



01190
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

SISTEMA EXPERTO PARA ANÁLISIS
DE FALLA DE ELEMENTOS
MECÁNICOS METÁLICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

P R E S E N T A:

VÍCTOR HUGO JACOBO ARMENDÁRIZ



DIRECTORES DE TESIS

DR. JOSÉ JESÚS ACOSTA FLORES
DR. ARMANDO ORTIZ PRADO

CD. UNIVERSITARIA

JUNIO 2005

m. 345217



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Prólogo

Los expertos en áreas especializadas del conocimiento son escasos. En análisis de falla (AF) ésta no es la excepción, ya que los profesionales expertos en el área se encuentran principalmente en centros de desarrollo tecnológico, institutos de investigación, empresas de consultoría en materiales y manufactura, y en algunas universidades. En México existen centros de desarrollo como el CIATEQ, CIDESI y Universidades como la UNAM, en donde la industria puede obtener apoyo en dicha área. Sin embargo, la demanda de estos servicios no es cubierta en su totalidad ya que existe un amplio sector de la industria que lo requiere. Por consecuencia es necesario contar con una mayor cantidad de expertos. Este proyecto se enfocó a brindar respuesta a la necesidad descrita, a través del diseño y desarrollo de un sistema experto para resolver problemas convencionales de AF de elementos mecánicos metálicos, con una orientación a la capacitación tanto en la academia como en la industria.

En la revisión de la literatura se encontraron desarrollos orientados a la solución de problemas de AF mediante inteligencia artificial. En el caso específico de fallas en elementos mecánicos, existen algunos sistemas que no han sido comercializados y solo se han empleado para educación e investigación. Los sistemas más importantes se han construido usando la técnica de razonamiento basado en casos (RBC); Liao *et al* de la Universidad de Louisiana, elaboraron un sistema para la identificación de mecanismos de falla; Graham-Jones y Mellor de la Universidad de Southampton presentan un sistema orientado a resolver problemas para elementos mecánicos que permite realizar AF antes y después de la ocurrencia del problema; por su parte Roberge *et al*, desarrollaron un sistema específico para fallas por corrosión.

Asimismo, se identificaron sistemas expertos para áreas específicas de AF tales como; análisis fractográfico, fallas en rodamientos, diagnóstico de fallas de operación en motores de combustión interna, mecánica de la fractura, fallas en concreto, interpretación de ensayos no destructivos, diagnóstico de defectos en neumáticos, AF para selección de materiales, fallas en soldaduras, análisis de desgaste por partículas, etc.

Los sistemas inteligentes más importantes coinciden en el empleo de RBC, en lugar del uso de reglas de decisión. La razón de uso de RBC es que facilita la construcción del sistema, pero se tiene una menor confiabilidad que los sistemas basados en reglas (SBR). Por otro lado, los SBR son más complejos para su desarrollo pero se tienen resultados más aproximados. Para el caso en estudio, en la búsqueda de elevar la confiabilidad de las soluciones a los problemas de fallas, se definió que el sistema a desarrollar debería ser de tipo híbrido, con procesos de solución mediante RBC y reglas deductivas.

Lo novedoso del sistema desarrollado es que soluciona los problemas de fallas a través del uso de reglas, una vez que se encuentra la solución se cuenta con una base de casos a la que el usuario puede acceder para validar las conclusiones obtenidas mediante reglas o a la inversa. En la solución de casos actúa como un colega, lo que permite que el usuario (ingeniero o estudiante de ingeniería mecánica), con un nivel de conocimientos básicos de ciencia de materiales, metalurgia física y mecánica, incremente paulatinamente su nivel de experiencia al utilizar gradualmente el sistema. El programa funciona en forma interactiva, plantea preguntas que tendrán que ser

contestadas por el usuario y lo encamina hacia la solución del problema. Al manejar dos métodos de razonamiento (basado en reglas y basado en casos), presenta una ventaja respecto de otros anteriormente desarrollados, ya que permite al usuario por un lado utilizar y ejercitar sus procesos de razonamiento deductivo y por otro el manejo de información estructurada en bases de datos. Lo cual es un proceso similar al que realiza un experto ya que éste por un lado establece un proceso metodológico en la solución del problema, y por otro utiliza el conocimiento de otros casos que ha resuelto o que se reportan en la literatura.

La metodología de la investigación en forma resumida consistió en:

- a. Análisis de factibilidad
- b. Determinación de los enfoques de los grupos de investigación que han desarrollado o se encuentran trabajando en sistemas similares
- c. Determinación del estado del arte de los sistemas expertos y de AF
- d. Capacitación en las metodologías para la adquisición y representación del conocimiento
- e. Integración del grupo de expertos y definición del experto líder
- f. Determinación de las características de operación
- g. Definición de estrategias para la obtención de información
- h. Selección del *shell*
- i. Desarrollo del un primer prototipo del SBR
- j. Identificación de los inconvenientes en el modelado del conocimiento de los expertos
- k. Integración de las bases de conocimientos a partir de la información obtenida de los expertos y de la literatura.
- l. Construcción del prototipo funcional de la base de conocimientos del subsistema de RBC
- m. Integración de ambos sistemas (RBR y RBC)
- n. Validación del sistema a través de la solución de problemas de campo (problemas que habían sido ya resueltos por el grupo de trabajo).

Un punto relevante de este trabajo es la definición de una metodología para la integración del sistema experto. En este sentido, se planteó una estructura que permite desarrollar paso a paso, sobre la base del sistema global, los diferentes módulos (ejes, engranes, rodamientos, etc) que integrarán el programa. Asimismo, dentro del ambiente se facilita la incorporación de otros módulos auxiliares tales como análisis de esfuerzos, de deterioro ambiental, de imágenes, entre otros. Las experiencias obtenidas en el desarrollo del subsistema de ejes ha permitido que los módulos restantes se desarrollen más fácilmente, lo cual traza el camino a seguir para la construcción futura de un metasistema experto en AF.

Con este proyecto, se ha logrado generar, en la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales de la Facultad de Ingeniería UNAM, una línea de trabajo en torno al desarrollo de sistemas inteligentes para AF de elementos mecánicos. Siendo pioneros en el desarrollo de este tipo de sistemas en la UNAM y en México.

El trabajo escrito se ha estructurado en 7 capítulos. En su primera parte (Capítulos 1 a 3) se presenta el marco teórico donde se incluyen los antecedentes, objetivos, hipótesis, conceptos, técnicas, metodologías y estado del arte de sistemas expertos y análisis de falla. En la segunda parte (capítulos 4 y 5) se describe el diseño y metodología para el desarrollo del sistema y se presentan la forma de construcción y operación de los subsistemas de ejes y de RBC. En la

tercera parte del reporte (capítulos 6 y 7) corresponde a la solución de casos, análisis de los resultados, conclusiones y recomendaciones.

En síntesis este proyecto ha permitido:

1. Consolidar una línea de investigación pionera en México
2. Definir una metodología para desarrollar sistemas expertos de cualquier tipo de elemento mecánico
3. Desarrollar un sistema híbrido con dos modos de razonamientos: basado en reglas y en casos. Hasta el momento de escribir este reporte en ningún otro caso se han conjugado los dos sistemas
4. Sentar las bases para la construcción de un metasistema experto en AF
5. Extender la aplicación de los sistemas expertos hacia otros campos de la ingeniería mecánica

Finalmente debo agradecer a quienes de alguna u otra manera con su apoyo hicieron posible el desarrollo de este trabajo, resaltando que sin su valiosa ayuda no se hubiera logrado llegar hasta su conclusión. En primer instancia debo reconocer la guía que durante 14 años he tenido de parte del Profesor Armando Ortiz Prado quien me ha exhortado a superarme y ha brindado su asesoría desde el inicio de este proyecto, lo cual ha sido invaluable, pero lo más importante es que siempre lo he tenido como amigo. Mención especial merece la Maestra Sara Mercedes Cerrud Sánchez, quien siempre me impulso a lo largo de mi carrera profesional, haciéndome notar mis deficiencias e instigando a que las superará, en el inicio de este proyecto ella fue la líder, desarrolló una metodología para la construcción del sistema y me involucró como participante, pasándome la estafeta para continuar con la conclusión de este trabajo que sienta las bases para el desarrollo de un metasistema experto. Lamentablemente nuestra querida Sarita no podrá estar en presencia física y espero que su esencia siempre nos acompañe, faltarían palabras para agradecerle todo lo que hizo por mi, y por limitaciones propias de un prólogo solo brindo este breve atisbo a lo sublime.

Este proyecto siempre ha sido un trabajo de equipo, el escrito que presento es la síntesis de cientos de horas que incluyen investigación, programación, discusiones, elaboración y obtención de imágenes, amén del tiempo que se ha dedicado a escribir no solo esta tesis si no las diferentes publicaciones que se han generado y que se indican en el apartado de publicaciones, proyectos y estancias de investigación; en donde también se plasman las estancias de investigación en que participe y el apoyo económico de parte de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM a través de los proyectos PAPPIT IN105198 e IN105902.

Agradezco entonces el apoyo técnico de mis compañeros Germán Álvarez, Efraín Ramos, Ignacio Cueva y Jorge Romero; las observaciones de Rafael Schouwenaars; el valioso trabajo desempeñado por los estudiantes y tesistas de licenciatura Héctor Quiroz, Marco Ramírez, Alberto Hernández y Oscar García.

Le doy las gracias al Dr. Yvan Houbaert Director del Departamento de Metalurgia y Ciencia de Materiales de la Universidad de Gante por sus ideas y apoyo durante las dos estancias que tuve con el grupo de expertos en análisis de falla de su laboratorio a los que hago extensivo mi agradecimiento.

Por otro lado, destaco la ayuda brindada por el Dr. José Jesús Acosta Flores que con sus comentarios siempre acertados me orientó y asesoró en este trabajo. Agradezco las sugerencias, consejos y directrices planteadas por los otros miembros de mi comité tutorial, los Drs. Arturo Barba Pingarrón, Jorge Carrera Bolaños, Arcadio Gamboa Medina, Marcelo López Parra y Marco Antonio Murray Lasso; mencionados en riguroso orden alfabético.

Para terminar debo agradecer a mi esposa Rosa María, mi bebe Rosita, mi madre, mi padre, hermanos y amigos, por la paciencia y comprensión que han tenido cuando he dedicado varios fines de semana a la escritura restando tiempo a la convivencia con ellos.

Ciudad Universitaria, D.F. junio del 2005

Víctor Hugo Jacobo Armendáriz

Índice

Prólogo	i
Índice	v
Índice de Figuras	vii
Índice de Tablas y cuadros	x
Publicaciones, Proyectos y Estancias	xii
Definición de Términos	xiv
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos e hipótesis	3
1.3 Organización del trabajo	4
CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE FALLA	
2.1 Generalidades	6
2.2 Definición de Falla	8
2.3 Causas de Falla en Materiales Metálicos	11
2.4 Mecanismos de Falla sus Tipos y Características	15
2.5 Metodología del Análisis de Falla	21
2.6 Herramientas y Técnicas Auxiliares del Análisis de Falla	26
2.7 Técnicas y Métodos para la Representación Formal del Conocimiento en Análisis de Falla	28
2.8 Análisis Sistemático de Fallas en Ejes	30
2.8.1 Tipos de Fallas en Ejes	30
2.8.2 Fallas por Fractura	30
2.8.3 Fallas por Deformación	39
2.8.4 Fallas por Desgaste	39
2.8.5 Fallas por Corrosión	40
2.8.6 Análisis del Estado de Esfuerzos	41
2.8.7 Fuentes de Fallas en Ejes	41
CAPÍTULO 3. SISTEMAS EXPERTOS	
3.1 Conceptos Teóricos	44
3.2 Metodología para el Desarrollo de Sistemas Expertos	50
3.3 Sistemas Basados en Reglas	52
3.4 Razonamiento Basado en Casos	56
3.5 Razonamiento Bajo Incertidumbre	59
3.6 Sistemas Inteligentes para Análisis de Falla	61
3.7 Potencial de los Sistemas Expertos en la Enseñanza del Análisis de Falla	65
CAPÍTULO 4. DISEÑO DEL SISTEMA Y METODOLOGÍA	
4.1 Metodología de la Investigación	68
4.2 Análisis de Factibilidad para el Desarrollo del Sistema	70
4.3 Diseño de la Estructura del Sistema y Características de Operación	72
4.4 Integración del Grupo de Expertos en Análisis de Falla	75

4.5	Desarrollo del Ingeniero del Conocimiento	78
4.6	Adquisición del Conocimiento	78
4.7	Representación del Conocimiento	80
4.8	Selección del <i>Shell</i> y de la Plataforma de Desarrollo	84
4.9	Estructuración de la Base de Conocimientos	87
4.10	Determinación de la Secuencia de Operación	92
4.11	Desarrollo del Prototipo	93

CAPÍTULO 5. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

5.1	Subsistema de Análisis de Fallas en Ejes	94
5.1.1.	Base de Conocimiento para El Módulo De Ejes	94
5.1.2.	Árbol de Fallas	95
5.1.3	Interfase de Usuario	98
5.2	Subsistema de Razonamiento Basado en Casos	104
5.2.1	Introducción	104
5.2.2	Organización del Conocimiento	104
5.2.3.	Estructura de los Casos	108
5.2.4	Construcción de la Base de Conocimiento	111
5.2.5	Ponderación de Atributos	112
5.2.6	Medidas de Relevancia	113
5.2.7	Biblioteca de Índices	115
5.2.8	Interfase de Usuario	115
5.2.9	Módulo de Explicación	115
5.2.10.	Operación del Sistema	116

CAPÍTULO 6. SOLUCIÓN DE CASOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1	Introducción	125
6.2	Falla por Fatiga en Flexión Unidireccional de Eje de Acero para Herramienta A6	125
6.3	Fractura por Fatiga a Torsión de un Eje Largo de Acero 4340 que fue Sujeto a una Carga Cíclica y Frecuentes Sobrecargas	126
6.4	Análisis de Falla de Semieje Trasero de un Camión	127
6.5	Análisis de Falla de Barra de Torsión de un Autobús	129
6.6	Fractura de una Flecha de Impulsor de Turbina	131
6.7	Análisis de Resultados y su Discusión	133

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

Anexo 1	Análisis de Esfuerzos en Ejes
Anexo 2	Factibilidad del Desarrollo del Sistema Experto en Análisis de Falla
Anexo 3	Secuencia de Solución de Problemas de Análisis de Falla
Anexo 4	Clases y Atributos en Visual Rule Studio
Anexo 5	Reglas del Subsistema para Fallas en Ejes en Visual Rule Studio
Anexo 6	Peso Asignado a los Atributos del Subsistema de RBC

Índice de Figuras

2.1	Diagrama de tina de baño. Relaciona la frecuencia de falla con la vida útil	10
2.2	Características de la fractura de acuerdo con el estado de esfuerzos	16
2.3	Fractura dúctil en copa y cono	18
2.4	Fractura transgranular	18
2.5	Fractura intergranular	18
2.6	Muestra de un alambre de acero galvanizado y recocido el cual se sometió a flexión rotativa. La fractura se inicia en la superficie del defecto y se propaga perpendicular al eje del alambre	21
2.7	Las marcas de desgaste están superpuestas a las estrías en la zona mate “marcas de llanta”	21
2.8	Secuencia de eventos recomendada para un proceso de AF	23
2.9	Matriz de experiencia de fallas	29
2.10	Representación esquemática de una superficie de fatiga. Se observan dos regiones; una zona pulida y otra con un aspecto rugoso (granular)	31
2.11	Imagen de la superficie de fractura de una barra de torsión de autobús Volvo. Se distinguen claramente las dos regiones (pulida y granular)	31
2.12	Representación esquemática de la región de aspecto concha de almeja	31
2.13	Imagen de la superficie de fractura de una barra de torsión de autobús. En el óvalo se muestra una zona típica de concha de almeja	31
2.14	Representación esquemática de las marcas típicas de fractura en un eje sometido a fatiga por flexión unidireccional a bajos (a,d,g) y altos (b,c,e,f,h,i) esfuerzos nominales. La concentración de esfuerzos es reducida en (a,b,c), moderada (d,e,f) y severa (g,h,i)	32
2.15	Representación esquemática de las marcas típicas de fractura en un eje sometido a fatiga por flexión bidireccional. El nivel de concentradores de esfuerzos son: reducidos(a), moderados (b) y severos en (c)	33
2.16	Representación esquemática de las marcas generadas por fatiga a flexión rotativa. En (a) se tiene una concentración de esfuerzos moderada y en (b) es severa	33
2.17	Aspecto de la superficie de fractura de una flecha de acero 1045 templado y revenido. El patrón concéntrico de las marcas de concha indican que la carga no estaba balanceada	33
2.18	Fatiga por torsión, aspecto de zona de ruptura. Se trata de una barra de torsión de un autobús. En este caso la fractura se presenta en la zona recta del eje, al nivel donde se encuentran los elementos de sujeción de la barra a la carrocería. La superficie es helicoidal	34
2.19	Eje de un acero 1060 que falló por fatiga a torsión. Las grietas de fatiga corrieron a partir de tres puntos en la superficie creciendo hacia el agujero de la pieza	34
2.20	Fatiga a torsión. Vista longitudinal de un eje fracturado en servicio. Se trata de un acero con 0.15% de C, 1.12% de Mn y 0.98% de Cr. La grieta de fatiga se originó en la superficie siendo desviada paralela a las fibras del material, creciendo entonces en dirección longitudinal	34
2.21	Geometría típica de una fractura por sobrecarga a cortante	35
2.22	Geometría típica de una fractura por sobrecarga a tracción	35
2.23	Geometría típica de una fractura por sobrecarga a torsión	35

2.24	Fractura dúctil. Superficie de copa y cono	36
2.25	Fotografías de microscopio electrónico de una fractura dúctil que presenta microcavidades (Dimples) en un acero 1045 recocido	36
2.26	Marcas de chevron	37
2.27	Aspecto granular y brillante de una fractura frágil. Se trata de acero de bajo carbono a -196°C sujeto a cargas de tracción	37
2.28	Zona de fractura del semieje de un vehículo de carga	37
2.29	Sección del eje de la figura 2.28. El ángulo y características de la superficie de fractura corresponden a una falla frágil producto de la presencia de cortante puro (torsión)	38
2.30	Detalle de la zona de fractura. Por la dirección de las marcas de Chevron la grieta corre de la zona superior derecha en dirección a la izquierda en la imagen	38
2.31	Superficie de una muestra con entalla de un acero 1025 en el que parte de la fractura es frágil y parte dúctil, mostrando zonas de microcavidades y de clivaje, en la imagen de microscopía electrónica se observa la zona de transición	38
2.32	Superficie de una barra de acero con 0.35% C, 0.6% Mn, 1.89% Cr, 0.24% Mo, templada y revenida. La barra sufrió dos impactos sucesivos en la misma dirección. La grieta principal fue inducida por el primer impacto y la reacción elástica en el otro lado de la pieza dio inicio a una segunda grieta. En la superficie se observan las diferentes etapas del proceso de fractura, las cuales se pueden correlacionar con los ciclos de carga	39
2.33	Efecto del tamaño del radio del filete sobre la concentración de esfuerzos en el cambio del diámetro en un eje	42
2.34	Imagen de la zona de fractura de la barra de torsión de un autobús. Resulta evidente el efecto de la presencia de elementos que realizan una presión puntual sobre la barra, se supone que esto es debido a condiciones de montaje. La grieta tiene su origen en la zona de indentación. No existe evidencia de movimiento relativo por que se considera que esta sujeción equivale a un empotramiento de la barra	42
2.35	Microestructura de la pieza (figura 6.19) en una zona cercana a la grieta estudiada. Se observa la presencia de bandas muy pronunciadas	43
2.36	Defecto encontrado en el semieje fracturado en el lado del diferencial (a 3 cm. del extremo del eje). La morfología de este defecto indica que la materia prima ha sido sujeta a una deformación muy limitada después de su solidificación	43
3.1	Interacción entre los participantes en la construcción de un sistema experto	46
3.2	Integración de los componentes del sistema experto	48
3.3	Etapas en el desarrollo de un sistema experto	50
3.4	Ilustración de la regla de inferencia Modus Ponens	55
3.5	Ilustración de la regla Modus Tollens	55
3.6	Proceso de razonamiento basado en casos	57
3.7	Elementos de un sistema RBC	58
4.1	Diagrama de operación del sistema híbrido	72
4.2	Modelo en espiral para el desarrollo de software	74
4.3	Estructuras orientadas a objetos	83
5.1	Fragmento del árbol de fallas en ejes para el caso de fallas de fractura	96

5.2	Interfase de múltiples documentos	98
5.3	Pantalla de presentación	99
5.4	Formulario general	100
5.5	Ventana para “gráficos ejemplo”	100
5.6	Ventana sobre datos generales geométricos y de solicitud del eje	102
5.7	Ventana sobre características, apoyos y elementos acoplados al eje	102
5.8	Ventana general para ayuda y titulares del sistema	103
5.9	Diagrama de Ishikawa elaborado a partir de un caso de AF “Fractura por fatiga de tornillos de acero inoxidable 316L usados para implantes quirúrgicos” seleccionado de (ASM, 1992)0	105
5.10	Mapa de conocimiento del caso de la figura 5.9	105
5.11	Pantalla de captura, corresponde a la clase “análisis SEM” de la tabla 2.6	115
5.12	Módulo de explicación: ejemplo de pantalla para mostrar resultados	116
5.13	Relaciones entre los componentes del sistema	117
5.14	Flecha fracturada (izq). Superficie de fractura (der.). Los puntos A, B y C son los orígenes de grietas	118
5.15	Micrografía que muestra una grieta adyacente y paralela a la fractura principal (75x) (izq.) . Micrografía de un extremo de la grieta (500x) (izq.)	119
5.16	Pantalla de inicio	119
5.17	Pantalla de instrucciones	119
5.18	Llaves primarias	120
5.19	Pantalla de clases	120
5.20	Primera pantalla para la información del material	121
5.21	Segunda pantalla para la información del material	121
5.22	Primera pantalla para la información de inspección a simple vista	121
5.23	Segunda pantalla para la información de inspección a simple vista	121
5.24	Pantalla de observación con microscopio o estereoscopio	122
5.25	Pantalla para los datos obtenidos con una metalografía o análisis químico	122
5.26	Pantalla #1 para el análisis con microscopio electrónico de barrido (SEM)	122
5.27	Pantalla #2 para el análisis con microscopio electrónico	122
5.28	Pantalla de medidas de similitud	123
5.29	Pantalla de medidas de similitud, luego de barrer toda la base de casos, se obtiene la similitud y presentan en orden los casos	123
5.30	Pantalla de casos similares	124
6.1	Eje de acero para herramienta A6 que falló por fatiga	126
6.2	Flecha de acero 4340 de un rotor que falló por fatiga a torsión	127
6.3	Vista general de una barra de torsión	129
6.4	Pantalla de casos similares (caso 27)	132
6.5	Ventanas de resultados de similitud (Subsistema RBC) para los casos 6.2-6.5	134

Índice de Tablas y Cuadros

TABLAS

2.1	Frecuencia de falla por su origen	11
2.2	Frecuencia de falla, según su origen, en componentes de aviones	11
2.3	Frecuencia de falla por sus causas	11
2.4	Frecuencia de falla, según sus causas, de componentes de aviones	11
2.5	Relación causa-efecto de decisiones mal elaboradas en la etapa de diseño	12
2.6	Defectos típicos de diversos procesos de fabricación	14
2.7	Relación causa-efecto en inconvenientes producto de la instalación	15
2.8	Clasificación de fallas en ejes	30
3.1	Diversos criterios para manejar valores frecuentes de atributos, x, y representan el valor lógico del mismo atributo de dos casos distintos	59
3.2	Relaciones entre palabras claves. Sistema para fallas por corrosión	63
4.1	Lista de control para evaluar aplicaciones de sistemas expertos	70
4.2	Lista de control para evaluar factibilidad del desarrollo del sistema experto en AF	71
4.3	Asignación de letras a los factores	85
4.4	Matriz de comparación y porcentajes obtenidos	85
4.5	Características de los shell's	86
4.6	Calificaciones de los factores en cada shell	86
4.7	Evaluación final	86
4.8	Descripción de la clase part	89
4.9	Descripción de clases Información sobre el material, falla y medio de operación	90
4.10	Descripción de las clases ejes, conclusiones intermedias, recomendaciones, aceros, bronces e información visual de la falla	91
4.11	Secuencia para la solución de un caso	93
5.1	Pruebas mecánicas y microscopia relacionada al tipo de falla	97
5.2	Código para los elementos montados en el eje	101
5.3	Los distintos mecanismos de falla con sus variantes	104
5.4	Mecanismos de falla particulares de <i>sobrecarga</i> , con sus características distintivas	106
5.5	Lista de los mecanismos de falla de <i>desgaste</i> , con sus características distintivas	106
5.6	Atributos de las fallas por fluencia	106
5.7	Lista de los mecanismos de falla por <i>fatiga</i> , con sus características distintivas	107
5.8	Lista de los mecanismos de falla por <i>corrosión</i> , con sus características distintivas	107
5.9	Estructura definitiva de un caso para el sistema RBC	109
5.10	Lista de atributos, correspondientes a las clases llaves primarias e información del material	109
5.11	Lista de atributos, correspondientes a las clases características de la superficie de fractura y estereoscopio/microscopio óptico	110
5.11	Lista de atributos, correspondientes a las clases metalografía/análisis químico y análisis SEM	111
5.13	Fragmento de un formato de captura de datos	112
5.14	Fragmento de la tabla de atributos	113
5.15	Peso de los distintos atributos	113
5.16	Criterios para medir la distancia entre valores de atributos. x, y representan valores del mismo atributo para dos casos diferentes	114

5.17	Relación de figuras y pantallas de captura	120
6.1	Antecedente de la falla de las tres barras	129
6.2	Comparación del caso histórico 17 con el caso en estudio	132
6.3	Comparación del caso histórico 27 con el caso en estudio	133
6.4	Subsistema de Ejes. Componente explicativo casos 6.2 y 6.3	135
6.5	Subsistema de Ejes. Componente explicativo casos 6.4 y 6.5	136
6.6	Subsistema de Ejes. Componente explicativo caso 6.6	137

CUADROS

2.1	Inconvenientes del AF y sus acciones correctivas	9
2.2	Características morfológicas de la fractura dúctil	17
2.3	Características morfológicas de fractura frágil	19
3.1	Metodologías de SEs	53
3.2	Estructura de caso sistema RBC para identificación de mecanismos de falla	62
4.1	Encadenamiento de reglas (I)	81
4.2	Encadenamiento de reglas (II)	81
4.3	Encadenamiento y descomposición de reglas	82
4.4	Clases y atributos en la construcción de reglas	83

Publicaciones, Proyectos y Estancias de Investigación

En lo que se refiere a **publicaciones** esta tesis tiene como soporte las siguientes:

- 1) Cerrud S., Ortiz A., **Jacobo V.**, Márquez E., (1998). *Propuesta para el Desarrollo de un Sistema Experto en Análisis de Falla de Elementos Mecánicos Metálicos*. Memorias del IV Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Ciudad Juárez, Chih. Octubre.
- 2) Cerrud S., **Jacobo V.**, Ortiz A., Quiroz H., Márquez E., (2000). *Adquisición y Representación del Conocimiento en un Sistema Experto para Análisis de Falla*. Memorias del VI Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Colima, Colima.
- 3) **Jacobo V.** Cerrud S. Ortiz A., (2000). *Prototipo de un Sistema Experto para el Análisis de Falla de Elementos Mecánicos*, Memorias del X Congreso Latinoamericano de Investigación de Operaciones, Mexico D.F.
- 4) **Jacobo V.**, Ortiz A., Cerrud S., (2000). *Aplicación de los Sistemas Expertos en la Enseñanza a Distancia de la Ingeniería en el Inicio del Siglo XXI*. Memorias del 3er. Seminario Internacional de Ingeniería de Sistemas, Ixtapa Zihuatanejo, noviembre.
- 5) Cerrud S. (2002). *Propuesta de Metodología para el Desarrollo de un Sistema Experto en Análisis de Falla de Elementos Mecánicos Metálicos*. Tesis de maestría (Ingeniería Mecánica). División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería UNAM.
- 6) Cerrud S., **Jacobo V.**, Ortiz A., Schouwenaars R., (2002). *Análisis de Falla*. Facultad de Ingeniería UNAM. (Este libro contiene un capítulo completo sobre sistemas inteligentes para análisis de falla).
- 7) **Jacobo V.**, Cerrud S., Ramírez M., Ortiz A., (2002). *Sistema Experto para Análisis de Falla de Ejes*. Ingeniería: Investigación y Tecnología. 3,3.
- 8) Ortiz A. **Jacobo V.** Cerrud S. Hernández A., (2003). *Análisis de Falla de Elementos Mecánicos Metálicos mediante Razonamiento Basado en Casos*. Memorias del IX Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica. Veracruz, Veracruz. Septiembre.
- 9) **Jacobo V.** Cerrud S., Ortiz A., Marquez E., (2003). *Metodología para el Desarrollo de Sistemas Expertos en Análisis de Falla de Elementos Mecánicos Metálicos*. Memorias del IX Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica. Veracruz, Veracruz, Septiembre.
- 10) **Jacobo V.**, Cerrud S., Ortiz A. Márquez E., (2004). *Sistema Experto Híbrido para Análisis de Falla de Elementos Mecánicos Metálicos*. Memorias del X Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica. Querétaro, Qro, Septiembre.

Asimismo se ha desarrollado 3 tesis de licenciatura, en donde participaron alumnos de ingeniería mecánica, ingeniería industrial e ingeniería en computación.

En lo que se refiere a **proyectos**, se ha contado con el apoyo de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, esto a través de los proyectos PAPIIT IN105198 "*Sistema experto para análisis de falla de piezas mecánicas metálicas*" y PAPIIT IN105902 "*Sistema experto híbrido para análisis de falla de elementos mecánicos metálicos (Vigente)*". Por otro lado actualmente se está desarrollando un proyecto de mejora de la enseñanza (PAPIME EN 105104) *Curso de Ciencia de Materiales en Multimedia* el cual contendrá un módulo de *análisis de falla* en el cual se incorporará el *sistema experto*.

Por otro lado el autor de esta tesis realizó dos **estancias** de investigación en el Laboratorio de Metalurgia y Ciencia de los materiales de la Universidad de Gante en Bélgica. En estas estancias se tuvieron reuniones de trabajo con expertos en análisis de falla de esa institución. (*Dr. Yvan Houbaert, Dr. Ian Penning, Dr. F. Leysen*). Estos profesionales participaron aportando ideas sobre la estructura del sistema y proponiendo formas para su desarrollo. Asimismo uno de los participantes en el proyecto sostuvo dos reuniones de trabajo con el *Dr. Brian Mellor* del Laboratorio de Metalurgia de la Universidad de Southampton en Inglaterra, quien tiene la experiencia en el desarrollo de un sistema inteligente para análisis de falla. Con él se intercambiaron ideas para el desarrollo del sistema y se obtuvo literatura sobre el tema.

Definición de Términos

Este apartado cuenta con dos rubros; nomenclatura y conceptos. El primero de ellos tiene como objetivo la definición de un descriptor para aquellos términos que se repiten en forma frecuente dentro de este trabajo escrito. En el segundo, se describen las consideraciones y el marco de referencia que se deben tomar en cuenta en el manejo de algunos conceptos claves dentro de esta tesis.

Nomenclatura

SEAFEMM	Sistema experto para análisis de falla de elementos mecánicos metálicos
AF	Análisis de falla
RBC	Razonamiento basado en casos
RBR	Razonamiento basado en reglas
SE	Sistema experto
SEs	Sistemas expertos

Conceptos

Diagnóstico de falla. Se refiere al análisis de una falla aplicado en un alto nivel (subsistema o sistema), es decir, dentro de una estructura jerárquica.

Análisis de falla. Este término se emplea para el análisis de los problemas en elementos mecánicos metálicos. Es decir, no se empleará para las fallas en sistemas jerárquicos.

Casos convencionales: Son los problemas que más frecuentemente se presentan en los elementos mecánicos. Representan el foco de aplicación del sistema desarrollado en esta tesis.

Casos especiales. En estos problemas el conocimiento es muy complejo, se presentan con poca frecuencia y se requiere de la forzosa participación de expertos. No los resuelve el sistema.

Capítulo 1. Introducción

1.1 ANTECEDENTES

Los sistemas y componentes de ingeniería son creados para llevar a cabo funciones específicas. Desafortunadamente, un alto porcentaje de éstos falla debido a distintas razones. La mayoría de las fallas no son significativas y sus consecuencias son tolerables, algunas llegan a ser catastróficas teniendo como consecuencia daños a las propiedades y hasta pérdida de vidas humanas.

Cuando ocurre una falla, se debe realizar un análisis minucioso (aplicación del método científico) para determinar su causa (diseño inapropiado, deficiencias del material, problemas de manufactura, condiciones de servicio excedidas, mantenimiento inadecuado, etc.). Este proceso se conoce como AF. Una vez que la causa es determinada, deben tomarse medidas correctivas para prevenir recurrencias futuras. Los expertos en esta área examinan toda la información sobre el caso, establecen hipótesis y desarrollan procedimientos para comprobarlas.

El AF es un tema complejo e involucra diferentes campos del conocimiento tales como mecánica, física, metalurgia, química y electroquímica, procesos de manufactura, análisis de esfuerzos, diseño y mecánica de la fractura. Es muy difícil que una persona sea experta en todos estos campos. Por lo que la determinación de la causa de una falla mayor usualmente requiere un equipo de expertos. Esto normalmente toma años de entrenamiento formal seguido por años de experiencia práctica.

Históricamente, el énfasis del AF se ha orientado a problemas catastróficos con un costo elevado. De ahí que las empresas del ramo aeronáutico y militar fueran las primeras a las que les interesó contar con grupos de técnicos para que en el menor tiempo posible determinaran las causas de un accidente y definieran acciones correctivas. Por su importancia económica y por el impacto que sus problemas pueden tener a nivel mundial, han sido las empresas del ramo automotriz quienes también han formado estos grupos, los cuales con base en análisis técnicos y económicos, definen bajo qué condiciones son llamados a revisión (*recalls*) los modelos de vehículos que han presentado algún inconveniente (sobre todo, si se han visto involucrados en accidentes). Como ejemplo están las camionetas que recientemente presentaron accidentes que se atribuyeron a los neumáticos, los que bajo ciertas condiciones de operación sufrían desprendimiento de la capa de rodamiento con resultados funestos para la unidad; asunto que, por cierto, estuvo a punto de provocar la quiebra de la empresa.

Sobre el proceso de análisis se puede comentar que dependiendo de la naturaleza de la falla, varía la profundidad del estudio y la secuencia de investigación para identificar las diferentes causas que la provocan. Los procesos de examen siguen una serie de etapas (Metals Handbook, 1990) y los resultados en cada una determinan la manera en la cual proceden las siguientes fases. Con base en la información obtenida en cada etapa, es posible a partir de un aspecto simple de la investigación, plantear hipótesis sobre los mecanismos de falla como puede ser una inspección visual de la superficie fracturada.

Para los casos en donde la información es escasa o ambigua, la revisión de problemas similares reportados en la literatura (Corrosion Atlas, 1991; Heyes, 1998; Jones, 1998; Metals Handbook, 1990; Naumann, 1983) es una tarea valiosa, la cual permite obtener pistas para acercarse a la solución.

Debido a la dificultad de adquirir el conocimiento en AF, se ha tenido especial interés en desarrollar sistemas computarizados para capacitar personal o para apoyar a los expertos. Uno de los objetivos que se persiguen es preservar el conocimiento, el cual se puede perder si los responsables se retiran de sus trabajos. Se han realizado algunas aplicaciones que incluyen árboles de falla, SEs, redes neuronales, etc (capítulo 3).

Los SEs son una rama de la inteligencia artificial aplicada, que fue desarrollada a mediados de los 1960's. La idea básica detrás de éstos es la experiencia, la cual se transfiere del humano a la computadora. Este conocimiento se almacena y los usuarios accesan a la máquina en busca de asesoría o consejo específico. Los SEs aportan medios poderosos y flexibles para obtener soluciones de una variedad de problemas que no concuerdan con otros métodos tradicionales (Adedeji, 1992; Ignizio, 1991). Su uso esta proliferando en muchos sectores de la vida social y tecnológica, donde apoyan los procesos de toma de decisiones y la resolución de problemas (Adedeji, 1992; Hancox *et al*, 1990; Ignizio, 1991; Jacobo *et al*, 1994; Rich y Knight, 1994; Rolston, 1992).

En su inicio, la aplicación de los SEs se orientó sobre todo hacia aquellos aspectos en donde la cantidad de información requerida para llegar a una decisión, provocaba en muchos de los casos soluciones diferentes y, en algunos, hasta opuestas. Sus principales aplicaciones se orientaron a la medicina, la jurisprudencia, la geología y posteriormente a la ingeniería. La técnica ha sido tanto infra como supervalorada, ya que en sus inicios se llegó a idealizar pensando en sistemas que pudieran sustituir al médico, al abogado y al ingeniero; por otra parte, otros los conceptualizaron como simples bases de datos que agilizaban la búsqueda de información, pero que de ninguna manera representaban una sustitución del humano. En la actualidad, el concepto se ha precisado y su aplicación se ha extendido a diferentes ramas de la ciencia, teniendo como principales ventajas su facilidad de difusión, rapidez y bajo costo. Lo anterior, aunado a su capacidad como elemento de entrenamiento para personal sin experiencia, ha dado como consecuencia una utilización cada vez más intensa, en muchas ocasiones como colega y en otras como experto.

Respecto a lo que sucede en la industria en México, se puede señalar que no existe una cultura del AF, y en la actualidad en la práctica, si una pieza sufre daño o deterioro, debe repararse en el menor tiempo posible. Cuando las fallas se presentan con frecuencia relativa, lo más común es modificar la parte o sistema a partir de la percepción particular del técnico encargado, lo cual al corregir el problema, lo convierte en procedimiento común. En algunas ocasiones, las empresas se deciden por contactar a expertos en AF, incurriendo en inconvenientes de costos, mismos que se reducirían si se contara con personal capacitado en el área. En muy pocos casos existen en la empresa ingenieros con la experiencia para realizar AF de un sistema o componente.

Lo anterior aplica para México al principio del siglo XXI. Las grandes industrias son en general transnacionales que se orientan principalmente a actividades que están más identificadas con la maquila que con el desarrollo de técnicas y procesos. Este tipo de empresas cuando tienen algún problema, envían el caso a su matriz y esperan las recomendaciones de ésta. Por otra parte, está la

industria mediana y pequeña; en donde lo más común es que el tiempo y los recursos dedicados al análisis de las causas que generan problemas es casi nulo; esto no por falta de importancia, sino porque sencillamente se desconocen las posibilidades del AF, y por razones evidentes no se dispone del personal capacitado para emprender estas acciones.

Por los motivos expuestos se requiere establecer acciones orientadas a la formación y actualización de personal, ya que en algunas ocasiones, al no utilizar la metodología adecuada y por la falta de elementos técnicos se llegan a plantear conclusiones y soluciones que sólo agravan la situación; además dada la escasez de expertos, el costo que sus servicios representa, aunado a la dificultad de disponer de éstos con la rapidez requerida, hace interesante la opción de diseñar y poner a disposición de la industria un SE en AF cuya plataforma esté basada en equipo de cómputo tipo PC. El sistema permitirá capacitar al personal e incrementar los profesionales en esta disciplina, tanto a ingenieros de la industria como a egresados futuros de instituciones de educación superior.

Considerando esta problemática, en la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se planteó la conveniencia de construir un SE en AF de elementos mecánicos metálicos, capaz de identificar las causas de falla de componentes mecánicos y sus responsables (materiales, medio ambiente, diseño, manufactura, condiciones de servicio, etc). Si bien lo que se pretende es la capacitación de personal, el sistema podrá ser empleado en la solución de problemas convencionales, funcionando como un colega.

1.2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS

En este subcapítulo se presentan objetivo general, objetivos específicos, hipótesis principal e hipótesis secundarias que guían esta tesis.

Objetivo general

Diseñar y desarrollar un SE que genere soluciones a problemas convencionales de AF de elementos mecánicos metálicos que, frecuentemente se presentan en la industria manufacturera. La orientación principal de este sistema es hacia la capacitación de personal tanto en la academia como en la industria. La idea básica es contar con una herramienta que permita, a través de su extensión y uso, incrementar la cantidad de personal calificado en AF en México.

Objetivos específicos

- Diseñar e implementar un SE de tipo colega para la determinación de las causas de falla de elementos mecánicos metálicos y determinar las acciones correctivas requeridas.
- Orientar el sistema como herramienta de capacitación y para la solución de problemas convencionales de AF.
- Desarrollar un sistema basado en el conocimiento para el AF de elementos mecánicos metálicos, que contenga un SE, una base de casos de acceso inteligente y módulos auxiliares para el cálculo del estado de esfuerzos.
- Construir el sistema bajo ambiente PC-Windows para facilitar su aplicación.
- Desarrollar el sistema inteligente bajo un ambiente de interfase múltiple.
- Diseñar una estructura flexible del sistema, de tal manera que a futuro se facilite la incorporación de nuevos módulos y robustecer su capacidad.

- Construir una base de casos que contenga información detallada sobre fallas de diferentes elementos mecánicos.
- Involucrar el conocimiento de diferentes fuentes como: expertos en AF, casos publicados, casos resueltos por grupos de investigación, bases de datos, etc.
- Plantear un marco teórico del AF de elementos mecánicos metálicos, aplicando un enfoque sistémico para estructurar de manera clara y concisa el conocimiento sobre este tópico. La finalidad es sustentar lo que se propone en el estudio y definir con claridad las estructuras del conocimiento.
- Generar una estructura sistémica de fallas características en ejes. Se busca proporcionar los fundamentos teóricos y la estructuración del árbol de las fallas en estos elementos.
- Modelar el conocimiento experto en AF.
- Desarrollar un subsistema de razonamiento basado en casos.
- Desarrollar un subsistema para fallas en ejes

Hipótesis principal

“Se puede desarrollar una herramienta computacional para AF, orientada a la capacitación de personal, que permita generar especialistas en esta área.”

Para lograrlo, se requiere estructurar el conocimiento de expertos en AF para manipularlo en la computadora, para la implementación del SE es fundamental la experiencia de los participantes (expertos, ingeniero del conocimiento y usuarios). Se requiere de un *Shell* (Herramienta para el desarrollo de SEs) que permita interactuar con un lenguaje de programación orientado a objetos, de tal forma que la lógica se adecue a las condiciones particulares del AF.

Hipótesis secundarias

- Es posible estructurar el sistema de una manera flexible, para facilitar en un futuro la incorporación de nuevos módulos.
- Se puede tener una mayor confiabilidad en las soluciones de un SE en AF, si se comparan los resultados contra una base de casos históricos.
- Es posible incorporar, en una base de casos, la información, sobre problemas de falla, disponible en la literatura, bases de datos y sistemas multimedios.
- Los módulos que componen el sistema basado en el conocimiento para AF, pueden desarrollarse e integrarse bajo el ambiente de Visual Basic.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

Este trabajo está dividido en siete capítulos. El presente capítulo tiene como objetivo plantear los antecedentes en torno a la investigación, establecer los objetivos e hipótesis y finalmente describir en forma breve el contenido de los capítulos.

El capítulo 2 muestra en su introducción el estado del arte del AF, indicando las exigencias actuales en sistemas o componentes defectuosos e identificando los enfoques de la aplicación de la técnica. Se presentan los fundamentos teóricos del AF de elementos mecánicos metálicos, causas de fallas de acuerdo a su origen. Asimismo, se muestran los mecanismos de falla partiendo de los factores característicos (fractura, deformación, desgaste y corrosión). Se describe la metodología general del AF planteando la forma de aplicarla y discutiendo como se debe llevar a cabo el proceso de análisis. Debido a que en el procedimiento experimental se utilizan

herramientas, técnicas y métodos particulares se incluye una descripción de éstos. Por otra parte, debido a que para desarrollar el SE se requiere de información organizada se describen técnicas para la representación formal del conocimiento en AF (Matriz de experiencia, árbol de fallas y análisis de modo y efecto de falla). Finalmente se presenta el análisis sistemático de fallas en ejes, esto debido a que se requiere profundizar en este elemento, ya que es uno de los módulos desarrollados en este proyecto.

En el capítulo 3 se presentan los fundamentos teóricos de los SEs; concepto, ventajas, elementos, participantes en su desarrollo, dinámica de operación, herramientas. Se muestra la metodología para su construcción, se plantean los diferentes enfoques metodológicos que se han implementado en los últimos 10 años y su ámbito de aplicación. Asimismo, se presenta la evolución e importancia del tratamiento de la incertidumbre. Por otro lado, se realiza la descripción de dos métodos de razonamiento (basado en reglas y basado en casos) que se utilizan para desarrollar SEs. Como punto medular de este capítulo se presentan los diferentes sistemas que sobre AF se han desarrollado a la fecha. Debido a que la orientación del proyecto, motivo de esta tesis, es hacia la educación en el AF, al final se analiza el potencial de los SEs en la enseñanza del AF.

Lo correspondiente al diseño del sistema y metodología se presenta en el capítulo 4, en este se describe en forma concreta toda la metodología de la investigación, el análisis de factibilidad, definición de las características de operación (diseño del sistema). Asimismo, se describe el procedimiento para el desarrollo del SE (adquisición del conocimiento, representación del conocimiento, selección del shell, construcción de la base de conocimientos, elaboración de prototipos). Cabe hacer notar que en la metodología se plantean en forma concreta los puntos que esta contiene, pero no todos son desarrollados en este capítulo, ya que solo se presentan *in extenso* las etapas correspondientes al sistema global. La revisión de la literatura sobre AF, SE y SE para AF se describe en los capítulos 2 y 3, y lo que compete al desarrollo de los subsistemas de ejes y de RBC se presenta en el capítulo 5. Es decir, el contenido de este último forma parte de la metodología pero debido a su extensión y a sus características particulares se presenta por separado.

En el capítulo 6 se presenta la aplicación del sistema en la solución de casos que ya han sido resueltos de manera satisfactoria por otros métodos, finalizando con el análisis de los resultados obtenidos. Las conclusiones y recomendaciones que se desprenden del presente estudio se plantean en el capítulo 7. La parte final incluye las referencias bibliográficas y un apartado de anexos con información de respaldo sobre algunos tópicos especiales del proyecto.

Capítulo 2. Análisis de Falla

2.1 GENERALIDADES

Las situaciones de fallas en sistemas y productos han tenido especial interés en los últimos años, esto no solo por cuestiones competitivas sino también por los aspectos de seguridad. Algunas fallas pueden llegar a ser trágicas como, por ejemplo, en vías férreas, aviones, y hasta en procesos industriales.

En la Unión Europea (UE) los estados miembros han adoptado y publicado las leyes, regulaciones y provisiones administrativas necesarias para cumplir con directivas de la comunidad. Por ejemplo, la legislación en cuanto a los defectos del producto está dada en la directiva de la Unión Europea 1999/34/CE. Esta define producto como cualquier cosa móvil, sencilla o incorporada dentro de un ensamble estacionario o movable. Un producto es defectuoso si éste no ofrece la seguridad a la que el usuario tiene derecho en sus expectativas, teniendo en mente todas las circunstancias, uso razonable y el tiempo cuando el producto fue puesto en circulación. El productor es responsable por los daños provocados por defectos del producto. El productor es el fabricante del producto terminado, de un componente o del material, o algo que lo ligue con su nombre, marca u otro signo distintivo del producto.

La seguridad está presente en directivas específicas de la UE. Para máquinas en la directiva (98/37/CE) se tratan las condiciones con las que deben cumplir los productores para garantizar sistemas seguros. Asimismo esta directiva incluye normatividad en cuanto a máquinas nuevas o usadas provenientes de terceros países, grupos de máquinas, ensambles complejos y equipamiento que modifica el funcionamiento de una máquina. En este caso el problema de fatiga, se menciona en el contexto de protección contra el riesgo mecánico.

Aunque la seguridad es la principal preocupación de la legislación, los defectos del producto son causa de inconvenientes financieros. Los costos de falla son los relativos a reparación directa, reemplazo, consecuencias colaterales del daño y otras implicaciones (seguridad, pérdida de confianza, imagen).

Estudios de los efectos económicos de fractura en EU y Europa sugieren que el costo total de fallas en los países desarrollados es del orden de 4% del PIB (De Castro y Fernandes, 2004). La aplicación del AF conduce a reducir costos debidos a los defectos de sistemas o componentes. Como ejemplo se puede mencionar un estudio que se realizó en el sistema Cutzamala que surte agua al área metropolitana de la Ciudad de México (Ortiz *et al*, 2002). En este caso hubo una falla en la tubería que ocasionó que al parar una de las dos líneas del sistema se redujera el suministro durante algunos días. Al realizar el estudio del problema se determinó que el tubo se había fracturado, debido a un fenómeno de corrosión bajo tensión de las espiras de refuerzo del concreto preesforzado de la tubería. Este hecho causó una serie de inconvenientes en cuanto a costos de mantenimiento, debido a lo que significa el reemplazo de un nuevo tramo de la tubería, a la vez de deterioro en la región de afectación. Lo más grave del problema mencionado es que no se tiene una idea de la magnitud real del deterioro acumulado por las líneas hidráulicas a lo largo de todo el sistema de alrededor de 120 km de longitud, razón por la cual es necesario realizar una evaluación integral del daño para poder programar el mantenimiento de forma

eficiente (Cerrud *et al*, 2003). De no hacerse así, se incurrirá en costos excesivos y hasta en problemas de índole político.

En cuanto a la frecuencia con la que se presentan las fallas, Wearne (1979) indica que existen variaciones en la incidencia de fallas en los diversos productos de ingeniería, pero en la actualidad las fallas que se presentan tienden a ser más serias, debido a la búsqueda de la economía de escala, la cual concentra riesgos físicos y financieros y la búsqueda de optimización en el diseño de sistemas y componentes, minimizando la redundancia.

Ninguna de las fallas del estudio de Wearne fue causada por fenómenos físicos desconocidos hasta el momento, una falla mayor como la del puente de Tacoma pudo explicarse por Von Karman, entonces director del laboratorio de aeronáutica de Caltech, basándose en la teoría de inestabilidad aerodinámica que se utiliza en el diseño de aeronaves (pero no, en esa época, en el diseño de puentes). Esto ilustra la complejidad del AF. El cual incluye áreas de mecánica, física, metalurgia, química, corrosión, procesos de manufactura, análisis de esfuerzos incluyendo técnicas numéricas tales como el método del elemento finito, análisis de diseño y mecánica de la fractura incluyendo grietas inducidas por el medio ambiente, ensayos no destructivos y evaluación de riesgos, entre otros. Por supuesto, ningún individuo será un experto en todas estas áreas. El experto en AF tendrá un conocimiento profundo en alguna de las áreas mencionadas y trabajará en el conocimiento de las otras, obtenidas de su experiencia, habilidad, entrenamiento y educación.

En relación con la metodología general del AF, Thomas (1989), sugiere que la variedad de problemas y enfoques a sus soluciones son grandes como para ser cubiertas por un simple enfoque general. Un marco de trabajo de un AF estructural puede consistir del examen de los modos de falla uno por uno (fatiga, deformación, corrosión, desgaste); sin embargo, cada uno de estos temas se tratan a profundidad en textos especializados, lo cual indica que existen procedimientos más detallados en un análisis integral de la falla.

La literatura profesional usualmente se concreta en los aspectos técnicos de las fallas. De cualquier manera, las razones reales de la falla son en su mayoría procedentes, incluyendo deficiencias de comunicación y definiciones poco claras de responsabilidades.

Por ejemplo Carper (1989), define las siguientes causas de falla en estructuras civiles:

- Elección del lugar y errores de desarrollo
- Deficiencias programadas
- Errores de diseño (incluyendo fallas que consideran algunas combinaciones de cargas, falta de redundancia, detalles de conexión, etc.),
- Errores de construcción,
- Deficiencias en los materiales,
- Errores de operación (incluyendo cambios en el uso, mantenimiento inadecuado, etc.).

Por supuesto, existen otros planteamientos tal como el de Petroski (1992), el cual presenta dos grupos de causas principales, en el primero se tienen los siguientes factores; ignorancia, economía, lapsos de descuido, sucesos inusuales (temblores, tormentas extremas, incendios, etc.),

Mientras que en el segundo se incluyen:

- Estados limitados (sobrecargas, sobreesfuerzos, movimiento, deterioro),
- Riesgos aleatorios (incendio, inundación, explosiones, temblores, choques),
- Errores humanos (errores de diseño, errores de construcción).

En la actualidad uno de los aspectos de mayor realce en el AF es la extensión de vida de los sistemas y componentes, Un enfoque sistemático a este problema incluye lo siguiente:

- Evaluación de las condiciones del material,
- Tipo de daños (fatiga, deformación, ambiente, etc.),
- Lugar dañado (superficie, volumen, interfase),
- Extensión del daño (localizado, global),
- Nivel del daño (despreciable, pone en riesgo la funcionalidad, causa peligro),
- Condiciones de carga,
- Temperatura.

El AF es para entender cómo y por qué suceden las fallas, para de esta manera poder efectuar acciones correctivas. Se requiere que el estudio sea minucioso y completo ya que si no se cumple esto, se incurre en falsas apreciaciones y decisiones sobre la falla. Desafortunadamente, un análisis completo es, con frecuencia, la excepción más que la regla, especialmente cuando se realiza por inexpertos. En este sentido Balaisdell (1989), presenta un análisis muy conciso sobre los problemas de la aplicación del AF. En el *cuadro 2.1* se presentan en forma resumida las propuestas de este último autor.

En la actualidad la investigación en fractura y fatiga ha contribuido a reducir la probabilidad de accidentes y desastres. El transporte es un área de gran interés, debido a posibles impactos de accidentes, por ejemplo en aviación o ferrocarriles. La legislación existente genera la necesidad de aplicar el AF. Sin embargo, comprender las causas de fallas es también fuente del conocimiento de la ingeniería, que permite cada vez tener sistemas más eficientes en términos de costos, seguridad y funcionalidad.

2.2 DEFINICIÓN DE FALLA

Una falla se conceptualiza como la diferencia que existe entre las expectativas y el desempeño de una pieza o sistema (Das, 1996). Representa una situación adversa en donde una componente o equipo 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 estas ocurrencias puede variar en un amplio rango. En general, el patrón de falla puede ser comparado con las características de la vida de un ser humano. La curva de falla también conocida como “perfil de tina de baño” (*figura 2.1*) es caracterizada por tres zonas de falla perfectamente diferenciadas. La primera zona está dada por el periodo inicial durante el cual las fallas se llaman “infantiles” o fallas tempranas, causadas generalmente por deficiencias en el diseño, defectos de manufactura, y errores de ensamblado e instalación. Las fallas en la segunda zona reciben el nombre de fallas de servicio o fallas de frecuencia constante, éstas son aleatorias y están inclusive repartidas en forma uniforme. La tercera zona de la curva es debida al deterioro normal de la pieza producto de su servicio. La incidencia de fallas en esta zona es alta debido a que muchos componentes han terminado ya su tiempo de servicio. La meta de todo diseñador es minimizar las fallas en la primera zona y extender lo más posible la vida útil de los elementos del sistema.

Cuadro 2.1 Inconvenientes del AF y sus acciones correctivas

Falla	Descripción	Acción correctiva
1	El rechazo a reconocer que la falla existe. Esta es la razón más básica en el AF, donde el mal funcionamiento del equipo esta permitido debido a que se piensa que éste está operando apropiadamente	Asegurarse de que cualquier cambio de operación sea reportado.
2	Apagar el equipo que esté funcionando mal o bien, retirar una componente fallada y simplemente sustituirla. Como una regla general, el análisis debe comenzar siempre con un paciente vivo, para que los costos no sean mayores y se aseguren las evidencias tratadas.	Debe existir una persona responsable que tome las decisiones de cuándo se deben apagar los equipos y determinar las causas de los componentes que fallen. Esta persona debe ser miembro del grupo de AF.
3	Determinar una “supuesta” causa. Esta es una de las tres fallas más comunes del AF. Lo que parece lógico y obvio es con frecuencia desaprobado. Es evidente que si el personal involucrado en el análisis es experto no ocurre lo anterior y sus respuestas son confiables	Se deben formular hipótesis que se comprueben con hechos. Es decir, se deben realizar pruebas y procedimientos experimentales para aceptar las hipótesis planteadas
4	No examinar a fondo los efectos de la falla. Los efectos frecuentemente indican la naturaleza del malfuncionamiento en sí mismo, y permite aprobar o desaprobar teorías.	No enfocar un análisis demasiado limitado. Examinar evidencias antes, durante y después del mal funcionamiento.
5	No evaluar el significado de datos recabados antes de acumular más. Este es un punto de la recolección de datos que indica que siempre se debe estar validando la información que se va obteniendo.	Separar cada asunto de los datos en su componente de información básica, para con esto facilitar su validación.
6	Probar teorías no validadas, en este caso se desperdician grandes cantidades de tiempo y dinero. Con frecuencia, las teorías pueden descartarse al ser evaluadas en el papel. En otras ocasiones, el desarrollo avanzado de una teoría ayuda a un analista sin experiencia en un área de un problema particular.	Con sentido común y una calculadora de bolsillo pueden salvarse horas de pruebas. Es decir, un banco de pruebas sencillas es comúnmente más práctico que crear un modelo en computadora
7	Probar una teoría por suposición. Aquí, el analista está tan confiado en su éxito que no realiza las prueba requeridas.	La única manera de saber si una teoría es viable es probarla.
8	No entender el sistema antes de analizarlo. Esta es otra de las tres fallas más comunes. Es virtualmente imposible determinar ¿cómo? o ¿por qué? algo falla, sin primero comprender cómo funciona el sistema o componente.	Familiarizarse verdaderamente con el tema bajo estudio. Utilizar manuales, dibujos, y fuentes de información. Llamar al fabricante puede ser de ayuda.
9	Finalizar un análisis antes de estar completo. Esta es la falla más común del AF. Tomar acciones correctivas contrarias a cualquier otra que sea la raíz de la causa solamente enmascara el problema real. Entonces el problema no es atacado y eventualmente reaparecerá.	Establecer una cadena completa de causa y efecto de eventos. Tomar la base para la fase de diseño, esta cadena puede ayudar a determinar si la raíz de la causa de la falla fue diseñada accidentalmente o si fue levantada después de un uso excesivo, de un error humano, o de la desviación en el diseño de las especificaciones
10	Reportar un análisis incompleto, inadecuado o inexistente. Para que un análisis sea de valor, los resultados deben estar disponibles para que todos puedan utilizarlos. Si uno no sabe cual fue el problema durante el AF, los mismos errores se repetirán en el futuro.	Publicar al menos un breve resumen (5 o 6 líneas) inmediatamente después del análisis, y distribuirlo a todos los que estén interesados en el tema. La información puede estar en la forma de un reporte oficial de AF y por lo menos debe contener las notas que se tomaron durante el análisis

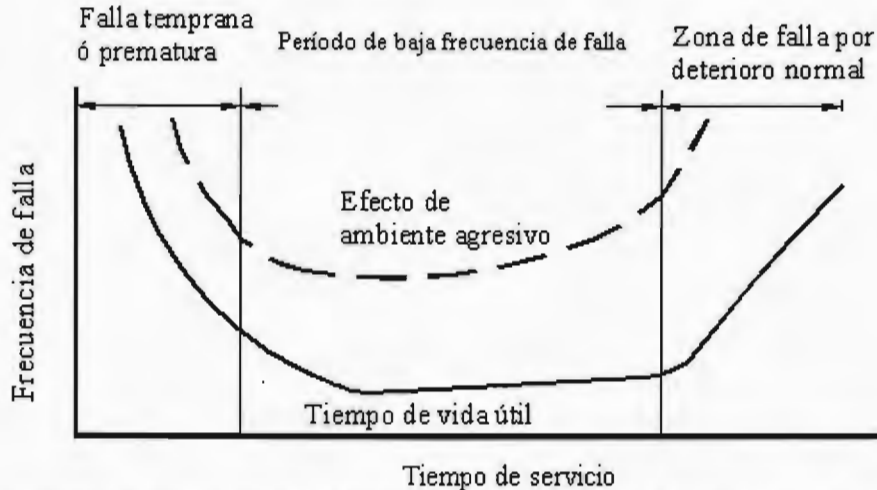


Figura 2.1 Diagrama de tina de baño. Relaciona la frecuencia de falla con la vida útil (Das, 1996).

