



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

SISTEMA EXPERTO PARA ANÁLISIS DE FALLA EN EJES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE: INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A :

MARCO ANTONIO RAMÍREZ RODRÍGUEZ

DIRECTOR DE TESIS

M. en I. ARMANDO ORTIZ PRADO

CD.Universitaria

Diciembre, 2002



TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

- A mi madre:

Por haberme enseñado la cosas más importantes en la vida.

- A mi padre:

Por su apoyo incondicional, su paciencia y sabiduría.

- A mi hermano:

Por los grandes momentos que hemos pasado juntos.

- Al M. en I. Armando Ortíz Prado:

Por su aportación en experiencia y conocimientos para la realización de este trabajo

- Al M. en I. Victor Hugo Jacobo Armendáriz:

Por la orientación brindada en la realización de este trabajo.

- A toda las personas de la UDIATEM. (Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales)

- A toda la gente que conocí en la Facultad de Ingeniería y que actualmente son mis amigos.

• PRÓLOGO	I
• CAPÍTULO I <i>SISTEMAS EXPERTOS</i>	
1.1 Generalidades	2
1.2 Metodología para el desarrollo de un sistema experto	5
1.3 Adquisición del conocimiento	6
1.4 Representación del conocimiento	11
• CAPÍTULO II <i>ANÁLISIS DE FALLA EN EJES</i>	
2.1 Generalidades	17
2.2 Análisis de falla	26
2.3 Mecanismos y causas de falla en ejes	28
• CAPÍTULO III <i>METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE ESFUERZOS EN EJES DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA</i>	
3.1 Generalidades	63
3.2 Sistema de referencia y proyección de fuerzas	64
3.3 Ecuaciones de equilibrio	68
3.4 Tensor de esfuerzos y esfuerzos máximo σ	71
3.5 Planos de orientación de los esfuerzos principales	73
• CAPÍTULO IV <i>METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA EXPERTO PARA ANÁLISIS DE FALLA EN EJES</i>	
4.1 Generalidades	43
4.2 Métodos para la adquisición del conocimiento	43
4.3 Métodos para la representación del conocimiento	45
4.4 Árbol de fallas	60
• CAPÍTULO V <i>DESARROLLO DEL PROTOTIPO</i>	
5.1 Generalidades	76
5.2 Interfase de usuario	76
5.3 Base de conocimiento para el módulo de ejes	86
• CONCLUSIONES	
• BIBLIOGRAFÍA	103
• APENDICE "A"	91
Clases y atributos del sistema	
• APENDICE "B"	106
Reglas del sistema	

El análisis de falla es una técnica utilizada en la industria para encontrar las causas que llevaron a un elemento a fallar, pero sobre todo para emprender las acciones correctivas necesarias que impedirán la reincidencia de estas fallas. La Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM) de la Facultad de Ingeniería se ha dedicado al análisis de falla por más de 15 años, durante este tiempo el grupo de expertos de la Unidad ha detectado la carencia de personal calificado en la Industria Nacional, por esta razón las empresas recurren a las Universidades y a los Centros de desarrollo en busca de soluciones a los problemas relacionados con fallas reiterativas.

El Sistema Experto para Análisis de Falla en Elementos Mecánicos Metálicos pretende almacenar el conocimiento en un software y con éste poder dar solución a los casos que se presenten con más frecuencia, de esta forma no será necesario contar con un experto humano para el análisis de los casos más sencillos, además de funcionar como colega para casos más complejos, en donde el sistema soportará al usuario con apuntes e imágenes sobre el análisis de falla del elemento analizado.

El sistema está constituido por distintos módulos para cada elemento, esto es debido a que el conocimiento involucrado en la detección de las causas que llevaron a un elemento a la falla es complejo, estas causas dependen de la geometría del elemento, de su función en el sistema al que pertenecían, del tipo de cargas a las que estuvieron sometidos, de las condiciones ambientales, de operación y de muchos otros factores. El presente trabajo describe los avances realizados para el Sistema Experto en Análisis de Falla en Elementos Mecánicos Metálicos para el módulo de ejes de transmisión, en donde se presenta la adquisición y representación del conocimiento utilizado, un programa para el cálculo de esfuerzo y el código fuente de la base de conocimiento. La metodología utilizada en el módulo de ejes será extrapolada a los demás módulos para el funcionamiento del sistema global.

El objetivo de este trabajo es presentar el desarrollo de un prototipo de Sistema Experto para Análisis de Falla en Ejes que pueda dar solución a los casos de mayor ocurrencia así como servir de pilar para el desarrollo de un sistema global para análisis de falla en elementos mecánicos metálicos.

CAPITULO I



Sistemas Expertos

1.1 GENERALIDADES

Un sistema experto es un programa computacional que simula el proceso de razonamiento de un experto humano para resolver problemas complejos en la toma de decisiones de una disciplina específica. Estos programas tienen características especiales que los hacen diferentes en la forma de programación a los lenguajes de propósito general.

Los sistemas expertos operan como programas interactivos que responden a preguntas, plantean respuestas, hacen recomendaciones y en general ayudan en la toma de decisiones. Proporcionan ayuda y apoyo en un amplio campo de actividades, desde diagnósticos computacionales hasta cirugías médicas.

“Un sistema experto es una herramienta interactiva basada en el cómputo para la toma de decisiones, utiliza dos factores, el holístico¹ o intuitivo y el conocimiento adquirido por el experto” [1].

La mayor parte de las aplicaciones para las que se han desarrollado sistemas expertos actualmente con éxito, son las siguientes:

- Interpretación e identificación de problemas
- Predicción de sucesos
- Diagnósticos
- Diseño
- Planeación
- Monitoreo de procesos
- Depuración y pruebas de sistemas
- Instrucción y entrenamiento de personal
- Problemas de control

Aplicaciones en las que sólo se requiera de cálculos u operaciones determinísticas no son buenos candidatos para convertirse en sistemas expertos. Para que un sistema experto sea efectivo, debe estar enfocado en un tema específico de un campo de conocimiento.

¹ holístico.- Correspondiente a la concepción de cada realidad como un todo distinto de la suma de las partes que lo componen. Diccionario de la Real Academia Española, Ed. 2001, www.rae.es

Lenguajes de programación

En la década de los años 70, se desarrollaron los primeros sistemas expertos, estos sistemas utilizaban lenguajes de programación especiales como PROLOG y LISP que facilitan el desarrollo del código, la mayor ventaja de estos lenguajes comparados con los lenguajes de programación convencionales es la capacidad de adicionar o quitar reglas con facilidad y la facultad de manejar datos no numéricos.

Actualmente las empresas que desarrollan software han introducido herramientas conocidas como "Shells" o "cascarones". Estos lenguajes de programación contienen todas las ventajas que PROLOG y LISP ofrecían e incluso presentan algoritmos y rutinas preprogramadas útiles para organizar y representar el conocimiento adquirido. Los cascarones pueden operar con lenguajes de programación que facilitan la construcción de interfases gráficas y el manejo de datos numéricos, herramientas valiosas para el buen desempeño de los sistemas.

Las características que un cascarón debe tener para poder realizar el trabajo que un sistema experto requiere, son las siguientes:

- Una mezcla eficiente de variables reales y enteras.
- Procesos de administración de memoria eficientes
- Rutinas extensas para manipular datos.
- Compiladores internos.
- Optimización del entorno del sistema.
- Procesos eficaces de búsqueda.

Estructura de los sistemas expertos.

Para la toma de decisiones en problemas complejos se utiliza una combinación de conocimiento heurístico² y formal. Para que una computadora pueda procesar y utilizar el conocimiento heurístico efectivamente es necesaria la organización y separación entre los datos que almacenan el conocimiento y las respectivas estructuras de control. Bajo este principio, los sistemas expertos están organizados en tres distintos niveles:(figura 1.1)

- a) *Base de conocimiento.*- Esta parte está compuesta por un juego de reglas en donde está almacenado el conocimiento, procedimientos involucrados y datos intrínsecos relevantes en el dominio específico del problema.

² heurístico.- Manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, como por tanteo, reglas empíricas, etc. Op.cit.

- b) *Memoria de trabajo*.- Esta parte se refiere a los datos específicos en el problema que se va a analizar.
- c) *Máquina de inferencia*.- Este es un mecanismo genérico de control, que aplica el conocimiento axiomático en la base de conocimiento del dominio analizado para obtener una conclusión o solución.

La estructuración del sistema en forma modular es una de las características más importantes que distingue a los sistemas expertos de los programas de cómputo convencionales.

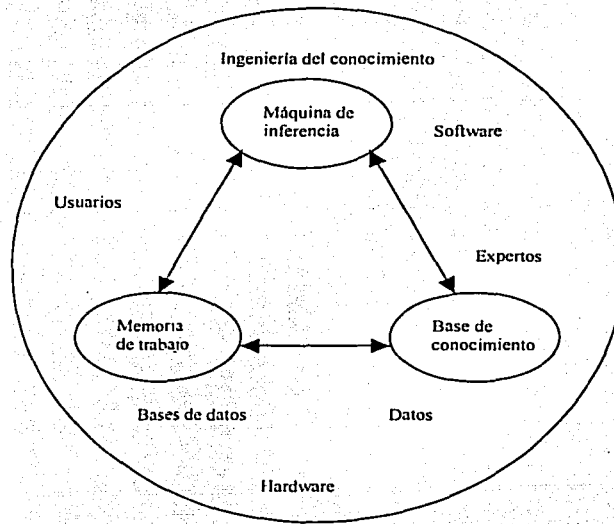


Figura 1.1 Organización y entorno de operación de los sistemas expertos.

Necesidad de los sistemas expertos.

Los sistemas expertos son necesarios por las limitaciones que involucra el proceso de toma de decisiones de los seres humanos, algunas de estas limitaciones son:

- 1) Los expertos son escasos.
- 2) Se cansan física y mentalmente por la carga de trabajo.
- 3) Tiene memoria limitada de trabajo.
- 4) Son incapaces de asimilar grandes cantidades de datos rápidamente.
- 5) Son incapaces de retener grandes cantidades de datos en la memoria.
- 6) Pueden evadir su responsabilidad en la toma de decisiones.
- 7) Mienten, esconden y mueren.

Para el desarrollo de sistemas expertos existen limitaciones impuestas por los lenguajes de programación convencionales que son:

- 1) Los sistemas de cómputo convencionales son algorítmicos por naturaleza y dependen solo de la secuencia impuesta por éste.
- 2) Los programas convencionales dependen de factores que son difíciles de obtener de forma cualitativa, asignan valores a las variables pero difícilmente cualidades.
- 3) Los programas convencionales no hacen uso efectivo del conocimiento heurístico utilizado por los expertos humanos.
- 4) Los programas convencionales no se adaptan fácilmente al cambio de ambiente en la solución de problemas.
- 5) Los programas convencionales buscan soluciones explícitas y factibles que no siempre son posibles.

Por estas razones, en la creación de un sistema experto es necesaria una metodología bien definida en donde se delimiten las actividades que realizarán los distintos grupos de trabajo (expertos, ingenieros del conocimiento y programadores).

Las características del sistema experto dependerán de las decisiones que los ingenieros del conocimiento y programadores estimen convenientes para un desempeño óptimo.

Razonamiento heurístico.

Los expertos humanos hacen uso de un tipo de razonamiento conocido como heurístico, este tipo de razonamiento normalmente llamado "reglas de dedo" permite llegar rápida y eficientemente a buenas soluciones. Los sistemas expertos basan sus procedimientos de razonamiento en manipulaciones simbólicas y procesos de inferencia holística que tratan de asemejarse a los utilizados por los expertos humanos, por su parte, los programas de cómputo convencionales solo pueden reconocer números o cadenas alfanuméricas y manipularlas de forma pre-programada.

1.2 METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO

Para el desarrollo de un sistema experto es necesario estructurar una metodología en donde se especifiquen las etapas que conformarán el proyecto y las expectativas de alcance de cada una de éstas. Hay que tener en cuenta que un plan predeterminado en tiempos y objetivos de

cada una de las etapas redituará en la obtención de un sistema más robusto y eficiente, las modificaciones de última hora o los cambios imprevistos entorpecen los resultados esperados y crean confusión entre los distintos grupos de trabajo.

Las actividades involucradas en el desarrollo de un sistema experto son:

- ❖ Desarrollo del ingeniero de conocimiento
- ❖ Integración del grupo de expertos en el dominio específico.
- ❖ Establecimiento de las características de operación del sistema experto
- ❖ Desarrollo del SE
 - Determinación de los mecanismos de adquisición del conocimiento
 - Estructuración del conocimiento del experto.
 - Determinación de las estructuras de representación del conocimiento
 - Selección del lenguaje o la herramienta de desarrollo
 - Construcción de la base de conocimientos
 - Determinación de la secuencia de operación del sistema
 - Construcción del prototipo
 - Verificación y validación del prototipo
 - Documentación del prototipo y procedimientos para la actualización del mismo
 - Recomendaciones

1.3 ADQUISICIÓN DEL CONOCIMIENTO

La adquisición del conocimiento es un elemento clave en el desarrollo de un sistema experto, ésta se refiere al proceso en el cual el ingeniero del conocimiento adquiere y codifica el conocimiento utilizado por el experto humano para resolver algún problema específico. El éxito de un sistema experto depende de la habilidad del ingeniero del conocimiento para representar adecuadamente las técnicas para la solución de problemas del experto humano.

La adquisición del conocimiento se implementa en múltiples fases, éstas involucran a un buen ingeniero del conocimiento, establecer las características que debe tener el conocimiento para poder ser adquirido, escoger al experto en el tema e implementar las técnicas para poder realizar la transformación del conocimiento.

Características del ingeniero del conocimiento.

El ingeniero del conocimiento debe asumir la responsabilidad del modelado del razonamiento humano para poder codificarlo en un lenguaje computacional.

Algunas de las características que un buen ingeniero del conocimiento debe tener son las siguientes:

- Paciencia
- Perseverancia
- Ser observador
- Inquisitivo
- Orientado a la producción de resultados
- Tener voluntad de aprendizaje
- Habilidad para el trabajo en equipo
- Técnicas de organización
- Buenas bases en el dominio de conocimiento
- Receptivo a las dudas
- Excelente habilidad de comunicación

El ingeniero del conocimiento debe ser capaz de transformar el conocimiento transmitido por el experto en algoritmos útiles y accesibles para que pueda ser manipulado por el equipo de programación.

Fuentes del conocimiento.

Las características del conocimiento para ser adquirido dependen de la naturaleza de la solución del problema así como del nivel de conocimiento en el dominio específico del experto, estas características en ocasiones están regidas por las fuentes de conocimiento utilizadas, las fuentes más comunes de conocimiento son:

- Consulta directa con los expertos humanos.
- Material impreso como libros y revistas.
- Observación directa
- Desempeño con el experto en la solución del problema

De todas las fuentes posibles de conocimiento, la consulta directa con el experto humano representa una gran dificultad para extraer el conocimiento pero a su vez ofrece el mayor nivel de confianza. Los libros u otro material impreso son accesibles para el inicio de la base

de conocimiento, pero después se tendrá que acudir a uno o más expertos, siempre asegurando la veracidad de los datos proporcionados por éste.

Métodos para la extracción del conocimiento.

La adquisición del conocimiento no es una ciencia que pueda predecir los resultados con exactitud. Los ingenieros del conocimiento involucrados en el desarrollo de sistemas expertos deben seleccionar la metodología que más se ajuste a las necesidades del problema en el proceso de extracción del conocimiento, durante las primeras sesiones se deben utilizar varios expertos para que el equipo de ingeniería del conocimiento pueda identificar los distintos métodos utilizados en la solución de problemas del dominio específico, a continuación se presentan algunas técnicas para la extracción del conocimiento del experto.

- ***Entrevistas.***- Este es el método más utilizado para la extracción de conocimiento del experto, en un método no estructurado de entrevista, el ingeniero del conocimiento tendrá varias sesiones con el experto en donde se involucrará en el proceso de dar solución a un problema específico, el experto describirá verbalmente los sucesos que identifique como importantes para la solución de dicho problema, el ingeniero del conocimiento debe registrar la información presente así como hacer preguntas espontáneas con el objetivo de esclarecer los puntos deseados y obtener mayor información. Algunos métodos específicos son utilizados durante las entrevistas para la extracción del conocimiento, a continuación se presentan las etapas utilizadas en el proceso de adquisición del conocimiento en las entrevistas:

- (1). **Discusión del problema.**- En ésta se explora el tipo de datos, conocimiento y procesos necesarios para la solución de problemas.
- (2). **Descripción del problema.**- Proceso de descripción de problemas típicos así como la solución planteada por el experto.
- (3). **Análisis del problema.**- Involucra una interacción entre el experto y el ingeniero del conocimiento en la solución de un problema real, después se analizan los pasos del razonamiento utilizado.
- (4). **Refinamiento.**- El experto presentará un problema al ingeniero del conocimiento para que con el conocimiento adquirido este pueda darle solución.
- (5). **Evaluación.**- Análisis del experto a la estructura de reglas creada por el equipo de conocimiento así como una crítica correspondiente.

(6). Validación.- Solución aceptable de problemas mediante el algoritmo creado por el ingeniero del conocimiento, dicho problema tiene que haber sido resuelto con anterioridad por el experto.

Las entrevistas no estructuradas se utilizan en las primeras etapas de construcción de la base de conocimiento, después son sustituidas por entrevistas estructuradas en donde éstas se enfocan en información específica y particular de las técnicas utilizadas por el experto.

- *Entrevistas de una sola sesión.*- Este tipo de entrevista requiere de una base de conocimiento sólida estructurada o de un ingeniero del conocimiento con dominio en el tema. Cuando existe una base de conocimiento, el experto trabaja sobre esta base, expresando su opinión sobre los cambios que crea apropiados. Cuando el ingeniero del conocimiento tiene un buen dominio del tema, las entrevistas se concretan a preguntas directas y específicas sobre algún punto de la base de conocimiento.

Generalmente las entrevistas no estructuradas tienen la ventaja de arrojar grandes cantidades de datos, una desventaja que presentan es que consumen demasiado tiempo, estas pueden durar semanas hasta llegar a concluir en avances y pueden ser ineficientes si no se estructuran con el tiempo.

Para las entrevistas estructuradas, el tiempo demandado para construir una base de conocimiento efectiva puede ser demasiado largo aunado a la escasez de ingenieros del conocimiento con dominio en los temas analizados.

La validez de los datos obtenidos mediante entrevistas depende casi en su totalidad de la persona que está encargada de hacer las entrevistas, las preguntas deben de estar bien redactadas y ser objetivas. Por su parte el experto debe tener la habilidad para sintetizar sus respuestas.

- *Cuestionarios e inspecciones.*- Los cuestionarios y las inspecciones son otro método para la adquisición del conocimiento, con cuestionarios concretos sobre una característica de interés se busca conocer el procedimiento utilizado por el experto en una parte específica del problema, las desventajas de este método es que el ingeniero del conocimiento se dedica a leer las respuestas del cuestionario en lugar de tomar parte en la solución del problema. Una vertiente de este método es usar cuestionarios cortos y aplicarlos a varios expertos con el fin de obtener la información de distintas fuentes y diversidad de criterios. El ingeniero del conocimiento debe estar capacitado para poder recopilar la información procedente de respuestas abiertas.

- *Documentación y análisis del conocimiento adquirido.*- Reportes escritos, grabaciones de audio y de video así como otras dinámicas son necesarias para esclarecer la información recabada en las entrevistas con los expertos para el desarrollo de la base de conocimiento. La información extraída debe ser organizada en un formato accesible, la transcripción de las entrevistas e información verbal debe generar un amplio acervo de información escrita para después poder generar la base de conocimiento, la documentación y el análisis de la información deben de esta conformadas por:

Transcripción.- Las pláticas que tenga el equipo de ingeniería del conocimiento con el experto deberán de ser documentadas por escrito.

Índice por frases.- Frases y palabras claves en el dominio deseado deben ser clasificadas haciendo referencia a su importancia.

Codificación del conocimiento.- La información debe ser clasificada por características para que esta pueda realizar procedimientos y rutinas predeterminadas.

Adquisición del conocimiento en grupo.

