

01128
19

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

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

NOMBRE: HERNANDEZ RAMIREZ
ALBERTO

FECHA: 28-FEB-2003

FIRMA: Alberto Hernández

**RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS
APLICADO AL ANÁLISIS DE FALLA DE
ELEMENTOS MECÁNICOS METÁLICOS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO INDUSTRIAL

P R E S E N T A :

ALBERTO HERNÁNDEZ RAMÍREZ



DIRECTOR DE TESIS

M. en I. VÍCTOR HUGO JACOBO ARMENDÁRIZ

CD. Universitaria

2003

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

B

Agradecimientos:

A mis padres Isabel y Alberto,

A mi hermano Javier,

A todos mis amigos,

A los profesores:

Victor H. Jacobo Armendáriz

Sara M. Cerrud Sánchez

Armando Ortiz Prado

*A todo el personal de la UDIATEM,
con quienes compartí dos años de trabajo.*

Y finalmente, a Dios

*Muchas gracias por todo el apoyo brindado
durante la realización de esta Tesis.
Sin la ayuda de todos,
jamás habría podido llegar
a su culminación este trabajo,
con el cual termino una etapa en mi vida.*

C

ÍNDICE

PRÓLOGO..... 1

CAPÍTULO 1
ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS INTELIGENTES PARA ANÁLISIS DE FALLA..... 3

- 1.1 Introducción..... 5
- 1.2 Sistema experto genérico para análisis de falla 6
- 1.3 Sistema para análisis de fallas por corrosión..... 7
- 1.4 Sistema para la identificación de mecanismos de falla..... 8
- 1.5 Ventajas y desventajas de los sistemas RBC para análisis de falla..... 10

CAPÍTULO 2
ORGANIZACIÓN DEL CONOCIMIENTO..... 12

- 2.1 Introducción..... 13
- 2.2 Razonamiento basado en casos..... 14
- 2.3 Elementos de un sistema RBC..... 16
- 2.4 Primera estructura propuesta..... 18
- 2.5 Segunda estructura propuesta..... 23
- 2.6 Estructura de organización..... 29

CAPÍTULO 3
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA..... 34

- 3.1 Introducción..... 35
- 3.2 Modelo para el desarrollo del sistema 35
- 3.3 Diagrama de flujo..... 38
- 3.4 Construcción de la base de conocimiento..... 39
- 3.5 Ponderación de atributos..... 41
- 3.6 Medidas de relevancia..... 45
- 3.7 Biblioteca de índices 46
- 3.8 Interfase de usuario..... 54

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

D

3.9 Módulo de explicación.....	54
3.10 Validación de los algoritmos de búsqueda	55

CAPITULO 4

OPERACIÓN DEL SISTEMA	57
------------------------------------	-----------

4.1 Introducción.....	58
4.2 Interacción de los componentes.....	58
4.3 El caso de ejemplo	60
4.4 Pantalla de inicio.....	62
4.5 Módulo de instrucciones	62
4.6 Llaves primarias.....	64
4.7 Clases	64
4.8 Pantallas de captura de valores lógicos	65
4.9 Confirmación.....	70
4.10 Medidas de similitud	71
4.11 Casos similares.....	72

CONCLUSIONES.....	81
--------------------------	-----------

Recomendaciones:	82
Perspectivas del sistema	83

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	84
--	-----------

Prólogo

La planta productiva mexicana se concentra en la pequeña y mediana industria. Las empresas metal-mecánicas que pertenecen a estas categorías sufren frecuentemente de problemas donde se involucra el análisis de falla.

Dado que son empresas que no cuentan con el capital necesario, no tienen un departamento propio para que desarrolle la investigación en análisis de falla, razón por la cual recurren a asesores externos o compran nuevamente el elemento que falló, sin embargo, esta última solución tiene el problema de que es altamente probable que la falla se repita, pues las causas de fondo no han sido atacadas.

Ante esta problemática, la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica En Materiales de la Facultad de Ingeniería está trabajando en la construcción de un sistema inteligente para análisis de falla. Este sistema contará con las características de almacenar la experiencia del analista y de ser fácil de manejar por parte de una persona con conocimientos de Ingeniería Mecánica.

Para que el sistema inteligente pueda brindar soluciones con un alto grado de confiabilidad, se pretende contar con un sistema híbrido, que maneje tanto el enfoque de razonamiento basado en reglas como el enfoque de razonamiento basado en casos.

La primera etapa del desarrollo del sistema inteligente, consistió en la construcción de un sistema de razonamiento basado en reglas para el análisis de falla en ejes.

El objetivo de este trabajo de tesis es desarrollar un prototipo del módulo de razonamiento basado en casos, que pueda trabajar como una herramienta autónoma y en etapas posteriores, pueda integrarse con el sistema de reglas. Para desarrollar este módulo, se utilizó el siguiente procedimiento:

- *Se revisó el estado del arte de los sistemas de razonamiento basado en casos para análisis de falla. (Capítulo 1)*

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- *Se revisaron las bases teóricas de los sistemas de razonamiento basado en casos. (Capítulo 2)*
- *Se elaboró un modelo de organización de conocimiento, como parte del diseño del sistema. (Capítulo 2)*
- *Se determinó un modelo de desarrollo de software apropiado y se elaboró el diagrama de flujo, completando así el diseño del sistema. (Capítulo 3)*
- *Se construyeron los elementos del sistema y se integraron. (Capítulo 3).*
- *Se realizaron pruebas de funcionamiento. (Capítulo 3)*
- *Se documentó la operación del sistema (Capítulo 4)*

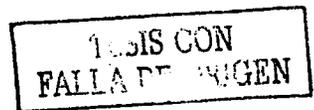
Este prototipo cuenta con una base de conocimientos con 30 casos históricos y un conjunto de índices. La base contiene casos de análisis de falla de distintos tipos de elementos metálicos, los cuales presentan diversos mecanismos de falla.

Durante toda la elaboración de esta tesis, se recurrió a la asesoría del experto en análisis de falla. El experto puede inferir los mecanismos de falla en los diversos casos a los que se enfrenta.

La relevancia del sistema desarrollado es que, cuando se integre con el sistema de reglas, podrá resolver la mayoría de los problemas de análisis de falla que se presentan en la industria; solamente cuando se presenten problemas muy complejos que el sistema no pueda resolver, será necesario recurrir a los asesores externos.

En la industria, un campo de trabajo del Ingeniero Industrial, es común que surjan problemas de análisis de falla. En lo personal, esta tesis representó la oportunidad de profundizar en este tema y obtener una capacitación en el mismo.

Alberto Hernández Ramírez



CAPÍTULO 1:

**ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS INTELIGENTES PARA
ANÁLISIS DE FALLA**

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.1 Introducción.

La aplicación de la inteligencia artificial en el análisis de falla, se ha limitado al desarrollo de algunos sistemas construidos bajo el enfoque del razonamiento basado en casos (RBC) Por otro lado, debido a su complejidad, los sistemas basados en reglas (RBR) casi no han sido considerados en esta área del conocimiento. Sin embargo, en la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica En Materiales (UDIATEM) se ha desarrollado un sistema experto para análisis de falla en ejes bajo el enfoque de RBR.

En el largo plazo, el sistema RBC que se ha desarrollado en este trabajo, se integrará con el sistema RBR de UDIATEM. Es entonces cuando se contará con un sistema híbrido que pueda resolver la necesidad nacional de personal capacitado en análisis de falla.

En su operación, el sistema híbrido almacenará los datos del caso del usuario a través de su interfase, con estos datos, el módulo RBR brindará su solución: el mecanismo de falla. Por otro lado, el módulo RBC será alimentado con datos del caso y con la solución del sistema RBR y exhibirá los casos más semejantes. Al consultar los casos similares, el usuario podrá validar la solución del sistema RBR. La figura 1.1 muestra el diagrama de operación del sistema híbrido.

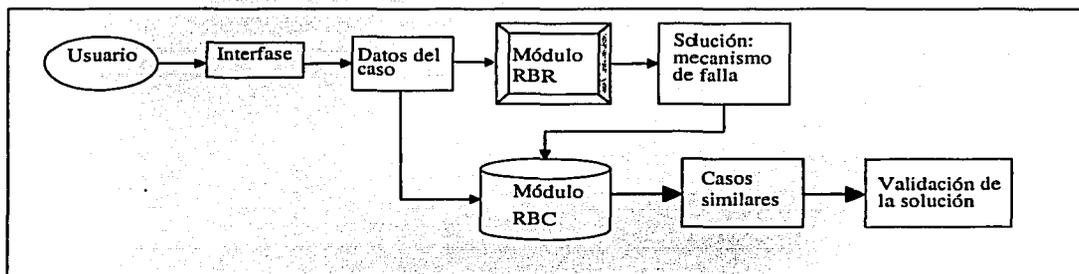


Figura 1.1. Diagrama de operación del sistema híbrido.

En este capítulo, se presentan las características de los sistemas de razonamiento basado en casos construidos para el análisis de falla. Se identifican sus ventajas y

desventajas con el propósito de proponer un nuevo sistema que pueda resolver problemas de análisis de falla mediante RBC.

1.2 Sistema experto genérico para análisis de falla

Jasper Graham-Jones y Brian G. Mellor, de la Universidad de Southampton, Inglaterra [11,12] desarrollaron un sistema de razonamiento basado en casos para análisis de falla. Este sistema es capaz de realizar las siguientes tareas:

- Identifica las posibles secuencias de falla y modos de falla.
- Brinda información detallada con ayuda de un ambiente multimedia para la selección de materiales, diseño, fabricación, estándares y métodos de obtención de datos relacionados con los modos de falla y las soluciones.
- Permite al diseñador (antes de la falla) o al analista (luego de la falla) modificar los detalles de diseño y manufactura para obtener una simulación de cómo afectarían los cambios a la confiabilidad del producto.
- Provee una base de datos de los casos históricos de diversos clientes para el consultor.
- Funciona como un tutorial para capacitación.

En su operación, el sistema solicita la descripción de los casos en lenguaje natural. Después despliega un menú de hasta 50 preguntas, el número de preguntas depende de la descripción inicial. Las respuestas a las preguntas pueden ser "sí", "no", "no se sabe" o una opción de una lista. El sistema almacena la información y calcula la similitud que existe entre el caso en estudio y los históricos. Ahora el usuario puede revisar el caso con mayor similitud o los que tengan una calificación parecida.

Estructura del sistema

1. Base de casos. Cada caso contiene el título y una descripción, el título es una línea que contiene al mecanismo de falla, además de que es lo suficientemente

específico para distinguir un caso. La descripción es un párrafo escrito en lenguaje natural. Los casos tienen atributos, que corresponden con las preguntas formuladas al usuario.

2. Biblioteca de índices. La descripción del caso y el título cumplen la función de un índice, pues limitan la región donde se efectuará la búsqueda de casos similares al caso en estudio.

El sistema cuenta con un alto desempeño en el uso del lenguaje natural, tiene bases de datos con sinónimos y puede comprender expresiones coloquiales como "no es posible diferenciar", "es probable", "no se puede saber", etc.

1.3 Sistema para análisis de fallas por corrosión.

Roberge et al. [15] presentan un sistema de razonamiento basado en casos para corrosión, utilizando técnicas de asociación entre pares de atributos o palabras clave.

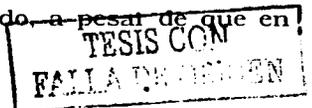
Este sistema no es capaz de determinar otros mecanismos de falla como la sobrecarga. Brinda recomendaciones para prevenir la recurrencia de falla. Este sistema fue construido para apoyar al experto humano, proporcionándole una base de datos con casos históricos, para auxiliarlo en las primeras actividades a seguir en la solución de problemas relacionados con la corrosión.

Estructura del sistema

1. Base de casos. Los casos están definidos principalmente por las siguientes palabras clave: Medio ambiente, geometría, material, temperatura, tiempo, estado de esfuerzos.

2. Biblioteca de índices. Está compuesta por las relaciones entre las palabras clave, las cuales fueron obtenidas al revisar 1156 casos de corrosión reportados en la literatura. (Tabla 1.1)

La tabla indica que los factores más repetitivos son el ambiente y el material, mientras que el tiempo es un elemento que pasa desapercibido, a pesar de que en



muchas ocasiones, el tiempo es el que determina la ocurrencia de las fallas por corrosión.

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

Tabla 1.1. Relaciones entre las palabras clave

3. Medidas de relevancia. Las palabras clave, junto con algunas variantes, forman el conjunto de atributos con los cuales se calcula la similitud.

1.4 Sistema para la identificación de mecanismos de falla.

T. W. Liao, Z. M. Zhang y C. R. Mount [13], han desarrollado un sistema de razonamiento basado en casos para identificar el mecanismo de falla en elementos metálicos. La debilidad de este sistema es que no cuenta con una biblioteca de índices.

El sistema puede distinguir entre dos tipos de casos: los comunes y los excepcionales. Un caso común es aquel que puede llevar a la inferencia de reglas y se presenta con regularidad, mientras que un caso excepcional aparece con poca frecuencia. Si encuentra un caso excepcional, el sistema realiza una búsqueda secundaria. Además, si dos casos tienen una similitud elevada y parecida, el sistema efectúa una búsqueda más detallada para determinar cuál caso es más similar al del usuario.

En las pruebas de funcionamiento, reportan haber ocupado casos semejantes a los históricos, los cuales fueron introducidos al sistema y posteriormente, analizaron los resultados de similitud, concluyendo que el sistema tenía un buen funcionamiento al obtener altos valores de similitud para estos casos.

El sistema cuenta con un módulo de algoritmo genético para obtener las ponderaciones de los atributos. Si el usuario activa este módulo, es necesario que

defina los parámetros como son la velocidad de mutación, el número de generaciones y el tamaño de población.

Estructura del sistema

1. Base de casos. La base de casos contiene 477 casos, de los cuales 375 están clasificados como normales y 102 como excepcionales. En la tabla 1.2 se encuentra la estructura de un caso, la cual contiene 8 diferentes clases, cada una con sus propios atributos o palabras clave. Los atributos toman, dependiendo del caso, los valores 1 (atributo presente), -1 (atributo ausente) ó 0 (no hay seguridad sobre si el atributo está presente o ausente)

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

Tabla 1.2. Estructura de un caso.

