuente a la fractura y por ende no se podría afirmar que el medio ambiente ha tenido efecto en la fractura, y mucho menos se podría definir cuantitativamente su influencia.

En el caso de corrosión bajo esfuerzo ésta se distinguirá por la presencia de ramas secundarias de la grieta las cuales confluyen hacia un tronco o fractura principal. Así mismo se podrán presentar grietas secundarias que se localizan adyacentes a la fractura principal pero que no se conectan a ésta. Además de lo anterior es conveniente mencionar que la corrosión bajo tensión presentará grietas tanto transgranulares como intragranulares.

3.4.6 Registro Fotográfico de las Partes que han Sufrido Fallas

Con la finalidad de contar con un registro que permita realizar el análisis y posteriormente elaborar el reporte será necesario que el analista determine las zonas de la falla que es necesario fotografiar así como los aumentos o condiciones particulares que coadyuvan a obtener la mayor cantidad de información de dichas imágenes. Es conveniente considerar que una fisura que inicialmente puede parecer que no presenta mayor efecto en la falla del material después puede mostrar características que fueron trascendentales en el desarrollo de la fractura, he aquí de nuevo la importancia de contar con un registro lo más completo posible de la falla.

3.4.7 Ensayos

Ensayos no Destructivos

En general las pruebas no destructivas son auxiliares invaluables para el ingeniero encargado del análisis de falla, empleándose regularmente en la detección de fracturas superficiales y discontinuidades, para esto los procesos más utilizados son:

- a) Inspección por partículas magnéticas en metales ferrosos
- b) Inspección mediante líquidos penetrantes, visibles y a luz ultravioleta
- c) Inspección por ultrasonido
- d) Inspección de materiales conductores mediante métodos electromagnéticos (corrientes de Eddy)

Inspección Mediante Partículas Magnéticas

Este método se basa en la aplicación de campos magnéticos sobre el material, con lo que la pieza al ser magnetizada mostrará, a través del acomodo de las partículas magnéticas que se han distribuido en su superficie, la presencia de discontinuidades superficiales o subsuperficiales, sobre todo en aquellos casos en que las discontinuidades sean perpendiculares al campo magnético aplicado.

Líquidos Penetrantes

La inspección mediante líquidos penetrantes se emplea en la detección de fallas superficiales en el material, en general la técnica implica el revestimiento de la pieza con un líquido de alta capilaridad, que se pretende sea absorbido en las discontinuidades. El exceso de líquido es eliminado de la superficie, para después recubrir ésta con un revelador que fundamentalmente funciona al asimilar al líquido que fue absorbido por las grietas en primera instancia. El líquido normalmente es de colores brillantes o contiene partículas fluorescentes que, al ser observadas con luz ultravioleta manifiestan de manera precisa la presencia de discontinuidades.

Inspección Electromagnética

Este método se le conoce también como de corrientes parásitas y es posible de ser empleado en cualquier material conductor. Si una bobina a través de la cual fluye una corriente alterna es colocada alrededor o cerca de la superficie de la pieza a inspeccionar es evidente que se producirán corrientes parásitas en el material debido a la inducción electromagnética. Las corrientes generadas afectarán la impedancia en la bobina excitadora o en cualquier otra bobina que se encuentre adyacente, donde la presencia de grietas o discontinuidades alterarán el flujo de las corrientes de Eddy, lo cual a su vez provocará alteraciones en la impedancia de la bobina, siendo entonces viable la detección de este cambio y por ende la determinación de la presencia de discontinuidades en el material.

Ultrasonido

Las ondas sonoras de muy alta frecuencia que son transmitidas a través de un metal son reflejadas en cualquier límite o frontera, tal como la interfase metal-aire en la superficie de la pieza o también por cualquier discontinuidad interna del material. Las ondas elásticas del sonido pueden detectar pequeñas irregularidades, pero también son fácilmente absorbidas en particular cuando el material presenta granos gruesos.

Métodos Radiográficos

Estos involucran el empleo de fuentes de rayos X o de rayos gamma, cuyas emisiones son dirigidas a través de la muestra a un papel fotográfico, pudiéndose determinar la presencia de discontinuidades una vez que se realiza el revelado, estableciéndose estas mediante el contraste de las diversas zonas. El método puede ser aplicado a cualquier material y sobre todo se destaca su habilidad para detectar heterogeneidades del material así como discontinuidades. En sí el papel fotográfico permite contar con archivos para un posterior análisis y discusión.

3.4.8 Ensayos Mecánicos

Medición de Dureza

Los ensayos de dureza son los más sencillos y rápidos dentro de las pruebas mecánicas, siendo práctica común el abuso en su aplicación. De manera independiente a sus múltiples aplicaciones se pueden emplear para:

- determinar la presencia de tratamientos térmicos y la calidad de éstos
- permiten hacer una evaluación aproximada de la resistencia a la tracción, sobre todo para el caso de aceros al carbono
- permiten detectar endurecimiento por trabajo o reblandecimiento que haya sufrido el material
- en el caso de emplear microdureza es posible analizar las propiedades por separado de las diferentes fases o zonas que constituyan al material

Otras Pruebas Mecánicas

Otras pruebas mecánicas pueden ser necesarias para confirmar que el material que sufrió la falla cumple con las especificaciones de diseño, o también por qué no, para determinar la variación de propiedades que se han presentado durante el servicio. Dentro de estos ensayos podemos contar los de tracción, impacto y tenacidad de la fractura, principalmente. Es evidente que se deberá contar con un volumen de material suficientemente grande y sin microfracturas, esto con el fin de que los datos obtenidos sean representativos. Es conveniente que el material evaluado haya sufrido el mismo ciclo térmico que el de la pieza fracturada, para determinar si dicho tratamiento modifica las propiedades mecánicas.

Al analizar los datos se deberá tener cuidado en la interpretación de los resultados ya que normalmente una variación menor al 10% con respecto a los datos de diseño no representará que esto es la causa primordial de la falla. Se deberá también considerar que los ensayos efectuados en laboratorio a pequeñas muestras del material pueden no representar adecuadamente el comportamiento de una estructura de mucho mayores dimensiones que como consecuencia de estas tiene una mayor tendencia a la fractura frágil. En esta línea es posible que una estructura de acero de grandes dimensiones presente una fractura frágil a temperatura ambiente, mientras que al efectuar pruebas de impacto en probetas estandarizadas del mismo material, la temperatura de transición sea mucho menor de 0°C.

Los ensayos de tracción son especialmente relevantes durante la producción, esto con la finalidad de asegurar que el material cumpla con los requerimientos de diseño, ya en el análisis de falla los datos obtenidos servirán para confirmar que precisamente el material cumple con dichas condiciones. Como se mencionó en párrafos anteriores las variaciones de las propiedades en un rango del 10% con respecto a lo especificado no representarán en general condiciones críticas para la falla. El uso del ensayo de tracción como herramienta para el análisis de falla es más comúnmente efectuado por los fabricantes en el examen de componentes que les han sido devueltos.

3.4.9 Selección, Conservación y Limpieza de la Superficie de Fractura

La adecuada selección, preservación y limpieza de la superficie de fractura representa una etapa vital para conservar la evidencia de su destrucción o alteración. Las superficies de fractura pueden sufrir tanto daño mecánico como químico. El daño mecánico se produce generalmente por el contacto de la superficie con otros objetos, lo cual puede suceder tanto durante el servicio, como durante su remoción o el transporte para el correspondiente análisis.

Limpieza para Examen

Las superficies de fractura deberán ser lavadas sólo que esto sea necesario, como por ejemplo cuando la pieza se encuentra libre de grasa, lodo o va a ser examinada en un microscopio electrónico.

Los procedimientos de limpieza incluyen:

- Sopleado con aire seco o gas inerte
- Limpieza con un pincel de pelo suave

- Tratamiento con solventes inorgánicos
- Tratamiento con soluciones alcalinas o ácidos suaves, con la finalidad de eliminar los depósitos superficiales, sin provocar daños en el metal base
- Limpieza ultrasónica
- Aplicación y remoción de réplicas

Examen al Microscopio

Microscopía de luz

Los microscopios de luz convencional son comúnmente empleados en los trabajos de análisis, debiéndose considerar que su resolución es limitada no siendo recomendable su uso para ampliificaciones mayores a 1 500x, dado que los que observamos es un juego de luces y sombras existen restricciones por la profundidad de campo. El uso de réplicas de plástico, con o sin recubrimiento evaporado de metal reflectivo es posible para microscopía con luz. El uso de réplicas permite un examen a detalle de regiones seleccionadas sin la necesidad de cortar las muestras y son también fácilmente manejables.

Preparación de Muestras Metalográficas

El análisis metalográfico proporciona al investigador un buen indicador de la clase de material del que se trata y si tiene la estructura deseada. Si se presentan anomalías no por fuerza estas serán causa directa de la falla prematura.

Otros efectos provocados por el servicio, tales como corrosión, oxidación y un severo endurecimiento por deformación de las superficies también puede revelarse e investigar su extensión. También las características de las grietas, de manera primordial su forma de propagación, proporcionan información de los factores responsables de su inicio así como del desarrollo de estas.

Microscopía Electrónica

Comparada con la microscopía óptica, la microscopía electrónica ofrece mucho mayor resolución (hasta menos de 10 angstroms para transmisión), siendo posible ampliaciones de más de 100 000x en un microscopio de barrido, con grandes profundidades de campo.

En muchos análisis se debe determinar la estructura de una muestra tomada muy cerca de la superficie de fractura o en una región a la cual un defecto se ha desarrollado durante el servicio y es representativo de todo el componente. Esto puede hacerse analizando muestras tomadas de otras zonas y se recomienda que el número de muestras para análisis sea el mayor número posible.

En las investigaciones de grieta por fatiga es posible tomar una muestra de la región donde la fractura se originó para determinar si el desarrollo del inicio está asociado con alguna anomalía, tal como:

- Defecto de soldadura
- Superficie descarburizada
- Una zona rica en inclusiones
- En una fundición una zona que contiene alta concentración de porosidad

Análisis de Muestras Metalográficas

Como en la prueba de dureza y en el examen macroscópico el análisis de muestras metalográficas con el microscopio óptico es una práctica común en muchos análisis de falla debido a la capacidad del microscopio de revelar imperfecciones en el material causadas durante el procesamiento y/o de

detectar los resultados de una variedad de condiciones de operación y medio ambiente que puedan contribuir a la falla:

- inclusiones
- segregación microestructural
- descarburización o carburización
- contenido de carbono
- tratamiento térmico inadecuado
- martensita no revenida
- corrosión intergranular

Muchas imperfecciones metalúrgicas y condiciones indeseables pueden ser detectadas y analizadas por el microscopio óptico de muestras metalográficas. Aún si no existieran imperfecciones metalúrgicas durante el análisis metalográfico es de gran valor para el investigador el poder analizar y medir parámetros tales como:

- profundidad de capa de endurecimiento
- espesor de recubrimientos electrolíticos
- tamaño de grano
- zona afectada por la temperatura

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Esta técnica se está usando ampliamente por los analistas en la fractografía debido a que permite un análisis directo de la superficie de fractura real sin la necesidad de una réplica. La gran ventaja del SEM es su habilidad para analizar muestras a bajos aumentos, desde 15 x y amplificar zonas de interés a muy altos aumentos. Es también muy útil cuando se analizan fracturas en secciones muy delgadas como alambres y láminas en las cuales es difícil obtener réplicas.

3.4.10 Análisis Volumétrico del Material

Pueden usarse diversas técnicas analíticas para determinar la concentración de elementos y para identificar compuestos en las aleaciones, depósitos superficiales y muestras de fluidos, lubricantes y suspensiones que rodean a la pieza.

Entre este tipo de técnicas se encuentran:

- *Emisión Semicuantitativa*
- *Análisis de superficies y depósitos*

3.4.11 Análisis y Determinación del Mecanismo de Fractura

El mecanismo de fractura en las piezas metálicas y muestras bajo carga, y la aplicación de los conceptos de mecánica de fractura al diseño y la predicción de la vida de servicio de las piezas y componentes son siempre pertinentes para el análisis de falla. Los conceptos de mecánica de fractura y las medidas de tenacidad a la fractura y otros parámetros de tenacidad proveen un marco de referencia cuantitativo para evaluar de manera confiable la estructura.

3.4.12 Pruebas de Simulación de Servicio

En las etapas finales de una investigación sobre análisis de falla puede ser necesario el realizar pruebas en las que se intenten simular las condiciones bajo las cuales se supone o estima en las cuales ocurrió la falla. Frecuentemente, estas pruebas no son practicables debido a lo complejo del

equipo que se requiere, y aún cuando son realizadas, no es posible que se sometan a todas las condiciones de servicio a las que se sabe existen en la realidad.

3.4.13 Análisis de los Resultados y Formulación de las Conclusiones

En ciertas etapas en cada investigación, la evidencia que se revela en los análisis y los resultados de las pruebas, son analizadas y reunidas para formular una conclusión preliminar. Si la causa probable de falla es aparente en las primeras etapas del análisis, las investigaciones subsecuentes se dirigirán y ampliarán hacia la confirmación de las causas probables y la eliminación de otras posibilidades. Otras investigaciones seguirán una serie lógica de etapas, como las que se destacan en estas notas, y el objetivo en cada etapa determinará las investigaciones a seguir. Como vayan apareciendo nuevos hechos que modifiquen las primeras impresiones se irán desarrollando nuevas hipótesis de falla y deberán consolidarse o abandonarse de acuerdo a los nuevos hechos que se vayan encontrando. Finalmente, en aquellas investigaciones en las cuales la causa de falla es particularmente compleja, una investigación en reportes publicados de sucesos similares pueden quererirse para sugerir posibles indicios.

Algunos de los trabajos ejecutados durante el curso de una investigación puede pensarse que sean innecesarios. Es importante distinguir entre el trabajo que es innecesario y en aquel en el cual no brinden resultados fructíferos. Durante un análisis debe esperarse que parte del trabajo realizado no ayude a determinar la causa de la falla, pero cuando menos una evidencia "negativa" pueda reorientar y obliga al análisis de algunas otras hipótesis que no fueron consideradas inicialmente. Sin embargo, antes de alcanzar conclusiones finales, se deberán buscar datos adicionales que confirmen la opinión original si es posible. La dependencia total de las conclusiones que puedan ser obtenidas de una simple muestra, como los de una muestra metalográfica, pueden ser fácilmente cambiadas a menos que se cuente con datos de fallas similares.