La mayoría de los problemas propuestos para ser solucionados por sistemas expertos son ambiguos por lo que una sola persona no podría conocer toda la información del problema para dar una solución integral, para obtener mejores soluciones es necesario el trabajo en grupo, aunado a las ventajas en las propuestas y decisiones que esto implica. De igual manera la responsabilidad en la toma de decisiones es compartida y las ventajas de trabajar en grupo son las siguientes:

1. Habilidad para compartir experiencias, conocimientos y fuentes de datos.
2. Incremento de credibilidad, puesto que las decisiones tomadas en grupo tienen estructuras más organizadas.
3. Una concepción más racional del problema, la oportunidad de observar a otras personas tomando decisiones incrementa la sensibilidad para emitir respuestas.

Cabe mencionar que el trabajo en equipo representa dificultades al momento de tomar decisiones de responsabilidad compartida, en muchos casos la metodología utilizada por los expertos suele ser distinta y llegar a un consenso es difícil, existen algunas estrategias para atenuar estas desventajas presentadas a continuación.

Lluvia de ideas.

La lluvia de ideas es un método para generar una gama de soluciones de distinta índole, estas ideas provienen del trabajo en grupo sin restricciones, los participantes pueden ser de distintas áreas y con esto se puede abarcar una mayor perspectiva en las soluciones.

En estas dinámicas está prohibida la crítica a las ideas expresadas por los participantes puesto que estas limitan la espontaneidad en las respuestas e inhiben la participación. Ya agotadas las ideas de los participantes se dispone a analizar cada una de las soluciones expresadas tomando en cuenta la factibilidad de éxito, este análisis es elaborado por el mismo equipo de trabajo que sugirió las ideas para no perder las distintas perspectivas generadas por los miembros de las distintas áreas presentes.

Método Delphi.

El objetivo de la toma de decisiones en grupo es extraer la opinión de distintos expertos para luego establecer la información recopilada por consenso. En los grupos de trabajo existen individuos dominantes que tratan de imponer sus ideas sobre las de los demás. Para poder tomar decisiones disminuyendo este factor se hace uso del método Delphi. En donde los participantes emiten sus ideas de forma anónima, las sugerencias, ideas, comentarios, etc. Son escritas y enviadas mediante un intermediario al equipo de ingeniería del conocimiento, evitando así las confrontaciones cara a cara de los expertos. Una selección cuidadosa del equipo de trabajo en la toma de decisiones tiene que ser realizada para que el método funcione óptimamente.

1.4 REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

El propósito de la representación del conocimiento en un sistema experto es organizar la información recabada de forma que el sistema pueda acceder a ésta rápidamente y ofrecer una respuesta satisfactoria. El conocimiento puede ser clasificado en dos tipos: *conocimiento superficial* y *conocimiento profundo*. Esta clasificación está regida por el uso dado al conocimiento en la solución de problemas, el conocimiento superficial es aquel que está basado en la experiencia formada por la solución exitosa de problemas similares, a diferencia del conocimiento profundo en donde se hace uso de la razón y busca dar explicaciones a los

fenómenos observados, este tipo de conocimiento está dominado por el estudio de leyes naturales y de modelos representativos.

Características de los distintos tipos de conocimiento

Conocimiento superficial:

Está compuesto simultáneamente por la acción y la situación del problema.

- Es capaz de dar soluciones sencillas en el dominio correspondiente.
- Se utiliza en situaciones de urgencia.
- Es rápido de utilizar.

Conocimiento profundo:

- Está compuesto por situaciones de causa y efecto.
- Está basado en la condición jerárquica de eventos.
- Involucra resultados y los planes para conseguirlos.
- Es capaz de dar solución a problemas complejos.

En la realización de un sistema experto, el conocimiento debe ser extraído y codificado de tal manera que sea útil en la solución del problema, cuando el conocimiento profundo es organizado, etiquetado y almacenado eficientemente se obtiene un *conocimiento compilado*.

La base de conocimiento de un sistema experto debe operar con las premisas que un experto humano utilizaría en la solución de problemas: Para que un sistema experto sea efectivo, necesita una buena representación del conocimiento extraído por el experto con el objetivo de prevenir ambigüedades en la solución de problemas. Existen algunos modelos para representación del conocimiento, es necesario que el ingeniero del conocimiento escoja el modelo más apropiado para el dominio específico en cuestión así como las características específicas del equipo de trabajo, a continuación se presentan algunos de los modelos utilizados:

- (1) Sistema semántico.
- (2) Marcos
- (3) Producción de reglas
- (4) Predicados lógicos
- (5) O-A-V (Objeto, atributos, valores) triadas.
- (6) Híbridos.

Las estructuras semánticas son las estructuras más generales y antiguas que existen para representar el conocimiento de un sistema experto, es un esquema para representar relaciones abstractas entre objetos del dominio del problema en cuestión. Como la programación actualmente está orientada a objetos en donde existen clases y atributos, este método es el más utilizado y se pueden derivar otras técnicas a partir de éste.

Las estructuras consisten en una serie de nodos que están ligados de otros objetos a través de relaciones, los nodos incluyen palabras, frases o símbolos que los diferencian de otros, las ligas o cadenas indican las funciones o relaciones entre los nodos.

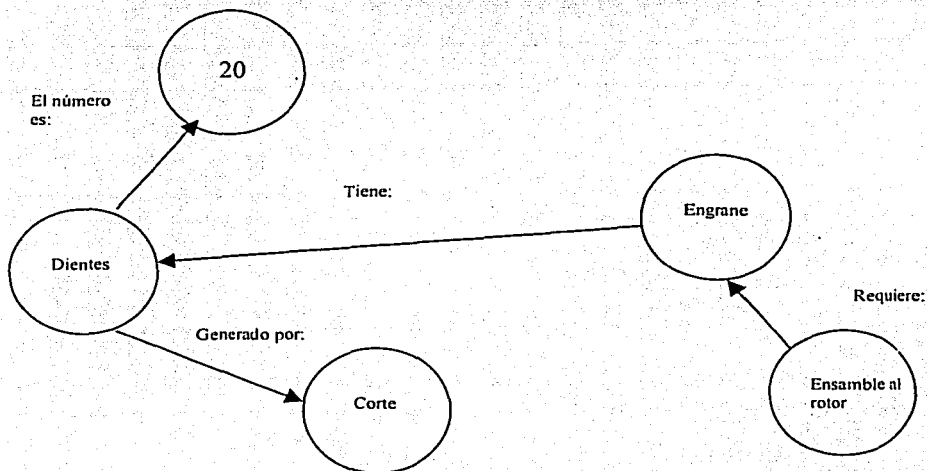


Figura 1.2 Ejemplo de una estructura semántica.

Los marcos consisten en una serie de espacios que contienen atributos para describir los objetos, situaciones, acciones o eventos, la diferencia entre los marcos y las estructuras semánticas es que la información correspondiente a un objeto en los primeros está debidamente ordenada en importancia y contenida por este a diferencia de las estructuras semánticas en donde las características o atributos están ordenados aleatoriamente.

ENGRANE	
Número de dientes	20
Ensamble	Rotor
Método de producción	Corte
Fecha de producción	9/2/01

Figura 1.3 Marco representativo de la producción de engranes.

Los marcos facilitan las búsquedas de información en las bases de conocimiento puesto que almacenan bloques de información compacta, a parte de estar estructuradas con un orden jerárquico para poder relacionarse con otros marcos.

Las reglas son el modo más versátil y popular para representar el conocimiento, las reglas son una estructura formal de representar recomendaciones, estrategias e ideas.

Las reglas de la forma "SI-ENTONCES" (IF-THEN) permite ligar antecedentes a conclusiones también permite ligar objetos a atributos como se muestra a continuación:

SI premisa ENTONCES conclusión.

SI entrada ENTONCES salida

SI condición ENTONCES acción

SI antecedente ENTONCES consecuencia

SI acción ENTONCES objetivo

La premisa se refiere a un hecho que debe ser verdadero para que se cumpla la conclusión, la entrada hace referencia al dato existente para poder arrojar salida, la condición se refiere a las circunstancias que deben prevalecer antes de que la acción sea concretada y así simultáneamente.

Los antecedentes y las consecuencias comúnmente pueden estar ligados a otros operadores como "Y" (AND) o "O" (OR). Las ventajas de las reglas es que son flexibles puesto que trabajan de manera independiente así pueden ser removidas o aumentarlas sin alterar la estructura en general, proveen una estrategia predeterminada fácil de entender, están estructuradas de manera similar en que los humanos usan el raciocinio, etc.

Antecedente:

SI el elemento que transmite potencia es un engrane Y los ejes están orientados a 90° respectivamente.

Consecuencia:

ENTONCES el tipo de elemento es un engrane cónico.

Ejemplo del método de producción de reglas.

Los predicados lógicos son sistemas elementales de forma estructurada para determinar si algún hecho es falso o verdadero, son muy parecidos a las reglas puesto que permiten hacer generalizaciones de hechos particulares y también permiten el uso de valores numéricos.

Las triadas de objetos, atributos y valores, son marcos donde se almacenan las características correspondientes, los objetos pueden ser analizados como entidades físicas o conceptuales.

Finalmente, los modelos híbridos son sólo combinaciones de las técnicas de representación del conocimiento anteriormente mencionadas.

CAPITULO II

Análisis de Falla en Ejes

2.1 GENERALIDADES

Un eje es una barra metálica, usualmente de forma cilíndrica y sólida, en algunas ocasiones hueca, ésta es utilizada para soportar elementos rotativos, para la transmisión de potencia y para la transmisión de movimiento[2].

Casi toda maquinaria rotatoria está dotada de ejes de transmisión, puesto que éstas necesitan transferir movimiento y un par de torsión de un sitio a otro. Por lo general, un eje transmite a la máquina el par de torsión proveniente de un dispositivo impulsor como motores o generadores, algunas veces, los ejes sirven de soporte para engranes, ruedas dentadas o poleas. Los ejes, dependiendo de la maquinaria a la que pertenezcan, pueden estar montados en cojinetes, en configuración de simplemente apoyados o en voladizo.

El acero es uno de los materiales más utilizados para la fabricación de ejes debido a su alta resistencia y elevado módulo de elasticidad, aunque a veces se recurre a las fundiciones, en especial, si con el eje se funden de manera integrada engranes u otros dispositivos. En entornos marinos u otros ambientes corrosivos, a veces se recurre al bronce o al acero inoxidable. Cuando el eje funciona también como superficie de rodamiento sobre un cojinete o buje, la dureza puede ser primordial, en estos casos el material del elemento pudiera ser endurecido o cementado.

La mayor parte de los ejes de las máquinas se fabrican a partir de aceros de bajo o medio contenido de carbono, ya sea laminado en frío o en caliente. Cuando se requiere de mayor resistencia, se aplican aceros aleados. Se pueden adquirir ejes de aceros pre-endurecidos 30HRC o rectificadas a precisión en dimensiones pequeñas y maquinarse con herramientas de carburo. También se dispone de ejes de precisión rectificadas totalmente endurecidos a 60 HRC, aunque no puedan ser maquinados[3].

Potencia en ejes

La potencia se define como la rapidez con la que se realiza un trabajo, si ΔU es el trabajo realizado durante el intervalo de tiempo Δt , entonces la potencia promedio durante este intervalo es:

$$\text{Potencia promedio} = \frac{\Delta U}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Cuando Δt tiende a cero:

$$\text{Potencia} = \frac{dU}{dt} \left[\frac{J}{s} \right] = [W] \quad (2.2)$$

Es posible determinar la potencia transmitida por un eje partiendo de que todo sistema en rotación tiene una potencia instantánea igual al producto punto de un momento suministrado por la velocidad angular.

$$P = T \cdot \omega \quad (2.3)$$

Como la velocidad angular del eje y el momento pueden variar con el tiempo, se toman valores promedio.

$$P_{prom} = T_{prom} \cdot \omega_{prom} \quad (2.4)$$

Cargas y esfuerzos en ejes

El caso más general de las cargas sobre una flecha que transmite potencia es la combinación de un momento flector y un par de torsión fluctuantes, también pueden existir cargas axiales presentes si el eje está en posición vertical o alguno de los elementos de transmisión de potencia es un engrane helicoidal o cónico. Como se observa en la figura 2.1 tanto el par de torsión como el momento flector llegan a variar con el tiempo, y ambos pueden contener componentes medio y alternante.

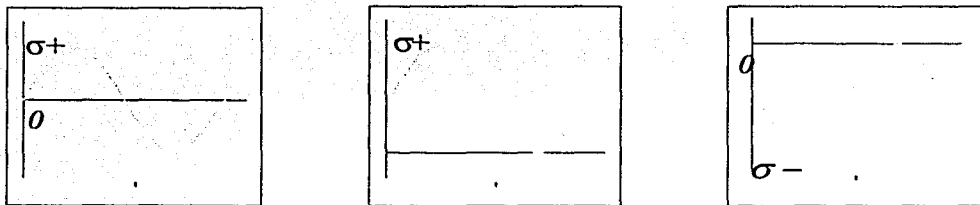


Figura 2.1 Esfuerzos cíclicos alternantes positivos y negativos

Esfuerzos por torsión

Haciendo un análisis del momento de torsión en el eje de la figura 2.2, el momento M_1 debe ser igual a M_2 , y si se hace un corte perpendicular, en cualquier parte de la viga entre estos dos momentos, debe existir equilibrio, por lo que los esfuerzos internos del material deben ser iguales al momento torsionante pero de sentido contrario.

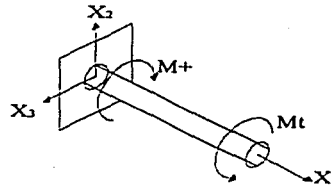


Figura 2.2 Eje circular sometido a torsión

Se define a ζ como la distancia perpendicular entre la fuerza dF al centro del eje, y la suma de los momentos de las fuerzas cortantes dF con respecto al centro del eje, deben ser iguales a la magnitud del torque aplicado.

$$\int \zeta dF = T \quad (2.5)$$

Y como $dF = \tau dA$, siendo τ el esfuerzo cortante en el elemento de área dA .

$$\int \zeta (\tau dA) = T \quad (2.6)$$

Ésta expresión debe satisfacer los esfuerzos cortantes en cualquier sección transversal del eje, pero es estáticamente indeterminada y no arroja información de cómo se distribuyen estos esfuerzos sobre dicha sección.

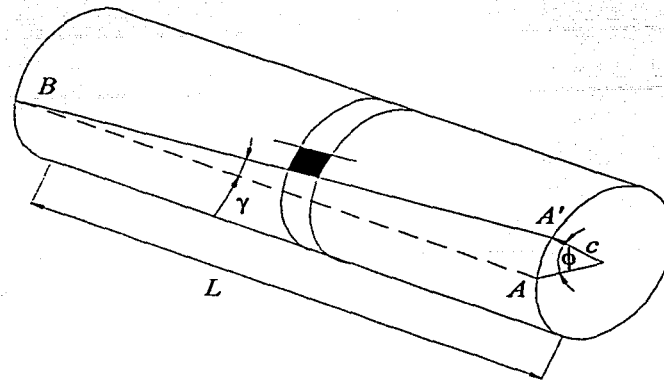


Figura 2.2 Eje circular sometido a torsión

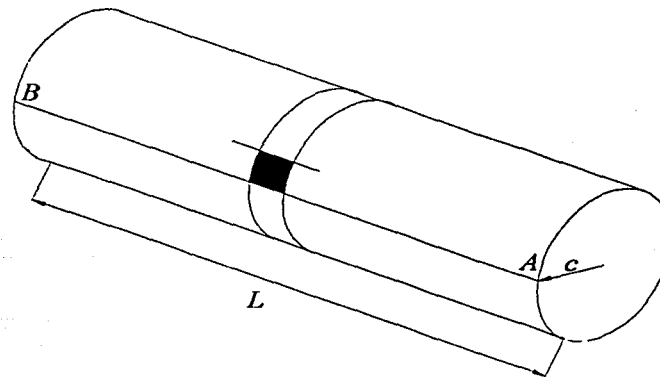


Figura 2.3 Eje circular antes de la torsión

Utilizando las deformaciones cortantes en un eje circular de longitud L y radio c que se ha sometido a torsión en un ángulo ϕ (figura 2.2), se podrá determinar la magnitud de los esfuerzos en función de su posición sobre la superficie.

Tomando un pequeño elemento cuadrado, delimitado por dos circunferencias y dos rectas adyacentes trazadas en la superficie del cilindro (figura 2.3) antes de aplicar la carga. Cuando el elemento es sometido a un par de torsión el elemento se transforma en un rombo y la

deformación cortante γ se mide por el cambio en los ángulos formados por los lados del elemento y debe ser igual al ángulo formado por las líneas AB y $A'B$. Para valores pequeños de γ , se puede expresar la longitud del arco $AA' = L\gamma$, y también como $AA' = c\phi$, finalmente igualando estas dos expresiones:

$$\gamma_{\max} = \frac{c\phi}{L} \quad (2.7)$$

La expresión 2.7, es válida para cualquier radio menor a c , esto es, para cualquier radio ρ dentro del cilindro, como se puede observar, la deformación máxima sucede en la superficie del cilindro, cuando el radio es igual a c .

$$\gamma = \frac{\rho\phi}{L} \quad (2.8)$$

Despejando el ángulo ϕ de las ecuaciones 2.7 y 2.8, e igualando, se obtiene la deformación en cualquier radio ρ en función de la deformación máxima.

$$\gamma = \frac{\rho}{c} \gamma_{\max} \quad (2.9)$$

Para valores del esfuerzo cortante que no excedan el límite de cedencia en un material homogéneo e isotrópico, la Ley de Hooke expresa:

$$\tau = G\gamma \quad (2.10)$$

Donde G es el módulo de rigidez del material. Multiplicando la ecuación 2.8 por G , se obtiene:

$$\tau = \frac{\rho}{c} \tau_{\max} \quad (2.11)$$

Sustituyendo la expresión 2.11 en 2.6.

$$T = \frac{\tau_{\max}}{c} \int \rho^2 dA \quad (2.12)$$

De esta expresión, se nota que la integral es el momento polar de inercia J de la sección transversal con respecto al centro del eje. Finalmente, despejando el esfuerzo cortante máximo:

$$\tau_{\max} = \frac{Tc}{J} \quad (2.13)$$

La potencia así como la velocidad angular en un eje de transmisión se mantienen constantes por intervalos de tiempo, Analizando la ecuación 2.3, se puede observar que el único parámetro desconocido en el eje es el par de torsión aplicado por los elementos motrices, éste puede ser conocido para condiciones particulares del sistema, ya sea despejando la ecuación y dándole solución o midiéndola directamente con un freno de Froude. Los esfuerzos cortantes producidos en un eje por torsión son sólo función del par y las características geométricas particulares de éste.

Esfuerzos por flexión

Además de los esfuerzos generados por el par de torsión, están los esfuerzos impuestos por las cargas actuantes en el sistema. El peso de los elementos montados, las reacciones en los apoyos, las cargas de transmisión y el peso mismo del eje, son algunas de las cargas que crean momentos sobre los ejes distintos al eje de rotación, estos momentos generan flexión en el eje de transmisión y por ende esfuerzos en el material.

Si un elemento está sometido a pares iguales y opuestos que actúan en el mismo plano longitudinal, se dice que está a flexión pura. Haciendo un balance de fuerzas y momentos en el elemento mostrado en la figura 2.5, se obtienen las siguientes expresiones.

$$\text{Fuerzas sobre "x"} \quad \int \sigma_x dA = 0 \quad (2.14)$$

$$\text{Momentos sobre "y"} \quad \int z \sigma_x dA = 0 \quad (2.15)$$

$$\text{Momentos sobre "z"} \quad \int (-y \sigma_x dA) = M \quad (2.16)$$

El signo de la ecuación 2.16 es negativo debido a que el esfuerzo de tensión, $\sigma_x > 0$, genera un momento negativo, en el sentido de las agujas del reloj, respecto al eje z. De igual manera que en la torsión, estas ecuaciones son indeterminadas estáticamente por lo que se hará uso de las deformaciones para poder darles solución.