Para poder entender la metodología de AF es necesario precisar las condiciones bajo las cuales se considera que una pieza o sistema ha fallado, ya que de otra forma se corre el riesgo de considerar las fallas como sinónimo de fractura de una pieza, lo cual representa una visión muy limitada de la problemática, por tal razón se considera que una pieza o sistema ha fallado cuando:

- 1) La pieza llega a ser completamente inoperable.
- 2) La pieza esta aún en operación pero no estará durante mucho tiempo funcionando satisfactoriamente, debido a que ha dejado de cumplir con ciertas características para las que se diseñó.
- 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.

La falla de un elemento mecánico se pueden manifestar de diferentes maneras las cuales según Collins (1993), es posible clasificar como:

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

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

A la fecha se han realizado diversos estudios en diferentes áreas de la ingeniería en los que se han reportado la frecuencia de las fallas según su origen y sus causas (Brooks y Choudhury, 1993) (tablas 2.1 a 2.4).

Tabla 2.1 Frecuencia de falla por su origen.

<i>Origen</i>	<i>%</i>
Selección inadecuada de material	38
Defectos de fabricación	15
Falla por tratamiento térmico	15
Falla por diseño mecánico	11
Condiciones de operación imprevistas	8
Inadecuado control ambiental	6
Inspección de calidad inapropiada o inexistente	5
Inadecuada sustitución de material	2

Tabla 2.3 Frecuencia de falla por sus causas.

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

Tabla 2.2 Frecuencia de falla, según su origen, en componentes de aviones.

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

Tabla 2.4 Frecuencia de falla, según sus causas, de componentes de aviones.

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

2.3 CAUSAS DE FALLA EN MATERIALES METÁLICOS

Las fuentes fundamentales de fallas incluyen muchos aspectos tales como el diseño, la selección del material, las imperfecciones del mismo, la fabricación y / o el procesamiento, el montaje, las pruebas, el almacenamiento, el transporte, y las propias condiciones de servicio, mantenimiento y la exposición no prevista a sobrecargas o daños mecánicos y/o químicos al estar en servicio. A menudo la falla se produce por la acción combinada de más de un factor.

Para realizar un adecuado AF se tienen que determinar las causas de falla y estas se podrían dividir en las siguientes categorías (Cerrud *et al*, 2002):

Deficiencias en el diseño

Éstas provocan fallas catastróficas en el servicio, esto enfatiza la necesidad de coordinar los esfuerzos de los ingenieros para eliminar las condiciones que hacen un componente propenso a la falla desde el diseño (tabla 2.5). La experiencia indica que la deficiencia de diseño que se comete con más frecuencia es la presencia de concentradores de esfuerzo, los cuales se pueden generar por una mala decisión en lo que se refiere a los radios de cambios de sección ó también por no haber precisado el diseñador su dimensión. Por ejemplo, los ejes que son sometidos a cargas

cíclicas de flexión en una sola dirección, pueden fracturarse por fatiga en el radio de filete; este hecho puede ser prevenido, si se rediseñan los ejes con un radio más suave o más grande en el cambio de sección transversal donde se ha formado la fractura o la grieta. Otra característica geométrica que lleva a la falla y debe ser evitada es la intersección de muescas mecánicas y radio de filete. Las muescas, provocan que el esfuerzo en un miembro cargado se incremente abruptamente en la raíz de éstas. Para elementos cargados elásticamente la magnitud del incremento de los esfuerzos en la raíz de la muesca es una función del tamaño, del contorno y, sobre todo, del ángulo de la muesca.

Tabla 2.5 Relación causa-efecto de decisiones mal elaboradas en la etapa de diseño.

Defectos	Consecuencias
Material, tratamiento o técnica de unión cuya selección ha sido inadecuada.	Las propiedades mecánicas se ven afectadas de manera desfavorable incluyendo la resistencia a la fatiga y la tenacidad, se incrementa la susceptibilidad a la corrosión.
El análisis de esfuerzos presenta errores, esto puede referirse a la pieza o a un elemento de sujeción.	Aumenta la probabilidad de falla por sobrecarga o fatiga, o un costo excesivo al estar sobredimensionado el elemento.
Presencia de concentradores de esfuerzos, cambios de sección, cuerdas, cuñeros, etc..	Aumenta el factor de concentración de esfuerzos y reduce la resistencia a la fatiga.
Inadecuada localización de agujeros, barrenos de lubricación, venas, etc.	Reduce la resistencia de la pieza por efecto de la concentración de esfuerzos.
Diseño para ensamble mal planteado, materiales incompatibles.	Se da lugar a la generación de esfuerzos residuales, y puede tenerse corrosión galvánica.
Condiciones de servicio no previstas.	Induce la sobrecarga o corrosión del elemento.

Deficiente selección del material

La selección de materiales como una parte de todo el procedimiento de diseño deberá efectuarse considerando tanto las características dimensionales, como las geométricas, y desde luego con base en la aplicación. La incorrecta selección del material se puede deber a una falla en la apreciación de las condiciones de operación (solicitaciones, condiciones de carga, medio ambiente), o también porque no se tomó en cuenta el método de manufactura a partir de la forma, dimensiones y aplicación de la pieza. En general el material que sea empleado para una aplicación será aquel que cumpla con todos los requisitos establecidos al menor costo. Algunos problemas que se presentan en la selección de un material, y que posteriormente se traducirán en causas de falla son la inadecuada aplicación de los resultados provenientes de las pruebas mecánicas, o la falta de previsión con relación a las condiciones de servicio.

Deficiencias en el material

El empleo de materiales que no corresponden a lo indicado por el diseñador es una de las posibles causas de que se presente un problema en el sistema. La experiencia indica que es poco usual que el material no corresponda con lo especificado, sin embargo es común que imperfecciones del material sean la causa o uno de los elementos que conllevan a la falla. Las imperfecciones pueden favorecer el crecimiento de una fractura o reducir la resistencia del material, ya que brindan sitios o zonas preferenciales para la propagación de la grieta al actuar como concentradores de

esfuerzo, o al servir como lugares propicios para que se desarrollen ataques preferenciales por picaduras o al brindar las condiciones para desarrollar corrosión intergranular.

Errores de ensambles y un mantenimiento inapropiado

Los errores de ensamble pueden ser desalineamientos, piezas fuera de tolerancias, etc. En cuanto al mantenimiento se tiene que, si éste no ha sido adecuado, por ejemplo, en cuanto a cambio de aceite en tiempo y calidad, limpieza de superficies, pintura, etc., se podrá dar lugar a fallas.

Problemas consecuencia de la manufactura

La susceptibilidad de los materiales a presentar falla, también está relacionada con su manufactura. Los procesos de trabajo en frío y operaciones relacionadas a estos como el embutido profundo, estirado y doblado producen una gran cantidad de esfuerzos residuales. Estas operaciones también, en algunas ocasiones, alteran de manera general o localizada las propiedades produciendo microfisuras, todo lo cual afecta la resistencia y confiabilidad del material. Los efectos en la superficie y los cambios metalúrgicos causados por el proceso tienen influencia en la resistencia a la fatiga, resistencia máxima y la resistencia a la corrosión. La generación de propiedades anisotrópicas, de heterogeneidad en el material, así como los cambios en la orientación de esfuerzos residuales son también posibilidades latentes que pueden producir efectos dañinos en el producto terminado o durante su servicio. Corte, troquelado y punzonado dejan esfuerzos residuales, además de que introducen asperezas y rasgan los bordes, los que después se convierten en concentradores de esfuerzos. Asimismo, pueden ocurrir diversos errores al aplicar un tratamiento térmico tales como, sobrecalentamiento, no alcanzar la temperatura austenítica, no dar el revenido adecuado, gradientes de temperatura excesivos o uso de medios de temple inadecuados, tiempos de calentamiento excesivos o en deficiencia, etc. En la *tabla 2.6* se muestran los defectos que se presentan relacionados con diversas operaciones de manufactura.

Problemas generados durante la instalación

Son defectos que escapan a las etapas de control de calidad, en general tienen su origen en fallas triviales del operador al inicio de la vida útil de la pieza y no interfieren con la operación normal de las partes ensambladas, pero si pueden provocar la aceleración del daño y por lo tanto, la falla imprevista del elemento. En general se trata de problemas de ajuste e inconvenientes en la alineación del sistema. En la *tabla 2.7* se presentan algunos de los más usuales.

Fallas producto de condiciones de servicio no especificadas

Se pueden presentar fallas originadas por las condiciones de servicio fuera de lo considerado en el diseño. Éstas se pueden deber a factores tales como; velocidad de carga, temperatura, sollicitaciones y medio ambiente. La ausencia de mantenimiento, inspecciones y monitoreos programados, favorecen éste tipo de fallas. Este tipo de inconvenientes se traducen en fallas por sobrecarga, disminución de la vida útil del elemento debido a una menor resistencia a la fatiga o también por desgastes no considerados en la etapa de diseño, por deformación no especificada producto de la fluencia del material y por pérdidas de espesor efecto de la corrosión, entre otras.

Fallas resultantes de daños en servicio

Los daños que ocurren durante el servicio pueden dar lugar a diversos tipos de falla. En general, el deterioro que la pieza sufre se puede deber a degradación en contacto con el medio ambiente (corrosión), combinación del estado de sollicitaciones con la agresividad del medio (corrosión

bajo tensión), fragilización por hidrógeno, formación de fases frágiles por efecto de la temperatura de servicio, pérdida de propiedades mecánicas o de resistencia a la corrosión por efecto de la permanencia a elevadas temperaturas durante periodos prolongados, deformación permanente por efecto de fluencia lenta. El servicio también puede inducir defectos superficiales que favorezcan la fatiga, estos pueden ser picaduras por corrosión, marcas de desgaste, abrasión, que además actúan como concentradores de esfuerzos.

Tabla 2.6 Defectos típicos de diversos procesos de fabricación

Operación de Manufactura	Proceso/producto	Defectos posibles.
Fundición.	Lingote de fundición /palanquilla, colada en arena, colada en matriz, colada en cáscara	Cavidades provenientes de la contracción, porosidad por gas, inclusiones no metálicas, óxidos, inclusiones exógenas, segregación, fisuras internas, escamas, fracturas en caliente, entre otros.
Procesos de deformación	Laminación de planos y perfiles	Juntas frías, fracturas, óxidos incrustados, discontinuidades por inclusiones no metálicas, delaminación, superficie con cáscara de naranja, fisuras transversales, fracturas en bordes y puntas.
	Piezas forjadas	Dobleces, juntas frías, fractura durante el enfriamiento, fractura durante el calentamiento, tamaño de grano, superficie de cáscara de naranja, ondulaciones en la superficie, crecimiento del tamaño de grano, descarburización, sobrecalentamiento, quemadura, fractura por segregación, baja resistencia mecánica, discontinuidad en la fibra del material, deformación plástica insuficiente, rugosidad.
	Secciones extruidas/ perfiles/ tubos	Fisuras radiales y marcas perimetrales, delaminación, discontinuidades longitudinales, defecto de extrusión, ampollas debido al gas atrapado, fusión incipiente.
	Estirado, embutido	Fracturas, acabado deficiente, superficie con aspecto de cáscara de naranja, fragilización por temporada (corrosión bajo tensión en latones).
	Troquelado	Agujeros traslapados, fisuras superficiales, microfracturas, dobleces.
Ensamble / acabado	Soldadura	Falta de penetración, fusión incompleta, fracturas, inclusiones, porosidad, distorsión, crecimiento de grano, estructura de widmanstatten, desplazamiento entre las superficies a soldar.
	Maquinado	Sobrecalentamiento, esfuerzos residuales, distorsión, irregularidades superficiales, microfisuras, incrustaciones de la herramienta
	Tratamiento térmico	Fractura por temple, crecimiento de grano, heterogeneidad de la microestructura, descarburización, oxidación, austenita retenida, fisuras posteriores al revenido y rectificado, martensita sin revenir, distorsión, bajas propiedades mecánicas.
	Recubrimiento metálico.	Adhesión imperfecta, ampollas, hojuelas en el recubrimiento, decoloración, ruptura, fragilización, depósitos rugosos, manchas, heterogeneidad..
	Decapado	Agrietamiento por corrosión, formación de depósitos, oxidación, picaduras.

Tabla 2.7 Relación causa-efecto en inconvenientes producto de la instalación.

Defectos	Efectos
Especificaciones inadecuadas o imprecisas, uniones no uniformes o mal aplicadas.	Se origina un movimiento relativo entre las partes, favorece la fatiga en el punto de concentración de esfuerzos.
Desalineamiento / incompatibilidad	Agrega carga adicional causando sobreesfuerzo y sobrecalentamiento. También favorece la fatiga. La corrosión bajo esfuerzo puede tener su primer origen en la deformación excesiva.

2.4 MECANISMOS DE FALLA SUS TIPOS Y CARACTERÍSTICAS

El AF de una estructura o pieza metálica requiere en primer lugar de la identificación de la falla, la cual puede ocurrir debido a uno o más mecanismos incluyendo los daños superficiales como corrosión o desgaste y deformación elástica o plástica. Cualquier error en la interpretación o una identificación incorrecta de las características de falla llevará invariablemente a una conclusión errónea, así el verdadero significado del AF se perderá. Por eso es imperativo conocer las características de cada tipo de falla, la clasificación de estos se da de acuerdo al aspecto y a su causa principal, en principio se pueden mencionar (Das, 1996):

I. Fallas por sobrecarga. Por el tipo de sollicitación que produce la falla .

Tracción Torsión
Flexión Cortante Impacto

II. Fallas por distorsión.

Flexión o pandeo Doblez

III. Fallas por fatiga.

Tracción Flexión unidireccional
Flexión con inversión de esfuerzo Flexión rotatoria
Torsión Contacto Térmica

IV. Fallas debidas a corrosión. Se puede clasificar por el mecanismo involucrado o por el aspecto

Corrosión uniforme Corrosión intergranular
Corrosión bajo esfuerzos Corrosión-erosión
Corrosión-fatiga Fragilización por hidrógeno
Corrosión galvánica Corrosión en grietas Disolución selectiva

V. Fallas por fluencia o deformación.

Fractura bajo esfuerzo Fluencia lenta (flujo viscoso del material)

VI. Fallas por desgaste.

Se clasifica por el mecanismo involucrado.

Adhesión Abrasión
Erosión Desgaste-Corrosión Fatiga superficial

Condiciones de carga

Una fractura que es producto del incremento de la carga a una velocidad baja o moderada hasta el punto de fractura del material es llamada fractura por sobrecarga, pero cuando la carga se incrementa con rapidez se denomina fractura por impacto. La fractura por fatiga es generada por la aplicación repetida o cíclica de la carga. En estos casos la sollicitación se describe en términos como tracción, compresión, torsión, flexión y cortante. En la *figura 2.2* se observa el comportamiento de materiales dúctiles y frágiles ante diferentes estados de esfuerzos.

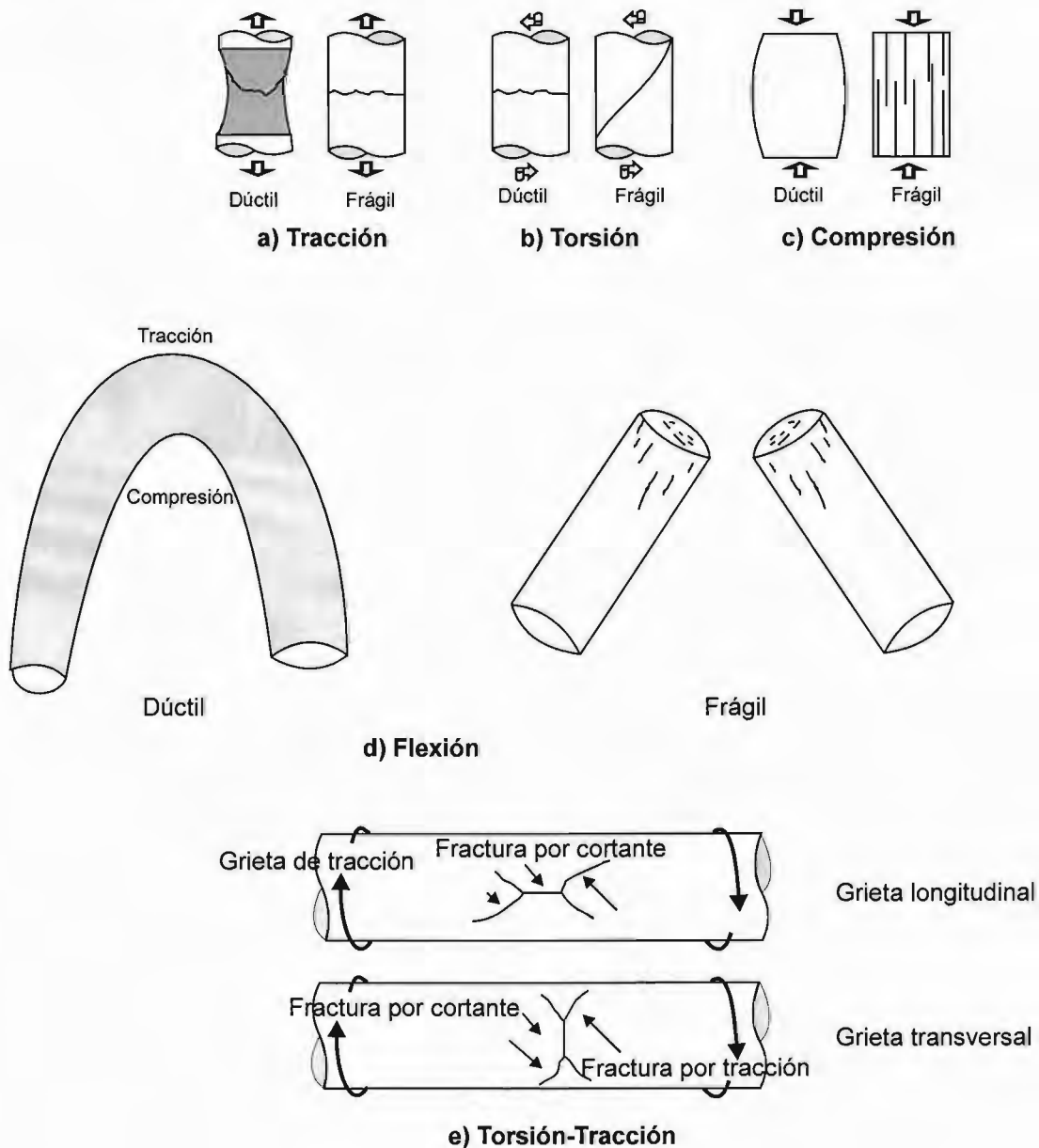


Figura 2.2 Características de la fractura de acuerdo con el estado de esfuerzos (ASM, 1992).

Fractura dúctil

Las fracturas dúctiles se caracterizan por estar asociadas a una gran cantidad de deformación plástica y un gasto considerable de energía. La fractura dúctil por tracción casi siempre tiene una apariencia fibrosa, con tonos grises (opacos). La fractura por tracción de chapa o placa se produce bajo condiciones de deformación plana, con formación del cuello, así como de labios de corte de la superficie de fractura a la superficie de la pieza. La relación del área de la región de la superficie perpendicular a la carga de tracción con el área del labio cortante generalmente se incrementa de acuerdo a como aumenta el espesor de la pieza. En el caso de una barra de sección circular se presentará de igual forma una zona perpendicular a la sollicitación con un plano inclinado aproximadamente a 45°, superficies que al unirse dan lugar a la denominada fractura de copa y cono (*figura 2.3*), típica de falla dúctil bajo condiciones axisimétricas. En el *cuadro 2.2* se presentan las características morfológicas de la fractura dúctil con relación al estado de esfuerzos.

Cuadro 2.2 Características morfológicas de la fractura dúctil

<p>Sobrecarga en torsión</p> <p>a) El plano de fractura es perpendicular al eje de torsión, la superficie es fibrosa.</p> <p>b) La fractura es en general perpendicular al eje de torsión, y esta superficie corresponde con la presencia del cortante máximo.</p> <p>c) La superficie o geometría exterior de la parte muestra deformación en la dirección de rotación, esto es, hay evidencia de deformación plástica</p>	<p>Flexión</p> <p>a) La superficie superior es semejante a la falla por tracción y la inferior, a la de compresión.</p> <p>b) Presenta características similares a la falla por tracción.</p> <p>c) Presenta regiones con superficies planas (perpendiculares a la dirección del esfuerzo normal máximo) y regiones producidas por cortante (a 45° con respecto a la dirección del esfuerzo normal máximo)</p> <p>d) La microestructura del eje longitudinal muestra la flexión de la fibra.</p>
<p>Sobrecarga en tracción.</p> <p>a) La deformación plástica da lugar a la conformación de copa y cono en la superficie de fractura</p> <p>b) Se caracteriza por la deformación plástica presente y la formación de cuello en la zona adyacente a la fractura.</p> <p>c) La superficie de fractura está caracterizada de manera predominante por apariencia fibrosa con una zona pronunciada de labios en la periferia de la fractura final. Las fibras son el indicador de una propagación de fractura lenta. El origen de la fractura está localizado centralmente en la zona fibrosa.</p>	<p>Falla por cortante</p> <p>a) Deformación adyacente a la fractura con cambio en el eje central.</p> <p>b) Presencia de microcavidades.</p> <p>c) La superficie de fractura presenta un incremento paulatino en su brillo a partir de la zona de inicio de la fractura.</p>
<p>d) Apariencia grisácea de las fibras o textura sedosa.</p> <p>e) Presencia de coalescencia micro-cavidades producto de la deformación plástica. Estas microcavidades representan una indicación inequívoca de falla por sobrecarga. Su geometría depende del proceso de formación, equiaxiales para el caso de esfuerzos normales, alargadas para el caso de sollicitación tangencial. Para esto se requiere el empleo de un microscopio electrónico de barrido.</p>	<p>Falla por impacto</p> <p>Se presenta limitada deformación plástica, la superficie de fractura es opaca y fibrosa</p>

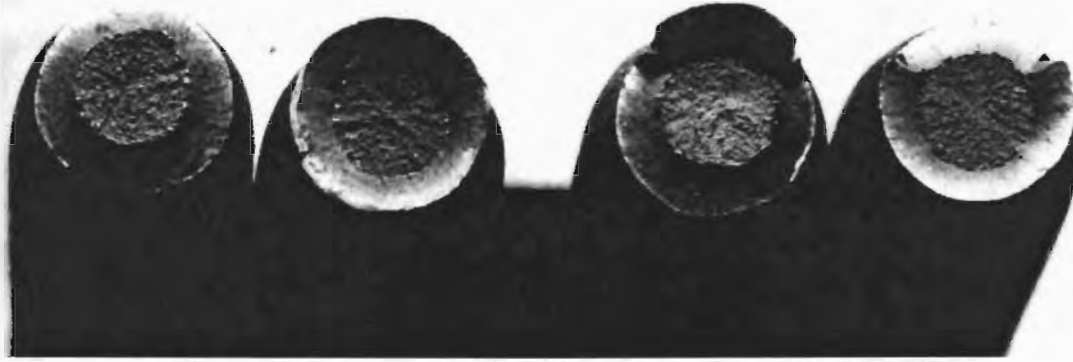


Figura 2.3 Fractura dúctil en copa y cono. (Cerrud *et al*, 2002).

Fractura frágil

Son caracterizadas por la rápida propagación de la grieta con un bajo gasto de energía y sin una apreciable deformación plástica. Las fracturas frágiles presentan una superficie brillante y granular así como un aspecto de caras planas. En caso de presentarse la fractura por una sobrecarga a tracción no se presenta formación de cuello o bien esta es mínima. La superficie de fractura es normal a la dirección de los esfuerzos principales. Es usual la presencia de marcas de Chevron en la superficie de fractura, las cuales se orientan hacia el punto de inicio de la grieta. En el *cuadro 2.3* se presentan las características morfológicas de fractura frágil con relación al estado de esfuerzos.

En los metales la propagación de la grieta se da por dos mecanismos principales (*figuras 2.4 y 2.5*):

- a. Fractura transgranular o clivaje.
- b. Fractura intergranular.

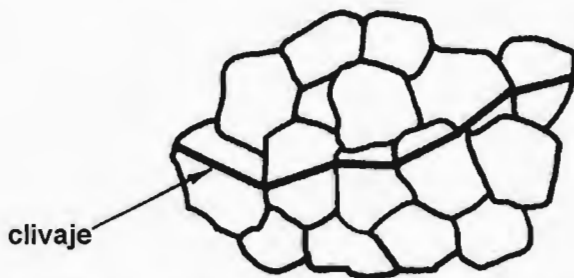


Figura 2.4 Fractura transgranular . (Cerrud *et al*, 2002)

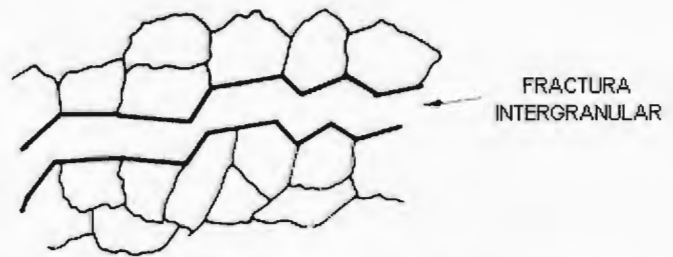


Figura 2.5 Fractura intergranular (Cerrud *et al*, 2002).

Fallas por sobrecarga

Todo componente tiene un límite de carga, cuando es rebasado éste la operación se considera insegura. Una carga que exceda el límite es definida como sobrecarga. La fractura por sobrecarga puede ser dúctil o frágil o una combinación de éstas. Esto depende de la condición del material, geometría de la pieza, tipo y velocidad de aplicación de la carga, así como de la temperatura. En general la ductilidad de la pieza decrece con; (a) aumento de la resistencia del metal debido al tratamiento térmico o por trabajo en frío, (b) Presencia de concentradores de esfuerzo como muescas, agujeros, filetes, inclusiones, porosidad, etc. (c) aumento de la frecuencia de aplicación de carga y (d) disminución de la temperatura.

Cuadro 2.3 Características morfológicas de fractura frágil

<p>Sobrecarga en torsión.</p> <p>a) La superficie de fractura es granular. b) La superficie de fractura está a 45° con respecto al eje de torsión. Ésta corresponde al plano normal a la dirección de los esfuerzos principales. c) En general la superficie de fractura es de tipo helicoidal sin deformación alguna en la zona de falla.</p>	<p>Flexión</p> <p>a) No hay deformación adyacente a la fractura b) Sus características son similares a la falla por tracción.</p>
<p>Sobrecarga en tracción.</p> <p>a) La deformación plástica es mínima o no existe evidencia de ésta. b) La superficie de fractura está caracterizada principalmente por una zona radial con un labio de corte que la limita. La zona radial es una región de corrimiento rápido de la fractura. c) Superficie de fractura irregular compuesta por facetas cristalinas brillantes. El aspecto se define también como de terrón de azúcar para indicar la apariencia granular de la superficie.</p>	<p>Falla por cortante</p> <p>a) No hay cambio en las características de deformación en el plano medio (fibra neutra)</p>
<p>d) Presencia de escalones de clivaje. Esto se define como marcas de río o de chevron, las cuales indican la dirección de avance de la grieta y permiten por tanto determinar la región de inicio de fractura. Este tipo de marcas pueden ser observadas a simple vista, aunque para precisar la presencia de escalones sea necesario utilizar un microscopio electrónico de barrido. e) La fractura puede ser transgranular o intergranular.</p>	<p>Falla por impacto</p> <p>a) La zona radial de un espécimen rectangular con un ancho mucho mayor que el espesor, exhibe un patrón de marcas de chevron (espinazo de pescado), y está asociada con una propagación relativamente rápida e inestable de la fractura.</p>

Fallas por fatiga

Este tipo de fractura es la más común, ya que ocasiona el 80% de las fallas de elementos estructurales: Se presenta cuando la pieza es sometida a sollicitaciones repetidas o fluctuantes, normalmente estas sollicitaciones son inferiores al límite elástico del material. En el caso de que se supere este valor existirá evidencia de endurecimiento y deformación permanente en la pieza.

En la fatiga se considera que existen tres etapas:

1. Daño inicial que conduce a la formación de la grieta.
2. Propagación de la grieta hasta que la sección transversal, que queda sin agrietarse, llega a ser excesivamente débil para soportar la carga.
3. Fractura final, separación de la pieza durante el último ciclo de carga.

Efecto de los concentradores de esfuerzo.

Dado que la fatiga representa la generación y corrimiento de una fisura por efecto de una carga fluctuante, en un plano que usualmente será perpendicular al esfuerzo normal máximo, la génesis de la grieta se da a partir de su formación, es precisamente esta etapa la que usualmente requiere de un intervalo de tiempo mayor, razón por la cual la presencia de concentradores de esfuerzos

tanto superficiales como subsuperficiales favorecerán la falla reduciendo en forma sensible el tiempo (número de ciclos) necesario para que ésta se produzca.

Características macroscópicas de la fractura por fatiga

El examen de las superficies de fracturas por fatiga inicia con la inspección visual; esta inspección emplea técnicas sencillas y puede ser, frecuentemente, realizada en el mismo lugar donde ocurrió la falla, requiriendo poca o nula preparación de la muestra y equipo muy sencillo, debiendo garantizar la no alteración de la muestra. La característica más representativa de las superficies de fatiga son las marcas de playa, que son concéntricas a un punto y este punto corresponde al origen de la grieta por fatiga. Son también llamadas marcas de concha; éstas pueden ocurrir como resultado de los cambios de carga o de frecuencia o por oxidación de la superficie de fractura durante los periodos que se detiene la grieta, esto debido a que la pieza se encuentra sometida a servicio intermitente. La zona de fractura final de manera frecuente se denota fibrosa en la superficie de la fractura por fatiga, dado que ésta se suscitó por sobrecarga, sus características se pueden buscar en este tipo de fallas. El tamaño de esta zona depende de la magnitud de la carga y su forma de la dirección, tamaño y geometría de la carga sobre la pieza fracturada. En materiales tenaces de sección redonda o delgada la zona de fractura final consistirá de una fractura en dos distintos modos.

- a) Fractura por tracción (modo de deformación plana) extendiéndose desde la zona de fatiga y en el mismo plano.
- b) Fractura por cortante (modo de esfuerzos en el plano) a 45 grados con respecto a la superficie de la pieza que rodea a la fractura por tracción.

En las *figuras 2.6 y 2.7* se muestran dos imágenes características de fallas por fatiga, la primera es a bajos aumentos y se observa el inicio y la forma en la que se propaga la fractura, la segunda se trata de una imagen por microscopia electrónica en donde se observa un patrón característico de marcas de lanta.

Fallas causadas por corrosión

La corrosión representa un proceso de deterioro de los metales y aleaciones por fenómenos electroquímicos. De acuerdo a su aspecto y condiciones se puede clasificar como; uniforme, por picaduras, disolución selectiva, intergranular, bajo tensión, corrosión-desgaste, corrosión-fatiga y fragilización por hidrógeno.

Fallas por deformación

Sobrecarga

En ocasiones la falla de la pieza se produce no por una fractura sino por una deformación excesiva, la cual puede ser permanente (plástica) o recuperable (elástica), que provoca regularmente interferencias, solicitaciones adicionales e inconvenientes en la operación. Existen dos tipos principales de esta falla: distorsión de tamaño, la que se refiere a un cambio en el volumen, y distorsión de forma, referente a cambios en la geometría.

Fluencia

La fluencia es la deformación que sufre el metal o aleación bajo la aplicación de cargas durante periodos muy prolongados. Puede causar cambios lo suficientemente importantes en las

dimensiones de un componente para dejarlo inutilizado para el servicio, o generar una interferencia que conlleve a la fractura. Las características de la falla por fluencia son:

- Deformación local y la abundancia de grietas intergranulares adyacentes a la grieta principal.
- La sección cercana a la fractura muestra, para altos aumentos, múltiples cavidades en los límites de grano.
- Las grietas se originan en puntos triples



Figura 2.6 Muestra de un alambre de acero galvanizado y recocido el cual se sometió a flexión rotativa. La fractura se inicia en la superficie del defecto y se propaga perpendicular al eje del alambre. (De Ferri, 1979).

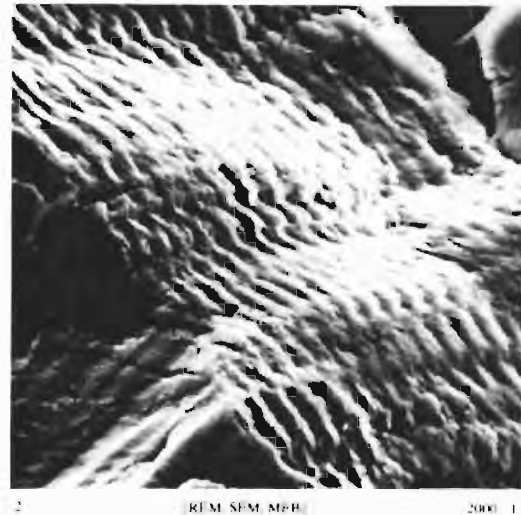


Figura 2.7 Las marcas de desgaste están superpuestas a las estrías en la zona mate “marcas de llanta”. (De Ferri, 1979).

Fallas por desgaste

El desgaste es un fenómeno de deterioro superficial, por causas mecánicas, que ocurre por desplazamiento y separación del material. Debido a que el desgaste usualmente implica una pérdida progresiva de masa y la alteración de dimensiones en un periodo, el problema del desgaste generalmente difiere de los demás e implica, sin duda, posibles daños por fractura. Todo componente mecánico que trabaja bajo condiciones de movimiento relativo está sujeto a cierto grado de desgaste.

2.5 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE FALLA

Una investigación de falla puede tener varios objetivos; puede realizarse para determinar la causa de una fractura, pero primordialmente para señalar la confiabilidad del producto y así evitar fallas prematuras, aunque también a menudo la investigación se emprende por razones académicas. Afortunadamente muchas fallas en elementos metálicos pueden ser analizadas de manera adecuada por los ingenieros con conocimiento de la metodología, ya que las causas se pueden interpretar con facilidad, sin embargo, existen ocasiones donde el grado de complejidad demanda la participación de expertos en diversas áreas de la ingeniería.

El AF representa una labor de investigación similar a la que realiza un médico forense para determinar las causas de un deceso, y de tal forma fincar o liberar responsabilidades. De manera análoga el analista de falla deberá, a través de un proceso sistemático y metodológico, eliminar hipótesis; hasta que con una precisión lo más cercana al 100% defina la(s) causa(s), y la secuencia de eventos que han conducido a la falla del sistema.

Un analista de falla deberá de considerar las siguientes incógnitas en cada caso al que se enfrente:

- ¿Qué datos deben recopilarse de las piezas que fallaron?
- ¿En qué orden deben obtenerse los datos para no destruir ninguna evidencia?
- ¿Cómo debe relacionarse la información recopilada?
- ¿Qué información debe solicitarse al usuario, que pueda ser útil en el AF?
- Desde un punto de vista hipotético, ¿cómo será posible prevenir la recurrencia de las fallas?

El AF es como jugar al detective con objetos inanimados. Esto es, el analista tiene que predecir con exactitud los tiempos en los cuales el elemento va a fallar o en su defecto, por qué falló, todo esto a través de un uso adecuado de los conocimientos de los materiales, diseño y fabricación. A través de la conjunción de estos factores se puede llegar a la conclusión del problema. Sin embargo, en algunos casos es imposible hallar un elemento de unión en una ruta lógica. Es por esto necesario que el analista tenga un pensamiento lógico y ordenado con el cual siga las siguientes directrices que le ayuden a llegar a la raíz de la causa de falla o a la determinación de la vida útil de una manera sistemática (Bafna y Harihakti, 2004; Cerrud *et al*, 2002; Lee, 2001; Metals Handbook, 1987):

1. *Información de los antecedentes.* Lo cual permite conocer lo ocurrido con anterioridad y durante la falla. A esto también corresponde la historia de la manufactura del componente y la información que el propio usuario pueda proporcionar.
2. *Examen visual.* Esto no solo corresponde a la revisión de la pieza sino también a la inspección de la planta o sitio de la falla. Con los datos recabados es posible elaborar bosquejos y mediciones, registrando observaciones y fotografías. Esto permitirá definir las partes que serán seleccionadas para realizar una primera etapa de examen, a la vez de una mejor comprensión del fenómeno y de la secuencia de eventos.
3. *Ensayos no-destructivos.* Estos permiten obtener información relativa a los defectos (superficiales y en el interior) del componente que falló.
4. *Estudios de fractografía.* Para identificar el tipo y naturaleza de la fractura.
5. *Pruebas destructivas.* Permiten asegurar la conformidad del material con relación a las especificaciones en lo que se refiere a composición química, propiedades mecánicas, microestructura, etc.
6. *Análisis de toda la información (recabada y desarrollada)* para con esto proponer conclusiones con relación a las causas y como consecuencia definir las recomendaciones para su prevención. Es conveniente mencionar que a mayor cantidad de información que aporte datos relevantes mayor será la confiabilidad de las conclusiones y recomendaciones.

La secuencia de pasos que se recomienda para el estudio se muestra en la *figura 2.8*, la cual deberá adecuarse a cada caso en particular, esto sobre todo partiendo del hecho de que en muchas ocasiones la primera incógnita es determinar cuál es la pieza por la que inició el problema.

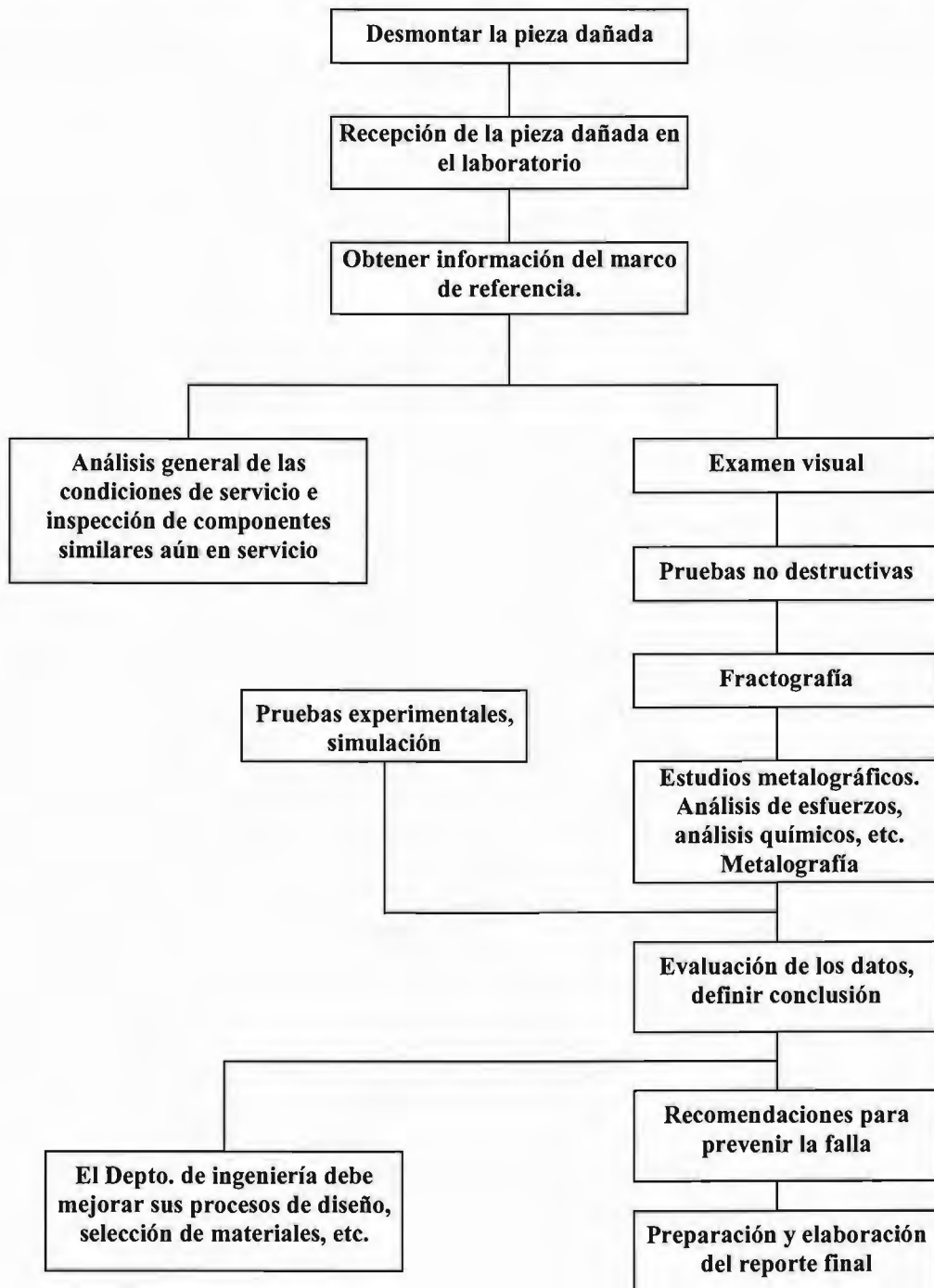


Figura 2.8 Secuencia de eventos recomendada para un proceso de AF (Cerrud *et al*, 2002).

Comentarios sobre la metodología de AF

El proceso de AF que solo se limita a explicar las causas de una cierta problemática, si bien puede resultar parcialmente útil, resulta incompleto ya que la importancia del AF radica en evitar que en lo futuro se presenten estos problemas. Es por tanto que el analista deberá de tener una gran precaución en explicar con detalle y alto grado de precisión, las causas del problema, debiendo además proponer soluciones que, técnica y económicamente, sean factibles.

Basándose en los resultados de la investigación el analista establece la secuencia para el AF, relacionando la falla principal con los efectos secundarios; define el mecanismo de falla, su origen propagación y causa. Una vez que las causas primarias de falla y los factores que contribuyeron se han definido y comprobado se proponen recomendaciones para la prevención de fallas semejantes o para la corrección de componentes similares que aún están en servicio.

Las conclusiones y recomendaciones que se desprenden de un estudio de AF deben llevar a la comprensión de los defectos que tiene el producto. Por lo tanto, con base en sus resultados se requiere de un esfuerzo de parte del departamento de ingeniería para mejorar las tecnologías actuales que son responsables de los inconvenientes. Esto es cada vez más imperativo, para garantizar la seguridad, eliminar paros de producción, reducir los costos de producción y en general mejorar la calidad de los productos.

En ciertas etapas de cada investigación, la evidencia que se revela en los estudios y los resultados de las pruebas, son reunidos y analizados para formular conclusiones preliminares. Obviamente muchas investigaciones no involucrarán evidencias claras, si la causa probable de falla es aparente en las primeras etapas del análisis, las investigaciones subsecuentes se dirigirán y hacia la confirmación de las causas probables y la eliminación de otras posibilidades. Algunas investigaciones seguirán una serie lógica de etapas, como las que se han destacado, y el objetivo en cada etapa determinará las investigaciones a seguir. Como vayan apareciendo nuevos hechos que modifiquen las primeras impresiones se irán desarrollando nuevas hipótesis de falla y deberán consolidarse o abandonarse de acuerdo a los nuevos hechos que se vayan encontrando. En los laboratorios donde se dispone de amplias facilidades, se hará un mayor esfuerzo para confirmar los resultados de pruebas mecánicas, análisis químico, fractografía y microscopía antes de la formulación de conclusiones preliminares. Finalmente, en aquellas investigaciones en las cuales la causa de falla es particularmente compleja, puede requerirse la revisión de literatura de reportes publicados relativos a sucesos similares para sugerir posibles indicios y soluciones.

Algunos de los trabajos ejecutados durante el curso de una investigación pueden juzgarse innecesarios. Es importante distinguir entre el trabajo que es innecesario y aquellos que no brindan resultados fructíferos. Durante un análisis debe esperarse que parte del trabajo realizado no ayude a determinar la causa de la falla, pero cuando menos una evidencia “negativa” pueda reorientar y obligar al análisis de algunas otras hipótesis que no fueron consideradas inicialmente. En otras palabras, cualquier tendencia a evitar trabajo esencial en una investigación deberá ser analizada cuidadosamente, ya que muchos resultados permiten descartar algunas hipótesis del estudio. En alguna instancia es posible formar una opinión observando la causa de falla en una etapa primaria de la investigación, tal como la inspección visual de una superficie fracturada o el análisis de una muestra metalográfica. Sin embargo, antes de plantear las conclusiones finales, se deberán buscar nuevos datos que confirmen la opinión original hasta donde sea posible. Las

conclusiones que puedan ser obtenidas de una simple muestra, pueden ser fácilmente modificadas a menos que se cuente con datos de fallas similares.

La siguiente lista está formada por una serie de preguntas, que sirven como auxiliar en el análisis de la evidencia derivada de los estudios y pruebas. Asimismo ésta representa una base en la formulación de conclusiones, a la vez de permitir la observación de detalles que en la investigación pudieran haber pasado desapercibidos:

- ⇒ ¿Se ha establecido de manera correcta la secuencia de eventos?
- ⇒ ¿Se han determinado los sitios de inicio de grieta?
- ⇒ ¿Las grietas se iniciaron en la superficie o abajo de ésta?
- ⇒ ¿El agrietamiento está asociado con un concentrador de esfuerzos?
- ⇒ ¿Qué tan grande es la grieta producida?
- ⇒ ¿Cuál fue la intensidad de carga?
- ⇒ ¿Cuál fue el tipo de carga: estática, cíclica o intermitente?
- ⇒ ¿Cuál fue la orientación del esfuerzo?
- ⇒ ¿Cuál fue el mecanismo de falla?
- ⇒ ¿Cuál fue la temperatura en servicio aproximada en el momento de falla?
- ⇒ ¿Contribuyó la temperatura a la falla?
- ⇒ ¿Contribuyó la corrosión a la falla?
- ⇒ ¿Qué tipo de mecanismo de corrosión contribuyó a la falla?
- ⇒ ¿El material utilizado fue el apropiado?
- ⇒ ¿Es requerido un mejor material?
- ⇒ ¿La calidad del material está de acuerdo a las especificaciones?
- ⇒ ¿La sección transversal fue adecuada para el tipo de servicio?
- ⇒ ¿Las propiedades mecánicas del material fueron aceptables de acuerdo a la pruebas?
- ⇒ ¿La pieza que falló fue tratada térmicamente en forma apropiada?
- ⇒ ¿La pieza que falló fue fabricada apropiadamente?
- ⇒ ¿La pieza que falló fue ensamblada e instalada apropiadamente?
- ⇒ ¿Se reparó alguna vez el componente, y si así fue, la reparación se realizó correctamente?
- ⇒ ¿El componente fue usado apropiadamente?
- ⇒ ¿En el componente se hizo el mantenimiento apropiado?
- ⇒ ¿Se lubricó en forma adecuada?
- ⇒ ¿La falla está relacionada con un abuso en servicio?
- ⇒ ¿Se puede mejorar el diseño del componente para evitar fallas similares?
- ⇒ ¿Existen componentes en servicio similares a los que fallaron?
- ⇒ ¿Se puede hacer algo para prever la falla?

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

2.6 HERRAMIENTAS Y TÉCNICAS AUXILIARES DEL ANÁLISIS DE FALLA

Una vez que se obtuvo suficiente información del contexto en que la pieza falló, el siguiente paso consiste en analizar la falla usando herramientas y técnicas apropiadas. En esta primera etapa se procede a realizar una observación a simple vista de la pieza y de la superficie de fractura, lo que permite obtener una visión general del problema. Para efectuar un examen macroscópico de la superficie de fractura es suficiente el empleo de un estereoscopio (50x o menor). La información recolectada de dicha observación es de gran valor para analizar la causa de falla ya que permite determinar:

- Naturaleza del origen de falla.
- Presencia y localización de concentradores de esfuerzos.
- Patrón de propagación de la fractura y secuencia de la falla.
- Modo y mecanismo de falla.
- Orientación de los esfuerzos.
- Presencia de imperfecciones que han contribuido a la falla.
- Presencia de contaminantes, ó evidencia de estos
- Dimensiones y datos físicos importantes.

Los aspectos relevantes se registran en imágenes digitales, fotografías y esquemas. Aparte del examen macroscópico de la superficie de fractura, en ocasiones se utilizan pruebas no destructivas como; líquidos penetrantes, ultrasonido, radiografía, partículas magnéticas, corrientes parásitas (*eddy*) y emisión acústica. Los cuales son empleados para revelar tanto defectos superficiales como internos.

El examen microscópico (metalográfico) de la muestra que falló permite al investigador comprobar la primera hipótesis con relación a las causas de falla; hipótesis que fue generada a partir de la observación a bajos aumentos. La microestructura provee información referente al tratamiento térmico, patrón de fractura, deformación, entre otros aspectos relevantes del componente. Es absolutamente necesario hacer una buena elección del espécimen no solamente para extraer la mayor cantidad de información sino también para revelar la razón exacta de la causa de falla. En todos los aspectos de la observación de la microestructura, se debe preparar previamente la superficie en estudio con el fin de observar ciertas características especiales, tales como líneas de flujo, inclusiones, porosidad, acabado superficial, etc., todo esto con auxilio de un microscopio metalográfico, o electrónico.

No obstante sus indudables ventajas, el microscopio óptico tiene limitaciones en lo que se refiere al aumento, resolución y profundidad de campo. Con el fin de superar estos inconvenientes se ha incrementado el uso del microscopio electrónico de barrido (SEM) debido a su poder de resolución y a su gran profundidad de campo. Si bien en algunos casos es conveniente el empleo del microscopio electrónico de transmisión (TEM), su mayor desventaja se debe a la necesidad de preparar las muestras por técnicas especializadas que representan mayor costo y tiempo (elaboración de réplicas). Por otra parte en el SEM se pueden estudiar las superficies de fractura directamente, sin preparación metalográfica (solo se requiere desengrasar). La gran profundidad de campo del SEM también permite observar vistas estereoscópicas, que son muy útiles para entender la topografía microscópica de una superficie de fractura.

El análisis químico del material se realiza en el SEM mediante el analizador de energía dispersa (EDAX). Los rayos X característicos que emite la superficie de la pieza son analizados ya sea por el método de energía dispersa o por longitud de onda, permitiendo determinar la composición en forma puntual o en una región de la superficie. Con el EDAX, las inclusiones, segregaciones, productos corrosivos o contaminantes que han contribuido a la falla pueden ser identificados fácilmente. La aplicación de software especializado facilita el análisis cualitativo y cuantitativo.

Además del análisis por microsonda, existen otras técnicas para el análisis de la superficie, dichos métodos son utilizados para detectar contaminantes o corrosivos en la superficie de fractura. La necesidad de este tipo de análisis surge cuando un componente falla debido a las condiciones de servicio, a la corrosión, corrosión-fatiga, corrosión bajo tensión, etc.

Propiedades Mecánicas.

Para el AF de elementos mecánicos es común la necesidad de conocer las propiedades mecánicas (resistencia máxima, esfuerzo de cedencia, ductilidad, etc.) de la pieza que ha fallado para así determinar si el material cumplía con las propiedades que fueron demandas por el diseñador. En la mayoría de los casos los datos requeridos se obtienen de un ensayo de tracción siendo también usual lo que se refiere a dureza y a tenacidad de fractura.

Mecánica de fractura.

Desde siempre los ingenieros han diseñado con base en la suposición de que los componentes son fabricados de manera ideal con materiales ideales. En la actualidad esta idea se ha modificado, ya que los estudios desarrollados en metalurgia y ciencia de materiales han demostrado que no existen materiales perfectos. Por esta razón siempre existirán defectos, sin importar qué tan bueno sea el diseño, el material y la fabricación de los componentes. Como no se pueden obtener materiales libres de defectos, la producción dentro de tolerancias cerradas es la meta tanto del diseñador como del fabricante. Por consiguiente, el concepto de factibilidad de falla en lugar de la filosofía de vida segura ha revolucionado el diseño. Sin embargo, se puede vivir con los defectos si existe una base racional para su evaluación y monitoreo. La mecánica de fractura juega un papel vital para estimar el tamaño crítico de grieta bajo el estado de esfuerzos, así como también para determinar el tamaño inicial de la fisura y las características de crecimiento subcrítico para diversos materiales. La mecánica de fractura está ganando terreno en el AF. Se emplea para determinar el tamaño de defecto que pudo haber causado la falla bajo ciertas condiciones, así como también para definir que tan críticos son estos, y para calcular la vida útil que le resta a un elemento en servicio, etc. Se usa en la prevención de fallas para asegurar el máximo tamaño de defecto que se puede tolerar, para establecer calendarios de inspección y para la elección de las técnicas no destructivas apropiadas para la inspección.

La mecánica de fractura es también importante en la predicción, prevención y análisis posterior a la falla por fenómenos de corrosión bajo esfuerzos y daño por hidrógeno, ya que en estos fenómenos, de forma equivalente a lo que sucede en fatiga, existe un valor crítico de intensidad de esfuerzo, por debajo del cual no hay crecimiento de la grieta debido a corrosión bajo tensión. Para todo esto es necesario conocer el valor de tenacidad de esfuerzo (K_{IC}), valor que se define a partir de una condición de esfuerzos planos en la punta de la grieta.

2.7 TÉCNICAS Y MÉTODOS PARA LA ORGANIZACIÓN FORMAL DEL CONOCIMIENTO EN ANÁLISIS DE FALLA

La pobre documentación, la organización inapropiada y la falta de acceso a la información de la falla son con frecuencia causas de subutilización de las experiencias sobre fallas anteriores. En la práctica, el espacio entre defectos aceptables e inaceptables puede ser reducido solamente con la experiencia en el servicio. En la actualidad se pueden efectuar cálculos, con auxilio de la computadora, que permiten determinar la velocidad de crecimiento de grieta o las condiciones de inestabilidad en estructuras complejas. Sin embargo, la incertidumbre en el diseño, con relación a las propiedades del material, condiciones de operación y el efecto del medio ambiente continúan complicando la confiabilidad del sistema bajo condiciones de trabajo reales. Por otra parte, el tiempo largo que se requiere para disponer de esta experiencia, demanda establecer estándares de seguridad y confiabilidad. En el pasado no se podía hacer uso de la experiencia acumulada con relación a las fallas que se habían presentado en el sistema o en sistemas similares en virtud de la mala organización de la información recopilada y a la falta de disponibilidad y acceso a la misma.

A la fecha al tener perfectamente estructurada la metodología del AF, tanto en lo que se refiere a las técnicas como al manejo de la información, se ha eliminado la problemática enunciada en el párrafo anterior, sin embargo, el analista siempre deberá tener en mente que lo más importante en un reporte de falla es la precisión que se tenga y la rapidez con que se entregue; por consecuencia, los cinco conceptos básicos que debe cumplir cualquier AF son: claridad, detalle, coherencia, totalidad y validez. Entonces, para el AF existe la necesidad de reportar y archivar datos de manera organizada, de tal forma que resulten sencillos de localizar, para que puedan ser utilizados por aquellos que tengan en lo futuro problemas similares. En la actualidad se utilizan técnicas para el manejo de la información, entre las más importantes están la matriz de experiencia de fallas, análisis de modo y efecto de falla, y el denominado árbol de fallas.

Matriz de experiencia de fallas (MEF)

Una forma de presentar de manera organizada la información de casos de falla es la denominada matriz de experiencia de falla (Cerrud *et al*, 2002; Dieter, 1991; Das, 1996). Esta matriz es un arreglo tridimensional obtenido al definir en un eje (x_1) funciones mecánicas elementales, los modos de falla en (x_2), y en (x_3) se presentan las acciones correctivas, como se muestra en la *figura 2.9*. De acuerdo con esto una celda en el espacio se define por modo de falla, función mecánica básica y acciones correctivas. Si un elemento mecánico que falló encaja en una de las celdas, entonces se tienen los detalles de las acciones correctivas y de su efectividad. La armada de Estados Unidos aplicó esta técnica para organizar la información de 500 partes de helicópteros que presentaron fallas, encontraron 105 funciones mecánicas elementales, 24 modos de falla y 35 acciones correctivas, (Dieter, 1991).

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

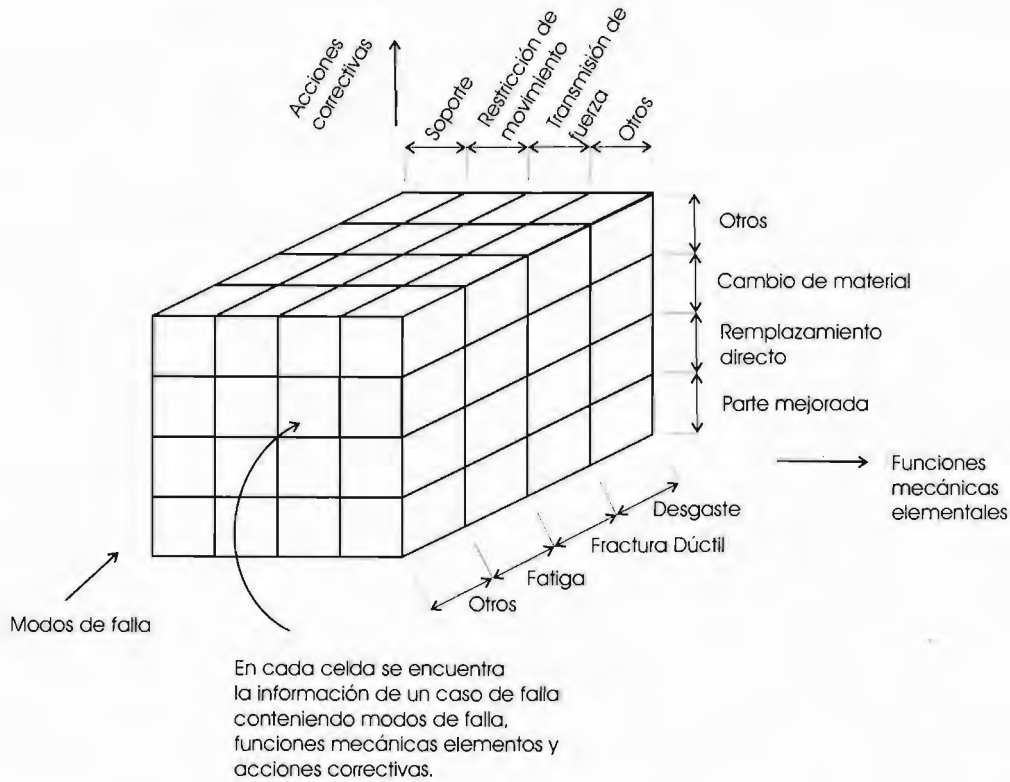


Figura 2.9 Matriz de experiencia de fallas

Análisis de modo y efecto de falla

Para determinar la confiabilidad de un producto se utiliza una técnica para identificar fallas potenciales (modos de falla) y sus efectos, (Cerrud *et al*, 2002; Doganaksov *et al*, 2002). Esta técnica sirve como herramienta para la evaluación del diseño y de ayuda para la evaluación de riesgo (se considera riesgo solamente si la consecuencia del evento es suficientemente severa). La falla mecánica se define como un cambio en el tamaño, forma o propiedades del material de un componente, ensamble o sistema que hace al producto incapaz de cumplir con la función para la cual se diseñó. Una falla puede ser el resultado del cambio en el sistema debido al deterioro (desgaste, degradación del material, fluencia, etc). o condiciones del medio ambiente (sobrecarga, efectos de la temperatura y corrosión). Si el deterioro o las vibraciones son tomadas en cuenta en el diseño, entonces el potencial para las fallas mecánicas es minimizado.

Esta técnica puede utilizarse a través de los procesos de desarrollo del producto y de la mejora de un producto existente. El método ayuda a identificar donde se hace necesaria la redundancia y en las fallas de diagnóstico después de que han ocurrido. El procedimiento de esta técnica consiste en identificar: la función afectada, los efectos de la falla sobre otras partes del sistema, modos de falla que afectan la función y la acción correctiva.