La siguiente lista está formada por una serie de preguntas, se presenta como una auxiliar en el análisis de la evidencia derivada de otros análisis y pruebas, y en la formulación de conclusiones. Las preguntas son también útiles para poner atención sobre los detalles que en investigaciones completas han pasado desapercibidas.

- ⇒ ¿Se ha establecido de manera correcta la secuencia de fallas?
- ⇒ ¿Se ha determinado los sitios en los que se inició el agrietamiento o fractura que llevó a la falla?
- ⇒ ¿Las grietas se iniciaron en la superficie o abajo de ésta?
- ⇒ ¿El agrietamiento está asociado con un concentrador de esfuerzos?
- ⇒ ¿Qué tan grande es la grieta producida?
- ⇒ ¿Cuál fue la intensidad de carga?
- ⇒ ¿Cuál fue el tipo de carga: estática, cíclica o intermitente?
- ⇒ ¿Cuál fue la orientación del esfuerzo?
- ⇒ ¿Cuál fue el mecanismo de falla?
- ⇒ ¿Cuál fue la temperatura en servicio aproximada en el momento de falla?
- ⇒ ¿Contribuyó la temperatura a la falla?
- ⇒ ¿Contribuyó la corrosión a la falla?
- ⇒ ¿Qué tipo de corrosión?
- ⇒ ¿El material utilizado fue el apropiado?
- ⇒ ¿Es requerido un mejor material?
- ⇒ ¿La calidad del material es apreciable de acuerdo a las especificaciones?
- ⇒ ¿La sección transversal fue adecuada para el tipo de servicio?
- ⇒ ¿Las propiedades mecánicas del material fueron las aceptables de acuerdo a las investigaciones?
- ⇒ ¿La pieza que falló fue tratada térmicamente en forma apropiada?
- ⇒ ¿La pieza que falló fue fabricada apropiadamente?

- ⇒ ¿La pieza que falló fue ensamblada e instalada apropiadamente?
- ⇒ ¿Se reparó alguna vez el componente durante el servicio, y si así fue, la reparación se realizó correctamente?
- ⇒ ¿El componente fue utilizado apropiadamente?
- ⇒ ¿En el componente se hizo el mantenimiento apropiado?
- ⇒ ¿Se lubricó en forma adecuada?
- ⇒ ¿La falla está relacionada con un abuso en servicio?
- ⇒ ¿Se puede mejorar el diseño del componente para evitar fallas similares?
- ⇒ ¿Existen componentes similares a los que fallaron aún en servicio, y qué se puede hacer para prever la falla?

Las respuestas a estas preguntas, generalmente deberán ser resultado de una combinación de registros, de análisis y pruebas previamente señaladas en estas notas. Sin embargo, la causa o causas de la falla no siempre podrán determinarse con certeza. La causa o causas más probables de falla deberán distinguirse de las simples conjeturas, ya que están basadas en hechos demostrables.

3.4.14 Redacción del Reporte

El reporte del análisis de falla deberá escribirse clara concisa y lógicamente. Un investigador experimentado ha propuesto que el reporte se divida en las siguientes secciones principales:

1. Descripción del componente que ha fallado
2. Condiciones de servicio en el momento de falla
3. Historia de servicio
4. Historia de los procesos de manufactura del componente
5. Análisis mecánico y metalúrgico de la falla
6. Evaluación de calidad metalúrgica
7. Resumen de los mecanismos que causaron la falla
8. Recomendaciones para prever fallas similares o para corregir componentes similares que aún se encuentran en servicio

Obviamente, no todos los reportes deberán cubrir todos los puntos anteriormente mencionados. Reportes muy extensos deberán con una introducción. Debido a que los lectores de reportes de análisis de falla son siempre personal de compras, operadores y/o contadores, se debe evitar en la medida de lo posible el empleo de un lenguaje técnico sofisticado. Un glosario de términos puede ser de gran utilidad. El uso de apéndices que contengan detalles sobre cálculos, ecuaciones y tablas de datos químicos y metalúrgicos, pueden ayudar para que todo el reporte sea claro y ordenado.

3.4.14 Conservación de los Registros

Por último, y no menos importante, los reportes obtenidos del análisis de falla deberán archivar con cierta clasificación, con palabras claves tales como:

- Tipo de materiales de las piezas
- Tipo de falla
- Día y nombre asignados al análisis, medición y los resultados obtenidos

Estos reportes podrán ayudar en un futuro próximo para tipos de fallas similares. Este es uno de los procedimientos más importantes para acumular conocimiento y experiencia de análisis de falla.

Nota: Refiérase a los Apuntes de Análisis de Falla, para mayor detalle. Vea bibliografía.

CAPITULO 4

4. Selección de Recursos

En este capítulo se realiza un breve análisis de los recursos, que se seleccionaron para el desarrollo de SEAFEM.

4.1 Análisis de Recursos

Dentro de los diferentes recursos que se tienen que tomar en cuenta para el desarrollo del sistema, podemos mencionar los siguientes: la Base de Datos, el lenguaje de programación, el shell que realizara la función de máquina de inferencias, así como el sistema operativo. Todo esto en función de los requerimientos del sistema, además de los recursos con que se cuenta o se puede contar. Así como también; la metodología de desarrollo para el sistema, la elección del método de encadenamiento y lo referente a los formatos para la adquisición del conocimiento que a su vez nos ayudan a llevar un control mas detallado de la recopilación del conocimiento.

4.1.1 Bases de Datos

Una base de datos es una colección de datos interrelacionados y almacenados en conjunto sin redundancias perjudiciales o innecesarias; su finalidad es la de servir a una o más aplicaciones.

Los sistemas de gestión de base de datos organizan y estructuran los datos de tal modo que puedan ser recuperados y manipulados por los usuarios y programas de aplicación. Las estructuras de los datos y las técnicas de acceso proporcionadas por un DBMS particular se denominan su modelo de datos. El modelo de datos determina la "personalidad" de un DBMS, y las aplicaciones para las cuales está particularmente bien conformado

Dentro de las bases de datos podemos destacar las que cuentan con un modelo de datos relacional.

Una base de datos relacional es una base de datos en donde todos los datos visibles al usuario están organizados estrictamente como tablas de valores, y en donde todas las operaciones de la base de datos operan sobre estas tablas.

EJEMPLOS DE BASES DE DATOS RELACIONALES

Base de datos	Desventajas	Ventajas
SYBASE	Es costoso	Permite la conexión a la BD en diversas plataformas a través de un protocolo de comunicación
Access	No se puede considerar propiamente como un DBMS, aunque si soporta aplicaciones cliente / servidor, se considera más de escritorio	Fácil de administrar. Contiene mucho elementos de un DBMS, contiene integridad referencial, soporte de transacciones, seguridad de datos y consultas mediante SQL
ORACLE	No provee volúmenes grandes de información. Se necesita espacio en disco para el lenguaje mismo, sus objetos y sus consultas.	Se puede acceder a la base, para hacer respaldos y transacciones cuando se encuentre en línea. El lenguaje esta diseñado para ser fácil de escribir y leer. Consultas interactivas.

4.1.2 Lenguajes de Programación

La decisión del lenguaje a emplear, depende del adecuado desarrollo del sistema. Una buena elección reducirá las dificultades de codificación, además de la facilidad de mantenimiento.

Dentro de las características que debe cumplir un lenguaje para el desarrollo de un sistema podemos mencionar:

- Y Producir un código legible.
- Y Detección rápida de posibles errores.
- Y Debe ser portable.

EJEMPLOS DE LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN DE MAYOR USO

Lenguaje de Programación	Características Principales	Requerimientos
Visual Basic	Proporciona en su última versión (6) aplicaciones muy ad hoc para Windows 95/98 y Windows NT. Crea programas ejecutables, incluso crea sus propios controles. Proporciona características para Internet y bases de datos. Incluye un motor de bases de datos de Access.	50 MB en DD Procesador Pentium 16 MB en RAM
Visual C++	Es un lenguaje altamente compatible. Contiene no solamente un compilador, sino también todas las bibliotecas, ejemplos y documentación para crear aplicaciones para Windows 95 y Windows NT	Procesador Pentium® 90MHz (mínimo) 24MB RAM (32MB RAM recomendado) 290MB en DD
Java	Es dinámico ya que puede cargar un nuevo código de cualquier parte de la red y compilarlo, lo que implica que no existe problema con las versiones que puedan tenerse.	Procesador 486 16 MB en RAM 100 MB en DD para c/s

4.1.3 Sistemas Operativos

Un sistema operativo puede ser contemplado como una colección organizada de extensiones software del hardware, consistentes en rutinas de control que hacen funcionar una computadora y proporcionar un entorno para la ejecución de los programas.

Un sistema operativo puede procesar su carga de trabajo de forma serial o de forma concurrente, es decir, los recursos del sistema informático pueden estar dedicados a un solo programa, hasta que este termine, o pueden ser reasignados dinámicamente entre una colección de programas activos en diferentes etapas de ejecución.

EJEMPLOS DE SISTEMAS OPERATIVOS DE MAYOR USO

Sistema Operativo	Características Principales	Requerimientos
UNIX	Amplia capacidad. Multitarea y multiusuario. Independencia de dispositivos. Capacidad de manejo de errores. Procesamiento en segundo plano. Administración central. Recursos compartidos.	Procesador 486 SX 8 MB en RAM 50 MB DD
LINUX	Multitareas reales. Memoria virtual. Carga por demanda. Es gratuito. Existe acceso al código fuente. Es estrictamente el núcleo del sistema, un archivo que no ocupa más de medio mega.	Se instala con 20 MB de RAM y 40 MB en DD
Windows 95	Proporciona ventajas significativas tanto a usuarios como a programadores. Interfaz Gráfica de Usuario (GUI). Multitarea. Fácil manejo para el usuario común	Procesador 486 o superior, 8MB en RAM, 50 a 55 MB en DD

4.1.4 Shells para Sistemas Expertos

Existen muchas clases diferentes de herramientas para Sistemas Expertos, con una amplia variedad de niveles y clases de funcionalidad y de requerimientos de equipo. En general, las herramientas para Sistemas Expertos se pueden pensar como un espectro. Este espectro se mueve desde el nivel más inferior de los lenguajes de programación de propósito general hasta el nivel más alto de grandes ambientes híbridos de desarrollo.

Las herramientas para Sistemas Expertos son valiosas por las siguientes razones:

Proporciona ambientes enriquecidos para el desarrollo de software. Los componentes incluyen: editores de estructura, opciones para el depuramiento y el rastreo y facilidades de señalamiento. Incluyen ayudas específicas para prototipos rápidos. Se puede evitar gran parte de la definición de modelos de consulta, representación de conocimientos y paradigma de inferencia porque estas facilidades están incorporadas en las herramientas.

La ventaja de los shells sobre los lenguajes de programación especializada en procesamiento simbólico -como Lisp y Prolog- es que el ingeniero de conocimiento puede minimizar tareas de programación para concentrarse en desarrollo de las bases de conocimientos. El resultado es que se pueda generar aplicaciones muy rápidamente.

EJEMPLOS DE SHELLS PARA SISTEMAS EXPERTOS

Shell	Características Principales
Insight 2 (I2)	Es un lenguaje basado en reglas de producción. Es un antecesor de Visual Rule Studio. Opera bajo sistema operativo DOS. Se pueden realizar programas auxiliares en pascal. Y también se tiene acceso a bases de datos.
Level 5 Object	Es un lenguaje basado en reglas de producción, antecesor de Visual Rule Studio. Combina las técnicas de OOP y la programación procedural tradicional.
Visual Rule Studio	Es un lenguaje basado en reglas de producción, las cuales constituyen la base de conocimientos. Se puede integrar como un objeto, en lenguajes con OOP; como Visual Basic, Visual C++, Java.

4.2 Selección de Recursos a utilizar

A continuación se mencionan las razones que se tienen para realizar a SEAFEM, bajo las siguientes herramientas.

4.2.1 Base de Datos Access 2000 como DBMS

Los proveedores de software consideran las bases de datos en dos partes, la entrada que controla la presentación de los datos en pantalla y la información del usuario con la entrada de los datos y por otra parte; el motor de la base de datos, que se encarga del mantenimiento de los datos.

Dentro del mercado de productos comerciales de Bases de Datos, los más conocidos son Oracle, Informix, Sybase, SQLServer, que además de ser productos muy robustos, proporcionan integridad y excelente calidad, sin embargo el mantenimiento y el proceso de instalación son en cierta medida complejos y se necesita de una persona con los conocimientos necesarios en el manejo de este tipo de base de datos.

Por otra parte; estos productos cuentan con características, tan potentes que para el sistema que se tiene planeado desarrollar, se desaprovecharían estas ventajas. Además de que el costo de las licencias es elevado comparado con otra base de datos, que aplique y se aproveche mejor para SEAFEM.

Por otro lado, al ser SEAFEM una aplicación que se va a estar ejecutando en una PC de escritorio, se ve la ventaja de que prácticamente cualquier PC en la actualidad, cuenta con la suite de productos de Microsoft entre ellos Access.

Por estas razones se decidió utilizar la Base de Datos Access, la cual proporciona un rápido acceso, seguridad y un costo medio, pero sobre todo una Base de Datos que cubre las necesidades de SEAFEM.

4.2.2 Visual Basic 6.0 como entorno de desarrollo

En lo que respecta al lenguaje de programación, se eligió Visual Basic 6.0. Una de las causas principales por la que se eligió este entorno de desarrollo, es el hecho de conocer su funcionamiento, ahorrándonos tiempo en aprender uno nuevo, además de que Visual Basic ofrece un ambiente gráfico amigable. Visual Basic es una herramienta de desarrollo, la cual contiene un depurador (debugger) altamente interactivo, el cual permite cambiar los valores de las variables y propiedades del objeto en tiempo de ejecución, pudiendo analizar resultados de forma inmediata.

En lo que respecta a la necesidad de interactuar con una base de datos, Visual Basic es compatible con Access en una forma muy interesante, además de ser uno de los lenguajes más utilizados en la actualidad. Además de que Visual Basic cumple con las expectativas de capacidad de programación orientada a objetos (aunque no tan amplia y poderosa como en otros lenguajes de programación).