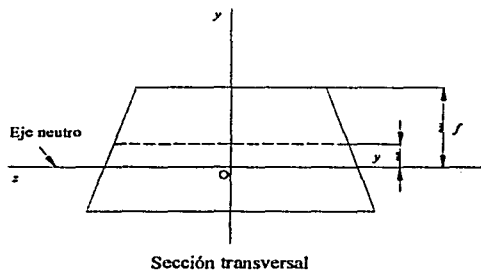


Figura 2.4 Sección transversal de viga sometida a flexión

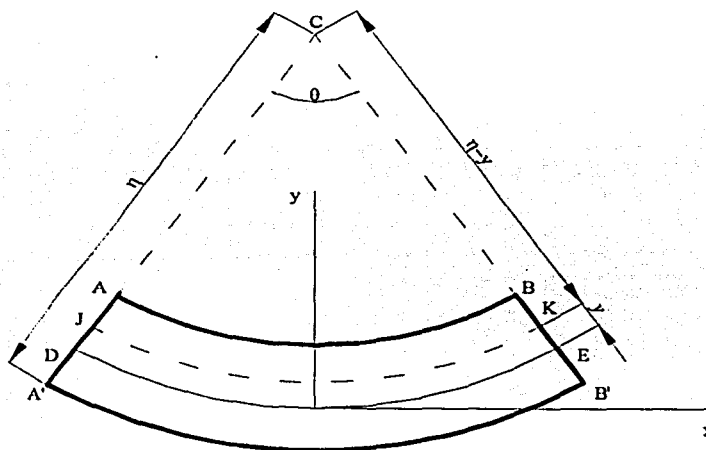


Figura 2.5 Viga sometida a flexión

Analizando la figura 2.5 se puede observar que la longitud del arco formado por el eje neutro DE es:

$$L = \eta\theta \quad (2.17)$$

La ecuación (2.17) iguala la longitud L del elemento, con el arco formado por DE en donde se aloja la superficie neutra, ya que ésta permanece constante durante la flexión. Para el arco JK ubicado a una distancia “ y ” arriba de la superficie neutra, se puede plantear:

$$L' = (\eta - y)\theta \quad (2.18)$$

Como la longitud del arco JK antes de la flexión era igual a L , se puede escribir el decremento de éste como:

$$\delta = L' - L$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.17) y (2.18) en esta expresión:

$$\delta = (\eta - y)\theta - \eta\theta$$

$$\delta = -y\theta \quad (2.19)$$

La deformación longitudinal ϵ_x puede representarse en función del decremento de longitud del segmento JK .

$$\epsilon_x = \frac{\delta}{L} = \frac{-y\theta}{\eta\theta}$$

$$\epsilon_x = -\frac{y}{\eta} \quad (2.20)$$

La deformación ϵ_x alcanza un valor máximo cuando “ y ” es máximo, esto es, cuando “ y ” sea la distancia entre el plano descrito por el eje neutro y la fibra más alejada a éste sobre la superficie del elemento (figura 2.4).

$$\epsilon_m = \frac{f}{\eta} \quad (2.21)$$

Resolviendo la ecuación 2.20 para η y reemplazando en esta última expresión, se obtiene la deformación longitudinal en función de la deformación máxima:

$$\varepsilon_x = -\frac{y}{f} \varepsilon_m \quad (2.22)$$

- Como el análisis elaborado es para deformaciones elásticas, se utiliza la ley de Hooke considerando un estado uniaxial de esfuerzos:

$$\sigma_x = E \varepsilon_x \quad (2.23)$$

Donde E es el módulo de elasticidad de Young específico del material. Multiplicando la expresión (2.22) por E , se obtiene el esfuerzo sobre la componente x :

$$\sigma_x = -\frac{y}{f} \sigma_m \quad (2.24)$$

Donde σ_m es el valor máximo absoluto del esfuerzo, de esta expresión se puede observar como el esfuerzo normal varía linealmente con la distancia al plano donde se aloja el eje neutro en el rango elástico. Como no existen deformaciones permanentes, el eje neutro pasa por el centroide de la sección transversal del elemento. Sustituyendo la ecuación (2.24) en (2.15):

$$\int (-y) \left(-\frac{y}{f} \sigma_m\right) dA = M$$

$$\frac{\sigma_m}{f} \int y^2 dA = M \quad (2.25)$$

De esta expresión se observa que la integral resultante es el momento de inercia de la sección respecto al eje neutro que pasa por el centroide. Finalmente se pueden escribir los esfuerzos como:

$$\sigma_m = \frac{Mf}{I} \quad (2.26)$$

Reemplazando σ_m de la ecuación (2.24) y sustituyendo en la ecuación (2.26) se obtiene el esfuerzo en función de la distancia en donde se quiera valorar éste respecto del eje neutro.

$$\sigma_x = -\frac{My}{I} \quad (2.27)$$

Como se puede observar, el esfuerzo resultante de los momentos flectores se manifiesta exclusivamente como esfuerzos de tracción o compresión dependiendo de la posición que se desee analizar. Hay que recordar que los ejes de transmisión están girando constantemente por lo que los esfuerzos debidos a flexión cambiarán de signo en una posición analizada sobre el eje una vez por ciclo, a diferencia de los esfuerzos de torsión que permanecen constantes mientras la velocidad angular del eje no sea alterada.

2.2 ANÁLISIS DE FALLA

Una falla es la diferencia que existe entre las expectativas y el desempeño de una pieza o sistema. Representa una situación adversa en donde un componente, equipo o sistema falla al no cumplir su función de manera satisfactoria, durante su tiempo de servicio. Las fallas son inevitables en el periodo de vida de cualquier sistema pero la probabilidad de que estas ocurran varia en el tiempo.

Existe una curva que relaciona la frecuencia de falla en función del tiempo de servicio, (figura 2.6) es también conocida como “perfil de tina de baño” y está dividida en tres secciones. La primera zona es el periodo en el cual las fallas están relacionadas con el diseño, defectos de manufactura y errores de ensamblado o instalación. La segunda zona está determinada por las fallas de servicio o fallas de frecuencia constante y la última zona de la curva es debida al deterioro normal de la pieza como resultado de el tiempo de operación, la incidencia de falla en esta zona es alta debido a que el tiempo de servicio del componente ha terminado.

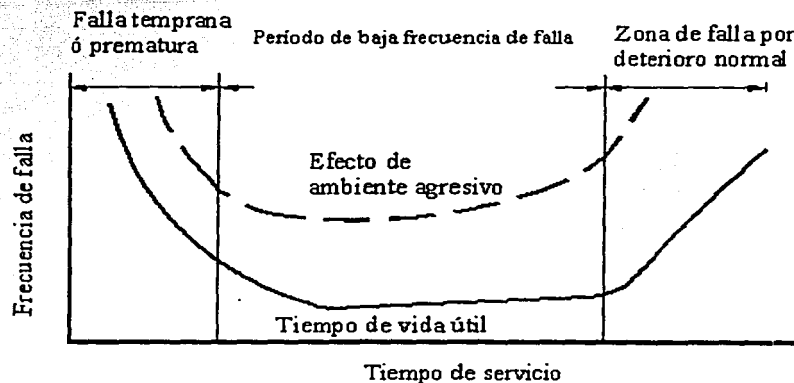


Figura 2.6
Perfil de tina de baño

Es necesario precisar las condiciones bajo las cuales se considera que una pieza o sistema ha fallado:

- 1) La pieza llega a ser completamente inoperable
- 2) La pieza está aún en operación pero no estará durante mucho tiempo funcionando satisfactoriamente, debido a que ha dejado de cumplir con ciertas características para las que fue diseñada.
- 3) Serios deterioros han vuelto insegura a la pieza o sistema y, por lo tanto, es necesario removerla inmediatamente de servicio para repararla o cambiarla.

El análisis de falla tiene como finalidad determinar las causas que han dado lugar a que un sistema, pieza o equipo dejen de cumplir con aquella función para la cual han sido diseñados, y éste se basa en conocimientos de diversos campos, una de sus características fundamentales es definir las causas y secuencia de eventos con la mayor precisión, a la vez del mínimo costo en tiempo de equipo y de personal.

El análisis de falla representa una labor de investigación. El analista de falla deberá, a través de un proceso sistemático y metodológico, eliminar hipótesis, hasta llegar a obtener una precisión lo más cercana al 100% que defina las causas y la secuencia de eventos que ha conducido a la falla del sistema.

El análisis de falla representa una metodología que con auxilio de distintas técnicas (metalografía, fractografía, pruebas destructivas y no destructivas) genera datos que al ser analizados permiten determinar la causa de la falla. Las siguientes directrices ayudan al investigador a llegar a la raíz de la causa de falla de una manera sistemática.

1. Información de los antecedentes. Permite conocer la secuencia de eventos ocurridos con anterioridad y durante la falla. A esta parte también corresponde la historia del componente correspondiente a la manufactura y la información que el operador pueda aportar.
2. Inspección visual. Ésta corresponde a la revisión detallada de la pieza y de la planta o sitio de falla. Con los datos recabados es posible realizar bosquejos y mediciones, registrando observaciones y fractografías. Esto permitirá definir las partes que serán seleccionadas para ser sometidas a pruebas y una comprensión mejor del fenómeno y la secuencia de eventos.

3. Ensayos no destructivos. Estos permiten obtener información relativa a los defectos superficiales e internos del componente que falló.
4. Estudios de fractografía. Son necesarios para determinar el tipo y la naturaleza de la fractura.
5. Pruebas destructivas. Permiten asegurar las propiedades del material con relación a las especificaciones referentes a composición química, propiedades mecánicas, microestructura, etc.
6. Análisis de la información recabada y desarrollada. Es necesaria para proponer las conclusiones, causas y secuencia de eventos de la falla. En todo análisis de fallas realizado es importante conocer las causas que determinaron la falla del sistema o elemento para poder concretar las acciones correctivas correspondientes para que la falla no se presente con frecuencia en el futuro.

2.3 MECANISMOS Y CAUSAS DE FALLAS EN EJES

Los ejes operan en un amplio rango de condiciones de servicio, desde atmósferas corrosivas o llenas de polvo, temperaturas extremadamente bajas como en ambientes criogénicos, en temperaturas extremadamente altas como en las turbinas de gas, etc. Aunado a esto, los ejes están sometidos a una variedad de cargas como son tracción, flexión, compresión, torsión o combinaciones de estas.

Como se mencionó anteriormente una falla sucede cuando un elemento o sistema deja de cumplir satisfactoriamente las funciones para las que fue diseñado, en el caso de los ejes los tipos de fallas que se pueden presentar son las siguientes:

- 1) Fracturas
 - a) Frágil
 - b) Dúctil
 - c) Por fatiga
 - d) Combinaciones de éstas
- 2) Distorsión
 - a) Distorsión permanente
 - b) Termofluencia
 - c) Pandeo

- 3) Desgaste
 - a) Adhesivo
 - b) Abrasivo
- 4) Corrosión

Fallas por fracturas

La causa más común de falla en ejes es la fatiga de los materiales. Las fallas por fatiga comienzan en el punto más vulnerable del elemento, en donde la presencia de cargas cíclicas debilitará el material hasta el punto en que exista desprendimiento de las superficies y se genere una pequeña fisura. En las fracturas por fatiga se pueden distinguir dos zonas bien diferenciadas, una superficie mate y sedosa o aterciopelada y otra zona de grano cristalino o fibrosa, normalmente la zona vulnerable donde comienza la fatiga es conocida como concentrador de esfuerzo. Los concentradores de esfuerzos son de distintos tipos[2]:

- a) Mecánicos
- b) Metalúrgicos
- c) Combinaciones de ambos

Los concentradores de esfuerzos mecánicos pueden ser filetes, discontinuidades, marcas de maquinado, grabados o cualquier cambio brusco en la geometría del elemento y generalmente son visibles a simple vista, los concentradores metalúrgicos pueden ser grietas de temple, picaduras por corrosión, inclusiones, defectos de soldadura, etc.

Las fallas por fatiga en ejes pueden clasificarse en tres subdivisiones dependiendo del origen de las cargas actuantes, éstas son por flexión, torsión o axial

Fatiga por flexión

Cuando un eje que falló por fatiga y estuvo sometido a cargas que lo obligaron a flexionarse respecto a su eje axial se dice que la falla sucedió como consecuencia de fatiga a flexión.

Se dice que existe flexión unidireccional cuando los esfuerzos son fluctuantes en cualquier punto del eje, como se puede observar en la figura 2.1. Los esfuerzos fluctuantes tienen cambios en su magnitud pero nunca de signo, lo que corresponde a la sollicitación repetida de una flexión en un plano definido siempre en el mismo sentido. La fisura de fatiga se origina a partir del punto A (figura 2.7), sobre la fibra exterior más alargada, donde el esfuerzo es

máximo y se desarrolla un arco de círculo que se aplana a medida que la fisura se extiende, hasta llegar a convertirse, aproximadamente, en una recta sobre la fibra neutra.

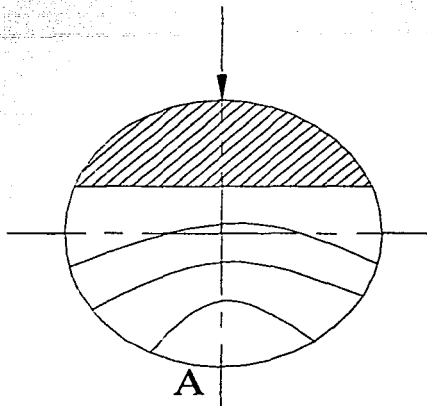


Figura 2.7 Fractura típica por fatiga a flexión unidireccional

En la flexión bidireccional, el esfuerzo es alternante, es decir que el esfuerzo en cualquier punto tiene cambios de magnitud y de signo, lo que demanda a una sollicitación de flexión en un sentido y luego del otro dentro de un mismo plano (figura 2.8). Si la magnitud del momento flector es igual en ambos sentidos, se comprueba la aparición simultánea de fisuras a cada lado, de tal manera que la fractura final ocupa una posición central en la sección rota y afecta la forma de un menisco cóncavo.

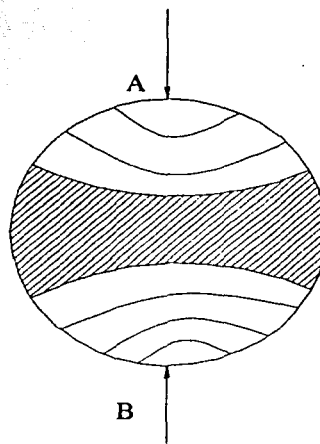


Figura 2.8 Fractura típica por fatiga a flexión bidireccional

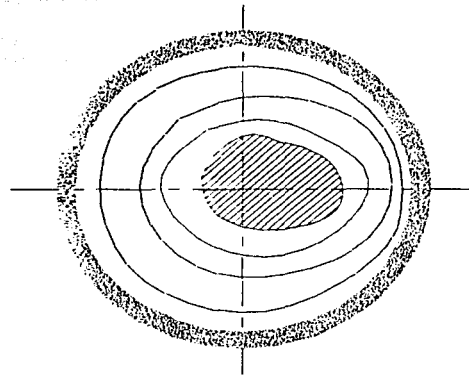


Figura 2.10 Fractura típica por fatiga a flexión rotativa (sección con entalla)

Fatiga por torsión

La fracturas por cargas de torsión alternas aparecen rectas o a 45° , respecto al eje axial del elemento. En metales dúctiles como aceros dulces o aceros con bajo contenido de carbono, las fracturas se producen en secciones rectas, en los metales frágiles como aceros templados o fundiciones, las fracturas tienen lugar siendo secciones helicoidales a 45° [4](figura 2.11).

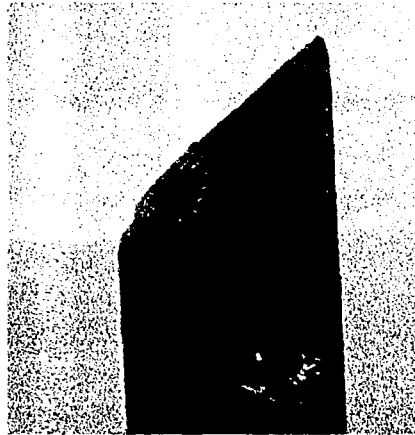


Figura 2.11 Fatiga por torsión en material frágil

Cuando el árbol está entallado circularmente o presenta un cuello, la fractura es siempre recta y algunas veces presenta un núcleo por fatiga de forma radial, constituido por caras dentadas, este dentado reciproco de las superficies de fractura, tiene como efecto retrasar la fractura final.

Fractura frágil

Las fractura frágil se presenta particularmente en ejes que operan en ambientes con temperaturas bajas y es el resultado de un impacto o una sobrecarga aplicada rápidamente. Ocurre en metales de alta resistencia mecánica o en metales con baja tenacidad y ductilidad, incluso metales normalmente dúctiles pueden fallar de manera frágil en secciones muy gruesas o sometidos a grandes tasas de deformación. Las fracturas frágiles están relacionadas con la inapropiada selección de los materiales como causa del desconocimiento de las condiciones ambientales y de operación para las que el eje fue diseñado, también están relacionadas con una demanda excesiva del eje por parte del operador, exponiendo a éste, a situaciones para las que no fue diseñado.

Las fractura frágil sucede como el resultado de la inhabilidad de ciertos materiales a deformarse plásticamente ante la presencia de esfuerzos elevados, particularmente a temperaturas bajas. Es característico que se presente una fractura a velocidades extremas de propagación, alrededor de 1830 m/s o superiores[5], en ocasiones existen evidencias de distorsión en la región de iniciación de la fractura así como presencia de marcas conocidas como patrones de chevron, que siempre están orientados hacia el punto donde inició la fractura (figura 2.12).

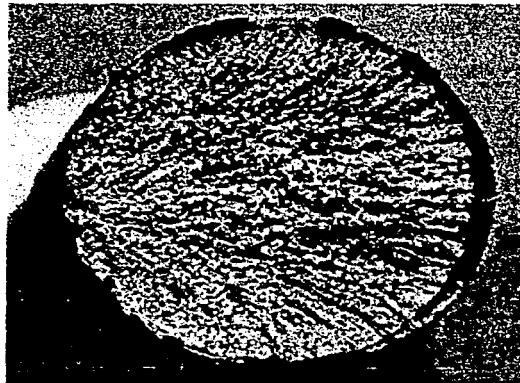


Figura 2.12 Fractura con marcas de chevron indicando el origen de la fractura

Normalmente la grieta se propaga con mayor facilidad a lo largo de planos cristalográficos específicos, a menudo, por agrietamiento, en algunas ocasiones esta grieta puede tomar trayectoria intergranular, esto es, a lo largo de los bordes de grano, particularmente cuando existen segregaciones o inclusiones que debilitan los bordes de grano. Si la falla ocurre por agrietamiento, cada grano fracturado es plano y de orientación distinta, lo que demanda apariencia cristalina o de “terrón de azúcar” a la superficie de fractura (figura 2.13).



Figura 2.13 Aspecto granular y brillante de una fractura frágil

Fractura dúctil

La fractura dúctil normalmente ocurre de manera transgranular, resultado de la dispersión de microcavidades en los metales con buena ductilidad y tenacidad. En general las fracturas dúctiles son causadas por sobrecarga o por aplicar un esfuerzo muy elevado en el material, la fractura comienza con nucleación, crecimiento y coalescencia de microcavidades, cuando un esfuerzo elevado causa la separación del metal en los bordes de grano o en las interfases de metal e inclusiones, conforme aumenta el esfuerzo las microcavidades crecen formando cavidades mayores. Finalmente, el área de contacto metal-metal es demasiado pequeña para soportar la carga y ocurre la fractura. La deformación por deslizamiento ocurre cuando el esfuerzo cortante resultante llega al esfuerzo cortante crítico; estos esfuerzos son máximos cuando están en planos a 45° respecto al esfuerzo de tensión aplicado, el crecimiento de microcavidades y el deslizamiento dan a la fractura dúctil características muy especiales, existen labios de deformación a 45° respecto el eje axial y se presenta una reducción en el

diámetro del eje, una estricción. Además, la superficie de fractura tiene una apariencia sedosa muy particular (figura 2.14), a altas ampliaciones, con la ayuda de un microscopio electrónico de barrido, se puede observar una superficie rugosa. Las rugosidades son rastros de microcavidades producidas durante la fractura. Las fallas por fractura dúctil ocurren rara vez en condiciones normales de operación en árboles y ejes, pueden presentarse como resultado de una carga accidental.