Árbol de fallas

Algunos autores como Louthan, (Das, 1996) han propuesto el empleo del árbol de falla, el cual provee directrices para realizar el AF en forma sistemática. Esta es una técnica gráfica que genera una descripción de la combinación de posibles eventos, que pueden resultar en una falla o situación indeseada. El árbol permite una evaluación cualitativa y cuantitativa. La primera

consiste en determinar las secuencias más cortas de eventos que podrían conducir a la falla. Las secuencias mínimas son útiles para propósitos de diseño con la finalidad de determinar los eslabones más débiles en el sistema. La evaluación cuantitativa del árbol de falla se realiza para determinar la importancia de diferentes eventos y secuencias que originan el problema bajo estudio, también se realiza para establecer la importancia que los diferentes eventos tienen en la secuencia que lleva a la falla del elemento.

2.8 ANÁLISIS SISTEMÁTICO DE FALLAS EN EJES

Un eje es un elemento mecánico, de forma cilíndrica y sólida, en algunas ocasiones hueco. Este elemento es utilizado para la transmisión de potencia o bien para la transmisión de movimiento. Casi toda la maquinaria rotatoria tiene ejes de transmisión debido a que las utilizan para transferir movimiento y par. En una máquina el eje transmite el par, el cual proviene de un dispositivo impulsor que puede ser, por ejemplo, un motor. También, en ocasiones los ejes son empleados como soporte para engranes, ruedas dentadas o poleas. Asimismo, dependiendo del tipo de maquinaria los ejes pueden estar montados en cojinetes de deslizamiento o antifricción (Metals Handbook, 1987).

La mayor parte de los ejes de máquinas se fabrican de barras de aceros de bajo o medio carbono, laminadas en frío o en caliente. Para el caso de que se requiera una mayor resistencia se producen a partir de aceros aleados. Si con el eje se funden a la vez engranes y otros dispositivos se utilizan fundiciones. Si el elemento estará en contacto con ambientes corrosivos se utilizan bronce o acero inoxidable. En diversas aplicaciones se les aplican tratamientos térmicos de temple superficial o volumétrico para incrementar su dureza y resistencia a la fatiga.

2.8.1 TIPOS DE FALLAS EN EJES

En su uso, los ejes pueden estar funcionando en una gran variedad de condiciones de servicio, sean ambientales o estados de esfuerzos. Se pueden mencionar por ejemplo tipos de atmósferas, temperaturas de trabajo, cargas de tracción, flexión, compresión, torsión o combinaciones de éstas. La clasificación de los tipos de fallas en ejes parte de considerar cuatro modos de falla: fractura, deformación, desgaste y corrosión (Tabla 2.8).

Tabla 2.8 Clasificación de fallas en ejes. (Metals Handbook, 1987).

Fractura	Deformación	Desgaste	Corrosión
a) Por fatiga b) Sobrecarga: Dúctil ó frágil c) Combinación dúctil-frágil	a) Distorsión permanente b) Termofluencia c) Pandeo	a) Abrasivo b) Adhesivo	a) Corrosion fatiga

2.8.2 FALLAS POR FRACTURA (Das, 1996; Felbeck y Atkins, 1996; Hull, 1999; Metals Handbook, 1987; Stahleisen, 1997).

a) Fracturas por fatiga

La fatiga es la causa más común de fallas en ejes. La fractura por fatiga inicia en el punto en donde exista una mayor debilidad del material; la presencia de cargas cíclicas se desarrolla hasta llevar a la falla al material y se genera una pequeña fisura. En estas fracturas se pueden distinguir dos regiones bien diferenciadas, una superficie pulida y otra fibrosa (granular). La primera, es la

zona de crecimiento de la grieta por fatiga, mientras que la segunda, es la región en donde el material ha fallado como resultado de una sobrecarga (figuras 2.10. y 2.11).

Las fracturas por fatiga se presentan en partes de maquinaria con una variación cíclica apreciable de los esfuerzos aplicados, produciendo con esto una superficie con el aspecto de una concha de almeja (figuras 2.12 y 2.13).

Normalmente la zona vulnerable donde comienza la fatiga es conocida como concentrador de esfuerzos, estos facilitadores de la falla son mecánicos, metalúrgicos o una combinación de ambos. Los concentradores mecánicos pueden ser filetes, discontinuidades, marcas de maquinado, cambios bruscos en la geometría del elemento y por lo general se pueden observar a simple vista. En cuanto a los concentradores metalúrgicos se tienen grietas de temple, picaduras por corrosión, inclusiones, defectos de soldadura, entre otras. 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

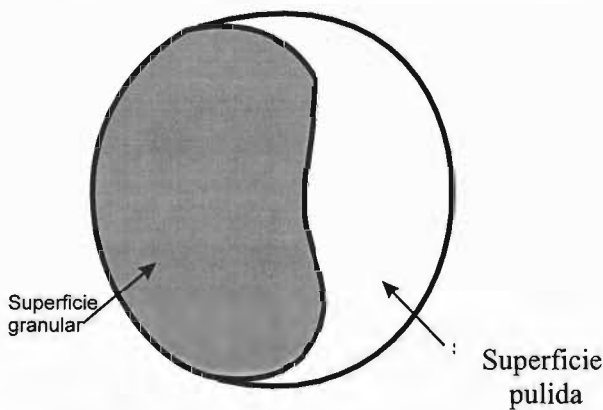


Figura 2.10 Representación esquemática de una superficie de fatiga. Se observan dos regiones; una zona pulida y otra con un aspecto rugoso (granular).



Figura 2.11 Imagen de la superficie de fractura de una barra de torsión de autobús (UDIATEM, 2004a). Se distinguen claramente las dos regiones (pulida y granular).

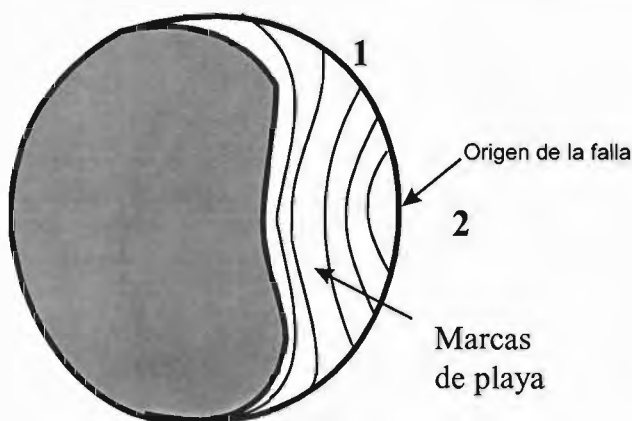


Figura 2.12 Representación esquemática de la región de aspecto concha de almeja.

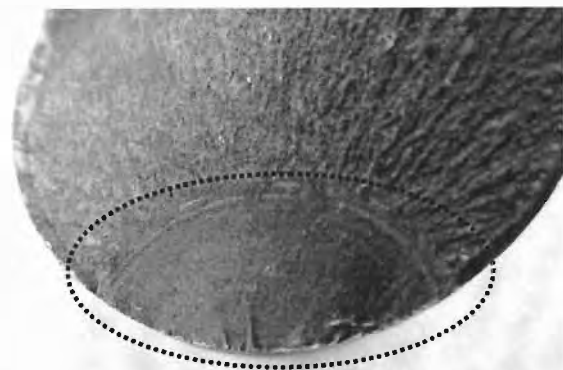


Figura 2.13 Imagen de la superficie de fractura de una barra de torsión de autobús (UDIATEM, 2004a). En el óvalo se muestra una zona típica de concha de almeja.

Fatiga por flexión unidireccional y bidireccional

Esta falla se presenta cuando el eje estuvo sometido a cargas que lo obligaron a flexionarse respecto a su eje normal de rotación. Este mecanismo tiene dos tipos *flexión unidireccional* y *bidireccional*, el *primero* se da cuando los esfuerzos son fluctuantes en cualquier punto del eje. Estos esfuerzos 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.

En la *figura 2.14* se muestran imágenes de marcas típicas de fatiga por flexión unidireccional cuando el elemento es sometido a diferentes condiciones de esfuerzos. En esta figura se observa que la fisura de fatiga se origina a partir de los puntos que indican con las puntas de flecha, sobre la fibra exterior más alargada, donde el esfuerzo es máximo y se desarrollan arcos de círculos que se aplanan a medida que la fisura se extiende, hasta llegar a convertirse, aproximadamente, en una recta sobre la fibra neutra.

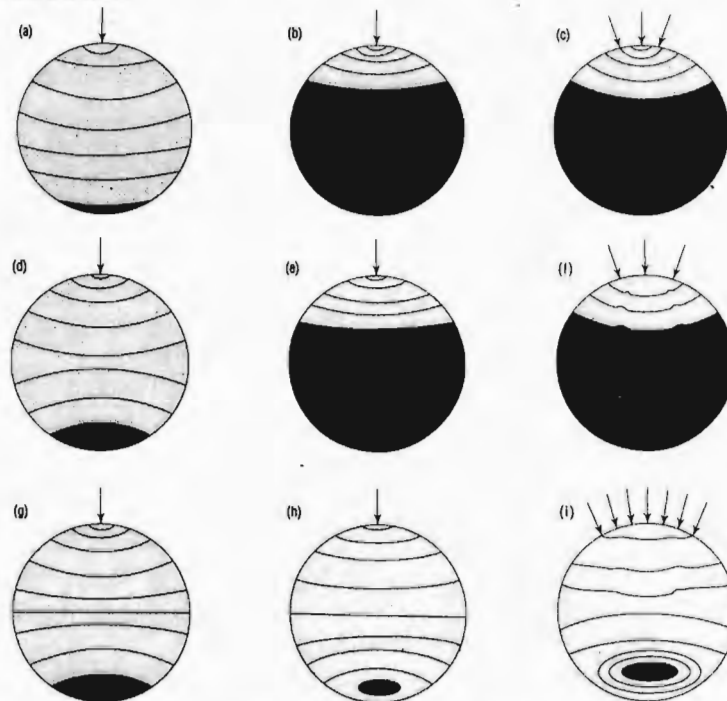


Figura 2.14 Representación esquemática de las marcas típicas de fractura en un eje sometido a fatiga por flexión unidireccional a bajos (a,d,g) y altos (b,c,e,f,h,i) esfuerzos nominales. La concentración de esfuerzos es reducida en (a,b,c), moderada (d,e,f) y severa (g,h,i), (Das, 1996; Metals Handbook, 1987).

En el caso de *flexión bidireccional*, el esfuerzo es alternante (en cualquier punto tiene cambios de magnitud y de signo, lo que demanda una sollicitación de flexión en un sentido y luego del otro dentro de un mismo plano. 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 fracturada y afecta la forma de un menisco cóncavo. En la *figura 2.15* se muestran las marcas típicas de fractura por flexión bidireccional.

Fatiga por flexión rotativa

La diferencia esencial entre un eje estacionario y uno que está rotando, sujetos a un momento flexionante de la misma magnitud, es que en el primero los esfuerzos de tracción se encuentran

confinados en la mitad de la sección transversal a partir del eje neutro, en el segundo estos esfuerzos, primero de tracción cambiarán a compresión en cada revolución, es decir se presentan esfuerzos alternantes. La magnitud de dichos esfuerzos depende de su posición en la sección así como del balanceo del eje. En flexión rotativa, la fractura por fatiga se produce igualmente en arco de círculo alrededor de un punto de la superficie (figura 2.16). La fisura progresa según una serie de arcos que tienen como punto de partida una pequeña elipse, cuyo centro es el origen de la fractura (Metals Handbook, 1987).

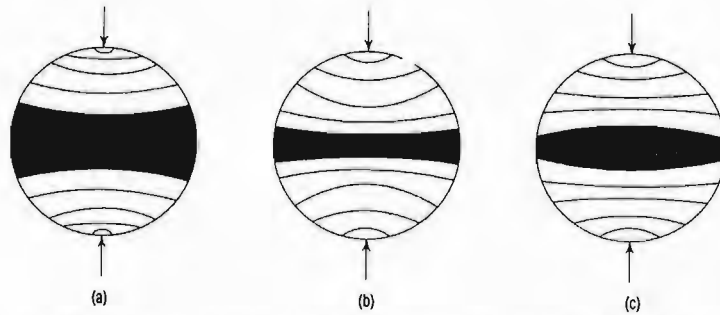
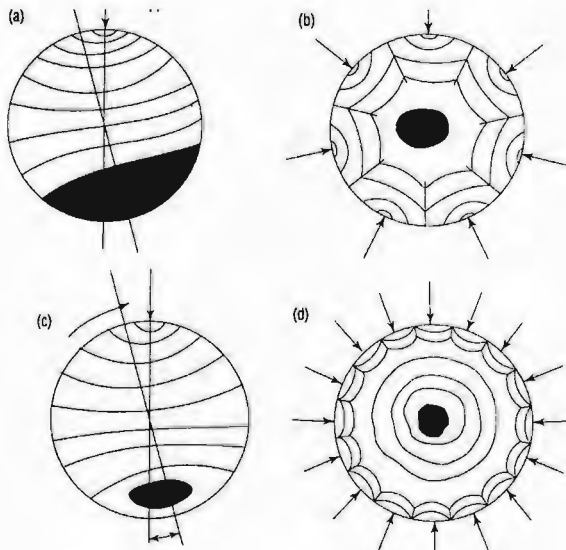


Figura 2.15 Representación esquemática de las marcas típicas de fractura en un eje sometido a fatiga por flexión bidireccional. El nivel de concentradores de esfuerzos son: reducidos(a), moderados (b) y severos en (c), (Das, 1996; Metals Handbook, 1987).

Cuando se trata de una sección entallada circularmente, la zona de fractura de fatiga se inicia sobre toda la circunferencia para dejar una zona de fractura final en el centro de la sección. Cuando la pieza se encuentra endurecida superficialmente, se observa que la fractura de fatiga nace debajo de la capa superficial endurecida. En la figura 2.17 se muestra el aspecto de una fractura por flexión rotativa.



2.16 Representación esquemática de las marcas generadas por fatiga a flexión rotativa. En (a) se tiene una concentración de esfuerzos moderada y en (b) es severa. (Das, 1996; Metals Handbook, 1987).

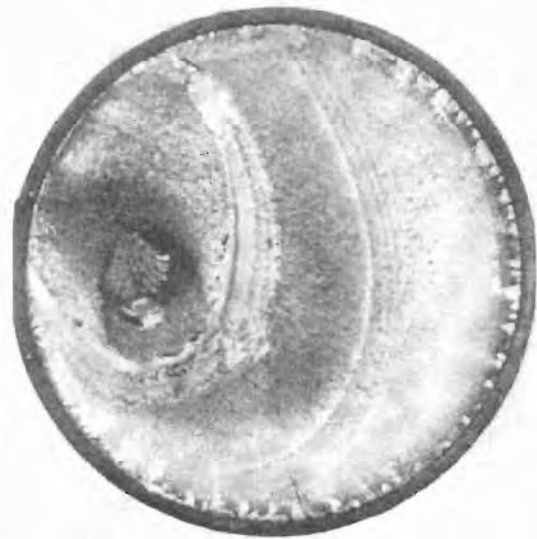


Figura 2.17 Aspecto de la superficie de fractura de una flecha de acero 1045 templado y revenido. El patrón concéntrico de las marcas de concha indica que la carga no estaba balanceada. (Stahleisen, 1997)

Fatiga por torsión

Las fracturas por cargas de torsión alternas aparecen rectas o a 45° , respecto al eje de rotación 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° (figura 2.18).

Cuando el árbol está entallado circularmente o presenta cuello, la fractura siempre es recta y algunas veces presenta un núcleo por fatiga de forma radial, constituido por caras dentadas. Este dentado recíproco de las superficies de fractura, tiene como efecto retrasar la fractura final. En las figuras 2.19 y 2.20 se muestran dos casos de fractura por fatiga a torsión



Figura 2.18 Fatiga por torsión, aspecto de zona de ruptura. Se trata de una barra de torsión de un autobús volvo (UDIATEM, 2004a). En este caso la fractura se presenta en la zona recta del eje, al nivel donde se encuentran los elementos de sujeción de la barra a la carrocería. La superficie es helicoidal



Figura 2.19 Eje de un acero 1060 que falló por fatiga a torsión. Las grietas de fatiga corrieron a partir de tres puntos en la superficie creciendo hacia el agujero de la pieza. (Stahleisen, 1997).



Figura 2.20 Fatiga a torsión. Vista longitudinal de un eje fracturado en servicio. Se trata de un acero con 0.15% de C, 1.12% de Mn y 0.98% de Cr. La grieta de fatiga se originó en la superficie siendo desviada paralela a las fibras del material, creciendo entonces en dirección longitudinal (Stahleisen, 1997).

b) Fracturas por sobrecarga

Esta fractura puede ser de tipo dúctil o frágil o bien una combinación de éstas. Lo anterior depende de la condición del material, geometría del elemento, tipo y velocidad de aplicación de la carga, así como de la temperatura. Existen diferentes características macroscópicas de la fractura por sobrecarga, éstas se dan en función del estado de esfuerzos y del tipo de material (dúctil o frágil). En las figuras 2.21-2.23 se muestran los patrones característicos de la fracturas por sobrecarga en un eje de materiales dúctil y frágil sometidos a esfuerzos de corte, tracción y torsión.

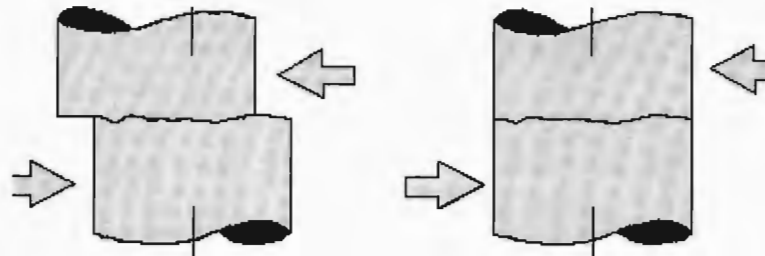


Figura 2.21 Geometría típica de una fractura por sobrecarga a cortante (Das, 1996).

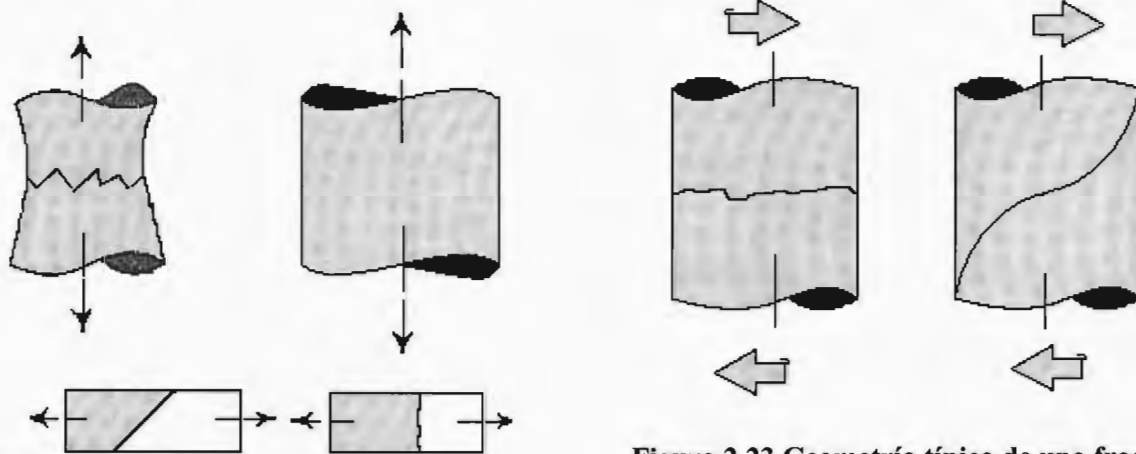


Figura 2.22 Geometría típica de una fractura por sobrecarga a tracción (Das, 1996).

Figura 2.23 Geometría típica de una fractura por sobrecarga a torsión (Das, 1996).

Fractura dúctil

Por lo general ocurre transgranular, es resultado de la dispersión de microcavidades en los metales con buena ductilidad y tenacidad. En forma regular este tipo de fracturas son causadas por sobrecarga, 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 normal aplicado, el crecimiento de microcavidades y el deslizamiento dan a la fractura dúctil características muy especiales, existen labios de deformación a 45° respecto al eje axial y se presenta una reducción en el diámetro del

eje. La superficie de fractura tiene una apariencia sedosa. 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. En la *figura 2.24* se muestra una imagen que muestra el patrón típico de copa y cono, característico de una fractura dúctil, mientras que en la *figura 2.25* se muestra una imagen de microscopía electrónica de barrido en donde se aprecian microcavidades.

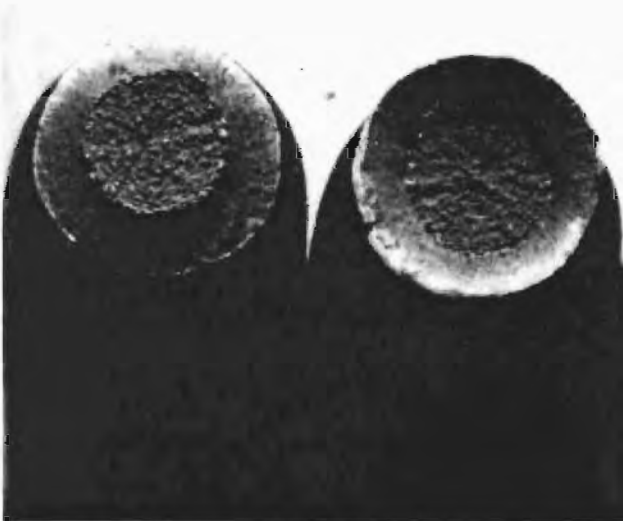


Figura 2.24 Fractura dúctil. Superficie de copa y cono (Cerrud *et al*, 2002).

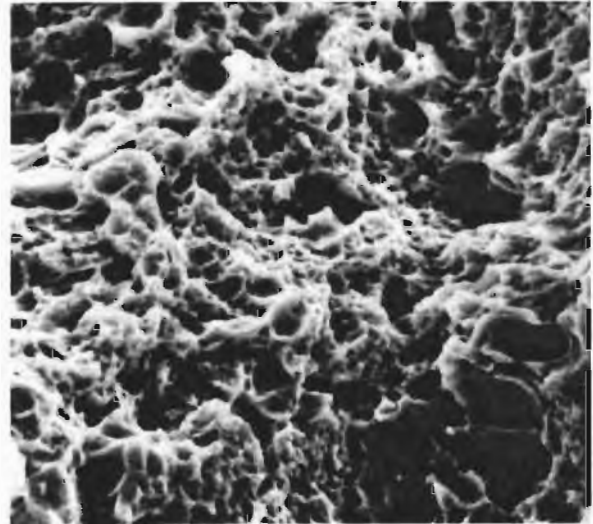


Figura 2.25 Fotografías de microscopio electrónico de una fractura dúctil que presenta microcavidades (*Dimples*) en un acero 1045 recocido (Stahleisen, 1997).

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. Se presenta 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 cuando son sometidos a grandes porcentajes de deformación. Estas fracturas están relacionadas con la inapropiada selección de los materiales como causa de la falta de conocimiento acerca de las condiciones ambientales y de operación para las que el eje se diseñó, también están relacionadas con una demanda excesiva del eje por parte del operador, exponiendo éste, a situaciones para las que no fue diseñado.

Las fractura frágil se presenta como resultado de la incapacidad de algunos materiales a deformarse plásticamente ante la presencia de solicitaciones elevadas. La velocidad a la que se desplaza la grieta (velocidad de desplazamiento de las ondas elásticas en el material) es del orden de 1800 m/s (Metals Handbook, 1987), en ocasiones existen evidencias de deformación en la región de inicio de la fractura así como presencia de marcas conocidas como patrones de chevron, que siempre están orientados hacia el punto donde se inició la fractura (*figura 2.26*).

Normalmente la grieta se propaga con mayor facilidad a lo largo de planos cristalográficos específicos, 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. 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 2.27). En las figuras 2.28-2.30 se presenta el caso de una fractura frágil en un semieje de un autobús (UDIATEM, 2004b), y se aprecian características morfológicas de este tipo de fractura.

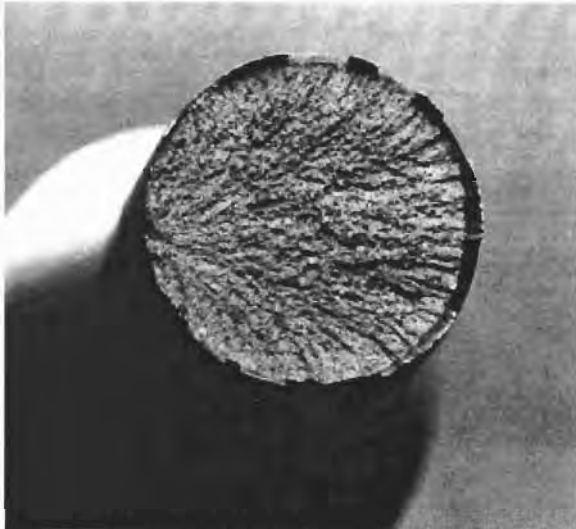


Figura 2.26 Marcas de chevron (Stahleisen, 1997).

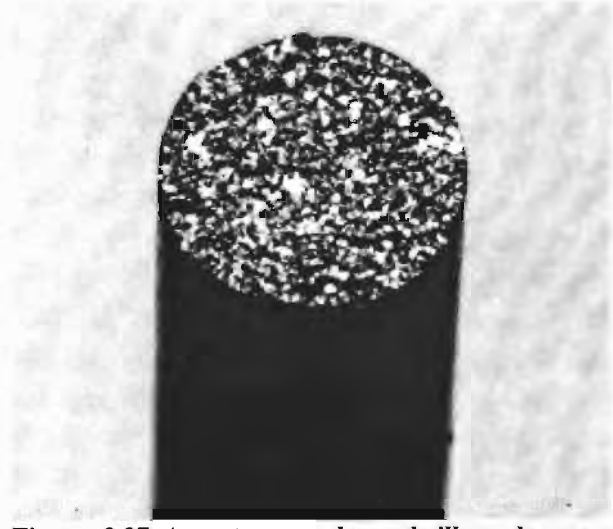


Figura 2.27 Aspecto granular y brillante de una fractura frágil. Se trata de acero de bajo carbono a -196°C sujeto a cargas de tracción (Stahleisen, 1997).



Figura 2.28 Zona de fractura del semieje de un vehículo de carga (UDIATEM, 2004b).



Figura 2.29 Sección del eje de la figura 2.28. El ángulo y características de la superficie de fractura corresponden a una falla frágil producto de la presencia de cortante puro (torsión) (UDIATEM, 2004b).



Figura 2.30 Detalle de la zona de fractura. Por la dirección de las marcas de Chevron la grieta corre de la zona superior derecha en dirección a la izquierda en la imagen (UDIATEM, 2004b).

c) Combinación de características de falla dúctil y frágil

En las figuras 2.31 y 2.32 se muestran imágenes donde se aprecia la morfología de fallas y se pueden observar la combinación de características de fractura dúctil y fractura frágil.

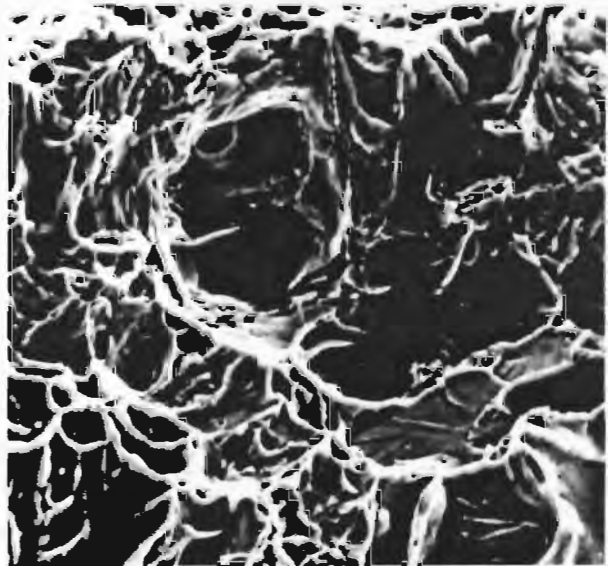


Figura 2.31 Superficie de una muestra con entalla de un acero 1025 en el que parte de la fractura es frágil y parte dúctil, mostrando zonas de microcavidades y de clivaje, en la imagen de microscopía electrónica se observa la zona de transición. (Stahleisen, 1997).



Figura 2.32 Superficie de una barra de acero con 0.35% C, 0.6% Mn, 1.89% Cr, 0.24% Mo, templada y revenida. La barra sufrió dos impactos sucesivos en la misma dirección. La grieta principal fue inducida por el primer impacto y la reacción elástica en el otro lado de la pieza dio inicio a una segunda grieta. En la superficie se observan las diferentes etapas del proceso de fractura, las cuales se pueden correlacionar con los ciclos de carga. (Stahleisen, 1997).

2.8.3 FALLAS POR DEFORMACIÓN

Distorsión permanente

Se presenta 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 deforma en forma excesiva y esto impide que pueda cumplir las funciones para las que fue diseñado, el endurecimiento por deformación, impedirá la fractura. Para evitar este tipo de falla, se debe incrementar el esfuerzo de cedencia, ya sea cambiando el material original del eje o aplicando algún tratamiento térmico.

Distorsión por termofluencia

La termofluencia se presenta 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. Este mecanismo puede ocurrir como resultado de cualquier tipo de carga y es común en ejes de turbinas de gas y motores de aviones (Metals Handbook, 1987). Para evitar la termofluencia en ejes y árboles es necesario usar materiales con alto punto de fusión, así como una adecuada definición de los parámetros de diseño para la vida de servicio de estos elementos.

Distorsión por pandeo

Esta falla se debe a una inestabilidad del eje respecto a los esfuerzos de compresión, es 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 otros cambios metalúrgicos resultan ilógicos.

2.8.4 FALLAS POR DESGASTE

Fallas por desgaste abrasivo

La falla del eje por este mecanismo se da 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. También algunas partículas como polvo, arena u otros elementos en el lubricante pueden causar el desgaste del eje.

Desgaste por contacto entre eje y cojinete

El desgaste por contacto entre el eje y los cojinetes, se da cuando la distancia o claro entre estos elementos desaparece, dando como resultado la remoción de partículas finas, este tipo de falla se presenta comúnmente en ejes de turbinas, generadores eléctricos, y compresores centrífugos. Para la prevención del desgaste entre ejes y cojinetes se puede realizar a través del cambio del material del eje, uso de cojinetes más blandos o cambio del aceite lubricante, eliminación de depósitos e impurezas en el lubricante o ampliar la superficie del claro formada por la película lubricante.

Desgaste adhesivo en ejes

Es el resultado de la unión de la interfase de dos metales similares (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, (Metals Handbook, 1987). 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 incrementando su vida útil.

2.8.5 FALLAS POR CORROSIÓN

Generalmente la corrosión se presenta como pequeñas picaduras ubicadas uniformemente en la superficie de los ejes, éstas remueven material y en ocasiones acarrear otros productos que las cubren. 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 iniciar. Es conveniente destacar que en la literatura se reporta a la corrosión bajo esfuerzos como un mecanismo promotor de las fallas en ejes, sin embargo en la vida práctica se presenta muy poco.

Corrosión-fatiga

Se produce por la acción combinada de la corrosión y ciclos de esfuerzo en los ejes. Este mecanismo involucra la formación de extrusiones e intrusiones en la superficie, que destruyen la capa protectora superficial (película de pasivación) en estos puntos y permite el ataque electroquímico, dando lugar a la formación de discontinuidades microscópicas. Estas discontinuidades actúan como muescas que favorecen la fractura por fatiga, pudiendo existir además un efecto de sinergia debido a la corrosión del material en la punta de la grieta. Con lo anterior la vida útil del elemento mecánico puede reducirse hasta en un 50%, con relación al fenómeno independientemente de la fatiga.

El proceso de falla por corrosión fatiga está compuesto por dos etapas. En la primera, la acción combinada de la corrosión y el esfuerzo cíclico daña el metal por picadura y se inicia una grieta. La segunda etapa es esencialmente una etapa de fatiga donde la grieta se propaga de una forma acelerada por la corrosión, y es controlada primordialmente por los efectos de corrosión bajo

esfuerzos y las propiedades del metal. A continuación se describen las características de este mecanismo:

- La superficie del metal presenta generalmente picaduras y las grietas se inician en el fondo de éstas.
- Las grietas son transcristalinas predominantemente y crecen en dirección normal al esfuerzo actuante.
- Las grietas son intercristalinas en aceros ferríticos (particularmente el acero con 13% de cromo) dependiendo de la intensidad del esfuerzo.
- Se inician y se propagan varias grietas simultáneamente.
- Las características de fractura son idénticas a las de falla por fatiga, con origen en la picadura de corrosión. No obstante, estas huellas son borradas muchas veces por la corrosión.

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 (Cerrud *et al*, 2002). Las zonas que primero se ven afectadas son los puntos de alta deformación, marcas, rayas, etc. Para evitar la fatiga por corrosión es necesario hacer una selección eficiente de los materiales que se utilizarán, estos 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.

Corrosión bajo tensión

En este caso el problema surge de la interacción de esfuerzos residuales o de las solicitaciones a las que está sometido el eje y la acción del medio ambiente. La corrosión bajo esfuerzos se manifiesta por la presencia de fisuras en el material, las cuales corren perpendiculares a los máximos esfuerzos normales. Este tipo de problema se caracteriza porque la fractura no necesariamente presenta depósitos producto de la corrosión. Esta combinación de efectos difiere en gran medida de los mecanismos de agrietamiento característicos a cada uno de los fenómenos por separado.

2.8.6 ANÁLISIS DEL ESTADO DE ESFUERZOS

En virtud de que el patrón de falla está en función del estado de esfuerzos al que se ve sometida la pieza y al criterio de falla que al caso aplique es primordial la determinación de las solicitaciones a las que está sometido el objeto, ya que esto permitirá determinar con precisión el tipo de falla. En el caso de fatiga la fisura corre perpendicular a los esfuerzos normales máximos. Por su parte cuando el material se comporta dúctil la falla es por cortante, razón por la cual las superficies que generan corresponden con las de máximo esfuerzo de corte. En el caso de que la falla sea frágil la fractura se presenta por normal máximo, por lo que las superficies que se generan son normales a éste. Para facilitar la determinación de las condiciones críticas se presentan en el *Anexo I* los análisis correspondientes a ejes que son sometidas a diferentes tipos de sollicitación

2.8.7 FUENTES DE FALLAS EN EJES

Las fallas en ejes son originadas por deficiencias en diseño, manufactura, materiales, ensamble, etc, bien por condiciones de servicio fuera de especificación o no previstas. Estas condiciones son conocidas como fuentes de falla en el sentido que de ellos provienen las fallas.

Fallas debidas a Diseño

Los cambios en los diámetros de los ejes provocan que se generen concentradores de esfuerzos. Los efectos de un cambio abrupto y de tres cambios de sección se muestran en forma esquemática en la *figura 2.33*. En esta imagen se puede observar en (a) el efecto de concentración de esfuerzos que se produce cuando se tiene un abrupto cambio de sección, en este caso se tiene un punto de alta concentración que provoca que el material se fracture. Si se analiza lo que ocurre en (b) y (c) se puede observar que el problema que se presenta en (a) se atenúa al tener un cambio menos abrupto. Finalmente en (d) se tiene un filete con un radio elevado el cual permite que las sollicitaciones se transfieran con mínimas restricciones.

Fallas debidas a la fabricación

Las discontinuidades producidas durante la manufactura, las reparaciones o los ensambles de un eje pueden representar puntos críticos de concentración de esfuerzos que provoquen la falla del elemento. En la manufactura se pueden generar marcas de la herramienta, rayas, elevados esfuerzos de tracción en la superficie debidos a la soldadura, electromaquinado, zonas de calentamiento irregular, en la forja líneas de flujo que no son paralelas a la superficie, descarburización por tratamiento térmico, esfuerzos residuales de compresión, defectos de maquinado, defectos debidos a un mal recubrimiento, etc. El manejo de los elementos en las operaciones de ensamble también puede provocar la generación de muescas que funcionen como concentradores de esfuerzos. En la *figura 2.34* se muestra una falla ocasionada por un mal ensamble de una barra de torsión de un autobús, el inicio de la fractura por fatiga coincide con una muesca que se generó por el apriete de tornillos sobre el elemento.

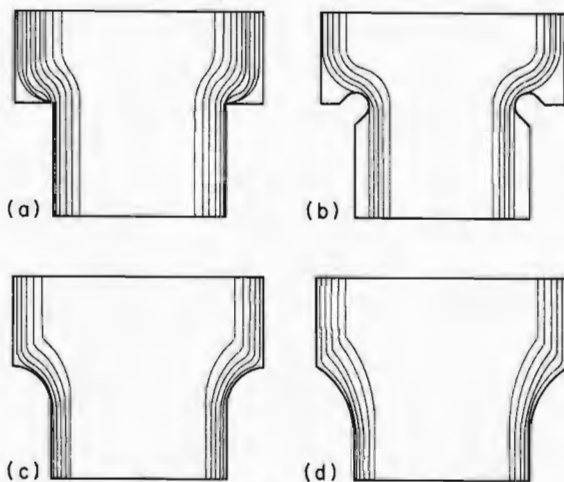


Figura 2.33 Efecto del tamaño del radio del filete sobre la concentración de esfuerzos en el cambio del diámetro en un eje. (Metals Handbook, 1987)

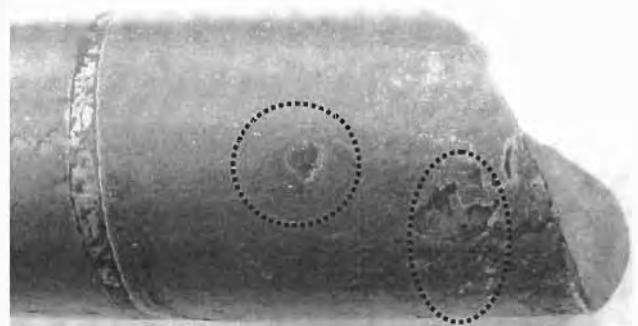


Figura 2.34 Imagen de la zona de fractura de la barra de torsión de un autobús. Resulta evidente el efecto de la presencia de elementos que realizan una presión puntual sobre la barra, se supone que esto es debido a condiciones de montaje. La grieta tiene su origen en la zona de indentación. No existe evidencia de movimiento relativo por que se considera que esta sujeción equivale a un empotramiento de la barra (UDIATEM, 2004a).

Fallas debidas al material

Las discontinuidades internas del material tales como porosidad, inclusiones, laminaciones, distribución de esfuerzos residuales, defectos de forja, etc. Estas imperfecciones pueden favorecer el crecimiento de una fractura o reducir la resistencia del material, ya que brindan sitios o zonas preferenciales para la propagación de la grieta al actuar como concentradores de

esfuerzo. En las *figuras 2.35 y 2.36* se observan dos características del material del semieje presentado en la *figura 2.28*. En la primera imagen se muestra la microestructura de la zona donde se localiza la zona de falla, en esta es evidente el bandeado que presenta el material, por otra parte en la segunda imagen se observa un defecto en el semieje.

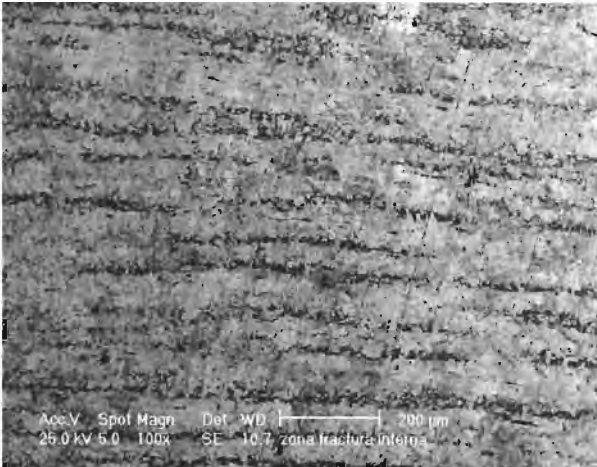


Figura 2.35 Microestructura de la pieza (*figura 6.19*) en una zona cercana a la grieta estudiada. Se observa la presencia de bandas muy pronunciadas. (UDIATEM, 2004b).

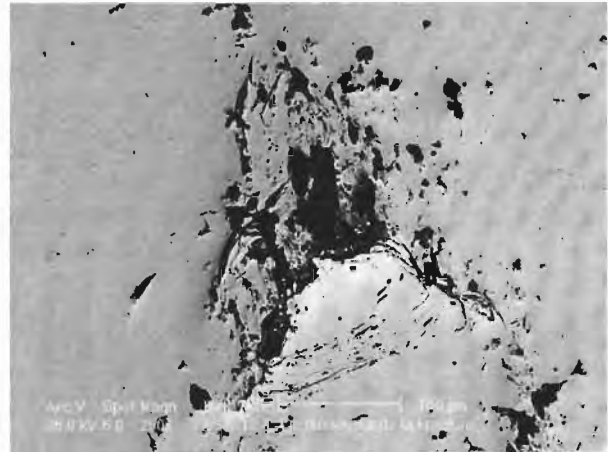


Figura 2.36 Defecto encontrado en el semieje fracturado en el lado del diferencial (a 3 cm. del extremo del eje). La morfología de este defecto indica que la materia prima ha sido sujeta a una deformación muy limitada después de su solidificación (UDIATEM, 2004b).

Otro problema relativo al material lo representa una inadecuada selección para una aplicación. La incorrecta selección del material se puede deber a una falla en la apreciación de las condiciones de operación (solicitaciones, condiciones de carga, medio ambiente), o también porque no se tomó en cuenta el método de manufactura a partir de la forma, dimensiones y aplicación de la pieza. Algunos problemas que se presentan en la selección de un material, y que posteriormente se traducirán en causas de falla son la inadecuada aplicación de los resultados provenientes de las pruebas mecánicas, o la falta de previsión con relación a las condiciones de servicio.

Capítulo 3. Sistemas Expertos

3.1. CONCEPTOS TEÓRICOS

La inteligencia artificial es la parte de la ciencia que se ocupa del diseño de sistemas de computación inteligentes. Es decir, programas que exhiben las características asociadas a la inteligencia en el comportamiento humano que se refieren a la comprensión del lenguaje, el aprendizaje, el razonamiento, la resolución de problemas (Castillo *et al*, 2003).

En la actualidad la inteligencia artificial presenta distintas áreas; SEs, demostración automática de teoremas, reconocimiento de voz y de patrones, procesamiento de lenguaje natural, visión artificial, robótica, redes neuronales, algoritmos genéticos, etc. Si bien los SE's representan una parte importante de investigación en esta área del conocimiento, es conveniente señalar que las otras aplicaciones de esta área disponen de una componente de SE's.

En la literatura se pueden encontrar múltiples definiciones de SE, a continuación se mencionan algunas:

“Los SE's son máquinas que piensan y razonan como un experto lo haría en una especialidad o campo. Un SE de verdad, no sólo realiza las funciones tradicionales de manejar cantidades grandes de datos, sino que también manipula esos datos de forma tal que el resultado sea inteligible y tenga significado para responder a preguntas incluso no completamente especificadas” (Stevens, 1984). “Un SE puede definirse como un sistema informático (hardware y software) que simula a los expertos humanos en un área de especialización dada” (Castillo *et al*, 2003).

Como síntesis de todas las definiciones existentes se tiene el siguiente concepto que sintetiza en forma concreta las coincidencias de diversos autores:

“Un SE es un programa de computadora que simula la forma en que resuelven problemas los expertos en una determinada área del conocimiento. Es decir, con los SE puede almacenarse el conocimiento de expertos en un dominio de especialización delimitado y solucionar problemas mediante la simulación de los procesos de razonamiento” (Cerrud, 2002).

El SE debe ser capaz de procesar y memorizar información, aprender y razonar en situaciones deterministas e inciertas, comunicarse con los usuarios, tomar decisiones apropiadas, y explicar por qué se han tomado tales acciones. Se puede plantear su capacidad como un colega que suministra ayuda a los expertos, brindando opiniones confiables.

El desarrollo o la adquisición de un SE implica costos que en lo general son elevados. Sin embargo, las erogaciones por concepto de mantenimiento y el costo marginal de su uso son relativamente bajas. Por otra parte, la ganancia en términos monetarios, de tiempo, y de precisión resultantes de su uso son importantes. Debido a esto es necesario, realizar análisis de factibilidad y/o de costo-beneficio.

Existen varias razones para utilizar SE's (Adedeji, 1993; Castillo *et al*, 2003). Las ventajas de su uso son las siguientes:

- *Autonomía.* Una vez desarrollado es independiente del experto y del desarrollador del sistema
- *Bajo costo de adquisición y de operación.* Disponer de un experto representa costos elevados en comparación con las erogaciones que representan el diseño, construcción y operación del SE
- *Diversidad de criterios.* El conocimiento puede ser resultado de la consulta a un grupo de expertos, éste puede combinarse, dando lugar a SE's más confiables. Lo anterior debido a que se obtiene un programa que combina el conocimiento colectivo de varios expertos en lugar de la de uno solo.
- *Facilidad de distribución.* Puede aplicarse en diferentes lugares por alejados que estén éstos.
- *Imparcialidad.* Los juicios emitidos son imparciales, aún si se opera con información ambigua
- *Manejo de gran cantidad de información.* Por la capacidad de almacenamiento de los sistemas de cómputo
- *Productividad.* El experto puede dedicar su tiempo a problemas cada vez más complejos. Los SE's pueden ser utilizados para realizar operaciones monótonas para los expertos del área.
- *Rapidez.* La velocidad de respuesta en ocasiones es mayor que la del experto. Los SE's pueden responder a preguntas y resolver problemas más rápido. Por esto, los sistemas son muy valiosos en casos en los que el tiempo de respuesta es crítico.
- *Reproducibilidad.* El sistema puede multiplicarse, debido a la facilidad de transmitir la información por vía magnética.
- *Respuesta a la escasez de expertos.* Con la ayuda de un SE, personal con poca experiencia puede resolver problemas que requieren conocimiento de un experto. Esto es también importante en casos en los que hay pocos expertos. Además, el número de personas con acceso al conocimiento aumenta con el uso de SE's.

El uso de los SE's se recomienda especialmente cuando:

- El conocimiento es difícil de adquirir o se basa en reglas que sólo pueden ser aprendidas por la experiencia.
- La mejora continua del conocimiento es esencial
- El problema está sujeto a reglas o códigos cambiantes.
- Los expertos representan costos elevados
- La disponibilidad de expertos es baja
- El conocimiento de los usuarios sobre el tema es limitado.

Tipos de SEs

Los problemas con los que pueden tratar los SE's pueden clasificarse en dos tipos: deterministas y estocásticos. Los de tipo determinista pueden ser formulados con un conjunto de reglas que relacionan varios objetos, éstos son conocidos como sistemas basados en reglas. En situaciones inciertas, es necesario introducir algunos medios para tratar la incertidumbre. Por ejemplo, algunos SE's usan la misma estructura de los sistemas basados en reglas, pero introducen una medida asociada a la incertidumbre de las reglas y premisas. Otra medida intuitiva de incertidumbre es la probabilidad, en la que la distribución conjunta de un conjunto de variables se usa para describir las relaciones de dependencia entre ellas, y se obtienen conclusiones usando conceptos básicos de la teoría de la probabilidad.

Por otro lado los SE's, se dividen, en cuanto a su tamaño, en tres clases generales:

1. *Asistente*. Realiza algunos procesos de una tarea experta.
2. *Colega*. Realiza parte de una tarea experta, auxilia en la solución de problemas.
3. *Experto*. Se acerca al nivel de desempeño de grupos expertos.

Participantes en el desarrollo de un SE

El equipo está compuesto por experto, ingeniero de conocimiento y usuario. El *experto* proporciona conocimientos especializados, el *ingeniero de conocimiento* es el enlace entre el experto y la computadora, éste plantea las preguntas al experto y estructura esa información en el sistema. Este profesional juega un papel crítico en la construcción del SE, ya que es el que construye el sistema. El *usuario* aporta sus deseos e ideas, determinando el escenario en el que debe aplicarse el SE. En la *figura 3.1* se muestra la interacción entre los diferentes participantes, la colaboración entre éstos requiere una enorme dedicación y un gran esfuerzo debido a los diferentes lenguajes y experiencias de las partes.

Es imperativo que un experto apropiado esté disponible para garantizar el éxito de un proyecto, el calificativo se aplica a la persona que cumple los siguientes requisitos:

- Posibilidad de resolver problemas en el dominio del tema. Existe la tendencia a crear SE que buscan resolver problemas que los expertos son incapaces de resolver.
- Disponibilidad. Se requieren de varias horas de principio a fin del desarrollo del prototipo y después para la conclusión del proyecto.
- Capacidad para describir el conocimiento y cómo debe aplicarse.
- Disposición de brindar su conocimiento, esto no es fácil ya que el conocimiento es escaso y por lo tanto valioso para la organización y para el experto.
- Buena reputación entre los usuarios potenciales del sistema. Si ése no es el caso, los usuarios futuros no lo aceptarán.
- Deben ser reconocido como una autoridad en la materia.

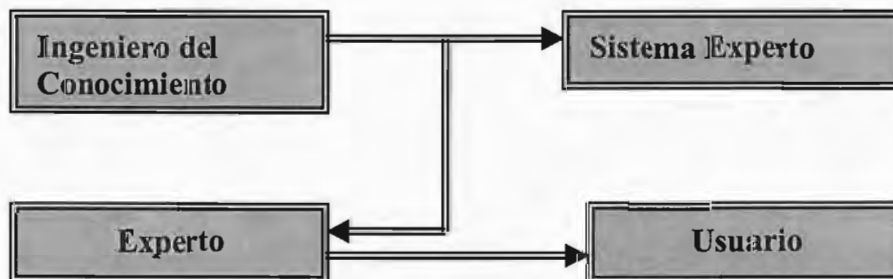


Figura 3.1. Interacción entre los participantes en la construcción de un SE

Componentes de un SE

El concepto de SE se entiende mejor cuando se estudian sus principales componentes, éstas se muestran en la *figura 3.2* y se describen a continuación:

Base de conocimientos: Contiene el conocimiento de los hechos y de las experiencias de los expertos. Para entender el concepto, es necesario diferenciar entre datos y conocimiento. Éste último se refiere a afirmaciones de validez tales como reglas, distribuciones de probabilidad, etc.,

mientras que los datos representan información relacionada con una aplicación particular. Mientras el conocimiento es permanente, los datos son transitorios, son destruidos después de usarlos. El conocimiento se almacena en una base y los datos en la memoria de trabajo

Mecanismo de inferencia:

En éste se simula el razonamiento que el experto aplica en la solución de algún problema. Es la unidad lógica con la que se extraen conclusiones de la base de conocimientos. Los razonamientos que efectúa se dan a través de la evaluación de reglas lógicas, y a partir de éstas se generan nuevas premisas.

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

a) *Encadenamiento hacia delante*. Se buscan en la base de conocimientos reglas para los hechos conocidos y se ejecutan. Este proceso se realizará tantas veces sea necesario hasta alcanzar el objetivo o que no existan reglas que aplicar. La base de conocimientos contiene algunas reglas y hechos conocidos. El objetivo es crear los hechos derivables de ello.

b) *Encadenamiento hacia atrás*. Se parte de un objetivo (hipótesis). Todas las reglas que contienen estas hipótesis son comprobadas, para ver si se cumplen las condiciones de estas reglas. La base de conocimientos contiene las mismas reglas y los mismos hechos que en el ejemplo del encadenamiento hacia adelante. El objetivo es la verificación de la hipótesis.

Componente explicativo

Explica al usuario la estrategia de solución y el por qué de las decisiones tomadas. Las soluciones descubiertas por los expertos deben ser repetibles tanto por el ingeniero en la fase de la comprobación como por el usuario. La exactitud del resultado podrá ser validada por el experto. El usuario puede pedir una explicación de las conclusiones obtenidas o de las acciones iniciadas por el SE. Por esta razón, es necesario contar con un subsistema que explique el proceso seguido por el motor de inferencia y la ejecución de las diferentes etapas.

Interfase de usuario

Representa el enlace entre el SE y el usuario. Sirve para que el usuario pueda realizar una consulta de la forma más sencilla posible. Este componente establece la manera en que se presentarán las preguntas al usuario. La interfase debe cumplir con lo siguiente:

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

Para que un SE sea una herramienta efectiva, debe incorporar mecanismos eficientes para mostrar y obtener información en forma sencilla y concreta. Ante la falta de información, la interfase de usuario es un vehículo para obtener la información del operador del sistema. Consecuentemente, una implementación inadecuada de la interfase de usuario que no facilite este proceso disminuye la calidad del SE.

Componente de adquisición

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

- El conocimiento, es decir ; reglas, hechos, las relaciones entre los hechos, etc.
- Posibilidad de presentación clara de la información contenida en la base de conocimientos.
- Comprobación automática de sintaxis.

Si el conocimiento inicial es muy limitado y no se pueden obtener conclusiones, el motor de inferencia utiliza el subsistema de adquisición de conocimiento para obtener el conocimiento necesario y continuar con el proceso de inferencia hasta que se hayan obtenido conclusiones.

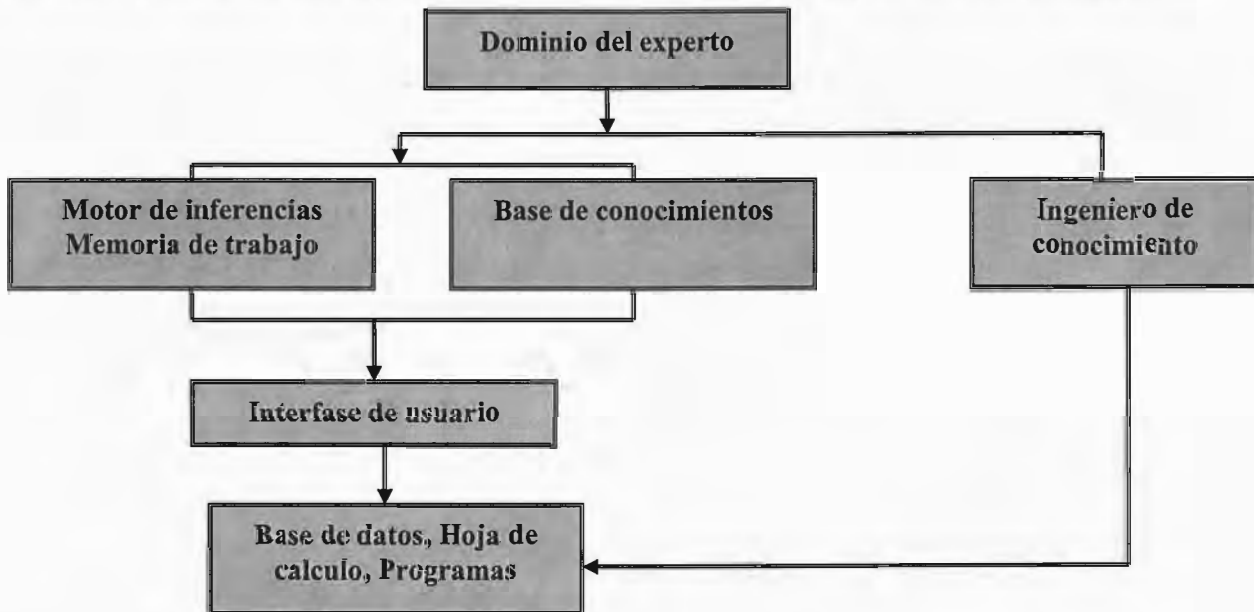


Figura 3.2. Integración de los componentes del SE

Shell: herramienta para el desarrollo de SEs

Es un programa que facilita la labor de implementación de los SE. La herramienta es muy amplia; contiene entornos de programación y otros sistemas auxiliares. Los elementos más importantes en un *shell* son:

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

La utilización de *Shell's* reduce el esfuerzo de desarrollo de un SE. La ventaja es que no se requiere el dominio de lenguajes de inteligencia artificial. Ningún *Shell* sirve para todas las aplicaciones, sino que hay que seleccionar el apropiado para cada tipo de problema.

Los inconvenientes de un *Shell* son:

- No puede ser la base de cualquier SE, sino que sólo es aplicable para determinados entornos.
- El desarrollador debe aprender el lenguaje y la lógica del *Shell* elegido.
- La introducción de funciones nuevas o de su modificación sólo es posible en *Shells* que ofrezcan interfases con un lenguaje de programación.

Consulta en SEs

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

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

En la consulta, al principio se plantean algunas preguntas generales para lograr una visión del contexto. La interacción que se produce al procesar los conocimientos del SE, desemboca en el verdadero diálogo con el usuario, orientado al objetivo. El diálogo por parte del sistema está a menudo dimensionado para ir confirmando o rechazando hipótesis. En el marco de este diálogo, el sistema realiza constantemente las acciones necesarias para alcanzar la solución del problema y explicar el estado del sistema. El programa se comporta como un experto:

- Plantea preguntas precisas
- Informa sobre los resultados intermedios y las hipótesis modificadas
- Determina el resultado, por ejemplo, un diagnóstico
- Justifica el resultado
- Explica (sólo a petición) también el rechazo de las hipótesis.

Una vez finalizado el diálogo, el componente explicativo suministra, si es necesario, la historia completa de la consulta. De esta manera es posible:

- Visualizar todas las entradas de información-
- Confrontar el resultado obtenido con otros resultados posibles.

El resultado alcanzado por el SE dependerá de la calidad de las respuestas del usuario. En general, el SE no puede comprobar la consistencia de las diferentes respuestas del usuario. Especialmente, cuando el usuario se ve obligado a realizar correcciones respecto a algún dato introducido con anterioridad, el sistema no puede determinar qué otras respuestas dadas y procesadas pueden estar afectadas. La responsabilidad de la consistencia de este entorno, recae naturalmente en el usuario y no en el sistema.

3. 2 METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE SISTEMAS EXPERTOS

En la *figura 3.3* se muestra la metodología general para el desarrollo de un SE.

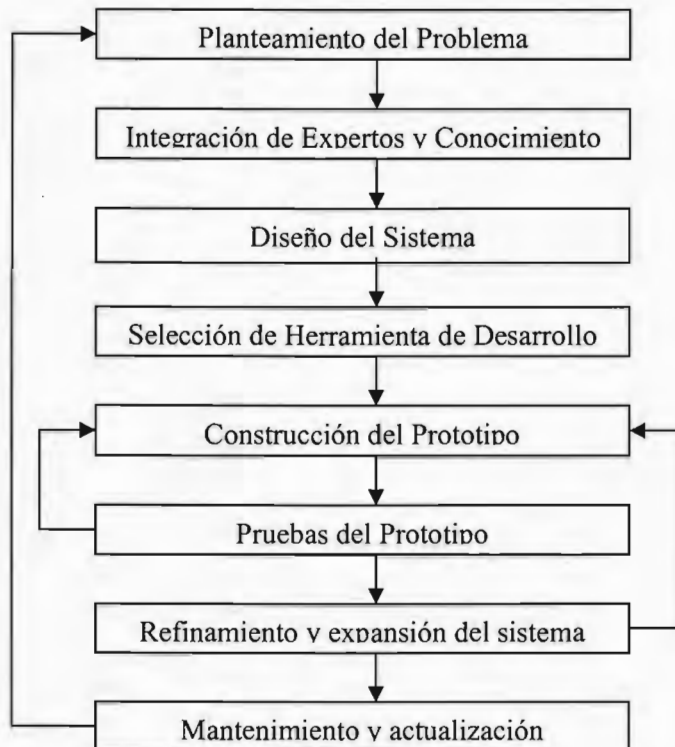


Figura 3.3. Etapas en el desarrollo de un SE

1. *Planteamiento del problema.* Debido a que el principal objetivo del SE es responder preguntas y resolver problemas, si está mal definido, suministrará respuestas erróneas.
2. *Integración de expertos y conocimiento.* Se integra el conocimiento a partir de dos fuentes principales; expertos en el área e información de la literatura, también se emplean bases de datos.
3. *Diseño del sistema.* Se diseñan estructuras para representación y almacenamiento del conocimiento, el motor de inferencia, el componente explicativo, la interfase de usuario, etc.
4. *Selección de la herramienta de desarrollo.* Debe decidirse si utilizar, un *shell* o un lenguaje de programación. La elección, no se da sólo por aspectos financieros sino también por aspectos de confiabilidad.
5. *Construcción y pruebas del prototipo.* Se requiere construir un prototipo con una base de conocimientos limitada, esto con la finalidad de validar los procesos definidos y probar su funcionamiento.
6. *Refinamiento y expansión del sistema.* Se corrigen las fallas del prototipo y se incluyen nuevas posibilidades no incorporadas en el diseño inicial. Realizado esto se procede a expandir el sistema.
7. *Mantenimiento y actualización.* El usuario plantea problemas o defectos, se corrigen errores y se actualiza el producto con conocimiento nuevo.