4.2.3 Visual Rule Studio como Máquina de Inferencias

La selección del Shell se centro en un software llamado Visual Rule Studio, el cual cuenta con características, que lo hacen muy competitivo con respecto a otros paquetes similares, especialmente en lo relacionado con 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 encadenamiento funcionen al mismo tiempo, lo cual le da una gran ventaja sobre otro tipo de shell. Esta herramienta 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 desarrollador solamente se ocupe de construir la base de reglas que a su vez constituye la parte esencial del Sistema Experto en conjunto.

Además de que Visual Rule Studio es altamente compatible con Visual Basic. Al instalar Visual Rule Studio, este aparece como una parte integral de Visual Basic, es decir, como un Activex Designer. Pudiendo alojar en una aplicación de Visual Basic un objeto conteniendo las reglas de negocios o base de conocimientos. El conjunto de reglas generado a través de Visual Rule Studio puede ser compilado con Visual Basic como .exe, .ocx, o .dll.

4.2.4 Windows 95 como Sistema Operativo

Windows proporciona ventajas significativas tanto a los usuarios como a los desarrolladores respecto al convencional entorno MS-DOS. Los beneficios a los usuarios y a los desarrolladores son realmente bastante similares porque el trabajo de un desarrollador es dar a los usuarios lo que ellos necesitan y desean, y que además sea factible realizar.

Windows es una interfaz gráfica de usuario (GUI: Graphical User Interface). Es un sistema operativo multitarea y monousuario. Puede ejecutar aplicaciones para Windows y aplicaciones para DOS.

Una de sus principales funciones es facilitar la comunicación entre el usuario y el ordenador. En el caso de Windows 98 esa comunicación se basa en las denominadas "ventanas" para que el sistema envíe información al usuario y los controles para que el usuario envíe información a Windows.

Las ventanas muestran al usuario información de cualquier tipo, ya sea texto o gráfico. Los controles son elementos incluidos en una ventana que permite al usuario realizar operaciones, por ejemplo, un botón para seleccionar algo, una lista de valores, un menú con diferentes opciones, una caja para introducir texto, etc.

El sistema operativo, es de fácil empleo para el usuario hacia el cual va dirigido SEAFEM. Además de que Visual Basic como lenguaje de desarrollo se puede ejecutar bajo esta plataforma. Al igual que Visual Rule Studio, así como también la aplicación de Access 2000 para el manejo de la base de datos.

4.2.5 Metodología de Desarrollo

El proceso de desarrollo de Sistemas Expertos, consiste de varias etapas básicas que son similares a las etapas típicas del ciclo de vida en ingeniería de software. Estas etapas son identificación del problema, construcción del prototipo, formalización, implantación, evaluación y evolución a largo plazo.

Sin excepción, la primera tarea en el desarrollo de cualquier Sistema Experto es establecer que el problema propuesto sea apropiado y requiera ser solucionado por un Sistema Experto.

Después de la selección de un problema apropiado, se construye un prototipo pequeño para ayudar en la comprensión del problema completo y estimar la tarea de la construcción de la solución total. El siguiente paso en el proceso de desarrollo, es formalizar el enunciado del problema y diseñar completamente el Sistema Experto. Después de la formalización se realiza la implantación. Esta consiste principalmente de un ciclo continuo de adquisición de conocimientos y pruebas.

Se entiende como fase de evaluación, que sigue a la implantación, la estimación de la proximidad del sistema al desempeño experto. Después de la evaluación y entrega, el Sistema Experto entra a un periodo de evolución a largo plazo. Durante este periodo el sistema continua incrementando su competencia (según la experiencia que se vaya logrando con su empleo) y se revisa como respuesta a los cambios en los conocimientos del área.

4.2.6 Técnicas de Adquisición de Conocimiento

Cada una de las tres actividades paralelas de Adquisición de Conocimiento está centrada en el concepto de alguna forma de interacción entre el Ingeniero de Conocimiento y el experto con relación a escenarios de solución de problemas.

- **Descripción.** En esta forma, que es una de las más apropiadas para las etapas iniciales del proyecto, el experto presenta una descripción estructurada del dominio. Esta clase de representación, que es similar a la que se ofrece en los textos y lecturas formales, es buena para establecer la información fundamental. Sin embargo, es de valor restringido para el desarrollo del sistema real, principalmente porque presenta versiones idealizadas de las actividades de solución de problemas y con frecuencia omite información con respecto a las estrategias.
- **Observación.** En este caso el Ingeniero del Conocimiento simplemente observa al experto durante situaciones reales de solución de problemas. Esta actividad, que es la más valiosa después de que el Ingeniero del Conocimiento ha establecido un nivel razonable de competencia en el dominio, posibilita al Ingeniero del Conocimiento para observar detalles de solución de problemas en un ambiente que no es inventado en ningún sentido.
- **Introspección.** En este modo de interacción, que normalmente se presenta con la entrevista del Ingeniero del Conocimiento al experto, se conduce una evaluación crítica de las situaciones de solución de problemas. Esto posibilita al Ingeniero del Conocimiento para explorar activamente el conocimiento requerido.

CAPITULO

5

5. Análisis

El análisis es el proceso de recolectar los requerimientos de los usuarios.

En el presente capítulo abordaremos en forma detallada la etapa del análisis. También se presentan los diferentes diagramas que lo integran.

5.1 Requerimientos (Módulos)

A través de entrevistas y reuniones con el experto, así como también con personas que en un momento dado serán usuarios de SEAFEM, se reúne información referente a los requerimientos y necesidades con los que el sistema debe contar. A partir de lo anterior se tienen los módulos con los que debe contar el sistema.

5.1.1 Requerimientos operativos generales

- El sistema debe ser amigable.
- De fácil acceso para el usuario.
- Accesibilidad en el uso de menús y ventanas en los diferentes módulos.
- Colores agradables a la vista del usuario.
- SEAFEM debe contar con un módulo de ayuda, para resolver dudas, sobre términos propios del Análisis de Falla. Así como también, del funcionamiento del sistema.

5.1.2 Requerimientos Funcionales

A partir de las necesidades y requerimientos para el Análisis de Falla, y bajo las características observadas, se decidió la siguiente estructura para el desarrollo de SEAFEM.

El contenido general del sistema se presenta a continuación. Más adelante se describe brevemente cada uno de los módulos.

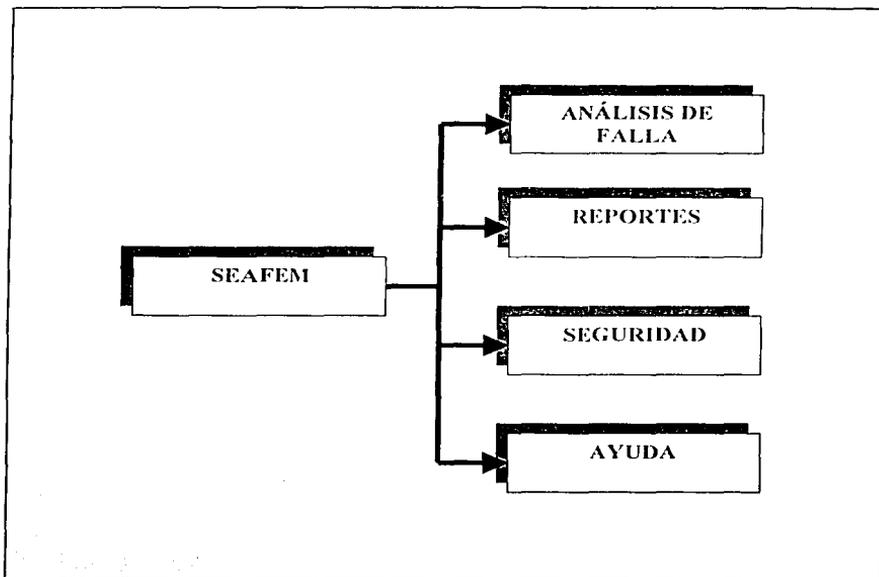


Figura 5.1 Contenido General de SEAFEM

1. ANÁLISIS DE FALLA. Dentro de este proceso se lleva a cabo la recopilación de información, a través de la cual el sistema comienza a emitir conclusiones. Lo anterior en función de las respuestas dadas por el usuario.

Dentro de la información requerida para el análisis, se piden datos tales como: tipo de material, condiciones de operación, condiciones ambientales que rodean al elemento, procesos de manufactura que se le pudieron haber efectuado o no al elemento, así como también del aspecto visual de la fractura, entre otras (1er nivel de análisis)

Después de haber realizado una serie de conclusiones intermedias, el sistema recomienda una serie de pruebas a realizar. A la pieza que se está analizando (eje).

Una vez realizadas las pruebas recomendadas, el usuario ingresa al sistema los resultados obtenidos. Esto en un segundo nivel de análisis (no tratado en este tema de tesis), que en conjunto con el primer nivel de análisis, nos corrobora el tipo de falla que se presentó en la pieza, y así poder emitir conclusiones y resultados. Dichos resultados y conclusiones pueden ser satisfactorios o no. Es decir, se puede establecer o no, el tipo de falla, así como las acciones a tomar para que el problema no se vuelva a presentar, así como las causas que lo originaron.

2. REPORTES. Con este módulo se puede tener un informe impreso del análisis, con las recomendaciones de pruebas a realizar, recomendaciones finales y causas de la falla. El objeto de esto es poder conservar de manera impresa un seguimiento del análisis.

3. SEGURIDAD. Uno de los requerimientos principales de SEAFEM es de la seguridad, enfocada sobre todo a que cada uno de los usuarios potenciales del sistema puedan tener acceso a todos y cada uno de sus posibles análisis, pero sólo a los que cada usuario haya realizado. Es decir, los usuarios no puedan tener acceso a análisis de otros usuarios.

4. AYUDA. Dentro de SEAFEM se cuenta con un módulo de ayuda, tanto del funcionamiento del sistema, así como de los diferentes términos dentro del Análisis de Falla que pudieran no ser del todo claro para el usuario, o que tal vez lo conoce, pero con otro nombre. De ahí la necesidad del módulo de ayuda.

5.2 Análisis Detallado

A continuación, se detalla más el módulo de análisis del proyecto. A partir de aquí se definirán los flujos de información, y los procesos que realiza el sistema. Además se describirán los modelos obtenidos a partir de los requerimientos para poder efectuar el Análisis de Falla.

5.2.1 Diagrama de Contexto

En el diagrama de contexto, se muestra como es la operación de SEAFEM en el proceso de análisis de falla.

Dicho proceso, consta de dos niveles. El primer análisis se basa en datos generales y de operación. También de una inspección visual del eje que se está analizando. Y por último de un cálculo de esfuerzos máximos, al que puede ser sometido el eje.

A partir del primer nivel de análisis se establece una sospecha del tipo de falla que se presentó en el eje y una serie de pruebas de laboratorio que se tendrán que realizar a la pieza.

El siguiente nivel de análisis será abordado una vez que SEAFEM, en su versión actual, sea conocido y aceptado por los usuarios del CDM.

La recomendación consiste en que otro equipo de tesis desarrolle dicha extensión con el alcance que se describe a continuación.

Una vez que se tienen los resultados de las pruebas, se procede a consultar nuevamente a SEAFEM. En un segundo nivel de análisis, el sistema es alimentado con los resultados obtenidos de las pruebas realizadas. Así como también, de los datos del primer nivel de análisis. Dichos datos del primer nivel de análisis; están dentro de una base de datos.

Por último, SEAFEM emite sus conclusiones finales, dentro de las cuales se mencionan, tipo de falla, causas de la falla y una recomendación para que la falla no se vuelva a presentar.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 5.2 Diagrama de Contexto de SEAFEM

Los puntos 1, 2 y 3, se abordaran en esta tesis; los puntos 4 y 5 (sombreados) son los que se recomiendan sean tratados en un siguiente tema de tesis, con el objetivo de hacer una extensión de la versión actual de SEAFEM.

5.2.2 Diagrama Jerárquico Funcional

En este diagrama se muestran las funciones que se realizan en el sistema.

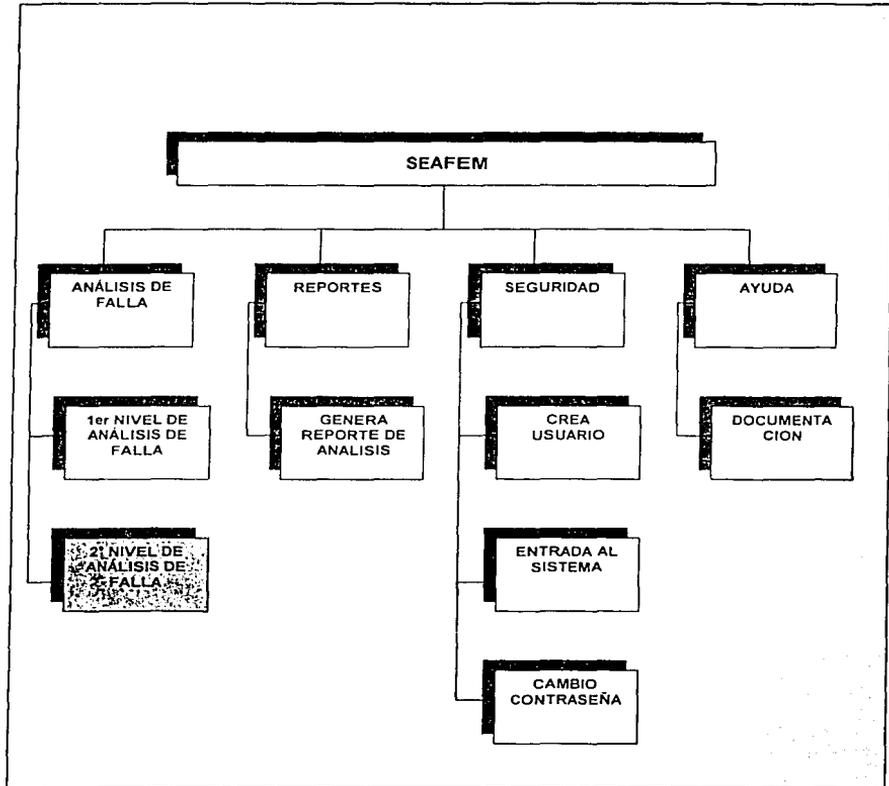


Figura 5.3 Diagrama Jerárquico Funcional de SEAFEM

El segundo nivel de análisis de falla (sombreado), no es tratado en este tema de tesis

5.2.3 Diagrama de Flujo de Datos

El Diagrama de Flujo de Datos, representa en forma gráfica el desplazamiento de los datos, entre las distintas entradas y salidas de SEAFEM. Este diagrama tiene la función de esquematizar el sistema en diferentes niveles de abstracción de forma tal que, cada nivel contenga un mejor flujo de información, así como una descripción más profunda del detalle funcional.