2. Medidas de similitud. El sistema exhibe los atributos para que el usuario, con la información de su caso, les asigne el valor 1, -1 ó 0. La similitud entre dos casos es calculada con la ecuación de Hamming (Ecuación 1.1)

$$SIM(X, Y) = 1 - \sum_i w_i * dist(x_i, y_i) \dots \text{Ecuación de Hamming.} \tag{Ec. 1.1}$$

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

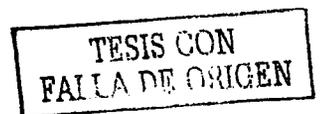
Y es un caso nuevo, y es el valor del mismo atributo de un caso nuevo,

SIM es la similitud entre dos casos,

w es la ponderación de cada atributo,

(dist) es la distancia, la cual es el resultado de comparar los valores lógicos de los atributos. La tabla 1.3 muestra la manera en que este sistema mide la distancia.

Esta tabla contiene el valor de 0, esto se debe a que en el análisis de falla, abunda la información incompleta o imprecisa. Existen varias teorías para manejar este problema, las cuales son citadas por Liao en [13]



(x)	(y)	Distancia
1	-1	0
-1	-1	0
1	-1	1
-1	1	1
0	1	0.5
0	-1	0.5
1	0	0.5
-1	0	0.5
0	0	0.5

Tabla 1.3. Medidas de distancia.

1.5 Ventajas y desventajas de los sistemas RBC para análisis de falla.

Se identificaron tanto aspectos positivos como negativos de los sistemas. Del primer sistema (punto 1.2), se resalta su capacidad de mostrar en la interfase de usuario, varios casos similares; del segundo (punto 1.3), las recomendaciones para evitar la recurrencia de falla; del tercero (punto 1.4), la orientación hacia la determinación de mecanismos de falla.

En la tabla 1.4, se presentan con mayor detalle las fortalezas y debilidades de los sistemas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Sistema	Fortalezas	Debilidades
Sistema experto genérico para análisis de falla	Con base en una descripción del caso en lenguaje natural, limita la búsqueda de casos, actuando como biblioteca de índices.	Al utilizar el lenguaje natural, es posible utilizar términos desconocidos para el sistema.
	Exhibe varios casos históricos en la interfase de usuario	No maneja acciones para evitar la recurrencia de falla.
	Tiene una estrategia de crecimiento bien planteada.	
Sistema para análisis de fallas por corrosión.	Brinda recomendaciones para prevenir la recurrencia de la falla en el módulo de explicación.	Es específico para corrosión.
	Cuenta con biblioteca de índices	
Sistema para identificar mecanismos de falla.	Maneja análisis de falla para cualquier tipo de elemento metálico.	No cuenta con biblioteca de índices.
	Puede realizar búsquedas para hallar el mejor de dos casos con alta similitud.	
	Su algoritmo genético permite refinar las ponderaciones.	Omite las acciones para evitar que la falla se repita.
	Especifica cómo se mide la distancia entre atributos.	

Tabla 1.4. Fortalezas y debilidades de los sistemas RBC.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 2:

ORGANIZACIÓN DEL CONOCIMIENTO

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

2.1 Introducción

Una vez que se revisó el estado del arte, se estudiaron las bases teóricas de los sistemas RBC, esto con el objetivo de realizar el diseño y posteriormente, la construcción del sistema. Sin embargo, durante la fase de diseño (que será explicada en el capítulo 3), apareció el problema de organizar el conocimiento, problema de todo sistema de este tipo, por lo que fue imperativo definir una estructura para organizar el conocimiento de análisis de falla. Este capítulo trata en primera instancia, de la teoría del RBC; posteriormente, se enfoca a la organización del conocimiento.

Diversos autores [3, 4, 5, 8] en materia de análisis de falla, han propuesto estructuras para organizar este conocimiento. Coinciden en separar la información de un caso en apartados como información del material, examen metalográfico, ambiente de operación, etc. En cada apartado, existen diferentes datos que caracterizan a un caso (para información del material: ferroso, no ferroso, contenido de carbono, etc.)

Pasando al razonamiento basado en casos, tales estructuras coinciden con una técnica de representación del conocimiento llamada marcos. Los marcos son estructuras donde se almacena información concreta de un cierto concepto e información adicional relacionada. Se representan por una serie de atributos y los valores asociados a los mismos; un marco puede contener otros marcos. Si un marco sólo contiene atributos y valores, representa una clase (conjunto de atributos) Los atributos son características propias de un problema, pueden o no pertenecer a un marco; además toman valores que pueden ser de tipo lógico, numérico o alfanumérico.

Se determinó que los marcos serían los apartados en que se divide la información de un caso de análisis de falla, y los datos que contienen los apartados, serían los atributos. El problema que faltaba resolver era determinar cuáles serían los marcos y cuáles serían los atributos.

Para solucionar esta problemática, la primera propuesta fue una estructura basada en un elemento de un sistema experto. Como se mencionó en el punto 1.1, la UDIATEM cuenta con un sistema experto para el análisis de falla en ejes. Como una

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

primera aproximación para organizar el conocimiento, se trabajó con base en una pantalla de ese sistema que sirve para exhibir casos resueltos.

Debido a que la primera estructura propuesta no era del todo satisfactoria, pues no engloba todos los atributos de un caso de análisis de falla, fue necesario proponer una segunda estructura y trabajar con ella hasta llegar a una estructura de organización definitiva.

2.2 Razonamiento basado en casos.

Los sistemas de razonamiento basado en casos son programas del área de la inteligencia artificial que utilizan situaciones ocurridas con anterioridad -denominadas casos- para identificar soluciones existentes, adaptar esas soluciones a los problemas actuales y explicar situaciones semejantes.

La metodología de estos sistemas se puede resumir en cuatro pasos, que son conocidos como las cuatro R [7,17]:

- 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. Algunos atributos tienen más influencia que otros en el cálculo de la similitud, por esto se les brindan pesos o ponderaciones.
- 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 RBC aprende.

En la figura 2.1 se muestra un esquema general del proceso.

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 sistema experto.

- Se pueden manejar grandes volúmenes de información si se aplican técnicas de bases de datos eficientes.
- Estos sistemas pueden aprender y mejorar su propio desempeño con sólo ampliar la base de casos.
- La construcción de prototipos es rápida.

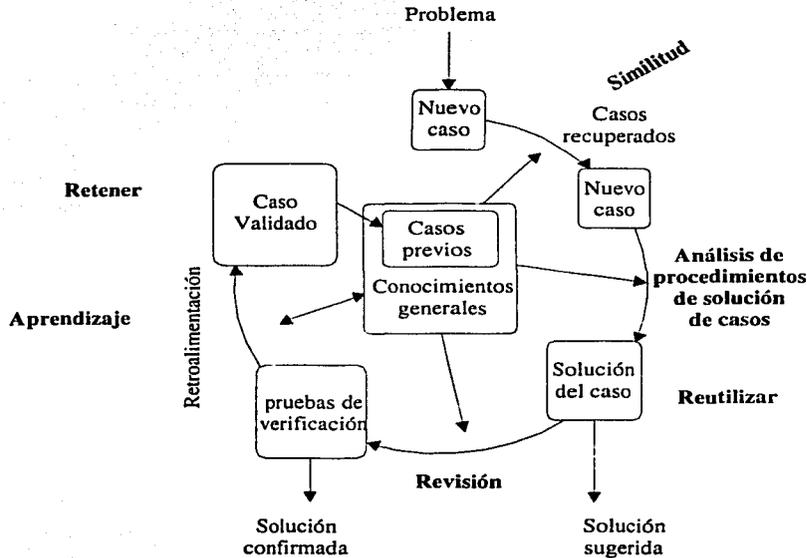


Figura 2.1. Proceso de razonamiento basado en casos

Por otra parte, los sistemas RBC presentan las siguientes desventajas:

- La ponderación de atributos es un problema muy difícil de resolver por el experto humano. Debido a esto, los desarrolladores recurren a métodos matemáticos.
- Requieren de una base de casos muy grande 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 resultados tampoco.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

2.3 Elementos de un sistema RBC

Estos sistemas constan de cuatro elementos (Figura 2.2): base de conocimiento, biblioteca de índices, medidas de relevancia, módulo de explicación (Kolodner en [7]). Aunque se explica la representación del conocimiento, queda inmersa en la base de conocimiento.

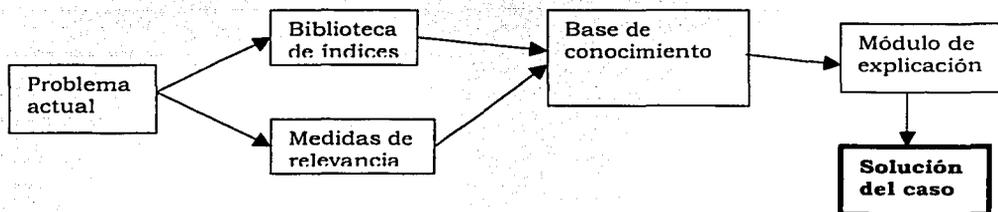


Figura 2.2. Elementos de un sistema RBC

a) Base de conocimiento

Es una base de casos históricos que captura problemas y sus soluciones. Se diseña para almacenar conocimiento y experiencia en algún tema particular. Contiene teorías, principios y clasificaciones del problema, junto con el proceso para resolver los problemas, además de la solución. El diseño que se le dé a la estructura de la base es muy importante (CASO: elementos del problema y solución)

b) Representación del conocimiento

Dentro de la base de conocimiento se encuentra implícito un problema que debe ser resuelto junto con el experto humano, se trata de la representación del conocimiento. Algunas de las herramientas principales para la representación son: marcos, atributos y reglas.

Las reglas son la forma más extendida de representación del conocimiento, tienen la estructura IF - THEN si (condición) entonces (acción / conclusión) El orden de ejecución es muy importante. Una regla puede activar otra regla y entonces recibe el

nombre de metaregla, se suelen usar para modelar progresivamente el conocimiento del experto.

c) Biblioteca de índices

Para realizar el rastreo de los 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. Debido a la complejidad de esta tarea, es necesario utilizar diversos métodos, de los cuales los más utilizados son:

- Indexación basada en matrices y vectores de conocimiento, las componentes importantes son calculadas y depositadas en un vector; se calcula una similitud parcial.
- Indexación inductiva basada en aprendizaje, este método trabaja con valores futuros que serán utilizados como índices. Se fijan las metas de indexación y conforme pasa el tiempo, se van alcanzando.
- Indexación basada en similitudes, se crea un grupo de índices para casos virtuales creados a partir de casos reales que guardan parecido entre sí, las diferencias crean índices para los casos reales.

d) 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 forma es usando la distancia euclidiana y otra, ocupando la distancia de Hamming:

$$SIM(X, Y) = 1 - DIST(X, Y) \dots Ec. 2.1$$

$$SIM(X, Y) = 1 - \frac{\sum (w_i^2 * dist(x_i, y_i)^2)}{\dots} \text{ Euclidiana} \dots Ec. 2.2$$

$$SIM(X, Y) = 1 - \sum w_i * dist(x_i, y_i) \text{ Hamming} \dots Ec. 1.1$$

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"; dentro del análisis de falla, es muy común que los atributos tomen estos valores.

Existen varias teorías para medir la distancia, las cuales son exhibidas en la tabla

2.1. Se incluye el manejo del valor de "inexistente" o "desconocido".

(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 Agre [10]
0.5	x o y son desconocidos. (Ricci y Avesani) [14]
dist(x,y)=0 dist(x,y)=1	Si ambos valores son desconocidos. Si un valor es conocido y el otro desconocido (Surma y Vanhoof) [16]

Tabla 2.1. Diversos criterios para manejar valores frecuentes de atributos, x, y representan el valor lógico del mismo atributo de dos casos distintos.

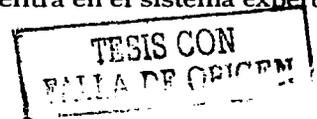
La efectividad de la medida de la similitud depende en gran medida de una buena asignación de pesos a los atributos. Dado que asignar pesos es una tarea compleja para el experto humano, se utilizan métodos basados en la estadística.

e) Módulo de explicación

Permite justificar y explicar el análisis completo del problema y las soluciones propuestas, así como las semejanzas o diferencias entre dicha solución y las de los casos históricos. El módulo de explicación debe ser diseñado prácticamente por el experto, pues él sabe cuál es la mejor manera de presentar la solución de un problema. Las pantallas de explicación deben tener tal cantidad de información que ni sea tan pobre ni tan abundante para dificultar la comprensión de la solución por parte del usuario final.

2.4 Primera estructura propuesta

Como una primera aproximación para organizar el conocimiento, se tomó el esquema del visor de la base de casos (Fig. 2.3) que se encuentra en el sistema experto



para análisis de falla de la UDIATEM, y se organizó una parte en forma de árboles y otra en forma de marcos (Figuras 2.4-a, b, c, d, e) Esta estructura brinda información sobre la pieza que falló y el material, además de una descripción de la falla, sin embargo la información presentada es insuficiente para clasificar el vasto rango de atributos que puede tener un problema de análisis de falla, por lo que se consideró conveniente expandirla. Un ejemplo de las carencias, es que faltan características de la superficie de fractura, como la presencia de marcas de playa.

Se procedió a registrar la información de casos históricos extraídos de diversas fuentes. Se concluyó que era preciso agregar más información para que el usuario pudiera caracterizar un caso, razón por la cual se decidió buscar otra estructura.