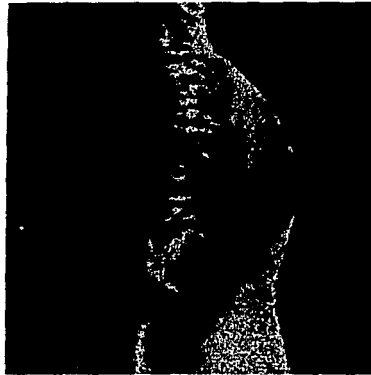


Figura 2.14 Apariencia de una fractura dúctil

Distorsión permanente

La distorsión permanente sucede cuando el esfuerzo aplicado supera al esfuerzo de cedencia del material pero no alcanza el esfuerzo último, es decir, el esfuerzo se encuentra dentro del rango de deformación plástica. El eje se deformará de manera excesiva y esto impedirá que pueda cumplir las funciones para las que fue diseñado, el trabajo en frío ganado en la deformación, impedirá la fractura. Para evitar este tipo de falla, se debe incrementar el esfuerzo de cedencia, ya sea cambiando el material original del que el eje está hecho o aplicando algún tratamiento térmico.

Distorsión por termofluencia

La termofluencia ocurre cuando se aplican esfuerzos a un eje a altas temperaturas y por periodos prolongados, el esfuerzo aplicado puede ser menor al de cedencia, dando como resultado final la deformación excesiva del eje. La termofluencia puede ocurrir como resultado de cualquier tipo de carga y es común en los ejes de las turbinas de gas y motores de

aviones[2]. Para poder evitar la termofluencia en ejes y árboles es necesario usar materiales con alto punto de fusión, así como una adecuada selección de los parámetros de diseño para la vida de servicio de estos elementos.

Distorsión por pandeo

Este tipo de falla sucede como una inestabilidad del eje respecto a los esfuerzos de compresión, es el resultado de un mal diseño, Se presentan cargas excesivas que el elemento no podrá resistir a largo plazo. En este caso los tratamientos térmicos u otras alternativas de cambios metalúrgicos resultan ilógicos.

Fallas por desgaste abrasivo

Se dice que un eje falló por desgaste abrasivo, cuando existe remoción no deseada de material por un mecanismo de corte en el periodo de servicio del elemento, éste puede reducir las dimensiones originales y acabar con la geometría diseñada. Finalmente el eje puede fallar por otro mecanismo. Algunas partículas como polvo, arena u otros elementos en el lubricante pueden causar el desgaste.

Desgaste por contacto entre eje y cojinetes

El desgaste abrasivo por contacto entre el eje y los cojinetes, ocurre cuando la distancia o claro entre estos elementos desaparece, dando como resultado la remoción de finas partículas, este tipo de falla se presenta comúnmente en ejes de turbinas, generadores eléctricos, y compresores centrífugos. Los materiales en los que se ha detectado este tipo de desgaste son aceros inoxidables y acero 3Cr-0.5Mo, encontrando la presencia de cloro en el lubricante.

Algunos métodos para la prevención del desgaste entre ejes y cojinetes son los siguientes:

- Cambio del material del eje
- Uso de cojinetes más blandos o cambio del material de los laberintos
- Cambiar el aceite lubricante
- Eliminar depósitos e impurezas en el lubricante
- Ampliar la superficie del claro formada por la película lubricante

Desgaste adhesivo en ejes

El desgaste conocido como escoriación, es el resultado de la unión de la interfaz de dos metales solubles, como acero con acero. El desgaste adhesivo se presenta cuando existe juego mínimo entre el eje y los elementos montados en éste, como engranes, catarinas, poleas, etc.

La erosión en los ejes es un problema que se presenta frecuentemente. Una característica evidente es la producción de un polvo café-rojizo para el desgaste en aceros, también se presenta una apariencia rasgada en la zona de contacto. Como existe contacto entre la superficie del eje y del otro elemento, llega un momento en que ambas superficies se unen para después despegarse por el movimiento continuo, creando una serie de pequeñas fracturas en las superficies de contacto. En el proceso mencionado anteriormente se genera calor por fricción, por lo que los cambios en la microestructura del material del eje son comunes, en el caso del acero, éste puede endurecerse o recocerse localmente[2].

Una opción para evitar el desgaste adhesivo en ejes, es la optimación en la selección de los materiales que se emplearán, así como de los tratamientos térmicos superficiales. En ocasiones, los ejes son recubiertos con cromo en las zonas críticas para evitar así, el cambio del eje completo.

Corrosión

Generalmente la corrosión se presenta como pequeñas picaduras ubicadas uniformemente en la superficie de los eje, éstas remueven material y en ocasiones acarrean otros productos que cubren las picaduras. Las picaduras por corrosión tienen poco efecto sobre la capacidad de carga en ejes y árboles, pero actúan como concentradores de esfuerzo en donde las fracturas por fatiga pueden ocurrir.

Los ambientes corrosivos aceleran la fatiga de los metales. Los ejes de acero expuestos a agua salada fallan prematuramente por fatiga aunque estos sean limpiados periódicamente[2], las zonas que primero se ven afectadas son los puntos de alta deformación, filos, rayados, etc. Para evitar la fatiga por corrosión es necesario hacer una selección eficiente de los materiales que se utilizarán, éstos deben ser altamente resistentes a la corrosión. También se puede hacer uso de recubrimientos que protejan la superficie de los agentes corrosivos en el medio de servicio.

CAPITULO III

**Metodología para el Cálculo
de Esfuerzos en Ejes de
Transmisión de Potencia**

3.1 GENERALIDADES

La siguiente metodología tiene como objetivo determinar los esfuerzos máximos, la posición y los planos donde se alojan éstos en ejes transmisores de potencia. Con esta información será posible determinar posteriormente si las dimensiones de los ejes, definidas durante el proceso de diseño, satisfacen los requerimientos al momento de la operación. De igual forma se utilizarán los valores obtenidos de este cálculo para saber si los materiales con los que el eje fue elaborado, cumplen con las especificaciones de resistencia reportadas en la literatura, así como la verificación del lugar de la fractura correspondiente con el del máximo esfuerzo.

La información recabada de este cálculo de esfuerzos junto con la correspondiente a la inspección visual permitirá crear una hipótesis y con ésta hacer inferencias acerca del mecanismo y las causas de falla, con esto se podrá realizar una selección adecuada de las pruebas destructivas y no destructivas que necesiten realizarse, el resultado de las pruebas comprobará la hipótesis o la descartará para tomar una nueva ruta de solución.

La siguiente metodología corresponde al cálculo de esfuerzos máximos en ejes con dos apoyos, que es el caso más común para ejes de transmisión de potencia. Con esta metodología se realizó un programa en Visual Basic que resuelve el sistema y da solución a los esfuerzos y su posición, la existencia de más apoyos convierte al sistema en indeterminado, ya que estaría compuesto por seis ecuaciones (tres de conservación de momentum lineal y tres de conservación de momentum angular) y nueve ó más incógnitas (tres para cada apoyo), de esta forma su solución se realizaría utilizando un modelo hiperestático.

3.2 SISTEMA DE REFERENCIA Y PROYECCIONES DE FUERZAS

Los elementos de transmisión de potencia que la metodología contempla son: engranes rectos, engranes cónicos, poleas y catarinas. El sistema de referencia mostrado en la figura 3.1 debe corresponder con el eje analizado para así poder realizar una adecuada interpretación de los resultados. El eje "x" corresponde con el eje axial del eje de transmisión, el eje "z", es el eje vertical respecto al piso y el eje "y" sería paralelo al piso.

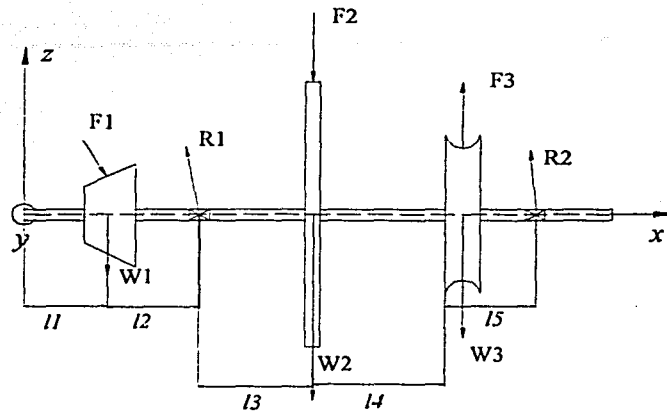


Figura 3.1 Sistema de referencia para ejes de transmisión de potencia.

Como el eje se encuentra en equilibrio estático lineal y sobre éste se encuentran “n” elementos montados, se puede escribir:

$$\sum F = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n + W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n + R_1 + R_2 = 0 \quad (3.1)$$

Donde F son las cargas externas impuestas por los elementos de transmisión, W los pesos de los elementos y R son las fuerzas de reacción como respuesta en los apoyos.

Descomponiendo sobre cada eje para la figura 3.1, se obtiene:

$$\sum F_z = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + \dots + F_{zn} + W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n + R_{zA1} + R_{zA2} = 0 \quad (3.2)$$

$$\sum F_y = F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + \dots + F_{yn} + R_{yA1} + R_{yA2} = 0 \quad (3.3)$$

Faltaría la ecuación para el eje “x”, pero por ser un caso de fuerzas colineales que no general momentos sobre “x” e “y”, su planteamiento se mostrará adelante.

Para poder determinar las componentes de las fuerzas sobre cada uno de los ejes, es necesario determinar la posición de los vectores en el sistema de referencia mostrado, para esto se hace uso de la figura 3.2, que representa una vista del plano "yz" de los engranes montados, cada circunferencia es el diámetro primitivo de los engranes en contacto, el ángulo θ coincide con el ángulo formado entre el eje "y" y la línea \overline{AB} , que es la línea descrita por los centros de los engranes, el ángulo ψ es el ángulo del envolvente del diente del engrane y θ'' es el ángulo entre el eje "y" y la fuerza actuante sobre el engrane (F).

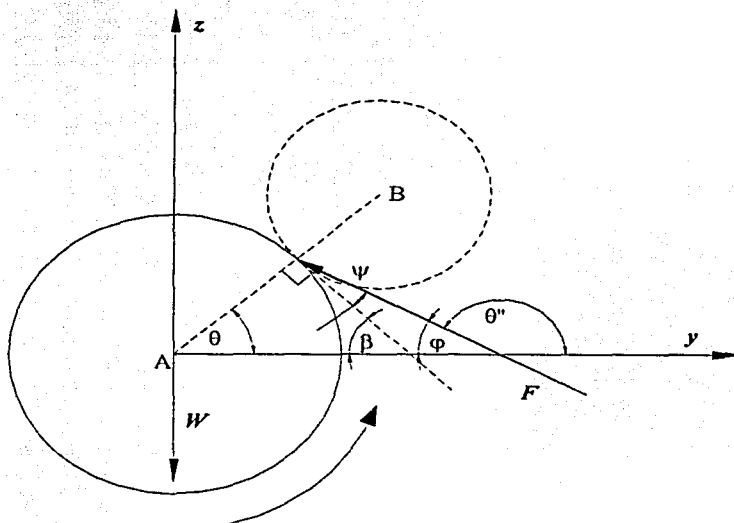


Figura 3.2 Sistema de referencia y orientación de fuerzas para engranes rectos

Conforme la figura 3.2

$$\theta + 90^\circ + \psi + \varphi = 180^\circ \quad (3.4)$$

Despejando φ de la expresión anterior.

$$\varphi = 90^\circ - \theta - \psi \quad (3.5)$$

Se puede observar que φ es el ángulo complementario de θ'' .

$$\varphi = 180^\circ - \theta'' \quad (3.6)$$

Igualando (3.3) con (3.2) y despejando θ'' :

$$\theta'' = 90^\circ + \theta + \psi \quad (3.7)$$

Con este ángulo es posible determinar la orientación de la fuerza F en el sistema de referencia utilizado. Las proyecciones de F sobre el eje "y" y el eje "z" para engranes respectivamente son:

$$F_y = F \cos \theta'' \quad (3.8)$$

$$F_z = F \operatorname{sen} \theta'' \quad (3.9)$$

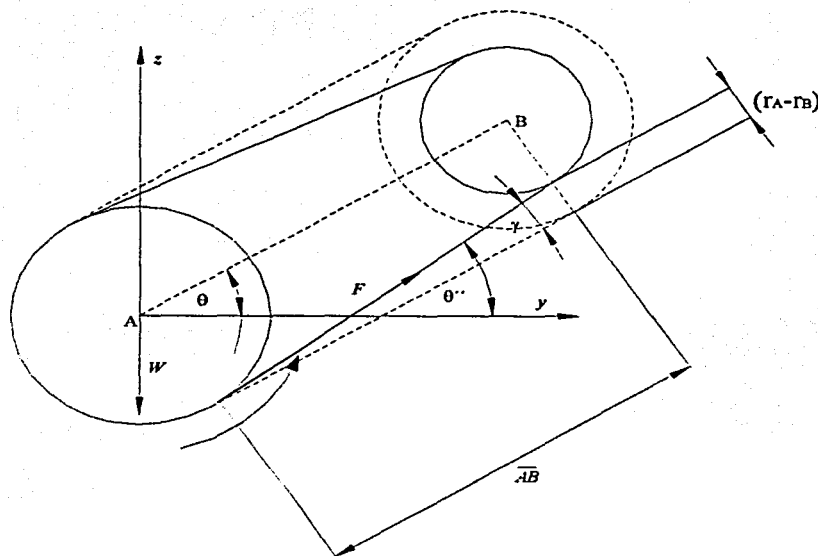


Figura 3.5 Sistema de referencia y orientación de fuerzas para poleas y catarinas

Para el caso de poleas y catarinas el ángulo θ'' resulta:

$$\theta'' = \theta + \gamma \quad (3.10)$$

Como se puede observar γ está en función de la relación de transmisión y la distancia entre los centros de las poleas.

$$\gamma = \text{ang} \tan \left(\frac{(r_A - r_B)}{AB} \right) \quad (3.11)$$

La distancia mínima entre los centros de las poleas en transmisiones sencillas debe ser mayor a la distancia del diámetro de la polea mayor y siempre deberá haber un ángulo de contacto mayor a 130° en la polea menor, de tal forma, en relaciones de transmisión menores a dos ($(r_A / r_B) < 2$) y distancias entre los centros de las poleas mayores a cuatro veces el diámetro mayor ($AB > 4r_A$) se puede despreciar:

$$\gamma = \text{ang} \tan \left(\frac{(r_A - \frac{r_A}{2})}{4r_A} \right) \quad (3.12)$$

$$\gamma = \text{ang} \tan \left(\frac{1}{8} \right)$$

Como se puede observar el peso sólo tiene componente sobre el eje "z". Sobre el eje "x", sólo tendrán componente las fuerzas actuantes en engranes cónicos, la metodología sólo contempla engranes cónicos a 45° .

Para engranes cónicos es necesario determinar el ángulo de inclinación sobre el eje "x" de la fuerza actuante, el análisis para el plano "yz" es el mismo que el realizado en la figura 3.2, de tal forma que la componente sobre el eje "x", analizando la figura 3.1 es:

$$F_x = F_{zc} = F_z \cos 45^\circ \quad (3.13)$$

$$F_{yc} = F_y \quad (3.14)$$

Donde “ F_{zc} ” y “ F_{yc} ” son las componentes en “z” e “y” respectivamente para engranes cónicos, cabe destacar que la componente “y” queda igual que la componente para engranes rectos debido a que la rotación de 45° de la cara del engrane cónico es respecto a un plano que contiene a un vector paralelo al eje “y”.

3.3 ECUACIONES DE EQUILIBRIO

La figura 3.2 muestra un eje de transmisión de potencia con cada uno de los distintos elementos que pueden ser utilizados en el programa. A continuación se presenta el método de solución utilizado para el sistema mostrado. Realizando un balance de momentos para los ejes “y” y “z”, respecto al origen.

$$\sum M_y = (F_{z1} - W_1)l_1 + R_{zA1}(l_1 + l_2) + (F_{z2} - W_2)(l_1 + l_2 + l_3) + (F_{z3} - W_3)(l_1 + l_2 + l_3 + l_4) + R_{zA2}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5) + F_{x1}(d/2) = 0 \quad (3.15)$$

Donde $d/2$ es la mitad del diámetro primitivo, que es la distancia entre la fuerza actuante en el elemento 1 y el eje “x”, así se contemplan todos los momentos que actúan sobre el eje “y”.

$$\sum M_z = F_{y1}l_1 + R_{yA1}(l_1 + l_2) + F_{y2}(l_1 + l_2 + l_3) + F_{y3}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4) + R_{yA2}(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5) + F_{x1} \frac{(d/2)}{\cos \theta} = 0 \quad (3.16)$$

La expresión resultante de la sumatoria de momentos sobre el eje “x”, no se toma en cuenta puesto que el eje está en rotación, $\sum M_x = I\alpha_x$. Como la componente de las reacciones en los apoyos sobre el eje “x” es colineal a éste, no genera momento sobre los ejes, se supone:

$$\sum F_x = R_{x1} + R_{x2} \quad (3.17)$$

$$R_{x1} = R_{x2}$$

El resultado es un sistema de cinco ecuaciones (3.2-3.3 y 3.15-3.17) con cinco incógnitas ($R_{x1}, R_{y1}, R_{y2}, R_{z1}, R_{z2}$), las distancias son datos geométricos conocidos y las fuerzas pueden ser obtenidas a través de la ecuación de potencia en función del par y velocidad angular, que también son datos conocidos:

$$T = Fl$$

Despejando la fuerza:

$$F = T/l \quad (3.18)$$

Se procede a obtener las ecuaciones para momentos flectores en el eje de transmisión para el eje "y", respecto a cada sección, para la sección contenida en l_1 no existen fuerzas actuantes y el resultado es un momento de magnitud nula, para la sección contenida en l_2 se obtiene:

$$M_{l_2} = -F_{1z} x \Big|_0^{l_2}$$

El signo de la expresión es negativo, debido a que los momentos en sentido antihorario se proponen negativos y los momentos con sentido horario positivos.

Valuando la ecuación se observa que sobre el primer elemento del eje los momentos flectores son nulos y sobre el apoyo tienen una magnitud de:

$$M_{l_2}(l_2) = -F_{1z} l_2 \quad (3.19)$$

Para la sección contenida en l_3 se obtiene:

$$M_{l_3} = -F_{1z}(l_2 + x) + R_{1z} x \Big|_0^{l_3}$$

Donde el extremo valuado en "0" corresponde al apoyo y el extremo valuado en l_3 corresponde al segundo elemento sobre el eje.

$$M_{13}(0) = -F_{1z}l_2$$

$$M_{13}(l_3) = -F_{1z}(l_2 + l_3) + R_{1z}l_3 \quad (3.20)$$

Para la sección contenida en l_4 :

$$M_{14} = -F_{1z}(l_2 + l_3 + x) + R_{1z}(l_3 + x) + F_{2z}x \Big|_0^{l_4}$$

Donde el extremo valuado en "0" corresponde al segundo elemento y el extremo valuado en l_4 corresponde al tercer elemento sobre el eje.

$$M_{14}(0) = -F_{1z}(l_2 + l_3) + R_{1z}l_3$$

$$M_{14}(l_4) = -F_{1z}(l_2 + l_3 + l_4) + R_{1z}(l_3 + l_4) - F_{2z}l_4 \quad (3.21)$$

De igual manera los extremos representan los momentos sobre el eje en el segundo y el tercer elemento. Para la sección comprendida por l_5 :

$$M_{15} = -F_{1z}(l_2 + l_3 + l_4 + x) + R_{1z}(l_3 + l_4 + x) - F_{2z}(l_4 + x) - F_{3z}x \Big|_0^{l_5}$$

Valuando los extremos:

$$M_{15}(0) = -F_{1z}(l_2 + l_3 + l_4) + R_{1z}(l_3 + l_4) - F_{2z}l_4$$

$$M_{15}(l_5) = -F_{1z}(l_2 + l_3 + l_4 + l_5) + R_{1z}(l_3 + l_4 + l_5) - F_{2z}(l_4 + l_5) - F_{3z}l_5 = 0 \quad (3.22)$$

3.4 TENSOR DE ESFUERZOS Y ESFUERZOS MÁXIMOS

El ejemplo para la figura mostrada trata de ilustrar la manera de obtener los momentos flectores en un eje, si existiesen más elementos el procedimiento continua hasta terminar las secciones donde estos están comprendidos, de forma análoga se obtienen los momentos flectores para el eje "z". Para obtener el momento flector máximo se comparan los valores

obtenidos de las ecuaciones (3.19-3.22) y se selecciona el mayor, se realiza el mismo procedimiento para los momentos sobre el eje “y” y se obtiene la resultante del sistema según:

$$M_{R \max} = \sqrt{M_{z \max}^2 + M_{y \max}^2} \quad (3.23)$$

Utilizando la ecuación (2.27) mostrada anteriormente para el esfuerzo debido a momentos flectores:

$$\sigma = -\frac{My}{I} \quad (2.27)$$

Donde “M” es el momento flector máximo, “y” representa la distancia del centroide a la fibra mas alejada sobre la superficie, que para el caso analizado, esta distancia corresponde al radio “r” del eje de sección circular e “I” es el momento de inercia de la sección transversal.

$$\sigma = -\frac{Mr}{I} \quad (3.24)$$

Para los esfuerzos producidos por momentos torsionantes se hace uso de la ecuación (2.13).

$$\tau_{\max} = \frac{Tc}{J} \quad (2.13)$$

Donde T es el par suministrado, c es el radio de la sección circular “r” y J el momento polar de inercia de dicha sección. El par se obtiene de la ecuación (2.3).

$$\tau_{\max} = \frac{Tr}{J} \quad (3.25)$$

Para una sección circular, el momento de inercia y el momento polar de inercia respecto a los ejes “y” y “z” son respectivamente:

$$I = \frac{\pi D^4}{64} \quad (3.26)$$

$$J = \frac{\pi D^4}{32} \quad (3.27)$$

De estas expresiones es evidente que :

$$J = 2I \quad (3.28)$$

Conociendo estos parámetros se procede a formar el tensor de esfuerzos correspondiente haciendo la superposición de las dos sollicitaciones de esfuerzo, la flexión y la torsión, como se puede observar la primera solo ocasiona esfuerzos normales y la segunda esfuerzos cortantes.