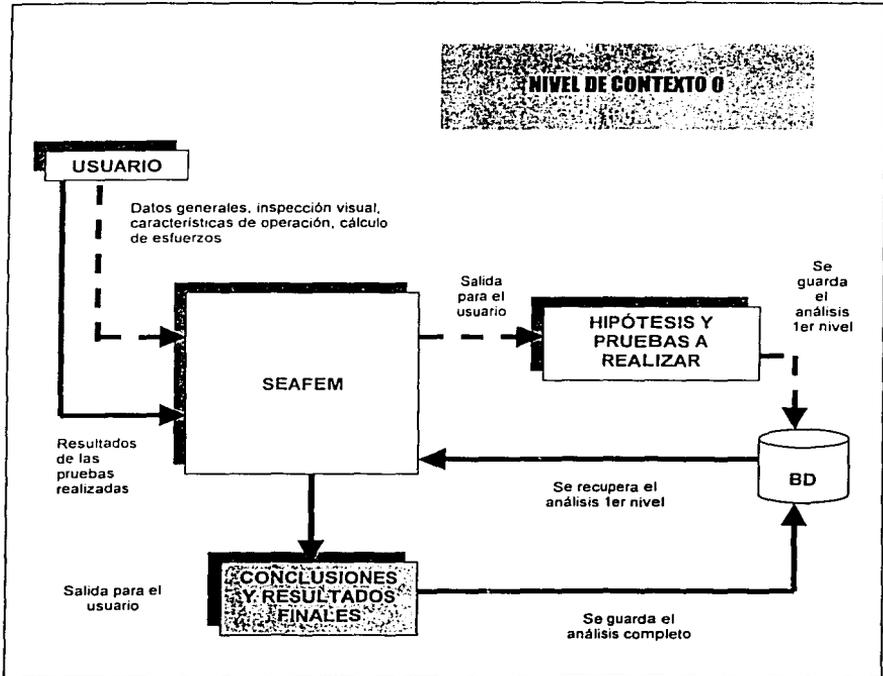
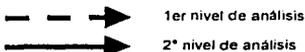


Figura 5.4 Diagrama de Flujo de Datos de SEAFEM Nivel 0

Notas:



El segundo nivel de análisis de falla (sombreado) no es tratado en este tema de tesis.

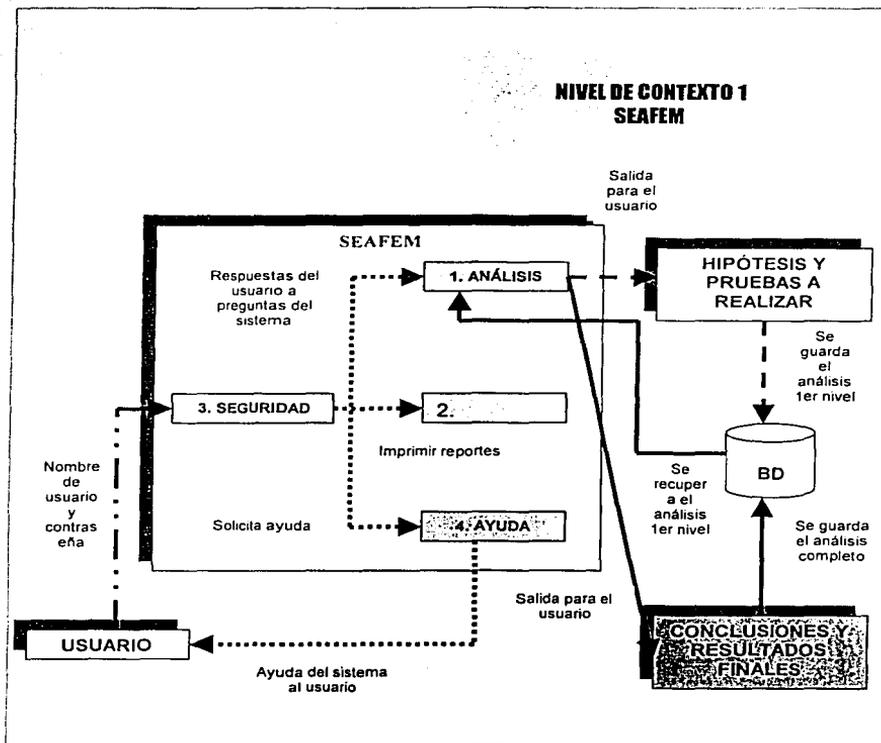


Figura 5.5 Diagrama de Flujo de Datos de SEAFEM Nivel 1

Notas:

- ➔ 1er nivel de análisis. Inspección visual, datos generales, características de operación, cál. de esfuerzos
- ➔ 2º nivel de análisis. Resultados de pruebas
- ➔ Los dos niveles de análisis. El sistema puede ser alimentado con datos de la inspección visual. O bien con los resultados de las pruebas. Según sea el caso.
- . - ➔ Acceso al sistema. Creación de usuarios (sólo el Administrador). Cambio de contraseña.

El segundo nivel de análisis de falla (sombreado) no es tratado en este tema de tesis.

Dentro del módulo de análisis tenemos lo siguiente:

- 1.1 *1er nivel de análisis de falla.* Aquí SEAFEM, realiza preguntas relacionadas con la inspección visual, características de operación, información general, y el cálculo de esfuerzos. Dichas preguntas nos van a llevar a establecer una sospecha de tipo de falla. Así como una primer salida para el usuario. Esta es, básicamente la recomendación de pruebas de laboratorio a realizar al eje en análisis.
- 1.2 *2° nivel de análisis de falla.* Aquí se realizan preguntas relacionadas con los resultados de las pruebas realizadas (recomendadas en el punto anterior). Además de otras preguntas, referentes al elemento en análisis. Este nivel de análisis no es tratado en este tema de tesis.

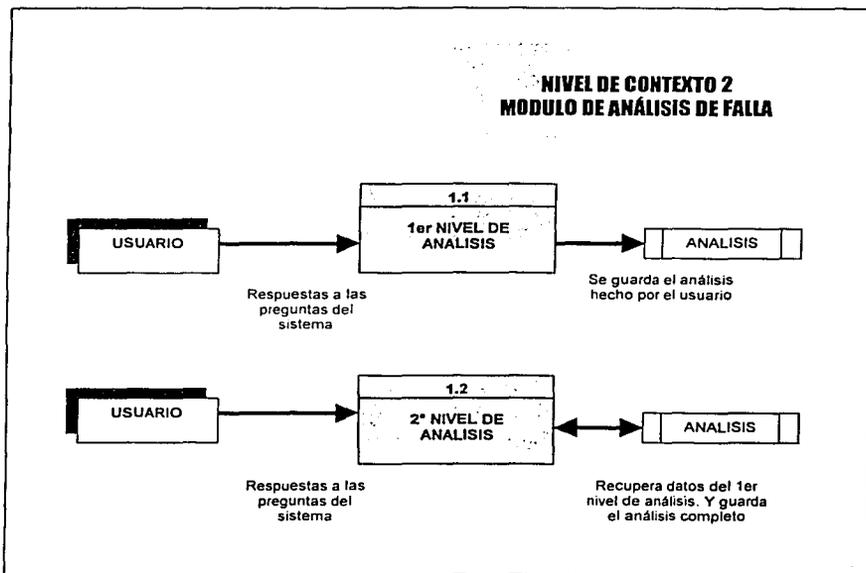


Figura 5.6 Diagrama de Flujo de Datos de SEAFEM-Análisis de falla Nivel 2

Nota:

El segundo nivel de análisis de falla no es tratado en este tema de tesis. Se hace referencia a él para que se comprenda el empleo de los datos y resultados del primer nivel de análisis.

Dentro del módulo de reportes tenemos lo siguiente:

2.1 Reportes. Con el módulo de reportes, el usuario tiene la opción de imprimir los resultados que el sistema genera. Dicho reporte esta compuesto de:

- a) Las respuestas dadas por el usuario.
- b) La recomendación de pruebas.

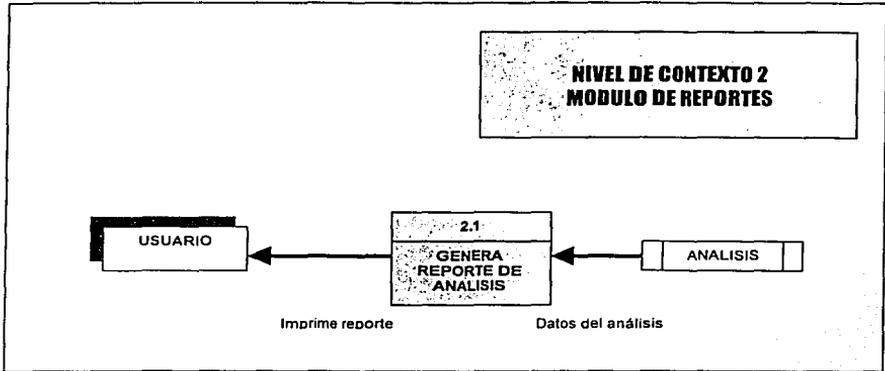


Figura 5.7 Diagrama de Flujo de Datos de SEAFEM-Reportes Nivel 2

Dentro del módulo de seguridad tenemos lo siguiente:

- 3.1 Crea usuario.** Sólo disponible para el Administrador del sistema. Dicho Administrador del sistema es el único usuario con la capacidad de crear más cuentas a otros usuarios para que puedan acceder a SEAFEM. La finalidad de esto es que cada usuario potencial del sistema, tenga acceso sólo a los análisis que el halla realizado, o pretenda realizar.
- 3.2 Entrada al sistema.** El usuario al proporcionar su nombre de usuario, y su contraseña; tendrá o no acceso al sistema. Esto depende, de dos cosas. Por un lado, si el usuario esta registrado. Y por otro, si su nombre de usuario y su contraseña son correctas.
- 3.3 Cambio de contraseña.** El usuario puede cambiar su contraseña de acceso al sistema. Sólo necesita proporcionar su antigua contraseña y la nueva que él desee.

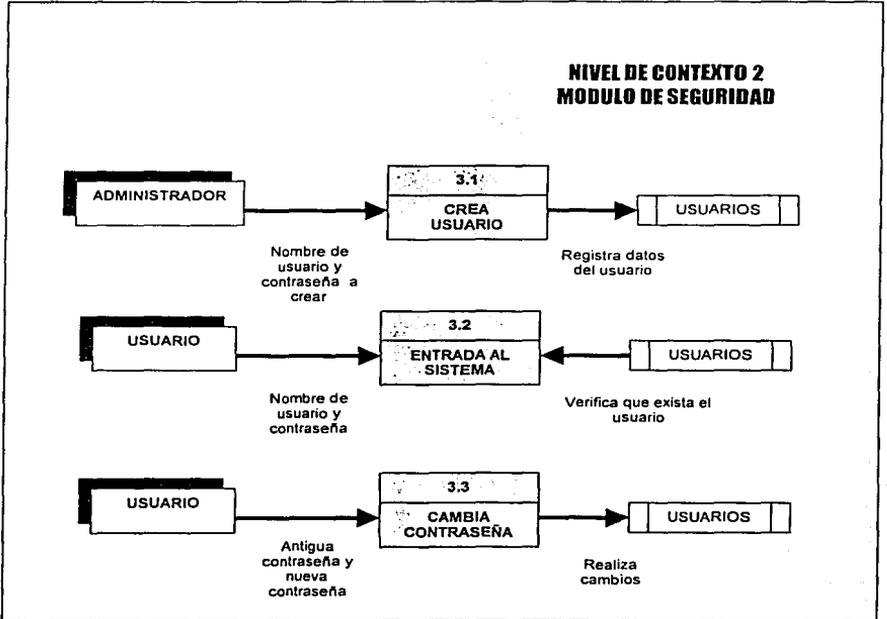


Figura 5.8 Diagrama de Flujo de Datos de SEAFEM-Seguridad Nivel 2

Dentro del módulo de ayuda tenemos lo siguiente:

4.1 Genera ayuda. El usuario tiene a su disposición ayuda en el sistema. La ayuda esta relacionada con el funcionamiento del sistema. Y también de la terminología empleada en el análisis de falla.

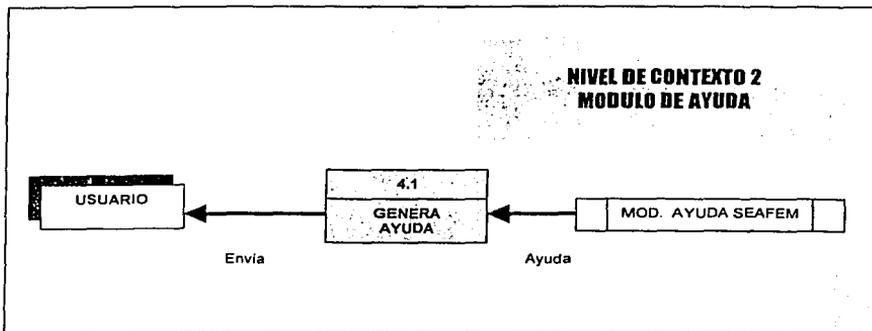


Figura 5.9 Diagrama de Flujo de Datos de SEAFEM-Ayuda Nivel 2

CAPITULO 6

6. Diseño y Desarrollo

En todo sistema existe una sección encargada de llevar el control de todos los módulos que forman parte de el. Por lo que en este capítulo se presenta una descripción de este. Así como de los módulos que lo integran.