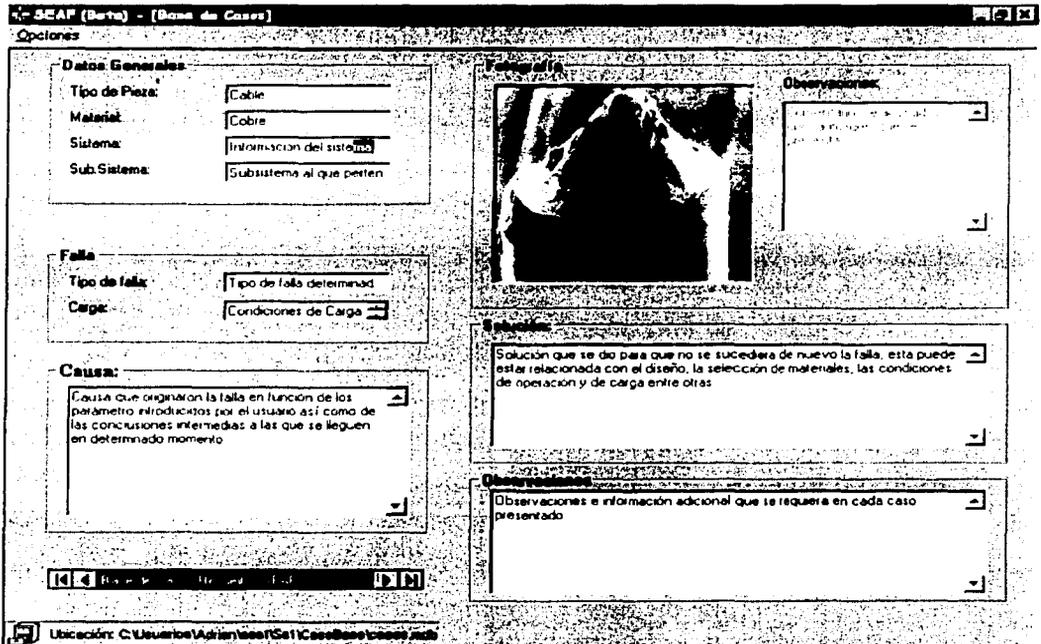


Figura 2.3. Visor de la base de casos del sistema experto de UDIATEM

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

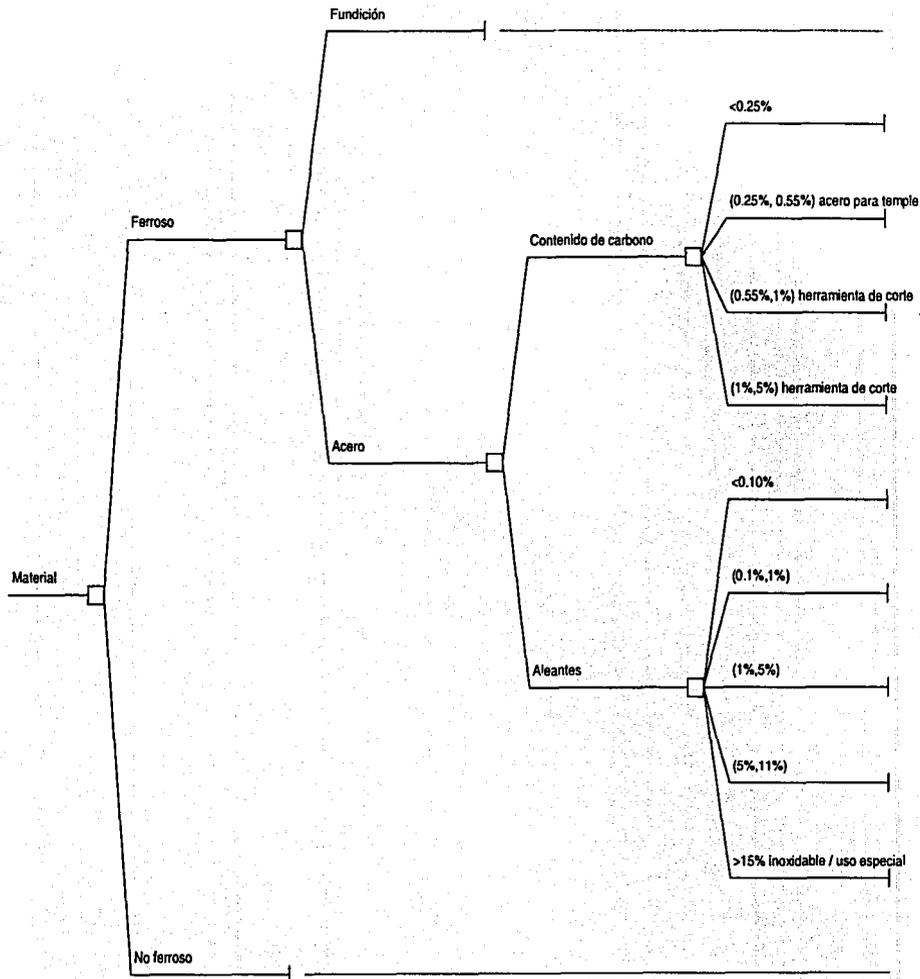


Figura 2.4-a. Estructura basada en el visor de casos del sistema experto. Corresponde al material.

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

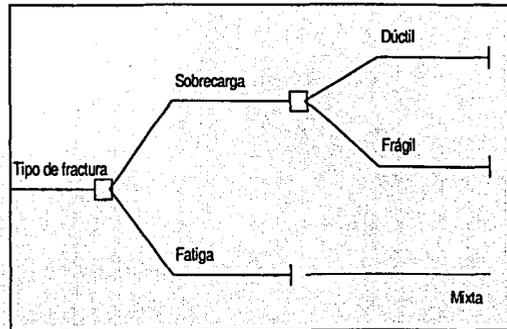


Figura 2.4-b. Estructura basada en el visor de casos del sistema experto. Corresponde al tipo de fractura.

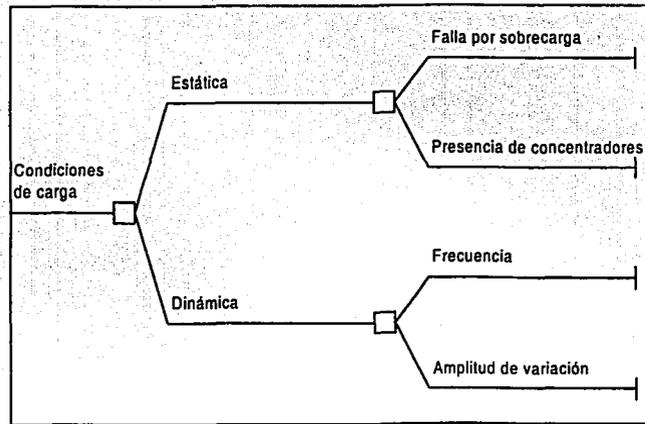


Figura 2.4-c. Estructura basada en el visor de casos del sistema experto. Corresponde a las condiciones de carga

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

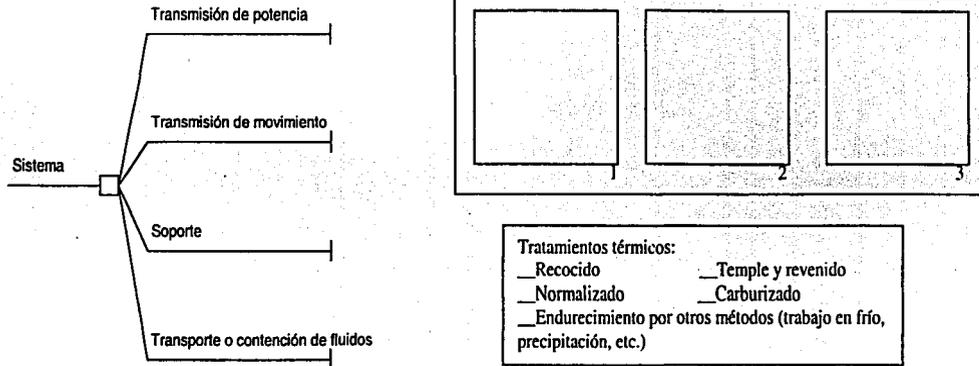


Figura 2.4-d. Izquierda: Árbol para los tipos de sistema a los que puede pertenecer un elemento metálico. Derecha arriba: Cuadros de imágenes, contiene una imagen del aspecto general de la falla (1), una imagen del aspecto microscópico de la falla (2) y una del patrón de falla (3) Derecha abajo: marco para tratamientos térmicos.

Acidez / Alcalinidad
Temperatura
Presencia de productos de corrosión

Análisis del caso

Resolución y notas.

Figura 2.4-e. Cuadros de texto. Izquierda: para la influencia del medio ambiente. Centro: para el análisis de las evidencias. Derecha: para la resolución del caso y notas adicionales.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

2.5 Segunda estructura propuesta

Se tomó como complemento lo propuesto por Das [3], que es una clasificación sobre los mecanismos de falla principales y sus variantes (tabla 2.2), el siguiente paso fue extraer los atributos que caracterizan a los distintos mecanismos, estos serán identificados también como "conceptos clave".

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.

Tabla 2.2. Los distintos mecanismos de falla con sus variantes, según A. K. Das

Las tablas 2.3-a, b, c, d, e exhiben los mecanismos y sus características, estas tablas son resultado de la clasificación de mecanismos de falla y de la caracterización de los mismos, es importante mencionar que de manera adicional a lo propuesto por Das, se ha tomado en cuenta lo establecido por otros autores [1, 8]

En esta fase, fue cuando se tuvo la mayor necesidad de consultar al experto, ya que los diversos autores pueden expresar el mismo concepto utilizando distintos términos; además de que los materiales consultados incluyen imágenes de la pieza que falló, las cuales muestran evidencias de los mecanismos de falla, éstas debieron ser interpretadas por el experto.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

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

Tabla 2.3-a. Lista de los mecanismos de falla particulares dentro de la sobrecarga, con sus características distintivas

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

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

Tabla 2.3-b. Lista de los mecanismos de falla particulares dentro de la fatiga, con sus características distintivas

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

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

Tabla 2.3-c. Lista de los mecanismos de falla particulares dentro de la corrosión, con sus características distintivas

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

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

Tabla 2.3-d. Lista de los mecanismos de falla particulares dentro del desgaste, con sus características distintivas

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 2.3-e. Atributos de las fallas por fluencia. Das no señala variantes de este mecanismo.

**TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN**

Selección de casos

Se consultó el Manual ASM de análisis de falla (*ASM Handbook of failure analysis*) [5] y se seleccionaron para su estudio 30 casos. Se elaboraron diagramas de Ishikawa (Fig. 2.5) donde se vació la información de los casos. Se definieron seis ramas para cada diagrama, fue así como se obtuvieron los conceptos clave explícitamente presentes o ausentes en cada caso.

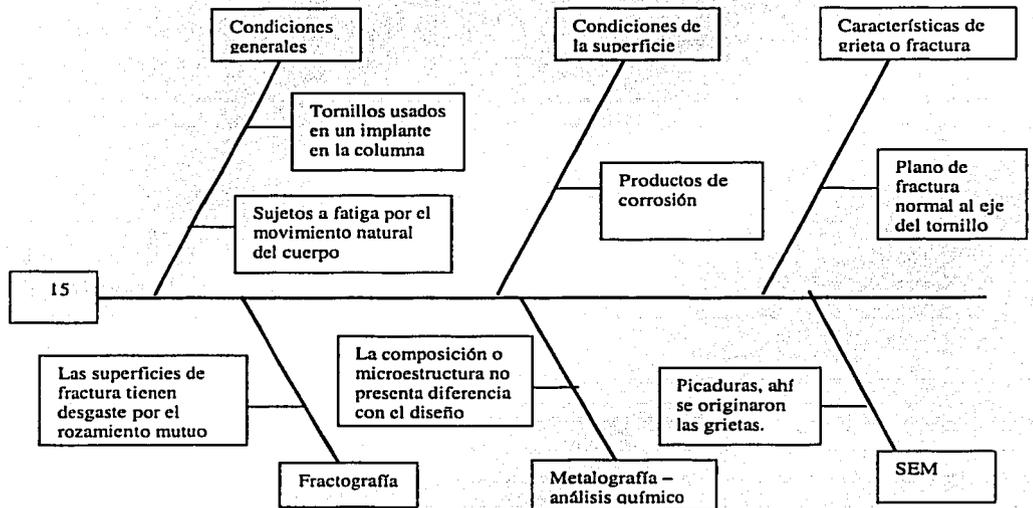


Fig. 2.5. Ejemplo de uno de los diagramas de Ishikawa

Para una comprensión más profunda del razonamiento seguido por los analistas, se elaboraron mapas de conocimiento para los casos, un ejemplo se muestra en la figura 2.6, el cual corresponde al caso para el cual se dibujó el diagrama mostrado en la figura 2.5.

Luego de elaborar los diagramas y los mapas para los 30 casos, se notó que muchos de los conceptos de la literatura coincidían con los enunciados en las tablas 2.3-a, b, c, d, e. Debido a esto, las tablas sirvieron como una estructura apta (pero perfectible) para estructurar el conocimiento de análisis de falla.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

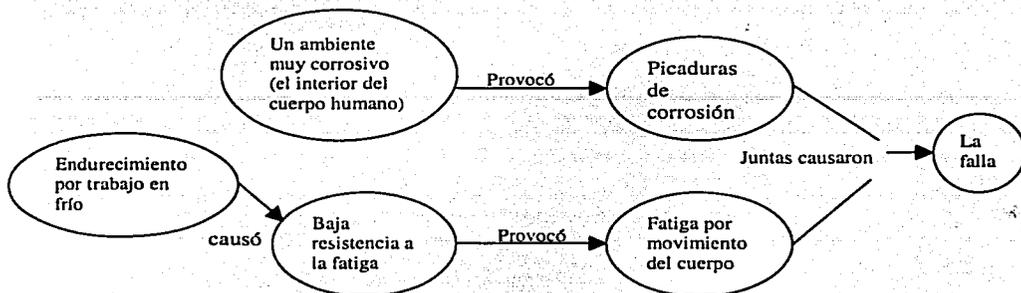


Figura 2.6. Mapa de conocimiento de cómo ocurrió la falla en el caso de "Fractura por fatiga de tornillos de acero inoxidable 316L usados para implantes quirúrgicos"

2.6 Estructura de organización

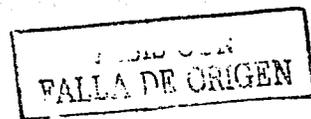
Se examinaron las estructuras de información propuestas por diversos autores [3, 4, 5, 8] Con base en esta revisión, se generó una estructura definitiva al completar y depurar los criterios desarrollados en las tablas 2.3-a, b, c, d, e. Las tablas 2.4 y 2.5 muestran esta nueva estructura. La tabla 2.5 corresponde al desglose de la región sombreada en la tabla 2.4.