Construcción del prototipo y de su expansión

Existen tres fases fundamentales para el desarrollo del prototipo; adquisición del conocimiento, representación del conocimiento y construcción de la base de conocimientos (Castillo *et al*, 2003; Cerrud *et al*, 2000). A continuación se describen cada una de éstas.

Adquisición del conocimiento

Consiste en identificar los elementos que intervienen en la solución del problema (conceptos, procedimientos, reglas de inferencia, heurísticos, casos especiales, métodos de razonamientos, restricciones, etc.). La información puede obtenerse de distintas fuentes; diálogo directo con expertos, información escrita (libros, revistas, manuales, informes, etc.), datos empíricos de aparatos de medición, observaciones, datos gráficos (imágenes, diagramas, dibujos, etc.). A medida que se obtiene el conocimiento es necesario depurarlo, seleccionando los conceptos básicos que harán posible el funcionamiento del sistema.

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

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

En la práctica, la adquisición del conocimiento requiere buenos métodos, y sobre todo, habilidad y experiencia del diseñador. Ésta es sin duda la fase más compleja del ciclo y donde se requiere de todas las herramientas que existen, por ejemplo, para ayudar en tareas como: interrogar con habilidad y paciencia a los expertos en el área, extraer información de textos, clasificar y filtrar datos etc.

Es esta fase la que demanda una mayor cantidad de tiempo y se considera el cuello de botella debido a que se invierte entre un 60 y 70% del tiempo de desarrollo, además de ser la primera fase de la construcción del sistema, es una actividad neurálgica (Cerrud *et al*, 2000). Para realizar el proceso señalado se requiere de expertos que además de tener un alto nivel de conocimientos tengan la voluntad para involucrarse en las dinámicas que el ingeniero del conocimiento defina para recuperar la experiencia. Cuando esta etapa ha sido concluida es conveniente que, para la estructuración de las diferentes reglas y/o casos, se definan interfases de usuario a través de las cuales el sistema solicita información sobre el problema a resolver. Cuando ya se tiene definida la interfase, se procede a generar las reglas para el razonamiento del sistema.

Representación del conocimiento

Cuando el conocimiento se ha adquirido, el siguiente paso es transportarlo a la computadora, siendo conveniente utilizar estructuras que faciliten la discretización de éste. El conocimiento es de tipo simbólico, razón por la cual se utilizan estructuras lógicas tales como reglas de decisión, marcos, redes semánticas, etc. Las estructuras que mejor representan el conocimiento son las de control de decisiones, principalmente la IF-THEN-ELSE (Sí-entonces-de lo contrario), ésta se adapta a la representación de reglas de decisión, y posee una sintaxis que ayuda a interpretar, desde el código, la estructura de conocimiento a la que hace referencia.

Estructuración y construcción de la base de conocimientos

Dentro de los SE desarrollados se tienen una división que ha servido para distinguir entre los métodos de inferencia que los SE's utilizan para analizar y diagnosticar un posible resultado o consecuencia de ciertas premisas con las cuales el SE es alimentado. Así se tienen los llamados SE basados en reglas y por el otro lado los SE basados en casos. La base de conocimientos puede contener reglas o casos dependiendo del método de razonamiento seleccionado.

Técnicas y enfoques metodológicos

Con relación a las metodologías y aplicaciones de los Ses, Shu-Hsien (2005) presenta un estudio en donde identifica a partir de la revisión de la literatura de 1995 a 2004, las metodologías y aplicaciones de los SEs. Se tienen 11 categorías: sistemas basados en reglas, sistemas basados en el conocimiento, redes neuronales, SE mediante lógica difusa, metodología orientada a objetos, razonamiento basado en casos, arquitectura de sistemas, agentes inteligentes, metodología de bases de datos, modelado y ontología. En el *cuadro 3.1* se describe en síntesis lo que refleja el estudio, se indica metodología, descripción y las aplicaciones desarrolladas. A partir de esta revisión, se observa que se ha diversificado el desarrollo de metodologías y aplicaciones de los SE. Del estudio se puede concluir (1) las metodologías de SE tienden a desarrollarse de acuerdo con las características del conocimiento experto del área específica. (2) Se sugieren metodologías especiales para el área de las ciencias sociales. (3) Existen aplicaciones específicas resueltas por distintas metodologías como el caso de diagnóstico y AF.

3.3 SISTEMAS BASADOS EN REGLAS

Estos representan una herramienta eficiente para tratar problemas de tipos determinista, o en aquellos en que se puede representar la incertidumbre a través de factores de certeza (Castillo *et al*, 2003). La base de conocimiento contiene el conjunto de reglas que definen el problema, y el motor de inferencia obtiene las conclusiones aplicando lógica clásica.

En este tipo de sistemas intervienen dos elementos importantes: la base de conocimiento y los datos. Los primeros están formados por la evidencia o hechos conocidos de una situación particular, este elemento es dinámico y se almacena en la memoria de trabajo. La información almacenada en la base de conocimiento es de naturaleza permanente y estática, es decir, no cambia de una aplicación a otra, a menos que se incorporen al SE elementos de aprendizaje.

En situaciones deterministas, las relaciones entre un grupo de objetos pueden ser representadas mediante un conjunto de reglas. El conocimiento se almacena en la base de conocimiento y consiste en un conjunto de objetos y de reglas que gobiernan las relaciones entre los objetos.

Las reglas relacionan dos o más objetos y está formada por las partes siguientes:

- La premisa de la regla, que es la expresión lógica entre las palabras clave *si* y *entonces*. La premisa puede contener una o más afirmaciones objeto-valor conectadas con operadores lógicos AND, OR, o NOT
- La conclusión de la regla, que es la expresión lógica tras la palabra clave *entonces*.

Cuadro 3.1 Metodologías de SEs

Metodología	Descripción	Aplicaciones
Sistemas basados en reglas (SBR)	Un SBR contiene información obtenida de expertos, y representa la información en forma de reglas, tales como IF-THEN-ELSE. Las reglas pueden usarse para llevar a cabo operaciones sobre datos para realizar inferencias y llegar a conclusiones apropiadas.	Tratamiento psiquiátrico, planeación de producción, consultas médicas, mantenimiento, programación de estrategias, valuación de fraudes, diagnóstico de fallas , diseño de procesos de manufactura, nanotecnología, planeación en agricultura y sistemas tutoriales.
Sistemas basados en el conocimiento (SBC)	Los cuatro componentes principales de un SBC son conocimiento base, medio de inferencia, herramientas auxiliares e interfase de usuario. Por otro lado, El término SBC incluye toda la información organizada de aplicaciones tecnológicas que pueden aportar ayuda para administrar el conocimiento en una organización. SBC es un concepto más amplio que los SBR de hecho un SBR es un SBC.	Tratamiento médico, planeación y análisis financiero, AF , administración de producción, toma de decisiones, representación del conocimiento, diseño de dispositivos electrónicos, pronóstico de clima, protección ambiental, tratamiento de aguas, control de procesos, diseño de robots y diseño urbano.
Redes neuronales (RN)	Una red neuronal artificial es un modelo que simula una red neuronal biológica. El concepto es utilizado para simular procesos paralelos interconectados en una arquitectura de redes. La neurona artificial recibe entradas que son análogas a los impulsos eléctricos entre neuronas biológicas. La salida de la neurona artificial corresponde a las señales enviadas desde una neurona biológica. Estas señales artificiales pueden cambiar en forma similar a lo que sucede en neuronas biológicas.	Diagnóstico de fallas , flujo óptimo de energía, toma de decisiones, sistemas de alarma, sistemas de diagnóstico, máquinas de aprendizaje, diseño de instalaciones, control de procesos, sistemas robotizados, tratamiento de residuos, análisis de señales acústicas, destilación de petróleo y aplicaciones biomédicas.
SEs mediante lógica difusa (SELD)	Esos sistemas están desarrollados usando el método de lógica difusa, la cual se muestra con incertidumbre. Esta técnica, la cual usa la teoría matemática de conjuntos difusos, simula los procesos de razonamiento de un ser humano normal permitiendo a la computadora que se comporte menos precisa y lógica que las computadoras convencionales.	Inventarios, planeación ecológica, sistemas de control, diagnóstico de fallas , tratamiento de aguas, pronóstico de suministro de agua, clasificación radiográfica, selección de hoteles, consultas y diagnóstico médico, búsqueda de empleo, seguridad de computadoras.
Metodología orientada a objetos (MOO)	La MOO combina dentro de un objeto datos junto con los procedimientos específicos que operan sobre estos datos. En lugar de pasar a procesar datos, el programa envía un mensaje a un objeto para llevar a cabo un procedimiento que esté disponible para ejecutarse en éste. Entonces, el mismo mensaje es enviado a muchos objetos diferentes, pero cada uno implementará el mensaje de diferente manera. Los datos de un objeto se encapsulan desde otras partes del sistema, así cada objeto es un bloque de construcción independiente del software que puede utilizarse en muchos sistemas diferentes sin cambiar los códigos de programa	Diagnóstico industrial, redes de información de manufactura, mantenimiento de sistemas de generación de energía, programación sintáctica y representación del conocimiento.
Razonamiento basado en casos (RBC)	La idea básica del RBC es adaptar soluciones que fueron utilizadas para resolver problemas previos y usar éstas para resolver nuevos problemas. En RBC, se describen las experiencias de especialistas humanos, representándose como casos, que se almacenan en una base de datos para posteriormente ser recuperadas cuando el usuario encuentre un nuevo caso de parámetros similares. El sistema busca en casos almacenados problemas con características similares para el nuevo, obteniendo las más apegadas, y aplica las soluciones del viejo caso al caso nuevo. Soluciones exitosas son identificadas para el caso nuevo y ambas se almacenan juntas con los otros casos en la base del conocimiento.	Diseño de procesos de manufactura, AF , aplicaciones médicas, aprendizaje en línea y modelación del conocimiento, selección de materiales.
Modelación (MOD)	La modelación es una metodología interdisciplinaria de SE debido a la construcción de la relación formal con el diseño del modelo lógico. Modelar tecnología puede aportar métodos cuantitativos para analizar datos para representar o adquirir conocimiento experto con programación lógica inductiva, algoritmos y otros campos de investigación.	Control de procesos, análisis médico, toma de decisiones, evaluación de software, diseño de terminales de transporte y asignación de proyectos
Arquitectura de sistemas (AS)	La arquitectura de sistemas de un SE es similar a un plano de una casa. La arquitectura muestra capacidades del sistema; interfases de usuario, funciones, flujo de datos, administración, lenguaje de programación, etc.	Diseño ergonómico, implementación de sistemas ISO, aplicaciones militares, simuladores de entrenamiento, configuración de embarcaciones.
Agentes inteligentes (AI)	Un AI es un programa de computadora que ayuda al usuario con las tareas de rutina de computadora. Esta es una nueva tecnología, y como tal tiene varias definiciones., varios de los nombres utilizados para describir AI son agentes de software, genios, y multiagentes.	Sistemas tutoriales, análisis y diseño de sistemas, mantenimiento electrónico, control de contaminación del aire, simulación industrial, e ingeniería del conocimiento en la plataforma WWW
Ontología (ONT)	La ontología es un concepto fundamental para describir el conocimiento tarea/dominio a ser identificado. Este concepto es usado como base de comunicación entre el dominio de los expertos y los ingenieros del conocimiento. En consecuencia, un modelo reusable tarea/dominio puede representarse y un programa código de computadora es generado en esta ontología para la adquisición del conocimiento.	Apoyo en decisiones médicas, reutilización del conocimiento, valuación del medio ambiente, adquisición del conocimiento, y en la heurística del ajedrez
Metodología de base de datos (MBD).	Un MBD es el software que permite una organización centralizada de datos, administrarlos eficientemente, y aportar accesos a los datos almacenados para programas de aplicación. Las metodologías modernas de bases de datos necesitan procesar grandes volúmenes, múltiples jerarquías, y diferentes formatos de datos para descubrir conocimientos expertos en profundidad a partir de grandes bases de datos.	Planeación de sistemas de energía, sistemas de información geográfica, interpretación de sedimentos de rocas y diagnóstico médico

Lo anterior permite definir el concepto de regla:

“Una regla es una afirmación lógica que relaciona dos o más objetos e incluye dos partes, la premisa y la conclusión. Cada una de estas partes consiste en una expresión lógica con una o más afirmaciones objeto-valor conectadas mediante los operadores lógicos Y, O, o NO.”

Una regla se escribe normalmente como "Si *premisa*, entonces *conclusión*". En general, la premisa y la conclusión de una regla, pueden contener afirmaciones múltiples objeto-valor. Una expresión lógica que contiene sólo una afirmación objeto-valor se denomina *expresión lógica simple*; en caso contrario, la expresión se dice *expresión lógica compuesta*. Una regla que contiene solamente expresiones lógicas simples se denomina una *regla simple*; en otro caso, se llama *regla compuesta*.

Características del motor de Inferencia

Existen dos tipos de elementos: los datos (hechos o evidencia) y el conocimiento (el conjunto de reglas almacenadas en la base de conocimiento). El motor de inferencia usa ambos para obtener nuevas conclusiones o hechos. Por ejemplo, si la premisa de una regla es cierta, entonces la conclusión de la regla debe ser también cierta. Los datos iniciales se incrementan incorporando nuevas conclusiones. Por esta razón tanto los hechos iniciales o datos de entrada como las conclusiones derivadas forman parte de los hechos o datos de que se dispone en un instante dado.

Las conclusiones pueden clasificarse en dos tipos: simples y compuestas. Las primeras son las que resultan de una regla simple. Las compuestas son las que resultan de más de una regla. Para obtener conclusiones, los expertos utilizan diferentes tipos de reglas y estrategias de inferencia y control, por el motor de inferencia para obtener conclusiones simples y compuestas.

Tipos de reglas

- Modus Ponens
- Modus Tollens
- Resolución

Estrategias de inferencia

- Encadenamiento de reglas,
- Encadenamiento de reglas orientado a un objetivo,
- Compilación de reglas

Las dos primeras reglas de inferencia se usan para obtener conclusiones simples, mientras que la tercera y las estrategias son para obtener conclusiones compuestas. Ninguna de las estrategias anteriores, si se implementan solas, conduce a todas las conclusiones posibles. Por esta razón, deben implementarse varias reglas y estrategias en el SE para que el motor de inferencia sea capaz de obtener la mayor cantidad de conclusiones posible.

Modus Ponens y Modus Tollens

Modus Ponens es la regla más utilizada, se usa para obtener conclusiones simples. En esta, se examina la premisa de la regla, y si es cierta, la conclusión pasa a formar parte del conocimiento. Por ejemplo (*figura 3.4*), si se tiene la regla, "Si *A* es cierto, entonces *B* es cierto" y sabiéndose además que "*A* es cierto." Entonces, la regla Modus Ponens concluye que "*B* es cierto." Esta regla de inferencia, que parece trivial, debido a su familiaridad, es la base de un gran número de SE's.

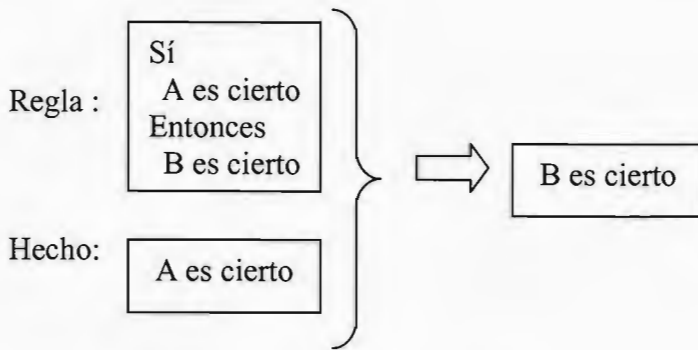


Figura 3.4. Ilustración de la regla de inferencia Modus Ponens.

Modus Tollens se utiliza también para obtener conclusiones simples. En este caso se examina la conclusión y si es falsa, se concluye que la premisa también es falsa. Por ejemplo, supóngase la regla (figura 3.5), "Si *A* es cierto, entonces *B* es cierto" pero se sabe que "*B* es falso." Entonces, utilizando la regla Modus Ponens no se puede obtener ninguna conclusión, pero la regla Modus Tollens concluye que "*A* es falso." Aunque muy simple y con muchas aplicaciones, la regla Modus Tollens es menos utilizada que la Modus Ponens.

Modus Ponens se mueve hacia adelante, es decir, de la premisa a la conclusión de una regla, mientras que Modus Tollens se mueve hacia atrás, de la conclusión a la premisa. Las dos reglas de inferencia no deben ser vistas como alternativas sino como complementarias. Modus Ponens necesita información de los objetos de la premisa para concluir, mientras que Modus Tollens requiere información sobre los objetos de la conclusión.

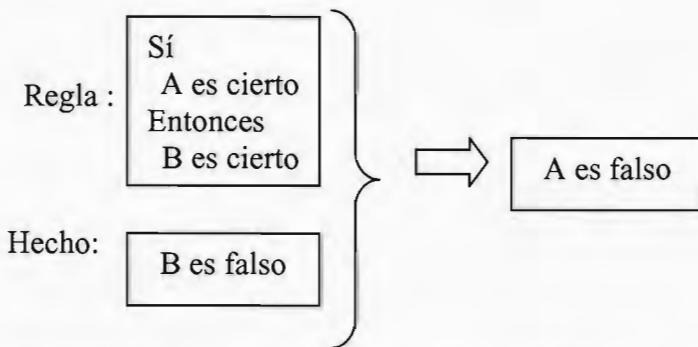


Figura 3.5. Ilustración de la regla Modus Tollens.

Mecanismo de Resolución

Las reglas Modus Ponens y Modus Tollens pueden ser utilizadas para obtener conclusiones simples. Por otra parte, las conclusiones compuestas, que se basan en dos o más reglas, se obtienen usando el llamado mecanismo de resolución. Este consiste en lo siguiente:

1. Las reglas son sustituidas por expresiones lógicas equivalentes.
2. Estas expresiones lógicas se combinan en otra expresión lógica.
3. Esta última expresión se utiliza para obtener la conclusión.

Tratamiento de la incertidumbre

En los sistemas basados en reglas la incertidumbre se puede manejar mediante factores de certeza o bien mediante el empleo de la probabilidad. El conocimiento de un SE basado en reglas consiste en los objetos y el conjunto de reglas., mientras que el basado en la probabilidad consiste en el espacio de probabilidad, que incluye las variables, sus posibles valores, y su función de probabilidad conjunta. Por otra parte, los datos de ambos enfoques consisten en la evidencia asociada a los casos a analizar.

La base de conocimiento en los SE's basados en reglas es fácil de implementar, puesto que sólo es necesario utilizar elementos simples, tales como objetos, conjuntos de valores, premisas, conclusiones y reglas. Sin embargo, el conocimiento que puede ser almacenado es limitado cuando se compara con el de los SE's basados en probabilidad. Un inconveniente de los SE's probabilísticos es el alto número de parámetros que manejan, lo que hace que sea difícil su especificación y definición. En los SE's basados en reglas las conclusiones se obtienen de los hechos aplicando las diferentes estrategias de inferencia, tales como Modus Ponens, Modus Tollens y encadenamiento de reglas. Por esta razón, el motor de inferencia es rápido y fácil de implementar. En los SE's basados en probabilidad, el motor de inferencia es más complejo que en el caso de los basados en reglas.

3.4 RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS

Los sistemas de RBC son programas que utilizan situaciones ocurridas con anterioridad (denominadas casos) para identificar soluciones existentes, adaptar esas soluciones a los problemas actuales y explicar situaciones semejantes. Esta técnica está basada en la forma en que los expertos razonan con base a la experiencia, éstos tiende a tomar decisiones sobre nuevas situaciones con base en sus experiencias o las de otros. Un sistema de RBC funciona de manera inteligente buscando casos similares al que se pretende solucionar, en una base que contiene soluciones a problemas de un campo de conocimiento delimitado.

La metodología de RBC se puede resumir en cuatro pasos, que son conocidos como las cuatro R's (Kolodner, 1993; <http://www.cbr-web.org>):

- Recuperar el o los casos más parecidos al problema actual pertenecientes a una base de casos. Para esto, se ocupan atributos, fórmulas para medir la similitud y una biblioteca de índices.
- Reutilizar la información y el conocimiento de dicho caso o casos para resolver el problema que se presenta.
- Revisar la solución propuesta y adaptarla, si es necesario.
- Retener la solución adaptada, agregando un nuevo caso a la base, es así como un sistema de RBC aprende.

Esta metodología y la interacción entre los elementos de un sistema RBC se presentan en la *figura 3.6*.

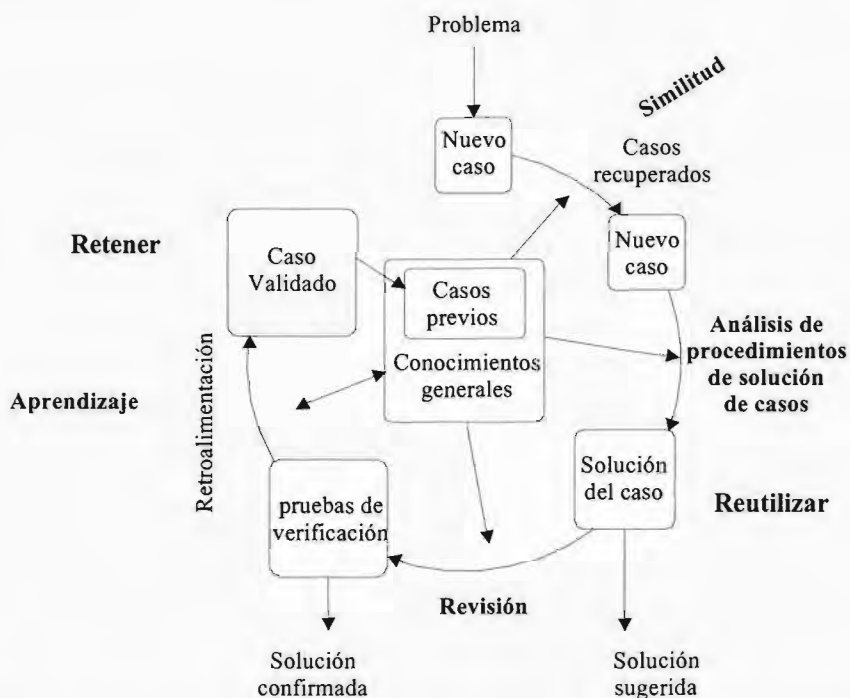


Figura 3.6. Proceso de razonamiento basado en casos (Kolodner, 1993)

Los sistemas de RBC son una alternativa a los SE's basados en reglas. Para construir un SE basado en reglas tiene que intervenir un ingeniero del conocimiento como intermediario entre el sistema y el experto; y modelar en forma de reglas el razonamiento de los expertos. El conocimiento es complejo y poco disponible, es complicado que el experto defina la relación de cientos de reglas que aplica para solucionar los problemas en su campo de estudio. Por lo anterior, del proceso de adquisición se generan reglas que en ocasiones son incorrectas o incompletas por que el experto se ve forzado a expresar sus razonamientos en un formato discreto (reglas deductivas), que se aleja del procedimiento que sigue para solucionar un problema. Por otro lado, el RBC busca modelar el proceso de razonamiento considerando casos que contiene experiencias dentro del campo de conocimiento.

Frente a otros campos de la inteligencia artificial, los sistemas de RBC presentan las siguientes ventajas:

- No requieren un modelo de dominio de conocimiento tan rígido ni tan explícito como lo podría necesitar un SE basado en reglas
- Se pueden manejar grandes volúmenes de información.
- Pueden aprender y mejorar su propio desempeño con sólo ampliar la base de casos.
- La construcción de prototipos es rápida.

Sin embargo, los sistemas RBC presentan las siguientes desventajas:

- La ponderación de atributos es un problema difícil de resolver por el experto. Debido a esto, se recurre a métodos matemáticos.

- Requieren de una base de casos robusta para poder brindar soluciones a problemas de todo tipo, no existe un número óptimo en cuanto a la cantidad de casos que se deben tener almacenados.
- Si no existen casos similares al del usuario en la base, no existirán tampoco resultados.

Elementos de un sistema de RBC

Estos sistemas constan de cuatro elementos (figura 3.7): base de conocimiento, biblioteca de índices, medidas de relevancia, módulo de explicación (Kolodner, 1993; <http://www.cbr-web.org>). La representación del conocimiento, esta inmersa en la base de conocimientos.

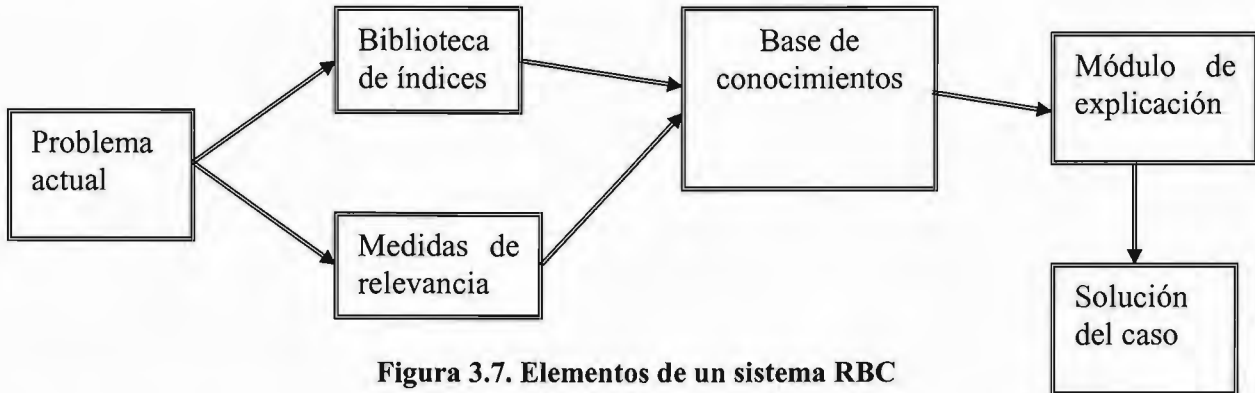


Figura 3.7. Elementos de un sistema RBC

Base de conocimientos

Es una base de casos históricos que contiene problemas y sus soluciones. Se diseña para almacenar conocimiento y experiencia sobre algún tema. Contiene teorías, principios y procesos de solución de problemas.

Biblioteca de índices

Para realizar la búsqueda de casos similares, es conveniente establecer un conjunto de índices que permita seleccionar casos históricos utilizando características relevantes de los mismos. Los índices determinan los casos que serán elegidos, evitan hacer un barrido completo de la base de casos.

Medidas de relevancia

Una vez que se acotó la región de búsqueda en la base, seleccionando casos similares, es necesario medir la similitud entre los casos históricos y el caso actual. Existen diversas maneras de medirla; una es usando la distancia *euclidiana* y otra mediante la distancia de *Hamming*:

$$SIM(X, Y) = 1 - DIST(X, Y) \tag{3.1}$$

$$SIM(X, Y) = 1 - \sqrt{\sum (w_i^2 * dist(x_i, y_i)^2)} \text{ (Euclidiana)} \tag{3.2}$$

$$SIM(X, Y) = 1 - \sum_i w_i * dist(x_i, y_i) \text{ (Hamming)} \tag{3.3}$$

Para el caso de valores continuos, se puede obtener la distancia utilizando los valores de variable física o propiedad. Sin embargo, hay atributos que toman valores lógicos que son: "igual",

"distinto" o "desconocido"; por ejemplo, en el AF es muy común que los atributos tomen estos valores. Existen varias teorías para medir la distancia, las cuales son exhibidas en la *tabla 3.1*. Se incluye el manejo del valor de "inexistente" o "desconocido".

Tabla 3.1. Diversos criterios para manejar valores frecuentes de atributos, x, y representan el valor lógico del mismo atributo de dos casos distintos.

(Dist.)	Motivo
0	Igual
1	Diferente
$\frac{1}{L} \left(1 - \frac{1}{L} \right)$	Si x o y son desconocidos. L es el número de valores discretos que puede tener un atributo, ecuación de (Agré, 1997).
0.5	x o y son desconocidos. (Ricci y Avesani, 1998).
dist(x,y)=0	Si ambos valores son desconocidos.
dist(x,y)=1	Si un valor es conocido y el otro desconocido (Surma y Vanhoof, 1999).

La efectividad de la medida de la similitud depende de una buena asignación de pesos a los atributos. Dado que asignar pesos es una tarea compleja para el experto, se utilizan métodos estadísticos.

Módulo de explicación

Permite justificar y explicar el análisis completo del problema y las soluciones propuestas. Este módulo debe ser diseñado prácticamente por el experto

3.5 RAZONAMIENTO BAJO INCERTIDUMBRE

Tratamiento de la incertidumbre en SE's, (Adedeji, 1992; Castillo et al, 2003; Diez, 2004; Ignizio, 1991).

El manejo de la incertidumbre representa uno de los puntos críticos de la inteligencia artificial. En particular, es una de las propiedades especiales de los SE's, y a la vez una de las más complejas, algunos autores lo denominan razonamiento aproximado.

El primer método numérico que surgió para el manejo de la incertidumbre fue el probabilista. En el siglo XVIII, *Bayes* y *Laplace* propusieron la probabilidad como una medida de la creencia personal. A principios del siglo XX surgen las interpretaciones de la probabilidad como la frecuencia (a largo plazo) asociada a situaciones o experimentos repetibles; en esta línea, destacan especialmente los trabajos estadísticos de *Fisher*. En los años 1930's, al enfrentar problemas de diagnóstico médico, era inevitable tener que tratar la incertidumbre, y en esa época la única técnica disponible, aún con todas sus limitaciones, era el método probabilista clásico (*Bayes*). Con él se construyeron los primeros sistemas de diagnóstico médico. No obstante, el método probabilista clásico presentaba dos inconvenientes principales: el primero, era la dificultad de obtener las probabilidades condicionales necesarias para construir modelos y en la mayoría de los casos, se recurrió a estimaciones subjetivas, las hipótesis eran poco verosímiles, sobre todo la de independencia condicional.

El éxito obtenido por el SE para análisis químico DENDRAL desarrollado por Lederberg en 1965, considerado como el primer SE, mostró las ventajas de la programación mediante reglas.

Por esto, los creadores de MYCIN (Buchanan y Shortliffe) buscaban un método de computación eficiente que pudiera adaptarse al razonamiento mediante encadenamiento de reglas. Los problemas de los métodos probabilistas para encajar en este esquema llevaron a los responsables del proyecto a desarrollar un método propio, consistente en asignar a cada regla un factor de certeza. Los logros del MYCIN fueron importantes, pues en un campo tan complejo y tan incierto como el de las enfermedades infecciosas, fue capaz de conseguir diagnósticos y recomendaciones terapéuticas al menos tan buenos como los de los mejores expertos de su especialidad. Una aplicación exitosa del uso de la probabilidad como medida intuitiva de la incertidumbre, es el caso del SE PROSPECTOR creado por Duda, Gaschnig, y Hart en 1979, que utiliza el teorema de Bayes para la exploración de mineral.

Cuando los creadores de MYCIN investigaban a principios de los 1980s como corregir problemas del método de factores de certeza, apareció el uso de las redes bayesianas, modelo probabilista inspirado en la causalidad, cuya virtud principal consiste en que lleva asociado un modelo gráfico en que cada nodo representa una variable y cada enlace representa un mecanismo causal.

En paralelo con esta evolución histórica de crisis y resurgimiento de la probabilidad, se desarrolló la teoría de los conjuntos difusos, frecuentemente llamada lógica difusa. La motivación inicial no fue el estudio de la incertidumbre, sino el estudio de la vaguedad, que es algo diferente. Por eso, la brillante idea de Lofti Zadeh, considerado como el padre de la lógica difusa, consiste en permitir que el grado de pertenencia a algunos conjuntos sea un número entre 0 y 1. Lamentablemente, el punto más débil de la metodología es la carencia de una definición operativa que permita determinar objetivamente el grado de pertenencia, con lo que la teoría es débil desde su nacimiento.

Es importante señalar que, mientras las redes bayesianas y la lógica difusa son temas de gran actualidad, el método probabilista clásico y el modelo de factores de certeza se consideran temas poco interesantes desde el punto de vista de la investigación. Sin embargo, el debate sobre cuál es el método más adecuado para representar la incertidumbre sigue abierto. Por un lado, está el grupo de los bayesianos que defienden que la teoría de la probabilidad es el único método correcto para el tratamiento de la incertidumbre (Castillo et al, 2003; Diez, 2004). Por otro, están quienes señalan que los modelos probabilistas, a pesar de sus cualidades, resultan insuficientes o inaplicables en muchos problemas del mundo real, por lo que conviene disponer de métodos alternativos.

Fuentes de incertidumbre

Estas se pueden clasificar en tres grupos; deficiencias de información, características del mundo real y deficiencias del modelo. En el campo de la medicina es donde se presentan todos los tipos de incertidumbre, y es en éste donde se han desarrollado más aplicaciones de SE's. Como ya se mencionó el ejemplo clásico es el SE MYCIN el cual está orientado al diagnóstico médico. Por tanto, la medicina resulta un área conveniente para estudiar las características de la incertidumbre. En este sentido, se pueden identificar los siguientes puntos:

Información incompleta. En ocasiones, la historia clínica no está disponible o es incompleta, y el paciente no es capaz de recordar todos los síntomas que ha experimentado y cómo se ha desarrollado la enfermedad. En otros casos, las limitaciones prácticas impiden contar con todos

los medios que deberían estar disponibles, por lo que el médico debe realizar su diagnóstico con la información que posee, aunque ésta sea muy limitada.

Información errónea. Algunas veces, la información proporcionada por el paciente puede ser incorrecta e inclusive trate de mentir al médico. También se puede presentar que un diagnóstico anterior, haya sido erróneo. Asimismo, tampoco es extraño que las pruebas de laboratorio den información falsa..

Información imprecisa. Existen datos que son difíciles de cuantificar, tal es el caso de síntomas como dolor o fatiga.

Mundo real no determinista. A diferencia de las máquinas, los médicos comprueban a diario que cada ser humano es un mundo, en que las leyes generales no siempre se aplican. En muchas ocasiones, las mismas causas producen efectos diferentes en distintas personas, sin que haya ninguna explicación aparente. Por esta razón, el diagnóstico médico debe estar siempre abierto a admitir la aleatoriedad y los casos de excepción.

Modelo incompleto. Existen fenómenos médicos cuya causa aún se desconoce. Por otro lado, es frecuente la falta de acuerdos entre los expertos de una misma especialidad. Finalmente, aunque toda esta información estuviera disponible, sería prácticamente imposible, incluirla en un SE.

Modelo inexacto. Todo modelo que trate de cuantificar la incertidumbre, por cualquiera de los métodos que existen, necesita incluir un elevado número de parámetros. Por ejemplo, en el caso de las redes bayesianas, se requieren especificar todas las probabilidades *a priori* y condicionales. Sin embargo, una gran parte de esta información no está disponible, por lo que debe ser estimada de forma subjetiva. Es deseable, que el método de razonamiento empleado pueda tener en cuenta las inexactitudes del modelo.

Para el caso de AF se observa que las características de esta área son muy similares al problema del diagnóstico médico y se presentan todos los tipos de incertidumbre que se han descrito para el caso de la medicina. En la práctica, cuando el analista de fallas se enfrenta a un problema, en muchas ocasiones, no se cuenta con la historia de la falla, entiéndase condiciones de servicio, información del contexto, del material, etc. Por otro lado, también ocurre que la información que se proporciona es errónea, por esta razón es necesario realizar pruebas de laboratorio que permitan ubicar más características sobre el problema y poder encaminarse a obtener una solución confiable. Algo similar a esto último ocurre cuando se presenta información cuantificable imprecisa, lo que hace obligatorio realizar ensayos que permitan estimar los parámetros de interés. Asimismo, aunque en el AF se presentan situaciones deterministas en la mayoría de los casos la aleatoriedad esta presente. Por otro lado, si se plantean modelos para resolver los problemas de AF, debido a la complejidad del conocimiento involucrado, siempre se presentará el inconveniente de la falta de exactitud de estos y en el sentido estricto no será posible que se cuente con toda la información, más bien, a medida que el sistema resuelva más casos y se robustezca, podrá proporcionar soluciones más confiables, debido a la experiencia acumulada.

3.6. SISTEMAS INTELIGENTES PARA ANÁLISIS DE FALLA

Existen algunos desarrollos orientados a la solución de problemas de AF mediante el uso de la inteligencia artificial. Para el caso específico de fallas de elementos mecánicos se han desarrollado algunos sistemas, pero no han sido comercializados. Es decir, solo se han empleado para cuestiones de educación e investigación. También existen diversas aplicaciones sobre fallas de otros elementos y sistemas. Los sistemas que se analizaron se presentan ordenados en cuanto al grado de importancia para este proyecto de tesis.

Sistema de RBC para la identificación de mecanismos de falla

En el Departamento de ingeniería industrial y sistemas de manufactura de la Universidad de Louisiana se desarrolló este sistema utilizando Microsoft Access para archivar la base de casos históricos y Visual Basic para construir los algoritmos de búsqueda del software (Liao, 2000; Liao *et al*, 1999). El programa es capaz de determinar el mecanismo de falla de un caso nuevo, utilizando su base de casos y medidas de relevancia, para esto puede distinguir entre dos tipos de casos: los comunes y los excepcionales. Si se encuentra un caso excepcional, se realiza una búsqueda secundaria. Los desarrolladores incluyeron un módulo con algoritmos genéticos diseñado para encontrar la ponderación que se debe dar a los distintos atributos de los casos para encontrar la similitud total, el módulo es capaz de obtener generaciones de ponderaciones cada vez mejores.

El sistema está orientado a las fallas de elementos metálicos mecánicos y se especializa en usar casos anteriores para determinar el mecanismo de falla, no las causas de falla. Establecen este enfoque debido a que las causas de falla pueden ser muy abundantes. El sistema opera con 15 mecanismos, y tiene una base de datos con 477 casos.

En la operación al activar la búsqueda se entra a una pantalla donde están clasificados distintos grupos de atributos, esto sirve para definir las características del problema a solucionar. Una vez realizado esto es cuando el sistema comienza la búsqueda y exhibe los casos que más similitud muestren, así como el mecanismo de falla sugerido. Para las medidas de la similitud utilizan la distancia euclidiana. En el caso de que existan dos mecanismos con similitud parecida y elevada, el sistema permite refinar la búsqueda.

En cuanto a la estructura del sistema la base de casos dispone de 477 casos, de los cuales se clasificaron 375 como normales y 102 como excepcionales. La estructura de un caso se indica en el *cuadro 3.2*

Cuadro 3.2. Estructura de caso sistema RBC para identificación de mecanismos de falla

Condición general	Condición superficial	Fracturas y grietas	Sección transversal
Fractografía	Composición	Propiedades físicas	Datos generales
Solución: Mecanismo de falla			

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

Sistema experto para análisis de falla utilizando RBC

Este sistema fue desarrollado por Graham-Jones y Mellor (1995a, 1995b, 1997a, 1997c), de la Universidad de Southampton. El sistema trabaja en dos niveles; AF antes y después de la falla. La diferencia está en que las preguntas de la superficie de fractura no tienen sentido si aún no se da la falla. Con una elección adecuada de preguntas, este asunto no implica gran diferencia, pero es obvio que los datos sobre la superficie de fractura son de gran importancia si la falla ha ocurrido. El primer paso es introducir una descripción completa del componente, haya fallado o no, especificando el material, medio ambiente y condiciones de carga. Luego se presenta un cuestionario al usuario, que puede tener hasta 50 preguntas dependiendo de la descripción inicial. Las respuestas dependen de qué tipo de pregunta se formule: “Si, no, no se sabe” o una

alternativa de varias a elegir. La descripción y las preguntas se archivan como un caso de búsqueda al que se le asigna una calificación numérica (en porcentaje), resultado de comparar el caso de búsqueda con los ya existentes. Ahora el consultor elige la calificación más alta o examina los casos con calificaciones inferiores, que pueden servir mejor para el problema, dado que puede existir más de una respuesta.

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

Sistema para análisis de falla debidas a corrosión (Roberge et al, 1996).

El sistema fue desarrollado para el área específica de la corrosión, no toca los defectos de manufactura como tales, sino sólo como causantes de corrosión; tampoco es capaz de determinar mecanismos de falla como sobrecarga. Maneja la técnica de RBC justificando sus autores que en muchos casos de AF, la información está incompleta, característica que dificulta el uso de otras técnicas como el razonamiento basado en reglas. El sistema fue construido para apoyar al experto brindándole una base de datos con casos históricos, de manera que ésta le ayude a una de las primeras actividades en una investigación de fallas: En cuanto al modo de operación, el usuario introduce parámetros de comparación al sistema, tales como el tipo de material, la temperatura y el ambiente de operación, esfuerzos, etc., el sistema efectúa una búsqueda dentro de su base de casos históricos y presenta los más similares y su solución, además de las recomendaciones que se hicieron en el pasado.

En la estructura se tiene una base de casos, para organizarla se definieron palabras clave esenciales para precisar un caso de falla y la causa de la corrosión, las utilizadas son: medio ambiente, geometría, material, temperatura, tiempo y esfuerzos. Para la indexación los autores revisaron artículos sobre casos de AF y se extrajeron relaciones entre las palabras claves, las cuales se presentan en la *tabla 3.2*, en esta se indican que los factores más repetitivos son el ambiente y el material, mientras que el tiempo es el menos frecuente, a pesar de que en muchas ocasiones es él quien determina lo ocurrencia de las fallas por corrosión.

Tabla 3. 2 Relaciones entre palabras claves. Sistema para fallas por corrosión. (Roberge et al, 1996)

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

Sistema experto para análisis fractográfico (Komai et al, 1995).

Se orienta a la determinación de causas de falla de problemas de fractura. El sistema utiliza el lenguaje de programación OPS83 que emplea reglas deductivas. La base del conocimiento cubre las reglas relacionadas no solamente al entorno, materiales, y condiciones de carga, sino también la morfología de la superficie fracturada (macro y microscópicamente. Debido a las expresiones

vagas de la morfología de fractura superficial, la lógica difusa se utiliza en el sistema. Aplicando el desarrollo de los SEs a casos históricos, se obtuvieron diagnósticos aproximados.

Sistema experto para análisis fractográfico en la ingeniería espacial(NASA) (Lee, 2001).

El AF de la arquitectura para vuelos y el equipamiento de apoyo terrestre frecuentemente requieren del examen de la superficie fracturada, las características varían con el material, el medio ambiente, y las condiciones de carga. Como éstos son en su mayoría un número ilimitado de combinaciones de estos tres parámetros, el análisis fractográfico requiere de revisión de la literatura. Aunque la información fractográfica asociada con las características primarias de materiales comunes está disponible en publicaciones tipo atlas, la información es específica del sistema o se encuentra asociada a características secundarias difíciles de localizar en la literatura abierta. La NASA está desarrollando un SE para este tipo de problemas. Este esfuerzo tiene dos componentes importantes, la ingeniería del software y la ciencia de los materiales.

Sistema experto “Detective de relaciones” SKF (Roberts y Glantz, 2003).

La compañía SKF uno de los principales fabricantes de rodamientos a nivel mundial desarrolló un SE orientado a la identificación de relaciones de falla. El nombre de este programa es “detective de relaciones”. El sistema ayuda al consumidor a prevenir daños y fallas recurrentes, ahorrando tiempo y costos asociados con paros no planeados de las máquinas. El sistema, que se encuentra disponible en la red, permite que los ingenieros de SKF de todo el mundo tengan asistencia remota en AF. Es una herramienta de apoyo en las decisiones que permite consistencia, rapidez y una evaluación exacta de las relaciones de daño o falla. Este es un sistema basado en el conocimiento que busca información básica y ofrece un número de posibles causas de las relaciones de daño encontradas en situaciones particulares. Las causas son clasificadas, (en %) ordenadas de la más alta a la más baja en probabilidad. La red de características de falla tiene cuatro categorías de nodos; condiciones (rapidez, tipo de relaciones, carga, temperatura, etc.), mecanismos internos (deslizamiento, ruptura de película lubricante, etc.), modos de falla (inicio de fatiga superficial, corrosión por desgaste, etc.), y síntomas observados (oxidación, decoloración, etc.).

Sistema para el modelado de fallas mecánicas en ambiente de realidad virtual.

(Jian-Ping Li y Thompson, 2003) presentan un trabajo en donde modelan fallas mecánicas en un ambiente de realidad virtual. Al modelar y predecir la falla, es posible visualizarla por medio de la realidad virtual. Diversos incidentes ocurren como resultado de interferencias de componentes dentro de una máquina, el ambiente virtual permite un mejor y rápido entendimiento de las fallas que se pueden presentar en un diseño complejo.

Sistema experto para la enseñanza de la ingeniería mecánica.

(Tucho *et al*, 2003) presentan un SE para la enseñanza de la ingeniería mecánica, se trata de un tutorial. El sistema combina CAD, el módulo experto, y un sistema de base de datos. Este programa permite realizar cálculos, análisis, simulación, y modelos de componentes y mecanismos. Grandes cantidades de datos pueden ser controladas por el sistema tales como catálogos de materiales y partes, los cuales contienen información respecto de sus características físicas, mecánicas, procesos de fabricación y otras informaciones detalladas de los objetos.

Sistema experto para el diagnóstico de fallas de operación en motores de combustión interna.

(Gelgele y Wang, 1998) presentan el prototipo de un SE orientado al diagnóstico de fallas de operación para motores de combustión interna. EXEDS (*Expert Engine Diagnostic System*) se desarrolló en el software Knowledge pro. El sistema analiza paso a paso los síntomas para finalmente establecer una serie de recomendaciones en cuanto a mantenimiento y la operación. La estructura jerárquica de organización del conocimiento y la operación del sistema se establece de la siguiente manera: el nodo raíz es el motor, éste se divide en dos ramas motor diesel y motor de gasolina, el siguiente nivel es lo referente a los síntomas para proceder entonces al nivel de pruebas, en donde se identifican de manera concreta las fallas, para finalmente establecer las acciones correctivas.

Otros sistemas y estudios relacionados

En lo que corresponde a las técnicas de AF (Menandro *et al*, 1995), realizaron un estudio para evaluar la factibilidad técnica para desarrollar un SE orientado al campo de mecánica de la fractura, en su trabajo se limitan a proponer una estructura de reglas muy básica y a partir de la revisión de la literatura argumentan que es factible la aplicación de los SEs para esta área del conocimiento. Por otro lado para el caso del concreto existe un SE llamado FTEXPERT el cual sirve para seleccionar pruebas de fractura en concreto, los resultados que arroja son similares a los que se reportan en la literatura sobre modos de falla en concreto. En cuanto a las técnicas auxiliares para AF Jarmulak *et al* (2001), realizan un estudio de las ventajas que tiene el RBC para la interpretación de los datos emanados de ensayos no destructivos. En lo que se refiere a defectos en la producción y el servicio Abou-Ali y Khamis (2003), realizaron un SE de diagnóstico para defectos de neumáticos llamado TIREDDX. Este comprende dos módulos principales: una base de datos de manufactura y uno de diagnóstico. De acuerdo a los autores el sistema fue desarrollado e implementado en una compañía líder en la fabricación de neumáticos donde se obtuvieron resultados satisfactorios. Por su parte Kutdriavtsev *et al* (1998) presentan un SE orientado a la evaluación y optimación de procesos de soldadura.

La técnica de RBC ha sido empleada para el proceso de selección de materiales. Trethewey *et al* (1998) desarrollaron un sistema para selección que incluye un módulo de AF de sistemas o componentes. Amen y Vomacka (2001), desarrollaron un sistema de RBC para selección de materiales y procesos de tratamiento térmico de aceros. Mejasson *et al* (2001) presentan un sistema que sirve como soporte a los ingenieros de materiales y de diseño en la industria de cableado submarino. Existen otras aplicaciones de interés para la ingeniería de materiales tal como el trabajo de Emri y Kova (1997) quienes desarrollaron el SE TENSALUM el cual sirve como asistente en la definición de pruebas mecánicas para el aluminio, considerando 9 diferentes standares (ASTM, BS, DIN, JUS, NF, etc).

3.7. POTENCIAL DE LOS SISTEMAS EXPERTOS EN LA ENSEÑANZA DEL ANÁLISIS DE FALLA

Los SEs se han aplicado como herramientas auxiliares en el ejercicio profesional de diversas disciplinas, asimismo existen antecedentes de su empleo como tutoriales (Liao, 2000; Tucho *et al*, 2003). Considerando la necesidad apremiante presente y futura de disminuir los costos en todas las actividades y por ende en la educación, es entonces conveniente valorar el potencial que el empleo de los SE tiene en las actividades orientadas al proceso enseñanza-aprendizaje. Esto debido a su versatilidad, facilidad de distribución y bajo costo de operación.

Por lo anterior, se espera que en los albores del siglo XXI se intensifique su uso en aplicaciones educativas. Por otro lado, el desarrollo de las redes de comunicación ha favorecido la educación a distancia, la cual se da básicamente de dos formas, una es por medio de tele conferencias y la otra la educación a través de plataformas del Internet. Esta segunda incluye la integración de libros electrónicos, aplicaciones educativas a través de sistemas multimedia, accesos a bibliotecas electrónicas, etc; los cuales se han integrado para la impartición de cursos electrónicos, mismos que han sido de utilidad en la enseñanza, solo que presentan un problema en relación a los cursos presenciales “no se cuenta con la interacción directa con el profesor” lo cual representa no contar con la transmisión de sus experiencias.

Los SE representan una solución a este problema pues se pueden incorporar a los cursos electrónicos como módulos auxiliares que actúen como tutoriales o bien para aplicaciones en donde la experiencia pueda ser simulada.

Educación por internet

Las redes de cómputo son la tecnología que día a día ofrece grandes posibilidades de acción en el ámbito educativo. Enseñar y aprender utilizando Internet es un proceso diferente a la educación tradicional, debido a que en el salón de clases existe una interacción directa profesor-alumno, lo que propicia necesariamente nuevas formas de aprender y, en consecuencia, de enseñar. La red es un instrumento que puede apoyar el proceso enseñanza aprendizaje en la medida en que permita al profesor establecer comunicación con sus alumnos, para asesorías remotas, aclarar dudas respecto a la clase; enviar documentos para discutir en el salón, enviar guías de lecturas, o enseñarles a los alumnos a buscar y recuperar información específica, permitiéndole al profesor actualizar su conocimiento a través de listas o grupos de discusión en una área de interés.

En lo que se refiere a AF Graham-Jones y Mellor (1997_b) encontraron que existe una gran cantidad de métodos disponibles para los ingenieros que ayudan en la colección de información de AF, pero la información disponible es escasa, limitada, y en la mayoría irrelevante. Muchas organizaciones han expresado su deseo de que la información en AF sea más accesible a través del Internet llevando a cabo la búsqueda de información cuantitativa sobre los modos existentes de falla. La WWW aporta el mejor protocolo para aportar formatos de texto e imagen sobre redes de trabajo, en plataformas múltiples de sistemas de computadora. Las razones técnicas para el estándar actual de información puede superarse con un diseño cuidadoso de páginas web y la introducción de nuevas tecnologías.

Problema de la interactividad profesor-alumno. (Jacobo et al, 2000).

La principal desventaja de los nuevos recursos es la falta de interactividad entre el maestro y el estudiante, cuando se utilizan sin otro medio complementario. Conforme la tecnología ha hecho posible subsanar esta deficiencia, los educadores a distancia han adoptado medios nuevos y formas nuevas de enseñar. En la actualidad, los medios más populares son: las comunicaciones por computadora incluyendo el correo electrónico, los sistemas de boletines electrónicos (*Bulletin Board*) y las páginas *Web*, que teóricamente crean la posibilidad de ofertar cursos a nivel mundial; de acceder reportes de investigación y bibliotecas virtuales; y de contactar investigadores y expertos de cualquier institución.

La tríada *profesor-facilitador-alumno*: es uno de los cambios más notorios y que requieren mayor esfuerzo de adaptación. En la educación tradicional, el profesor interactúa directamente con sus estudiantes, prepara sus propios materiales de apoyo, notas de clase y exámenes; y es prácticamente autónomo dentro del aula. En cambio los profesores a distancia, no se encuentran en comunicación directa con sus estudiantes en el salón de clase; la comunicación se da no sólo mediada por la tecnología, sino también a través de un equipo de asociados que desarrollan las aplicaciones educativas.

Los SEs como herramienta para la interactividad en la educación a distancia. (Graham-Jones, y Mellor, 1997b; Jacobo *et al*, 2000)

Como se mencionó se han realizado esfuerzos para mejorar la interactividad entre el profesor y alumno y se busca incrementar ésta, a través de la aplicación de la tecnología y de nuevos métodos de enseñanza-aprendizaje. Asimismo, conviene comentar que aunque es posible establecer comunicación entre el profesor y los estudiantes a través de pláticas electrónicas, un factor limitante es el tiempo disponible para la atención al alumno. Una alternativa para mejorar la interactividad lo representan los SE's, ya que el alumno, puede contar de manera adicional con la simulación de la experiencia del profesor, misma que puede ser accesada en cualquier momento.

Con base en lo anterior Jacobo *et al* (2000) proponen un curso electrónico en AF que incluye los siguientes elementos: apuntes electrónicos, base de casos, direccionamiento a páginas Web, módulo de evaluación y módulo inteligente. Este último elemento tiene dos vertientes:

Tutor inteligente. Actúa como sustituto del profesor en la tutoría del alumno. Establece la estrategia de aprendizaje para cada alumno, define las formas más adecuadas de evaluación y proporciona elementos para que el alumno evalúe su propio aprendizaje, realiza recomendaciones acerca de qué tipo de medios de información consultar y brinda apoyo en la solución de los problemas.

Simulación del experto. Para resolver un problema en el ámbito del AF, es conveniente contar con el auxilio de un experto o grupo de expertos. Para sustituir su conocimiento se empleará un SE para AF, donde el alumno (usuario) opera el sistema y resuelve el problema como si tuviera al profesor- experto a su lado.

Es indudable que la interacción que se da en las clases presenciales del profesor con el alumno, no se puede sustituir por completo en los cursos electrónicos. Sin embargo, en este tipo de cursos se busca que los sistemas simulen la labor de orientación del profesor, y para esto se diseñan estrategias aprovechando las tecnologías de la información. En este sentido los SEs representan una alternativa, funcionando como tutores inteligentes o bien como facilitadores para resolver problemas en un dominio determinado.

Capítulo 4. Diseño del Sistema y Metodología

4.1 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En primer instancia se evaluó la factibilidad para el desarrollo del SE en AF empleando para esto el procedimiento propuesto por Beckman (1991). Con base en el resultado positivo de esta evaluación, se estructuró la forma en que se debería desarrollar el sistema (Cerrud, 2002; Jacobo *et al*, 2003), se estudiaron los diferentes enfoques de grupos de investigación que han desarrollado o se encuentran trabajando en sistemas similares (Graham-Jones y Mellor, 1995a, 1995b, 1997a, 1997c; Kazaz, 2003; Komai *et al*, 1995; Lee, 2001; Liao *et al* 1999a, 1999b; Liao, 2000, 2004; Menandro *et al*, 1995; Roberge *et al*, 1996). Asimismo se consideraron los resultados emanados por Shu-Hsien (2005), el cual revisó las metodologías aplicadas en el periodo 1995-2004. Por otra parte se analizó la bibliografía sobre AF con el fin de aportar elementos para la investigación y con el objetivo de definir en forma sistemática las fallas de elementos mecánicos. Con base en lo anterior se estableció el marco de referencia para el proyecto.

Posteriormente se realizó un proceso de capacitación en donde se estudiaron los conceptos sobre SEs, principalmente en las metodologías para la adquisición y representación del conocimiento, se integró el grupo de expertos tomando en cuenta nivel de experiencia, disposición y disponibilidad de tiempo para involucrarse en las entrevistas. En la determinación de las características de operación participaron expertos en AF, ingenieros del conocimiento y los usuarios potenciales. Las consideraciones que se tomaron en cuenta son ambiente de interacción con el usuario, etapas de solución de un problema, definición del tratamiento de la incertidumbre, estructuración en módulos, plataforma computacional, limitaciones del usuario y características de la base de conocimientos.

Con las experiencias obtenidas en el desarrollo de este sistema se identificaron los inconvenientes que se presentan en el modelado del conocimiento de los expertos, en particular lo relacionado con las fases de adquisición y representación del conocimiento (Cerrud *et al*, 2000). Se establecieron estrategias para la adquisición del conocimiento, definiendo técnicas para obtención de información como entrevistas o sesiones. Se aplicaron diagramas de causa efecto ya que en un problema de AF los efectos son conocidos y se tiene como objetivo determinar las causas que condujeron a la falla. Con esto se logró definir el método de análisis de los expertos y la forma en que realizan su razonamiento. Se determinaron las estructuras de representación del conocimiento, definiéndose las de reglas de decisión y los marcos para la descripción de los casos.

Para seleccionar el *shell* se aplicó una matriz de decisión, los criterios que se evaluaron fueron costo, mecanismos de adquisición del conocimiento, interfases externas, reportes generados, calidad de la documentación, facilidad de aprendizaje, facilidad de uso, requerimientos de *hardware*, soporte técnico y características generales. El *shell* que resultó seleccionado fue Visual Rule Studio (1998) el cual trabaja dentro de la plataforma de *Visual Basic*. También se llevó a cabo un proceso de aprendizaje del *shell* que se utilizó para el desarrollo del sistema.

Las bases de conocimientos y de casos se integraron a partir de la información obtenida de los expertos y de casos reportados en la literatura. De acuerdo con el orden en que el experto humano realiza la solución de un caso se determinó la secuencia de operación del sistema. Para observar la interacción de los elementos del sistema se desarrolló y probó un prototipo con una base de conocimientos limitada (Jacobó *et al*, 2000). Esto tuvo la finalidad de probar las características de operación definidas y llevar a cabo los ajustes correspondientes, posteriormente, se realizó la expansión del sistema.

El sistema tal como se presenta en este trabajo de tesis, cuenta ya con un módulo para el AF de ejes (Jacobó *et al*, 2002, 2004), y un módulo de razonamiento basado en casos (Jacobó *et al*, 2004; Ortiz *et al*, 2003). Es importante mencionar que estos subsistemas están desarrollados sobre la base de una estructura global, la cual está diseñada de tal manera que en un futuro se puedan incorporar nuevos módulos. Se trata pues, de un sistema flexible y con capacidad para ser robustecido. Asimismo, dentro de la estructura queda abierta la posibilidad de incorporar módulos que se pueden desarrollar a futuro tales como análisis de esfuerzos, deterioro ambiental, propagación de grietas, etc.

Finalmente se realizó el proceso de validación del sistema, el cual se llevó a cabo, resolviendo problemas de campo, de los cuales ya se tenía la solución, mediante el programa desarrollado en el presente proyecto. En este trabajo se presenta el proceso de solución de 5 problemas de AFs en ejes, para todos estos se aplican los módulos de razonamiento basado en casos y el de razonamiento basado en reglas.

En el proceso metodológico (Cerrud, 2002; Jacobó *et al*, 2000), constó de los siguientes pasos (los puntos que se desarrollan en otros capítulos se indican entre paréntesis):

1. Análisis de factibilidad
2. Revisión de las características de los SEs en desarrollo para AF. (*capítulo 3*)
3. Revisión de la literatura de SEs (*capítulo 3*)
4. Revisión de la literatura de AF (*capítulo 2*)
5. Diseño de la estructura del sistema y características de operación
6. Integración del grupo de expertos en AF
7. Desarrollo del ingeniero de conocimiento
8. Determinación de los mecanismos de adquisición del conocimiento
9. Determinación de las estructuras de representación del conocimiento
10. Selección del *shell* y de la plataforma de desarrollo
11. Estructuración de la base de conocimientos
12. Estructuración de la base de casos
13. Determinación de la secuencia de operación
14. Desarrollo del prototipo
15. Construcción de la interface con el usuario (*capítulo 5*)
16. Desarrollo del subsistema para AF de ejes (*capítulo 5*)
17. Desarrollo del subsistema de razonamiento basado en casos (*capítulo 5*)
18. Verificación y validación del sistema (*capítulo 6*).