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\tau_t & \tau_t \\ -\tau_t & 0 & 0 \\ \tau_t & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_f & -\tau_t & \tau_t \\ -\tau_t & 0 & 0 \\ \tau_t & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

Esfuerzos flectores

Esfuerzos de torsión

Esfuerzos combinados

Para conocer los esfuerzos principales del tensor de esfuerzos combinados, es necesario obtener el polinomio característico del sistema, el cual resulta:

$$-\lambda(\lambda^2 - \sigma_f \lambda - 2\tau_t^2) = 0 \quad (3.30)$$

De esta expresión es evidente que una raíz es igual a cero y las otras dos son:

$$\lambda_{2,3} = \frac{\sigma_f \pm \sqrt{\sigma_f^2 + 8\tau_i^2}}{2} \quad (3.31)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.24, 3.25 y 3.28 en 3.31 y simplificando:

$$\lambda_{2,3} = \frac{r(M \pm \sqrt{M^2 + 2T^2})}{2I} \quad (3.32)$$

Los esfuerzos principales son iguales a los valores de las raíces, el esfuerzo principal número I será el de mayor valor y el esfuerzos principal III será el menor. De tal forma:

$$\begin{aligned} \sigma_I &= + \\ \sigma_{II} &= 0 \\ \sigma_{III} &= - \end{aligned} \quad (3.33)$$

3.5 PLANOS DE ORIENTACIÓN DE LOS ESFUERZOS PRINCIPALES

Los esfuerzos principales son ortogonales entre sí, por lo que se pueden representar sobre un segundo sistema rotado respecto al original. Para poder determinar los cosenos directores del nuevo sistema respecto al original se puede plantear:

$$\begin{pmatrix} l(\sigma_x - \lambda) & m\tau_{yx} & n\tau_{zx} \\ l\tau_{xy} & m(\sigma_y - \lambda) & n\sigma_{zy} \\ l\tau_{xz} & m\tau_{yz} & n(\sigma_z - \lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

Donde "l", "m" y "n" son los cosenos directores del vector normal al plano donde se aloja el esfuerzos principal σ_i , para completar el sistema se tienen que obtener los cosenos directores correspondientes a los tres esfuerzos principales, de tal forma para el sistema analizado se tiene:

$$\begin{pmatrix} l(\sigma_f - \lambda_i) & -m\tau_i & n\tau_i \\ -l\tau_y & -m\lambda_i & 0 \\ l\tau_i & 0 & -n\lambda_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.35)$$

Para $i = 1, 2, 3$

Como se puede observar el sistema es homogéneo e indeterminado y se tendrá que utilizar una ecuación más para poder dar una solución numérica:

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1 \quad (3.36)$$

De tal forma, despejando "l" del tercer renglón de la expresión 4.35 se obtiene:

$$l = \frac{n\lambda_i}{\tau_i} \quad (3.37)$$

Se sustituye 3.37 en 3.36 y se despeja "m":

$$m = \sqrt{1 - n^2 \left(1 + \frac{\lambda^2}{\tau_i^2} \right)} \quad (3.38)$$

Sustituyendo en el primer renglón de la expresión 3.35 a 3.37 y 3.38 y despejando "n" se obtiene:

$$n = \left(\left(1 + \frac{\lambda^2}{\tau_i^2} \right) + \frac{\lambda^2}{\tau_i^2} (\sigma_f - \lambda)^2 + 2\lambda(\sigma_f - \lambda) + \tau_i^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.39)$$

Del segundo renglón de la expresión 3.35, se despeja "m":

$$m = -\frac{l\tau_i}{\lambda} \quad (3.40)$$

Con las expresiones 3.37, 3.39 y 3.40, se da una solución numérica al sistema y se conocen los cosenos directores del nuevo sistema de referencia. Estos datos servirán para identificar el ángulo del plano de fractura del elemento analizado correspondiente con el material del que está compuesto. Además, la metodología proporciona una buena aproximación de la distribución de esfuerzos en el eje y del tipo de fractura. Con esta información se compararán los planos reales de la fractura con los teóricos para así poder emitir conclusiones. El algoritmo generado para la metodología descrita en esta sección será expuesto en el capítulo V, así como el juego de reglas que rigen al sistema en general.

CAPITULO IV

**Metodología para el Desarrollo
del Sistema Experto para
Análisis de Falla en Ejes**

4.1 GENERALIDADES

El siguiente capítulo describe la metodología utilizada en las distintas etapas de la construcción del prototipo del Sistema Experto en Análisis de Falla de Ejes. Una metodología bien estructurada y planeada contribuirá en resultados de mayor eficiencia en las subsecuentes partes de implementación del sistema.

Como se explicó en el primer capítulo, la adquisición de conocimiento es el proceso en el cual el conocimiento es extraído y codificado para la solución de problemas. Como consecuencia, esta parte del proceso es la que demanda mayor cantidad de tiempo, tomando alrededor del 60 al 70% del desarrollo, esto es debido a que el análisis de falla involucra conocimientos complejos tanto en sus mecanismos como en la toma de decisiones.

4.2 MÉTODOS PARA LA ADQUISICIÓN DEL CONOCIMIENTO

El análisis de falla cuenta con varias etapas de desarrollo, que comprenden desde la inspección visual hasta el planteamiento de una hipótesis satisfactoria que proponga una solución al problema, estas etapas tienen distintas características, en algunas la observación será un factor primordial y en otras los modelos matemáticos o el resultado de las pruebas de laboratorio constituirán las bases para poder tener la información suficiente que sea demandada, por lo que fue necesario delimitar dichas fases tanto para la adquisición como para la representación de conocimiento.

En la fase de inspección visual el método desarrollado para la extracción de conocimiento fueron las entrevistas directas y la capacitación de los ingenieros del conocimiento en el tema de análisis de fallas y los distintos tipos de fractura existentes para materiales metálicos, conforme los ingenieros del conocimiento fueron comprendiendo el proceso utilizado, las entrevistas cambiaron a sesiones cortas con el experto, en donde se trataban temas específicos en la solución de ciertos problemas. Para poder comprender mejor la información que el experto necesitaba para la detección del tipo de fractura, se implementó una dinámica, que consistía en la selección de un eje fracturado. Dicho eje era introducido en una caja para que los expertos no pudieran verlo, los expertos podían hacer preguntas de las condiciones generales del eje, de las características de la superficie de fractura, del

sistema al que pertenecía, del tipo de material, geometría, parámetros de diseño y cualquier cosa que pudiera ser detectada a simple vista. Con esta dinámica se intentó simular la forma en que un usuario sería cuestionado por el sistema, conocer las preguntas a las que podría responder sencillamente y en las que necesitaría de conocimiento específico. Para el módulo del sistema correspondiente a la inspección visual, se determinó que el usuario necesitaba conocimiento y cierta experiencia acerca de las marcas características en la superficie de fractura, capacidad de observación y contar con la historia de operación del elemento. Se determinó que el programa necesitaría un módulo de ayuda para el usuario, el cual debería contener algunos conceptos básicos del tipo y las características de falla. La información contenida en la ayuda está compuesta por texto e imágenes, estas últimas ayudan a visualizar al usuario las características específicas de las fracturas, como son marcas de chevron, superficies granulares, planos de localización, etc.

Como complemento a las entrevistas con el experto, se estudió la fractografía en diversas fuentes bibliográficas, se analizaron fotos con patrones característicos de fractura y se discutió con éstos las causas que determinaban la apariencia final de la fractura, conociendo el tipo de falla, se pueden hacer inferencias acerca de las causas, para finalmente poderlas relacionar con el tipo de material, el diseño, la manufactura, etc. Para poder determinar el mecanismo de falla, es necesario conocer el estado de esfuerzos al que el elemento fue sometido, de tal manera fue necesario repasar las ecuaciones características de esfuerzo en materiales metálicos y con estas plantear un modelo adecuado para determinar los esfuerzos máximos en ejes transmisores de potencia. En el capítulo III se presentó la metodología de cálculo utilizada para determinar el esfuerzo máximo así como el plano de incidencia.

Cuando los ingenieros del conocimiento estuvieron adentrados en el tema del análisis de falla se realizaron juntas en donde se trataba de estimular la lluvia de ideas acerca del mecanismo de solución de problemas en el dominio respectivo, dichas sesiones sirvieron para resaltar que existen varios métodos de solución, según al experto que se consulte, también se comprendió que existen casos típicos, que se presentan a menudo y como consecuencia su detección y clasificación es mucho más sencilla.

Después de haber adquirido la información general de la inspección visual se procedió a realizar un refinamiento de ésta, se organizó la información por tipo de fractura, tipo de material, condiciones de carga y se clasificó al elemento analizado respecto a la función que realizaba así como al sistema al que pertenecía, de toda esta información se realizaron apuntes, cuadros sinópticos y esquemas. De esta forma, fue más fácil el manejo de la información recabada para después poder ser clasificada.

4.3 MÉTODOS PARA LA REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

La finalidad de la representación del conocimiento es la de organizar la información de manera adecuada para que a través de procedimientos y rutinas un programa de cómputo pueda dar una solución al problema demandado. En el caso de sistemas expertos de razonamiento basado en reglas (RBR), el conocimiento adquirido tiene que ser representado con una secuencia lógica, esta secuencia lógica está constituida por estructuras de control de decisiones que tienen la forma If -Then-Else, vistas en el primer capítulo, estas estructuras tienen la propiedad de adaptarse fácilmente a los códigos de programación además de ser accesibles para los programadores tanto en su secuencia como en el mantenimiento del programa. Para el caso del análisis de fallas es factible considerar este tipo de estructuras para una eficiente representación del conocimiento puesto que éste parte de conocer ciertas premisas, éstas a su vez son suficientes para encontrar algunas conclusiones intermedias que vayan delimitando la solución del problema. Para que la máquina de inferencia de un sistema experto basado en reglas pueda arrojar conclusiones necesita que se cumplan las premisas de ciertas reglas, estas a su vez arrojarán conclusiones que servirán como premisas de nuevas reglas y así sucesivamente, a este mecanismo se le conoce como "encadenamiento" (ejemplo 4.1).

Si la clasificación del material es AISI-SAE 1020

Entonces el material es acero, tiene .2% de peso de carbono y es no aleado

Si el eje es de acero

Entonces el elemento es metálico

Ejemplo 4.1 Encadenamiento de reglas

Como se puede observar en el ejemplo 4.1, en una estructura de control pueden existir varias premisas para que exista una conclusión, conforme los encadenamientos de reglas van siendo más grandes, existe mayor seguridad de que la conclusión sea verdadera, En el ejemplo anterior una sola premisa produjo tres conclusiones directas y una de estas conclusiones encadenó una segunda estructura de control para una cuarta conclusión. Aunque no es necesario que una sola premisa encadene a las sentencias de control y “dispare” varias conclusiones, es común que una estructura o regla este compuesta de varias premisas, que al cumplirse afirmarán una o varias conclusiones (ejemplo 4.2)

Si el tipo de falla es fractura

Y la aplicación de cargas fue cíclica

Y existe un concentrador de esfuerzos cerca de la fractura

Y existen Marcas de Playa

Entonces el tipo de falla es fatiga

Ejemplo 4.2 Encadenamiento de reglas

En el ejemplo anterior se creó una estructura de control con cuatro premisas y una conclusión, el mecanismo de encadenamiento implica generar todas las reglas posibles derivadas del caso con mayor seguridad hasta donde sea posible. Esto es, la estructura de control con mayor número de premisas o requerimientos tendrá que ser descompuesta en un número igual de estructuras de control hasta un mínimo que concluya en afirmación de la conclusión (ejemplo 4.3). Utilizando el ejemplo anterior:

Si el tipo de falla es fractura
Y la aplicación de cargas fue cíclica
Y existe un concentrador de esfuerzos cerca de la fractura
Y existen Marcas de Playa
Entonces el tipo de falla es fatiga

Si el tipo de falla es fractura
Y la aplicación de cargas fue cíclica
Y existe un concentrador de esfuerzos cerca de la fractura
Entonces el tipo de falla es fatiga

Si el tipo de falla es fractura
Y la aplicación de cargas fue cíclica
Y existen Marcas de Playa
Entonces el tipo de falla es fatiga

Si el tipo de falla es fractura
Y la aplicación de cargas fue cíclica
Entonces el tipo de falla es fatiga

Si el tipo de falla es fractura
Y existen Marcas de Playa
Entonces el tipo de falla es fatiga

Ejemplo 4.3 Encadenamiento y descomposición de reglas

Como se puede observar la primera estructura se pudo descomponer en otras cuatro, que son sólo partes de la primera, estas estructuras descompuestas no son tan confiables como la primera pero contiene información suficiente para determinar la conclusión con menor precisión. Una regla es más confiable conforme mayor número de premisas tenga. Se podía haber descompuesto aun más la primera estructura, pero la información existente

no sería suficiente para afirmar la conclusión.

Clases y atributos

Para tener un mejor manejo de la información y como resultado una construcción más fluida de las estructuras de control, es necesario clasificar o "categorizar" la información, es decir, separarla por sus características o cualidades que tenga en común. Estas categorías estarán formadas por *clases*, ésta es una característica impuesta a un grupo de información desde un punto de vista bastante general, de tal forma, las clases contienen una gran cantidad de información clasificada, dispuesta a la construcción de reglas.

Conforme las características de la información se hacen más específicas es más difícil utilizar las clases, por lo que se hace uso de un siguiente nivel de clasificación, éste es por *atributos*. Los atributos contienen información ordenada pero más específica, a su vez, pertenecen a las clases y una clase puede tener cientos de atributos. Un atributo es una característica que diferencia la información del resto de la clase. Los atributos pueden estar compuestos por uno o varios elementos que son las *variables que toma el atributo* (figura 4.2).

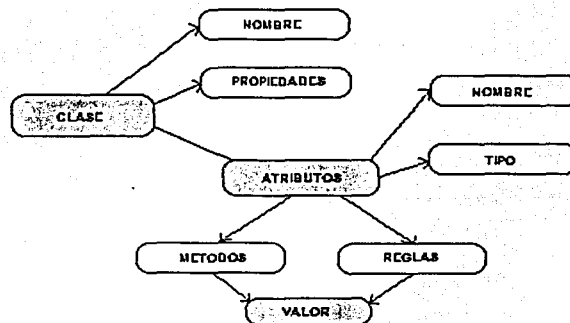


Figura 4.1 Estructuras en clases y atributos

CLASE: INFORMACIÓN DEL MATERIAL	
ATRIBUTOS	VARIABLES DEL ATRIBUTO
MATERIALES	Acero, Bronce, Acero inoxidable, Latón, Aluminio, Fundiciones.
TIPO DE ACERO	1008, 1010, 1020, 1040, 1060, 4140, 4120
PORCENTAJE DE CARBONO	Bajo, Medio, Alto
NIVEL DE ALEACION	Bajo, Medio, Alto
COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL	Dúctil, Frágil

Figura 4.2 Ejemplo de clases y atributos

Tomando en cuenta la clasificación de la información descrita anteriormente la premisa de una regla o sentencia de control puede ser escrita por un condicional (IF-SI), el atributo, la clase y finalmente la variable que tomará el atributo. La conclusión será formada de la misma manera por un condicional (THEN-ENTONCES), el atributo, la clase y la variable que tomará el atributo (Ejemplo 4.4) :

SI el TIPO DE ACERO de INFORMACIÓN DEL MATERIAL es 1008
 ENTONCES el PORCENTAJE DE CARBONO de INFORMACIÓN DEL MATERIAL es Bajo.

Ejemplo 4.4 Clases y atributos en la construcción de reglas.

Selección del Shell

Un *Shell* es un programa computacional que funciona como administrador de la información, es una herramienta que se utiliza para el desarrollo de sistemas expertos, contiene rutinas de encadenamiento, así como las asignaciones correspondientes a una máquina de inferencia y sirve como intermediario entre la interfase (usuario) y las estructuras de control (ingenieros del conocimiento y expertos)[6].

Para el desarrollo del Sistema Experto en Análisis de Fallas en Ejes, que es un sistema basado en reglas fue necesario seleccionar un *Shell* que cumpliera con los principios de representación del conocimiento descritos anteriormente, así como muchas otras características que se presentan a continuación[1]:

Costo. Este debía ser adecuado respecto a las posibilidades del UDIATEM, así como los alcances previstos para el sistema

Mecanismos de representación del conocimiento. Se refiere a las posibilidades en cuanto a las estructuras de representación como; reglas, marcos, etc, así como al tipo de cualidades que maneje la máquina de inferencia, que son de encadenamiento hacia adelante o hacia atrás.

Interfases externas. Se refiere a la posibilidad de interacción con sistemas de bases de datos, hojas de cálculo, lenguajes de programación, etc.

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

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

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

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

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

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

Soporte técnico. Se evalúa principalmente si se dispondrá de asesoría técnica

Visual Rule Studio

Conforme lo anteriormente mencionado, la herramienta que se escogió como *Shell* para el desarrollo del Sistema Experto en Análisis de Fallas en Ejes fue Visual Rule Studio versión 2.0. Éste es la nueva versión de Level 5 object que fue de los primeros sistemas que manejaron ambientes visuales bajo la plataforma de Windows. El shell se inserta en Visual Basic 6.0, como un archivo de aplicación Active X, mismo que se orienta al desarrollo de ambientes gráficos y es amigable con el usuario, cumple además con las expectativas de capacidad de programación orientada a objetos. Visual Rule Studio tiene características que lo hacen muy competitivo con respecto a otros paquetes similares¹, especialmente en lo relacionado a la capacidad de implementar métodos de inferencia con encadenamiento hacia atrás y con encadenamiento hacia delante además de permitir que ambos tipos de encadenamientos funcionen al mismo tiempo, lo cual le da una gran ventaja sobre otros cascarones. Esta herramienta de desarrollo se caracteriza por tener estructurados varios métodos y procedimientos que permiten un control óptimo sobre la forma en como el sistema va a procesar la base de reglas.

Creación de Clases y Atributos

Para el desarrollo de la base de conocimiento, compuesta por un juego de reglas, fue necesario determinar las clases y atributos pertinentes en el dominio de ejes de transmisión de potencia. Dentro de Visual Rule Studio los atributos son variables que tienen distintas características y funciones en tiempo de programación y ejecución. Los atributos pueden ser de las siguientes formas:

- Simple.- Este tipo de atributo solo puede tener dos valores. Sí o no, existencia o carencia, etc. Una vez que el atributo es invocado adquiere el valor positivo, esto es: existencia, sí, etc.
- Compound.- Este tipo de atributo puede tomar una variable o característica de una lista de dos o más elementos.