6.1 Menú del sistema

Antes de entrar en detalle en los módulos, se explicara el menú del sistema, en este se encuentran las siguientes opciones

Seguridad. Aquí se encuentra contenido todo lo referente al modulo de seguridad el cual se explicara mas adelante

Análisis Esta opción nos introduce al modulo de Análisis de Falla, que es la base central del sistema

Ventana. Muestra las ventanas que se encuentran activas en el sistema

Ayuda. En esta opción encontramos todo lo referente al modulo de Ayuda, en el cual se encuentran definiciones de palabras utilizadas en el sistema, así como una guía de utilización del sistema

Salir. Esta opción es la queda la salida total del sistema

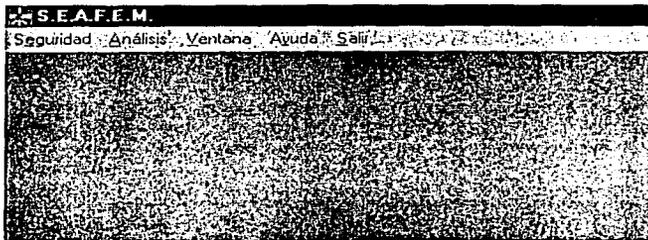
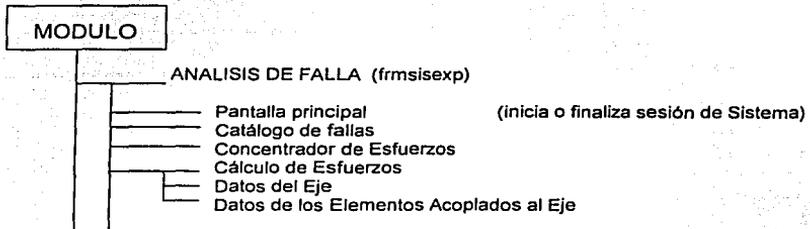


Figura 6.1 Menú del sistema

6.2 Módulo de Análisis de Falla



En este módulo se encuentra el sistema central del proyecto, donde se comienza el análisis de falla del componente mecánico, del cual se necesita conocer las causas que llevaron a la falla de la pieza.

6.2.1 Pantalla principal

En la pantalla principal encontraremos la forma de cómo el sistema empieza a obtener la información para el comienzo del análisis, esta pantalla nos muestra las siguientes características:

- **Instrucciones.-** Mediante una caja de texto, nos indica los pasos a seguir durante el análisis.
- **Preguntas.-** En una caja de texto, van apareciendo y generándose cada una de las preguntas que se requieran según el sistema experto.
- **Respuestas.-** Esta parte se puede visualizar de varias maneras ya que el sistema dependiendo de la pregunta arrojada nos muestra las posibles respuestas, mostrándolas en una lista donde se puede elegir una o varias opciones mostradas, otro tipo es mediante botones de opción.
- **Historia.-** Es un espacio en donde se encuentra un pequeño historial, de las preguntas y de las respuestas que se van generando durante la consulta al sistema experto.
- **Conclusiones.** En esta parte se visualizan los resultados obtenidos por parte del sistema experto.

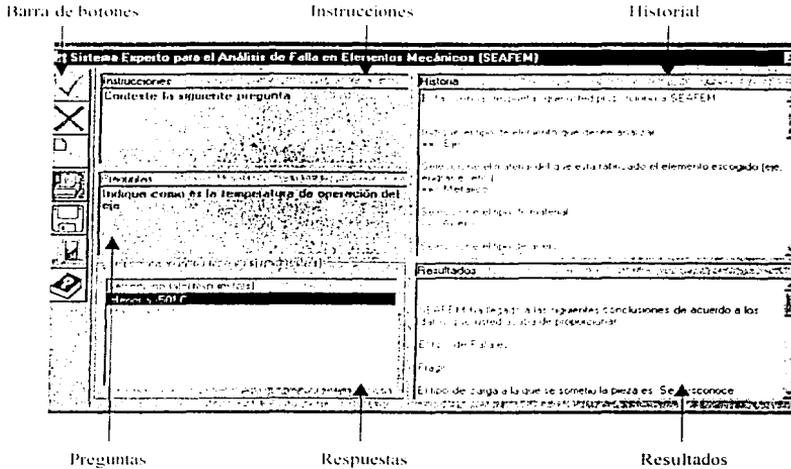


Figura 6.2 Pantalla de análisis

Barra de botones

En esta barra se encuentran los siguientes botones:



Aceptar. Al dar click en este botón validará que es la respuesta a la pregunta mostrada.



Cancelar. Con este se cancela la pregunta y no toma ningún valor de la misma.



Reset. Al dar click sobre este botón se limpia todo el análisis que hasta el momento se llevaba a cabo para comenzar con un nuevo análisis.



Imprimir. Este botón se activa al haber finalizado el análisis y es el que da paso a imprimir los resultados obtenidos por el sistema si así lo requiere el usuario.



Guardar. este botón se activa en la finalización del análisis y se ocupa para guardar el análisis del usuario, si así lo desea.



Salir. Para detener y salir del análisis que se este efectuando o para después que se haya finalizado el análisis y querer cerrar la pantalla.



Ayuda. Con este botón genera la ayuda del sistema.

6.2.2 Catálogo de fallas

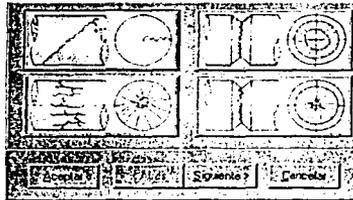


Figura 6.3 Catálogo de fallas

En esta forma se muestran imágenes para que el usuario que esta haciendo la consulta tenga una ayuda visual de cómo se encuentra el tipo de fractura en la pieza analizada, para que el sistema encuentre una solución con mayor certeza. En esta forma se cuenta con los siguientes botones:

- **Aceptar:** Al dar click en este botón obtiene el valor seleccionado y continua con el análisis.
- **Atrás:** Para cuando ya se recorrió las distintas imágenes, poder regresar a las anteriores.
- **Siguiete:** Para ver mas imágenes relacionadas con el tipo de fractura
- **Cancelar:** Saca la forma de la pantalla y con el valor nulo

En este caso solo se puede elegir una sola imagen.

6.2.3 Concentrador de esfuerzos

En esta pantalla se muestran los diferentes tipos de concentradores de esfuerzos que existen para poder acercarse a la posibilidad de encontrar la mejor solución. Aquí se puede escoger solo una imagen, también se cuenta con los botones de aceptar y cancelar, el primero valida la imagen seleccionada y el segundo cancela cualquier opción elegida y sale de la forma.

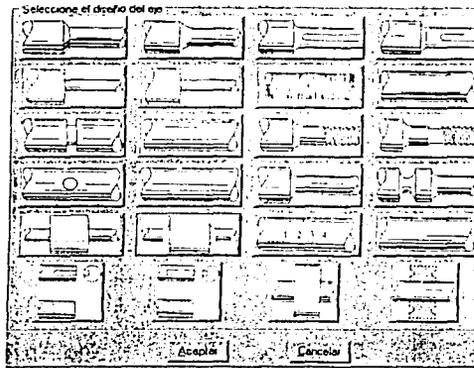


Figura 6.4 Concentradores de esfuerzos

6.2.4 Cálculo de esfuerzos

Esta parte se trabaja con la finalidad de obtener un valor que muestre, los esfuerzos máximos por parte del elemento a estudiar.

Datos del Eje.

En los datos del eje se pide la información en condiciones de operación de la pieza seleccionada.

Primeramente se pide el diámetro del eje, este valor se colocara en una caja de texto, el valor introducido debe ser un valor dado en metros, pero en caso de no ser un diámetro constante se omite la pregunta.

Después se pide la Potencia total dada en KW y la velocidad angular en las siguientes unidades (r.p.m). estos valores se colocan dentro de una caja de texto.

En seguida se muestran dos imágenes donde se pide se elija cualquiera de las dos para conocer el tipo de sección transversal donde se encuentra la fractura. En caso de ser hueco el eje, se pedirá el diámetro interior.

Por último se cuentan con los botones de aceptar y cancelar, el primero al obtener las respuestas necesarias, nos lleva a la segunda forma del cálculo de esfuerzos.

Figura 6.5 Cálculo de esfuerzos - datos del eje

Datos de los elementos acoplados al eje.

En esta forma se capturan todos los elementos que interactúan con el eje, consta de los siguientes elementos:

Datos de los elementos En este grid se van almacenando cada uno de los elementos que van acoplados al eje y que se van ingresando en las cajas de texto en donde se piden los datos de los elementos

Datos del elemento En esta parte nos pide diferente información de los elementos que pueden ir acoplados al eje

Potencia Con esta parte se indica si la potencia sale o entra del sistema.

Por otra parte se piden varios datos que se almacenaran en cajas de texto para cada elemento acoplado al eje, algunas opciones se deshabilitaran si no es necesario saber la información por el tipo de elemento que esta acoplado al elemento analizado.

En seguida se mencionan los datos a introducir con sus respectivas unidades:

- Potencia en [kw]
- Distancia en [m]
- Diámetro eje por sección en [m]
- Angulo theta en [°] de 0° a 360°
- Espesor en [m]
- Radio en [m]
- Material
- Angulo phi (ϕ) en [°] 45° ó 135°. Dependiendo del ángulo que forman los engranes (cónicos)
- Angulo psi (ψ) en [°] 20° ó 14.5°. Dependiendo del ángulo que forman los "dientes" de los engranes.

Datos de los elementos
(Grid)

Barra de botones Datos del elemento

Datos de los elementos escopados al eje

#	Tipol	Potencia	E/S	Distancia	Diametro	A	Theta	Especro	Materia	Radio	A. Pr	A. Pr
1	E	0	E	1	0.3	0	0	H#	0	0	0	0
2	E	24	E	1	0.3	0	1	AISI 304	1	0	0	0
3	E	24	E	1	0.3	0	1	AISI 304	1	0	1.25	0
4	E	24	E	1	0.3	0	1	AISI 304	1	0	0	0
5	E	0	H#	1	0.3	0	0	H#	0	0	0	0
6	E	0	E	1	0.3	0	1	AISI 304	1	0	0	0

Datos del Elemento:

Poles o Catinas Engrane
 Apoyo Engrane Cóncavo

Entra Sale

La potencia: kW
 Distancia: m
 Diametro en secc: m

Angulo Theta: m
 Espectro: m
 Radio: m
 Materia: m
 Angulo Pr: m
 Angulo Pr: m

Figura 6.6 Cálculo de esfuerzos - datos de los elementos

Además se cuenta con una barra de botones, que a continuación se mencionan.



Aceptar. Carga todos los valores



Insertar. Inserta el elemento analizado



Eliminar. Elimina un registro seleccionado que aparece en el grid de los datos de los elementos.

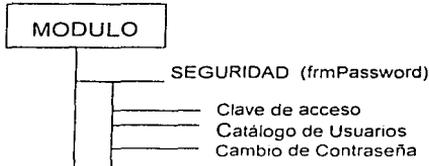


Guardar. Guarda la información de los datos que se introdujeron al sistema.



Salir. Sale de la forma.

6.3 Módulo de seguridad



Este módulo se presenta ante la necesidad de controlar a los usuarios que manejen el sistema SEAFEM, para que la base de datos que contiene la información guardada por cada uno de los usuarios sea consistente en todo momento.

La seguridad se basa en el control de todo el sistema, por un solo usuario que será el administrador. Él será el encargado de dar de alta a los usuarios que manejarán el sistema de primera instancia, ya que es aconsejable que se genere por lo menos un usuario que tenga los privilegios como DBA pero no está utilizando el usuario de administrador.

Este módulo, parte de una seguridad en la cual se valida al usuario antes de la carga total del sistema.

6.3.1 Clave de acceso

La clave de acceso, es la forma en la cual debe introducirse el nombre de usuario y su respectiva contraseña, para ver cuáles son sus privilegios como usuario y así poder ingresar al sistema sólo a los servicios que le sean permitidos.

Esta forma cuenta con dos cajas de texto como entrada de datos, la primera es para el nombre del usuario y la segunda para la contraseña dada al usuario. Esta última entrará en forma de que no se pueda ver la clave del usuario, también cuenta con dos botones el de aceptar y salir, el primero al ser oprimido busca al usuario y confirma la contraseña, si es correcta permite entrar al usuario y muestra la forma principal. En caso contrario manda un mensaje de contraseña inválida. El segundo botón al ser oprimido simplemente saca al usuario del sistema y nunca realiza la carga de este.

Después de validar al usuario, se realiza la carga del sistema, mostrando la forma donde se encuentra el menú y ahí se encuentran los siguientes puntos del módulo de seguridad.



Figura 6 7 Acceso al sistema

Ya dentro de la pantalla principal, en el menú se encuentra el módulo de Seguridad donde están las opciones Catálogo de Usuarios y Cambio de Contraseña. La primera opción es una interfaz donde el administrador o el que tenga privilegios puede dar de alta o baja a usuarios, sin acceder directamente a la base de datos.

6.3.2 Catálogo de usuarios

La forma cuenta con tres campos de texto, para ingresar al usuario, contraseña y la confirmación de la contraseña.

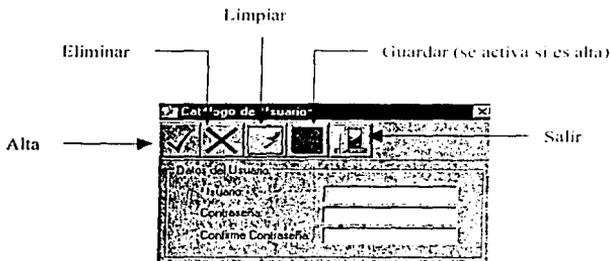


Figura 6 8 Catálogo de usuarios

Además la pantalla cuenta con una barra de botones, estos son:

- Alta.- Al dar clic en este botón se activa automáticamente el botón de guardar en el espacio en gris, cuando los campos están llenos y se confirma la contraseña del usuario, se pulsa guardar e ingresa el registro en la base.
- Eliminar.- Para borrar el registro cuando se identifica al usuario.
- Limpiar.- Para limpiar los campos de la forma.
- Salir.- Salir de la forma.
- Guardar.- Solo en caso de ser alta se activa, y es para cuando se va a guardar al usuario.

6.3.3 Cambio de contraseña

Esta es la segunda opción del menú de Seguridad y consiste en poder cambiar la contraseña del usuario.