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, estos últimos son los que toman valores lógicos.

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

Problema	Título y número de caso	
	Clases	Ejemplos de los atributos
Problema	Llaves primarias	Marcas de playa, atmósfera marítima
	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	

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Tabla 2.4. Estructura definitiva de un caso para el sistema RBC.

Atributo
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

Continúa en la página siguiente

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

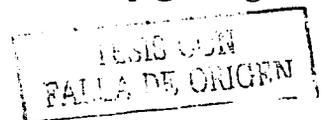
Presencia de sustancias agresivas (muy ácidas o alcalinas) u oxidantes
Atmósfera marítima
Sólo se han detectado grietas, no hay fractura
Se hizo reparación, se sustituyó material o se rediseñó la pieza
CLASE: INFORMACIÓN DEL MATERIAL
Ferroso
No ferroso
SOLO SI ES FERROSO
Fundición
Acero
CONTENIDO DE 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
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

Continúa en la página siguiente

TRABAJO CON
FALLA DE ORIGEN

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 recubrimiento
Patrón de anillos concéntricos
Picaduras
El fondo de las picaduras es el origen de la grieta.
Fractura intercrystalina
Fractura transcrystalina
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
CLASE: METALOGRAFIA / 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

Continúa en la página siguiente



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
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)

Tabla 2.5. Lista de atributos, corresponde al desglose de la región sombreada en la tabla 2.4.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 3:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

3.1 Introducción

Este capítulo consta de dos secciones: el diseño y la construcción del sistema. El diseño comprendió tres fases: determinación y aplicación de un modelo de desarrollo de software, construcción de la estructura de conocimiento y elaboración del diagrama de flujo del sistema. La estructura ya fue tratada en el capítulo 2.

Una vez que se diseñó el sistema, se inició la construcción. Se comenzó con la base de conocimientos, después se asignaron pesos a los atributos para poder desarrollar las medidas de relevancia. Luego, se construyó la biblioteca de índices y por último, la interfase de usuario y el módulo de explicación. La interfase de usuario no es un elemento exclusivo de los sistemas RBC, razón por la cual no fue mencionada en el punto 2.3, sin embargo, sí es un elemento imprescindible en cualquier sistema de computación. El último punto de este capítulo fue la validación de los algoritmos de búsqueda.

3.2 Modelo para el desarrollo del sistema

Es importante contar con un esquema o modelo para desarrollar el sistema, debido a que describe los pasos necesarios para la construcción y expansión del software. A continuación se explica la determinación y aplicación del modelo.

a) Determinación del modelo.

Se analizaron varios modelos de desarrollo de software (tratados por Pressman en [9]) para elegir el mejor. Algunos de esos modelos son:

- ◆ Modelo lineal secuencial
- ◆ Modelo de construcción de prototipos
- ◆ Modelo DRA (desarrollo rápido de aplicaciones)
- ◆ Modelo incremental
- ◆ Modelo en espiral
- ◆ Modelo de ensamblaje de componentes

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El sistema RBC construido pertenece a un proyecto de la UDIATEM. Debido a la forma de trabajo que existe en este grupo de investigación, es altamente probable que el sistema sea expandido por distintas personas. Por este motivo, fue conveniente elegir un modelo donde cada mejora que se haga al software, represente un punto de partida nuevo. El modelo que mejor se adapta a esta necesidad, es el de espiral (figura 3.1) En este modelo, el software se desarrolla en varias versiones incrementales. En las primeras iteraciones, la versión puede ser un esquema en papel. En las últimas iteraciones, las versiones son cada vez más funcionales.

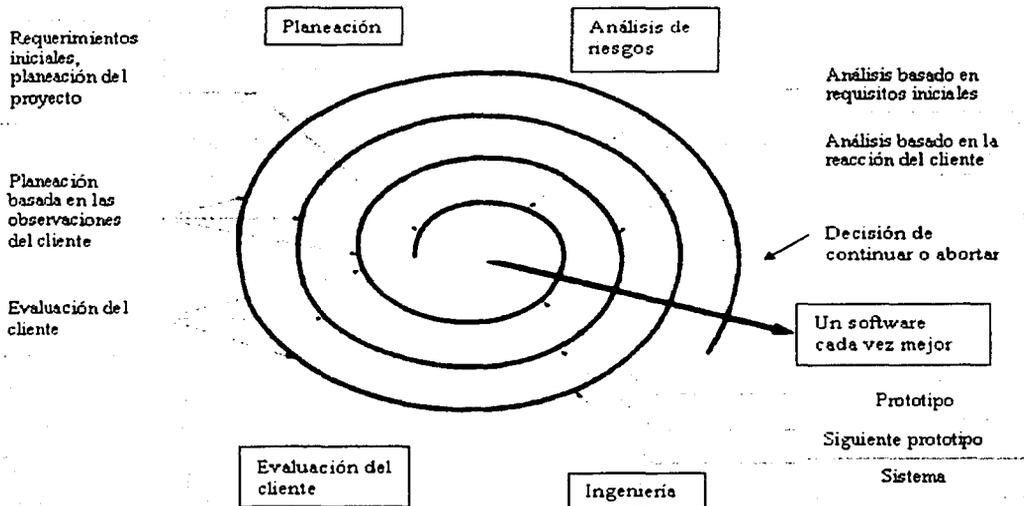


Figura 3.1. Modelo en espiral para el desarrollo de software.

b) Aplicación del modelo

En esta primera versión, se ha aplicado el modelo de la manera siguiente:

1) **Planeación:** Se definió con ayuda del experto, el aspecto de la interfase de usuario y el funcionamiento del sistema. Se definieron los recursos para el desarrollo del sistema, especialmente el software y el material bibliográfico para la construcción. Debido a que el sistema experto de UDIATEM fue desarrollado en la plataforma de Visual Basic, el sistema RBC se construyó en este lenguaje. Para el

TRABAJA CON FALLA DE ORIGEN

manejo de las tablas de la base de conocimientos, se usó Microsoft Access, ya que es compatible con este ambiente de programación. El programa Microsoft Photo Editor fue utilizado para el manejo de imágenes. El material bibliográfico consistió en dos manuales del lenguaje Visual Basic [2, 6], los cuales fueron elegidos por manejar un lenguaje sencillo y por tratar temas de alta afinidad con el sistema desarrollado.

2) Análisis de riesgos: El riesgo más importante era desarrollar el sistema con base en una estructura de organización del conocimiento errónea, este riesgo se ha minimizado a través de las entrevistas con el experto.

3) Ingeniería: Se construyó un primer prototipo que contiene 30 casos históricos. A la etapa de Ingeniería corresponden los puntos 3.4 a 3.10. Las pruebas de funcionamiento quedan incluidas en esta etapa.

4) Evaluación del cliente: Aunque el experto no será el cliente final, cuenta con conocimientos que le permiten determinar las necesidades del cliente. Una vez terminado el sistema, se pidió al experto autorización para dar por terminada la primera versión. Cabe mencionar que el experto supervisó todo el proceso de desarrollo.

3.3 Diagrama de flujo.

El diagrama de flujo (Fig. 3.2) explica paso a paso la operación del sistema.

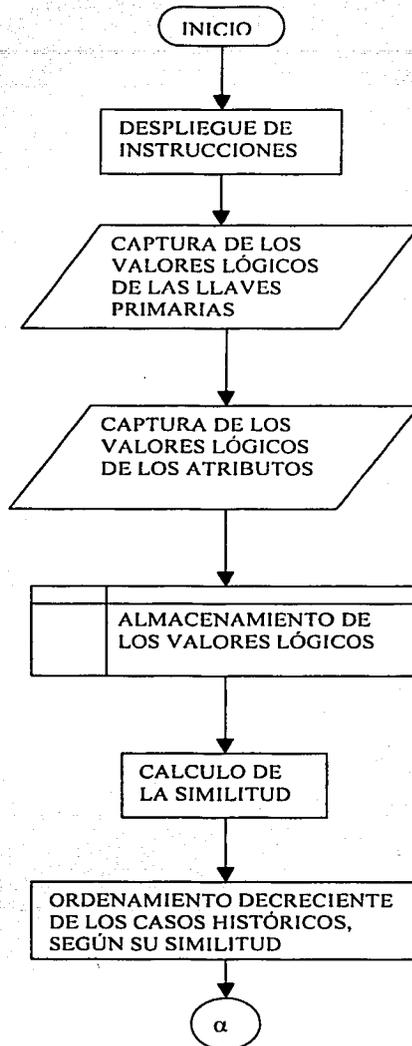


Figura 3.2. Continúa en la página siguiente

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

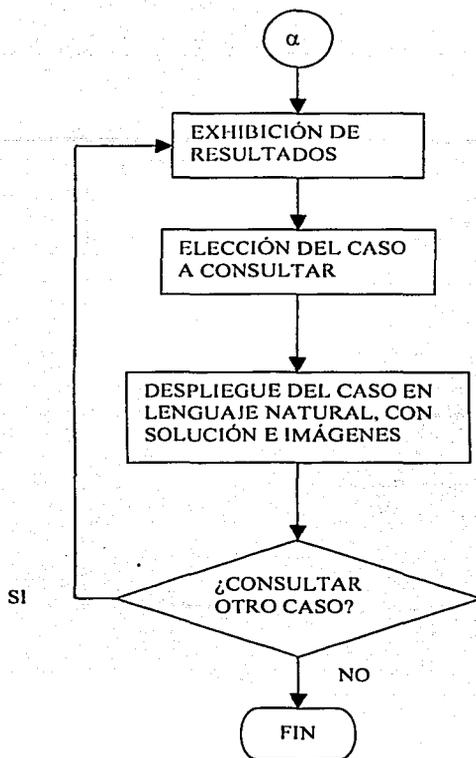


Figura 3.2. Diagrama de flujo

3.4 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 2.5 y 2.6 de la estructura de organización (punto 2.5). La tabla que reúne los valores lógicos de los

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

atributos corresponde con la tabla 2.6. Los archivos de texto contienen la descripción, la discusión, las causas más probables y las acciones correctivas, además del título del caso.

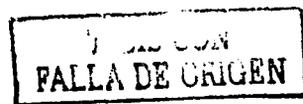
Para construir la tabla de valores lógicos, se elaboraron formatos. En esos formatos se encuentran los atributos de la tabla 2.6 clasificados de acuerdo al mecanismo de falla, esta clasificación se hizo para facilitar la obtención de valores lógicos. Estos valores sirven para calcular la distancia entre los atributos de distintos casos.

Los valores lógicos son 1 (atributo presente), -1 (atributo ausente) ó 0, lo que quiere decir que con la información del caso, no es posible precisar si el atributo está presente o ausente. En la tabla 3.1, aparece un fragmento de un formato utilizado para algunos atributos de los casos 21 a 25. Como un ejemplo de uso de estos formatos, en el caso 25, no existen cuellos (-1) Si una casilla está vacía, es porque podría tener un valor de 0.

25	24	23	22	21	←Número de caso
VALOR LÓGICO					ATRIBUTOS
SOBRECARGA EN TENSIÓN DÚCTIL					
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 TENSIÓN 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

Tabla 3.1. Fragmento de un formato de captura de datos.

Para llenar las casillas vacías, se hizo una nueva revisión de los casos, y se decidió cuáles de los atributos poseían un valor lógico de 0. Esta tarea requirió una lectura minuciosa de los casos, además de la consulta de teoría sobre análisis de falla en varias fuentes [1, 3]



Cuando ya estaban determinados todos los valores de atributos para los casos históricos, se creó un archivo de Microsoft Access donde se colocaron los atributos de la tabla 2.6 y los valores lógicos para los 30 casos. La tabla 3.2 muestra un fragmento de ese archivo, para algunos de los atributos de la clase “Esteroscopio / Microscopio óptico”.

ATRIBUTO	Número de caso→					
	10	11	12	13	14	15
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 3.2. Fragmento de la tabla de atributos.

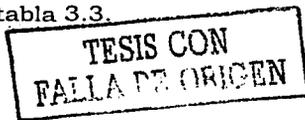
3.5 Ponderación de atributos

La primera aproximación para asignar la ponderación, fue examinar caso por caso cuales atributos habían sido los más importantes y asignarles un peso superior al de los demás atributos, pero esto arrojaba resultados particulares que no se podían utilizar para todos los casos.

Se realizó entonces otro ciclo de entrevistas con el experto. La entrevista consistía en enunciar cuáles son los signos para distinguir una variante de mecanismo de falla de otra, 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, con apoyo del experto, se construyó la tabla 3.3.



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

Tabla 3.3. Peso de los distintos atributos.

En la tabla 3.4, se muestran los pesos de los atributos (sin incluir las llaves primarias) Es altamente importante señalar que los pesos obtenidos no son definitivos, y conforme la base de casos crezca, será imperativo revisarlos.

Atributo	Peso
CLASE: LLAVES PRIMARIAS	
La superficie de fractura tiene dos zonas con rugosidad distinta	
Hay pérdida de masa y habla 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	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

Continúa en la página siguiente.

ELEMENTOS ALEANTÉS 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

Continúa en la página siguiente.

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	
Estrías / marcas de chevron	2
Patrón de agrietamiento de río	2
La corrosión está en las capas de recubrimientos	1
Patrón de anillos concéntricos	2
Picaduras	3
El fondo de las picaduras es el origen de la grieta.	3
Fractura intercristalina	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 central 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
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

Continúa en la página siguiente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

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
Vacios de fluencia en la frontera de grano cerca de la fractura	1
Corrosión en grietas (crevice)	2

Tabla 3.4. Lista de atributos con peso.

3.6 Medidas de relevancia

Una vez determinados los pesos, es posible desarrollar las medidas de relevancia. El tipo de medida que se utilizó es el de vecino más cercano, donde el sistema 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 pesos de la tabla 3.4 y los valores de distancia de la tabla 3.5; esta tabla fue elaborada con base en las medidas de distancia propuestas por T. W. Liao [13]; en el manejo del valor “desconocido”, se ha utilizado la teoría de Ricci y Avesani [14]

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:

$$SIM(X, Y) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n w_i * dist(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \dots \text{Ec. 3.1}$$

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.