4.2 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA

Para analizar la factibilidad del desarrollo de SE's Beckman (1991) propone una metodología de evaluación, la cual ha sido utilizada en el desarrollo de este trabajo. Dicho procedimiento se genera con base en el análisis de las categorías que se presentan en la *tabla 4.1.*, éste define una ponderación total, en donde los puntajes parciales se obtienen a partir de las tablas específicas (*Anexo 2*) para cada uno de los factores señalados.

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

Tabla 4.1 Lista de control para evaluar aplicaciones de SEs

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

Determinación de la viabilidad del sistema propuesto

Aplicando la metodología descrita, en el *Anexo 2* se presenta el análisis que justifica el desarrollo e implantación del SE en AF de elementos mecánicos metálicos (Cerrud *et al*, 1998). La metodología seguida se basa en la calificación del procedimiento a través de adjetivos que definan sus condiciones. Los valores que aparecen en las tablas fueron determinados por expertos en AF de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, en donde se tiene una experiencia de más de 30 años desarrollando proyectos en esta área de estudio. Asimismo, se contó con el apoyo de expertos del Laboratorio de Metalurgia y Ciencia de Materiales de la Universidad de Gante en Bélgica. También para fortalecer los resultados de este análisis se consultó literatura especializada en AF.

Análisis de los resultados

Los resultados enumerados mediante la *tabla 4.2* se pueden interpretar en el sentido de que el conocimiento involucrado en AF hace de esta área una aplicación idónea para el desarrollo de un

SE. Se ha visto que el AF es muy complejo y depende en gran medida de la experiencia previa del experto. Esto no solamente se aplica desde el punto de vista de las conclusiones sino también de la rapidez y métodos empleados para validar las propuestas.

Tabla 4.2 Lista de control para evaluar la factibilidad del desarrollo del sistema experto en AF

CATEGORÍA	PONDERACIÓN
1. Tipo de problema	25
2. Resultados finales	21
3. Diseñador del sistema	16
4. Dominio del experto	15
5. Usuario final	6
Puntos totales	83/100

Analizando los resultados provenientes del *Anexo 2*, se desprende lo siguiente:

La *evaluación de resultados finales*, permite precisar cuales son los beneficios que la integración del SE tiene para los usuarios potenciales, desde un punto de vista técnico y económico. En esta conclusión se toman en cuenta las ventajas que brindará el sistema tanto a la industria (capacitación y solución de problemas convencionales) como a la docencia. Por su parte, los resultados obtenidos con relación a la *evaluación del diseñador* del sistema permiten concluir que se cuenta con el personal capacitado para fungir como ingenieros de conocimiento en el proyecto, es conveniente mencionar que al momento de comenzar con el desarrollo de este proyecto el autor ya tenía experiencia en el desarrollo de tutoriales y en el análisis para el desarrollo de un SE para selección de materiales. Por otro lado, es necesario hacer notar que los resultados se pueden interpretar en el sentido de que fue necesario capacitar a aquellos que van a realizar la labor antes mencionada (ponderación 16/20), en la actualidad ya se alcanzó (20/20) pues ya se estructuró un grupo de trabajo sobre esta línea.

Una cuestión fundamental en el desarrollo de un SE es contar con los expertos no solo capacitados sino también motivados, para que se integren al proyecto, estando dispuestos a dedicar un elevada cantidad de horas durante su desarrollo, circunstancia que en este caso se considera del orden de tres años. Este tipo de análisis se presenta a través de los resultados de la *evaluación del dominio del experto*. La puntuación obtenida (15/15) se explica debido a que existen expertos calificados en la propia área de trabajo (Departamento de Ingeniería Mecánica de la UNAM).

En cuanto al *usuario final*, se concluye que al poder manejar ambientes gráficos para la solución de un problema el usuario, a la vez de motivarse por la facilidad y precisión con la que obtienen resultados a través del SE, no se siente desplazado, ya que estará trabajando con un colega electrónico que le transmite sus opiniones y le apoya en su desarrollo.

Finalmente, es conveniente recalcar que los resultados que se presentan en la *tabla 4.2* (83/100) son muy favorables para el desarrollo del SE en AF.

4.3 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL SISTEMA Y CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN

Para el caso en estudio, en la búsqueda de elevar la confiabilidad de las soluciones a los problemas de fallas, se definió que el sistema a desarrollar debe ser de tipo híbrido (Jacobo *et al*, 2004), con procesos de solución mediante razonamiento basado en casos y en reglas. En su funcionamiento el sistema toma las soluciones de los dos enfoques con la intención de que el usuario tenga más elementos para la solución del problema de AF. En la *figura 4.1* se presenta la dinámica de interacción para la solución de problemas mediante el sistema

El sistema funciona con la siguiente dinámica:

1. Obtención de la información del problema a resolver
2. Solución un problema de AF a través de la aplicación del subsistema por reglas.
3. Solución del problema a través de razonamiento basado en casos
4. Análisis por parte del usuario de las soluciones obtenidas por ambos métodos.
5. Incorporación de los casos resueltos a la base de casos

Lo novedoso del sistema desarrollado es que soluciona los problemas de fallas a través del uso de reglas, una vez que se encuentra la solución se cuenta con una base de casos, a la que se accesa con el fin de que el usuario valide las conclusiones obtenidas por reglas o viceversa.

La incorporación de una base de casos a la que se pueda acceder para consultar las experiencias sobre casos similares al que se esté resolviendo, resulta ser un elemento que permite validar las soluciones obtenidas por el procedimiento tradicional de solución mediante reglas deductivas, logrando de esta manera incrementar el potencial del sistema como herramienta para capacitación o bien para la solución de problemas de tipo convencional.

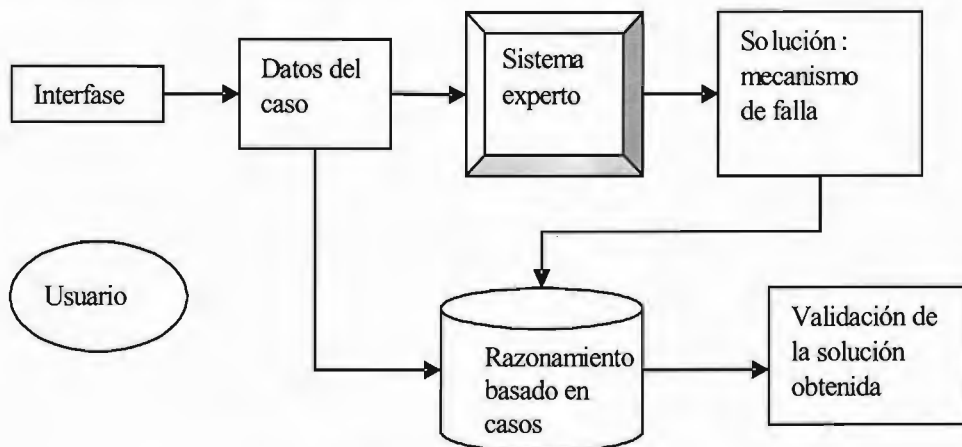


Figura 4.1 Diagrama de operación del sistema híbrido

Un punto relevante de este trabajo es el planteamiento de una metodología para el desarrollo del SE que permita dar solución a problemas de elementos mecánicos metálicos. Se planteó una estructura que permite desarrollar paso a paso, sobre la base del sistema global, los diferentes módulos (ejes, engranes, resortes, etc) que integrarán el sistema. Asimismo dentro del ambiente se facilita la incorporación de otros módulos auxiliares tales como análisis de esfuerzos, de deterioro ambiental, de imágenes, entre otros. Las experiencias obtenidas en el desarrollo de un

subsistema de ejes permiten que los módulos restantes se desarrollen más fácilmente, asimismo, la metodología planteada sienta las bases para la expansión del sistema.

Para lograr lo anterior es necesario construir una base de casos de AF, la cual debe tener una gran cantidad de registros, que se integran a partir de diversas fuentes de conocimiento; expertos, bases de datos, artículos, manuales de AF, sistemas multimedios, etc. De igual manera será necesario desarrollar algoritmos para la interacción general de los módulos del sistema, por lo que se tiene que profundizar en aspectos de manipulación de bases datos.

Establecimiento de las características de operación del SE

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

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

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

Modelo de desarrollo de software

Una vez establecida la estructura del sistema, se determinó un modelo de desarrollo de software, seleccionándose el de espiral (figura 4.2). En este modelo, el software se desarrolla en varias etapas incrementales. En las primeras iteraciones, la versión puede ser un esquema en papel. En las últimas iteraciones, las versiones son cada vez más funcionales. Este modelo tiene la ventaja de que cada versión es un nuevo punto de inicio; esto permite que ante el cambio de personal de desarrollo el sistema pueda seguirse desarrollando y expandiendo minimizando estos inconvenientes

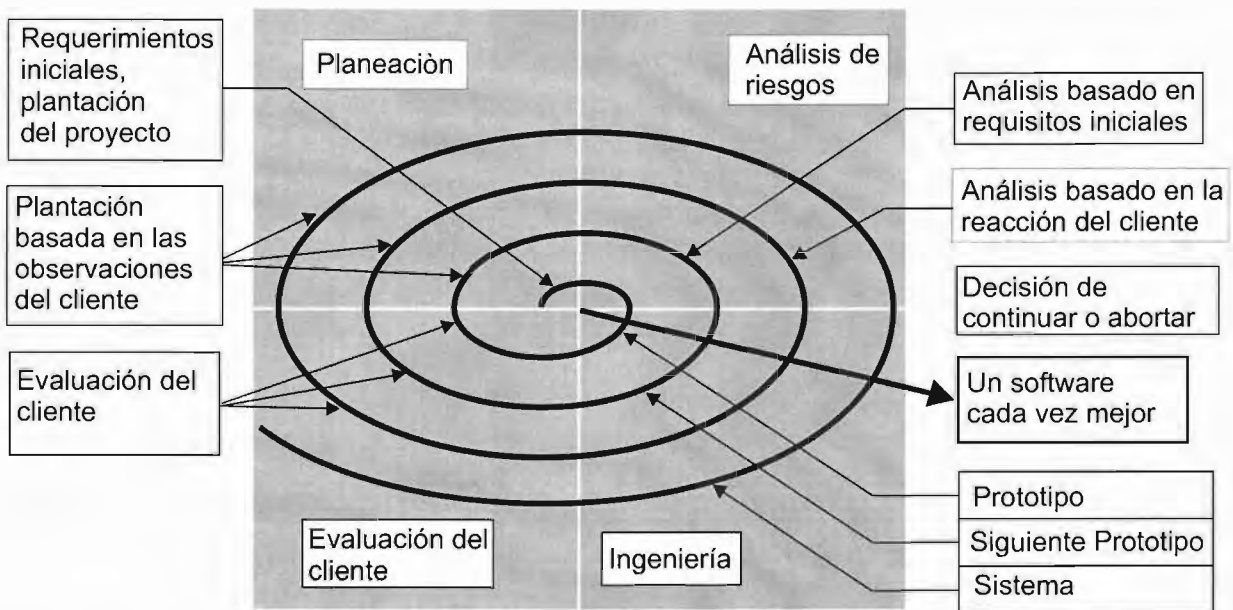


Figura 4.2 Modelo en espiral para el desarrollo de software

En el modelo de espiral en los cuadrantes se tienen 4 aspectos importantes: La *planeación* que es lo correspondiente al diseño del sistema, la parte de *análisis de riesgos* en donde para el caso de en estudio el riesgo más importante es desarrollar el sistema con base en una estructura de organización del conocimiento errónea. Lo que corresponde a ingeniería se maneja propiamente la construcción del prototipo y del sistema, finalmente la *evaluación del cliente* la cual se realiza por entrevistas con éste o bien a través de gente experimentada que tenga visión de lo que el cliente necesita, en el caso bajo estudio las necesidades se captaron a través de los usuarios (estudiantes, profesores y personal de la industria) y también a por medio de la experiencia de profesionales en AF.

Estrategia para el desarrollo del sistema global

El sistema pretende dar solución a problemas relativos al AF de diversos elementos mecánicos, por lo que desde un principio se estructuró con una visión global. El diseño de la interfase de usuario y la estructura de la base de conocimientos se realizó de acuerdo con este planteamiento. Si bien es cierto ésta es la base estructural del sistema, buscar construirlo como un todo resultó problemático, lo cual se manifestó en el propio desarrollo del prototipo, ya que debido a lo robusto del sistema todas las acciones se complican. Por lo anterior se planteó como estrategia la construcción del sistema módulo por módulo; ya que teniendo la experiencia de este primer subsistema, los demás se facilitan, pues ya se tiene conocimiento sobre los inconvenientes que se presentan en la adquisición y representación del conocimiento. Debido a la cantidad de información de la que se dispone y de la experiencia de solución de casos prácticos el primer módulo que se desarrolló fue el relativo a ejes. La estructura y el desarrollo de la base de conocimientos se realizó a partir de lo que indica la técnica de la matriz de experiencia para AF (Cerrud *et al*, 2002; Das, 1996; Dieter, 1991) ya que establece un criterio que organiza la información de la base tomando en cuenta tres aspectos; tipos de falla, modos de falla y conclusiones. Asimismo se continuo con el desarrollo del módulo de RBC, este subsistema es general en el sentido de que contiene información sobre fallas de diferentes elementos mecánicos.

4.4 INTEGRACIÓN DEL GRUPO DE EXPERTOS EN ANÁLISIS DE FALLA

Para determinar el tipo de profesionales que fungen como expertos se puede hablar de una serie de características que estos deben cumplir, tales como:

- a. tiempo de dedicación al proyecto,
- b. disponibilidad y
- c. empatía, entre otras.

Sin embargo, el punto fundamental es el nivel de experiencia que estos tengan, la forma sistemática en que resuelven los problemas y la capacidad para describir los procesos de solución. Considerando lo anterior se realizó un análisis relativo a la experiencia como un factor significativo para AF, la forma en que el experto enfrenta los problemas y las características particulares del conocimiento involucrado. Esto permitió definir al personal idóneo que integrará el grupo de expertos.

Experiencia: factor fundamental en AF

Para establecer la causa y secuencia correctas de una falla, se requiere un enfoque sistemático y científico (Das, 1996; Lange, 1986; Metals Handbook, 1990). La cantidad y calidad de información obtenida en el proceso depende en gran medida de la experiencia, conocimiento, habilidad de análisis y metodología del analista; así como la disponibilidad de detalles y de la infraestructura. La experiencia indica que un ingeniero experimentado puede manejar cualquier tipo de investigación de falla en elementos metálicos usando los instrumentos e instalaciones disponibles en los laboratorios de metalurgia, siempre y cuando tenga el ingenio y la capacidad para enfrentar problemas complejos.

La realización de una adecuada recolección de información del contexto en que ocurre la falla, constituye uno de los primeros pasos para lograr la comprensión de los factores básicos que pueden estar asociados con ésta. Una inadecuada o escasa recopilación de información llevará a un análisis erróneo o un exceso de tiempo para el análisis del caso en cuestión. Por esta razón, siempre que sea posible se debe recolectar información tal como el tipo de pieza, número, tipo de equipo, localización de la falla con respecto a todo el sistema, dibujos, especificaciones, historia

del servicio o mantenimiento, reportes de accidentes previos y evidencia comprobable por parte de testigos oculares. Si la información que se ha obtenido del contexto es inapropiada, el investigador debe visitar el lugar en que ocurrió la falla para familiarizarse con los detalles asociados al componente. Primero, se deben estudiar los aspectos funcionales relativos al diseño y a los parámetros de servicio, tales como la carga estática, los esfuerzos de servicio y las condiciones de ensamble. A continuación, se examinan las condiciones ambientales, tales como las fluctuaciones de temperatura o la presencia de agentes corrosivos, que deben analizarse y registrarse. Por último, se deben tener discusiones con el personal de campo con relación al testimonio del operador. En caso de investigaciones de accidentes. Son indispensables las fotografías de la situación real del sitio del percance.

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

- ¿Cuál es el tipo de material?
- ¿Cuáles son las propiedades físicas, químicas y mecánicas del material?
- ¿Cómo se fabricó?
- ¿Cuánto tiempo lleva en servicio?
- ¿Para qué fue diseñado?
- ¿A qué ambiente fue expuesto?

Por otro lado, el conocimiento del investigador en cuanto al análisis del aspecto de la superficie del material que falló y del tipo de pieza del estudio en cuestión es importante, tanto para el análisis de la estrategia, como para la recopilación de datos, ya que en la actualidad se tiende a caracterizar a cada elemento en una forma distinta. Por ejemplo, en el caso de fallas de engranes se sabe que éstas se deben ya sea al desgaste, flujo plástico o fractura debida a sobrecarga, fatiga o materiales defectuosos (Abersek *et al*, 2004; Alban, 1985).

En la solución de un problema de AF el experto en un primer nivel realiza una inspección preliminar en donde considera la historia de la falla, función del elemento, materia, proceso de manufactura y solicitaciones. Con base en esta información genera una primera hipótesis acerca de la causa probable de falla. En segundo nivel, realiza una inspección visual con más detalle, evalúa la geometría, el aspecto de la superficie, la dirección de corrimiento de la falla, diseño y manufactura; esto le permite refinar su razonamiento y plantear una hipótesis de trabajo. En el tercer nivel, define el tipo de pruebas de laboratorio que se requerirán para poder verificar la hipótesis planteada. Con la información obtenida de las pruebas establece una tesis de las causas que llevaron a la falla. Por último, cuando ya ha planteado la tesis, describe los aspectos que favorecieron a la falla, la secuencia de eventos que la propiciaron y establece las acciones correctivas y preventivas correspondientes (*Anexo 3*).

Como se mencionó, el AF permite prever el comportamiento del elemento mecánico, sistema o equipo evitando de esta manera que se presenten futuros inconvenientes, incrementando entonces la confiabilidad y disminuyendo los costos. Si bien el AF tiene reglas y procedimientos perfectamente definidos, es indudable que la determinación de la causa de falla no es trivial, esto debido a las características de la información disponible, los conocimientos y los procesos de razonamiento involucrados. Éstas se describen a continuación:

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

Expertos

En el grupo de trabajo se integró con 3 expertos en AF del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Por otro lado existe la asesoría externa de dos expertos del Departamento de Metalurgia y Ciencia de los Materiales de la Universidad de Gante, Bélgica. Por cuestiones de disponibilidad y para evitar conflictos de opinión se ha tenido mayor contacto con el que se denomina experto líder del proyecto, el cual sirve de guía para discutir las experiencias del grupo y de los reportado en la literatura.

4.5 DESARROLLO DEL INGENIERO DEL CONOCIMIENTO

Para lograr integrar un soporte de ingeniería del conocimiento se realizó un proceso de capacitación en lo relativo a SEs y AF. Esta preparación incluyó el involucrarse en la determinación de las características de operación del sistema, estudiar los procedimientos para la adquisición del conocimiento, conocer las estructuras para la representación del conocimiento, analizar las ventajas y desventajas de las herramientas para desarrollo de SE's. Asimismo, para tener un lenguaje común de comunicación con los expertos se capacitó en el procedimiento general del AF, la determinación de los mecanismos, la descripción de las diferentes causas de falla, etc. De este proceso se obtuvo a tres ingenieros del conocimiento, que posteriormente se capacitaron en el uso del *shell Visual Rule Studio* y en el lenguaje *Visual Basic*.

4.6 ADQUISICIÓN DEL CONOCIMIENTO

En las fases del proceso de desarrollo de un SE, en general, la que demanda una mayor cantidad de tiempo es la de adquisición del conocimiento y se considera el cuello de botella debido a que se invierte entre un 60 y 70% del tiempo de desarrollo. Además de ser la primera fase del proceso, es una actividad neurálgica (Cerrud *et al*, 2000). Por otro lado, en el AF el conocimiento que se involucra para el análisis y la toma de decisiones es muy complejo, razón por la que se debe definir un método que permita la extracción, selección, estructuración, organización y validación del conocimiento, de manera confiable; dado que la forma en que se realice repercutirá en las fases subsecuentes del desarrollo del sistema.

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

Los métodos aplicados de adquisición son de dos tipos:

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

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

Para el caso en estudio, en un principio, la metodología de adquisición que se siguió fue la que se desarrolla en gran cantidad de textos relacionados con el tema, este consistía principalmente en realizar una serie de cuestionarios al experto respecto a la forma en como resuelve el problema del AF. Sin embargo, para el caso específico y las condiciones que se tenían dicho método no produjo los resultados deseados. Por el contrario se tenía una gran cantidad de información, la cual difícilmente podría constituirse en reglas útiles que mostraran la mecánica del razonamiento seguida por el experto en la práctica del AF. Dado que el conocimiento obtenido del experto se traduce en una serie de reglas, es de vital importancia que el conocimiento adquirido del experto sea conciso y de la mejor calidad y cantidad disponibles.

Determinación de los mecanismos de adquisición del conocimiento

El AF 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 AFs 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 elemento fracturado. Dicho elemento era introducido en una caja para que los expertos no pudieran verlo, los expertos podían hacer preguntas de las condiciones generales del elemento, 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 fractografía en diversas fuentes bibliográficas (Brooks y Choudhury, 1993; De Ferri, 1979; Feldbeck y Atkins, 1996; Hull, 1999; Metals Handbook, 1987). Se analizaron fotografías con patrones característicos de fractura y se discutió con estos 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.

Cuando los ingenieros del conocimiento estuvieron adentrados en el tema del AF se realizaron sesiones de trabajo 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.

Por otra parte para validar y enriquecer el conocimiento se consultó en la literatura las experiencias acumuladas sobre AF. Para el caso del sistema de RBC se obtuvieron casos de estudio reportados en diferentes informes técnicos, manuales, libros especializados, etc.

4.7 REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Trasladar conocimiento del experto a una computadora es otro obstáculo que se presentó en la creación del SE. Concretamente, la propuesta es integrar de manera eficiente la mayor cantidad posible de reglas obtenidas de los expertos, así como también toda la información contenida en los casos ya resueltos y documentados, de manera que se tenga un sistema híbrido que maneje tanto reglas como conocimientos previos. Las reglas que se aplican deben estar organizadas por lo que en el desarrollo de este sistema se utilizan las estructuras de información orientadas a objetos. Cabe recordar que una de las características más deseable de un SE es que posea la capacidad de aprender de la experiencia, el sistema que se propone en este trabajo cumple con esta característica al permitirle al usuario guardar el caso resuelto en la base de casos que se integra dentro del sistema (Cerrud *et al*, 2000).

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

Determinación de las estructuras de 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 SEs 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*, estas estructuras tiene 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 AFs 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 SE 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* (cuadro 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*

Cuadro 4.1 Encadenamiento de reglas (I)

Como se puede observar en el ejemplo del cuadro 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 (*cuadro 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

Cuadro 4.2 Encadenamiento de reglas (II)

En el ejemplo del *cuadro 4.2* 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 (*cuadro 4.3*). Como se puede observar en el *cuadro 4.3* la primera estructura se pudo descomponer en otras cuatro, que son sólo partes de la primera, éstas 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.

<p><i>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 <u>Entonces el tipo de falla es fatiga</u></i></p>
<p><i>Si el tipo de falla es fractura Y la aplicación de cargas fue cíclica Y existe un concentrador de esfuerzos cerca de la fractura <u>Entonces el tipo de falla es fatiga</u></i></p>
<p><i>Si el tipo de falla es fractura Y la aplicación de cargas fue cíclica Y existen Marcas de Playa <u>Entonces el tipo de falla es fatiga</u></i></p>
<p><i>Si el tipo de falla es fractura Y la aplicación de cargas fue cíclica <u>Entonces el tipo de falla es fatiga</u></i></p>
<p><i>Si el tipo de falla es fractura Y existen Marcas de Playa <u>Entonces el tipo de falla es fatiga</u></i></p>

Cuadro 4.3 Encadenamiento y descomposición de reglas

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 4.3).

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 (Cuadro 4.4) :

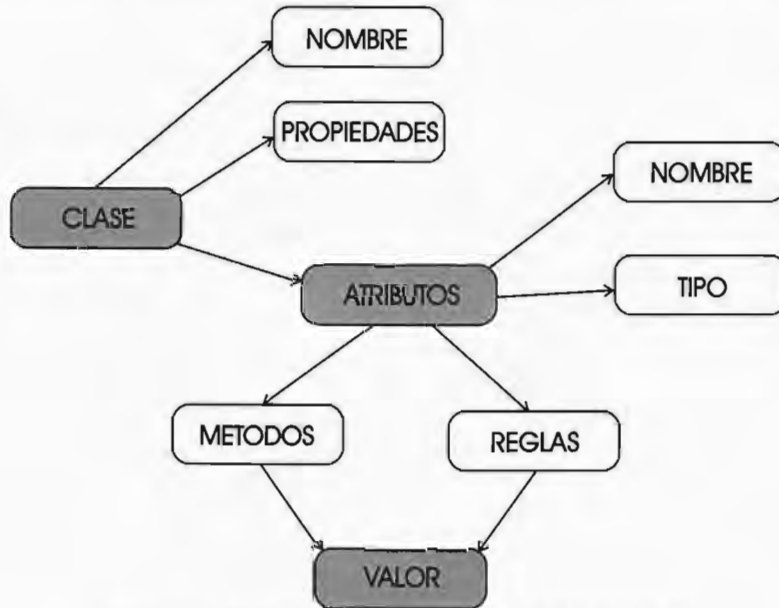


Figura 4.3 Estructuras orientadas a objetos

<i>Clase: Información Del Material</i>	
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 aleación	Bajo, Medio, Alto
Comportamiento del material	Dúctil, Frágil

*Si el tipo de acero es 1008
entonces el porcentaje de carbono es bajo*

Cuadro 4.4 Clases y atributos en la construcción de reglas

Representación del conocimiento para el módulo de RBC

El método de RBC inicialmente se puede emplear como un sistema que realiza búsquedas inteligentes de información dentro de una base de casos resueltos sobre determinado tipo de problemas. En la exploración dentro de la base se buscan casos parecidos al problema que se pretende resolver utilizando para esto criterios de similitud. La descripción de las estructuras del subsistema de RBC se presenta en forma detallada en el capítulo 5

4.8 SELECCIÓN DEL SHELL Y DE LA PLATAFORMA DE DESARROLLO

Un *Shell* es un programa computacional que funciona como administrador de la información, es una herramienta que se utiliza para el desarrollo de SEs, contiene rutinas de encadenamiento, así como las asignaciones correspondientes a una máquina de inferencia y sirve como intermediario entre la interfase y las estructuras de control (Adedeji, 1992).

Para el desarrollo del 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 (Jacobo *et al*, 2003):

Costo. De acuerdo con las posibilidades de la organización

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

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

Generación de reportes. Se consideran los tipos de reportes que puede generar la herramienta, estos 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 y construcción de la base de reglas, y 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 al respaldo de información, velocidad de ejecución, etc.

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

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

Procedimiento para la selección del shell (Cerrud, 2002)

Para seleccionar el *shell* más adecuado se aplicó una matriz de selección. A continuación se indica paso a paso el procedimiento para la selección de la herramienta computacional

1. Asignación de porcentajes w_i (pesos) a los diferentes factores considerando que se cumpla que la suma de estos sea igual a 100%. Para lograr lo anterior se construyó una matriz en donde se compara cada una de las propiedades contra todas las demás, si la propiedad evaluada es más importante que la otra se le asigna un valor de "1" a la celda correspondiente, en caso contrario el valor será "0". En las *tablas 4.3 y 4.4* se muestra la matriz de comparación así como los porcentajes obtenidos.

2. Identificación de las herramientas a evaluar. En primera instancia se consideraron shells con los que se han desarrollado aplicaciones en la ingeniería. Estos fueron EXSYS, Nexpert Object, KEE, Clips y Visual Rule Studio.

3. Se describieron las características de cada shell de acuerdo con cada uno de los factores a evaluar, esto se indica en la *tabla 4.5*

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

Malo	1
Regular	2
Bueno	3
Muy bueno	4
Excelente	5

5. Se asignaron calificaciones para cada factor en los diferentes *shells*. Los resultados se indican en la *tabla 4.6*

6. Se multiplicó cada calificación por el correspondiente peso de cada factor. y se obtuvieron los totales. Los factores D,E, I y J se eliminan pues significan ponderaciones iguales. En la *tabla 4.7* se indica el resultado final de la evaluación

Como resultado de este ejercicio resultó seleccionado el shell *Visual Rule Studio*

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

Tabla 4.3 Asignación de letras a los factores

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

Tabla 4.4 Matriz de comparación y porcentajes obtenidos

	EXSYS	NEXPERT	KEE	CLIPS	Visual Rule
A	\$10,000	\$50,000	\$90,000	Gratuito	\$7,500.00
B	Reglas, clases, objetos marcos Encadenamiento hacia adelante y hacia atrás	Reglas, clases, objetos marcos Encadenamiento hacia adelante y hacia atrás	Reglas, clases, objetos marcos Encadenamiento hacia adelante y hacia atrás	Reglas, clases, objetos marcos. Encadenamiento hacia atrás	Reglas, clases, objetos marcos, encadenamiento hacia adelante y hacia atrás de manera simultanea
C	Dbase, Gráficos,	C, Dbase, Fortran, pascal	UNIX-Ms-dos	C, Fortran	Visual Basic, Access, Excel, sistemas CAD
D	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena
E	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena
F	Sencillo	Sencillo	Complejo	Complejo	Sencillo
G	Regular	Buena	Buena	Regular	Excelente
H	Diversas sistemas operativos, Ms-Dos, windows, unix, mac	Ms-Dos	Ms-Dos y UNIX	Dos y UNIX	Windows, ambiente de Visual Basic
I	Pentium	Pentium	Pentium	Pentium	Pentium
J	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla 4.5 Características de los shell's

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

Tabla 4.6 Calificaciones de los factores en cada shell

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

Tabla 4.7 Evaluación final

Visual Rule Studio

La herramienta que se escogió como *Shell* para el desarrollo del subsistema basado en reglas fue (Visual Rule Studio, 1998). 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 otras herramientas. Esta *shell* 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.

El módulo de razonamiento basado en casos se construyó bajo la plataforma de *Visual Basic*, debido a que de esta manera se integra con el sistema de reglas y se ejecuta dentro del sistema global.

Visual Basic

(Visual Basic, 1998) 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 SE se optó por la interfase de múltiples documentos, siendo ésta capaz de soportar varios documentos abiertos simultáneamente en distintas ventanas independientes, en donde se pueden desplegar gráficos, la ayuda del programa, módulos alternos, etc.

4.9 ESTRUCTURACIÓN DE LA BASE DE CONOCIMIENTOS

Para organizar la información, el *shell* actúa como administrador de la información recopilada, manteniendo el intercambio de datos entre la interfase y propiamente el sistema, para poder realizar estas funciones, la información tiene que ser clasificada o por cualidades que tenga en común, estas categorías están formadas por *clases* donde se almacena información desde un punto de vista bastante general. Conforme las características de la información se hacen más específicas es más difícil utilizar las clases mencionadas por lo que existe una manera de clasificar más particular que las clases, ésta es por *atributos*. Las clases y los atributos son determinados por el equipo de trabajo según sean los intereses del manejo de la información y de las facilidades que esto represente para la programación de los algoritmos. Los atributos, a su vez, pertenecen a las clases y una clase puede tener cientos de atributos, un atributo es una característica que diferencia la información del resto de la clase. Los atributos pueden estar compuestos por uno o varios elementos (*variables que toma el atributo*).

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

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

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

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

Clases y atributos en el SE en AF (Cerrud, 2002; Jacobo et al, 2004)

En las *tablas 4.8-4.10* se presenta la estructura de clases y atributos realizada para el sistema, así como las características correspondientes a cada uno de estos. Para su rápida identificación, a cada atributo es asignado un cuadro de la forma (,) en donde el primer carácter indica la forma en que será determinado dicho elemento, si el usuario lo determina directamente el carácter presente será una U y si es determinado por otro método el carácter presente será P.

El segundo carácter del cuadro indica el tipo del atributo:

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

Tabla 4.8 Descripción de la clase part

Clase	Atributos	Descripción de atributos
<p>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</p>	Material	Clasificación del material Metales, cerámicos, polímeros, etc. (U,C)
	Tipo de elemento	Tipo de elemento que se desea analizar. (eje, perno, engrane ,etc.)(U,C)
	Función realizada	Función que desempeña el elemento dentro del sistema en donde operaba. (transporte de líquido, transmisión de potencia, etc.) (U,C)
	Tipo determinado	Atributo creado para determinar si el elemento buscado por el usuario fue encontrado. (P,S)
	Tipo de carga práctica	Tipo de carga a la que el elemento estuvo sometido, determinada por el usuario. (flexión, torsión,etc.)(U,C)
	Tipo de carga teórica	Tipo de carga determinada por el usuario a través de imágenes de fractura. (flexión, torsión,etc.) (U,C)
	Campo de esfuerzos	Determina el número de ejes necesarios para definir el esfuerzo el elemento.(uniaxial, biaxial, etc.)(U,C)
	Concentradores de esfuerzos	Existencia de concentradores de esfuerzos, la existencia de este 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 falla. (U,S)
	Recubrimiento	Determina si el elemento presenta algún tipo de recubrimiento. Este atributo permite el acceso a la siguiente lista de atributos. (U,S) Tipo de recubrimiento.- Determina el tipo de recubrimiento presente en el elemento. (orgánico, fosfatado, etc.) (U,C) Corrosión en el recubrimiento.- Determina la presencia de corrosión en el elemento analizado. (U,S) Daño en el recubrimiento.- (U,S) Corrosión en el elemento.- Determina si existen muestras de corrosión en el elemento en general. (U,S) Corrosión en la fractura.- Determina si existen muestras de corrosión específicamente en la zona de la fractura. (U,S) Picaduras por corrosión.- Determina si existen picaduras originadas por corrosión en el elemento. (U,S)
Apariencia de la pieza	Determina las características generales de una primera inspección visual sobre el estado de la pieza. (deformación, desgaste, etc.) (U,M) Existencia de cargas cíclicas.- (U,S)	

Tabla 4.9 Descripción de las clases Información sobre el material, falla y medio de operación

Clase	Atributos	Descripción de atributos
<p>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</p>	Materiales	Permite seleccionar entre distintos metales y aleaciones como acero, aluminio, etc. (U, C)
	Material identificado	Atributo creado para determinar que el material buscado por el usuario fue encontrado. (P, S)
	Tipo de acero	Permite determinar el tipo de acero bajo la clasificación SAE. (1010, 4410, etc.) (U, C)
	Porcentaje de carbono	Permite determinar el porcentaje de carbono en el material de forma cualitativa. (alto, medio, bajo) (P, C)
	Nivel de aleación	Permite determinar el nivel de aleación presente en el acero como baja aleación, media aleación y alta aleación. (P, C)
	Comportamiento del material	Permite definir las propiedades mecánicas según sea el material elegido. (frágil, dúctil) (P, C)
	Existencia de tratamiento térmico	Determina la existencia de tratamiento térmico del material, si el valor adquirido es positivo, permite accesar y dar valores a los siguientes atributos: Revenido. (U, S), Templado.(U, S), Recocido.(U, S)
	Medio de temple	Permite determinar el medio con el que fue templado el elemento. (agua, aceite, salmuera, etc.) (U, C), Templado con flama. (U, S), Cementado. (U, S), Nitrurado. (U, S)
	Dureza	Adquiere el valor de la magnitud de la dureza, supuesto para las condiciones del elemento en la bibliografía
<p>Falla: Esta clase tiene como objetivo almacenar la información correspondiente a la falla como es geometría, apariencia, etc.</p>	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. (opaca, 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)
<p>Medio de operación: Esta clase fue creada para recabar información correspondiente al medio en donde se desempeñaba el elemento antes de la falla</p>	Tiempo de operación	Permite cuantificar el tiempo en que el elemento estuvo en servicio. (U, N)
	Temperatura	Permite cuantificar la magnitud de la temperatura media en °C a la que operaba el elemento. (U, N)
	Temperatura atmosférica	Permite cuantificar la magnitud de la temperatura media en °C en el lugar donde operaba el elemento. (U, N)
	Humedad relativa	Permite determinar de forma cualitativa el nivel de humedad presente en el lugar de operación del elemento. (alto, medio, bajo.) (P, C)
	Presencia de agentes corrosivos	Permite seleccionar los distintos agentes corrosivos presentes en el medio de operación. (SOx, NOx, ácidos, etc.) (U, M)
	Líquidos en contacto	Permite determinar las sustancias líquidas que empapaban la pieza. (hidrocarburos, ácidos, agua, etc.) (U, M)
pH	Permite determinar cualitativamente el pH presente en el medio de operación. (ácido, neutro, alcalino.) (U, C)	

Tabla 4.10 Descripción de las clases ejes, conclusiones intermedias, recomendaciones, aceros, bronces e información visual de la falla

Clase	Atributos	Descripción de atributos
Ejes: Esta clase fue creada para obtener información correspondiente al elemento eje, evidentemente su uso es exclusivo para el análisis de estos	Proporción diámetro-longitud	Permite determinar cualitativamente la relación existente entre el radio del eje y su longitud para ejes circulares. (alto, medio, bajo) (P, C)
	Sección transversal	Permite identificar la forma geométrica de la sección transversal del eje. (Circular, agujerada, etc.) (U, C)
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	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, S)
	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)
Recomendaciones: Esta clase tiene como fin almacenar la información correspondiente a las recomendaciones realizadas a el usuario	Rec	Toma el valor procedente de una cadena de texto proveniente de una base de datos, para después ser presentada en pantalla. (P, S)
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	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)
Bronces: Esta clase fue creada para poder identificar el material si se tratara de bronce así como sus propiedades mecánicas	Bronces	Permite clasificar al bronce (U, C)
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	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

4.10 DETERMINACIÓN DE LA SECUENCIA DE OPERACIÓN (Jacobó *et al*, 2000, 2003)

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

- Material
- Tipo de pieza
- Sistema al que pertenece

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

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

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

En la tabla 4.11 se muestra la descripción de los pasos genéricos en la solución de un caso:

Tabla 4.11 Secuencia para la solución de un caso (Jacobo et al, 2002)

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

4.11 DESARROLLO DEL PROTOTIPO (Jacobo et al, 2000)

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

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

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

Capítulo 5. Descripción del Sistema

5.1 SUBSISTEMA DE ANÁLISIS DE FALLAS EN EJES

5.1.1 BASE DE CONOCIMIENTO PARA EL MÓDULO DE EJES

Esta fue realizada en *Visual Rule Studio*. 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 definidas en el *capítulo 4*.

Clases propiedades y atributos en Visual Rule Studio

La base de conocimiento 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 conocimientos, permitiendo anexar o corregir reglas; así como el resultado generado por éstas sin alterar el código en *Visual Basic*. En el *Anexo 4* se presentan las clases, atributos, propiedades y las reglas para ejes en la forma sintáctica de *Visual Rule Studio*. La representación tomada en el código tiene el propósito de una mejor comprensión de las reglas creadas.

Estructura de reglas generadas para el módulo de ejes

La estructura de reglas fue creada por los expertos e ingenieros del conocimiento. Las premisas obtenidas en la fase de representación del conocimiento fueron transferidas a código de *Visual Rule Studio*, las reglas están sujetas a un factor de certeza que fue determinado por el grupo de expertos. La utilidad de estas reglas se presenta sólo en el periodo de evaluación de resultados. El valor mínimo de disparo es variable, éste puede ser cambiado para casos más complejos en donde se requiera factores de certeza más altos, este valor también es definido por los expertos. El sistema cuenta con una rutina de actualización automática del factor de certeza de las reglas (refinamiento), se parte de un valor inicial y a medida que se van resolviendo casos el programa los va ajustando, si la solución de un caso en el sistema permitió llegar a conclusiones satisfactorias en la práctica, los factores de certeza implicados en el caso tendrán un incremento en el nivel de confianza, por otro lado si no se llega a una solución satisfactoria se decrementarán

Las reglas se presentan en el *Anexo 5* tal y cómo aparecen en el código de *Visual Rule Studio*. El primer bloque de reglas corresponde a la selección del elemento y material, éste es un módulo general para el SE en AF de elementos mecánicos metálicos, determina el tipo de elemento que se desea analizar y el material del que está compuesto. El segundo bloque sirve para determinar el tipo de falla que se presentó. La fractura es el tipo de falla más común en ejes, de tal forma, este módulo sólo funciona para fractura, 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, así como las conclusiones intermedias. El tercer bloque 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, la información sobre los resultados de pruebas mecánicas, es fundamental para que el sistema pueda mostrar las conclusiones en pantalla. El

cuarto bloque 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.

5.1.2 ÁRBOL DE FALLAS

Como se describió en el *capítulo 2* el árbol de fallas es un método gráfico que sirve para el análisis de confiabilidad de 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 para este trabajo fue transportada hacia el AF para obtener una adecuada representación del conocimiento involucrado en la solución de los casos.

Una parte del árbol generado para encontrar las causas que llevaron a las falla se presenta en la *figura 5.1*, de este grafico se obtienen las siguientes 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)

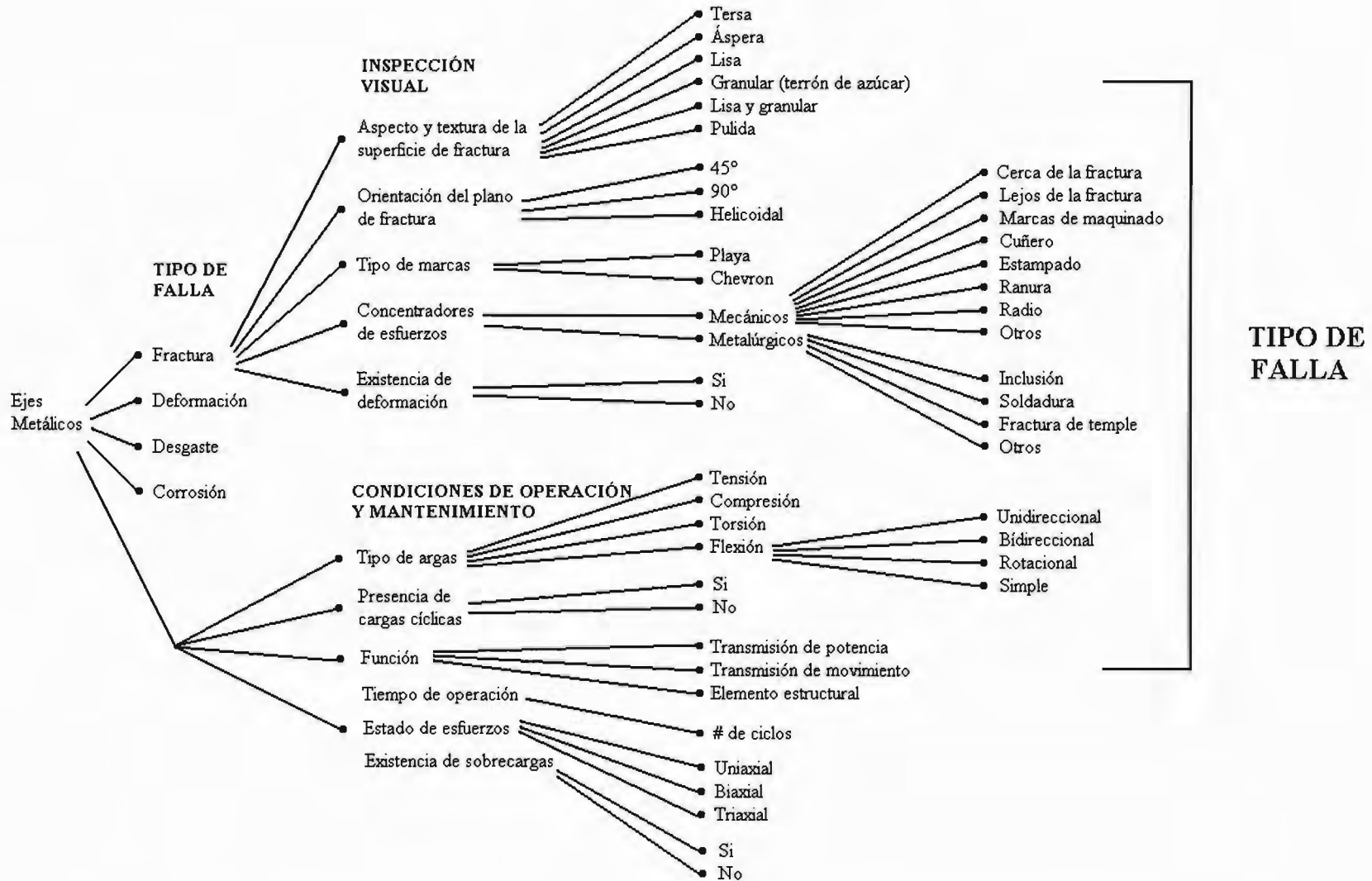


Figura 5.1 Fragmento del árbol de fallas en ejes para el caso de fallas de fractura

Después de la determinación del tipo de falla se procede a determinar las pruebas de laboratorio que se requieren realizar para tener más elementos que permitan validar las conclusiones obtenidas de la inspección visual de la pieza (*Tabla 5.1*).

Tabla 5.1 Pruebas mecánicas y microscopía relacionada al tipo de falla

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

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. El único caso en el que no se requiere conocer el tipo de falla para determinar las causas, es cuando exista un concentrador de esfuerzo por mal diseño y sobre éste se encuentre la fractura, la conclusión será relacionada a problemas en el diseño.

Falla por fatiga

Para este caso se verifica el resultado de las pruebas de dureza respecto a los valores obtenidos en la literatura, en el caso de que no coincidan, se compara 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 (*Anexo1*) 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 verifican 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 plantear 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 toma en cuenta el número de ciclos a los que el eje estuvo sometido, para el caso en que este número sea bajo se le 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.

5.1.3 INTERFASE DE USUARIO

Para el buen funcionamiento del SE, se necesitaba una interfase en donde el usuario describiera una gran cantidad de variables, y que tuviera la capacidad de mostrar imágenes, diagramas, esquemas y gráficos; esto con el fin de facilitar al usuario la comprensión de los términos empleados en el software. Por esta razón se escogió el lenguaje de programación *Visual Basic 6.0*, 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. En la *figura 5.2* se presenta la interfase de arranque del programa.

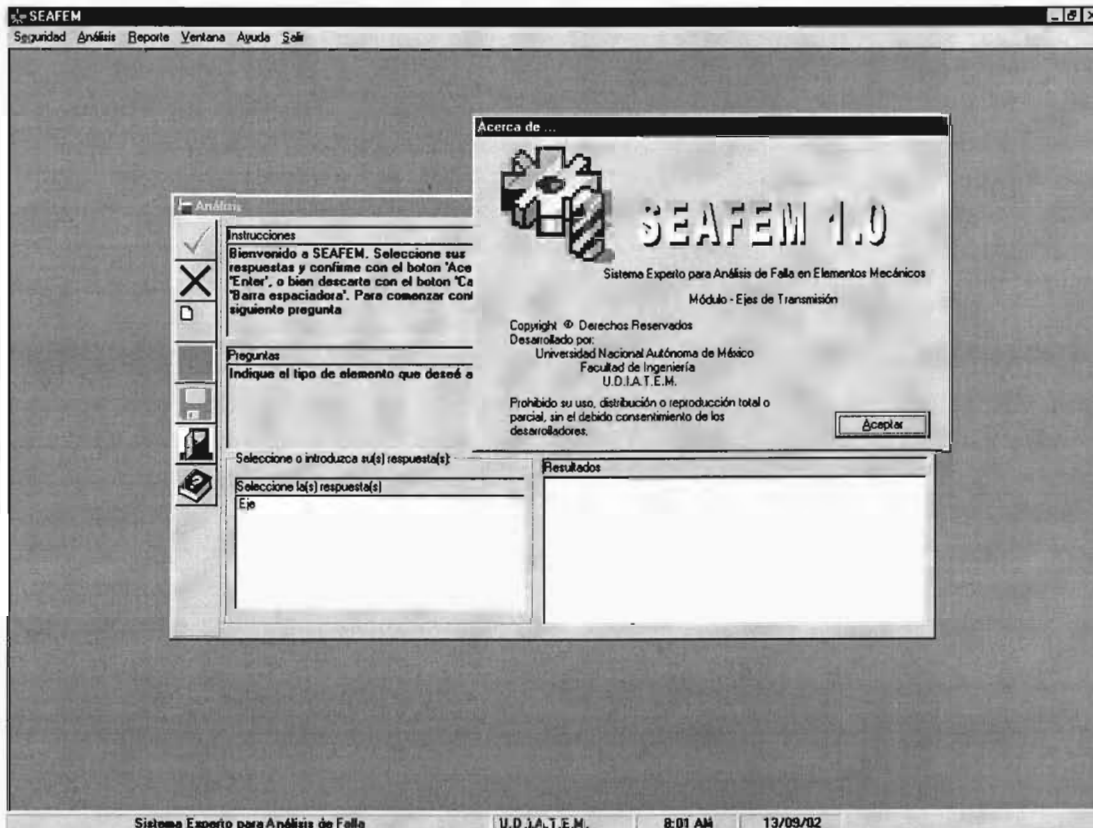


Figura 5.2 Interfase de múltiples documentos

Secuencia de operación de ventanas y formularios

El 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. El usuario tiene que oprimir el botón izquierdo para poder acceder a la siguiente ventana. En el menú principal (barra superior) aparece el formulario principal, el cual da acceso a todas las ventanas del sistema, en éste se encuentran opciones básicas que incluyen una clave de seguridad, análisis para la solución de un caso, base de casos resueltos, módulo de ayuda, impresión de reportes y una ventana de usos múltiples en donde se pueden guardar apuntes, imágenes, etc.

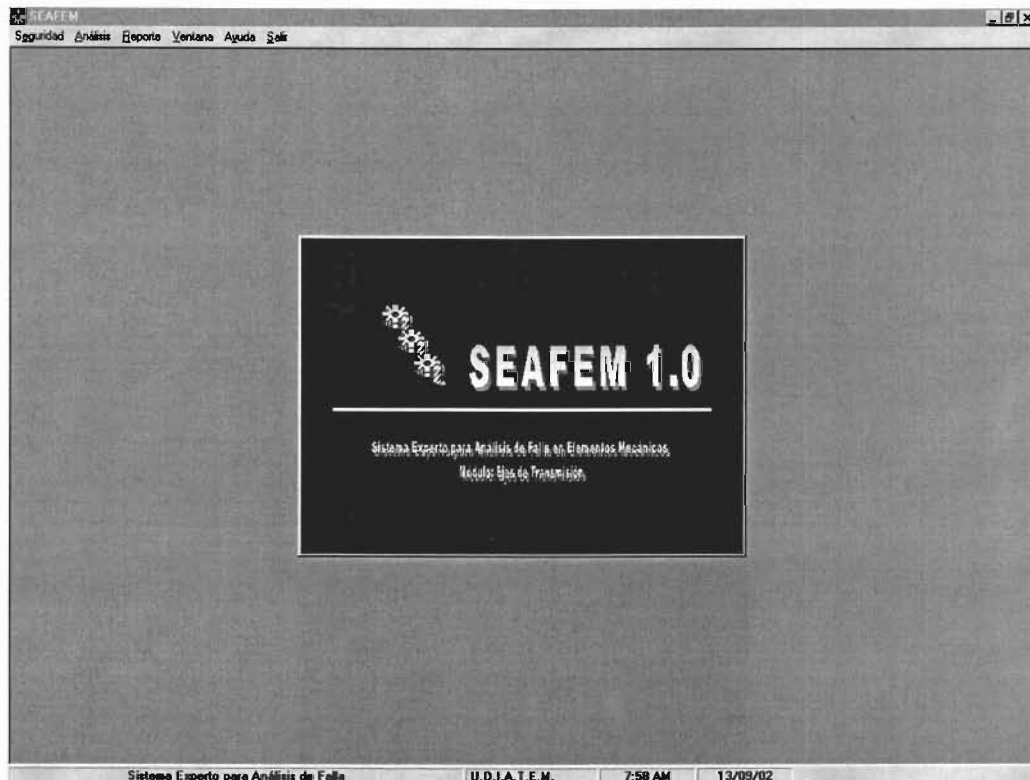


Figura 5.3 Pantalla de presentación

Para proceder al análisis de un caso, es necesario oprimir el botón de análisis que se encuentra en la parte superior derecha del formulario principal 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

El formulario general (*figura 5.4*) está constituido por cinco ventanas y una serie de botones de control. La ventana superior izquierda contiene las instrucciones para la captura correcta del formato al momento de cada pregunta o sección. La ventana intermedia del lado izquierdo contiene las preguntas realizadas por el sistema, la 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 fue creada para que el usuario pueda observar de forma rápida las respuestas introducidas al sistema; así como para darle seguimiento al caso analizado. La ventana inferior izquierda presenta los resultados parciales o finales. En la parte izquierda del formulario se encuentran botones gráficos que dan acceso a los controles básicos. Sobre este formulario 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 imagen que más se parezca al elemento analizado, con este procedimiento el sistema compara los datos introducidos con la figura seleccionada.

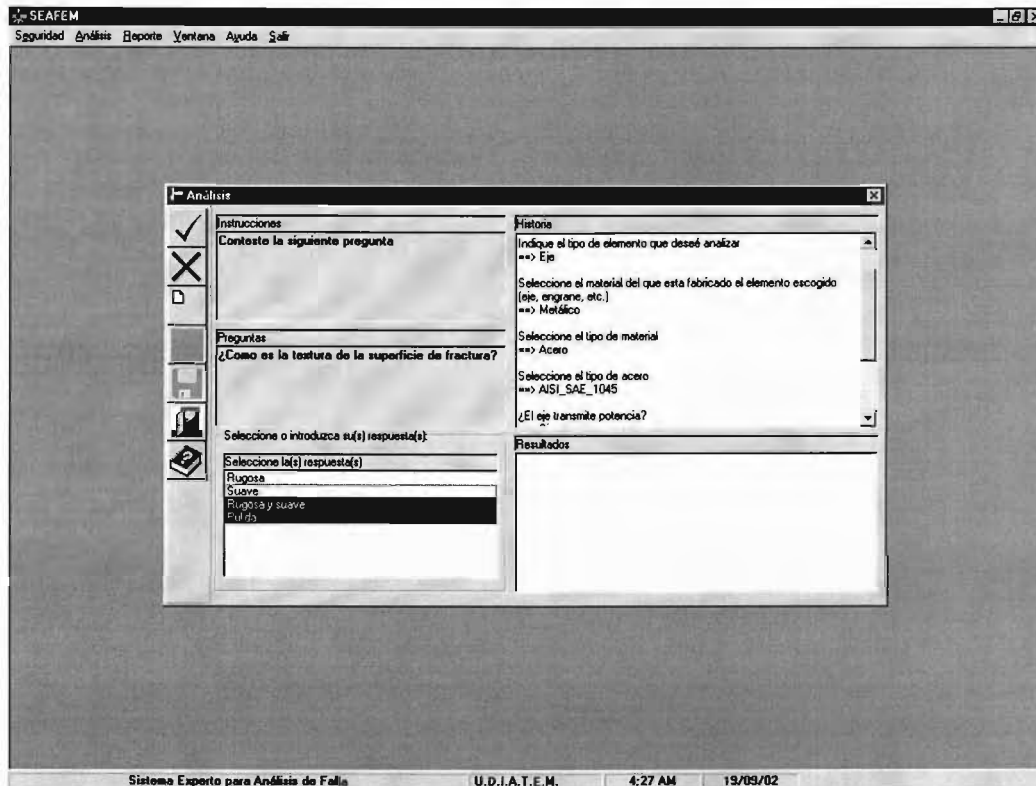


Figura 5.4 Formulario general

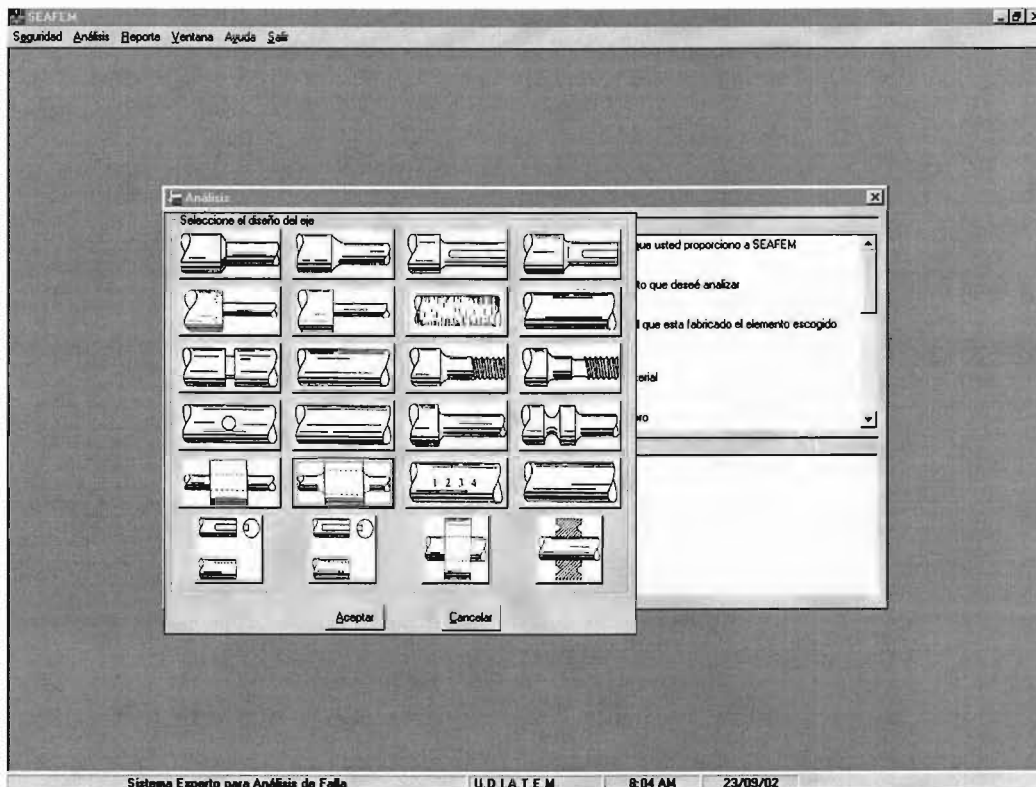


Figura 5.5 Ventana para “gráficos ejemplo”

Después de haber obtenido las primeras conclusiones intermedias (sobre 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 su orientación.

Ventanas para el análisis de esfuerzos

Esta interfase está compuesta por dos ventanas (*figuras 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 *segunda* contiene la forma donde se introducen los datos correspondientes a los elementos acoplados al eje y los apoyos, este formato es similar a una hoja de cálculo, la primera columna se listan los elementos acoplados y tienen asignado un código para su identificación. Los caracteres y su significado se muestran en la *tabla 5.2*.