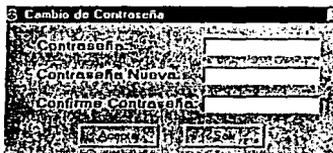


Figura 6 9 Cambio de contraseña

Cuenta con tres cajas de texto, cada una sirve para ingresar la contraseña actual del usuario, la contraseña nueva que se va a registrar y la confirmación de la nueva contraseña.

También existen los botones de Aceptar para realizar el cambio de contraseña y Salir por si ya no se realiza ningún cambio.

6.4 Módulo de reportes



En este módulo se encuentra la forma queda paso a la impresión del reporte del análisis realizado, cuenta con dos botones vista preliminar y salir, además de un combobox para poder ver los números de análisis que se encuentran guardados en el sistema (de ese usuario), el cual se tendrá que colocar en el recuadro.

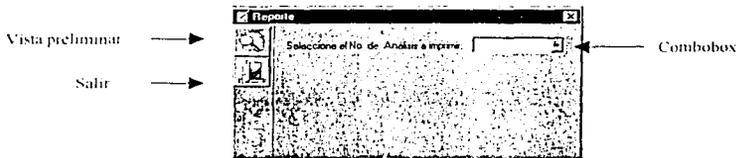


Figura 6 10 Reportes

Y al dar click en el botón de la vista preliminar, ya cuando se encuentre el número de análisis asignado se mandará en pantalla la vista del reporte a imprimirse como se muestra a continuación.

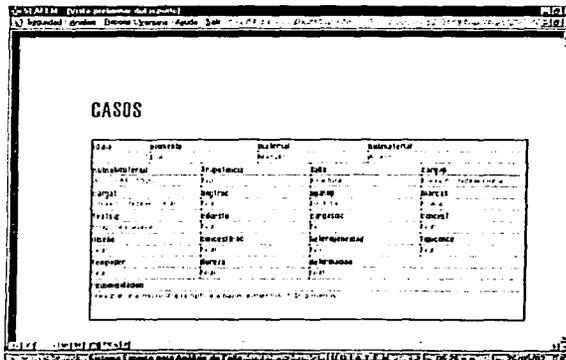
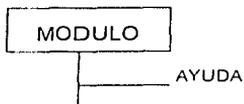


Figura 6 11 Vista preliminar del reporte

6.5 Módulo de ayuda



En este módulo se encontrará la ayuda que se le brinda al usuario por cualquier duda con respecto al llenado de la información pedida por el sistema, así como de un glosario de términos para cualquier duda de palabras que no entienda su significado.

Este módulo cuenta con diferentes secciones como son:

Contenido Donde se encontrara cada uno de los módulos explicados, así como el procedimiento de inserción de la información.

Índice Aquí se mostrara un índice de palabras clave que llevaran a un tema en específico de la ayuda.

Buscar Esta parte es para buscar en otro tipo de librerías que se anexen.

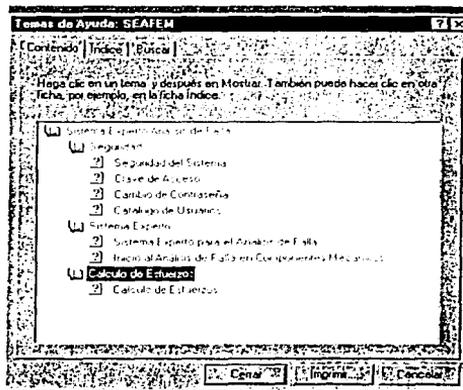


Figura 6-12 Ayuda del sistema

Conclusiones

El presente trabajo tiene la finalidad de ser empleado en el diagnóstico de análisis de falla.

Dejando las bases para poder extender dicha versión de SEAFEM. A través de la recopilación y estructuración de más conocimiento.

Se demostró la factibilidad de emplear los sistemas expertos en el análisis de falla.

SEAFEM es una herramienta, que basada en una serie de preguntas, referentes a: la inspección visual del eje y a las características de operación de este. Nos dará una recomendación de pruebas de laboratorio que se deberán realizar al eje en análisis. Teniendo como hipótesis el tipo de fractura que sufrió el eje. Además de las posibles causas.

El desarrollo de SEAFEM involucró diferentes áreas de trabajo.

Primeramente se trato de manejar claramente el concepto de Sistemas Expertos, desempeñar el papel de ingeniero del conocimiento es un punto difícil ya que se debe de interpretar el conocimiento del experto humano y después transmitir este conocimiento en reglas para dar paso a la creación de la base de conocimientos, por lo tanto uno se debe de familiarizar con el lenguaje y el conocimiento del área de mecánica.

Por otro lado el tema de Análisis de Falla es un tema complejo en muchos aspectos ya que se menciona que el análisis de una pieza, es especial para cada elemento analizado, de tal manera que se hizo un balance general partiendo de varios análisis. Para ver cuales eran los pasos que se siguen por parte del experto al momento de que se le presenta la pieza. Primeramente la parte visual nos indica varias cosas por las cuales se puede dar un indicio de por que la falla en la pieza. Otro elemento importante son las condiciones de trabajo de la pieza. También el diseño de esta juega un factor importante, y en otros aspectos el tipo de material utilizado.

El sistema experto, se desarrollo con el fin de tener una herramienta de análisis. La cual pueda ayudar a una persona sin ningún conocimiento en el área de análisis de falla. O bien si cuenta con este conocimiento servir como un apoyo para validar sus hipótesis.

En lo que respecta a la resolución del problema, se pudo comprobar que la restricción del alcance proviene del conocimiento de la situación. Es en esta forma, en la que los sistemas expertos evitan la proliferación de combinaciones.

ESTA TESIS NO SALI
DE LA BIBLIOTECA

El sistema es útil porque:

- Permite establecer una o unas pruebas de laboratorio. Mediante preguntas sencillas.
- El tiempo de análisis del sistema no lleva más de 5 minutos. Pudiendo obtener una respuesta eficaz y eficiente.
- En lo que respecta a la interfaz de usuario. Esta es fácil de usar y de entender. Cuenta con una área de preguntas. Una de posibles respuestas. Además de una en la cual se lleva un historial de las preguntas y respuestas. Y por último la respectiva de resultados y recomendaciones.
- Tiene la posibilidad de guardar el análisis en una base de datos. Permitiendo con esto la posterior manipulación de los datos obtenidos en el primer nivel de análisis. Los cuales serán empleados en futura extensión del sistema.
- Presenta grandes perspectivas como una herramienta que permita facilitar el análisis de falla. A través del conocimiento que sea recopilado de los expertos humanos.

En lo que se refiere a la actualización de la base de conocimientos, esta viene a ser relativamente fácil. Debido a que prácticamente hay que editar el archivo de la base de conocimientos. Basándose en la estructura de clases, atributos, valores y reglas que ya existen. Dejando a un lado cuestiones relacionadas con la programación de la interfaz de usuario.

Además, cabe mencionar que dicha interfaz de usuario, puede ser empleada con prácticamente cualquier base de conocimientos. No importando el área del sistema experto.

Realizando pequeñas modificaciones en lo que respecta al código de la interfaz de usuario. Dichas modificaciones se refieren a cual va a ser la conclusión a la cual va a llegar el sistema experto. Que obviamente serán diferentes de sistema a sistema.

También, este trabajo deja bases firmes para poder incrementar las posibilidades de cobertura del sistema. Es decir, poder extender el análisis a más elementos mecánicos. Como pueden ser engranes, resortes, etc. Además de la posible extensión de análisis de falla en ejes.

A. Base de Conocimientos

En este anexo se presenta cómo Visual Rule Studio se integra a Visual Basic. Y el listado de la base de conocimientos de SEAFEM.

A.1 Visual Rule Studio y Visual Basic

Los desarrolladores corporativos y los analistas de negocios no pueden aceptar las limitaciones de los tradicionales entornos de desarrollo de sistemas expertos. Los desarrolladores de hoy en día, esperan integrar nuevas tecnologías, con plataformas de desarrollo establecidas como: Visual Basic, Visual C++ o Java. Este es el caso de Visual Rule Studio.

Visual Rule Studio esta basado en el Lenguaje de Reglas de Producción (Production Rule Language - PRL) y la máquina de inferencias de Level5 Objetc. Las tecnologías de Visual Rule Studio, son el resultado directo de la rica herencia de cerca de 14 años en la innovación de herramientas para el desarrollo de sistemas expertos.

Visual Rule Studio se integra a Visual Basic como un ActiveX Designer. Esto permite agregar Objetos de reglas, a aplicaciones ya existentes o bien a nuevas aplicaciones. Visual Rule Studio, habilita completamente la orientación a objetos. Aislando las reglas de la aplicación. Encapsulando las reglas en objetos llamados Rulesets. Formando parte del Entorno de Desarrollo Integrado (Integrated Development Environment - IDE) de Visual Basic. El uso de Ruleset en una aplicación es similar a como se emplea otro Designer de Visual Basic.

El desglose de la estructura de objetos de Visual Rule Studio se bosqueja a continuación:

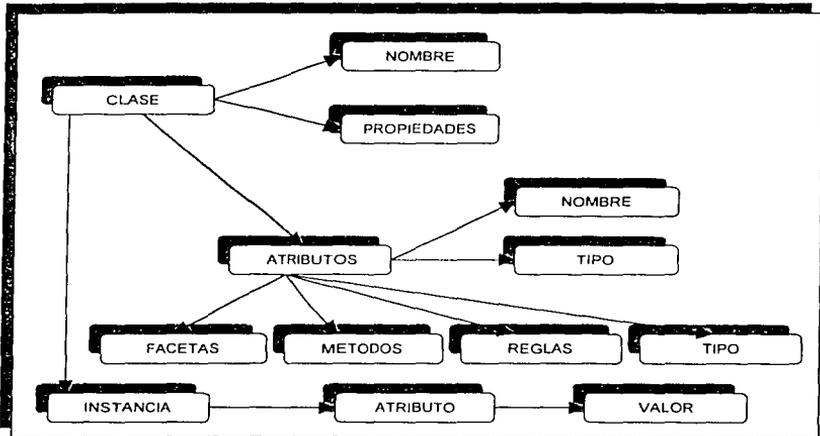


Figura A 1 Estructura de objetos de Visual Rule Studio

Visual Rule Studio, emplea objetos y reglas. Las reglas son diferentes de los objetos. Sin embargo, es mejor modelar aplicaciones comerciales complejas usando ambas. Los objetos representan el mundo real, las entidades de negocios como clientes, productos, negocios. Los objetos encapsulan los datos y el comportamiento necesarios para realizar las funciones de negocios. Las reglas llevan a cabo las políticas y prácticas de una organización.

Por cada clase que se define en PRL Rulesets desde Visual Rule Studio, Visual Basic crearía un objeto con sus respectivas propiedades. Por ejemplo, para la siguiente clase:

```

Class CreditAction
With Authorized Simple
Default False
Search Order Rules Default

With Reason Compound Amount
Too_Large,Overdue_Balance,Credit_Limit_Exceeded, Normal
Default Normal
Search Order Context Default
  
```

Visual Basic crearía el objeto **CreditAction** con las propiedades **Authorized** y **Reason**. La referencia o modificación de los atributos de la clase, desde Visual Basic causa que las reglas de la base de conocimientos sean evaluadas por la máquina de inferencias.

Visual Rule Studio, integra por sí solo un editor, llamado "Editor PRL". El cual proporciona un ambiente autosuficiente, que permite crear y revisar bases de conocimiento, fuera del entorno de desarrollo de Visual Basic. Incluye un ambiente de prueba para probar y poner a punto las bases de conocimiento sin usar Visual Basic.

```

C:\Program Files\Rule Machines\Visual Rule Studio\Samples...
File Edit Select Get Store View Help
[Icons]
=====
' This sample PRL file can be used by the Visual
' /Samples/LoadPRL folder.
'
=====
' CLASS Declarations
Class Credit
With Amount Numeric
With Limit Numeric
With CurrentBalance Numeric
With Authorized Compound Yes, No
=====
' RULE & DEMON Declarations

Rule 0
If Credit.Amount <= 50
Then Credit.Authorized Is Yes

```

Figura A.2 Editor PRL de Visual Rule Studio

A.2 Código de la Base de Conocimientos

A continuación, se listan la base de conocimientos de SEAFEM. Primero se definen las diferentes clases, atributos y valores. Después se muestra la estructura de las reglas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

```

=====
! Class Declarations
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
Class Part

```

```

    With Material Compound
    Metallic

    With Type Compound          Shaft

! encontramos el tipo de elemento
With TypeFound Simple

```

```

!encontramos el tipo de funcion del elemento
!With FunctionFound Simple

```

```

With PracticeLoadType Compound
    Tension,
    Compression,
    Torsion,
    Unidirectional_Bending,
    Bidirectional_Bending,
    Rotational_Bending,
    Bending

```

```

With TheoristLoadType Compound

    Tension,
    Torsion,
    Unidirectional_Bending,
    Bidirectional_Bending,
    Rotational_Bending

```

```

With StressField Compound
Uniaxial,
    Biaxial,
    Triaxial

```

```

With Heterogeneity Simple

```

```

With Features_Exist Simple

```

```

With Feature_Is_Near Simple

```

```

With Design Compound
    Good,
    Bad,
    DontCare

```

```

With Cyclic_load Simple

```

```

!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

```

```

xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

```

```

Class Material_Info

    With Materials Compound
    Steel,
    Bronze

```

```

!encontrar clase de material
With MaterialFound Simple

```

```

!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

```

```

Class Rec

```

```

    With Recommendation String

```

```

    With Other Simple

```

```

!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

```

```

Class Failure

```

```

    With FClass Multicompound
    Crack
    Corrosion,
    WearingOut,
    Deformation

```

```

    With Type Multicompound
    Brittle,
    Ductile,
    Fatigue

```

```

    With Failure_Plane_Apparence Compound
    Planar,
    45deg,
    Helical

```

```

    With Multicompound Failure_Surface_Apparence

    Soft,
    Brightness,
    Coarse,
    Sugar_Cube

```

```

    With Failure_Surface_Texture Multicompound
    Wrinkled,
    Smooth,
    Both,
    Polished

```

```

    With Surface_Marks Compound
    Chevron,
    Beach

```



```

!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

```

```

! RULE & DEMON Declarations
! =====
! Reglas que determinan el tipo de elemento y el tipo de
! material
! =====

```

```

Rule 1
If Material Of Part Is Metallic
And Materials Of Material_Info Is Steel
And Type Of Steels Is AISI_SAE_1020
Or Type Of Steels Is AISI_SAE_1045
Or Type Of Steels Is AISI_SAE_1345
Or Type Of Steels Is AISI_SAE_4340
Or Type Of Steels Is AISI_SAE_4620
Or Type Of Steels Is AISI_SAE_8620
Or Type Of Steels Is AISI_SAE_4145
Or Type Of Steels Is ASTM_A36
Or Type Of Steels Is ASTM_A131
Or Type Of Steels Is ASTM_A283
Or Type Of Steels Is ASTM_A573
Or Type Of Steels Is ASTM_A678
Or Type Of Steels Is ASTM_A529
Then Material_Info MaterialFound
!