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

Tabla 3.5. Criterios para medir la distancia entre valores de atributos. x , y representan valores del mismo atributo para dos casos diferentes.

Posteriormente se empleó la similitud euclidiana:

$$SIM(X, Y) = 1 - \sqrt{\sum (w_i^2 * dist(x_i, y_i)^2)} \dots \text{Ec. 2.2}$$

Pero al comparar los resultados obtenidos con la ecuación 3.1 y la ecuación 2.2, se observó que la similitud tomada con la ecuación 3.1 tenía una diferencia enorme con respecto a la similitud de Hamming, la tabla 3.6 muestra un ejemplo. Dado que la similitud de Hamming se basa en un concepto bien conocido (la media ponderada), y por ende, tiene mayor confiabilidad, se descartó el uso de la ecuación 2.2.

3.7 Biblioteca de índices

Los conceptos clave llamados "llaves primarias" de este sistema deben tener un peso mayor que los demás atributos, pues sirven como un mecanismo de indexación. Estas llaves primarias son proposiciones que el usuario debe afirmar o negar con la mayor certeza, ya que por el momento, funcionan como un prototipo de índice, influenciando altamente la medida de similitud. Su fundamento es el método de indexación basada en matrices y vectores de conocimiento. Los pesos para las llaves primarias se obtuvieron hasta que el sistema estaba en operación.

Para obtener los pesos, se siguieron tres pasos: establecimiento de requisitos, método analítico y solución final. El establecimiento de requisitos consistió en



determinar las características que debían cumplir los pesos, de aquí se concluyó que era necesario hallar un valor óptimo. Como un método para obtener el valor óptimo de los pesos, se aplicó el cálculo diferencial, expresando la similitud de un caso histórico con un nuevo caso, como una función de los pesos de las llaves. Dado que el cálculo no brindó los resultados esperados, se buscó una solución analizando el comportamiento de los valores de similitud en función de los pesos de las llaves. La solución final no es un valor óptimo.

CASO	SIM. EUC.	CASO	SIM. HAM.
23	0.3161	23	0.6855
6	0.2691	6	0.6582
11	0.2631	5	0.6523
24	0.2605	24	0.6523
17	0.2598	2	0.6504
2	0.2326	11	0.6445
5	0.2307	9	0.6328
9	0.2231	17	0.5801
10	0.2188	10	0.5645
20	0.1899	4	0.5625
21	0.1899	22	0.5605
27	0.1869	27	0.5605
1	0.1797	20	0.5586
16	0.1797	21	0.5547
22	0.1551	1	0.5488
4	0.1545	16	0.5488
25	0.1419	3	0.5313
3	0.1205	8	0.5273
12	0.1112	12	0.5254
19	0.1068	13	0.5254
18	0.1040	25	0.5234
8	0.0911	29	0.5195
13	0.0809	19	0.5176
29	0.0772	18	0.5078
7	0.0746	7	0.5020
14	0.0724	14	0.5020
15	0.0724	15	0.5020
26	0.0698	26	0.4922
30	0.0439	30	0.4922
28	0.0059	28	0.4648

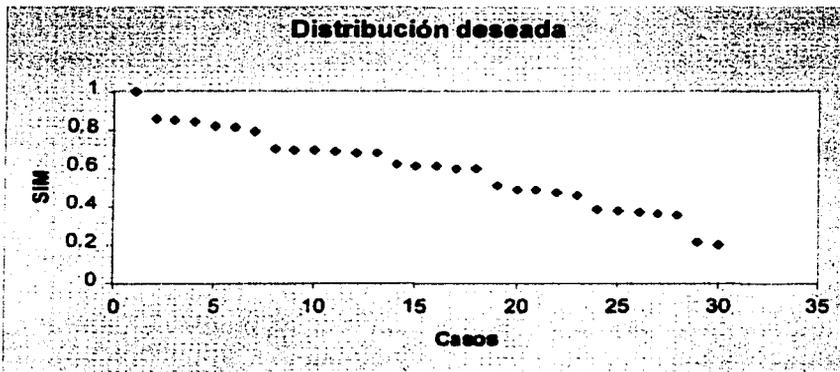
Tabla 3.6. Se puede observar que hay una diferencia notable entre las similitudes calculadas con dos fórmulas distintas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1) Establecimiento de requisitos.

Se determinó que las llaves primarias tendrían un peso adecuado cuando se pudiera observar un patrón, donde los casos históricos con el mismo mecanismo de falla, tengan una similitud parecida y se puedan distinguir varios grupos de casos (gráfica 3.1), cada grupo debe corresponder con un mecanismo. Se determinó también que ese peso no debe ser tan alto que provoque que la influencia de los demás atributos desaparezca.

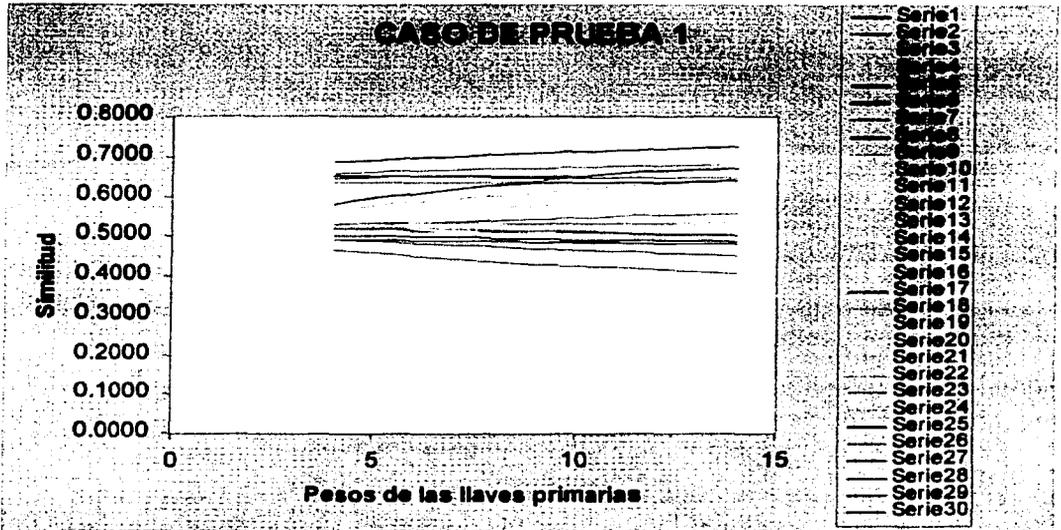
El peso de las llaves debe ser un número entero (Kolodner en [7]) y para este sistema, debe ser mayor a 3, es decir, mayor que el máximo de los pesos de los atributos, para que sirva como índice.



Gráfica 3.1. Distribución ideal de los casos midiendo su similitud con el caso en estudio. El valor de SIM=1 indica que habrá un caso 100% similar al caso en estudio.

2) Métodos analíticos.

Se realizaron pruebas con un caso nuevo manteniendo constantes todos los valores lógicos y pesos de los atributos, exceptuando los pesos de las llaves primarias, y se obtuvo la gráfica 3.2. De esta gráfica se desprende que la similitud va aumentando en algunos casos y disminuyendo en otros junto con el peso de las llaves primarias; también se infiere que no se hallará un punto donde la similitud sea máxima o mínima para todos los casos (sólo el infinito), debido a las tendencias. Por esta razón se estudió la función de similitud y se analizó la posibilidad de hallar puntos críticos utilizando el cálculo diferencial.



Gráfica 3.2. Similitud al aumentar los pesos de las llaves primarias, se compararon los 30 casos históricos utilizando un caso de prueba distinto.

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

$$SIM(X, Y) = 1 - \frac{\sum \alpha_i W_{li} + \sum \beta_i W_{ati}}{11W_{li} + \sum W_{ati}} \dots Ec. 3.2$$

Y también se puede escribir como:

$$SIM(X, Y) = 1 - \frac{\sum \alpha_i W_{li}}{11W_{li} + \sum W_{ati}} - \frac{\sum \beta_i W_{ati}}{11W_{li} + \sum W_{ati}} \dots Ec. 3.3$$

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

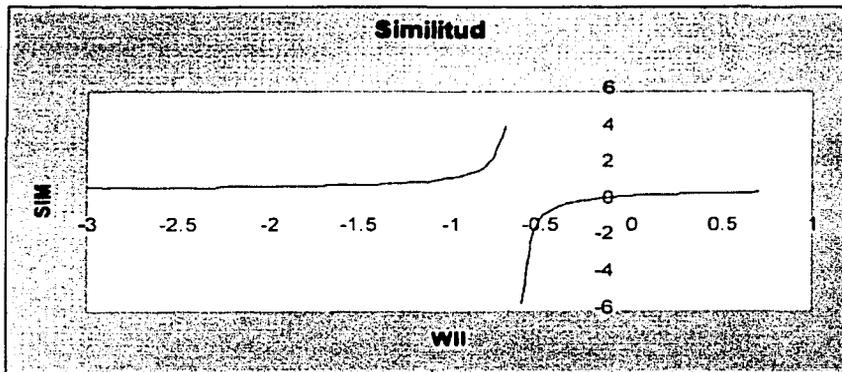
β_i son los valores de distancia que existen al comparar los atributos distintos a las llaves.



Para escribir la ecuación de similitud sólo en función del peso de las llaves primarias, se deben realizar manejos con los términos. La suma de α_i es una cantidad constante y lo mismo sucede para la suma de W_{ati} y para la de $\beta_i W_{ati}$. Con base en lo anterior y haciendo cambios de notación ($A = \sum \alpha_i$, $B = \sum W_{ati}$, $C = \sum \beta_i W_{ati}$) para expresar las constantes, se tiene la expresión:

$$SIM(X, Y) = 1 - \left(\frac{AWII + C}{11WII + B} \right) \dots \text{Ec. 3.4}$$

Esta función es una hipérbola, con sus ejes principales rotados con respecto a los ejes X-Y, su centro geométrico no se encuentra en el origen. Una representación de una función de este tipo se halla en la gráfica 3.3.



Gráfica 3.3. La gráfica de una función perteneciente a la familia de las funciones de similitud.

Al obtener la derivada de la función de similitud con respecto a los pesos de las llaves primarias (Ec. 3.5), se notó que no era posible obtener puntos críticos a partir de ésta.

$$\frac{dSIM(X, Y)}{dWII} = \frac{11C - AB}{(11WII + B)^2} \dots \text{Ec. 3.5}$$

El tipo de funciones al cual pertenece la de similitud, tiene un valor de infinito para la variable dependiente, el punto de abscisa correspondiente podría considerarse como aquel que brinda la similitud máxima, y por consiguiente, el peso para las llaves primarias; sin embargo, el valor de abscisa es $WII = (-B/11)$. Este valor es negativo, y

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

dado que no pueden existir pesos negativos en el sistema RBC (Kolodner en [7]), se ha desechado esta alternativa de tipo analítico.

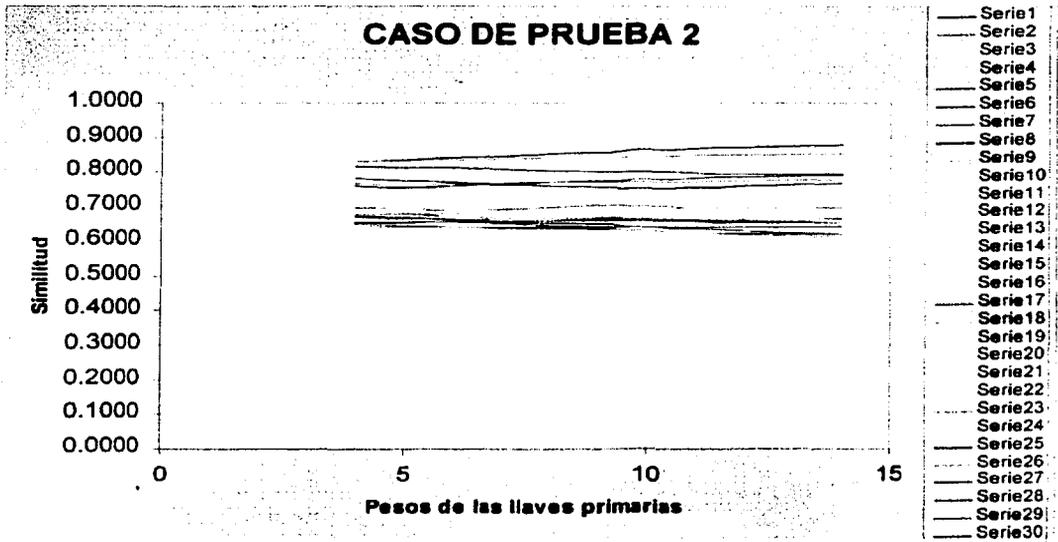
Todas las ecuaciones de similitud que el sistema genere en su operación, tendrán características semejantes, sólo variando en los valores que se consideraron constantes en la ecuación 3.4. Por esta razón, se debe rechazar la obtención del peso de las llaves por métodos analíticos.