¹ S. M. Cerrud, "Propuesta de Metodología para el Desarrollo de un Sistema Experto en Análisis de Falla de Elementos Mecánicos Metálicos"

- Multicompound.- Este tipo de atributo puede tomar de uno a “n” elementos de una lista de “n” elementos.
- String.- Este tipo de atributo puede tomar una variable introducida por el usuario externamente, esto es, la variable no tiene que estar determinada en el código del programa fuente. El atributo tomará una cadena de caracteres de texto.
- Numeric.- Este tipo de atributo toma valores numéricos que pueden ser determinados por el usuario o por el programa.

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

No todos los atributos e inclusive algunas clases son determinadas de esta manera, existen algunas clases y atributos que fueron creadas para el buen funcionamiento del programa en donde el usuario no los selecciona directamente. En estos casos, los atributos toman sus valores por medio de las inferencias de las premisas contenidas en las reglas del sistema y el usuario solo interviene de manera indirecta.

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

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

El segundo carácter del cuadro indica el tipo del atributo:

- S.- Simple
- C.- Compound
- M.- Multicompound
- St.- String
- N.- Numeric.

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

Atributos:

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

	Agujeros.- Existencia de agujeros. (U,S)
	Cambios de sección.- Existencia de cambios de sección. (U,S)
	Estriados.- Existencia de estriados. (U,S)
	Estampados.- Existencia de estampados. (U,S)
	Roscas.- Existencia de roscas. (U,S)
	Cuñeros.- Existencia de cuñeros. (U,S)
	Ranuras.- Existencia de ranuras. (U,S)
	Marcas de maquinado.- Existencia de marcas de maquinado visibles. (U,S)
Concentrador de esfuerzos cerca de la zona de falla,-	Determina si el concentrador de esfuerzos está situado cerca de la superficie de fractura. (U,S)
Recubrimiento.-	Determina si el elemento presenta algún tipo de recubrimiento. Este atributo permite el acceso a la siguiente lista de atributos. (U,S)
	Tipo de recubrimiento.- Determina el tipo de recubrimiento presente en el elemento. (orgánico, fosfatado, etc.) (U,C)
	Corrosión en el recubrimiento.- Determina la presencia de corrosión en el elemento analizado. (U,S)
	Daño en el recubrimiento.- (U,S)
	Corrosión en el elemento.- Determina si existen muestras de corrosión en el elemento en general. (U,S)
	Corrosión en la fractura.- Determina si existen muestras de corrosión específicamente en la zona de la fractura. (U,S)
	Picaduras por corrosión.- Determina si existen picaduras originadas por corrosión en el elemento. (U,S)
Apariencia de la pieza.-	Determina las características generales de una primera inspección visual sobre el estado de la pieza. (deformación, desgaste, etc.) (U,M)
	Existencia de cargas cíclicas.- (U,S)

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

Atributos:

Materiales.-	Permite seleccionar entre distintos metales y aleaciones como acero, aluminio, etc. (U,C)
Material identificado.-	Atributo creado para determinar que el material buscado por el usuario fue encontrado. (P,S)
Tipo de acero.-	Permite determinar el tipo de acero bajo la clasificación AISI-SAE. (1010, 4410, etc.) (U,C)
Porcentaje de carbono.-	Permite determinar el porcentaje de carbono en el material de forma cualitativa. (alto, medio, bajo) (P,C)
Nivel de aleación.-	Permite determinar el nivel de aleación presente en el acero como baja aleación, media aleación y alta aleación. (P,C)
Comportamiento del material.-	Permite definir las propiedades mecánicas según sea el material elegido .(frágil, dúctil) (P,C)
Existencia de tratamiento térmico.	Determina la existencia de tratamiento térmico del material, si el valor adquirido es positivo, permite accesar y dar valores a los siguientes atributos. Templado.(U,S) Recocido.(U,S)
Medio de temple.-	Permite determinar el medio con el que fue templado el elemento. (agua, aceite, salmuera, etc.) (U,C) Templado con flama. (U,S) Cementado. (U,S) Nitrurado. (U,S)

Dureza- Adquiere el valor de la magnitud de la dureza, supuesto para las condiciones del elemento en la bibliografía.

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

Atributos:

- Tipo de falla.-** Permite identificar el mecanismo de falla. (deformación, fractura, desgaste, etc) (U,C)
- Crecimiento de la fractura.-** Permite identificar el crecimiento de la fractura. (unidireccional, bidireccional,etc.) (U,C)
- Existencia de una zona de deformación.-** Permite identificar una zona de deformación en la fractura. (U,S)
- Tipo de fractura.-** Permite identificar el mecanismo de fractura. (frágil, dúctil, fatiga) Para el caso de fatiga, relaciona el tipo de carga. (flexión bilateral, torsión, etc.) (U,M)
- Plano de fractura.-** Permite identificar el plano donde se generó la fractura, respecto al eje axial en el caso de ejes, (90°, 45°, helicoidal.) (U,C)
- Apariencia de la superficie de fractura.-** Determina la apariencia de la superficie de fractura. (brillosa, terrón de azúcar, áspera, etc.) (U,M)
- Textura de la superficie.-** Determina la textura de la superficie de fractura. (rugoso, liso, etc.) (U,M)
- Tamaño de la fractura.-** Permite determinar el tamaño de la fractura de forma cualitativa. (metros, pies, pulgadas, etc.) (U,C)
- Marcas en la superficie de fractura.-** Permite determinar la existencia de marcas existentes en la superficie de fractura. (chevron, playa) (U,C)

Tiempo de operación.- Permite cuantificar el tiempo en que el elemento estuvo en servicio. (U,N)

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

Atributos:

Temperatura.- Permite cuantificar la magnitud de la temperatura media en °C a la que operaba el elemento. (U,N)

Temperatura atmosférica.- Permite cuantificar la magnitud de la temperatura media en °C en el lugar donde operaba el elemento. (U,N)

Humedad relativa.- Permite determinar de forma cualitativa el nivel de humedad presente en el lugar de operación del elemento. (alto, medio, bajo.) (P,C)

Presencia de agentes corrosivos.- Permite seleccionar los distintos agentes corrosivos presentes en el medio de operación. (SO_x, NO_x, ácidos, etc.) (U,M)

Líquidos en contacto.- Permite determinar las sustancias líquidas que empapaban la pieza. (hidrocarburos, ácidos, agua, etc.) (U,M)

PH.- Permite determinar cualitativamente el pH presente en el medio de operación. (ácido, neutro, alcalino.) (U,C)

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

Atributos:

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

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

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

Atributos:

Material seleccionado para el diseño.-

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

Problema de diseño.-

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

Causas de la falla.-

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

Fatiga asociada a la carga.-

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

Tipo de carga A.E:

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

Fractura por fatiga.-

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

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

Atributo:

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

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

Atributos.-

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

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

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

Atributos:

Bronces- Permite clasificar el bronce (U,C)

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

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

4.4 ÁRBOL DE FALLAS

El árbol de fallas es un método gráfico que sirve para el análisis de confiabilidad de los sistemas de control y seguridad. La aplicación de éste permite evaluar la probabilidad de falla de un elemento y compararla con su magnitud teniendo como propósito principal identificar las posibles combinaciones de sucesos que concluirán en una falla de cierto tipo. Esta representación gráfica es utilizada para encontrar fallas en procesos y fue transportada hacia el análisis de falla para obtener una buena representación del conocimiento involucrado en la solución de los casos.

El Árbol generado para encontrar las causas que llevaron a las falla se presenta en la figura 4.6 , junto con el siguiente juego de estructuras de control:

Reglas para falla por fatiga

1. 1, 4(21)
2. 1, 8(31), 5(23,42), 4(21)
3. 1, 4(21), 2(16)
4. 1, 8(31), 4(21)
5. 1, 4(21), 2(17)
6. 1, 8(31), 5(23, 42), 4(21), 2(17)
7. 1, 4(21), 2(16, 17)
8. 1, 8(31), 4(21), 2(17)

Falla frágil

9. 1, 7(27), 3(19), 2(13)
10. 7(29), 3(20), 4(22)
11. 1, 2(15), 4(22), 2(13)
12. 1, 4(22), 2(13)
13. 1, 2(15, 13)
14. 1, 7(27), 3(19), 2(13), 11(39)
15. 1, 7(29), 3(20), 4(22), 11(39)
16. 1, 4(22), 2(15, 13), 11(39)
17. 1, 4(22), 2(13), 11(39)
18. 1, 2(15, 13), 11(39)

19. 1, 4(22), 2(15), 11(39)

20. 1, 4(22), 2(15)

Falla dúctil

21. 1, 2(12)

22. 1, 2(12, 13)

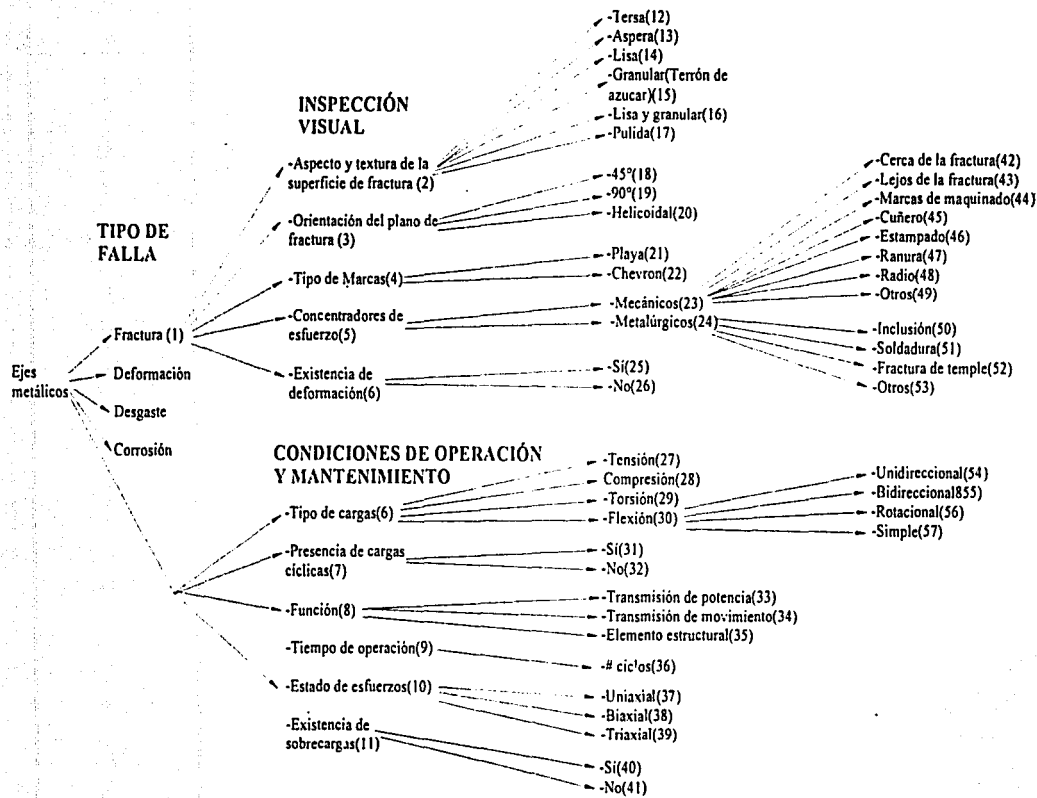
23. 1, 2(13, 12), 6(25)

24. 1, 6(21)

El árbol de fallas que se presenta no está expandido en su totalidad debido a la dificultad de poderlo presentar en una hoja tamaño carta, sin embargo mantiene sus características principales, así como todos los atributos que determinan directamente a un tipo de falla. Existen muchas otras reglas que no son citadas en esta parte por ser de carácter auxiliar, para determinar algún parámetro de utilidad o en beneficio de la programación. Una vez determinado el tipo de falla se escogen las siguientes pruebas a realizar.

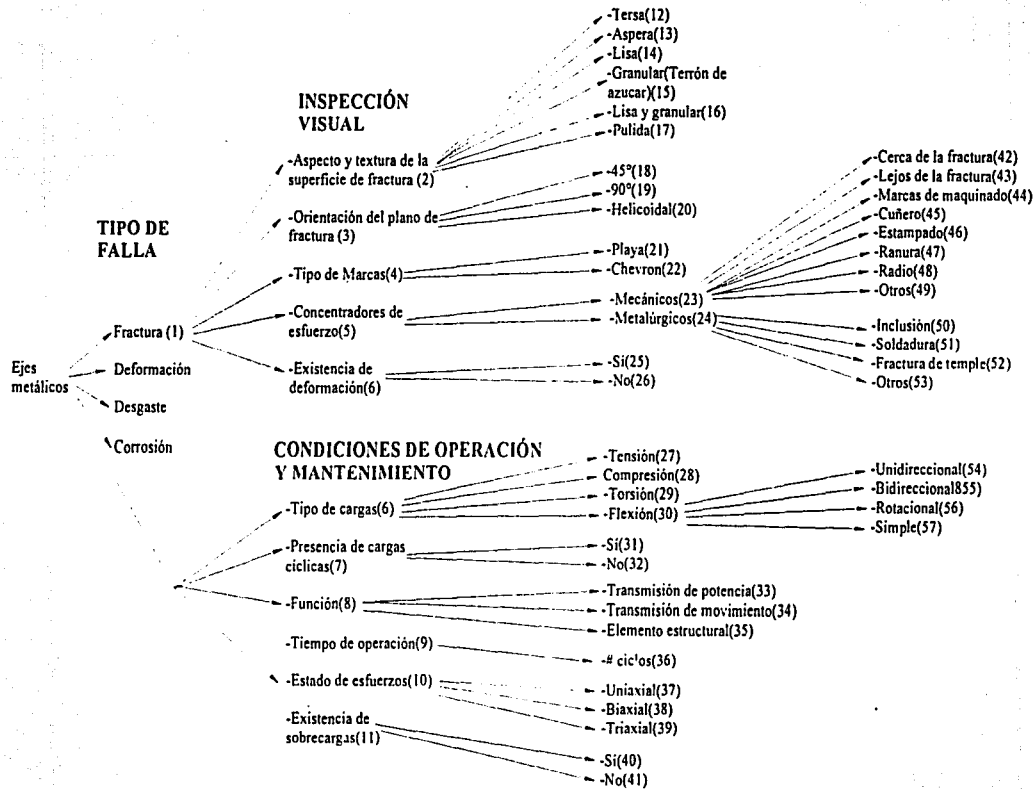
Pruebas sugeridas	Tipo de falla
<ul style="list-style-type: none"> - Microscopía a bajos aumentos. (<50X) - Metalografía - Medición de dureza 	Fatiga
<ul style="list-style-type: none"> - Medición de dureza - Microscopía a bajos aumentos. (<50X) 	Falla frágil
<ul style="list-style-type: none"> - Medición de dureza - Microscopía a bajos aumentos. (<50X) 	Falla dúctil

Figura 4.5 Pruebas mecánicas y microscopía relacionada al tipo de falla



TIPO DE FALLA

Figura 4.6 Árbol de fallas



TIPO DE FALLA

Figura 4.6 Árbol de fallas

Con el resultado de las pruebas realizadas al elemento aunado al tipo de falla, condiciones de operación, ambientales, etc. se determinan las causas que llevaron al elemento a falla con un cierto factor de confianza. El único caso en el que no se requiere conocer el tipo de falla para determinar las causas de ésta, es cuando exista un concentrador de esfuerzo por mal diseño y sobre este se encuentre la fractura, la conclusión será relacionada a problemas en el diseño.

Falla por fatiga

Para este caso se verificará el resultado de las pruebas de dureza respecto a los valores obtenidos en la literatura, en el caso de que no coincidan, se tomará en cuenta el tipo de microestructura procedente de la metalografía con la esperada, si nuevamente el resultado es negativo se deduce una falla en la manufactura, en caso de que la dureza y metalografía coincidan con los valores teóricos se volverá a preguntar acerca de la condiciones generales, inspección visual, etc. La inspección a bajos aumentos verificará la falla por fatiga cuando se encuentren características como marcas de llanta, zona de desprendimiento, corrimiento de fisuras, etc.

Para el caso en que el esfuerzo de cedencia teórico del material sea menor al esfuerzo máximo calculado para el eje (Capítulo III) se deducen fallas de diseño.

Para el caso en que el esfuerzo de cedencia teórico sea mucho mayor al esfuerzo máximo calculado y la microestructura y dureza coincida con las pruebas se deduce un problema de operación.

Falla frágil

En este caso se verificarán los resultados de las pruebas de dureza con la dureza teórica, cuando sean distintas se determinan problemas del material.

En cualquier otro caso se volverán a hacer las preguntas correspondientes a los módulos de inspección visual, condiciones de operación, etc. Y se volverá a plantear una hipótesis de falla.

Falla dúctil

Para este tipo de falla se tomará en cuenta el número de ciclos a los que el eje estuvo sometido, para el caso en que este número sea bajo se asocian problemas de material o manufactura, en el caso que el número de ciclos sea elevado se propone una sobrecarga en el elemento. Las pruebas sólo sirven para determinar con mayor certeza el tipo de falla.

CAPITULO V



Desarrollo del Prototipo

5.1 GENERALIDADES

En este capítulo se presenta el desarrollo de un prototipo del sistema experto para análisis de falla en ejes, este programa funcionará como parte de un sistema experto mayor que tendrá como objetivo el análisis de fallas varios elementos mecánicos como engranes, pernos, tuberías, etc. Por esta razón, el sistema está construido de forma modular, algunas partes de la interfase y de la base de conocimiento fueron realizadas pensando en un sistema global y existen otras más específicas que sólo funcionan para el análisis de ejes. Dentro del módulo de ejes existen distintos niveles de análisis, que son: inspección visual de la superficie de fractura, análisis de esfuerzos, conclusiones intermedias, segunda inspección visual y análisis de pruebas. Cabe destacar que el sistema se enfoca principalmente en la solución de fallas por fractura, siendo ésta la más común. Analizando la superficie de fractura se podrá conocer el mecanismo de falla, junto con las condiciones de operación y el estado general del eje se podrá crear una conclusión intermedia que después será comprobada o desechada mediante las pruebas mecánicas.

5.2 INTERFASE DE USUARIO

Para el buen funcionamiento del sistema experto para análisis de fallas en ejes se necesitaba una interfase en donde el usuario pudiera describir una gran cantidad de variables útiles para el sistema, así como la capacidad de mostrar imágenes, diagramas, esquemas y gráficos en general con el fin de facilitarle al usuario la comprensión de los términos empleados en el software. Por esta razón se escogió un lenguaje de programación visual que cumpliera con los requerimientos de comunicación con el "shell" mencionados en el capítulo IV. Visual Basic 6.0 es un lenguaje de programación orientado a eventos, el cual utiliza objetos sujetos a propiedades y métodos. Las propiedades son los datos que describen a un objeto, los eventos son hechos que pueden ocurrir sobre un evento y un método agrupa el código que se ejecuta en respuesta a ese evento.

Visual Basic 6.0

Visual Basic permite configurar su entorno bajo dos tipos de interfase: La interfase de un solo documento SDI (Singular Document Interface) o la interfase de múltiples documentos MDI (Multiple Document Interface). Con la primera opción todas las ventanas se pueden

mover libremente dentro de la pantalla, con la segunda, las ventanas secundarias quedarán confinadas dentro de una pantalla principal. Para el desarrollo del prototipo del sistema experto en análisis de fallas en ejes se optó por la interfase de múltiples documentos, siendo ésta capaz de soportar varios documentos abiertos simultáneamente en distintas ventanas independientes (figura 5.1), en donde se pueden desplegar gráficos, la ayuda del programa, módulos alternos, etc.