Tabla 5.2 Código para los elementos montados en el eje

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

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, éstas 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 cónicos, este puede ser 45 ó 135 [°]

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

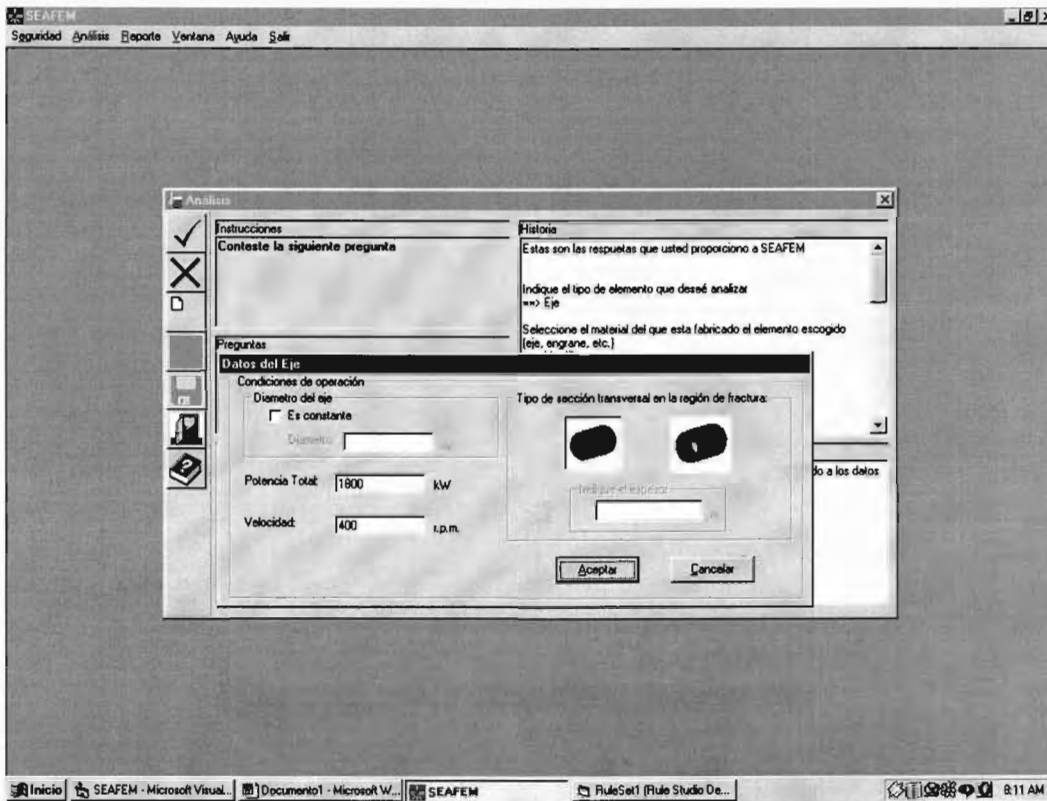


Figura 5.6 Ventana sobre datos generales geométricos y de sollicitación del eje

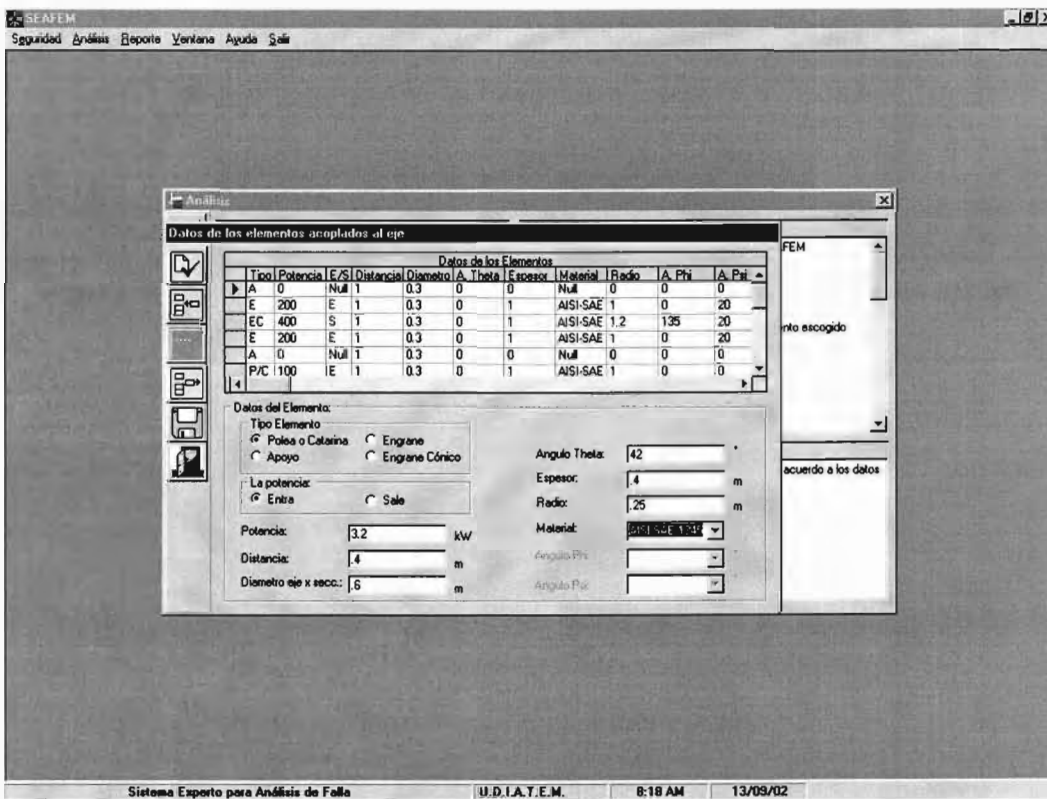


Figura 5.7 Ventana sobre características apoyos y elementos acoplados al eje

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 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 respecto a: funcionamiento del sistema, información de entrada, y correcta captura de las formas de datos sin recurrir a la documentación escrita del programa. Los tutoriales fueron creados para que el usuario pueda consultar temas sobre AF, éstos cuentan con un glosario de términos comunes, así como apuntes sobre AF y un catálogo de los distintos tipos de fracturas (figura 5.8).

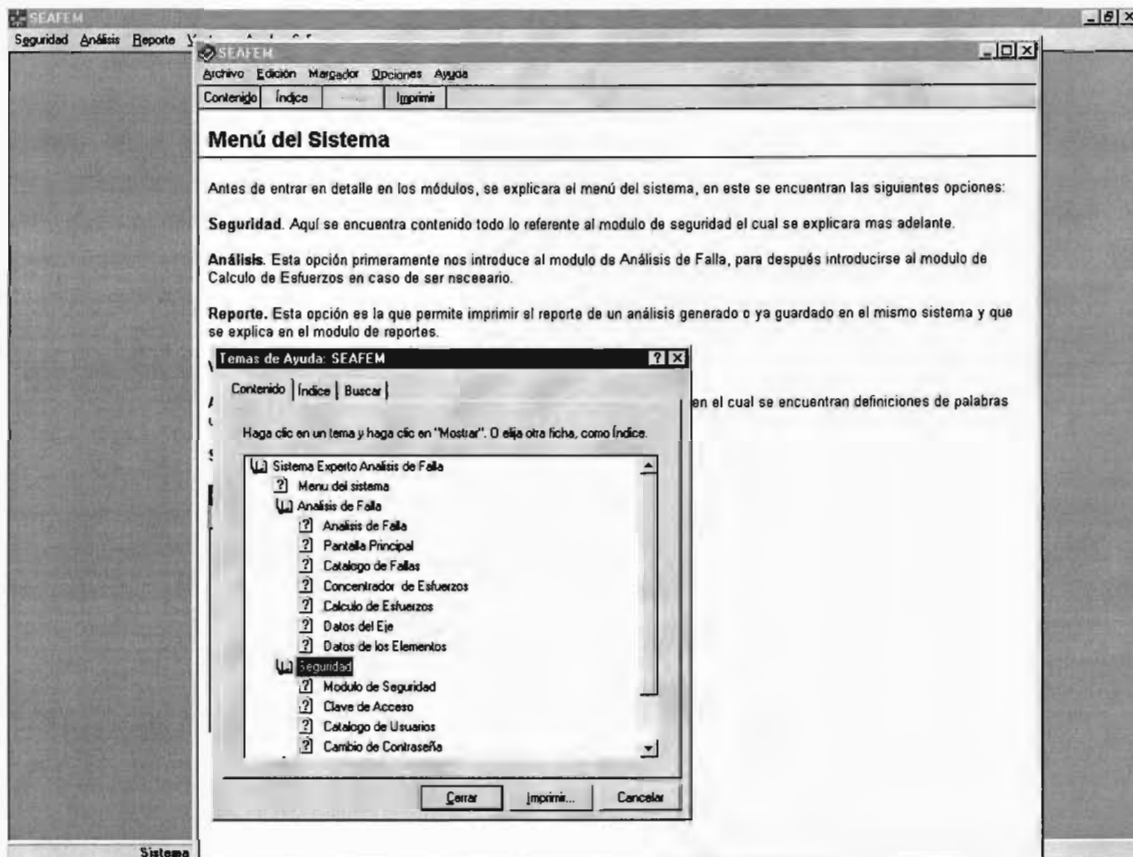


Figura 5.8 Ventana general para ayuda y titulares del sistema

5.2 SUBSISTEMA DE RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS

5.2.1 INTRODUCCIÓN

Debido a que el SE de UDIATEM fue desarrollado en la plataforma de *Visual Basic*, el sistema RBC se construyó en este lenguaje. Para el manejo de las tablas de la base de conocimientos, se usó *Microsoft Access*, ya que es compatible con este ambiente de programación. Para la construcción de la base de conocimientos se emplearon *Access*, *Excel* y editores de imágenes; Para la biblioteca de índices se utilizaron *Excel* y *Visual Basic*. El componente explicativo, la interfase de usuario y la integración del sistema RBC se realizaron a través de *Visual Basic*.

5.2.2 ORGANIZACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Para la organización del conocimiento, en primera instancia se tomó como base lo propuesto en (Cerrud *et al*, 2002; Das, 1996; Metals Handbook, 1990), obteniendo una clasificación sobre los mecanismos de falla principales y sus variantes (*tabla 5.3.*), el siguiente paso fue extraer los atributos que caracterizan a los distintos mecanismos, éstos son identificados como *conceptos clave*.

Tabla 5.3 Los distintos mecanismos de falla con sus variantes.

Mecanismo principal	Variante del mecanismo
Sobrecarga	Tensión, torsión, flexión, cortante, impacto, desgarre.
Fatiga	Flexión unidireccional, flexión inversa, torsión, contacto, fatiga térmica, marcas o huellas superficiales.
Corrosión	Corrosión uniforme, picaduras, corrosión bajo esfuerzos, corrosión intergranular, ataque de hidrógeno, exfoliación, corrosión con desgaste, separación selectiva, corrosión fatiga.
Fluencia	No se reportan variantes.
Desgaste	Adhesivo y abrasivo.

Las *tablas 5.4-5.8* son resultado de la clasificación de mecanismos de falla y su caracterización de los mismos. En esta fase, se obtuvieron las estructuras a partir de la revisión de la literatura, la cual fue validada por el experto líder, ya que los autores consultados pueden expresar el mismo concepto utilizando distintos términos.

Selección de casos para la organización del conocimiento

Se consultaron los manuales de ASM sobre casos de AF y (ASM; 1974, 1992) y se seleccionaron para su estudio 30 casos. Se elaboraron diagramas de *Ishikawa* (*figura 5.9*) en donde en forma sintética se plasmó la información de los casos, de esta manera se obtuvieron los conceptos clave. Para una comprensión más profunda del razonamiento seguido por los analistas, se elaboraron mapas de conocimiento (*ejemplo figura 5.10*), el cual corresponde al caso para el cual se dibujó el diagrama mostrado en la *figura 5.9*.

Luego de elaborar los diagramas y los mapas para los 30 casos, se observó que muchos de los conceptos de la literatura coincidían con los enunciados en las *tablas 5.4-5.8*. Debido a esto, las tablas sirvieron como una estructura adecuada de organizar el conocimiento de AF.

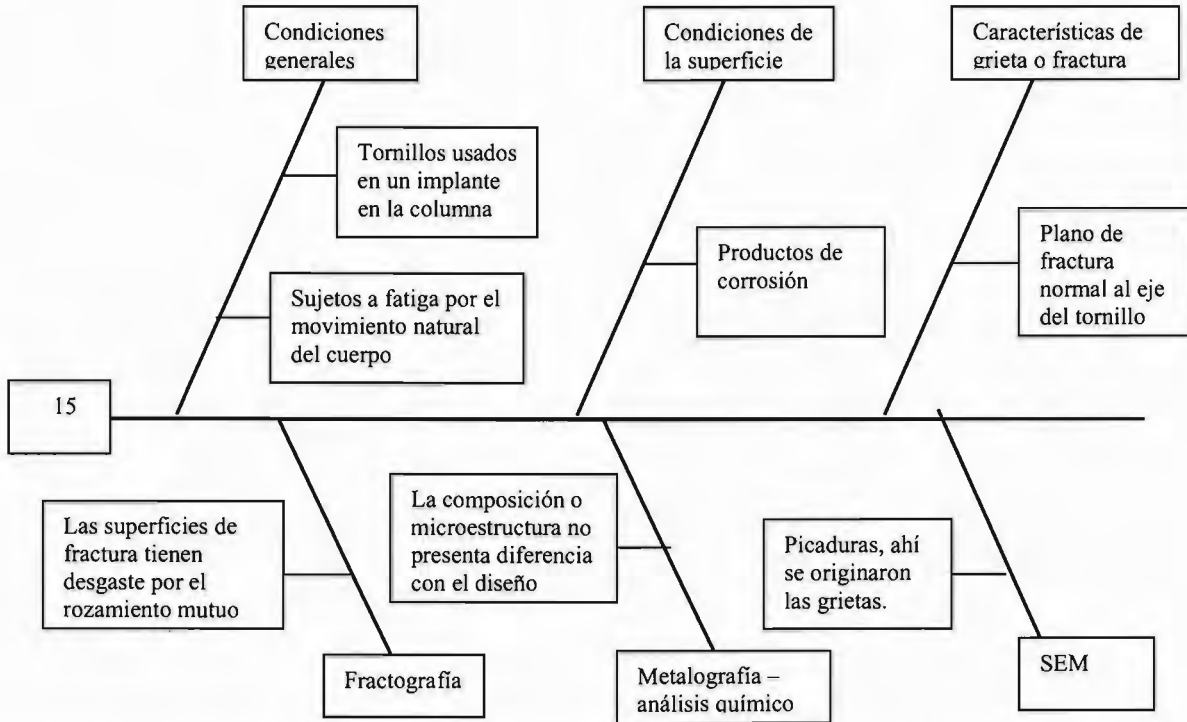


Figura 5.9 Diagrama de Ishikawa elaborado a partir de un caso de AF “Fractura por fatiga de tornillos de acero inoxidable 316L usados para implantes quirúrgicos” seleccionado de (ASM, 1992)

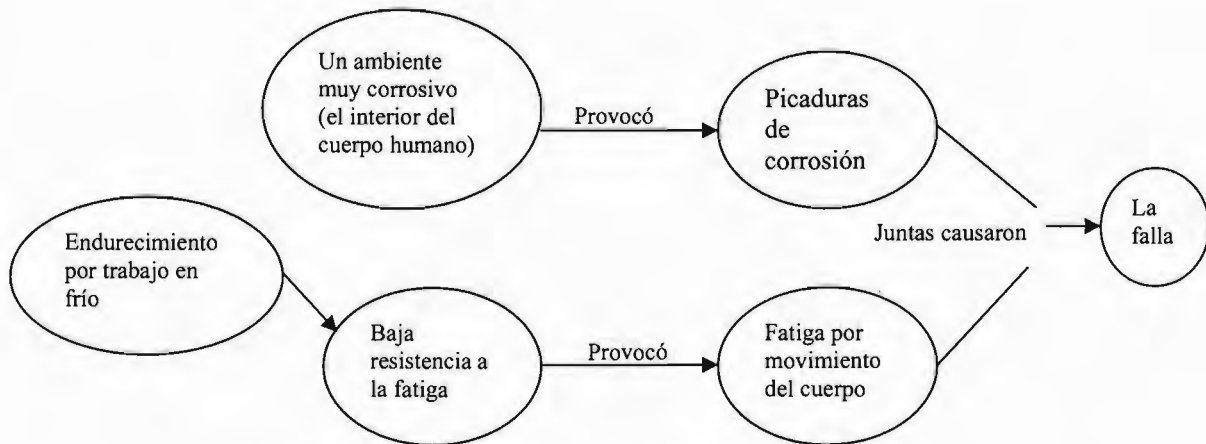


Figura 5.10 Mapa de conocimiento del caso de la figura 5.9

Tabla 5.4 Lista de los mecanismos de falla particulares de *sobrecarga*, con sus características distintivas

<p>SOBRECARGA EN TRACCIÓN (comportamiento dúctil) Geometría específica de la superficie de fractura Deformación plástica excesiva Cuellos en la fractura Superficie fibrosa Origen de falla en el centro de la superficie fibrosa Apariencia grisácea de las fibras Textura sedosa de la superficie de fractura Microcavidades equiaxiales Ruptura transgranular o intergranular</p>	<p>SOBRECARGA BAJO FLEXIÓN Deformación adyacente a la fractura. Es semejante a la falla por tracción Tiene regiones a 90° y a 45 ° con respecto al esfuerzo normal máximo. La microestructura del eje longitudinal muestra fibras dobladas</p>
	<p>FALLA POR SOBRECARGA BAJO ESFUERZOS CORTANTES (Comportamiento dúctil) Deformación adyacente a la fractura con cambio en el eje central. Presencia de agujeros elongados o parabólicos Zonas en forma de creciente brillantes y finas</p>
<p>SOBRECARGA EN TRACCIÓN (comportamiento frágil) Geometría específica de la superficie de fractura Deformación plástica pequeña o ausente Superficie con una zona radial y un labio limítrofe. Superficie de fractura irregular, con una fase cristalina Escalón de clivaje, patrón de río Ruptura transgranular</p>	<p>FALLA POR SOBRECARGA BAJO ESFUERZOS CORTANTES (Comportamiento frágil) No hay deformación o cambio en el eje central.</p>
	<p>FALLA POR IMPACTO Propagación rápida o inestable de la fractura. Patrón de chevron o espinazo de pescado</p>
<p>SOBRECARGA BAJO TORSIÓN (comportamiento dúctil) Fractura normal al esfuerzo de tensión Superficie con deformación en la dirección de rotación</p>	<p>FALLA POR SOBRECARGA Microcavidades pequeñas Alta deformación plástica Si había bajo esfuerzo de cedencia, las microcavidades son grandes</p>
<p>SOBRECARGA BAJO TORSIÓN (comportamiento frágil) Fractura a 45° con respecto al esfuerzo normal máximo Superficie de fractura tipo espiral, sin deformación plástica.</p>	

Tabla 5.5 Lista de los mecanismos de falla de *desgaste*, con sus características distintivas

<p>DESGASTE ABRASIVO Remoción de partículas grandes Abrasión con ralladuras (bajo esfuerzo)</p>
<p>DESGASTE ADHESIVO Apariencia rota o con surcos mostrando la dirección de arranque</p>

Tabla 5.6 Atributos de las fallas por fluencia

Enorme deformación plástica
Grietas intergranulares adyacentes a la grieta principal
Vacios de fluencia en la frontera de grano cerca de la fractura

Tabla 5.7 Lista de los mecanismos de falla por *fatiga*, con sus características distintivas

<p>EN TODAS LAS FALLAS POR FATIGA PUEDE HABER:</p> <p>Marcas de playa, fractura transcristalina o intercristalina o estrías</p>	<p>FATIGA POR FLEXIÓN INVERSA</p> <p>Se desarrollan dos grietas partiendo de puntos diametralmente opuestos fracturas planas, sin cuellos</p>
<p>FATIGA EN ALTOS CICLOS (más de 10^6)</p> <p>Superficie de fractura fina.</p> <p>Los espacios entre las marcas de playa son finos, uniformes y angostos.</p> <p>Las líneas de propagación de marcas de playa o estrías están bien definidas</p>	<p>FATIGA POR FLEXIÓN ROTACIONAL</p> <p>La fractura crece en sentido opuesto a la rotación, pero se desvía 15° o más.</p> <p>La fractura comienza en cualquier punto de la periferia</p>
<p>FATIGA A BAJOS CICLOS (menos de 10^5)</p> <p>Superficie más rugosa.</p> <p>Los espacios son difusos, no son uniformes, son anchos y separados</p> <p>Las líneas de propagación de marcas de playa o estrías son difusas</p>	<p>FATIGA POR CONTACTO</p> <p>Presenta desgaste</p> <p>Deterioraciones, cavidades en forma de cráter</p>
<p>FATIGA POR FLEXIÓN UNIDIRECCIONAL</p> <p>El patrón de fractura es simétrico con respecto al origen</p> <p>El origen de las marcas de playa es único.</p> <p>Se forman varias grietas que convergen en una</p>	<p>MARCAS O HUELLAS SUPERFICIALES</p> <p>Huecos o abolladuras causados por la deformación plástica, identificados como indentaciones</p> <p>FATIGA TÉRMICA</p> <p>Numerosos sitios de iniciación que se unen de manera aleatoria cerca de un filo de la pieza.</p> <p>Sin deformación plástica</p> <p>Rupturas transgranulares</p> <p>Fracturas planas y transversales</p> <p>Superficies de fractura con productos de corrosión u oxidación.</p>

Tabla 5.8 Lista de los mecanismos de falla por *corrosión*, con sus características distintivas

<p>CORROSIÓN UNIFORME O SUPERFICIAL</p> <p>Exceso de óxidos (polvo)</p> <p>Decoloración de la pieza</p>	<p>CORROSIÓN POR EXFOLIACIÓN</p> <p>Se observa una hoja en el examen con microscopio electrónico</p>
<p>PICADURAS</p> <p>Cavidades agudas y bien definidas en la superficie</p> <p>Pueden estar cubiertas por productos de corrosión.</p>	<p>CORROSIÓN-DESGASTE</p> <p>Decoloración superficial debida a la oxidación.</p> <p>La grieta se origina en la zona desgastada</p>
<p>SEPARACIÓN-DESZINCIFICACIÓN</p> <p>Pérdida selectiva de algún componente de la aleación.</p>	<p>CORROSIÓN FATIGA</p> <p>Picaduras</p> <p>El fondo de las picaduras es el origen de la grieta.</p> <p>Las grietas crecen en dirección normal al esfuerzo</p>
<p>CORROSIÓN INTERGRANULAR</p> <p>Redes de grietas</p>	<p>Se inician y se propagan varias grietas simultáneamente</p> <p>Estrías</p> <p>DAÑO POR HIDRÓGENO</p> <p>Ampollamiento o delaminación del material</p> <p>Fragilización del material.</p> <p>Escamas y ojos de pescado que rodean la inclusión no metálica</p>

5.2.3 ESTRUCTURA DE LOS CASOS

Se examinaron las estructuras de información reportadas en la literatura (Cerrud *et al*, 2002; Das, 1996; Corrosion Atlas, 1991; Metals Handbook, 1990) Con base en esta revisión, se generó una estructura definitiva al completar y depurar los criterios desarrollados en las *tablas 5.4-5.8*. En las *tablas 5.9-5.12* se muestra esta nueva estructura. Las *tablas 5.10-5.12* corresponden al desglose de la región sombreada en la *tabla 5.9*.

La estructura de organización cuenta con dos secciones: el problema y la solución. Dentro del problema se encuentra lo siguiente:

- a) *Título y número del caso*. Su función es la identificación del caso por parte del usuario y del programa.
- b) *Clases y atributos*. Cada clase contiene distintos atributos

La solución cuenta con los siguientes apartados:

- a) *Descripción del caso*. Es un texto en lenguaje natural que explica el caso, con todo el procedimiento de análisis.
- b) *Discusiones*. Una pequeña deliberación hecha por el analista para determinar el mecanismo de falla.
- c) *Causa más probable*. Luego de deliberar, se enuncia el mecanismo de falla más probable y la causa de falla.
- d) *Acciones correctivas*. Directrices propuestas por el analista para evitar la recurrencia de falla.
- e)

Tabla 5.9 Estructura definitiva de un caso para el sistema RBC

Problema	<i>Título y número de caso</i>	
	Clases	Ejemplos de los atributos
	Llaves primarias	Marcas de playa, atmósfera marina
	Información del material	Ferroso, no ferroso, contenido de carbono
	Características de la superficie de fractura / grieta	Cuellos, patrón de chevron, labios
	Observación con estereoscopio / microscopio óptico	Picaduras, estrías, fractura intercrystalina
	Examen químico / Metalografía	Inclusiones, porosidad, corrosión intergranular
	Análisis SEM (Microscopio electrónico de barrido)	Clivaje, microcavidades
Solución	Descripción del caso incluyendo información del material, características de la superficie de fractura / grieta, observación con estereoscopio / microscopio óptico, examen químico / metalografía y análisis SEM. Además se incluyen imágenes. Algunos casos incluyen datos extras como análisis de esfuerzos o pruebas destructivas.	
	Discusiones para determinar el mecanismo de falla	
	Causa más probable	
	Acciones correctivas	

Tabla 5.10 Lista de atributos, correspondientes a las clases llaves primarias e información del material

CLASE: LLAVES PRIMARIAS
La superficie de fractura tiene dos zonas con rugosidad distinta
Hay pérdida de masa y había contacto o movimiento relativo
Se presentan marcas de playa
La pieza tiene deformación plástica y no se ha roto
Existen vibraciones y otros signos anormales y la pieza no ha fallado
Existen óxidos u otros productos de corrosión en la sup. de fractura
Se operaba con ciclos térmicos
Presencia de sustancias agresivas (muy ácidas o alcalinas) u oxidantes
Atmósfera marítima
Sólo se han detectado grietas, no hay fractura
Se hizo reparación, se sustituyó material o se rediseñó la pieza
CLASE: INFORMACIÓN DEL MATERIAL
Ferroso
No ferroso
SOLO SI ES FERROSO
Fundición
Acero
CONTENIDO DE CARBONO
Menor al 0.25%
Entre 0.25% y 0.55%
Entre 0.55% y 1%
Entre 1% y 5%
CONTENIDO DE ALEANTES
Menor al 0.1%
Entre 0.1% y 1%
Entre 1% y 5%
Entre 5% y 11%
Mayor al 11% / inoxidable
ELEMENTOS ALEANTES ESPECÍFICOS
El material es una aleación de aluminio o magnesio.
El material es una aleación de zinc
TIPO DE SISTEMA
Transmisión de movimiento
Transmisión de potencia
Soporte
Transporte o contención de fluidos
TRATAMIENTOS TÉRMICOS
Recocido
Normalizado
Temple y revenido
Carburizado
Endurecimiento por trabajo en frío, precipitación, flama
INFORMACIÓN ADICIONAL SOBRE EL MATERIAL
Recubrimientos
Fragilización del material

Tabla 5.11 Lista de atributos, correspondientes a las clases características de la superficie de fractura y estereoscopio/microscopio óptico

CLASE: CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA / GRIETA
Apariencia cristalina en una zona
Patrón de hueso de chevron o espinazo de pescado
Poca o nula deformación plástica-frágil
Alta deformación plástica-dúctil
Cambio de tonalidad en la superficie de la pieza
Huecos o abolladuras-indentaciones
Desprendimiento de partículas por abrasión
Abrasión con ralladuras
Se encuentra exceso de polvo (productos de corrosión)
La superficie está deslustrada sin daño aparente
Presencia de labios
Apariencia rota o con surcos mostrando la dirección de arranque
Superficie con deformación en la dirección de rotación
Superficie de fractura tipo espiral, sin deformación plástica.
Zonas en forma de creciente brillantes y finas
Fractura perpendicular al esfuerzo normal máximo
Fractura a 45° con respecto a la dirección del esfuerzo normal máximo
Desgaste en las superficies de fractura
La falla está en un concentrador de esfuerzos mecánico
Se identifica fácilmente origen, propagación lenta y fractura, hay corrosión
La fractura comienza en un punto de la periferia
Grietas adyacentes a la grieta principal
Porosidad superficial (asociada con abrasión)
Ampollamiento o delaminación del material
Origen de falla en el centro de la superficie
Cuellos en la fractura
La fractura crece en sentido opuesto a la rotación, pero se desvía 15° o más.
Tiene regiones a 90° y a 45 ° con respecto al esfuerzo normal máximo
Hay variaciones de tonalidad en la superficie de fractura
La grieta se origina en una zona desgastada
Marcas de playa simétricas con respecto al origen de la grieta
CLASE: ESTEREOSCOPIO / MICROSCOPIO ÓPTICO
Estrías / marcas de chevron
Patrón de agrietamiento de río
La corrosión está en las capas de recubrimientos
Se pierde gran parte del recubrimiento
Patrón de anillos concéntricos
Picaduras
El fondo de las picaduras es el origen de la grieta.
Fractura intercristalina
Fractura transcristalina
El origen de las marcas de playa es único.
Deformación adyacente a la fractura.
Deformación adyacente a la fractura con cambio en el eje central de la pieza
No hay deformación o cambio en el eje centra de la pieza
Cavidades agudas y bien definidas en forma de cráter

Tabla 5.12 Lista de atributos, correspondientes a las clases metalografía/análisis químico y análisis SEM

CLASE: METALOGRAFÍA / ANÁLISIS QUÍMICO
Inclusiones o Presencia de precipitados
Porosidad
Pérdida selectiva de un componente de la aleación
Grietas con ramificaciones
Se desarrollan dos grietas partiendo de puntos diametralmente opuestos
Patrón de río
Redes de grietas (corrosión intergranular)
Ruptura intergranular
La composición o microestructura NO cumple las especificaciones de diseño
CLASE: ANÁLISIS SEM
Estrías / marcas de llanta
Microcavidades equiaxiales
Ruptura intergranular
Patrón de río
Apariencia dúctil
Ruptura transgranular
Apariencia frágil
La microestructura del eje longitudinal muestra fibras dobladas
Presencia de microcavidades elongadas o parabólicas
Microcavidades equiaxiales
Las microcavidades son grandes, asociadas con un esfuerzo de cedencia bajo
Se inician y se propagan varias grietas simultáneamente
Los espacios entre los marcas de playa o estrías son difusos y no uniformes
Líneas de propagación de marcas de fatiga débiles
Fractura combinada dúctil-frágil (típica de clivaje)
Los espacios entre las marcas de playa o estrías son finos, uniformes y angostos.
Líneas de propagación de marcas de fatiga bien definidas
Pérdida selectiva de un componente de la aleación
Microporosidades
Ojos de pescado o escamas rodeando una inclusión no metálica
Se puede observar una hoja
Vacios de fluencia en la frontera de grano cerca de la fractura
Corrosión en grietas (crevice)

5.2.4 CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE CONOCIMIENTO

La base de conocimiento está integrada por un conjunto de archivos:

- Una tabla que reúne los valores lógicos de los atributos. La tabla contiene 30 vectores con valores, los cuales corresponden al número de casos.
- Un máximo de cuatro archivos de imagen para cada caso
- Un archivo de texto por caso.

Esta base contiene todos los elementos que aparecen en las *tablas 5.9-5.12*. Los archivos de texto contienen la descripción, la discusión, las causas más probables y las acciones correctivas, además del título del caso.

Para construir la tabla de valores lógicos, se elaboraron formatos, en éstos se encuentran los atributos de las *tablas 5.10-5.12* clasificados de acuerdo al mecanismo de falla, esta clasificación se hizo para facilitar la obtención de valores lógicos, los cuales sirven para calcular la distancia entre los atributos de distintos casos. Los valores lógicos son 1 (atributo presente), -1 (atributo ausente) ó 0 (no es posible precisar si el atributo está presente o ausente). En la *tabla 5.13* se presenta un fragmento del formato utilizado para atributos de los casos 21 a 25.

Tabla 5.13 Fragmento de un formato de captura de datos

25	24	23	22	21	←Número de caso
VALOR LÓGICO					ATRIBUTOS
SOBRECARGA EN TENSION DUCTIL					
1	1	1	-1	-1	Presencia de deformación plástica
1		1		-1	Superficie de fractura a 45° con respecto al esfuerzo aplicado
1				-1	Microcavidades equiaxiales
1				-1	Ruptura intergranular
-1		-1	-1	-1	Aparición de cuellos
SOBRECARGA EN TENSION FRÁGIL					
-1	-1	-1	1	1	No hay deformación plástica.
-1		1		-1	Superficie de fractura a 90° con respecto al esfuerzo aplicado
-1				-1	Ruptura transgranular
-1		-1	-1	-1	Presencia de labios

Para completar las celdas vacías de la tabla 5.13, se realizó una nueva revisión de los casos y se decidió cuáles de los atributos poseían un valor lógico de 0. Esta tarea requirió un estudio minucioso la cual se realizó con el apoyo del experto líder.

Una vez determinados todos los valores de atributo, se generó un archivo en *Access* donde se capturaron los atributos y los valores lógicos para 30 casos. En la tabla 5.14 se muestra un fragmento de la organización del archivo, en donde se presentan algunos de los atributos de la clase “Estereoscopio / Microscopio óptico”.

5.2.5 PONDERACIÓN DE ATRIBUTOS

No todos los atributos tienen la misma importancia. Para asignar la ponderación, en primera instancia se examinó en cada caso cuales atributos habían sido los más importantes y se les asignó un peso superior al de los demás, pero esto arrojaba resultados particulares que no se podían utilizar para todos los casos. Se realizó entonces otro ciclo de entrevistas con expertos. La sesión consistía en enunciar cuáles son los signos para distinguir un mecanismo de falla de otro, el experto eligió cuáles eran más importantes. Luego de algunas sesiones, se notó que los atributos se podían clasificar en tres tipos:

- Determinantes
- Relevantes, pero con menor importancia que los determinantes
- Prácticamente irrelevantes

Dado que la similitud es una medida numérica, se optó por brindar un peso numérico a los atributos, de esta manera se definieron los términos expresados en la *tabla 5.15*. En el *Anexo 6* se presentan los pesos de los atributos.

Tabla 5.14 Fragmento de la tabla de atributos.

ATRIBUTO	Número de caso →	1	1	1	1	1	1
		0	1	2	3	4	5
		VALORES LÓGICOS					
Estrías / marcas de chevron		1	-1	-1	-1	-1	-1
patrón de agrietamiento de río		-1	-1	-1	-1	-1	1
La corrosión está en sujetadores o en las capas de recubrimientos.		-1	-1	0	-1	-1	-1
se pierde toda la capa protectora		-1	-1	-1	0	-1	-1
patrón de anillos concéntricos		-1	-1	-1	-1	-1	-1
Picaduras		-1	-1	1	-1	-1	-1
El fondo de las picaduras es el origen de la grieta.		-1	-1	1	-1	-1	-1
Presencia de labios		-1	-1	-1	1	-1	-1
Fractura intercrystalina		-1	1	-1	-1	1	1

Tabla 5.15 Peso de los distintos atributos

Tipo de atributo	Peso (escala aritmética)
Determinante	3
Menor importancia	2
Prácticamente irrelevante	1

5.2.6 MEDIDAS DE RELEVANCIA

Determinados los pesos, se desarrollaron las medidas de relevancia. El tipo de medida que se utilizó es la del vecino más cercano, donde se selecciona los casos históricos que más características similares tengan con el problema actual. Este método fue seleccionado debido a que se puede aplicar de manera adecuada a un prototipo, pues no utiliza medidas estadísticas que sólo pueden obtenerse a través del uso del sistema.

La similitud se calcula utilizando los datos del *Anexo 6* y los valores de distancia de la *tabla 5.16*; esta fue elaborada con base en las medidas de distancia propuestas por (Liao, 2000); en el manejo del valor “desconocido”, se ha utilizado la teoría de (Ricci y Avesani, 1998).

Para medir la similitud total entre dos casos, se podía utilizar la similitud euclidiana o la de Hamming. Al iniciar la construcción del sistema, se ocupó la similitud de Hamming con el propósito de tener un mejor control de la operación, una de las formas de la ecuación es:

$$SIM(X, Y) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n wi * dist(xi, yi)}{\sum_{i=1}^n wi} \dots\dots\dots(5.1)$$

Donde X es un caso, x es el valor de un atributo de un caso.

Y es otro caso, y es el valor de un atributo de otro caso.

$Dist$ es la distancia entre atributos.

SIM es la similitud entre dos casos.

w es la ponderación de cada atributo.

Tabla 5.16 Criterios para medir la distancia entre valores de atributos. x , y representan valores del mismo atributo para dos casos diferentes

x	y	Distancia	Razón
1	-1	1	Valores distintos
-1	1	1	Valores distintos
0	1	0.5	Un valor es conocido y el otro no
0	-1	0.5	Un valor es conocido y el otro no
1	0	0.5	Un valor es conocido y el otro no
-1	0	0.5	Un valor es conocido y el otro no
0	0	0	Valores iguales
1	1	0	Valores iguales
-1	-1	0	Valores iguales

Posteriormente se empleó la similitud euclidiana:

$$SIM(X, Y) = 1 - \sqrt{\sum (w_i^2 * dist(x_i, y_i)^2)} \dots\dots\dots(5.2)$$

Pero al comparar los resultados obtenidos con las ecuaciones 5.1 y 5.2, se observó que la similitud tomada con la ecuación 5.2 tenía una diferencia sustancial respecto a la similitud de Hamming. La ecuación de *Hamming* tiene una mayor confiabilidad (Liao, 2000; Ortiz *et al*, 2003) y es la que se emplea en este sistema.

La función de similitud para este sistema se puede escribir como:

$$SIM(X, Y) = 1 - \frac{\sum \alpha_i W_{li} + \sum \beta_i W_{ati}}{11W_{li} + \sum W_{ati}} \dots\dots\dots (5.3)$$

Y también se puede escribir como:

$$SIM(X, Y) = 1 - \frac{\sum \alpha_i W_{li}}{11W_{li} + \sum W_{ati}} - \frac{\sum \beta_i W_{ati}}{11W_{li} + \sum W_{ati}} \dots\dots\dots(5.4)$$

Donde α_i son los valores de distancia que existen al comparar las llaves primarias,

W_{li} es el peso de las llaves primarias,

El número 11 corresponde con el número de llaves,

W_{ati} es el peso de todos los atributos distintos a las llaves y

β_i son los valores de distancia que existen al comparar los atributos distintos a las llaves.

5.2.7 BIBLIOTECA DE ÍNDICES

Los conceptos clave “llaves primarias” deben tener un peso mayor que los demás atributos, pues sirven como un mecanismo de indexado. Estas son proposiciones que el usuario debe afirmar o negar con la mayor certeza, su fundamento es el método de indizado basado en matrices y vectores de conocimiento. Para obtener los pesos, se siguieron tres pasos: establecimiento de requisitos, método analítico y solución final. El primero consistió en determinar las características que debían cumplir los pesos, de aquí se concluyó que era necesario encontrar un valor óptimo los cuales se determinaron para cada una de las llaves (Ortiz *et al*, 2003).

5.2.8 INTERFASE DE USUARIO

La interfase cuenta con dos tipos de pantallas: las de captura de información y las de resultados. En la *figura 5.11* se muestra una pantalla para captura de datos y en la *figura 5.12* una para exhibir resultados. Las pantallas de captura contienen las clases y atributos de la *tablas 5.10-5.12*. Éstas tienen un pequeño recuadro para que el usuario pueda asignar el valor lógico a cada uno de los atributos. Éstos últimos son leídos de la base de conocimientos en tiempo de ejecución, lo cual es una característica conveniente porque basta modificar los atributos que están en la base de conocimientos para cambiar las pantallas de captura.

5.2.9 MÓDULO DE EXPLICACIÓN

Está compuesto por una caja de texto y un conjunto de imágenes (*figura 5.12*) La caja despliega la descripción del caso en lenguaje natural, las observaciones con distintos instrumentos, la deliberación para resolver el caso, la solución y las acciones correctivas. En algunos casos, aparece un apartado para pruebas de simulación y otro para recomendaciones de cómo se pudo evitar la falla.

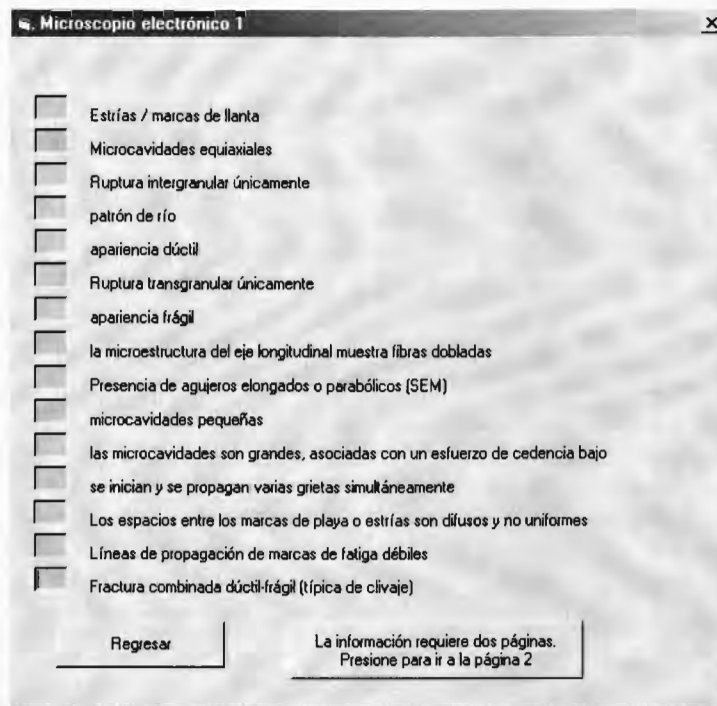


Figura 5.11 Pantalla de captura, corresponde a la clase “análisis SEM”

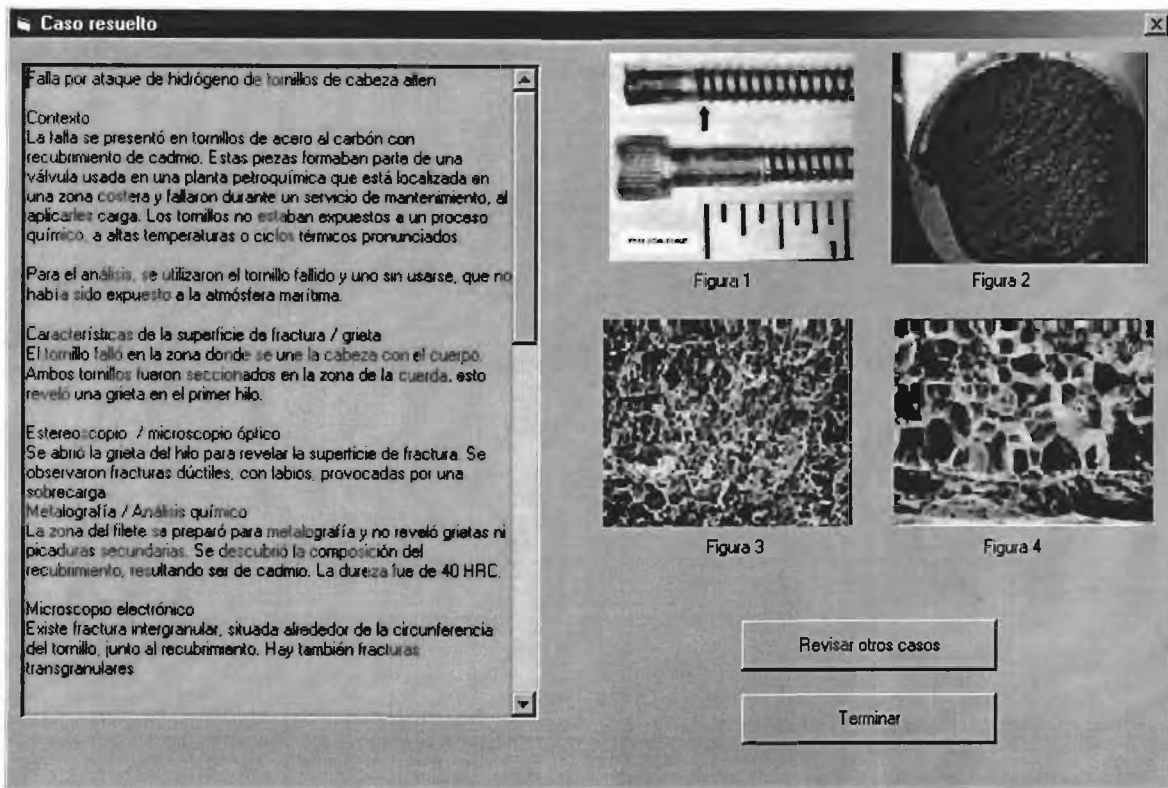


Figura 5.12 Módulo de explicación: ejemplo de pantalla para mostrar resultados

5.2.10 OPERACIÓN DEL SISTEMA

La interacción de los componentes en el tiempo de ejecución es la siguiente (figura 5.13):

- 1) El sistema lee la base de conocimiento para llenar las pantallas de captura de datos de la interfase de usuario. En la interfase se obtiene toda la información del caso en estudio. El sistema almacena esa información en un vector.
- 2) El vector es comparado con los vectores de los casos históricos, utilizando las medidas de relevancia y la biblioteca de índices.
- 3) El programa obtiene la similitud y ordena los casos de forma decreciente de acuerdo a la similitud en una tabla, donde también aparece el número de caso. El usuario puede elegir cual caso desea analizar de entre los diez más semejantes.
- 4) A través del número del caso histórico, el sistema activa los archivos de descripción del caso y los de imágenes sobre el módulo de explicación, el cual cuenta con la opción de regresar a la tabla del punto 3 y revisar otros casos.
- 5) Una vez terminada la búsqueda por parte del usuario, este mismo puede detener la operación del sistema.

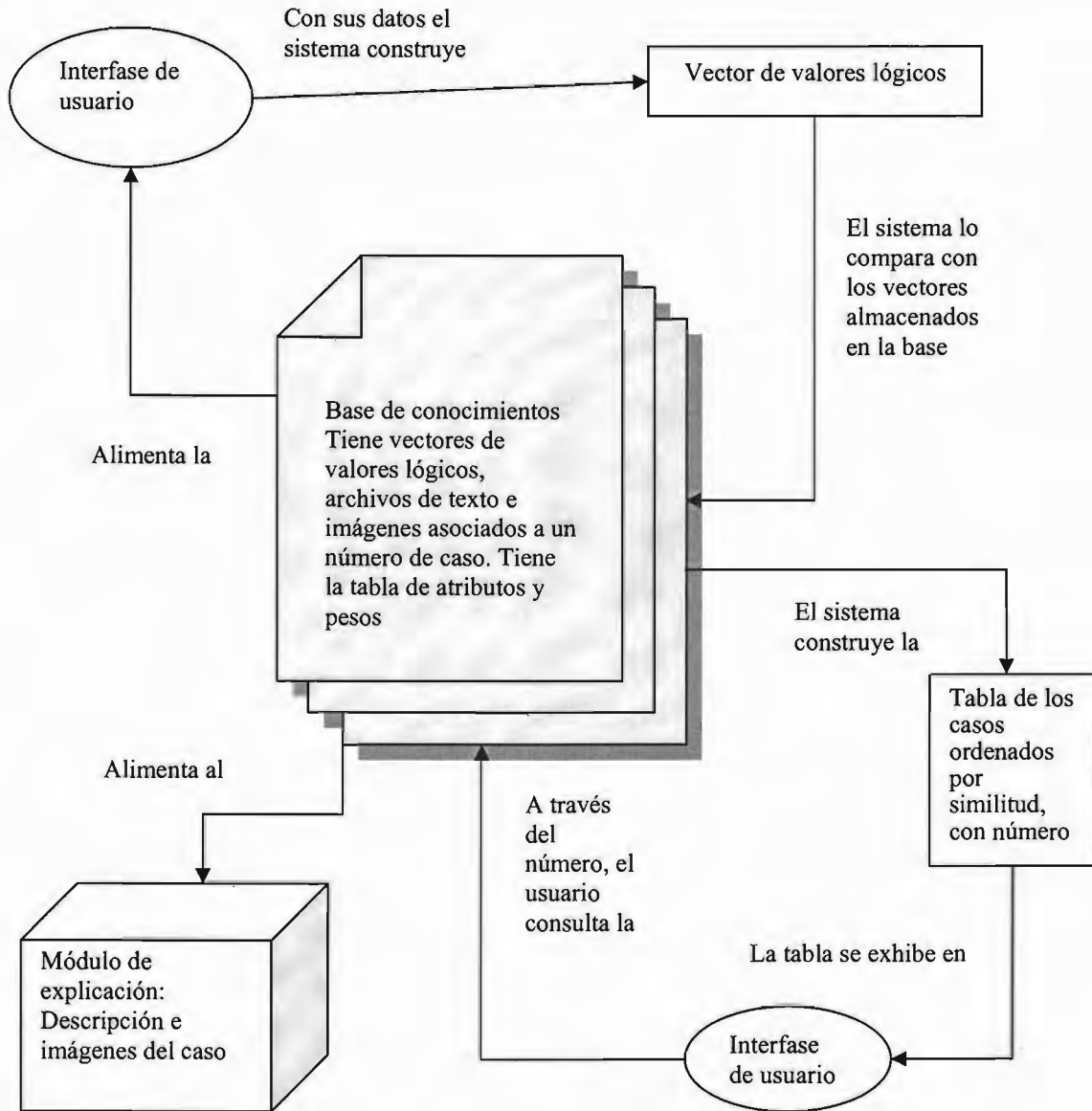


Figura 5.13 Relaciones entre los componentes del sistema.

Caso de ejemplo

Este caso fue extraído de (ASM, 1992), está escrito en lenguaje natural y contiene varias imágenes.

Fractura de una flecha de impulsor de turbina

Una flecha de impulsor de turbina falló luego de 2 meses de uso. Este elemento era parte del sistema impulsor de una turbina de gas y debido a la manera en que fue instalada en la unidad, estaba sometida a tensión constante. La magnitud del esfuerzo de tensión es desconocida. Se reportó que la flecha estaba diseñada para girar a una velocidad angular constante de 7500rpm en operación normal.

El diseño de la flecha especificaba como material el ASTM A193-83-a grado B7, con una resistencia a la tensión mínima de 790Mpa. La flecha se fracturó en dos pedazos. Una porción de una de las superficies fue separada y llevada al análisis SEM. Una segunda sección de la misma superficie de fractura, fue cortada de la flecha y fue montada para poder exhibir la superficie de fractura.

Características de la superficie de grieta / fractura.

La falla tuvo lugar en una zona acanalada de la flecha. La *figura 5.14* muestra el sitio de fractura y las dos superficies de fractura. El barreno en el centro fue hecho para facilitar la remoción de esta pieza. De esta imagen se observa que la superficie de fractura es, en su mayor parte, perpendicular al eje de la flecha. Este sería el plano del máximo esfuerzo normal. No hay labios en la periferia ni evidencias de cuellos. Hay tres orígenes de fractura distintos (puntos A, B y C de la *figura 5.14*) Estos sitios de iniciación de fractura están inclinados con respecto a la sección transversal y tienen una superficie helicoidal.

Análisis con microscopio electrónico

El análisis en el punto A reveló una superficie plana y lisa, esto fue provocado por el frotamiento de las superficies de fractura. No existen estrías. Algunas microcavidades elongadas fueron encontradas, esto es un signo de falla tipo dúctil por cortante (sobrecarga)

Metalografía

El análisis de una muestra tomada del punto B mostró que la estructura general era martensita revenida. Se reveló una grieta secundaria, casi adyacente al punto B. La grieta era de tipo helicoidal. La *figura 5.15* muestra un extremo de la grieta.

Análisis químico

El análisis químico del material de la flecha mostró que cumplía con los requerimientos del acero ASTM A193-83-a grado B7 (AISI 4140)

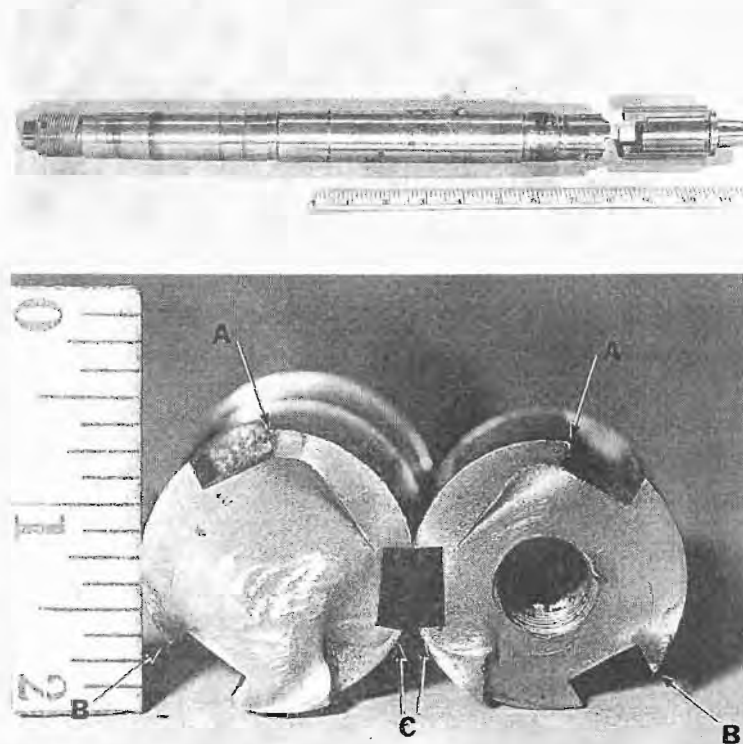


Figura 5.14 Flecha fracturada (arriba). Superficie de fractura (abajo). Los puntos A, B y C son los orígenes de grietas.

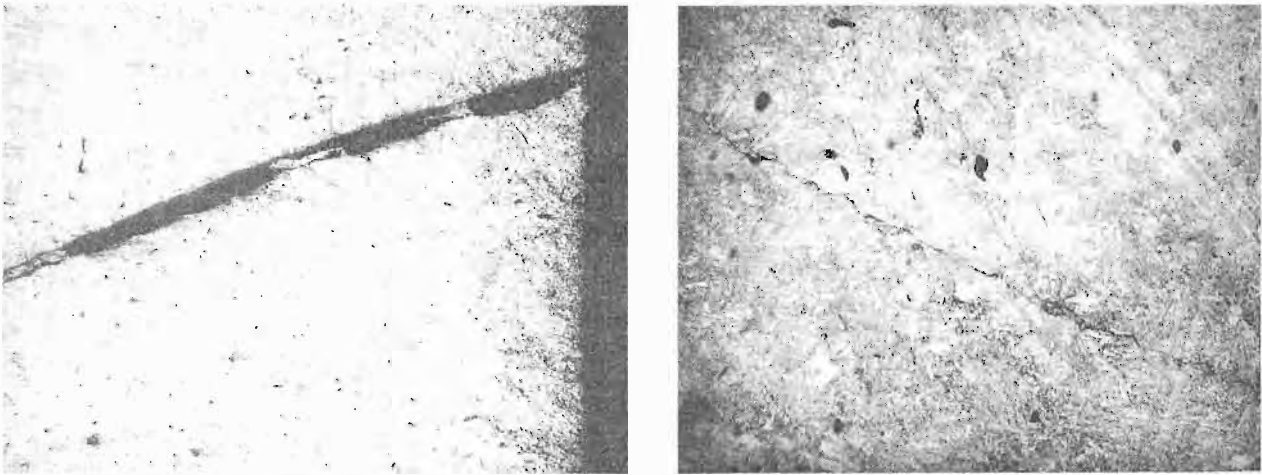


Figura 5.15 Micrografía que muestra una grieta adyacente y paralela a la fractura principal (75x) (izq.) . Micrografía de un extremo de la grieta (500x) (izq.)

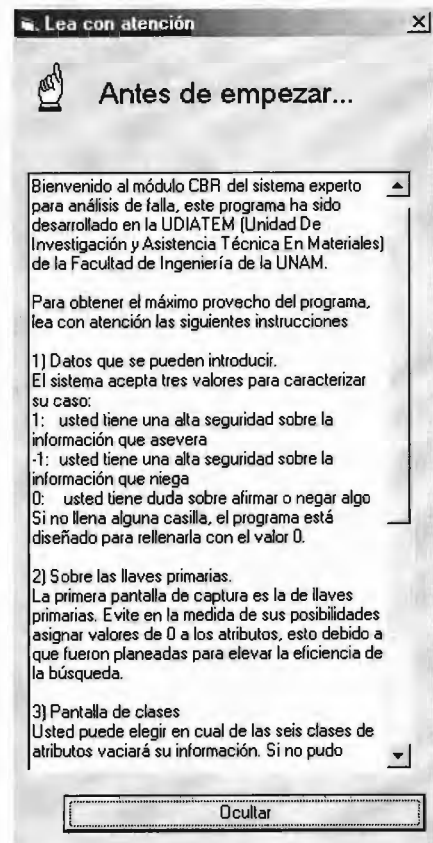
Solución del caso ejemplo a través del sistema

Una vez analizado el caso, se procedió a resolverlo a través del sistema. Al principio se presenta la pantalla inicial (figura 5.16), siguen las instrucciones (figura 5.17) y posteriormente, las pantallas de captura.



Figura 5.16 Pantalla de inicio

Figura 5.17 Pantalla de instrucciones →



Llaves primarias

La primera pantalla de captura es la de llaves primarias (figura 5.18). Se debe evitar asignar valores de 0 a los atributos, esto debido a que las llaves fueron diseñadas para elevar la eficiencia de la búsqueda. En esta pantalla se hacen las primeras proposiciones que el usuario debe negar o afirmar. Una vez que se aprieta el botón “Continuar”, no es posible modificar los valores.

Clases

Reciben el nombre de clases los grupos de atributos, esta pantalla permite desplazarse entre clases, así como también ver las instrucciones. Se pueden elegir las clases de atributos para vaciar su información en cualquier orden. En cuanto al microscopio electrónico, si no se pudo hacer el análisis, simplemente se deben rellenar con ceros todas las casillas de esa clase o no dejarlas vacías. (figura 5.19)

Captura de valores lógicos

Son ocho pantallas donde el usuario captura los datos, utilizando los valores lógicos -1, 1, 0. La tabla 5.17 muestra el grupo de pantallas de captura. En el caso de ejemplo, para asignar valores de 1 ó -1 a los atributos de estas pantallas, se analizó una vez más el caso y se hicieron algunas inferencias para determinar el valor lógico de algunos atributos; otros más quedaron con el valor “desconocido”, pues la información del caso es insuficiente para asignar otro valor.

Tabla 5.17 Relación de figuras y pantallas de captura

Figura	Pantallas
5.20	Información del material – 1
5.21	Información del material – 2
5.22	Características de la superficie de fractura - 1 (simple vista)
5.23	Características de la superficie de fractura - 2 (simple vista)
5.24	Resultados de la observación con microscopio óptico / estereoscopio
5.25	Resultados de la metalografía y análisis químico
5.26	Examen con microscopio electrónico – 1
5.27	Examen con microscopio electrónico – 2

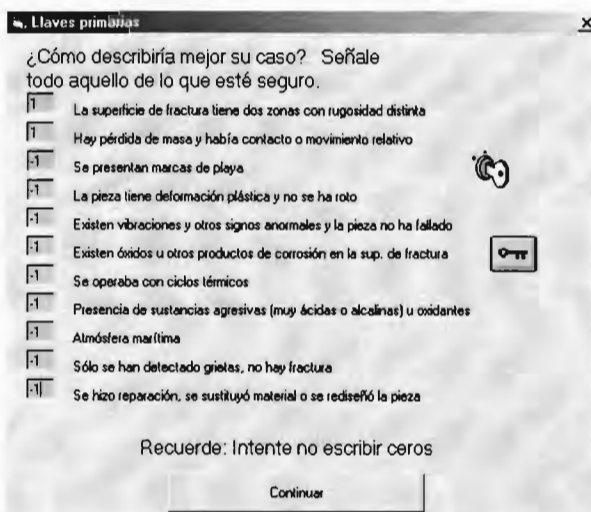


Figura 5.18 Llaves primarias.

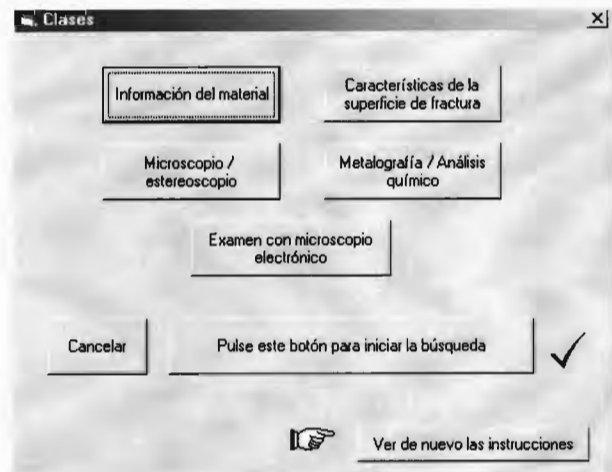


Figura 5.19 Pantalla de clases

Información del material 1

Ferroso / No ferroso	<input type="checkbox"/> 1 Ferroso <input type="checkbox"/> -1 No ferroso
Fundición / Acero	<input type="checkbox"/> -1 Fundición <input type="checkbox"/> 1 Acero
Contenido de carbono	<input type="checkbox"/> -1 Menor al 0.25%
	<input type="checkbox"/> 1 Entre 0.25% y 0.55%
	<input type="checkbox"/> -1 Entre 0.55% y 1%
	<input type="checkbox"/> -1 Entre 1% y 5%
Contenido de aleantes	<input type="checkbox"/> -1 Menor al 0.1%
	<input type="checkbox"/> 1 Entre 0.1% y 1%
	<input type="checkbox"/> -1 Entre 1% y 5%
	<input type="checkbox"/> -1 Entre 5% y 11%
	<input type="checkbox"/> -1 Mayor al 11% / inoxidable

Regresar La información requiere dos páginas. Presione para ir a la página 2

Figura 5.20 Primera pantalla para la información del material.