3) Solución final

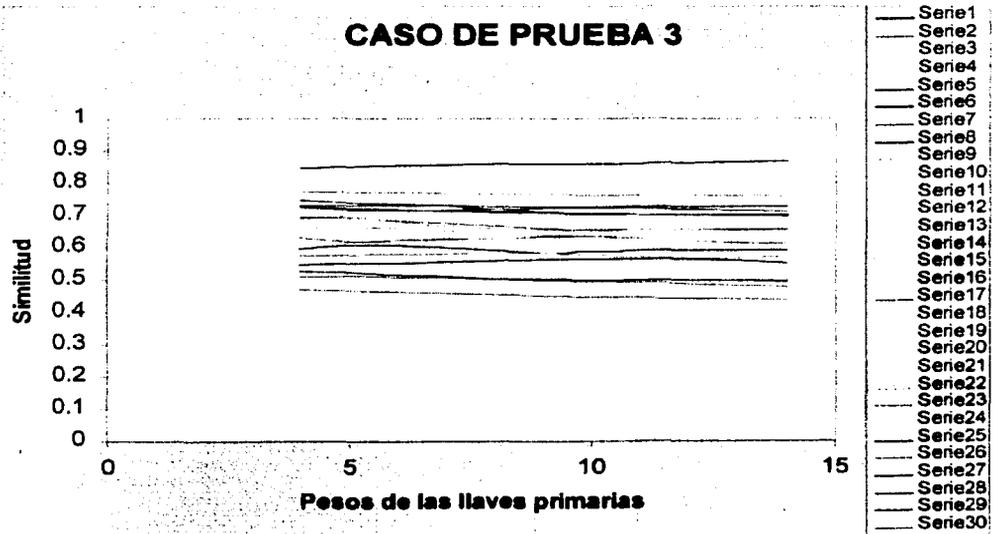
El valor del peso debe cumplir con la condición de ser mayor a 3 y de ser un número entero. En la gráfica 3.2 se observa un comportamiento asintótico: para los casos con alta similitud, el valor máximo se halla en el infinito y para los casos con baja similitud, el mínimo se halla en el infinito.

Se elaboraron gráficas como la 3.2 y se observó cuál es la influencia sobre la distribución de la similitud de los casos, estas gráficas (gráficas 3.4 y 3.5) son de dos casos nuevos extraídos de [5] que se introdujeron al sistema para resolver este problema.

Cuando ya se habían obtenido las gráficas, se procedió al análisis, la observación más importante es que cuando el peso de las llaves primarias es mayor o igual a 10, las similitudes de los casos más parecidos y más distintos se empiezan a acercar a la asíntota. De aquí se puede afirmar que si el peso de las llaves sigue elevándose, llegará un punto donde la similitud prácticamente no varíe. Debido a lo anterior, se puede concluir que el peso de las llaves primarias debe ser mayor o igual a 10.



Gráfica 3.4. Similitud al aumentar los pesos de las llaves primarias, se compararon los 30 casos históricos utilizando un caso de prueba.

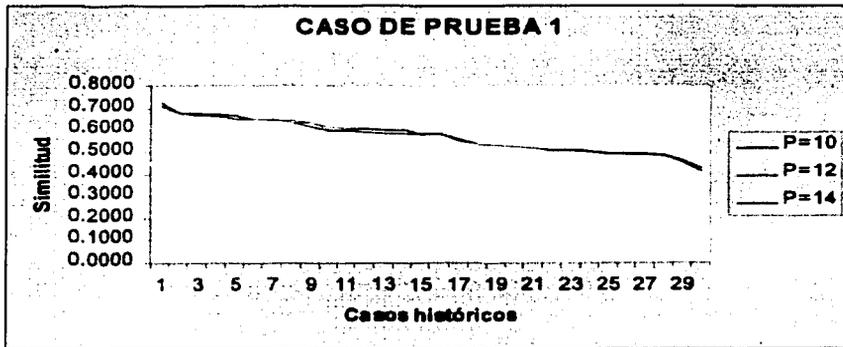


Gráfica 3.5. Similitud al aumentar los pesos de las llaves primarias, se compararon los 30 casos históricos utilizando un caso de prueba.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

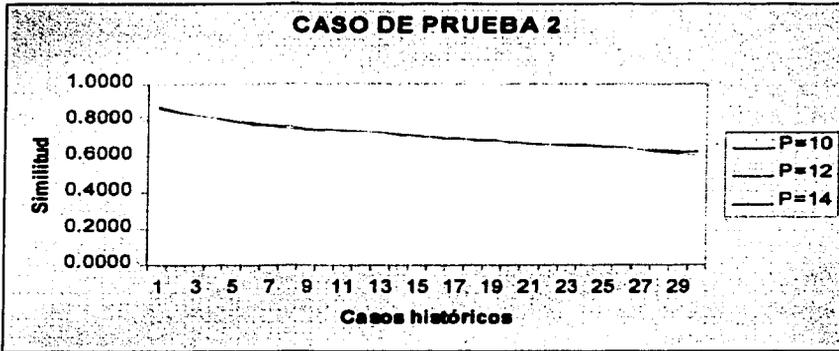
Una vez analizada la manera en cómo cambia la similitud al cambiar el peso, se trazaron las gráficas de similitud con los casos históricos para los tres casos de prueba, dando valores de 10, 12 y 14 al peso de las llaves (gráficas 3.6, 3.7 y 3.8) En las tres gráficas, se puede notar que la similitud no varía de manera significativa al cambiar el peso de las llaves primarias. Ante estas circunstancias, cualquier valor mayor o igual a 10 podía aceptarse como válido. Existe además la condición de que los grupos de casos deben separarse y producir un patrón como el de la gráfica 3.1.

Se llevó esta situación al experto y observando las gráficas 3.6, 3.7 y 3.8, asignó el peso de 12. Dado que la base de casos es pequeña, es difícil comprobar si se cumple la condición de que aparezcan patrones, esta tarea deberá realizarse cuando la base de casos sea expandida.

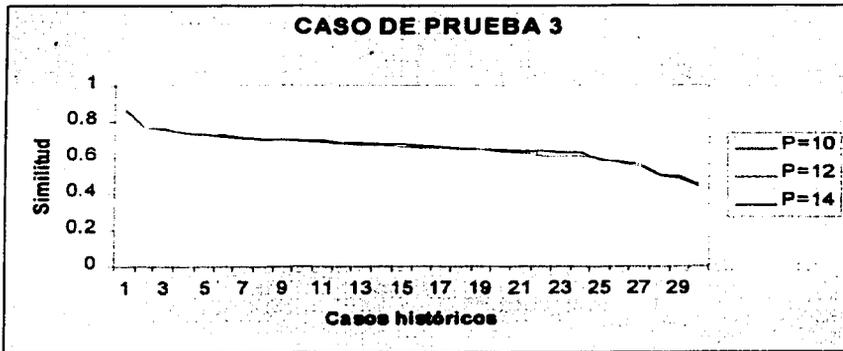


Gráfica 3.6. Similitud al variar los pesos de las llaves primarias. Los casos históricos están ordenados por su similitud (P = peso de las llaves primarias)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Gráfica 3.7. Similitud al variar los pesos de las llaves primarias. Los casos históricos están ordenados por su similitud. (P = peso de las llaves primarias)



Gráfica 3.8. Similitud al variar los pesos de las llaves primarias. Los casos históricos están ordenados por su similitud. (P = peso de las llaves primarias)

3.8 Interfase de usuario

La interfase cuenta con dos tipos de pantallas: las destinadas a capturar la información del usuario y las destinadas a mostrar información y resultados. En la figura 3.4 se muestra una pantalla para captura de datos y en la figura 3.5, se muestra una para exhibir resultados. El diseño de las pantallas se hizo en conjunto con el experto.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las pantallas de captura contienen las clases y atributos de la tabla 2.6. Tienen un pequeño recuadro para que el usuario pueda asignar el valor lógico a cada uno de los atributos. Los atributos son leídos de la base de conocimientos en tiempo de ejecución. Esta característica es conveniente porque basta modificar los atributos que están en la base de conocimientos para cambiar las pantallas de captura.

3.9 Módulo de explicación

El módulo está compuesto por una caja de texto y un conjunto de imágenes (Fig. 3.4) La caja de texto despliega la descripción del caso en lenguaje natural, incluyendo información sobre pruebas destructivas y no destructivas, 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.

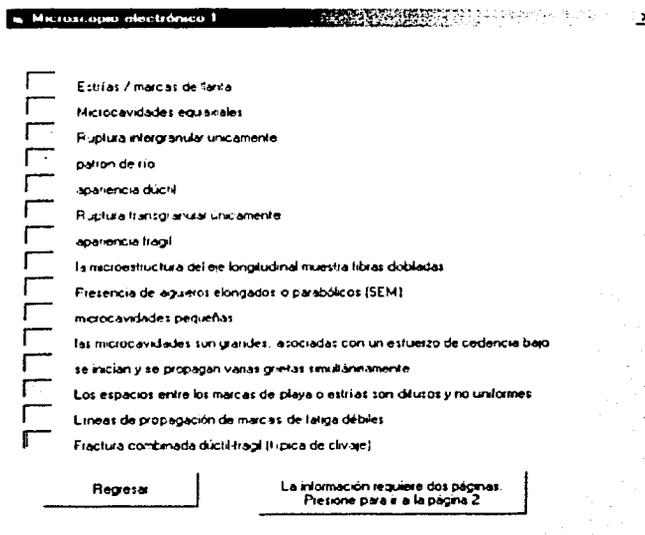


Figura 3.4. Pantalla de captura, corresponde a la clase "análisis SEM" de la tabla 2.6

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

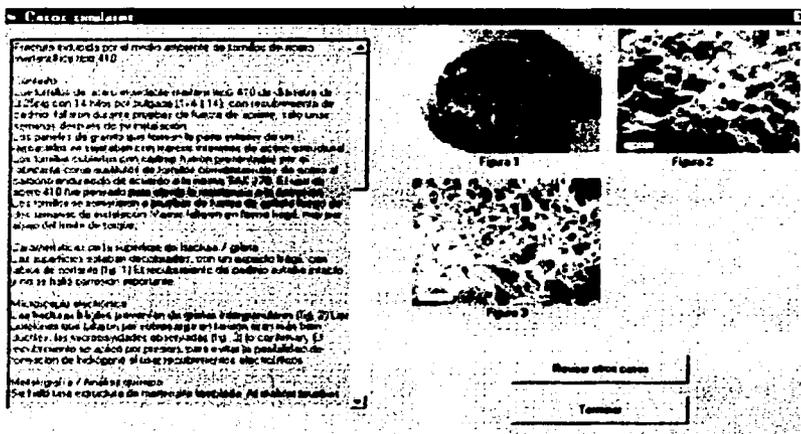


Figura 3.5. Módulo de explicación: ejemplo de pantalla para mostrar resultados.

3.10 Validación de los algoritmos de búsqueda

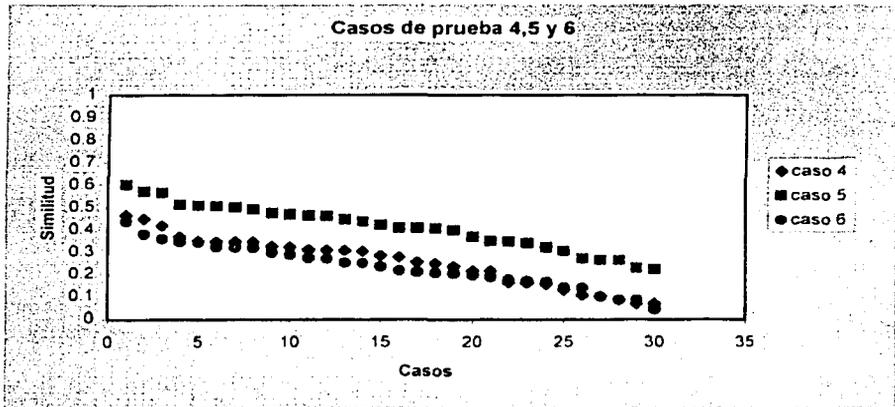
Para la validación, se utilizó el método de Liao enunciado en el punto 1.4, además de probar el sistema con casos diferentes a los históricos.

Las gráficas 3.6, 3.7 y 3.8 fueron generadas introduciendo al sistema casos semejantes a los históricos. Al analizar nuevamente dichas gráficas, se observó que el sistema encuentra casos con elevada similitud; en las gráficas 3.6 y 3.8, la similitud más alta rebasa el valor 0.8.

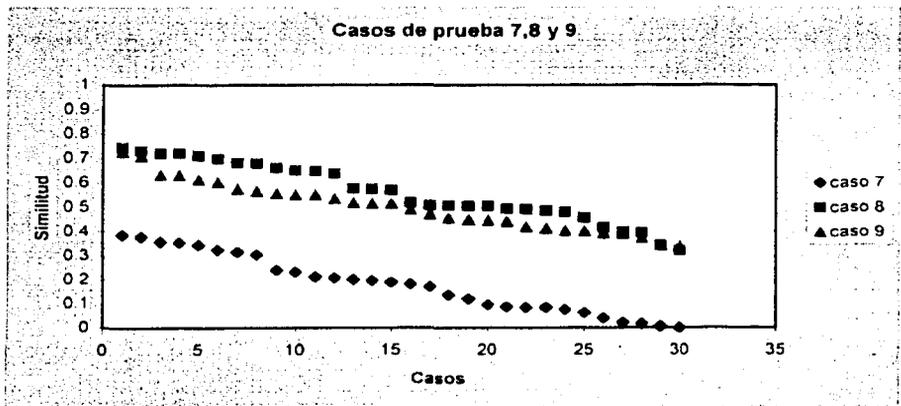
Se utilizaron después casos extraídos de [4, 8] y se trazaron las gráficas 3.9 y 3.10, el peso de las llaves primarias ya se mantuvo en 12.

Al probar el sistema con casos de diversas fuentes, se observa que encuentra casos con similitud alta (en la gráfica 3.10, hay un valor superior a 0.7) y casos con similitud muy baja (en la gráfica 3.10 existe un valor de 0) Esto es normal debido a que la base de casos es pequeña y el sistema no puede encontrar casos semejantes a los de prueba.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



Gráfica 3.9. Similitud de los casos históricos con algunos casos extraídos de [4]



Gráfica 3.10. Similitud de los casos históricos con algunos casos extraídos de [8]

Como el sistema ha obtenido valores altos de similitud para casos semejantes a los históricos y un rango de valores para casos distintos a los históricos, es posible decir que el sistema tiene un funcionamiento apropiado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 4:

OPERACIÓN DEL SISTEMA

4.1 Introducción

En el presente capítulo se describe la forma en que opera el sistema. El orden que siguen las pantallas presentadas es el de ejecución, excepto en las pantallas de las figuras 4.10 a 4.17, donde el usuario tiene libertad de elegir el orden. Para la ejecución se tomó un caso al azar de [5] y se introdujo al sistema, esto con el fin de que el usuario entienda mejor el manejo del sistema.