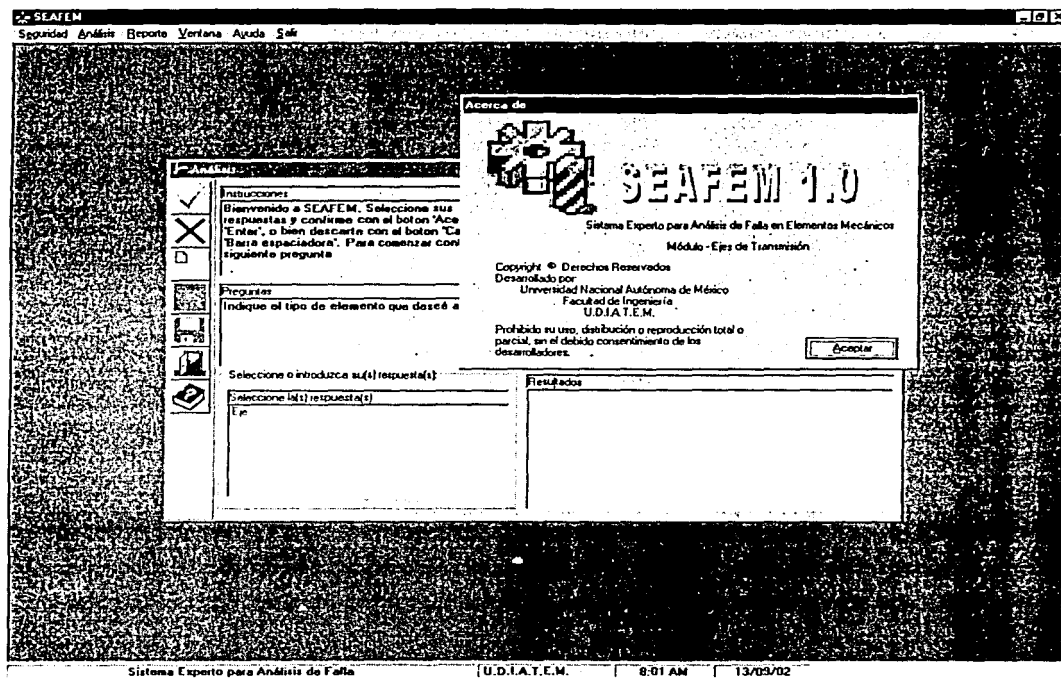


Figura 5.1 Interfase de múltiples documentos

Secuencia de operación de ventanas y formularios

Como se mencionó anteriormente el prototipo del sistema está constituido por varias partes y cada una de éstas está representada en la interfase por una ventana en donde se informa al usuario el nivel del análisis que se está realizando. El programa comienza con una pantalla

de presentación en donde se menciona la información general (figura 5.2) como, el nombre del sistema, el nombre del programa, la versión y el módulo correspondiente de ejes. El usuario tiene que oprimir el botón izquierdo para poder acceder a la siguiente ventana.

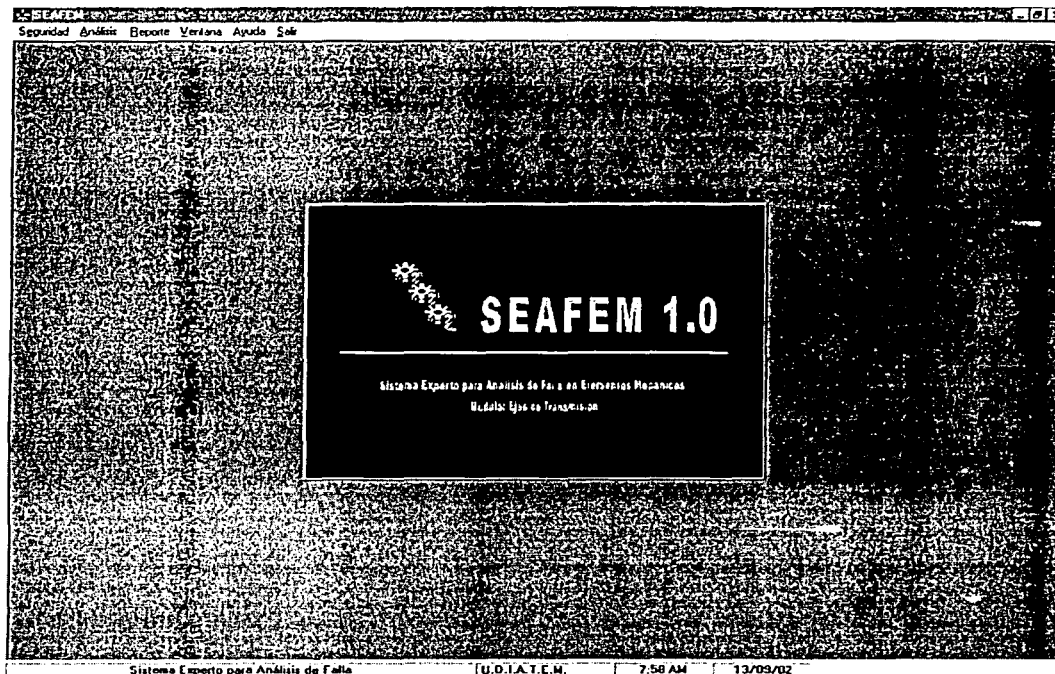


Figura 5.2 Pantalla de presentación

La siguiente ventana es el formulario principal o “madre” (figura 5.3) , el cual da cabida a todas las ventanas del sistema, en este formulario están las opciones primordiales del sistema que se encuentran en la parte superior de la pantalla, estas opciones incluyen una clave de seguridad para poder utilizar el sistema, el análisis para la solución de un caso, una base de casos resueltos, un módulo de ayuda , la impresión de reportes, una ventana de usos múltiples en donde se pueden guardar apuntes, imágenes, etc.

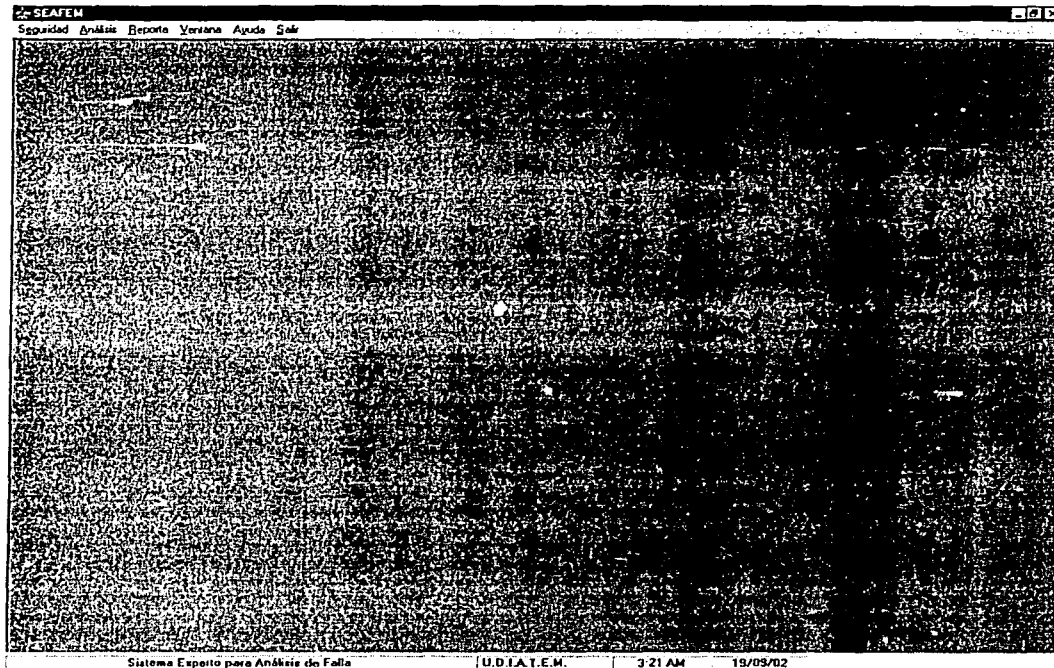


Figura 5.3 Formulario principal

Para proceder al análisis de un caso, es necesario oprimir el botón de análisis que se encuentra en la parte superior derecha del formulario madre y seleccionar “nuevo caso” del menú emergente que aparecerá abajo del botón, una vez realizada la operación, el sistema presentará un formulario general mostrado en la figura 5.4.

Características y objetos del formulario general

Este formulario está constituido por cinco ventanas y una serie de botones de control. La ventana superior izquierda contiene las instrucciones para el correcto llenado del formato al instante de cada pregunta o sección, la ventana intermedia del lado izquierdo contiene las preguntas realizadas por el sistema, la ventana inferior izquierda contiene una serie de posibles respuestas presentadas por el sistema, la ventana superior derecha contiene un historial que guarda las preguntas y respuestas correspondientes al caso analizado, esta ventana fue creada para que el usuario pueda observar de forma rápida las respuestas

introducidas al sistema así como para darle un seguimiento detallado al caso analizado. La ventana inferior izquierda presenta los resultados a los que el sistema concluya parcial o totalmente. En la parte izquierda del formulario se encuentra una serie de botones gráficos que dan acceso a los controles básicos de éste.

- El botón con el ícono de la paloma funciona para aceptar la selección realizada a las preguntas planteadas por el sistema, una vez que se acciona la interfase captura las respuestas y cambia la pregunta contestada por una nueva o hace el cambio hacia un nuevo módulo.
- El botón con el ícono del tache sirve para cancelar una selección de las respuestas ofrecidas por el sistema, al apretar este botón se le indica al sistema que no se desea aceptar ninguna de las respuestas y pasará a la siguiente pregunta.
- El botón con el ícono de la hoja de papel realiza una impresión del historial del caso analizado.
- El botón con el ícono del diskette permite guardar en disco duro o disco flexible.
- El botón con el ícono de la puerta sirve para salir del análisis al realizado momento, cerrando el formulario general y quedando sólo la interfase de múltiples documentos
- El botón con el ícono del libro sirve para consultar la ayuda acerca de las funciones del sistema así como información acerca del análisis de falla

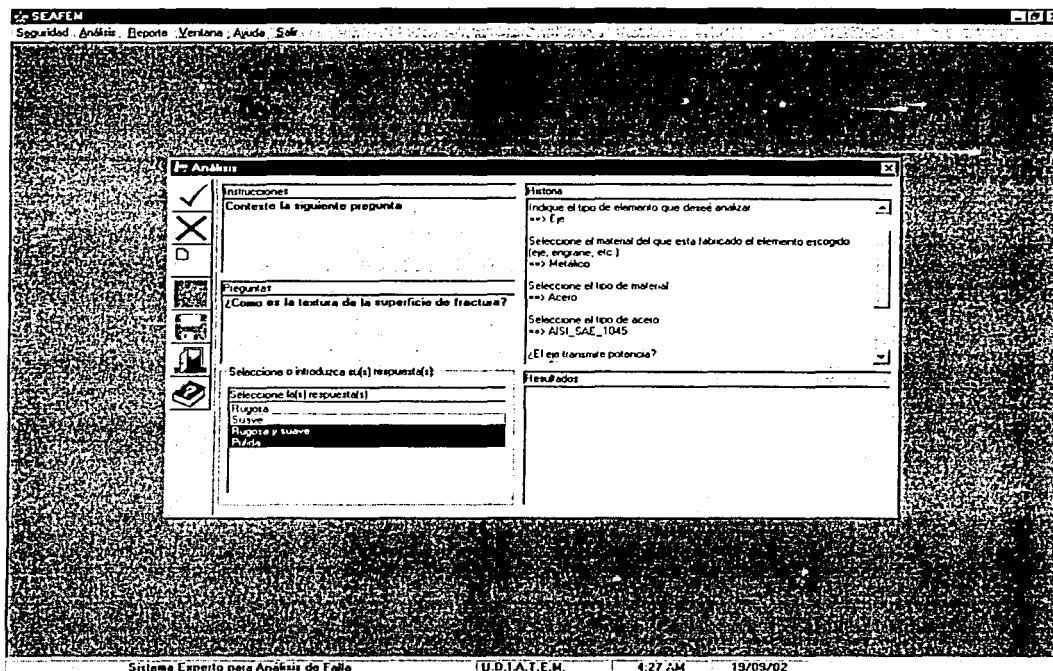


Figura 5.4 Formulario general

Sobre este formulario de uso general aparecen ventanas que ejemplifican algunos conceptos (figura 5.5) como superficies de fractura, marcas sobre la superficie, concentradores de esfuerzos, etc. Con la presencia de estos gráficos se pretende eliminar las ambigüedades en la descripción escrita de la geometría de los ejes, también son utilizados para corroborar la información que el usuario ha introducido al sistema, si el usuario definió las características de la superficie de fractura y el tipo de carga, se le presentarán distintas imágenes patrón de las superficies y el usuario deberá escoger la figura que más se parezca al elemento analizado, con este procedimiento el sistema hará una comparación de los datos introducidos con la figura seleccionada.

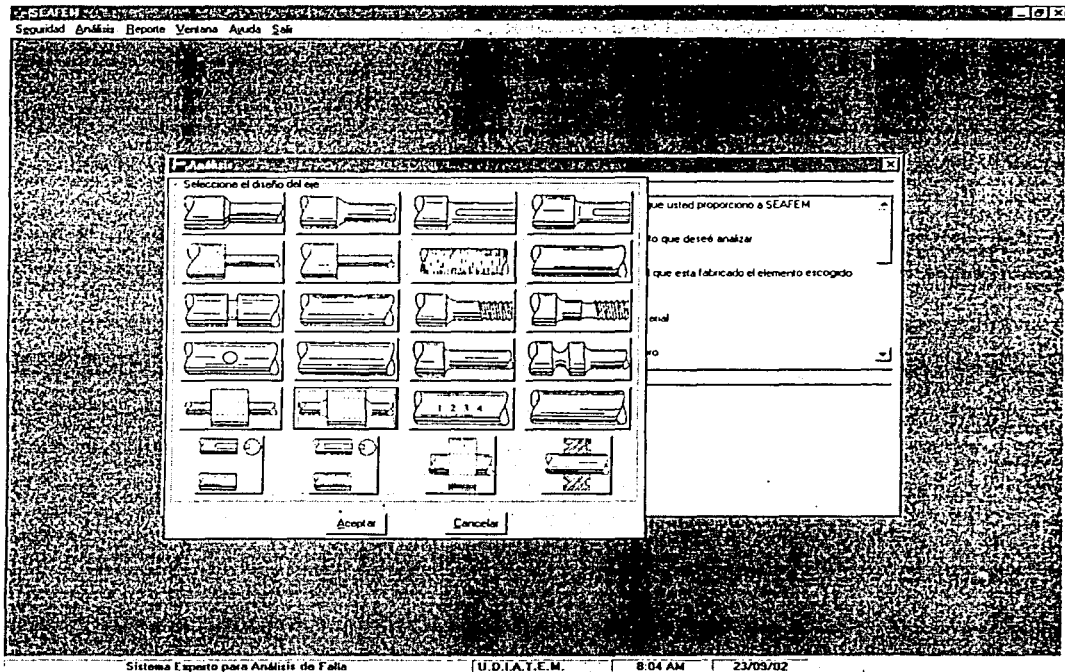


Figura 5.5 Ventana para “gráficos ejemplo”

Después de haber obtenido las primeras conclusiones intermedias que son acerca del mecanismo de falla por inspección visual, se realiza un análisis del elemento respecto a las cargas a las que estuvo sometido en condiciones normales de operación y como resultado se encuentran los esfuerzos máximos y los planos de orientación éstos.

Ventanas para el análisis de esfuerzos

La metodología para la detección de esfuerzos fue descrita en el tercer capítulo y la interfase desarrollada para éste está compuesta por dos ventanas presentada en la figura 5.6 y 5.7. La primera corresponde a los datos geométricos del eje (tipo de sección y diámetro), la velocidad en RPM y la potencia de entrada al eje en kW. La figura 5.7 contiene la forma donde se introducen los datos correspondientes a los elementos acoplados al eje y los apoyos, el formato de esta ventana es similar al de una hoja de cálculo, la primera columna se listan los elementos acoplados y les es asignado un código para su identificación, los caracteres y su significado se muestran en la tabla 5.1:

Tipo de elemento	Código
Engrane cilíndrico recto	E
Engrane cónico	EC
Polea o catarina	P/C
Apoyo	A

Tabla 5.1 Código para los elementos montados en el eje

Los apoyos no son elementos que estén acoplados al eje, pero es necesario denotarlos para conocer su ubicación en éste, las características asociadas a éstos serán cero a excepción de las distancias del eje de referencia y el diámetro correspondiente a la sección transversal.

En el primer renglón se encuentran las características y propiedades para cada uno de los elementos acoplados, estas son:

Potencia.- Indica la potencia transmitida por el elemento. [kW]

Entrada o salida (E/S).- Determina si la potencia entra al eje o sale de éste a través del elemento.

Distancia.- Es la distancia entre el origen del sistema de referencia para el análisis del eje y el elemento. [m]

Diámetro.- Indica el diámetro de la sección transversal del eje en donde se encuentra el elemento acoplado. [m]

Ángulo Theta.- Es el ángulo formado entre el eje "y" y los centros de los elementos acoplados de transmisión. [°]

Espesor.- Define el espesor de cada elemento. [m]

Material.- Indica el material del que está hecho el elemento.

Radio.- Es el radio del elemento acoplado, para el caso de engranes este es igual a la mitad del diámetro primitivo. [m]

Ángulo phi.- Es el ángulo entre la sección transversal y el eje de contacto entre dos engranes cónico, este puede ser 45 ó 135 [°]

Ángulo psi.- Es el ángulo para el envolvente en los dientes de los engranes. [°]

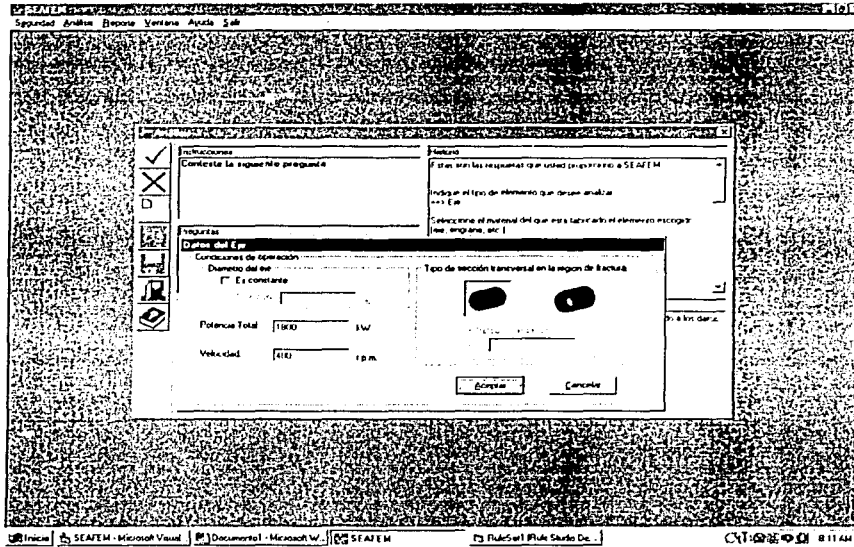


Figura 5.6 Ventana sobre datos generales geométricos y de sollicitación del eje

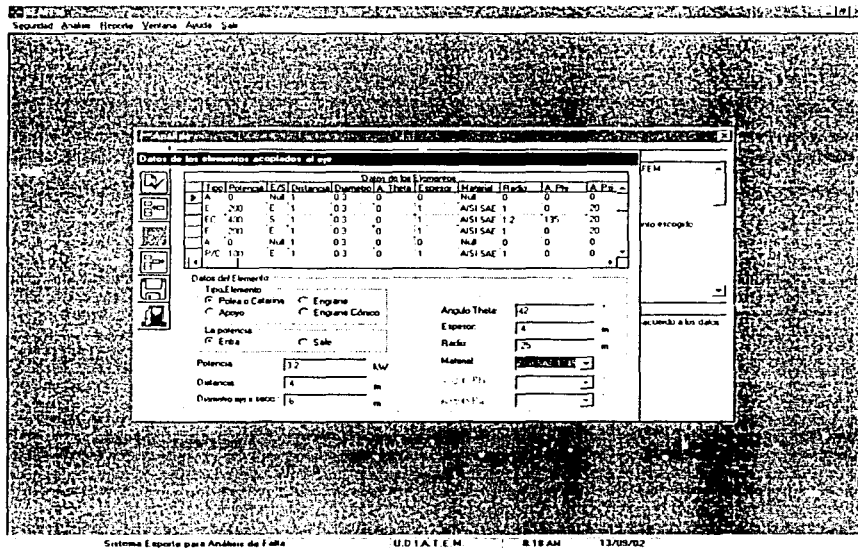


Figura 5.7 Ventana sobre características apoyos y elementos acoplados al eje

Los botones de control del formulario para las características del eje con los elementos acoplados son similares a los del formulario general, a excepción de un botón para dar de alta un nuevo elemento acoplado y otro para eliminarlo. Los esfuerzos máximos y los planos de orientación se presentan en la ventana de resultados del formulario general.