```

```

Rule 2
If Material Of Part Is Metallic
And Materials Of Material_Info Is Bronze
And Type Of Bronzes Is SAE CA836
Or Type Of Bronzes Is SAE CA838
Or Type Of Bronzes Is SAE CA852
Or Type Of Bronzes Is SAE CA854
Or Type Of Bronzes Is SAE CA858
Or Type Of Bronzes Is SAE CA878
Or Type Of Bronzes Is SAE CA879
Or Type Of Bronzes Is SAE CA862
Or Type Of Bronzes Is SAE CA863
Or Type Of Bronzes Is SAE CA865
Or Type Of Bronzes Is SAE CA872
Or Type Of Bronzes Is SAE CA874
Or Type Of Bronzes Is SAE CA875
Then Material_Info MaterialFound
!

```

```

Rule 3
If Type Of Part Is Shaft
And Material_Info.MaterialFound
And Shafts.Power_transmissions
Or Not Shafts.Power_transmissions
And FClass Of Failure Is Crack
Then IntermediateConclusions.Element Is Shaft
!

```

```

! =====
! Reglas que determinan el tipo de falla
! =====
! Falla fragil
!

```

```

Rule 4
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
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.VBrittle Cf 80
!

```

```

Rule 5
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And PracticeLoadType Of Part Is Torsion
And Failure_Plane_Apparence Of Failure Is Helical
And Surface_Marks Of Failure Is Chevron
Then Failure.Type Is Brittle Cf 95
And Failure_VisualInformation.VBrittle Cf 95
!

```

```

Rule 6
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Surface_Marks Of Failure Is Chevron
And Failure_Surface_Apparence Of Failure Is
Sugar_Cube
And Failure_Surface_Texture Of Failure Is Wrinkled
Then Failure.Type Is Brittle Cf 80
And Failure_VisualInformation.VBrittle Cf 80
!

```

```

Rule 7
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Surface_Marks Of Failure Is Chevron
And Failure_Surface_Texture Of Failure Is Wrinkled
Then Failure.Type Is Brittle Cf 40
And Failure_VisualInformation.VBrittle Cf 40
!

```

```

Rule 8
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Failure_Surface_Apparence Of Failure Is
Sugar_Cube
And Failure_Surface_Texture Of Failure Is Wrinkled
Then Failure.Type Is Brittle Cf 60
And Failure_VisualInformation.VBrittle Cf 60
!

```

```

Rule 9
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And PracticeLoadType Of Part Is Tension
And Failure_Plane_Apparence Of Failure Is Planar
And Failure_Surface_Apparence Of Failure Is Coarse
And StressField Of Part Is Triaxial
Then Failure.Type Is Brittle Cf 90
And Failure_VisualInformation.VBrittle Cf 90
!

```

```

Rule 10
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And PracticeLoadType Of Part Is Torsion
And Failure_Plane_Apparence Of Failure Is Helical
And Surface_Marks Of Failure Is Chevron
And StressField Of Part Is Triaxial
Then Failure.Type Is Brittle Cf 95
And Failure_VisualInformation.VBrittle Cf 95
!

```

```

Rule 11
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Surface_Marks Of Failure Is Chevron
And Failure_Surface_Apparence Of Failure Is
Sugar_Cube
And Failure_Surface_Texture Of Failure Is Wrinkled
And StressField Of Part Is Triaxial
Then Failure.Type Is Brittle Cf 50
And Failure_VisualInformation.VBrittle Cf 50
!

```

```

Rule 12
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Surface_Marks Of Failure Is Chevron
And Failure_Surface_Texture Of Failure Is Wrinkled
And StressField Of Part Is Triaxial
Then Failure.Type Is Brittle

```

```

And Failure_VisualInformation.VBrittle Cf 50
|
Rule 13
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Failure_Surface_Apparence Of Failure Is Sugar_Cube
And Failure_Surface_Texture Of Failure Is Wrinkled
And StressField Of Part Is Triaxial
Then Failure_Type Is Brittle Cf 60
And Failure_VisualInformation.VBrittle Cf 60
|
| =====
| Falla fatiga
|
Rule 14
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Surface_Marks Of Failure Is Beach
Then Failure_Type Is Fatigue Cf 80
And Failure_VisualInformation.VFatigue Cf 80
|
Rule 15
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Cyclic_Load Of Part
And Features_Exist Of Part
And IntermediateConclusions.Design
And Feature_Is_Near Of Part
And Surface_Marks Of Failure Is Beach
Then Failure_Type Is Fatigue Cf 95
And Failure_VisualInformation.VFatigue Cf 95
|
Rule 16
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Surface_marks Of Failure Is Beach
And Failure_Surface_Texture Of Failure Is Both
Then Failure_Type Is Fatigue Cf 85
And Failure_VisualInformation.VFatigue Cf 85
|
Rule 17
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Cyclic_Load Of Part
And Surface_Marks Of Failure Is Beach
Then Failure_Type Is Fatigue Cf 82
And Failure_VisualInformation.VFatigue Cf 82
|
Rule 18
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Surface_Marks Of Failure Is Beach
And Failure_Surface_Texture Of Failure Is Polished
Then Failure_Type Is Fatigue Cf 60
And Failure_VisualInformation.VFatigue Cf 60
|
Rule 19
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Cyclic_Load Of Part
And Features_Exist Of Part
And IntermediateConclusions.Design
And Feature_Is_Near Of Part
And Surface_Marks Of Failure Is Beach
And Failure_Surface_Texture Of Failure Is Polished
Then Failure_Type Is Fatigue Cf 75
And Failure_VisualInformation.VFatigue Cf 75
|
Rule 20
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Surface_marks Of Failure Is Beach
And Failure_Surface_Texture Of Failure Is Both
And Failure_Surface_Texture Of Failure Is Polished
Then Failure_Type Is Fatigue Cf 60
And Failure_VisualInformation.VFatigue Cf 60
|

Rule 21
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Cyclic_Load Of Part
And Surface_Marks Of Failure Is Beach
And Failure_Surface_Texture Of Failure Is Polished
Then Failure_Type Is Fatigue Cf 75
And Failure_VisualInformation.VFatigue Cf 75
|
| =====
| Falla ductil
|
Rule 22
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Failure_Surface_Texture Of Failure Is Smooth
Then Failure_Type Is Ductile Cf 50
And Failure_VisualInformation.VDuctile Cf 50
|
Rule 23
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Failure_Surface_Apparence Of Failure Is Coarse
And Failure_Surface_Texture Of Failure Is Smooth
Then Failure_Type Is Ductile Cf 40
And Failure_VisualInformation.VDuctile Cf 40
|
Rule 24
If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Failure_Surface_Apparence Of Failure Is Coarse
And Failure_Surface_Texture Of Failure Is Smooth
And Deformation_zone Of Failure
Then Failure_Type Is Ductile Cf 80
And Failure_VisualInformation.VDuctile Cf 80
|
| =====
|
Rule 25
If VFatigue Of Failure_VisualInformation
And Conf(Failure_VisualInformation.VFatigue) >=
Conf(Failure_VisualInformation.VBrittle)
And Conf(Failure_VisualInformation.VFatigue) >=
Conf(Failure_VisualInformation.VDuctile)
Then IntermediateConclusions.FatigueFailure
Else Not IntermediateConclusions.FatigueFailure
|
Rule 26
If Type Of Failure Is Fatigue
And PracticeLoadType Of Part Is Tension
And FatigueFailure Of IntermediateConclusions
And TheorisLoadType Of Part Is Tension
Then IntermediateConclusions.LoadType Is Tension
|
Rule 28
If Type Of Failure Is Fatigue
And PracticeLoadType Of Part Is Unidirectional_Bending
And FatigueFailure Of IntermediateConclusions
And TheorisLoadType Of Part Is Unidirectional_Bending
Then IntermediateConclusions.LoadType Is
Unidirectional_Bending
|
Rule 29
If Type Of Failure Is Fatigue
And PracticeLoadType Of Part Is Bending
And FatigueFailure Of IntermediateConclusions
And TheorisLoadType Of Part Is Unidirectional_Bending
Then IntermediateConclusions.LoadType Is
Unidirectional_Bending
|
Rule 30
If Type Of Failure Is Fatigue
And PracticeLoadType Of Part Is Bidirectional_Bending
And FatigueFailure Of IntermediateConclusions

```


B. Código fuente

En este anexo se muestran las partes más relevantes del código fuente de SEAFEM.

```

=====
'Rutina que sirve de query, para buscar, identificar, y preguntar
'por cada uno de los atributos de las diferentes clases
'que integran la base de conocimientos, ademas de desplegar el prompt adecuado de la pregunta
'=====
Public Sub Query(ObjectName As String, AttribName As String, attribClassInst As Object, AttribRTInst As Object)

    If bSalir = True Then Exit Sub

    m_ObjectName = ObjectName
    m_AttribName = AttribName
    Set m_attribClassInst = attribClassInst
    Set m_AttribRTInst = AttribRTInst

    If m_shutDown = False Then

        Dim ruleDtl As RuleDetail

        CargaPractica = ConoceCargaPractica(ObjectName, AttribName)
        CadenaBuscada = IdentificaCadena(ObjectName, AttribName)
        iNumero = UbicaVariable(ObjectName, AttribName)

        On Error GoTo useDef
        Set ruleDtl = m_RuleDtls.Item(Trim$(ObjectName) & "." & Trim$(AttribName))
        m_PromptBox = ruleDtl.Prompt
        m_GeneralInfo.Text = ruleDtl.Instructions
        GoTo havePrompt
    useDef:
        'no prompt text found... use the default
        m_PromptBox.Text = AttribName & " of " & ObjectName
        m_GeneralInfo.Text = "Answer the following question."

    havePrompt:
        Select Case attribClassInst.DataType
            Case Is = VRMS.rmSimple
                doSimpleQuery
            Case Is = VRMS.rmNumeric
                doNumericQuery
            Case Is = VRMS.rmString
                MsgBox "String not implemented"
            Case Is = VRMS.rmDateTime
                MsgBox "Date not implemented"
            Case Is = VRMS.rmInterval
                MsgBox "Interval not implemented"
            Case Is = VRMS.rmCompound
                doCompoundQuery
            Case Is = VRMS.rmMultiCompound
                doMultiCompoundQuery
        End Select
    End If

```

```

Set m_attrbClassInst = Nothing
Set m_AttribRTInst = Nothing
Set attribClassInst = Nothing
Set AttribRTInst = Nothing

End Sub

'=====
'Rutina para ubicar las posibles respuestas a cada uno de los
'atributos del tipo compound dentro de la base de conocimientos
'y realizar la asignación de las respuestas a esta última
'=====
Private Sub doCompoundQuery()

    Dim itemList As String
    Dim idx As Long
    Dim complems As VRMS CompoundItems
    Dim completem As VRMS CompoundItem
    Dim ruleDtl As RuleDetail
    Dim MeTranslate As clsTranslate

    m_itemCompound = True
    m_itemsList.Visible = True
    m_itemsList.Multi.Visible = False
    m_itemsNumber.Visible = False
    m_itemsList.Enabled = True
    m_itemsList.Multi.Enabled = True
    m_itemsNumber.Enabled = False
    m_itemsFrame.Visible = False
    m_itemsOptionSi.Visible = False
    m_itemsOptionNo.Visible = False

    Set complems = m_attrbClassInst.CompoundItems
    m_itemsList.Clear
    For idx = 0 To complems.Count - 1
        Set completem = complems.Item(idx)
        On Error GoTo useDef
        Set ruleDtl = m_RuleDtls.Item(Trim$(m_ObjectName) & "." & Trim$(m_AttribName) & "." & completem.Name)
        If ruleDtl Is Nothing Then GoTo useDef
        m_itemsList.AddItem ruleDtl.Prompt
        GoTo havePrompt
    useDef:
        Set MeTranslate = m_Translates.Item(completem.Name)

        If MeTranslate Is Nothing Then
            m_itemsList.AddItem completem.Name
        Else
            m_itemsList.AddItem MeTranslate.Spanish
        End If
    havePrompt:
    Next
    frmSisexp.tolmmain.Buttons(1).Enabled = False

    m_qryPending = True

    'verificamos si es la cadena con la cual se van a disparar
    'las formas de las imagenes

    If CadenaBuscada = True Then
        Call UbicaForma
        Call MandaForma
    End If

    While (m_qryPending = True)