4.2 Interacción de los componentes.

La interacción de los componentes en el tiempo de ejecución es la siguiente (ver figura 4.1):

- 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 archivos 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.

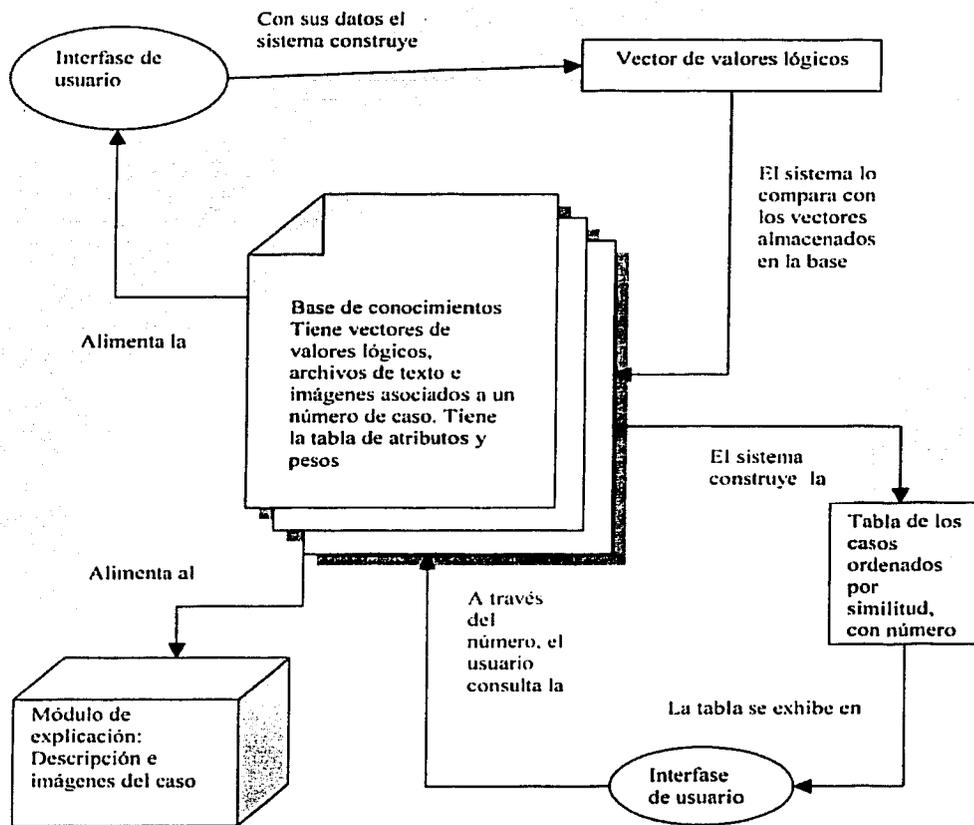


Figura 4.1. Relaciones entre los componentes del sistema.

4.3 El caso de ejemplo

Este caso fue extraído de [5], está escrito en lenguaje natural y contiene varias imágenes. Dado que fue elegido al azar, no se pretende que tenga alta similitud con los casos históricos.

Fractura de una flecha de impulsor de turbina

Contexto

Una flecha de impulsor de turbina falló luego de 2 meses de uso. La flecha 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 4.2 muestra la flecha y el sitio de fractura. La figura 4.3 muestra las superficies de fractura que embonan. El barreno en el centro fue hecho para facilitar la remoción de esta pieza. De la figura 4.3, 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 4.3) Estos sitios de iniciación de fractura están inclinados con respecto a la sección transversal y tienen una superficie helicoidal.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

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 estrias. 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 templada. Se reveló una grieta secundaria, casi adyacente al punto B. La grieta era de tipo helicoidal. Las figuras 3 y 4 muestran 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)

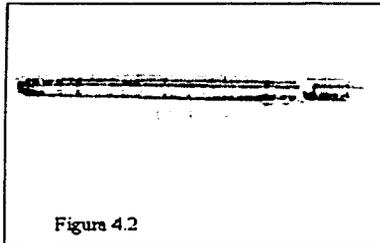


Figura 4.2

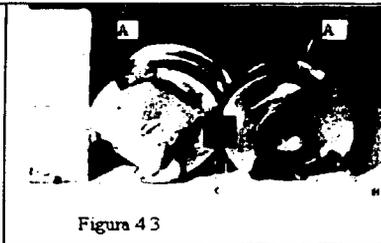


Figura 4.3

Figura 4.2. La flecha fracturada. Figura 4.3. Superficie de fractura. Los puntos A, B y C son los orígenes de grietas.

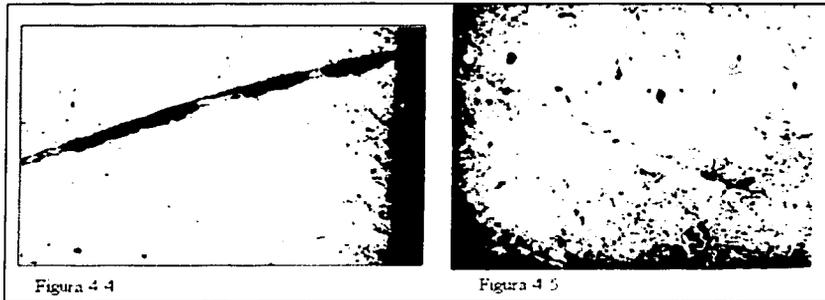


Figura 4.4. Micrografía que muestra una grieta adyacente y paralela a la fractura principal (75x) Figura 4.5. Micrografía de un extremo de la grieta (500x)

Una vez analizado el caso, se procedió a resolverlo a través del sistema. A continuación se muestra la pantalla inicial, las instrucciones y posteriormente, las pantallas para capturar información.

4.4 Pantalla de inicio

La primera pantalla aparece en la figura 4.6.

4.5 Módulo de instrucciones

Las instrucciones (figura 4.7), contienen detalles de operación que conviene saber antes de vaciar información. Las instrucciones (dirigidas al usuario) son:

1) Datos que se pueden introducir.

El sistema acepta tres valores para caracterizar su caso:

1: se tiene una alta seguridad sobre la información aseverada

-1: se tiene una alta seguridad sobre la información negada

0: se tiene duda sobre afirmar o negar algo

Si no se llena alguna casilla, el programa está diseñado para rellenarla con 0.

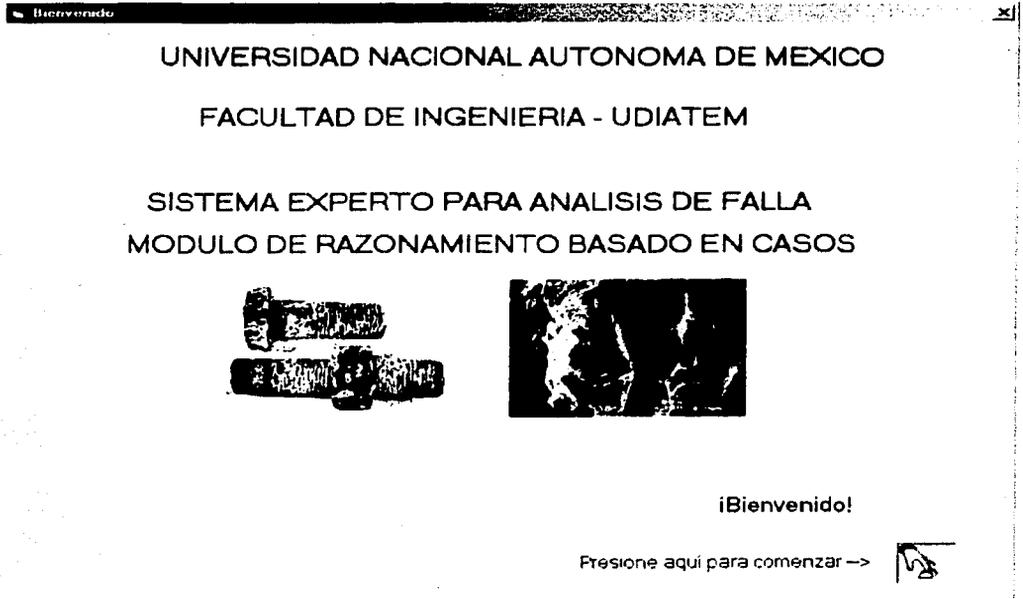


Figura 4.6. Pantalla de inicio

2) Sobre las llaves primarias

La primera pantalla de captura es la de llaves primarias. 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.

3) Clases

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.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

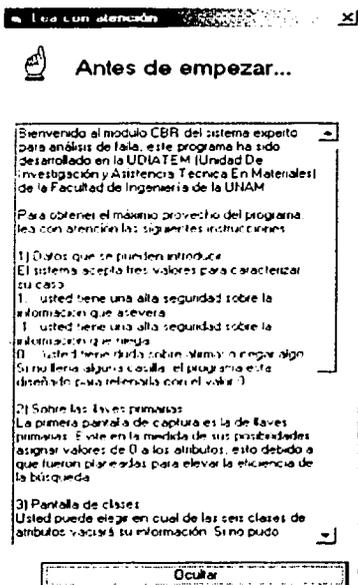


Figura 4.7. Pantalla de instrucciones.

4.6 Llaves primarias

En esta pantalla (Figura 4.8) 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. Para introducir los valores adecuados, se analizó el caso del punto 4.3 de manera detenida.

4.7 Clases

Reciben el nombre de clases los grupos de atributos, esta pantalla permite desplazarse entre clases, así como también ver las instrucciones. Se encuentra aquí un botón para comenzar la búsqueda (Fig. 4.9)

Claves primarias

¿Cómo describiría mejor su caso? Señale todo aquello de lo que esté seguro

- 1 La superficie de fractura tiene dos zonas con rugosidad distinta
- 1 Hay pérdida de masa y había contacto o movimiento relativo
- 1 Se presentan marcas de playa
- 1 La pieza tiene deformación plástica y no se ha roto
- 1 Existen vibraciones y otros signos anormales y la pieza no ha fallado
- 1 Existen óxidos u otros productos de corrosión en la sup. de fractura
- 1 Se operaba con ciclos térmicos
- 1 Presencia de sustancias agresivas (muy ácidas o alcalinas) u oxidantes
- 1 Almóstrata marítima
- 1 Sólo se han detectado grietas, no hay fractura
- 1 Se hizo reparación, se sustituyó material o se rediseñó la pieza

Recuerde. Intente no escribir ceros

Continuar

Figura 4.8. Llaves primarias.

Clases

Información del material

Características de la superficie de fractura

Microscopio / estereoscopio

Metalografía / Análisis químico

Examen con microscopio electrónico

Cancelar

Fulse este botón para iniciar la búsqueda

Ver de nuevo las instrucciones

Figura 4.9. Pantalla de clases.

4.8 Pantallas de captura de valores lógicos.

Son ocho pantallas donde el usuario debe vaciar sus datos, utilizando los valores lógicos -1, 1, 0. La siguiente tabla (tabla 4.1) muestra una relación de las figuras y las pantallas. En este 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

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

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.

Figura	Pantallas
4.10	Información del material – 1
4.11	Información del material – 2
4.12	Características de la superficie de fractura - 1 (simple vista)
4.13	Características de la superficie de fractura - 2 (simple vista)
4.14	Resultados de la observación con microscopio óptico / estereoscopio
4.15	Resultados de la metalografía y análisis químico
4.16	Examen con microscopio electrónico – 1
4.17	Examen con microscopio electrónico – 2

Tabla 4.1. Relación de figuras y pantallas.

Información del material 1

Ferroso / No ferroso

Ferroso

No ferroso

Fundición / Acero

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

Regresar

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

Figura 4.10. Primera pantalla para la información del material.

Información del material x

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 4.11. Segunda pantalla para la información del material.

Características de la superficie de fractura x

<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 peza
<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 destruida sin daño aparente
<input type="checkbox"/> 1	Presencia de libros
<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 crecimiento brillantes y finas

Regresar

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

Figura 4.12. Primera pantalla para la información que se puede obtener a simple vista.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

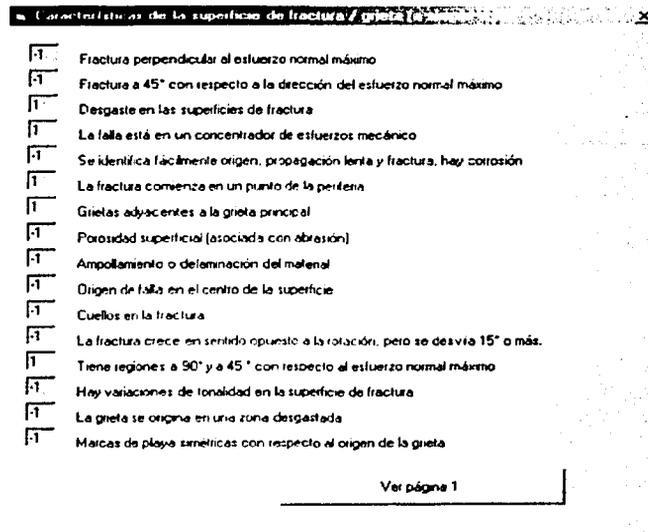


Figura 4.13. Segunda pantalla para la información que se puede obtener a simple vista.