Ventanas para tutoriales y ayuda del sistema

El módulo de ayuda tiene como objetivo apoyar al usuario en las dudas respecto al funcionamiento del sistema, la información pedida y el correcto llenado de las formas sin recurrir a la documentación escrita del programa. Los tutoriales fueron creados para que el usuario pueda consultar temas sobre análisis de falla, éstos cuentan con un glosario de términos comunes, así como apuntes sobre el análisis de falla y un catálogo de los distintos tipos de fracturas..

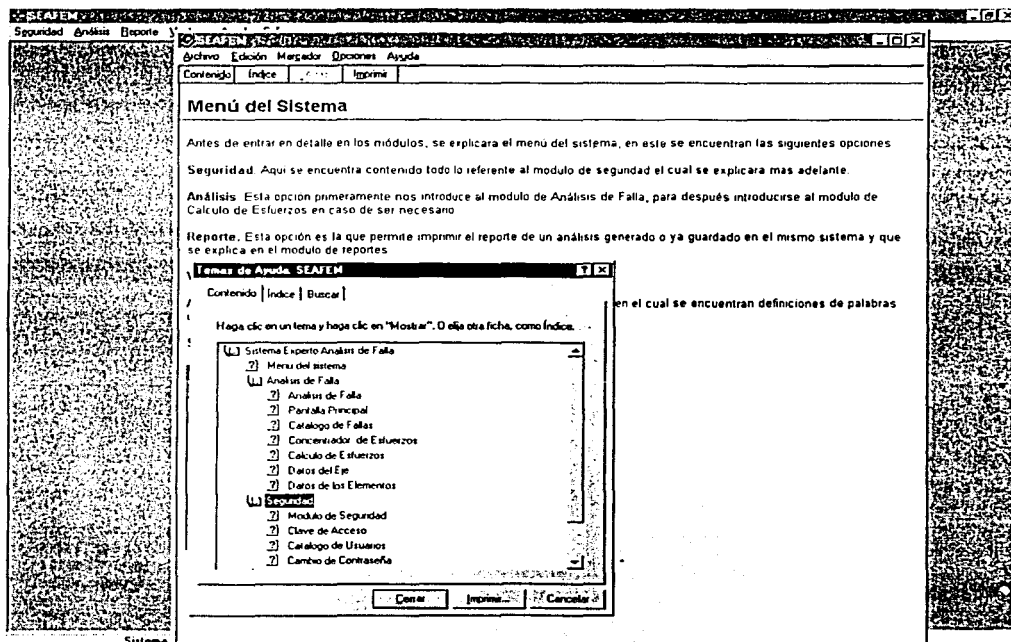


Figura 5.8 Ventana general para ayuda y titulares del sistema

5.3 BASE DE CONOCIMIENTO PARA EL MÓDULO DE EJES

La base de conocimiento para el módulo de ejes del sistema experto fue realizada en Visual Rule Studio, esta parte del programa contiene el juego de reglas que rige la toma de decisiones del sistema con el mecanismo de encadenamiento hacia atrás, las clases, atributos y propiedades de la base de conocimiento fueron determinadas en el capítulo IV. Esta sección tiene como objetivo mostrar las reglas creadas y los factores de confianza determinados para estas.

Clases propiedades y atributos en Visual Rule Studio

La base de conocimiento del sistema se encuentra en un archivo independiente al programa en Visual Basic, este archivo tiene el nombre de “módulo diseñadores” y es automáticamente abierto por el sistema en tiempo de diseño y de ejecución como un archivo de tipo Active X. Esta configuración fue elegida para facilitar el mantenimiento y la expansión de la base de conocimiento, permitiendo anexar o corregir reglas así como el resultado generado por éstas sin alterar el código en Visual Basic. En el apéndice “A” se presentan las clases, atributos y propiedades de los módulos generales y para ejes de la forma redactada en Visual Rule Studio, aunque éstas ya fueron presentadas en el capítulo IV. En el apéndice “A” se muestran con la representación tomada en el código con el propósito de una mejor comprensión para la exposición de las reglas creadas, el orden de estas clases y atributos es el mismo que en el capítulo IV.

Estructura de reglas generadas para el módulo de ejes

La estructura de reglas que rigen el sistema fueron creadas bajo un trabajo interdisciplinario de los expertos en análisis de fallas, ingenieros del conocimiento y programadores. De esta forma las premisas redactadas en la fase de representación del conocimiento fueron transferidas a código de Visual Rule Studio, las reglas están sujetas a un factor de confianza determinado por el grupo de expertos, este factor de confianza C.F. determina cuando una regla se dispara, es decir, cuando ésta tiene la capacidad de sustentar una conclusión o resultado. El valor mínimo del factor de confianza para que una regla se dispare es determinado por un periodo de pruebas realizado al sistema en donde se evalúan los

resultados obtenidos por éste, de tal forma que existirán algunas reglas que contengan factores de confianza demasiado bajos y que no determinarán conclusiones, la utilidad de estas reglas se presenta sólo en el periodo de evaluación de resultados, por lo que su presencia es obligatoria además de que el valor mínimo de disparo es variable, éste puede ser cambiado para casos más complejos en donde se requiera factores de confianza más elevados, este valor mínimo de disparo también es definido por los expertos.

Las reglas están presentadas en el apéndice "B" tal y cómo aparecen en el código de Visual Rule Studio, como la forma de encadenamiento ya fue presentada anteriormente, así como las clases y atributos, se puede entender fácilmente las conclusiones arrojadas por las premisas.

El primer módulo de reglas corresponde a la selección del elemento y material, éste es un módulo general para el Sistema experto en análisis de fallas en elementos mecánicos metálicos, determina el tipo de elemento que se desea analizar y el material del que el elemento está compuesto.

El segundo bloque de reglas sirve para determinar el tipo de falla que se presentó en el elemento. La fractura es el tipo de falla más común en ejes, de tal forma, este módulo sólo funciona para fracturas, posteriormente se expandirá la base de conocimiento hacia otros tipos de fallas, en esencia esta es la parte fundamental de la base de conocimiento en la fase de inspección visual y por ende es el módulo con mayor número de reglas. Como parte de este módulo se encuentra un grupo de reglas que sirve para corroborar el tipo de carga y fractura, este grupo también contiene reglas que determinan las conclusiones intermedias.

El tercer bloque de reglas tiene como función recomendar las pruebas mecánicas necesarias para elevar el nivel de confianza de las conclusiones realizadas por el sistema o para descartarlas, por esta razón, el resultado de las pruebas mecánicas es fundamental para que el sistema pueda mostrar las conclusiones en pantalla.

El cuarto bloque de reglas sirve para asignar la dureza a los materiales respecto a sus propiedades teóricas y poder hacer comparaciones de estos datos con los obtenidos en el laboratorio.

El prototipo del Sistema Experto para análisis de fallas en ejes funciona como una herramienta útil en la detección de los distintos tipos de fractura, crea conclusiones intermedias de las causas que llevaron a la falla y recomienda las pruebas necesarias para validar con certeza las conclusiones intermedias.

Los resultados del sistema dependen directamente de la capacidad de observación del usuario aunque existen preguntas cruzadas que permiten descalificar cierta información que resulte contradictoria. El sistema demanda usuarios con conocimientos básicos de mecánica o experiencia en ejes de transmisión, esto es debido a que se hacen preguntas referentes a las características de diseño, a la superficie de fractura, a las condiciones de operación y otros parámetros que sólo pueden ser identificados con dicha preparación.

El Sistema fue concebido como parte de un Sistema global, de tal forma que existirá un módulo por cada elemento mecánico que pueda ser analizado por éste. Con el desarrollo del primer módulo para ejes de transmisión fue adquirida cierta experiencia que será de utilidad en la construcción de nuevos módulos.

El Árbol de fallas es la parte fundamental de la base de conocimiento del Sistema pues contiene el juego de reglas de decisión que trabajará directamente con la máquina de inferencia. Una vez generado el árbol de fallas para un nuevo elemento mecánico sólo será necesario transcribirlo a lenguaje código para su implementación en el sistema.

La máquina de inferencia funciona de manera independiente a la interfase de modo que la base de conocimiento puede ser expandida en el futuro sin alterar el código realizado para la interfase, de igual forma facilita el periodo de pruebas puesto que no es necesario correr el programa completo para detectar los distintos problemas que puedan presentarse respecto al juego de reglas.

El análisis de falla resultó ser un campo propicio para el desarrollo e implementación de un sistema experto debido a las características del conocimiento involucrado en la solución de los casos.

El sistema experto funciona de forma didáctica para poder instruir a nuevos usuarios en el tema del análisis de falla debido a que es una herramienta interactiva, en donde el sistema hace preguntas que tendrán que ser contestadas por el usuario.

El análisis de un eje no durará más de treinta minutos si se cuenta con la información necesaria, puesto que las preguntas se refieren en su mayoría a la inspección visual y detallada del elemento, a las condiciones ambientales y de operación en las que trabajó y al material del que está compuesto. Después de haber realizado el análisis y haber conocido la recomendación de pruebas, el caso analizado puede ser guardado en una base de datos de donde puede ser seleccionado cuando se conozcan los resultados de las pruebas.

F a l t a

P á g i n a

89 |

APENDICE A

Clases y Atributos del Sistema

With Feature_Is_Near Simple

With Design Compound

Good,
Bad,
DontCare

With Cyclic_load Simple

!XX
!XX
!XX

Class Material_Info

With Materials Compound

Steel,
Bronze

!encontrar clase de material
With MaterialFound Simple

!XX
!XX
!XX

Class Rec

With Recomendation String

With Other Simple

!XX
!XX
!XX

Class Failure

With FClass Multicompound

Crack
!
Corrosion,
!
WearingOut,
!
Deformation

With Type Multicompound

Brittle,
Ductile,
Fatigue

With Failure_Plane_Apparence Compound

Planar,
_45deg,
Helical

With Failure_Surface_Apparence Multicompound

Soft,
Brigthness,
Coarse,
Sugar_Cube

With Failure_Surface_Texture Multicompound

Wrinkled,
Smooth,
Both,
Polished

With Surface_Marks Compound

Chevron,
Beach

With Deformation_zone Simple

!XX
!XX
!XX

Class Environment

With Work_Temperature Compound

_minus50deg,
_more50deg

!XX
!XX
!XX

Class Shafts

!atributo para conocer si el eje transmmite potencia

With Power_transmissions Simple

With FunctionFound Simple

!XX
!XX
!XX

Class IntermediateConclusions

With Mat_ElemFound Simple

With LoadType Compound
Tension,
Torsion,
Unidirectional_Bending,
Bidirectional_Bending,
Rotational_Bending

With FatigueFailure Simple

With Design Simple

With Element Compound
Shaft

!XX
!XX
!XX
!

Class Steels

! tipos de aceros

With Type Compound

AISI_SAE_1020,
AISI_SAE_1045,
AISI_SAE_1345,
AISI_SAE_4340,
AISI_SAE_4620,
AISI_SAE_8620,
AISI_SAE_4145,
ASTM_A36,
ASTM_A131,
ASTM_A283,
ASTM_A573,
ASTM_A678,
ASTM_A529

With Hardness Compound

High,
Medium,

Low

!XX
!XX
!XX
!

Class Bronzes

With Type Compound

- SAE CA836,
- SAE CA838,
- SAE CA852,
- SAE CA854,
- SAE CA858,
- SAE CA878,
- SAE CA879,
- SAE CA862,
- SAE CA863,
- SAE CA865,
- SAE CA872,
- SAE CA874,
- SAE CA875

!XX
!XX
!XX
!

Class Failure_VisualInformation

With VBrittle Simple

With VFatigue Simple
With VDuctile Simple

Class Feature

With Type Compound
Mechanical,
Metallurgist

APENDICE B



Reglas del Sistema

! 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_Apparence Of Failure Is Sugar_Cube
And StressField Of Part Is Triaxial
Then Failure.Type Is Brittle Cf 50
And Failure_VisualInformation.VBrittle Cf 50

Rule 13

If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Surface_Marks Of Failure Is Chevron
And Failure_Surface_Apparence Of Failure Is Sugar_Cube
Then Failure.Type Is Brittle Cf 50
And Failure_VisualInformation.VBrittle Cf 50

Rule 14

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 15

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 16

If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Surface_Marks Of Failure Is Beach
Then Failure.Type Is Fatigue Cf 60
And Failure_VisualInformation.VFatigue Cf 60

!

Rule 17

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 18

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 19

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 20

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 80
And Failure_VisualInformation.VFatigue Cf 80

!

Rule 21

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 22

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 23

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 24

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 25

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 26

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 27

If IntermediateConclusions.Element Is Shaft
And Deformation_zone Of Failure
Then Failure.Type Is Ductile Cf 80
And Failure_VisualInformation.VDuctile Cf 80

!

!

! =====
!
Rule 28
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 29
If Type Of Failure Is Fatigue
And PracticeLoadType Of Part Is Tension
And FatigueFailure Of IntermediateConclusions
And TheoristLoadType Of Part Is Tension
Then IntermediateConclusions.LoadType Is Tension

Rule 30
If Type Of Failure Is Fatigue
And PracticeLoadType Of Part Is Unidirectional_Bending
And FatigueFailure Of IntermediateConclusions
And TheoristLoadType Of Part Is Unidirectional_Bending
Then IntermediateConclusions.LoadType Is Unidirectional_Bending
!

Rule 31
If Type Of Failure Is Fatigue
And PracticeLoadType Of Part Is Bending
And FatigueFailure Of IntermediateConclusions
And TheoristLoadType Of Part Is Unidirectional_Bending
Then IntermediateConclusions.LoadType Is Unidirectional_Bending
!

Rule 32
If Type Of Failure Is Fatigue
And PracticeLoadType Of Part Is Bidirectional_Bending
And FatigueFailure Of IntermediateConclusions
And TheoristLoadType Of Part Is Bidirectional_Bending
Then IntermediateConclusions.LoadType Is Bidirectional_Bending
!

Rule 33
If Type Of Failure Is Fatigue
And PracticeLoadType Of Part Is Bending
And FatigueFailure Of IntermediateConclusions
And TheoristLoadType Of Part Is Bidirectional_Bending
Then IntermediateConclusions.LoadType Is Bidirectional_Bending
!

Rule 34

If Type Of Failure Is Fatigue
And PracticeLoadType Of Part Is Rotational_Bending
And FatigueFailure Of IntermediateConclusions
And TheoristLoadType Of Part Is Rotational_Bending
Then IntermediateConclusions.LoadType Is Rotational_Bending
!

Rule 35

If Type Of Failure Is Fatigue
And PracticeLoadType Of Part Is Bending
And FatigueFailure Of IntermediateConclusions
And TheoristLoadType Of Part Is Rotational_Bending
Then IntermediateConclusions.LoadType Is Rotational_Bending
!

Rule 36

If Type Of Failure Is Fatigue
And PracticeLoadType Of Part Is Torsion
And FatigueFailure Of IntermediateConclusions
And TheoristLoadType Of Part Is Torsion
Then IntermediateConclusions.LoadType Is Torsion
!

Rule 37

If Design Of Part Is Good
Then IntermediateConclusions.Design
!

Rule 38

If Design Of Part Is Bad
Then IntermediateConclusions.Design
!

Rule 39

If Design Of Part Is DontCare
Then IntermediateConclusions.Design
!

Rule 40

If VFatigue Of Failure_VisualInformation
And Conf(Failure_VisualInformation.VFatigue) >=
Conf(Failure_VisualInformation.VBrittle)
And Conf(Failure_VisualInformation.VFatigue) >=
Conf(Failure_VisualInformation.VDuctile)
And Heterogeneity Of Part
And Type Of Feature Is Mechanical
Or Type Of Feature Is Metallurgist
Then Rec.Recomendation := "Optic Microscopy, low increase 50x <"
Else Rec.Other
!

Rule 41

```

If VBrittle Of Failure_VisualInformation
And Conf(Failure_VisualInformation.VBrittle) >=
Conf(Failure_VisualInformation.VFatigue)
And Conf(Failure_VisualInformation.VBrittle) >=
Conf(Failure_VisualInformation.VDuctile)
And Work_Temperature Of Environment Is _minus50deg
Then Rec.Recomendation := "Optic Microscopy, low increase 50x < and Hardness"
Else Rec.Other
!

```

Rule 42

```

If VDuctile Of Failure_VisualInformation
And Conf(Failure_VisualInformation.VDuctile) >=
Conf(Failure_VisualInformation.VBrittle)
And Conf(Failure_VisualInformation.VDuctile) >=
Conf(Failure_VisualInformation.VFatigue)
And Hardness Of Steels Is High
Or Hardness Of Steels Is Medium
Then Rec.Recomendation := "Chemical analysis and Hardness"
Else Rec.Other
!

```

Rule 43

```

If VDuctile Of Failure_VisualInformation
And Conf(Failure_VisualInformation.VDuctile) >=
Conf(Failure_VisualInformation.VBrittle)
And Conf(Failure_VisualInformation.VDuctile) >=
Conf(Failure_VisualInformation.VFatigue)
And Hardness Of Steels Is Low
Then Rec.Recomendation := "Hardness"
Else Rec.Other
!

```

Rule 44

```

If Other Of Rec
And VFatigue Of Failure_VisualInformation
Then Rec.Recomendation := "Optic Microscopy, low increase 50x <"
!

```

Rule 45

```

If Other Of Rec
And VDuctile Of Failure_VisualInformation
Then Rec.Recomendation := "Chemical analysis and Hardness"
!

```


Rule 46

If Other Of Rec

And VBrittle Of Failure_VisualInformation

Then Rec.Recomendation := "Optic Microscopy, low increase 50x < and Hardness"

!

!

!

!reglas para determinar la dureza del material

!

!

Rule 47

If 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_A283

Or Type Of Steels Is ASTM_A573

Or Type Of Steels Is ASTM_A678

Or Type Of Steels Is ASTM_A529

Or Type Of Steels Is AISI_SAE_4340

Then Steels.Hardness Is High

!

Rule 48

If Type Of Steels Is AISI_SAE_1345

Or Type Of Steels Is ASTM_A36

Or Type Of Steels Is ASTM_A131

Then Steels.Hardness Is Medium

!

Rule 49

If Type Of Steels Is AISI_SAE_1045

Then Steels.Hardness Is Low

!

!

End

BIBLIOGRAFÍA

Libros

1. Adedeji B. Expert Systems Applications in Engineering and Manufacturing. Ed. Prentice Hall, 1991
2. Failure Analysis and Prevention Metals Handbook Vol. X American Society for Metals, 1987
3. Norton R. Machine Elements Design. Prentice Hall, 1996
4. Cazaud R. La fatiga de los metales. Ed. Aguilar, 1957
5. Askeland D. Science and Engineering of Materials. Wadsworth incorporated, 1993
6. Giarratano J. Expert Systems. PWS Publishing, 1998
7. Cerrud S. "Propuesta de Metodología para Análisis de Falla en Elementos Mecánicos Metálicos" Tesis, Posgrado de Ingeniería, 2002
8. Lai M. Rubin D. Kempl E. Introduction to Continuum Mechanics. Bulterworth-Heineman, 1997
9. Levi E. Elementos de Mecánica del Medio Continuo. Limusa, 1996
10. Beer F. Johnston E. Dewolf J. Mechanics of Materials. Mc Graw Hill, 1997
11. Dieter. Engineering Design. McGraw Hill, 1991
12. Visual Rule Studio. Developers Guide Rules Machine Corporation, 1998
13. Microsoft Visual Basic 6.0. Programmer`s Guide. Microsoft Press, 1998
14. Diccionario de la Real Academia Española, Ed. 2001. www.rae.es

Artículos

15. Graham-Jones, Mellor B. Expert & Knowledge Based Systems in Failure Analysis. Part of the Engineering Materials Failures Series. Southampton University U.K. 1997
16. Graham-Jones, Mellor B. Expert Systems. Part of the Engineering Materials Failures Series. Southampton University U.K. 1997
17. Cerrud S. Márquez E. Jacobo V.H. Quiroz H., Adquisición y representación del conocimiento en un sistema experto en análisis de falla. Memorias del VI Congreso anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Colima, Colima octubre 2000
18. Walton H. W. Failures diagnostics- Applications of expert systems. Proceedings of the International Conference on Failure Analysis, 1991
19. Cerrud S. Márquez E. Jacobo V.H. Ortiz P. Propuesta para el desarrollo de un sistema experto para análisis de falla de elementos mecánicos metálicos. Memorias del IV Congreso anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Ciudad Juárez Chih. octubre 1998