```

```

DoEvents
Wend

If bSalir Then
  m_itemsList.Clear
  Exit Sub
End If

' si no se tiene una buena respuesta, temporalmente . . .

If Not (m_AttribRTInst Is Nothing) Then
  If bCancelar Then
    bCancelar = False
    Exit Sub
  Else
    m_AttribRTInst = complems.Item(m_itemsList.ListIndex).Name
  End If
End If

End Sub

'=====
'Rutina para ubicar las posibles respuestas a cada uno de los
'atributos del tipo multicomound dentro de la base de conocimientos
' y realizar la asignación de las respuestas a esta última
'=====
Private Sub doMultiCompoundQuery()

  Dim itemsList As String
  Dim idx As Long
  Dim complems As VRMS CompoundItems
  Dim compltem As VRMS CompoundItem
  Dim ruleDtl As RuleDetail
  Dim vVal As Variant
  Dim i As Integer
  Dim MeTranslate As clsTranslate

  m_itemMultiCompound = True
  m_itemsList.Visible = False
  m_itemsListMulti.Visible = True
  m_itemsNumber.Visible = False
  m_itemsList.Enabled = True
  m_itemsListMulti.Enabled = True
  m_itemsNumber.Enabled = False
  m_itemsFrame.Visible = False
  m_itemsOptionSi.Visible = False
  m_itemsOptionNo.Visible = False

  Set complems = m_attribClassInst.CompoundItems
  m_itemsListMulti.Clear
  For idx = 0 To complems.Count - 1
    Set compltem = complems.Item(idx)
    On Error GoTo useDef
    Set ruleDtl = m_RuleDtlis.Item(Trim$(m_ObjectName) & "." & Trim$(m_AttribName) & "." & compltem.Name)
    If ruleDtl Is Nothing Then GoTo useDef
    m_itemsListMulti.AddItem ruleDtl.Prompt
    GoTo havePrompt
  useDef:
    Set MeTranslate = m_Translates.Item(compltem.Name)

    If MeTranslate Is Nothing Then
      m_itemsListMulti.AddItem compltem.Name
    Else
      m_itemsListMulti.AddItem MeTranslate.Spanish
    End If
  Next

```

havePrompt:

```

Next
frmsisexp.tolmain.Buttons(1).Enabled = False

m_qryPending = True
While (m_qryPending = True)
  DoEvents
Wend

If bSalir Then
  m_itemsListMulti.Clear
  Exit Sub
End If

** Not a good solution, temporary...
If Not (m_AttribRTInst Is Nothing) Then
  For i = 0 To m_itemsListMulti.ListCount - 1

    If (m_itemsListMulti.Selected(i)) Then
      m_itemsListMulti.ListIndex = i
      vVal = vVal + compltems.Item(m_itemsListMulti.ListIndex).Name + ","
    End If
  Next

  If bCancelar Then
    bCancelar = False

    Exit Sub
  Else
    m_AttribRTInst = vVal
  End If

End If

```

End If

End Sub

```

=====
'Rutina para ubicar las posibles respuestas a cada uno de los
'atributos del tipo simple dentro de la base de conocimientos
'y realizar la asignación de las respuestas a esta última
=====

```

Private Sub doSimpleQuery()

```

  m_itemSimple = True
  m_itemsList.Visible = False
  m_itemsListMulti.Visible = False
  m_itemsNumber.Visible = False
  m_itemsNumber.Text = ""
  m_itemsNumber.Enabled = False
  m_itemsFrame.Visible = True
  m_itemsOptionSi.Visible = True
  m_itemsOptionNo.Visible = True
  m_itemsOptionNo.Value = False
  m_itemsOptionSi.Value = False

```

frmsisexp.tolmain.Buttons(1).Enabled = False

```

m_qryPending = True
While (m_qryPending = True)
  DoEvents
Wend

```

** Not a good solution, temporary...

```

If bCancelar Then
    bCancelar = False
Exit Sub
Else
    If EsSimple Then
        EsSimple = False
        If frmsisexp.optsi.Value = True Then
            m_AttribRTInst = "True"
        ElseIf frmsisexp.oplno.Value = True Then
            m_AttribRTInst = "False"
        End If
    End If
End If

End Sub

'=====
'Rutina para realizar la conexión con la base de datos
'=====
Private Sub Conecta()

Set CnConecta = New ADODB.Connection

With CnConecta
    .Provider = "Microsoft.Jet.OLEDB.4.0"
    .ConnectionString = App.Path & "\bdseafem.mdb"
    .CursorLocation = adUseNone
    .Open
End With

Set rsdatos = New ADODB.Recordset

End Sub

'=====
'Rutina para procesar la respuesta del usuario. Cuando ya se realizo una selección
'Dependiendo del tipo de atributo (compound, multicomound, simple)
'=====
Public Sub Procesar()

Dim i As Integer
Dim ERespuestas As String

"Dim sAttrib As String

** For now, just release the query object...
m_QryObj.m_qryPending = False

'codigo para agregar el encabezado de las salidas
If bEncabezadoR = False Then
    ERespuestas = "Estas son las respuestas que usted proporciona a SEAFEM"
    txthistorical = ERespuestas & vbNewLine & vbNewLine
    bEncabezadoR = True
End If

'=====

If m_QryObj.m_itemCompound Then
    m_QryObj.m_itemCompound = False

    If CargaPractica Then
        CargaPractica = False
        sTipoCargaPractica = IAnswers.Text
    End If
End If

```

```

End If

If bConcentrador Then
  bConcentrador = False
  If sSimple = "SI" Then
    bFormaConEsf = True
  End If
End If

txthistorical.Text = txthistorical.Text & vbNewLine & txtQuestion
txthistorical.Text = txthistorical.Text & vbNewLine & "=>" & lAnswers.Text
txthistorical.Text = txthistorical.Text & vbNewLine

End If

*****

If m_QryObj.m_itemMultiCompound Then
  m_QryObj.m_itemMultiCompound = False

  For i = 0 To List1.ListCount - 1
    If (List1.Selected(i)) Then
      sAttrib = sAttrib + List1.List(i) + ","
    End If
  Next

  sAttrib = Mid(sAttrib, 1, Len(sAttrib) - 1)

  '** Add the strings to the list box...
  txthistorical.Text = txthistorical.Text & vbNewLine & txtQuestion
  txthistorical.Text = txthistorical.Text & vbNewLine & "=>" & sAttrib
  txthistorical.Text = txthistorical.Text & vbNewLine

End If

*****

If m_QryObj.m_itemSimple Then

  If bEje Then
    bEje = False
    If sSimple = "SI" Then
      bEjeTransPotencia = True
    End If
  End If

  m_QryObj.m_itemSimple = False
  m_QryObj.EsSimple = True
  txthistorical.Text = txthistorical.Text & vbNewLine & txtQuestion
  txthistorical.Text = txthistorical.Text & vbNewLine & "=>" & sSimple
  txthistorical.Text = txthistorical.Text & vbNewLine

End If

Call AsignaValores 'llamamos a la funcion que asigna los
'valores para despues insertar en la BD

End Sub

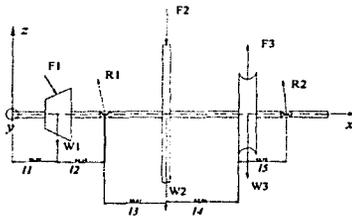
```

C. Cálculo de Esfuerzos

En seguida, se presenta el análisis realizado para el módulo de el cálculo de esfuerzos. Este módulo será empleado por alguna o algunas reglas de la base de conocimientos de SEAFEM. En una futura extensión. De donde se obtendrán; los esfuerzos máximos, el elemento donde se encuentran estos y los respectivos cósenos directores.

C.1 Sistema de Referencia

En el diagrama, se da una perspectiva general de las consideraciones que se realizaron para el análisis. Tomando en cuenta todas las fuerzas y momentos actuantes en el sistema.



C.1 Sistema de referencia para eje de transmisión de potencia.

El eje puede tener "n" número de elementos acoplados.

C.2 Fórmulas

El cálculo de esfuerzos, esta basado en las fórmulas, que a continuación se listan. Basándonos además del esquema de análisis mostrado en el apartado anterior.

$$\sum F_x = 0 \quad \dots 1$$

$$\sum F_y = 0 \quad \dots 2$$

$$\sum F_z = 0 \quad \dots 3$$

Donde:

F_x – Son las fuerzas que actúan sobre el eje x
 F_y – Son las fuerzas que actúan sobre el eje y
 F_z – Son las fuerzas que actúan sobre el eje z

$$\sum M_x = I\alpha_x \quad \dots 4$$

$$\sum M_y = 0 \quad \dots 5$$

$$\sum M_z = 0 \quad \dots 6$$

Donde:

M_x – Son los momentos que actúan sobre el eje x. Los cuales no se toman en cuenta puesto que el eje está en rotación.

M_y – Son los momentos que actúan sobre el eje y

M_z – Son los momentos que actúan sobre el eje z

El esfuerzo debido al momento por torsión se obtiene de:

$$T = \frac{\tau \left(\frac{d}{2} \right)}{\zeta} \quad \dots 7$$

Donde:

T – Esfuerzo debido al momento por torsión

τ - Par de fuerzas

d . Diámetro de la sección transversal del eje

ζ - Momento polar de inercia

El par de fuerzas se obtiene de:

$$\tau_{R_n \rightarrow R_{n+1}} = \sum_{i=1}^n \frac{Pot(i)}{W} \quad \dots 8$$

Donde :

$\tau_{R_n \rightarrow R_{n+1}}$ - Par del elemento n al elemento n + 1

Pot(i) - Potencia de entrada o salida al sistema de cada elemento

w - Velocidad angular (es la misma para todo el sistema)

El momento polar de inercia se obtiene de:

$$\zeta = \pi d^4 / 32 \quad \dots 9$$

si el eje no es hueco, de lo contrario se calcula con:

$$\zeta = 2\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 e \quad \dots 10$$

Donde:

d – Diámetro de la sección transversal del eje
e – Espesor del eje

Para el esfuerzo debido al momento flector tenemos:

$$F = \frac{(My - Mz)d}{\zeta} \quad \dots 11$$

Donde:

My – Momento en el eje y
Mz – Momento en el eje z
d – Diámetro de la sección transversal del eje
 ζ – Momento polar de inercia

My y Mz se obtiene de las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6

El momento polar de inercia se obtiene con las ecuaciones 9 ó 10, dependiendo de si el eje no es hueco o hueco, respectivamente.

Partiendo de las siguientes matrices, obtenemos los valores de λ , que van a ser los valores característicos de esa matriz:

$$A = \begin{bmatrix} F & -T & T \\ -T & 0 & 0 \\ T & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \dots 12$$

$$\lambda I = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix} \quad \dots 13$$

$$A - \lambda I = \begin{bmatrix} F - \lambda & -T & T \\ -T & -\lambda & 0 \\ T & 0 & -\lambda \end{bmatrix} \dots 14$$

Obteniendo el determinante de la matriz $A - \lambda I$, tenemos:

$$\lambda^3 - F\lambda + 2T^2 = 0 \dots 15$$

Resolviendo la ecuación anterior:

$$\lambda_{1,2} = \frac{F \pm \sqrt{F^2 + 8T^2}}{2} \dots 16$$

Donde:

λ - Valores característicos de la matriz $A - \lambda I$
 T - Esfuerzo debido al Momento por Torsión
 F - Esfuerzo debido al Momento Flector

Partiendo de la siguiente ecuación matricial obtendremos los vectores característicos:

$$\bar{A} \bar{x} = \lambda \bar{x} \dots 17$$

$$\begin{bmatrix} F & -T & T \\ -T & 0 & 0 \\ T & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \dots 18$$

$$\begin{aligned} Fx - Ty + Tz &= \lambda x \\ -Tx &= \lambda y \dots 19 \\ Tx &= \lambda z \end{aligned}$$

Para el sistema anterior, proponemos $x=1$ y resolviendo llegamos a:

$$\begin{aligned} x &= 1 \\ y &= -T/\lambda \dots 20 \\ z &= T/\lambda \end{aligned}$$

Donde:

x - componente en x del vector característico
 y - componente en y del vector característico
 z - componente en z del vector característico

λ - Valores característicos de la matriz $A - \lambda I$
 T- Esfuerzo debido al Momento por Torsión
 F- Esfuerzo debido al Momento Flector

Todo lo anterior se realiza para cada uno de los elementos acoplados al eje.

Una vez que se tiene esto se obtiene el mayor vector característico, con sus respectivos valores característicos. Además de los valores máximos de los esfuerzos debidos al momento por torsión y por flexión. Los cuales corresponderán a uno y sólo un elemento acoplado al eje.

Por ultimo, con los datos anteriores, se obtienen los cósenos directores (l, m, n) de la siguiente forma.

A partir de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} l(F - \lambda) - mT + nT &= 0 \\ -lT - m\lambda &= 0 \quad \dots 21 \\ lT &= 0 \end{aligned}$$

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1 \quad \dots 22$$

Después de manipular la ecuación 22 y la ultima ecuación de 21 llegamos a:

$$l^2 = \frac{1}{1 + C_1^2 + C_2^2} \quad \dots 23$$

Donde:

$$C_1 = \left(\frac{-T}{\lambda} \right) \quad \dots 24$$

$$C_2 = -\frac{F - \lambda + \frac{T^2}{\lambda}}{T} \quad \dots 25$$

Sustituyendo 24 y 25 en 23, obtenemos los valores de l . Quedando así los valores de m y n para cada valor de l . Donde m, n y l son los cósenos directores.

$$m = \frac{-lT}{\lambda} \quad \dots 26$$

$$n = m - \frac{l(F - \lambda)}{T} \quad \dots 27$$

Este módulo de cálculo de esfuerzos será empleado en una futura extensión de SEAFEM, con la finalidad de utilizar más conocimientos que permitan al sistema concluir el tipo de fractura y las causas que lo originaron con un mayor grado de confianza.

Nota:

Para mayor detalle referente al cálculo de esfuerzos se recomiendan los siguientes libros:

- * Elementos de Mecánica del medio continuo.
- * Introducción a la mecánica de sólidos.

En la bibliografía se detallan estas fuentes.

Bibliografía

Sistemas Expertos Parte 2 Experiencia de la Práctica

Dieter Nebendahl

Marcombo

Principios de Inteligencia Artificial y Sistemas Expertos

David W. Rolston

McGraw Hill

Programación con Visual Basic 6.0

Francisco Charre Ojeda

Anaya Multimedia

Visual Rule Studio - Developer's Guide

Rule Machines Corporation

Apuntes de Análisis de Falla

UDIATEM - Facultad de Ingeniería

Introducción a la mecánica de sólidos

Edgar P. Popov

Limusa

Elementos de mecánica del medio continuo

Enzo Levi

Limusa

<http://home.worldonline.es/mariocr/introduccion.htm>

http://ingenieroseninformatica.org/recursos/tutoriales/sist_exp/index.php

<http://www.fortunecity.com/skyscraper/romrow/207/se/portada.html>

<http://www.unav.es/assignaturas/ia/tsid012.htm>

<http://sardis.upeu.edu.pe/~miquel/temas/experto.htm>

<http://mailweb.udlap.mx/~oneve/maestriadir/index.htm>