Características de la superficie de fractura / grieta [a simple vista] 1

<input type="checkbox"/> 0	Apariencia cristalina en una zona
<input type="checkbox"/> -1	Patrón de hueso de chevron o espinazo de pescado
<input type="checkbox"/> 1	Poca o nula deformación plástica-frágil
<input type="checkbox"/> -1	Alta deformación plástica-dúctil
<input type="checkbox"/> -1	Cambio de tonalidad en la superficie de la pieza
<input type="checkbox"/> -1	Huecos o abolladuras-indentaciones
<input type="checkbox"/> -1	Desprendimiento de partículas por abrasión
<input type="checkbox"/> -1	Abrasión con ralladuras
<input type="checkbox"/> -1	Se encuentra exceso de polvo (productos de corrosión)
<input type="checkbox"/> -1	La superficie está deslustrada sin daño aparente
<input type="checkbox"/> -1	Presencia de labios
<input type="checkbox"/> -1	Apariencia rota o con surcos mostrando la dirección de arranque
<input type="checkbox"/> -1	Superficie con deformación en la dirección de rotación
<input type="checkbox"/> 1	Superficie de fractura tipo espiral, sin deformación plástica.
<input type="checkbox"/> -1	Zonas en forma de creciente brillantes y finas

Regresar La información requiere dos páginas. Presione para ir a la página 2

Figura 5.22 Primera pantalla para la información de inspección a simple vista.

Información del material 2

Aleaciones	<input type="checkbox"/> -1 El material es una aleación de aluminio o magnesio.
	<input type="checkbox"/> -1 El material es una aleación de zinc
Tipo de sistema	<input type="checkbox"/> -1 Transmisión de movimiento
	<input type="checkbox"/> 1 Transmisión de potencia
	<input type="checkbox"/> -1 Soporte
	<input type="checkbox"/> -1 Transporte o contención de fluidos
Tratamiento térmico	<input type="checkbox"/> 1 Recocido
	<input type="checkbox"/> 0 Normalizado
	<input type="checkbox"/> 1 Temple y revenido
	<input type="checkbox"/> 0 Carburizado
	<input type="checkbox"/> -1 Endurecimiento por trabajo en frío, precipitación, flama
Otros datos	<input type="checkbox"/> -1 Recubrimientos
	<input type="checkbox"/> -1 Fragilización del material

Ver página 1

Figura 5.21 Segunda pantalla para la información del material.

Características de la superficie de fractura / grieta [a simple vista] 2

<input type="checkbox"/> -1	Fractura perpendicular al esfuerzo normal máximo
<input type="checkbox"/> -1	Fractura a 45° con respecto a la dirección del esfuerzo normal máximo
<input type="checkbox"/> 1	Desgaste en las superficies de fractura
<input type="checkbox"/> 1	La falla está en un concentrador de esfuerzos mecánico
<input type="checkbox"/> -1	Se identifica fácilmente origen, propagación lenta y fractura, hay corrosión
<input type="checkbox"/> 1	La fractura comienza en un punto de la periferia
<input type="checkbox"/> -1	Grietas adyacentes a la grieta principal
<input type="checkbox"/> -1	Porosidad superficial (asociada con abrasión)
<input type="checkbox"/> -1	Ampollamiento o delaminación del material
<input type="checkbox"/> -1	Origen de falla en el centro de la superficie
<input type="checkbox"/> -1	Cuellos en la fractura
<input type="checkbox"/> -1	La fractura crece en sentido opuesto a la rotación, pero se desvía 15° o más.
<input type="checkbox"/> 1	Tiene regiones a 90° y a 45° con respecto al esfuerzo normal máximo
<input type="checkbox"/> -1	Hay variaciones de tonalidad en la superficie de fractura
<input type="checkbox"/> -1	La grieta se origina en una zona desgastada
<input type="checkbox"/> -1	Marcas de playa simétricas con respecto al origen de la grieta

Ver página 1

Figura 5.23 Segunda pantalla para la información de inspección a simple vista.

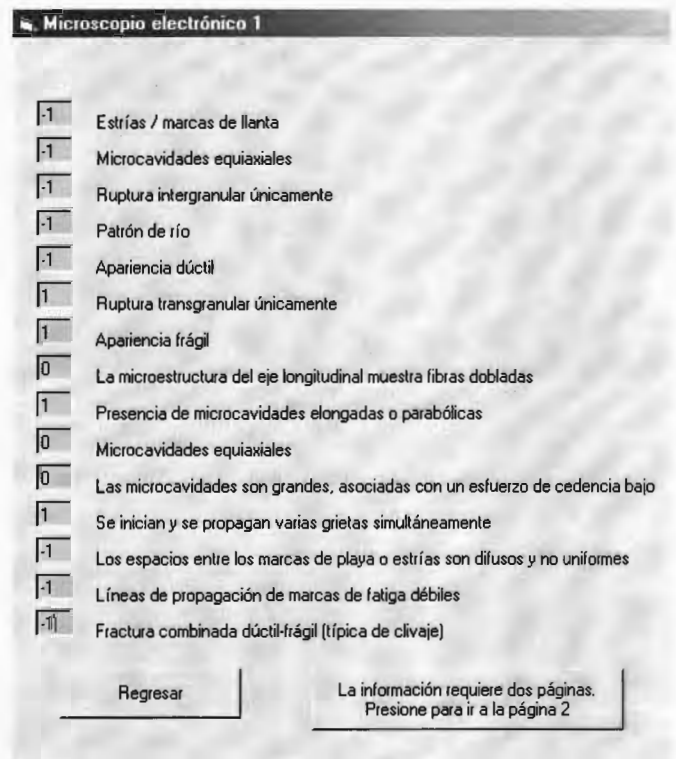
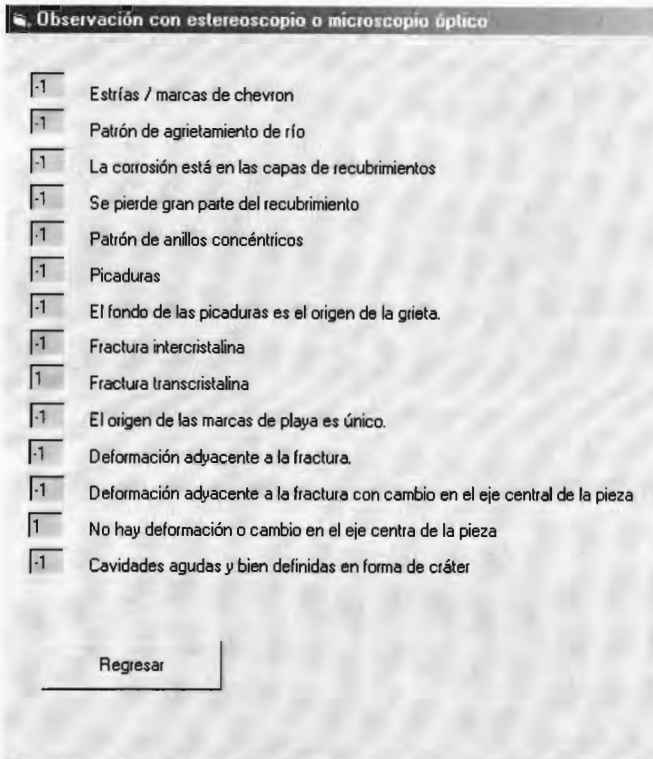


Figura 5.24 Pantalla de observación con microscopio o estereoscopio

Figura 5.26 Pantalla #1 para el análisis con microscopio electrónico de barrido (SEM)

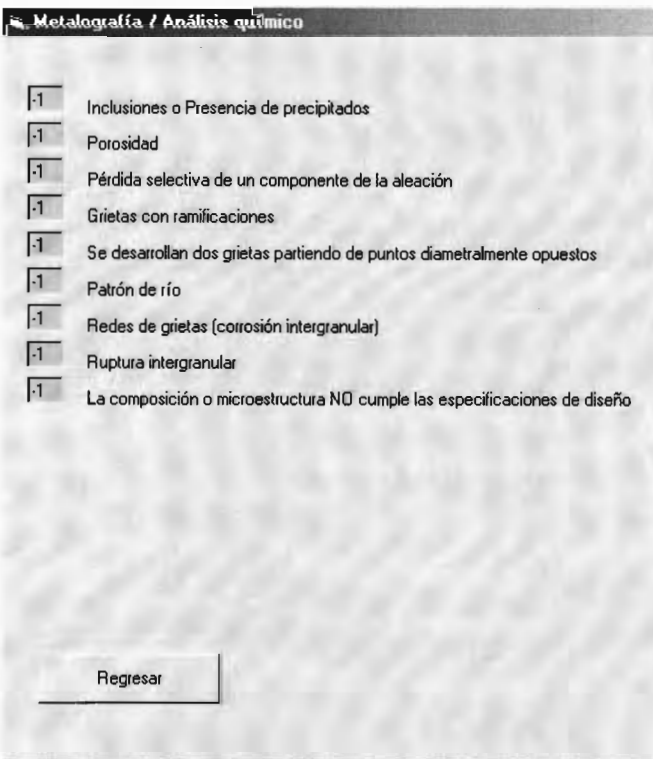


Figura 5.25 Pantalla para los datos obtenidos con una metalografía o análisis químico.

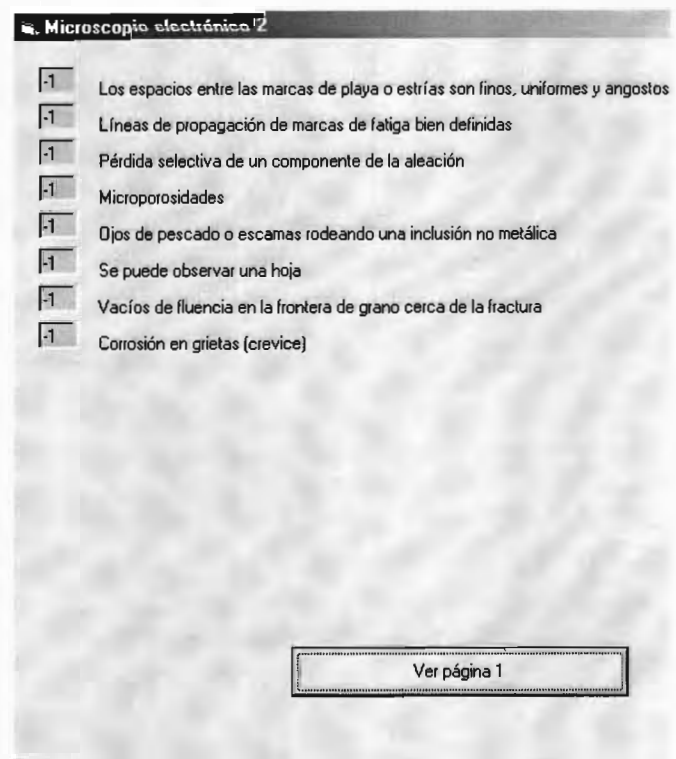


Figura 5.27 Pantalla #2 para el análisis con microscopio electrónico.

Medidas de similitud

En esta pantalla (figura 5.28) se accesa la opción *Vaciar datos*, una vez capturada esta información, se procede al calculo de la similitud, se realiza la búsqueda, y después aparecen los resultados como se indica en la figura 5.29. En la tabla de esta última pantalla, en la primera columna aparece el número de caso histórico y en la segunda, la similitud con el caso actual. Los botones con números del 1 al 10 al lado de esta tabla, funcionan como acceso a los casos, una vez que se presiona alguno de ellos, aparece la pantalla de “casos similares”. Para este caso, se observa que el caso más similar al caso en estudio es el número 17, seguido por el número 27.

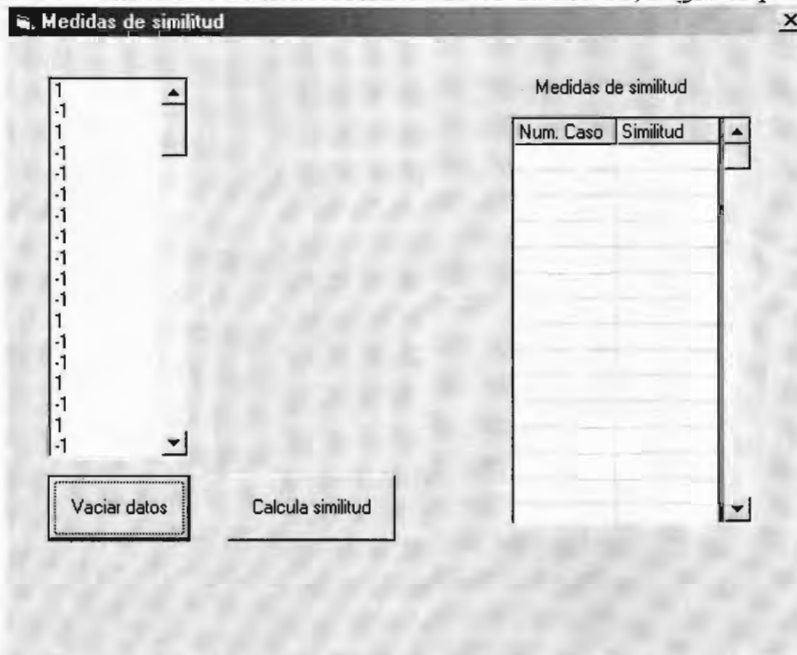


Figura 5.28 Pantalla de medidas de similitud

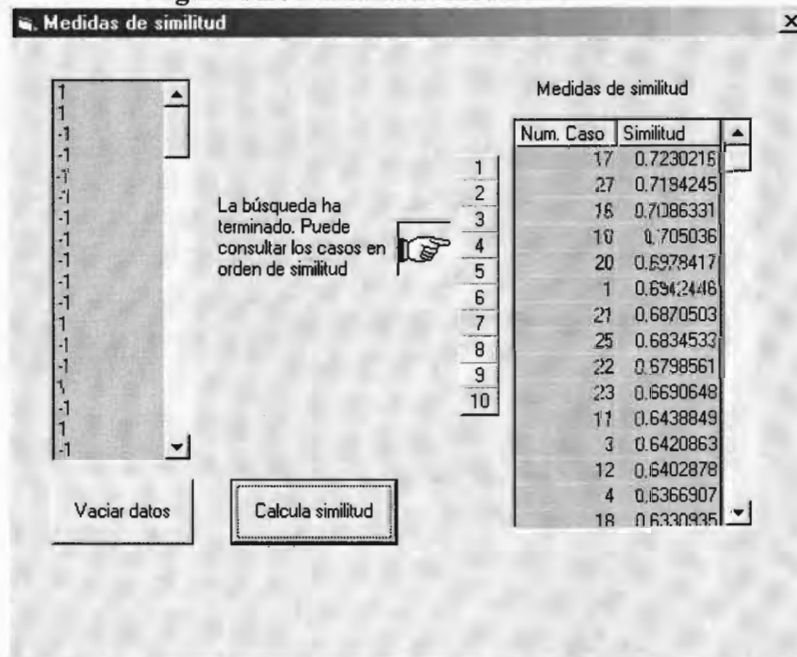


Figura 5.29 Pantalla de medidas de similitud, luego de borrar toda la base de casos, se obtiene la similitud y presentan en orden los casos

Ventana de Casos similares

Esta pantalla (figura 5.30) contiene una caja de texto con la descripción del caso, las causas de falla más probables, la discusión y las acciones correctivas. Tiene además espacios para presentar hasta 4 imágenes, una opción para continuar examinando los casos más similares y otra para terminar la operación del sistema. La figura 5.30 presenta la descripción correspondiente al caso número 17

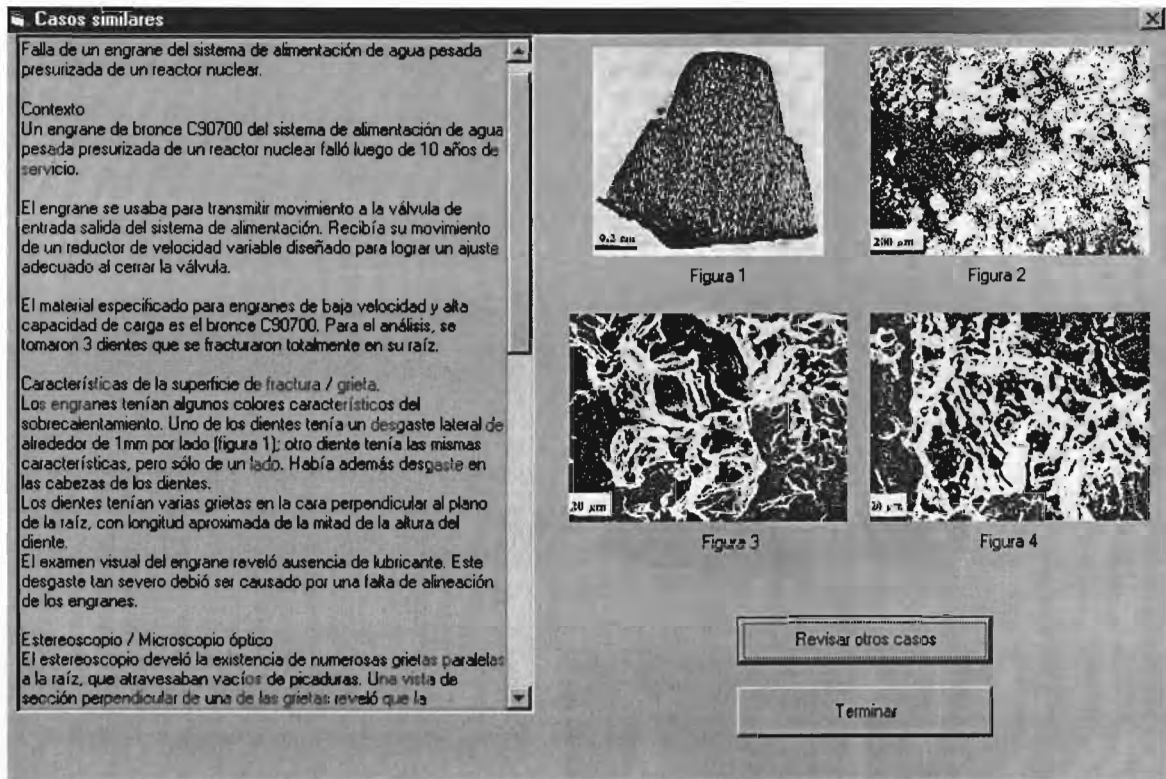


Figura 5.30 Pantalla de casos similares

Es conveniente recalcar que el usuario puede consultar más casos históricos para poder solucionar al caso en cuestión. Por otro lado el usuario, una vez que ha encontrado una solución exitosa a su problema, puede incorporar el nuevo caso a la base para ir gradualmente incrementando la experiencia del programa al expandir el conocimiento.

Capítulo 6. Solución de Casos y Análisis de Resultados

6.1 INTRODUCCIÓN

Para efectos de validación y análisis de resultados se resolvieron, mediante el sistema, 5 casos de estudio sobre problemas de análisis de falla, los primeros dos fueron seleccionados del apartado sobre fallas en ejes del tomo 11 (análisis de falla) de ASM (Metals Handbook, 1990). El tercero y el cuarto corresponden a dos casos que fueron resueltos en la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales de la Facultad de Ingeniería (UDIATEM, 2004a,b). El quinto caso fue el planteado como ejemplo de operación del subsistema de RBC en el *punto 5.2.10*.

En primer término se presenta una descripción resumida de cada uno de los casos, para plantear en forma concreta el contexto, la metodología y la solución del problema. La descripción es útil para efectos comparativos entre lo reportado y lo que se obtiene en la ejecución del programa. Finalmente se presenta el análisis de los resultados obtenidos en la aplicación del sistema experto, acompañado de la discusión respecto a la forma en que se reproducen las soluciones reportadas en la literatura para los 5 casos, así como los alcances.

6.2 FALLA POR FATIGA EN FLEXIÓN UNIDIRECCIONAL DE UN EJE DE ACERO PARA HERRAMIENTA A6.

El eje que se muestra en la *figura 6.1* fue parte de un dispositivo de sujeción en un ensamblaje de herramienta usado para doblar tubería de 5.7-cm (2.25-in) de diámetro exterior en un radio de 8.6 cm (3.375-in). El ensamble contiene dos de estos ejes, los cuales fallaron simultáneamente y fueron enviados al laboratorio para su análisis. La fuerza máxima de sujeción en el ensamble fue 54 430 kg (120 000 lb). Las especificaciones del material para los ejes fue acero para herramienta A6. Los ejes fueron sujetos a un esfuerzo de tracción impuesto por la fuerza de sujeción y un esfuerzo de flexión resultante de la naturaleza de la operación. Los esfuerzos por flexión unidireccional fueron impuestos en un eje cuando una flexión positiva (mano derecha) se aplica en la tubería y en el otro eje cuando se aplica flexión opuesta (mano izquierda). Aproximadamente se aplicaron 45 flexiones positivas y 45 negativas por hora en la máquina; se desconoce el número total de flexiones que se aplicaron en los ejes antes de que fallaran. El esfuerzo de tracción aplicado a los ejes también fue cíclico debido a que la fuerza de sujeción se remueve después de hacer cada flexión.

Investigación. El análisis químico del acero, mostró que la composición estaba dentro de las especificaciones. La dureza promedio fue 48 HRC. Se maquinó una probeta para ensayo de tracción del 1.3 cm (0.505 in) de diámetro del centro de uno de los ejes fracturado, está falló frágil a un esfuerzo de tracción de 1557 MPa (228 ksi). Del análisis metalográfico se constata que la microestructura del acero es martensita de revenido, con inclusiones de sulfuro de manganeso y carburos complejos de Fe_4Mo_2C y Fe_4Cr_2C , finamente dispersos. La observación en la zona del borde de la superficie de fractura reveló la segregación de algunas inclusiones (sulfuros y óxidos). La evaluación visual de la superficie de fractura reveló ambas áreas, un área lisa y otra rugosa granular. El área lisa es típica de fracturas por fatiga. Las marcas de río en el área lisa de la fractura también son un indicador de la falla por fatiga. El área rugosa, luminosa y de apariencia cristalina es la zona final de fractura. La zona de fatiga con textura lisa es relativamente amplia comparada con la zona de fractura final de textura cristalina, lo que indica

que el eje fue sujeto a bajos esfuerzos. La superficie final de fractura muestra que la flexión es unidireccional. La grieta por fatiga se inició en un filete de 0.25 mm (0.010 in) de radio en un cambio de sección. El agrietamiento se vio favorecido por la presencia de inclusiones no metálicas que intersectan la superficie en una zona crítica del filete.

Conclusiones. Los ejes fracturaron por fatiga como resultado de bajos sobreesfuerzos y una carga alta unidireccional y cíclica. El radio pequeño del filete en el cambio de sección resultó en una concentración tal que, en conjunción con las inclusiones de óxidos de sulfuro que intersectan la superficie del filete, iniciaron las grietas.

Medidas correctivas. Se fabricaron nuevos ejes con un filete de radio 2.4 mm (0.09 in) de radio en el cambio de sección crítico. El filete de mayor radio minimiza la concentración de esfuerzos en esta región y previene la recurrencia de la falla.

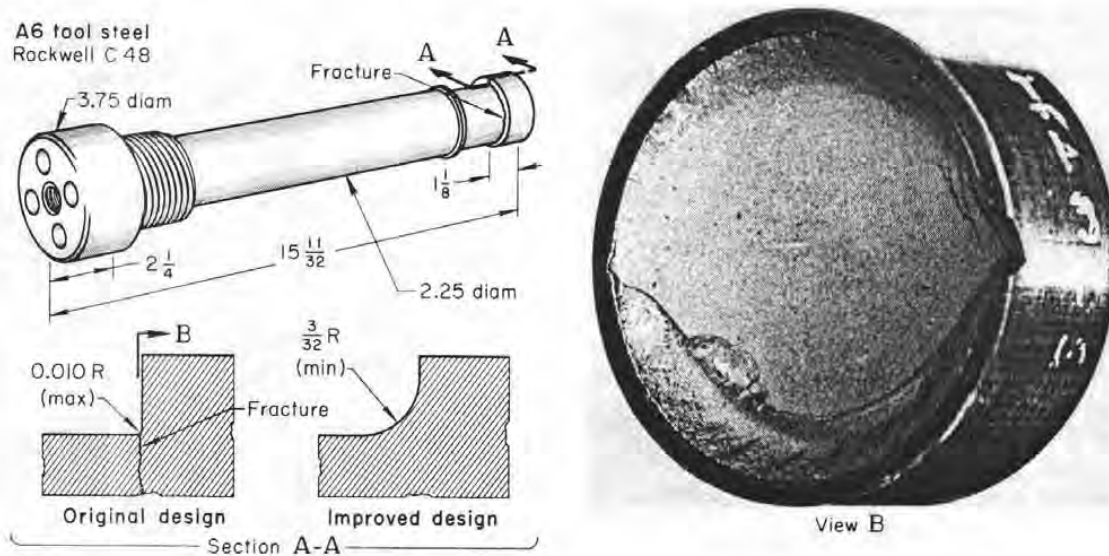


Figura 6.1 Eje de acero para herramienta A6 que falló por fatiga

6.3 FRACTURA POR FATIGA A TORSIÓN DE UN EJE DE ACERO 4340 QUE FUE SUJETO A UNA CARGA CÍCLICA Y FRECUENTES SOBRECARGAS.

El eje de acero 4340 (figura 6.2), sujeto a una carga cíclica y frecuentes sobrecargas, se fracturó después de tres semanas de operación. El eje forma parte de un tren de engranes que reduce la velocidad rotacional del miembro de dirección. El eje presenta una ranura de tal forma que ésta actúe como fusible mecánico, de tal forma que en dicha zona se fracture al presentarse una sobrecarga súbita, con lo se evita daño al costoso mecanismo de engranes. El rotor está sujeto a una elevada vibración intermitente y rápida, resultado de una serie de pequeñas sobrecargas a una frecuencia de tres veces por segundo.

Investigación. La evaluación descubrió que el eje se había fracturado en la ranura y que la superficie de fractura contenía un patrón en forma de estrella. Las fracturas, en todas las piezas analizadas, eran aproximadamente de la misma forma y tamaño, y se encontraron indicaciones de

fatiga, clivaje, y falla por cortante en aproximadamente la misma ubicación en cada pieza. Las grietas estaban orientadas a aproximadamente 45° del eje de la flecha, lo cual indica que fue causada por un esfuerzo normal de tensión al plano de 45° y no por los esfuerzos cortantes transversales o longitudinales. El análisis de las superficies de una de las piezas del eje fracturado revelan grietas cortantes transversales y longitudinales en el diámetro menor de la ranuras. También ocurrió un ligero deslizamiento plástico en el material adyacente a estas grietas. El agrietamiento ocurrió en algunos puntos de la ranura en el eje antes de que muchas de las grietas crecieran hasta un tamaño crítico. No se presentaron irregularidades superficiales en la ranura en ninguna de sus grietas cortantes. La estructura del metal era normal, con una dureza uniforme de 30 a 30.5 HRC a través de la sección, indicando una resistencia en el rango esperado para un acero 4340 templado y revenido para ejes. Un macroataque mostró que el acero estaba libre de segregación u otras irregularidades.

Conclusión. El mecanismo básico de falla fue fractura por fatiga a torsión, la cual comenzó en numerosas grietas superficiales, tanto longitudinales como transversales, que se desarrollaron en la periferia de la raíz de la ranura. Estas grietas resultaron de las sobrecargas puntuales causadas por vibración. Las concentraciones de esfuerzos se desarrollaron en las regiones de máximo cortante, y las grietas de fatiga se propagaron en una dirección perpendicular al esfuerzo de tracción máximo, esto formó el patrón de estrella a 45° del eje longitudinal de la flecha. La ranura en el eje, diseñada para prevenir el daño al tren de engranes, ha realizado su función pero a una sobrecarga menor que la que se esperaba.

Medidas correctivas. La resistencia a la fatiga del eje se incrementó por granallado la ranura, y la vibración en la máquina se minimizó.

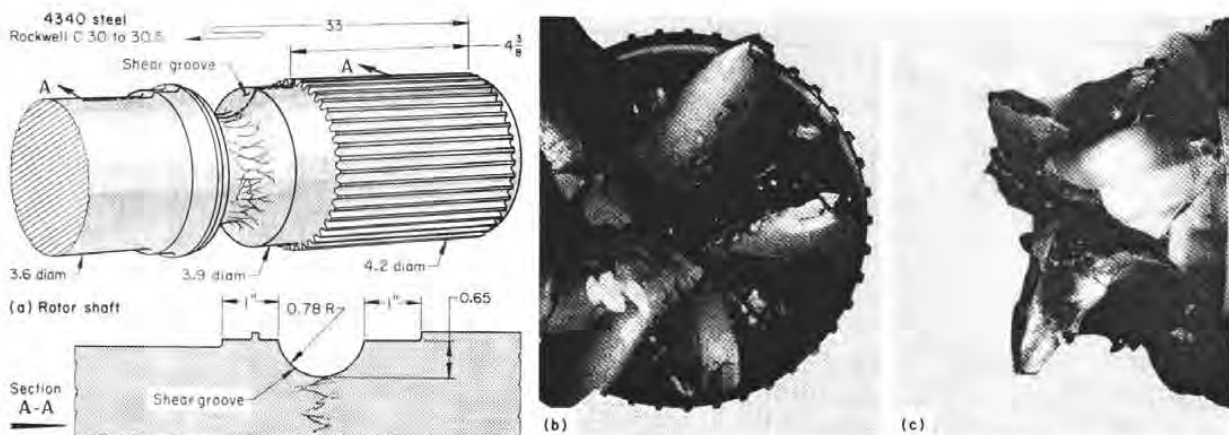


Figura 6.2 Flecha de acero 4340 de un rotor que falló por fatiga a torsión

6.4. ANÁLISIS DE FALLA DE SEMIEJE TRASERO DE UN CAMIÓN

Un semieje empleado en eje trasero de un camión ligero se fracturó (UDIATEM, 2004b). De acuerdo a lo reportado la falla se presentó durante las pruebas a las que en planta se somete al camión (dinamómetro), antes de ser enviado al distribuidor. Se reportó exclusivamente la presencia de vibración en el vehículo por lo que se procedió a revisar el eje, encontrándose que la flecha motriz (semieje S17) se había fracturado (*figuras en capítulo 2, 2.28-2.30, 2.35 y 2.36*). El eje tiene una capacidad de 17,500 lb y corresponde a un vehículo con transmisión automática

(ALLISON serie 2000), dicho vehículo es impulsado por una planta motriz DT466 de 220 HP, y 540 lb-ft a 1400 rpm.

Investigación.

Análisis químico

La composición química se determinó mediante espectroscopia de emisión resultando ser 0.44%C, 1.45%Mn, 0.0099%P, 0.024S y Fe el resto. El material cumplió con la especificación.

Fractografía

Se trata de una falla frágil inducida por la presencia de un defecto de varios milímetros de longitud, el cual se encontraba aproximadamente a 5 mm. de la superficie en la zona correspondiente a la banda de templado. La falla origen (discontinuidad) no pudo ser observada, ya que esta fue alterada con la manipulación del material. Sin embargo, se encontró un defecto similar, el cual no alcanzó las condiciones críticas. Dicho defecto se encontró a una profundidad similar (5 mm. de la superficie) del causante de la falla. Con base en el estudio se concluye que el defecto analizado es independiente de aquél que ocasionó la fractura. Por otra parte las evidencias demuestran de manera fehaciente y precisa que dicha grieta no pudo ser causada durante la fractura del eje o como consecuencia de su corte posterior. La presencia de esta discontinuidad representa un incumplimiento de las especificaciones de la empresa Si bien el estudio de fractografía no permitió indicar el origen de la grieta el fuerte bandeado observado en el material correspondiente a la zona donde se observó la fisura así como los defectos, permiten suponer que los inconvenientes se produjeron durante la forja como consecuencia de una baja calidad del material empleado para ésta.

Perfil de dureza

Se determinó el perfil de dureza de la pieza (pieza fracturada lado del diferencial). De acuerdo a la especificación no se cumple con la dureza requerida a una profundidad de 0.39”.

Metalografía

Existe la evidencia de una estructura fuertemente bandeada, ésta se encuentra en el límite de aceptación por especificación, pero en la norma no existe referencia a la presencia de bandas en la zona templada por lo que se supone que la estructura en dicha región debiera ser homogénea, situación que no es cumplida por el material.

Análisis de esfuerzos

Considerando las características de la planta de fuerza que impulsa al camión al cual pertenece el semieje fracturado (220 HP, par máximo 540 lb-ft), y las características de la transmisión y considerando que el eje está sometido a torsión pura, y éste tiene un diámetro nominal de 1.8 pg, (45.7 mm), el máximo esfuerzo es de 762 Mpa, valor muy por debajo de la resistencia estimada del material, de acuerdo a su microestructura. Extrapolando a partir de los datos de dureza se puede estimar que el límite de cedencia es superior a los 1500 Mpa, en la superficie del material. Por lo anterior resulta imposible que la flecha haya fallado por sobrecarga. Para los esfuerzos que ocurren cuando el eje opera a par máximo, se encuentra un tamaño crítico para un defecto interno de 2.8mm y de 1.4 mm en la superficie

Conclusión

La fractura de la pieza es de tipo frágil siendo generada por la presencia de un defecto de tamaño crítico de varios milímetros de longitud ubicado a unos 5 mm. de la superficie original de la pieza. Por su orientación y profundidad, este defecto no fue identificado durante la inspección por partículas magnéticas. La grieta tenía las dimensiones suficientes para ocasionar que bajo la presencia de sollicitaciones muy por debajo de las máximas de diseño, se presentará la fractura

intempestiva (frágil) del eje. Del análisis de esfuerzos se considera que el diseño de la pieza fue adecuado (factor de seguridad del orden de 2). Por otra parte no existe evidencia de ningún tipo de abuso durante el servicio que favoreciera o promoviera la falla. La baja calidad del acero compromete de manera crítica la confiabilidad de los productos fabricados. El bandeado y el contenido de inclusiones son indicadores de esta baja calidad, pero no son críticos. El punto crítico es la presencia de zonas porosas, las cuales se pueden explicar únicamente mediante procesos de acerería fuera de normatividad. Estas zonas ocurren de manera aleatoria en las barras, pero con una alta frecuencia (en ambas piezas analizadas se encontró un total de tres zonas afectadas). Únicamente cuando una zona porosa coincide con la zona de mayor deformación por forja se generan defectos críticos. Debido al carácter aleatorio de la presencia de estos poros, no es posible predecir la incidencia de la falla, por esta incertidumbre cualquier pieza producida con base en este material representa un problema de confiabilidad.

Medidas correctivas

Se sugiere la implementación de un estudio que permita precisar las condiciones que conllevan a la generación de fisuras en el material, ya que la presencia de éstas compromete de manera crítica la confiabilidad del producto. Si bien el material cumple, en el límite, con las características de bandeado y la presencia de inclusiones, se sugiere revisar las condiciones de aceptación estándar, con la finalidad la confiabilidad del producto forjado

6.5 ANÁLISIS DE FALLA DE BARRA DE TORSIÓN DE UN AUTOBÚS

En la *figura 6.3* se presenta una de tres barras de torsión de un autobús que se fracturaron en servicio (UDIATEM, 2004a). Los antecedentes del servicio de estas estabilizadoras se presentan en la *tabla 6.1*. Las imágenes de fractografía y microscopia se presentan en figuras del *capítulo 2* (2.11, 2.13, 2.18 y 2.34).

Tabla 6.1 Antecedente de la falla de las tres barras

Barra de torsión 1	Barra de torsión 2	Barra de torsión 3
No. 808	No. 808	No. 812
Km 375,365	Km 375,365	Km 333,359
6/Sep/2004	6/Sep/2004	4/Sep/2004



Figura 6.3 Vista general de una barra de torsión

Investigación

Inspección mediante líquidos penetrantes

Mediante líquidos penetrantes se determinó que no existen otras grietas superficiales, tanto en las zonas de sujeción de las barras al chasis como en los cambios de sección. Asimismo, se comprueba que el deterioro por corrosión, producido debajo de los hules de sujeción, es superficial. No existe evidencia de que a partir de esta zona se generen grietas de fatiga.

Análisis químico

Se efectuó el análisis químico por espectroscopia de emisión. Se puede concluir que el material corresponde a un acero 5155. Sin embargo, es necesario mencionar que el material de las barras de torsión no presenta una correspondencia al 100% con el AISI 5155, ya que éstas tienen un contenido de cromo superior en un 30% a lo establecido en la norma AISI.

Perfil de dureza

Se obtuvo el perfil de dureza (Rockwell C) de cada una de las barras fracturadas, esto de acuerdo a la norma ASTM E 18-98. Si bien se observan variaciones en los valores de dureza de las tres barras bajo análisis, en cada una de éstas el perfil de durezas es uniforme lo que indica un tratamiento térmico de alta calidad. Por otra parte los datos de dureza son congruentes con la función de la pieza.

Fractografía

Del aspecto macroscópico de la fractura y las condiciones de servicio (barra sometida a torsión con cargas variables en el tiempo—cortante puro en la sección recta-) se establece que se trata de una fractura generada por cargas cíclicas (fatiga), en la que al alcanzar la grieta un tamaño crítico y al combinarse con las sollicitaciones producto del servicio de la pieza, se suscita el corrimiento frágil de la fisura. En el caso de las barras 2 y 3, la superficie de fractura está a 45° con respecto al eje de la pieza, situación que comprueba el estado de sollicitaciones bajo el cual se produce la falla. Si bien la observación macroscópica de las superficies de fractura es concluyente en cuanto a las sollicitaciones y mecanismos de falla, se procedió a inspeccionar éstas mediante microscopía electrónica de barrido, no encontrándose mayores evidencias con excepción de la presencia de porosidad, la cual favorece el corrimiento de la grieta, esto sobre todo en la barra 1.

Estudio metalográfico

Es evidente la presencia de algunas inclusiones y porosidades, siendo más marcado este defecto en la barra 1.

Análisis de tenacidad de fractura

Se determinaron los esfuerzos críticos para valores extremos de K_{Ic} . Para $K_{Ic}=50 \text{ Mpa m}^{1/2}$ y $a=0.011 \text{ m}$, el $\sigma_{50} = 268.9 \text{ [MPa]}$, $M_T = 4770 \text{ [N m]}$. Considerando que se tiene una distancia de 0.38 [m] del punto de aplicación de la carga al punto de empotramiento, la fuerza aplicada es de 12556 [N] . Considerando una fuerza de 12.5 [kN] que se aplica homogéneamente sobre la mitad del área del barrenado (encontrado en el inicio de la grieta) que es de aproximadamente $1.32 \text{ e}^{-3} \text{ [m}^2\text{]}$, por lo que la presión ejercida sobre el barrenado será de 10 [MPa] .

Conclusión

La inspección de las superficies de fractura indica que la falla se debió a un fenómeno de fatiga. En la barra 1 ésta inicia en una zona donde se combinan sollicitaciones máximas con una gran cantidad de defectos (discontinuidades) del material. Por su parte en las barras 2 y 3 la grieta de fatiga tiene su origen en la zona donde se aplica una carga puntual a través de un perno que hace las veces de elemento de sujeción. Situación que es desfavorable en cuanto al objetivo de la barra, a la vez de generar un concentrador de esfuerzos que favorece el inicio de la grieta. En cuanto a la composición se considera que ésta es adecuada para la función de la barra, lo mismo

que el tratamiento térmico. Del estudio metalográfico se determina que la calidad metalúrgica de la barra marcada como 1 es inferior en función de las discontinuidades observadas en ésta, en particular se considera que la falla se presentó en esta barra (número 1) al combinarse una sollicitación máxima con una serie de discontinuidades (poros) que reducen la confiabilidad y resistencia de la pieza.

Medidas correctivas

Se considera necesario modificar el procedimiento de ensamble de la barra de torsión evitando la presencia de los pernos que producen el efecto de empotramiento de la barra, ya que esto a la vez de ser causa de la falla evita que la barra cumpla con su objetivo de diseño en cuanto a mejorar la estabilidad del vehículo. Esto es la barra deberá de tener libertad para su rotación y desplazamiento axial y las gomas de sujeción únicamente guían a la barra. En cuanto al material se deberán de establecer procedimientos que eviten la presencia de defectos como los observados en la barra 1.

6.6 FRACTURA DE UNA FLECHA DE IMPULSOR DE TURBINA

En este apartado se presenta la solución, mediante el módulo de RBC, del problema desarrollado en el punto 5.2.10 (*Operación del sistema*) del capítulo 5. En la figura 5.30 se presentó uno de los casos similares (#17), en la figura 6.4 se presenta otro de los casos seleccionados.

Texto de los casos

Los textos del caso 17 y del caso 27 corresponden a los exhibidos en las figuras 5.30 y 6.1, se describen a continuación debido a que el tamaño del texto rebasa la capacidad de la ventana de presentación de casos (Nota: Dentro de estos dos textos, el número de las figuras hace referencia a aquellas que se encuentran dentro de las figuras 5.30 y 6.4).

Comparación entre los casos

Se presentan las semejanzas y las diferencias más importantes que guardan el caso histórico 17 (*tabla 6.2*) y el caso histórico 27 (*tabla 6.3*) con el caso en estudio (*punto 5.2.10*)

Las *tablas 6.2 y 6.3* muestran que los casos históricos encontrados tienen semejanzas con el caso de ejemplo en los signos de fatiga. En los textos del caso 17 y del caso 27, aparece como causa más probable un mecanismo de fatiga combinada con desgaste y uno de fatiga. Por otro lado, en ninguno de los dos casos históricos, ni en el caso de ejemplo, apareció algún mecanismo de corrosión. Estas son las semejanzas más importantes que el sistema encontró, pues evidencian el mecanismo de falla del caso de ejemplo, que es la fatiga. También en éstas *tablas* aparecen como aspectos distintos, los materiales y el tipo de pieza. Ante una situación semejante, el usuario deberá decidir qué tan importantes son estas diferencias para el problema de análisis de falla al que se enfrenta.

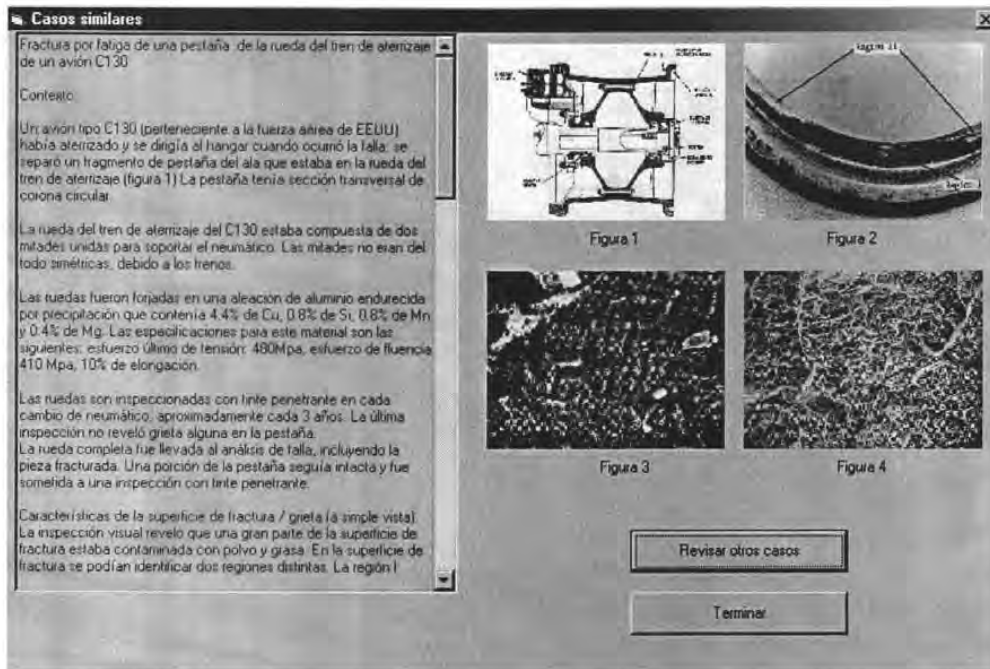


Figura 6.4 Pantalla de casos similares (caso 27)

Tabla 6.2 Comparación del caso histórico 17 con el caso en estudio

	CASO DE EJEMPLO	CASO HISTÓRICO 17
Características similares	Sistema al que pertenece: Transmisión de potencia	Sistema al que pertenece: Transmisión de potencia
	Falla en un concentrador de esfuerzos mecánico (canales)	Falla en un concentrador de esfuerzos mecánico (raíz de los dientes)
	Presencia de desgaste	Presencia de desgaste
	Falla final por sobrecarga	Falla final por sobrecarga
	Se infiere por los signos de fatiga que el elemento estaba sometido a cargas cíclicas.	El elemento estaba sometido a cargas cíclicas
	Signo de fatiga: dos regiones distintas en la superficie de fractura	Signo de fatiga: estrías
	No existe corrosión	No existe corrosión
Características Distintas	Material: Acero AISI 4140	Material: Bronce C90700
	Elemento: flecha	Elemento: diente de engrane
	Sin problemas en la microestructura	Imperfecciones en la microestructura
	No hay sobrecalentamiento	Evidencias de sobrecalentamiento en la superficie de la pieza

Tabla 6.3 Comparación del caso histórico 27 con el caso en estudio

	CASO DE EJEMPLO	CASO HISTÓRICO 27
Características semejantes	Falla en un concentrador de esfuerzos mecánico (canales)	Falla en un concentrador de esfuerzos mecánico (la pestaña)
	Sin problemas en la microestructura	Sin problemas en la microestructura
	Dos regiones distintas en la superficie de fractura (signo de fatiga)	Dos regiones distintas en la superficie de fractura: una con marcas de playa y lisa, otra con labios y rugosa.
	Falla final por sobrecarga	Falla final por sobrecarga
	No existe corrosión	No existe corrosión, sólo polvo y grasa
	Se infiere por los signos de fatiga que el elemento estaba sometido a cargas cíclicas.	El elemento estaba sometido a cargas cíclicas
Características distintas	Presencia de desgaste por frotamiento	No hay desgaste.
	No hay estrías	Existen estrías.
	Material: Acero AISI 4140	Material: Aluminio
	Elemento: flecha	Elemento: Pestaña
	Sistema al que pertenece: Transmisión de potencia	Sistema al que pertenece: soporte.

6.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

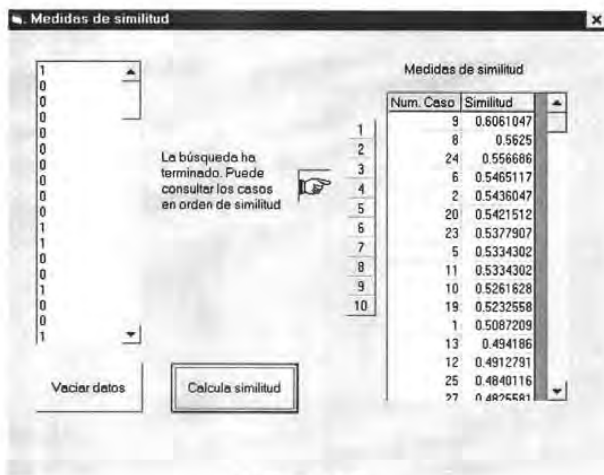
Los 5 casos fueron resueltos por ambos métodos (RBC y SBR). En lo que se refiere al **módulo de ejes** (tablas 6.4-6.5) los resultados tuvieron correspondencia respecto de lo que se indica en la literatura. Una parte importante de los resultados que provee el sistema es el componente explicativo el cual va describiendo la información de entrada de los casos y por otro lado muestra también las causas de la falla así como su mecanismo. Asimismo, plantea una recomendación para la realización de pruebas de laboratorio (Inspección a bajos aumentos, análisis químico, dureza, etc). En algunos casos la información esta incompleta, aún así el sistema brinda soluciones con la información disponible, esto evidentemente reduce el nivel de confianza y debe ser tomado en cuenta por el analista. En cuanto a la identificación de concentradores de esfuerzos mecánicos, las imágenes que se presentan en el sistema mostraron una correspondencia al 100% con las que aparecen en los casos reportados en la literatura, lo mismo ocurre en el caso de la identificación de los patrones característicos de fracturas. Esto último resulta importante ya que al introducir la información de entrada al sistema se puede incurrir en errores de apreciación.

Un punto importante de señalar es que el sistema brinda resultados muy concretos respecto de la información que se le esta proporcionando, esto lo distingue de los casos reportados en la literatura, en donde se da una descripción más a detalle de todo el contexto de la falla y los procedimientos de análisis y solución. Sin embargo, la forma en que se realiza el proceso mediante el sistema permite que el usuario se capacite y aprenda sobre la manera de resolver problemas de análisis de falla.

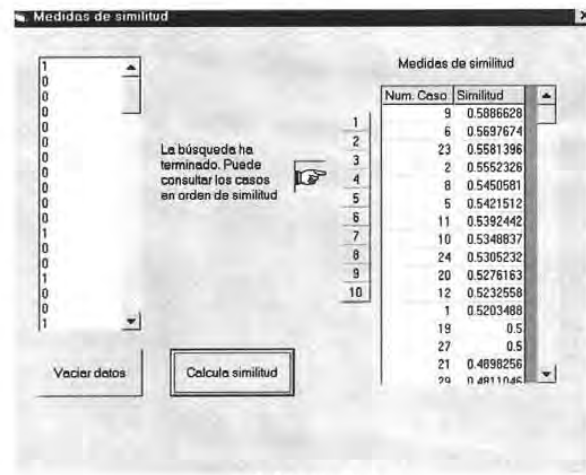
El **módulo de RBC** (figuras 6.5 a-d) mostró un desempeño satisfactorio, haciendo notar que los criterios más importantes que se observan en cuanto a similitud son mecanismo de falla en primer término y en segundo el tipo de elemento. Esta aclaración es importante debido a que en algunos de los casos aparecen con mayor similitud elementos mecánicos distintos al que se esta solucionando, Sin embargo el usuario tiene la opción de consultar los diez 10 casos de mayor

similitud., lo cual le permite acceder a un caso en donde se este manejando el mismo tipo de elemento. Si se observan los resultados de los casos resueltos se puede identificar que aparece listado el caso 9 dentro de los de mayor similitud, esto se debe a que en este se presenta la *Falla por fatiga de un eje de un vehículo prototipo para tránsito urbano*. Este módulo presenta limitaciones en cuanto a la extensión de la base de casos, en la medida que se tengan más casos en la base se tendrán más elementos para llegar a mejores soluciones.

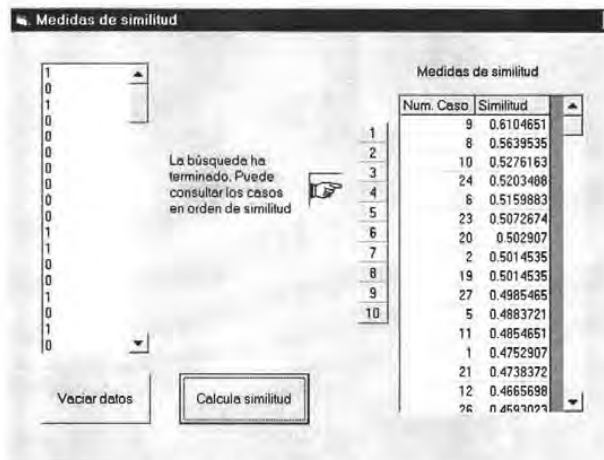
Al resolver por ambos métodos los 5 casos se observó que se complementan de manera satisfactoria ya que mientras en uno se aprenden los procedimientos deductivos en el otro se pueden estudiar casos similares con información *in extenso*, lo que permite que el usuario tenga una mayor comprensión y por ende aprendizaje de los problemas planteados.



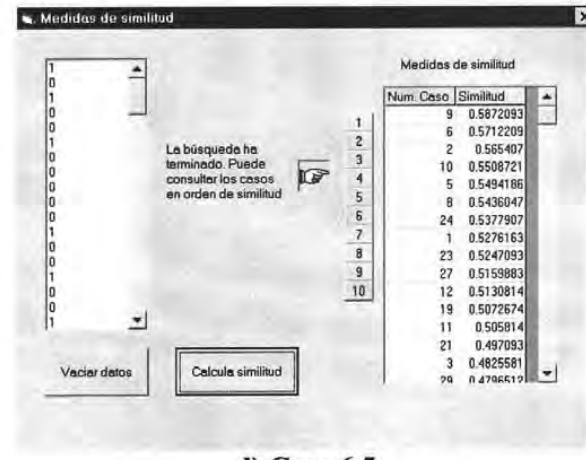
a) Caso 6.2



c) Caso 6.4



b) Caso 6.3



d) Caso 6.5

Figura 6.5 Ventanas de resultados de similitud (Subsistema RBC) para los casos 6.2-6.5

Tabla 6.4 Subsistema de Ejes. Componente explicativo casos 6.2 y 6.3

CASO 6.2	CASO 6.3
<p>Indique el tipo de elemento que desee analizar => Eje</p> <p>Seleccione el material del que esta fabricado el elemento escogido (eje, engrane, etc.) => Metálico</p> <p>Seleccione el tipo de material => Acero</p> <p>Seleccione el tipo de acero => ASTM_A36</p> <p>¿El eje transmite potencia? => No</p> <p>Indique el mecanismo por el cual falló el elemento => Fractura</p> <p>Indique el tipo de carga al que esta sometido el elemento => Flexión Unidireccional</p> <p>¿La superficie de fractura presenta algún tipo de falla? => Playa</p> <p>¿Como es la apariencia de la superficie de la fractura? => Terrón de azúcar</p> <p>¿Como es la textura de la superficie de fractura? => Rugosa</p> <p>Indique el estado de esfuerzos al cual estuvo sometido el elemento => Biaxial</p> <p>¿Existieron cargas cíclicas actuantes en el elemento? => Si</p> <p>¿Existen concentradores de esfuerzos? => Si</p> <p>¿Como es el diseño del eje? => Mal Diseño</p> <p>¿La fractura se encuentra sobre el concentrador de esfuerzos? => Si</p> <p>¿La superficie de la fractura de su pieza se asemeja a alguna de las siguientes? => Flexión Unidireccional</p> <p>Puede identificar si existe una heterogeneidad en el eje. A partir del cual haya comenzado la fractura => Si</p> <p>Indique el tipo de heterogeneidad => Metalúrgica</p> <p>El tipo de Falla es:</p> <p>Fatiga</p> <p>El tipo de carga a la que se sometio la pieza es: Flexión Unidireccional</p> <p>SEAFEM recomienda realizar la(s) siguiente(s) pruebas de laboratorio:</p> <p>*** Realizar una microscopía óptica a bajos aumentos. 100X</p>	<p>Indique el tipo de elemento que desee analizar => Eje</p> <p>Seleccione el material del que esta fabricado el elemento escogido (eje, engrane, etc.) => Metálico</p> <p>Seleccione el tipo de material => Acero</p> <p>Seleccione el tipo de acero => AISI_SAE_4340</p> <p>¿El eje transmite potencia? => Si</p> <p>Indique el mecanismo por el cual falló el elemento => Fractura</p> <p>Indique el tipo de carga al que esta sometido el elemento => Flexión Rotacional</p> <p>¿La superficie de fractura presenta algún tipo de falla? => Playa</p> <p>¿Como es la apariencia de la superficie de la fractura? => ----</p> <p>¿Como es la textura de la superficie de fractura? => Rugosa y suave</p> <p>¿Existieron cargas cíclicas actuantes en el elemento? => Si</p> <p>¿Existen concentradores de esfuerzos? => Si</p> <p>¿Como es el diseño del eje? =></p> <p>¿La fractura se encuentra sobre el concentrador de esfuerzos? => Si</p> <p>¿La superficie de la fractura de su pieza se asemeja a alguna de las siguientes? => Torsión</p> <p>Puede identificar si existe una heterogeneidad en el eje. A partir del cual haya comenzado la fractura => No</p> <p>El tipo de Falla es:</p> <p>Fatiga</p> <p>El tipo de carga a la que se sometió la pieza es: Se desconoce</p> <p>SEAFEM recomienda realizar la(s) siguiente(s) pruebas de laboratorio:</p> <p>*** Realizar una microscopía óptica a bajos aumentos. 100X</p>

Tabla 6.5 Subsistema de Ejes. Componente explicativo casos 6.4 y 6.5

CASO 6.4	CASO 6.5
<p>Indique el tipo de elemento que desee analizar => Eje Seleccione el material del que está fabricado el elemento escogido (eje, engrane, etc.) => Metálico Seleccione el tipo de material => Acero Seleccione el tipo de acero => AISI_SAE_4140 ¿El eje transmite potencia? => Si Indique el mecanismo por el cual falló el elemento => Fractura Indique el tipo de carga al que esta sometido el elemento => Torsión ¿Como es el ángulo del plano principal de la fractura? => 45 grados ¿La superficie de fractura presenta algún tipo de falla? => Chevron ¿Como es la apariencia de la superficie de la fractura? => Áspera ¿Como es la textura de la superficie de fractura? => Rugosa Indique el estado de esfuerzos al cual estuvo sometido el elemento => Biaxial ¿Existieron cargas cíclicas actuantes en el elemento? => Si ¿Existen concentradores de esfuerzos? => Si ¿Como es el diseño del eje? => Buen Diseño ¿La fractura se encuentra sobre el concentrador de esfuerzos? => No Indique como es la temperatura de operación del eje ⇒ Menor a -50° C El tipo de Falla es: Frágil El tipo de carga a la que se sometió la pieza es: Se desconoce SEAFEM recomienda realizar la(s) siguiente(s) pruebas de laboratorio: *** Microscopía óptica a bajos aumentos- 100X -. Además de una prueba de dureza</p>	<p>Indique el tipo de elemento que desee analizar => Eje Seleccione el material del que está fabricado el elemento escogido (eje, engrane, etc.) => Metálico Seleccione el tipo de material => Acero Seleccione el tipo de acero => AISI_SAE_4140 ¿El eje transmite potencia? => No Indique el mecanismo por el cual falló el elemento => Fractura Indique el tipo de carga al que esta sometido el elemento => Torsión ¿Como es el ángulo del plano principal de la fractura? => 45 grados ¿La superficie de fractura presenta algún tipo de falla? => Playa ¿Como es la apariencia de la superficie de la fractura? => Áspera ¿Como es la textura de la superficie de fractura? => Rugosa y suave ¿Existieron cargas cíclicas actuantes en el elemento? => Si ¿Existen concentradores de esfuerzos? => Si ¿Como es el diseño del eje? => Comparativo ¿La fractura se encuentra sobre el concentrador de esfuerzos? => Si ¿La superficie de la fractura de su pieza se asemeja a alguna de las siguientes? => Torsión Puede identificar si existe una heterogeneidad en el eje. A partir del cual haya comenzado la fractura => Si Indique el tipo de heterogeneidad ⇒ Mecánica El tipo de Falla es: Fatiga El tipo de carga a la que se sometió la pieza es: Torsión SEAFEM recomienda realizar la(s) siguiente(s) pruebas de laboratorio: *** Microscopía óptica a bajos aumentos.-100X -</p>

Tabla 6.6 Subsistema de Ejes. Componente explicativo caso 6.6

CASO 6.6
<p>indique el tipo de elemento que desee analizar ==> Eje Seleccione el material del que esta fabricado el elemento escogido (eje, engrane, etc.) ==> Metálico Seleccione el tipo de material ==> Acero Seleccione el tipo de acero ==> ASTM_A131 ¿El eje transmite potencia? ==> Si Indique el mecanismo por el cual falló el elemento ==> Fractura Indique el tipo de carga al que está sometido el elemento ==> Torsión ¿Como es el ángulo del plano principal de la fractura? ==> Plano ¿La superficie de fractura presenta algún tipo de falla? ==> Chevron ¿Como es la apariencia de la superficie de la fractura? ==> Tersa ¿Como es la textura de la superficie de fractura? ==> Suave ¿Existieron cargas cíclicas actuantes en el elemento? ==> Si ¿Existen concentradores de esfuerzos? ==> Si ¿Como es el diseño del eje? ==> Comparativo ¿La fractura se encuentra sobre el concentrador de esfuerzos? ==> Si</p> <p>El tipo de Falla es:</p> <p>Dúctil</p> <p>El tipo de carga a la que se sometió la pieza es: Se desconoce</p> <p>SEAFEM recomienda realizar la(s) siguiente(s) pruebas de laboratorio:</p> <p>*** Realizar un análisis químico y una prueba de dureza</p>

Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones

CONCLUSIONES

El sistema desarrollado permite solucionar problemas convencionales de AF, su orientación básica es como herramienta de capacitación de personal, tanto en la industria como en la academia. En la solución de casos actúa como un colega lo que permite que el usuario, con un nivel de conocimientos básicos de ciencia de materiales, metalurgia física y mecánica, incrementa paulatinamente su nivel de experiencia al utilizar gradualmente al sistema. El SE desarrollado es un importante auxiliar didáctico al instruir al usuario en el tema de AF, esto a partir de la interactividad, ya que el sistema plantea preguntas que tienen que ser contestadas por el usuario, conduciéndolo a través de éstas a la solución del problema.

En general el sistema:

- Determina las causas de falla de elementos mecánicos metálicos y permite determinar acciones correctivas.
- Funciona en una plataforma de interfaz múltiple.
- Es de tipo flexible, lo que permite su crecimiento a través de la incorporación futura de nuevos módulos
- Cuenta con una base de casos con una estructura de información detallada sobre fallas de diferentes elementos mecánicos.

Los sistemas inteligentes de AF reportados en la literatura utilizan el razonamiento basado en casos en vez del razonamiento por reglas. Esto se debe a que en el enfoque de casos, no se requiere elaborar un modelo de conocimiento tan explícito como en el enfoque de reglas, por lo que se puede estructurar un prototipo con mayor facilidad y posteriormente, desarrollarlo hasta tener un programa funcional. El sistema que en esta tesis se presenta cuenta con ambos métodos de razonamiento.

El sistema presentado contiene un módulo para fallas en ejes y otro para razonamiento basado en casos. Sin embargo, el programa se elaboró sobre la base de una estructura global y siguiendo un modelo de desarrollo de software de tipo espiral, lo cual permite su robustecimiento; es decir está diseñado de tal manera que se pueden incorporar módulos para fallas en engranes, rodamientos, elementos estructurales, etc. Asimismo, permite acrecentar la base de conocimientos dentro del módulo de RBC.

Al manejar dos métodos de razonamiento (basado en reglas y basado en casos), el sistema presenta una ventaja respecto de otros (los cuales básicamente utilizan el basado en casos), ya que permite al usuario por un lado utilizar y ejercitar sus procesos de razonamiento deductivo y por otro el manejo de información estructurada en bases de datos. Lo cual es un proceso similar a la que realiza un experto ya que éste por un lado establece un proceso metodológico para solucionar problemas y por otro utiliza el conocimiento de otros casos que ha resuelto y el que se reporta en la literatura (revisión del estado del arte).

Incorporar una base de casos a la que se pueda acceder para consultar las experiencias sobre casos similares al que se este resolviendo, resulta ser un elemento que permite validar las

soluciones obtenidas por el procedimiento tradicional de solución mediante reglas deductivas, logrando de esta manera incrementar la confiabilidad del sistema. Cabe señalar que mientras más grande sea la cantidad de información que contenga la base mayor será el beneficio como herramienta para la solución de problemas.

Dentro de la construcción del subsistema RBC, las etapas más importantes son la elaboración del modelo de organización del conocimiento (estructura de organización) y el mecanismo de indizado (llaves primarias). El sistema construido presenta las siguientes ventajas respecto a otros sistemas RBC: Al estar programado en Visual Basic, tanto su manejo como su futuro crecimiento son muy sencillos, Al seguir el modelo de desarrollo en espiral, permite su continuo crecimiento, incluye para todos los casos, acciones correctivas para la falla, presenta el acceso desde la interfase de hasta 10 casos históricos.

El módulo de ejes es una herramienta útil en la detección de los distintos tipos de fractura, genera conclusiones intermedias de las causas que llevaron a la falla y recomienda las pruebas necesarias para validar con certeza las conclusiones intermedias. La máquina de inferencia de este módulo 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.

Debido a que el conocimiento involucrado en un AF es variable y complejo, la sistematización del mismo permite identificar los casos que se presentan en forma convencional, diferenciándolos de los casos excepcionales, en donde el contexto, los mecanismos de falla y los procedimientos experimentales no se encuentran bien definidos y requieren de un análisis especial, lo que implica que éstos solo puedan ser resueltos por un experto con muchos años de experiencia o bien por un grupo de expertos.

Considerando lo anterior si se busca construir sistemas que resuelvan el total de los casos que se presentan el proceso de desarrollo se complica y se torna incosteable. Es conveniente señalar que en la práctica, la mayor cantidad de casos caen en el ámbito de lo convencional (85%-90%), condición a la que se enfocó el trabajo desarrollado.

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

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

La parte más conflictiva en el desarrollo del sistema resultó ser la adquisición del conocimiento, la que representó el 60% del tiempo total. Esta fase neurálgica fue un cuello de botella ya que hasta no estar concluida se pudo proceder con la representación, diseño de interfases y programación del sistema. En este punto resultó fundamental la sistematización de la información, ya que con base en esta se establecieron estrategias para obtención del conocimiento de los expertos y de la proveniente de la literatura.

Al considerar la futura expansión del sistema se debe pensar en una plataforma de programación que permita la incorporación de nuevos elementos, en este caso el ambiente de Visual Basic, permite por un lado la ejecución de Visual Rule Studio y por el otro el desarrollo de nuevos módulos que auxilien el proceso de AF.

El impacto económico que el SE en AF tiene en una empresa se puede determinar a partir de considerar los inconvenientes y los costos directos e indirectos que se presentan cuando un sistema mecánico deja de operar de acuerdo con las expectativas. Es una práctica extendida en gran parte de la industria que cuando un componente falla simplemente se procede a su cambio en el menor tiempo posible, de tal forma que la producción no se vea afectada negativamente por este hecho. Cuando las fallas se vuelven más frecuentes se estila incrementar dimensiones ó modificar materiales y sus tratamientos. Donde las medidas correctivas tienen una base empírica y de relaciones causa efecto directas (si una pieza se fracturó, entonces hay que hacerla más robusta). En muchas ocasiones y a través de un proceso de ensayo-error se llega a reducir los problemas e incluso hasta a eliminarlos, sin embargo cuando estos se suscitan de nueva cuenta no existe ni la información ni menos aún la metodología que permita resolver los problemas en forma efectiva, rápida y al menor costo. Todo lo expuesto redundaría significativamente en los costos de mantenimiento y operación y se llega al punto de considerarlos como una parte implícita del gasto. Solo en pocos casos, sobretodo cuando la producción, los costos o la seguridad se ven seriamente afectadas se procede a la realización de estudios de AF, pero debido a la falta de conocimientos, se tiene una visión miope del problema (al no conocer los beneficios que se pueden obtener de una acción, simplemente se obvia ésta) que considera a los estudios como un gasto y no como una inversión.

De lo expuesto en el párrafo anterior se puede analizar la importancia de contar con un SE que residente en cualquier equipo de la empresa auxilie a su personal técnico en el desarrollo de estudios de AF, por otra parte la estructura didáctica del programa permite que dicho personal se vaya capacitando de manera interactiva. Por consecuencia las acciones correctivas no serán por ensayo-error, ni deberán esperar a que el problema se torne crítico para proceder a su solución sino que se podrán instrumentar prácticamente en paralelo de la ocurrencia de inconvenientes.

Los ahorros obtenidos se cuantifican a través de:

- a. Disminución de los tiempos de paro
- b. Reducción de los inventarios de refacciones en el almacén
- c. Reducción de desperdicios
- d. Incremento de producción
- e. Incremento en la vida de herramientas y máquinas
- f. Reducción en el consumo de energía y materias primas
- g. Incremento en la confiabilidad
- h. Incremento de la seguridad de operación

i. Disminución de costos de mantenimiento

Observaciones y comentarios:

- El AF es un campo propicio para el desarrollo e implementación de un SE debido a las características del conocimiento involucrado en la solución de los casos.
- La metodología desarrollada es aplicable para desarrollar otros módulos del SE.
- La estructura sistémica de las fallas características de ejes, permitió estructurar el árbol de fallas que fue básico para la definición de las reglas.
- La lógica de programación del Shell seleccionado se adecuó a las condiciones particulares del AF.
- Se puede tener una mayor confiabilidad en las soluciones de un SE en AF si se comparan los resultados contra una base de casos históricos.
- La enseñanza del AF, se ve beneficiada, al contar con una herramienta interactiva, que maneja dos métodos; uno orientado al aprendizaje de los procesos de razonamiento de expertos en AF y el otro que maneja de información documentada con descripción *in extenso* de casos de fallas. Asimismo resulta importante el empleo de imágenes y de texto estructurado sobre los diferentes problemas.
- En el campo de la ingeniería mecánica los SEs constituyen un área innovadora de oportunidad, tanto en el ámbito de la educación como en el de la solución de problemas industriales.

Finalmente, este proyecto, ha permitido que se desarrolle, dentro de la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales de la Facultad de Ingeniería UNAM, una línea de trabajo en torno al desarrollo de sistemas inteligentes para AF de elementos mecánicos, siendo pioneros en el desarrollo de este tipo de sistemas en la UNAM y en México.

RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

En la actualidad se está trabajando en un subsistema para AF de engranes, al concluir éste se pretende continuar con uno orientado a elementos estructurales. Asimismo se trabaja en la expansión de la base de casos del sistema RBC, se pretende incorporar un mínimo de 100 casos para incrementar la capacidad del sistema, esto no resulta una tarea trivial ya que significa obtener los casos de literatura especializada que se encuentra fundamentalmente en idioma inglés por lo que es necesario sintetizar y traducir la información. Asimismo se necesita la obtención de imágenes para la documentación de los casos.

Para los subsistemas actuales y futuros se necesitan desarrollar métodos estadísticos para refinar los pesos de los atributos y los factores de certeza. La idea es que con el uso el sistema se vuelva cada vez más efectivo.

Es necesario desarrollar nuevos módulos de navegación basado en imágenes. A través de los cuales el usuario pueda operar el sistema y se minimicen los errores de apreciación. La orientación a objetos con la que esta construido el sistema permite este tipo de actualización sin mayor afectación del código base.

Se requiere generar un módulo integrador para que los subsistemas trabajen en paralelo, en la actualidad trabajan en forma independiente.

Para aprovechar su potencial en cuanto a cursos multimedia vía internet, es necesario trasladar el código del programa hacia una plataforma que permita su ejecución en la red en tiempo real.

Una de las actividades que es necesario implantar es que en todos los casos de AF que la industria presente para su solución al grupo de trabajo de la UDIATEM, se aplique el sistema con el objetivo de refinar sus soluciones y por otro lado una vez validado incorporarlo a la base de casos del sistema. Esta es otra de las acciones que permitirán su crecimiento.

Asimismo se requiere que el sistema se utilice en los temas de AF, que se imparten en materias de materiales y diseño, una vez que el profesor haya terminado de desarrollar la metodología. Esto permitirá que el alumno cuente con una herramienta de aprendizaje que lo oriente en la solución de problemas en esta disciplina.

Referencias

- Abersek B., Flasker J., Glodez S., (2004). *Failure Analysis on Gears*. Damage and Fracture Mechanics VIII.
- Abou-Ali M., Khamis M., (2003). *TIREDDX: An Integrated Intelligent Defects Diagnostic System for Tire Production and Service*. Expert Systems With Applications 24, pp. 247-259.
- Adedeji B., (1992). *Expert Systems Applications in Engineering and Manufacturing*. Prentice Hall.
- Adedeji B., Foote B., Peters J., (1993). *A Case Study of Economic Justification of Expert Systems in Maintenance Operations*. The Engineering Economist 38,2, pp. 99-117.
- Agre G.,(1997). *Knowledge-based systems maintenance as learning two-tiered domain representations*. Lecture Notes in Artificial Intelligence 1010. Springer, Berlin, pp.109-120.
- Alban L. E., (1985). *Systematic Analysis of Gear Failures*. ASM.
- Amen R. Vomacka P., (2001). *Case-based Reasoning as a Tool for Materials Selection*. Materials and Design 22, pp. 353-358.
- ASM, (1974). *Source Book in Failure Analysis*. American Society for Metals
- ASM, (1992). *Handbook of Failure Analysis*. ASM international, USA
- Bafna V., Harihakti P., (2004). *Investigating Material and Component Failure*. TCR Engineering Services Technical Team.
- Balaisdell K., (1989). *How Failure Analysis Fails*. Machine Design ABI/INFORM Global 61, 9, pp. 146.
- Beckman T., (1991). *AI-Expert*, The Magazine of Artificial Intelligence in Practice, February.
- Brooks C., Choudhury A., (1993). *Metallurgical Failure Analysis*. McGraw-Hill.
- Cairo O., (1998). *KAMET: A Comprehensive Methodology for Knowledge Acquisition from Multiple Knowledge Sources*. Expert Systems With Applications 14, pp. 1-16.
- Carper K., (1989). *Learning from failures*. Forensic Engineering. Elsevier.
- Castillo E., Gutiérrez J., Hadi A., (2003). *S. Sistemas Expertos y Modelos de Redes Probabilísticas*. Universidad de Cantabria España.
- Cerrud S., Ortiz A., Jacobo V., Márquez E., (1998). *Propuesta para el Desarrollo de un Sistema Experto en Análisis de Falla de Elementos Mecánicos Metálicos*. Memorias del IV Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Ciudad Juárez, Chih. Octubre.
- Cerrud S., Jacobo V., Ortiz A., Quiroz H., Márquez E., (2000). *Adquisición y Representación del Conocimiento en un Sistema Experto para Análisis de Falla*. Memorias del VI Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Colima, Colima.
- Cerrud S. (2002). *Propuesta de Metodología para el Desarrollo de un Sistema Experto en Análisis de Falla de Elementos Mecánicos Metálicos*. Tesis de maestría (Ingeniería Mecánica). División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería UNAM.
- Cerrud S., Jacobo V., Ortiz A., Schouwenaars R., (2002). *Análisis de Falla*. Facultad de Ingeniería UNAM.
- Cerrud S., Jacobo V., Schouwenaars R., Ortiz A., (2003). *Diseño de un modelo para el estudio de riesgo de falla por corrosión en tubería de concreto preesforzado*. Memorias del IX Congreso de la Sociedad Mexicana de Ingeniería mecánica. Veracruz, Veracruz. Septiembre.
- Collins J., (1993). *Failure of Materials in Mechanical Design*. Chapter 2: *Modes of Mechanical Failure*. John Wiley & Sons.
- Corrosion Atlas, (1991). Elsevier Science, The Netherlands.
- Das A., (1996). *Metallurgy of Failure Analysis*. Ed. McGraw-Hill.

- De Castro P., Fernandes A., (2004). *Methodologies for Failure Analysis: A Critical Survey*, Materials and Design 25, pp. 117-123.
- De Ferri., (1979). Metallographia, Volume V. *Microfractography*. Verlag Stahleisen, Dusseldorf.
- Dieter G., (1986). *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill, Materials Science & Metallurgy.
- Dieter. G., (1991). *Engineering Design*, McGraw-Hill.
- Diez F., (2004). *Introducción al Razonamiento Aproximado*. Departamento de Inteligencia Artificial UNED Madrid.
- Doganaksov N., Hahn.G.J., Meeker W.Q., (2002). *Reliability Analysis by Failure Mode*. Quality Progress ABI/INFORM Global 35,6, p. 47.
- Emri I., Kova D., (1997). *Expert System for Testing Mechanical Properties of Aluminum and Aluminum Alloys*. Expert Systems With Applications 12,4, pp. 473-482.
- Felbeck D., Atkins A.G., (1996). *Strength and Fracture of Engineering Solids*. Prentice-Hall, Inc.
- Gelgele H., Wang K., (1998). *An Expert System for Engine Fault Diagnosis. Development and Application*. Journal of Intelligent Manufacturing, 9, pp. 539-545.
- Graham-Jones P., Mellor B., (1995a). *The Development of a Generic Failure Analysis Expert System Based on Case-Based Reasoning*. Southampton University.
- Graham-Jones P., Mellor B., (1995b). *Expert and Knowledge-Based Systems in Failure Analysis*. Engineering Failure Analysis 2, pp. 137-149.
- Graham-Jones P., Mellor B., (1997a). *Expert Systems in Failure Analysis. Part of the Engineering Materials Failure Series*. Southampton, University U.K.
- Graham-Jones P., Mellor B., (1997b). *The Oportunities for the Internet to Assist with Failure Analysis*. NACE Corrosion.
- Graham-Jones P., Mellor B., (1997c). *Issues Involved in Developing a Failure Analysis Expert System For Metallic Materials Using Rule and Case-Based Reasoning*. NACE Corrosion.
- Hancox P., Mills W., Reid B., (1990). *Artificial Intelligence/Expert Systems*. Ergosyst Associates, Lawrence, Kansas.
- Heyes A., (1998). *Automotive Component Failures*. Engineering Failure Analysis 5,2, pp. 129-141.
- Hull D., (1999). *Fractography, Observing, Measuring and Interpreting, Fracture Surface Topography*. Cambridge University Press.
- Ignizio P.J., (1991). *Introduction to Expert Systems. The Development and Implementation of Rule-Based Expert Systems*. Ed. McGraw-Hill.
- Jacobo V. et al., (1994). *Análisis para el Desarrollo de un Sistema Experto en Selección de Materiales*. Tesis de Licenciatura. Ingeniero Mecánico Electricista (Industrial) Facultad de Ingeniería UNAM.
- Jacobo V. Cerrud S. Ortiz A., (2000). *Prototipo de un Sistema Experto para el Análisis de Falla de Elementos Mecánicos*, Memorias del X Congreso Latinoamericano de Investigación de Operaciones, Mexico D.F.
- Jacobo V., Ortiz A., Cerrud S., (2000). *Aplicación de los Sistemas Expertos en la Enseñanza a Distancia de la Ingeniería en el Inicio del Siglo XXI*. Memorias del 3er. Seminario Internacional de Ingeniería de Sistemas, Ixtapa Zihuatanejo, noviembre.
- Jacobo V., Cerrud S., Ramírez M., Ortiz A., (2002). *Sistema Experto para Análisis de Falla de Ejes*. Ingeniería: Investigación y Tecnología. 3,3.
- Jacobo V. Cerrud S., Ortiz A., Marquez E., (2003). *Metodología para el Desarrollo de Sistemas Expertos en Análisis de Falla de Elementos Mecánicos Metálicos*. Memorias del IX Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica. Veracruz, Veracruz, Septiembre.

- Jacobo V., Cerrud S., Ortiz A. Márquez E., (2004). *Sistema Experto Híbrido para Análisis de Falla de Elementos Mecánicos Metálicos*. Memorias del X Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica. Querétaro, Qro, Septiembre.
- Jarmulak J., Kerckhoffs E.J., Vant Veen P., (2001). *Case-Based Reasoning for Interpretation of Data from Non-destructive Testing*. Engineering Applications of Artificial Intelligence 14, pp. 401-417.
- Jones D. (Editor)., (1998). *Failure Analysis Case Studies*, Elsevier Science Ltd.
- Kazaz A., (2003). *Application of an Expert System on the Fracture Mechanics of Concrete*. Artificial Intelligence Review 19, pp. 177-190.
- Kolodner J., (1993). *Case-Based Reasoning*. Morgan-Kaufmann, USA.
- Komai K., Minoshima K., Yamasaki N., (1995). *Development of Expert System for Fractography of Environmentally Assisted Cracking*, University of Tasmania.
- Kudryavtsev Y., Kleiman J., Trufiakov V., Mikheev P., (1998). *Expert System for Fatigue Assessment and Optimization of Welded Elements*. Integrity Testing Laboratory Inc & Paton Welding Institute.
- Lange. G., (1998). *Systematic Analysis of Technical Failures*. Informationsgesellschaft, Verlag.
- Lee R., (2001). *Development of an Expert System to Assist Fractographical Analysis*. Advanced Systems and Analysis Division, NASA.
- Li Jian-Ping, Thompson G., (2003). Modelling of Mechanical Failures in a Virtual Reality Design Environment. AR&MS Ref :2003RM-040
- Liao T., Zhan Z., Mount C., (1999a). *An Integrated Database and Expert System for Failure Mechanism Identification: Part I- Automated Knowledge Acquisition*. Engineering Failure Analysis 6, pp. 387-406.
- Liao T., Zhan Z., Mount C., (1999b). *An Integrated Database and Expert System for Failure Mechanism Identification: Part II- The System and Performance Testing*. Engineering Failure Analysis 6, pp. 407-421.
- Liao T., (2000). *A Case-Based Reasoning System for Identifying Failure Mechanisms*. Engineering Applications of Artificial Intelligence 13, pp. 199-213.
- Liao T., (2004). *An Investigation of a Hybrid CBR Method for Failure Mechanisms Identification*. Engineering Applications of Artificial Intelligence 17, pp. 123-134.
- Mejasson P., Petridis M. Knight B., Soper A. Norman P., (2001). *Intelligent Design Assistant (IDA): A Case Base Reasoning System for Material and Design*. Materials and Design 22, pp. 163-170.
- Menandro F., Moyer E., Liebowitz H., (1995). *An Expert System Approach to Fracture Mechanics*. Engineering Fracture Mechanics 50, pp. 631-637.
- Metals Handbook (1987). Vol. 9: *Fractography and Atlas of Fractographs*. American Society for Metals.
- Metals Handbook, (1990). Vol. 11: *Failure Analysis and Prevention*. ASM International, USA.
- Microsoft Visual Basic 6.0. *Programmer's Guide*. Microsoft Press, (1998).
- Naumann F., (1983). *Failure Analysis: Case Histories and Methodology*. ASM Verlag GmbH Stuttgart.
- Ortiz A., Cerrud S. Schouwenaars R., Jacobo V., (2002). *Análisis de falla de tubería de polietileno de alto peso molecular empleada para conducción de agua potable*. Memorias del VIII Congreso de la Sociedad Mexicana de Ingeniería mecánica. Monterrey N.L. Septiembre.
- Ortiz A. Jacobo V. Cerrud S. Hernández A., (2003). *Análisis de Falla de Elementos Mecánicos Metálicos mediante Razonamiento Basado en Casos*. Memorias del IX Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica. Veracruz, Veracruz. Septiembre.

- Petroski K., (1992). *To engineer is human. The role of failure in succesful design*. Vintage Books.
- Ricci F.; Avesani P., (1998) *Learning a local similarity metric for case-based reasoning*. Proceedings of the first International Conference on Case-based reasoning (ICCBR) Springer, Berlin.
- Rich E., Knight K., (1994). *Inteligencia Artificial*. McGraw-Hill.
- Roberge P., Tullmin M., Trethewey K., (1996). *Failure Analysis by Case-Based Reasoning*. Proceedings of the International Congress InterCorr.
- Roberts C., Glantz W., (2003). *SKF Bearing Detective: Preventing Reoccurring Bearing Failures* SKF Group, 15:39.
- Roslton D.W., (1992). *Principios de Inteligencia Artificial y Sistemas Expertos*. Ed. McGraw-Hill.
- Shu-Hsien Liao., (2005). *Expert System Methodologies and Applications – A Decade Review form 1995 to 2004*. Expert Systems with Applications 28, pp. 93-103.
- Stahleisen., (1997). *The Appearance of Cracks and Fractures in Metallic Materials*. Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf.
- Stevens L., (1984). *Artificial Intelligence. The Search for the perfect machine*. Hayden Book Company.
- Surma J.; Vanhoof K., (1999). *Integrating rules and cases for the classification task: case-based reasoning research and development*. Proceedings of the first International Conference on case-based reasoning (ICCBR) Springer, Berlin.
- The CBR Home Page*. <http://www.cbr-web.org/>
- Thomas J., (1989). *Industrial experience with structural failures*. Structural failure. John Wiley.
- Trethewey K., Wood R., Roberge P., (1998). *Development of a knowledge-based system for materials management*. Materials & Design 19, pp. 39-56.
- Tucho R., Sierra J., Fernández J., Vijande R., Moris G., (2003). *Expert Tutoring System for Teaching Mechanical Engineering*. Expert Systems With Applications 24, pp. 415-424.
- UDIATEM, (2004a). *Análisis de falla de barra de torsión de autobús Volvo*. Reporte de circulación restringida, -Volvo Buses de México.
- UDIATEM, (2004b). *Análisis de falla de semieje trasero DANA*. Reporte de circulación restringida, -International.
- Visual Rule Studio., (1998). *Developers Guide*, Rules Machine Corporation.
- Wearne S., (1979). *A review of reports of failures*. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

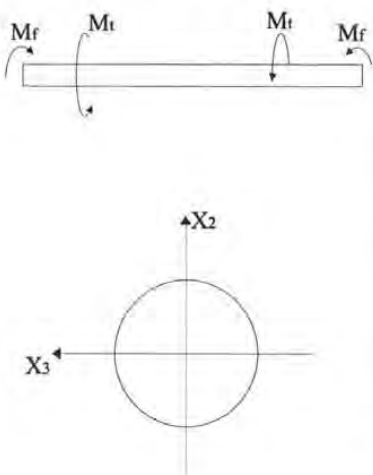
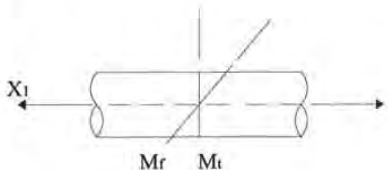
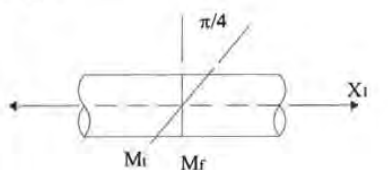
- Chatterjee S., (2000). *The Essence of Equipment Failure Analysis Theory, Approach, and Case Study*. Pump Magazine Publications.
- Coenen F., Swinnen G., Vanhoof K., Wets G., (2000). *The Improvement of Response Modeling: Combining Rule-Induction and Case-Based Reasoning*. Expert Systems with Applications 18, pp. 307-313.
- Darwish S.M., (2000). *A Knowledge-Base for Electronics Soldering*. Journal of Materials Processing Technology 97, pp. 1-9.
- Davidson T. (1999). *An Introduction to Failure Analysis for Metallurgical Engineers*, TMS Outstanding Student Paper Contest Winner-1999 Undergraduate Division.
- Hata T., Kobayashi N., Kimura F., Suzuki H., (2002). *Representation of Functional Relations Among Parts and Its Application to Product Failure Reasoning*. Kimura & Suzuki Laboratory, University of Tokio.
- Jansen J., (2001). *Using Failure Analysis to Assure Product Quality*. Automotive Plastics ABI/INFORM Global 59,1, pp. 34.
- Matsuoka T., Kobayashi M., (1997). *The GO-Flow Reliability Analysis Methodology-Analysis of Common Cause Failures with Uncertainty*, Nuclear Engineering and Design 175, pp 205-214.
- Page R., (2000). *Guidelines for Forensic Analysis of Failed Parts*. Mechanical and Materials Engineering Division Southwest Research Institute, Technical Report No. TR 00-2. Gas Machinery Research Council.
- Peng Z., Goodwin S., (2001). *Wear-debris Analysis in Expert Systems*. Tribology Letters 11,3-4,j09. pp. 177-184.
- Rosqvist T., (2000). *Bayesian Aggregation of Experts Judgements on Failure Intensity*, Reliability Engineering and System Safety 70, pp. 283-289.
- Sachs N., (2004). *Failure Analysis of Mechanical Components*. Maintenance World, 4-12.
- Scheirs J., (2000). *Compositional and Failure Analysis of Polymers*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Tchounikine P., Choquet C., Istenes Z., (1998). *Elaborating the Problem-Solving Model of a Fault Diagnosis Expert System by Knowledge Level Prototyping*. Expert Systems With Applications 14, pp. 303-312.
- Van Der Vorst B., (2003). *Decision-support System for Bearing Failure Mode Analysis*. SKF Group Technical Press. 6-3.
- Vouros G. (2000). *Representing, Adapting and Reasoning with Uncertain, Imprecise and Vague Information*. Expert Systems with Applications 19, pp. 167-192.

Anexos

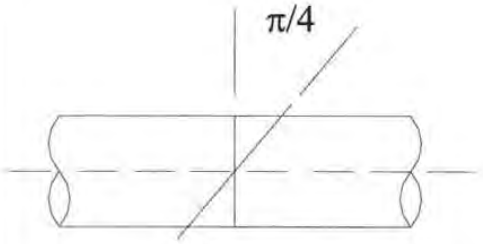
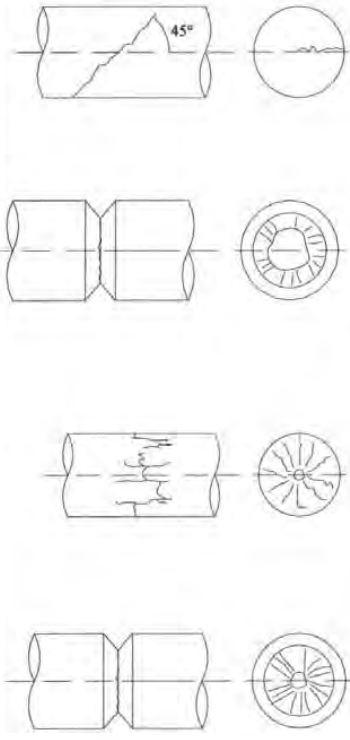
Anexo 1

Análisis de Esfuerzos en Ejes

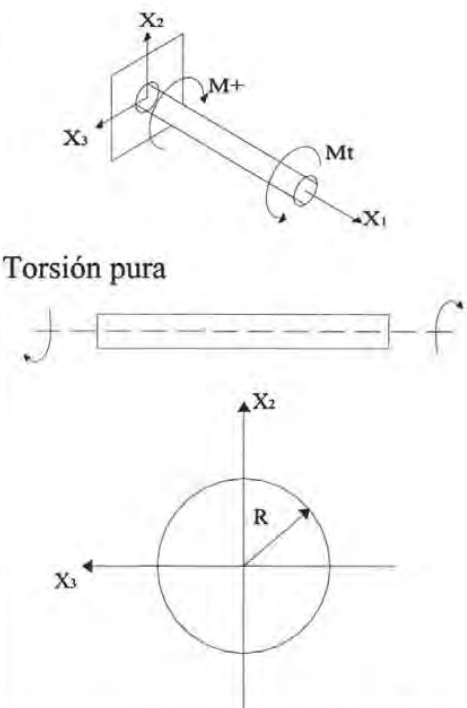
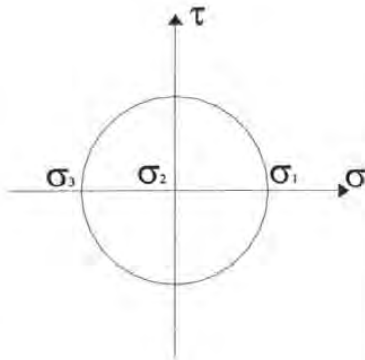
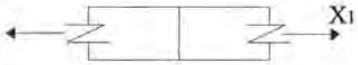

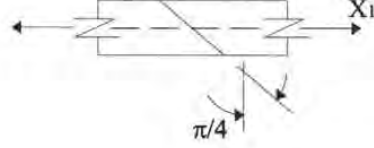

Análisis de esfuerzos en un eje sometido a sobrecarga por flexión-torsión

DIAGRAMA	ESTADO DE ESFUERZOS	ASPECTO
	$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{M_f x_2}{I} & -\frac{M_t x_3}{I_p} & \frac{M_t x_3}{I_p} \\ -\frac{M_f x_3}{I_p} & 0 & 0 \\ \frac{M_t x_2}{I_p} & 0 & 0 \end{pmatrix}$ $\sigma = \frac{M_f R}{I_p} \pm \frac{2R}{I_p} [M_f^2 + M_t^2]^{1/2}$ <p>Angulo de Esfuerzos principales de 0° a 45° con respecto al plano normal a "X₁"</p> $\sigma_{\max} = \frac{2R}{I_p} [M_f^2 + M_t^2]^{1/2}$	<p>Dúctil</p>  <p>Aspecto Opaco Fibroso Microcavidades</p> <p>Frágil</p>  <p>Aspecto Brillante Rugoso Granular Marcas de rio Superficies de clivaje</p>

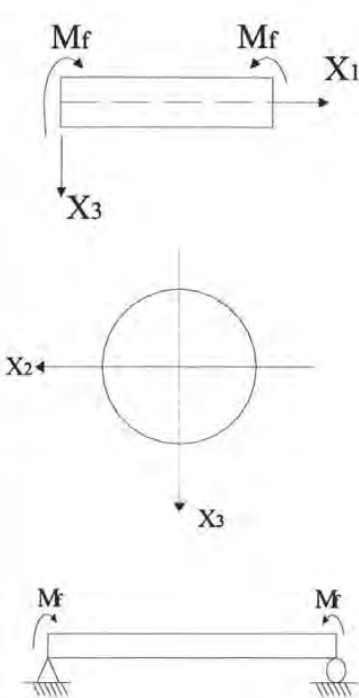
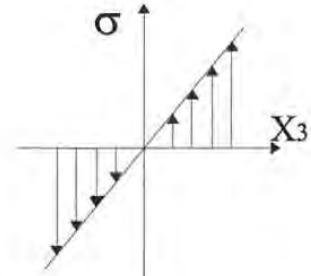

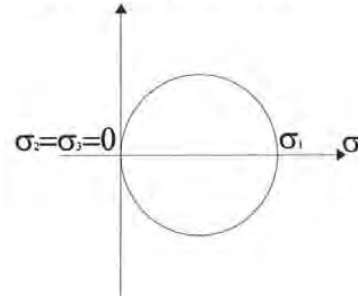
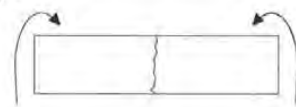
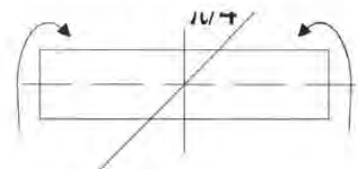
Análisis de esfuerzos en un eje (fatiga a torsión)

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

Análisis de esfuerzos en un eje sometido a sobrecarga por torsión pura

DIAGRAMA	ESTADO DE ESFUERZOS	CIRCULO DE MOHR
 <p>Torsión pura</p>	<p>Flecha sólida de sección circular</p> $\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & x_3 & x_2 \\ -x_3 & 0 & 0 \\ x_2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{Mt}{I_p}$ <p>Esfuerzo principal</p> $\sigma_{1,3} = \pm \frac{MtR}{I_p} ; \sigma_2 = 0$ <p>Direcciones principales</p> $n = \frac{1}{\sqrt{2}} e_1 - \frac{1}{\sqrt{2}} e_2$	 <p>Cortante puro direcciones principales a $\frac{\pi}{4}$ del estado de cortante puro</p>
<p>Angulo del plano principal de fractura</p>	<p>Característica de la superficie de falla</p>	
<p>Material dúctil Falla por cortante máximo</p>  <p>Superficie de fractura Superficie normal a X₁</p>	<p>La superficie externa muestra deformación en la dirección de rotación. La cual no existirá en el caso de fatiga.</p>  <p>A nivel microscópico las microcavidades están orientadas en el sentido de los esfuerzos de corte.</p>	
<p>Material frágil Falla por esfuerzo normal máximo</p>  <p>$\pi/4$</p>	<p>La superficie de fractura da lugar a un plano helicoidal.</p>  <p>El aspecto de la superficie es granular y brillante</p>	

Análisis de esfuerzos en un eje sometido a sobrecarga por flexión pura

DIAGRAMA	ESTADO DE ESFUERZOS	CIRCULO DE MOHR
 <p style="text-align: center;">$M = M_2 e_2 + M_3 e_3$</p>	<p>Flecha sólida de sección circular</p>  $\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{Mx_3}{I} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$  <p>Esfuerzo máximo $\sigma = \pm \frac{MR}{I}$</p>	 <p style="text-align: center;">$\sigma_1 = \sigma_3 = 0$</p>
Angulo del plano principal de fractura	Característica de la superficie de falla	
<p>Material frágil</p>  <p>La fractura se presenta sin evidencia de deformación plástica. No existen marcas de playa</p>	<p>Superficie brillante con aspecto de terrón de azúcar</p>	
<p>Material dúctil</p> <p>Deformación adyacente a la zona de fractura.</p> <p>Zona superior semejante a la superficie que se produce en una falla a tracción, zona inferior característica de falla a compresión.</p> 	<p>La microestructura en una sección longitudinal indica flexión de fibras</p>	

Anexo 2

Factibilidad del Desarrollo del Sistema Experto en Análisis de Falla

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

Cuando se analiza la viabilidad de desarrollar un sistema experto no solo hay que considerar lo que se ha expresado, sino también se deben considerar los beneficios que traerá a la organización que lo empleará, en términos de; reducción de costos, mejora de la calidad de las evaluaciones realizadas, incremento de la productividad, etc. De manera adicional, para decidir si se lleva a cabo una aplicación se debe considerar la disponibilidad de expertos en el área, siendo importante no solo su nivel de experiencia, sino que si tendrá el tiempo suficiente para las diversas sesiones y entrevistas requeridas. Asimismo se debe tomar en cuenta si el ingeniero del conocimiento (diseñador del sistema) tiene las habilidades en computación, para realizar la revisión de la literatura y para el planteamiento de metodologías para la obtención de información. Por último, es conveniente considerar el impacto que traerá al usuario final del sistema.

Para analizar la factibilidad del desarrollo de SE's, *Beckman* propone una metodología para evaluación. A continuación se describe en primera instancia este procedimiento para posteriormente aplicarlo y evaluar el área de estudio, el análisis de falla de elementos mecánicos metálicos. La determinación de la factibilidad para el desarrollo de un sistema experto se da con base en el análisis de las categorías que se presentan en la *tabla 1*. *Beckman* define una ponderación total, en donde los puntajes parciales se obtienen a partir de las *tablas 2 -6* para cada uno de los factores señalados.

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

Tabla 1 Lista de control para evaluar aplicaciones de sistemas expertos

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

Tabla 2. Evaluación del tipo de problema

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

Tabla 3. Evaluación de resultados finales

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

Tabla 4 Evaluación del diseñador del sistema

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

Tabla 5 Evaluación del dominio del experto

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

Tabla 6 Evaluación del usuario final

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

Determinación de la viabilidad del sistema propuesto

Aplicando la metodología descrita, se presenta el análisis que justifica el desarrollo e implantación del sistema experto en análisis de falla de elementos mecánicos metálicos [20] (tablas 7-11).

La metodología seguida se basa en la calificación del procedimiento a través de adjetivos que definan sus condiciones. Para la determinación de los valores propuestos para la ponderación se adquirieron a partir de sesiones de trabajo con expertos en análisis de falla de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, en donde se tiene una experiencia de más de 30 años desarrollando proyectos en esta área de estudio. Asimismo, se contó con el apoyo de expertos del Laboratorio de Metalurgia y Ciencia de Materiales de la Universidad de Gante en Bélgica. También para fortalecer los resultados de este análisis se consultó literatura especializada en análisis de falla. Analizando la *tabla 12* se afirma que el análisis de falla es un área viable para el desarrollo de un sistema experto.

Tabla 7 Evaluación del tipo de problema (Análisis de falla)

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

Tabla 8 Evaluación de resultados finales (Análisis de falla)

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

Tabla 9 Evaluación del diseñador del sistema ((Análisis de falla)

ATRIBUTO	PONDERACIÓN
1. El diseñador tiene experiencia en el diseño y el desarrollo de sistemas expertos	2/3
2. Conoce como usar la herramienta apropiada para el sistema y ha empleado el shell elegido	1/2
3. Tiene experiencia en la adquisición y selección del conocimiento de fuentes escritas y expertos	3/3
4. Tiene experiencia en inteligencia artificial para reconocer cuáles técnicas serán útiles para el desarrollo del sistema	2/3
5. Comprende la psicología cognoscitiva	1/1
6. Ha dirigido y desarrollado más aplicaciones de computación tradicional	2/2
7. Está informado ó es un experto en el campo del problema	1/2
8. Se cuenta hardware y software para el desarrollo del sistema	1/1
9. Puede asignar al menos 6 meses de tiempo completo para el desarrollo, evaluación e implementación del sistema	3/3
Puntos totales	16/20

Tabla 10 Evaluación del dominio del experto (Análisis de falla)

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

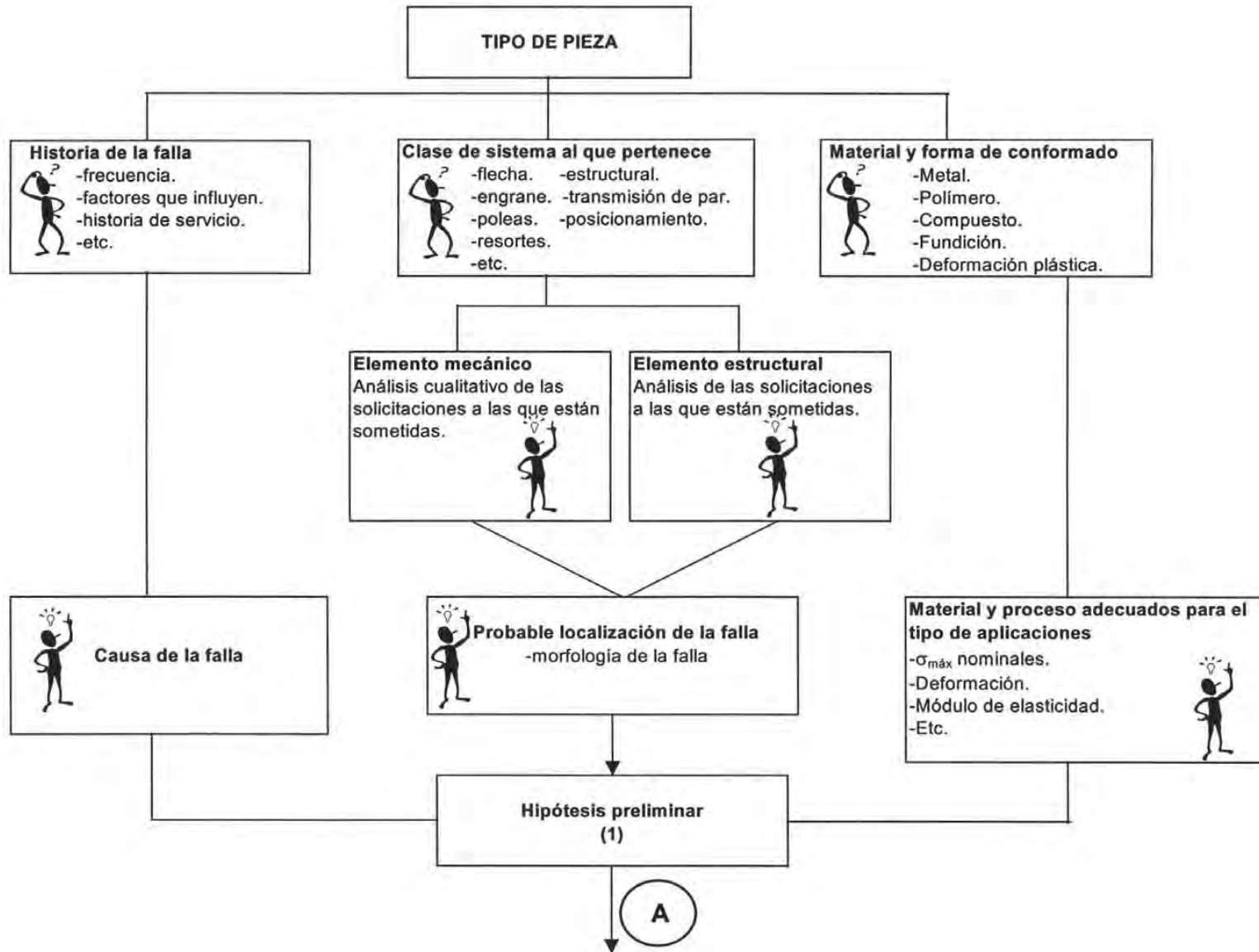
Tabla 11 Evaluación del usuario final (Análisis de falla)

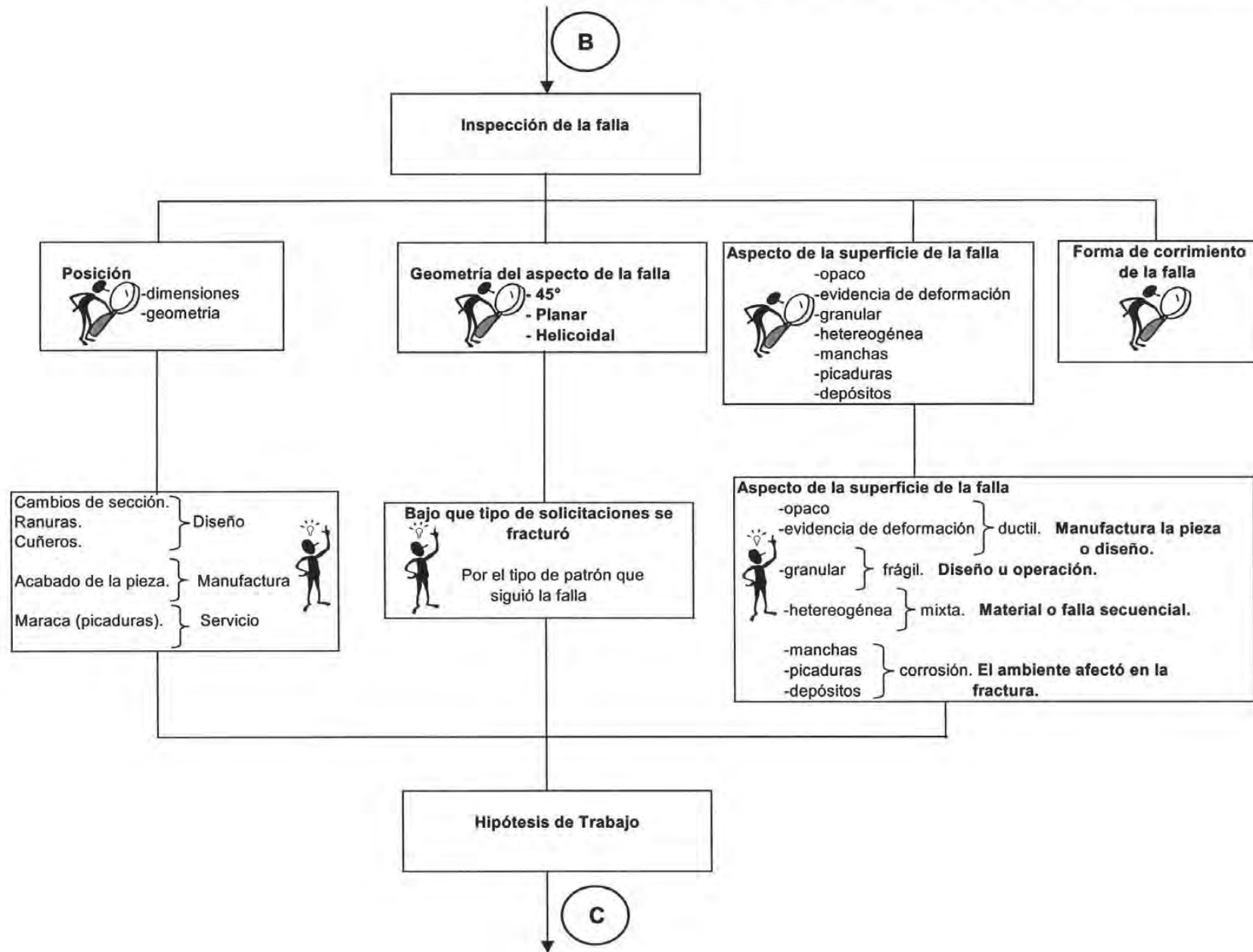
ATRIBUTOS	PONDERACIÓN
1. Existe la necesidad del sistema en México	2/2
2. El usuario no será desplazado o reemplazado como resultado de la implementación del sistema	2/2
3. Desea ser involucrado en el desarrollo del sistema	0/1
4. No se tienen expectativas altas ó irreales.	2/2
5. Aunque se requiere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

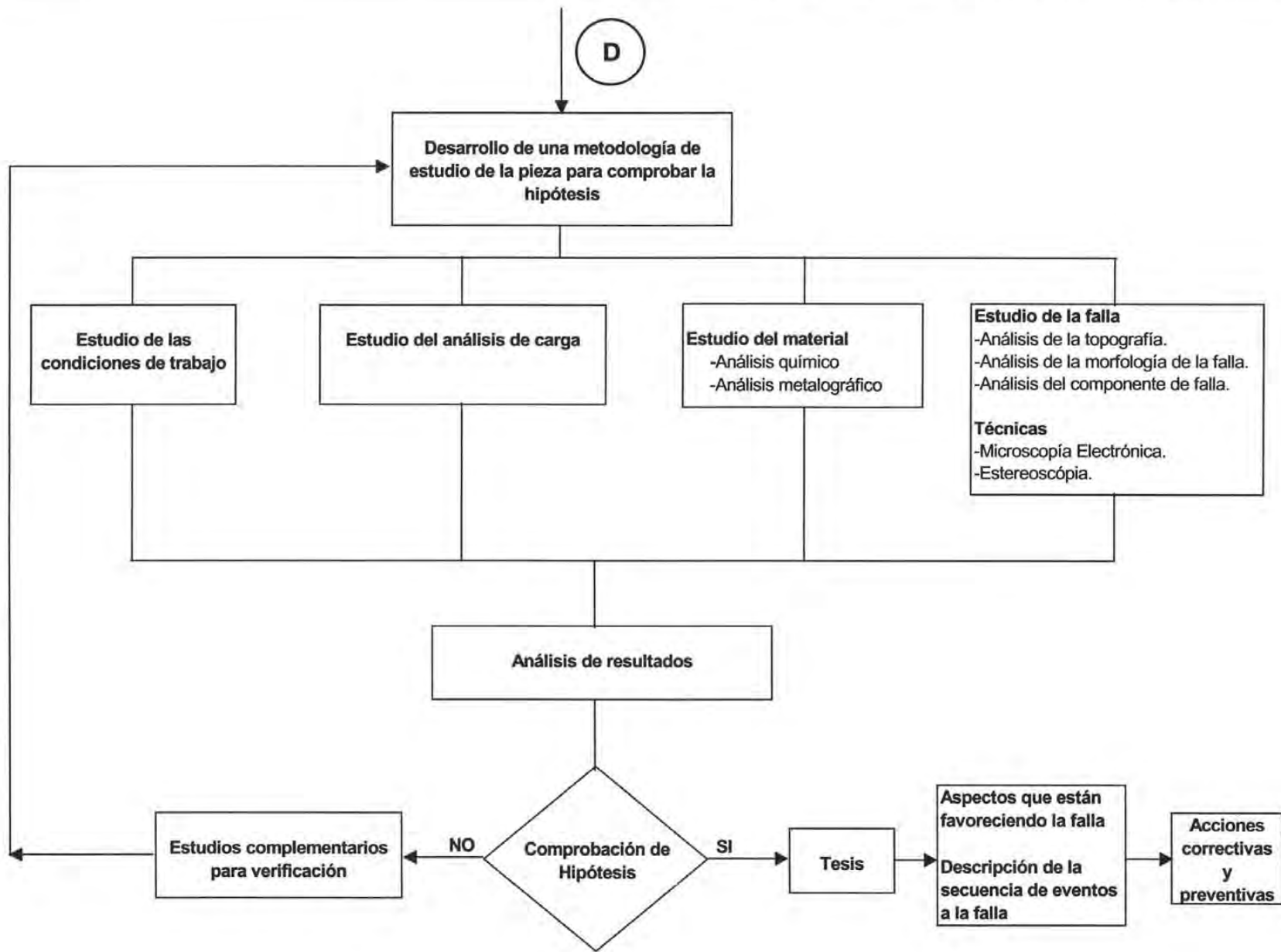
Tabla 12 Lista de control para evaluar aplicaciones de sistemas expertos(Análisis de falla)

CATEGORÍA	PONDERACIÓN
1. Tipo de problema	25
2. Resultados finales	21
3. Diseñador del sistema	16
4. Dominio del experto	15
5. Usuario final	6
Puntos totales	83/100

Anexo 3. Secuencia de Solución de Problemas de Análisis de Falla







Anexo 4

Clases y Atributos en Visual Rule Studio

! Class Declarations

!XX
!XX

Class Part

With Material Compound
Metalic

With Type Compound
Shaft
! encontramos el tipo de elemento

With TypeFound Simple
! encontramos el tipo de funcion del elemento

!With FunctionFound Simple

With PracticeLoadType Compound

Tension,
Compression,
Torsion,
Unidirectional_Bending,
Bidirectional_Bending,
Rotational_Bending,
Bending

With TheoristLoadType Compound

Tension,
Torsion,
Unidirectional_Bending,
Bidirectional_Bending,
Rotational_Bending

With StressField Compound
Uniaxial,
Biaxial,
Triaxial

With Heterogeneity Simple

With Features_Exist Simple

With Feature_Is_Near Simple

With Design Compound
Good,

Bad,
DontCare

With Cyclic_load Simple

!XX
!XX

Class Material_Info

With Materials Compound
Steel,
Bronze

!encontrar clase de material
With MaterialFound Simple

!XX
!XX

Class Rec

With Recomendation String

With Other Simple

!XX
!XX

Class Failure

With FClass Multicomponent

Crack
!
Corrosion,
!
WearingOut,
!
Deformation

With Type Multicomponent

Brittle,
Ductile,
Fatigue

With Failure_Plane_Apparence Compound

Planar,
_45deg,
Helical

With Failure_Surface_Apparence Multicomponent

Soft,
Brighness,
Coarse,
Sugar_Cube

With Failure_Surface_Texture Multicomponent

Wrinkled,
Smooth,

Both,
Polished

With Surface_Marks Compound
Chevron,
Beach

With Deformation_zone Simple

!XX
!XX

Class Environment

With Work_Temperature Compound
_minus50deg,
_more50deg

!XX
!XX

Class Shafts

!atributo para conocer si el eje transmmitte potencia
With Power_transmissions Simple

With FunctionFound Simple

!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

!
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
!

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
!

Class Failure_VisualInformation

With VBrittle Simple

With VFatigue Simple

With VDuctile Simple

Class Feature

With Type Compound
Mechanical,
Metallurgist

Anexo 5

Reglas del Subsistema para Fallas en Ejes en Visual Rule Studio

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
!

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
!

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
!

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"

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
```

Anexo 6

Peso asignado a los atributos del subsistema de RBC

Atributo	Peso
CLASE: INFORMACIÓN DEL MATERIAL	
Ferroso	1
No ferroso	1
SOLO SI ES FERROSO	
Fundición	2
Acero	2
CONTENIDO DE CARBONO	
Menor al 0.25%	1
Entre 0.25% y 0.55%	1
Entre 0.55% y 1%	1
Entre 1% y 5%	1
CONTENIDO DE ALEANTES	
Menor al 0.1%	1
Entre 0.1% y 1%	1
Entre 1% y 5%	1
Entre 5% y 11%	1
Mayor al 11% / inoxidable	1
ELEMENTOS ALEANTES ESPECÍFICOS	
El material es una aleación de aluminio o magnesio.	2
El material es una aleación de zinc	3
TIPO DE SISTEMA	
Transmisión de movimiento	3
Transmisión de potencia	3
Soporte	3
Transporte o contención de fluidos	3
TRATAMIENTOS TÉRMICOS	
Recocido	1
Normalizado	1
Temple y revenido	1
Carburizado	1
Endurecimiento por trabajo en frío, precipitación, flama	1
INFORMACIÓN ADICIONAL SOBRE EL MATERIAL	
Recubrimientos	1
Fragilización del material	2
CLASE: CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA / GRIETA	
Apariencia cristalina en una zona	2
Patrón de hueso de chevron o espinazo de pescado	2
Poca o nula deformación plástica-frágil	3
Alta deformación plástica-dúctil	3
Cambio de tonalidad en la superficie de la pieza	1
Huecos o abolladuras-indentaciones	1

Desprendimiento de partículas por abrasión	3
Abrasión con ralladuras	3
Se encuentra exceso de polvo (productos de corrosión)	1
La superficie está deslustrada sin daño aparente	1
Presencia de labios	2
Apariencia rota o con surcos mostrando la dirección de arranque	3
Superficie con deformación en la dirección de rotación	2
Superficie de fractura tipo espiral, sin deformación plástica.	2
Zonas en forma de creciente brillantes y finas	2
Fractura perpendicular al esfuerzo normal máximo	3
Fractura a 45° con respecto a la dirección del esfuerzo normal máximo	3
Desgaste en las superficies de fractura	2
La falla está en un concentrador de esfuerzos mecánico	2
Se identifica fácilmente origen, propagación lenta y fractura, hay corrosión	1
La fractura comienza en un punto de la periferia	3
Grietas adyacentes a la grieta principal	3
Porosidad superficial (asociada con abrasión)	3
Ampollamiento o delaminación del material	2
Origen de falla en el centro de la superficie	1
Cuellos en la fractura	1
La fractura crece en sentido opuesto a la rotación, pero se desvía 15° o más.	3
Tiene regiones a 90° y a 45 ° con respecto al esfuerzo normal máximo	3
Hay variaciones de tonalidad en la superficie de fractura	3
La grieta se origina en una zona desgastada	1
Marcas de playa simétricas con respecto al origen de la grieta	1
CLASE: ESTEREOSCOPIO / MICROSCOPIO ÓPTICO	
Estrias / marcas de chevron	2
Patrón de agrietamiento de río	2
La corrosión está en las capas de recubrimientos	1
Se pierde gran parte del recubrimiento	1
Patrón de anillos concéntricos	2
Picaduras	3
El fondo de las picaduras es el origen de la grieta.	3
Fractura intercrystalina	2
Fractura transcristalina	2
El origen de las marcas de playa es único.	3
Deformación adyacente a la fractura.	1

Deformación adyacente a la fractura con cambio en el eje central de la pieza	3
No hay deformación o cambio en el eje centra de la pieza	1
Cavidades agudas y bien definidas en forma de cráter	3
CLASE: METALOGRAFÍA / ANÁLISIS QUÍMICO	
Inclusiones o Presencia de precipitados	2
Porosidad	2
Pérdida selectiva de un componente de la aleación	2
Grietas con ramificaciones	3
Se desarrollan dos grietas partiendo de puntos diametralmente opuestos	3
Patrón de río	2
Redes de grietas (corrosión intergranular)	3
Ruptura intergranular	2
La composición o microestructura NO cumple las especificaciones de diseño	3
CLASE: ANÁLISIS SEM	
Estrías / marcas de llanta	2
Microcavidades equiaxiales	3
Ruptura intergranular	3
Patrón de río	2
Apariencia dúctil	3
Ruptura transgranular	3
Apariencia frágil	3
La microestructura del eje longitudinal muestra fibras dobladas	2
Presencia de microcavidades elongadas o parabólicas	3
Microcavidades equiaxiales	3
Las microcavidades son grandes, asociadas con un esfuerzo de cedencia bajo	3
Se inician y se propagan varias grietas simultáneamente	3
Los espacios entre los marcas de playa o estrías son difusos y no uniformes	2
Líneas de propagación de marcas de fatiga débiles	2
Fractura combinada dúctil-frágil (típica de clivaje)	2
Los espacios entre las marcas de playa o estrías son finos, uniformes y angostos.	2
Líneas de propagación de marcas de fatiga bien definidas	2
Pérdida selectiva de un componente de la aleación	3
Microporosidades	2
Ojos de pescado o escamas rodeando una inclusión no metálica	1
Se puede observar una hoja	1
Vacíos de fluencia en la frontera de grano cerca de la fractura	1
Corrosión en grietas (crevice)	2