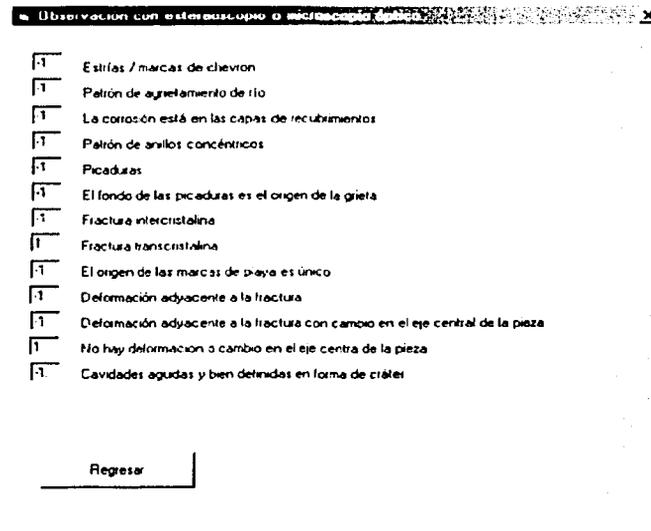


Figura 4.14. Pantalla de observación con microscopio o estereoscopio

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

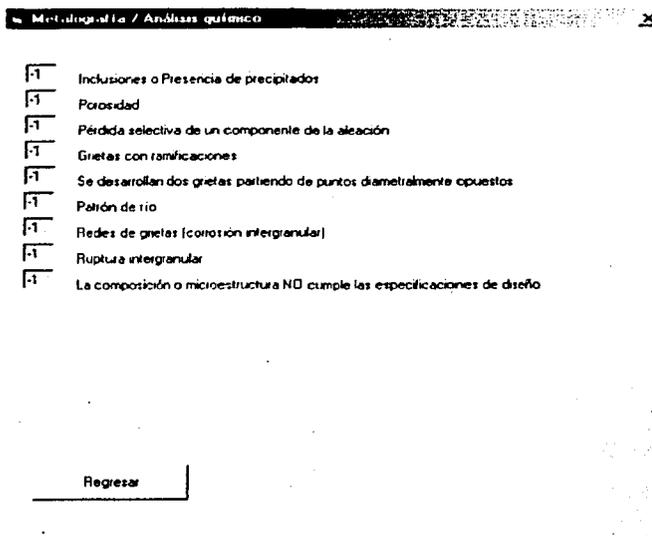


Figura 4.15. Pantalla para los datos obtenidos con una metalografía o aná

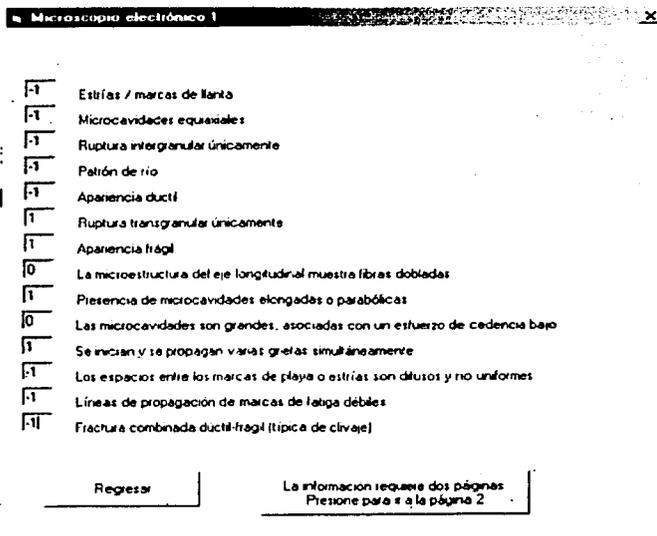


Figura 4.16. Pantalla #1 para el análisis con microscopio electrónico de barrido (SEM)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

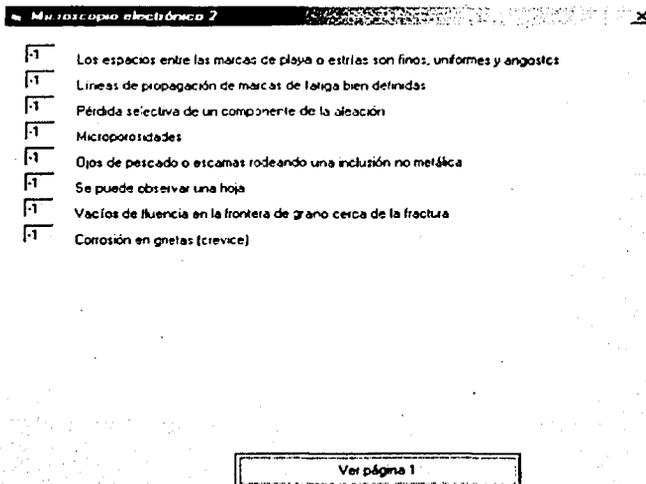


Figura 4.17. Pantalla #2 para el análisis con microscopio electrónico.

4.9 Confirmación.

Una vez que se presiona el botón para iniciar la búsqueda de la pantalla “clases”, aparece el diálogo de la figura 4.18. Al pulsar el botón “SI”, aparece de nuevo la pantalla “clases” para modificar la información del caso. Si se pulsa el otro botón, comienzan las operaciones para medir la similitud.

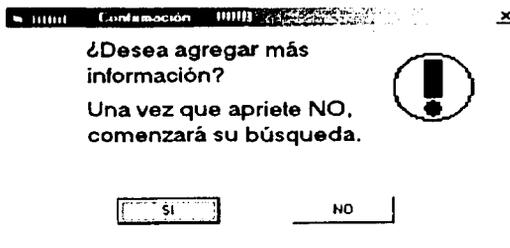


Figura 4.18. Pantalla de confirmación

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

4.10 Medidas de similitud

En esta pantalla se debe apretar el botón “Vaciar datos”, esta orden almacena en una lista la información del usuario (figura 4.19) Después se pulsa el botón “Calcular similitud”, ahora se realiza la búsqueda y luego de unos instantes, se puede observar la pantalla de la figura 4.20.

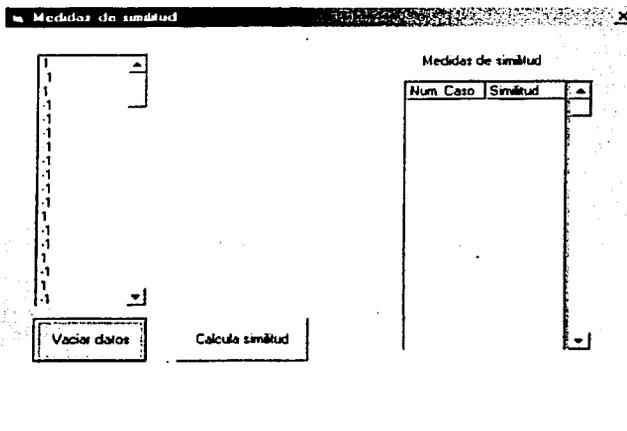


Figura 4.19. Pantalla de medidas de similitud, luego de apretar el botón “vaciar datos”

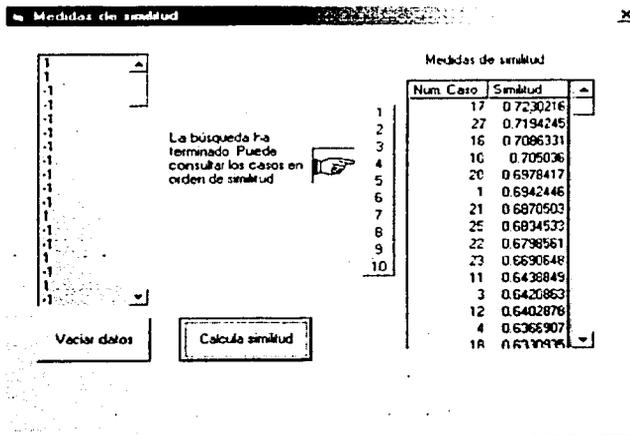


Figura 4.20. Pantalla de medidas de similitud, luego de barrer toda la base de casos, calcular la similitud y ordenar los casos históricos.

En la tabla llamada “medidas de similitud” de la figura 4.20, 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”. En la tabla de la figura 4.20, se observa que el caso más similar al caso en estudio es el número 17, seguido por el número 27. Dado que la similitud de ambos casos es muy parecida, se mostrarán ambos en el punto 4.11.

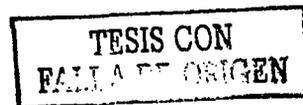
4.11 Casos similares

Esta pantalla (Figura 4.21) tiene 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, un botón para continuar examinando los casos más similares (al accionarlo aparece la pantalla de la figura 4.20) y uno para terminar la operación del sistema.

Los casos históricos más semejantes son el número 17 y el número 27, a continuación se mostrarán las pantallas de “casos similares” para ambos casos. Posteriormente, se presentarán los textos con el análisis de falla completo de cada caso y por último, se hará una comparación entre el caso de ejemplo (punto 4.3) y los dos casos históricos.

Pantallas de casos similares

La figura 4.21 muestra la pantalla de “casos similares” para el caso histórico 17; la figura 4.22, para el caso 27.



Casos similares

Título de un engrane del sistema de alimentación de agua pesada presurizada de un reactor nuclear

Contexto:
 Un engrane de bronce C30700 del sistema de alimentación de agua pesada presurizada de un reactor nuclear falló luego de 10 años de servicio.

El engrane se usaba para transmitir movimiento a la válvula de control de salida del sistema de alimentación. Recibía su movimiento de un reductor de velocidad variable diseñado para lograr un ajuste adecuado al cerrar la válvula.

El material especificado para engranes de baja velocidad y alta capacidad de carga es el bronce C30700. Para el análisis, se tomaron 3 dientes que se fracturaron totalmente en su raíz.

Características de la superficie de fractura / grieta:
 Los engranes tenían algunos colores característicos del subenfriamiento. Uno de los dientes tenía un desgaste lateral de alrededor de 1mm por lado (Figura 1); otro diente tenía las mismas características, pero solo de un lado. Había además desgaste en las calzas de los dientes.

Los dientes tenían varias grietas en la cara perpendicular al plano de la raíz, con longitud aproximada de la mitad de la altura del diente.

El examen visual del engrane reveló ausencia de lubricante. Este desgaste tan severo debió ser causado por una falta de alineación de los engranes.

Estereoscopia / Microscopio óptico
 El estereoscopio reveló la existencia de numerosas grietas paralelas a la raíz, que atravesaban vacíos de picado. Una vista de sección perpendicular de uno de los dientes reveló que la



Figura 1

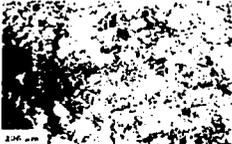


Figura 2



Figura 3

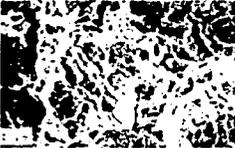


Figura 4

Revisar otros casos

Terminar

Figura 4.21. Pantalla de casos similares

Casos similares

Fractura por fatiga de una pestaña de la rueda del tren de aterrizaje de un avión C130

Contexto:
 Un avión tipo C130 (perteneciente a la fuerza aérea de EEUU), había aterrizado y se dirigía al hangar cuando ocurrió la falla: se separó un fragmento de pestaña del ala que estaba en la (parte del tren de aterrizaje (Figura 1) La pestaña tenía sección transversal de forma circular.

La rueda del tren de aterrizaje del C130 estaba compuesta de dos mitades unidas para soportar el neumático. Las mitades no eran totalmente simétricas, debido a los frenos.

Las ruedas fueron forjadas en una aleación de aluminio secundario por precipitación que contiene 4.4% de Cu, 0.8% de Si, 0.03% de Mn y 0.4% de Mg. Las especificaciones para este material son las siguientes: esfuerzo último de tensión: 480MPa; esfuerzo de fluencia 410 MPa, 10% de elongación.

Las ruedas son inspeccionadas con linta penetrante en cada cambio de neumático, aproximadamente cada 3 años. La última inspección no reveló grietas alguna en la pestaña.

La rueda cuando fue llevada al servicio de mantenimiento la pieza fracturada. Una porción de la pestaña seguía sujeta y fue sometida a una inspección con linta penetrante.

Características de la superficie de fractura / grieta de la pestaña:
 La inspección visual reveló que una gran parte de la superficie de la fractura estaba contaminada con polvo y grasa. En la superficie de fractura se podían identificar dos regiones distintas. La región

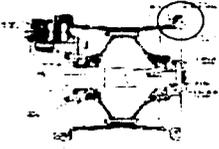


Figura 1

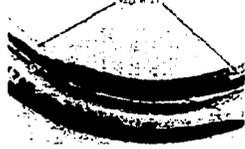


Figura 2



Figura 3

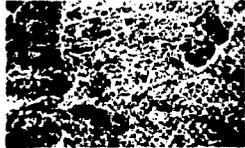


Figura 4

Revisar otros casos

Terminar

Figura 4.22. Pantalla de casos similares

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Texto del caso 17

Los textos del caso 17 y del caso 27 corresponden a aquellos exhibidos en una ventana en las figuras 4.21 y 4.22, se han colocado aquí debido a que el tamaño del texto rebasa la capacidad de dicha ventana. Nota: Dentro de estos dos textos, el número de las figuras hace referencia a aquellas que se encuentran dentro de las figuras 4.21 y 4.22, respectivamente.

Falla de un engrane del sistema de alimentación de agua pesada presurizada de un reactor nuclear.

Contexto

Un engrane de bronce C90700 del sistema de alimentación de agua pesada presurizada de un reactor nuclear falló luego de 10 años de servicio.

El engrane se usaba para transmitir movimiento a la válvula de entrada salida del sistema de alimentación. Recibía su movimiento de un reductor de velocidad variable diseñado para lograr un ajuste adecuado al cerrar la válvula.

El material especificado para engranes de baja velocidad y alta capacidad de carga es el bronce C90700. Para el análisis, se tomaron 3 dientes que se fracturaron totalmente en su raíz.

Características de la superficie de fractura / grieta.

Los engranes tenían algunos colores característicos del sobrecalentamiento. Uno de los dientes tenía un desgaste lateral de alrededor de 1mm por lado (figura 1); otro diente tenía las mismas características, pero sólo en una cara. Había además desgaste en las cabezas de los dientes. Este desgaste tan severo debió ser causado por una falta de alineación de los engranes

Los dientes tenían varias grietas en la cara perpendicular al plano de la raíz, con longitud aproximada de la mitad de la altura del diente.

El examen del engrane reveló ausencia de lubricante..

Estereoscopio / Microscopio óptico

El estereoscopio develó la existencia de numerosas grietas paralelas a la raíz, que atravesaban vacíos en la microestructura. Una vista de sección perpendicular de una

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

de las grietas reveló que la propagación ocurrió a través de la fase ϵ (épsilon), debido a la fragilidad del material (figura 2)

Metalografía / Análisis químico.

Se abrió una de las grietas perpendiculares a la raíz y se hallaron estrías de fatiga.

Análisis SEM.

Se observó que las zonas de fractura tenían una apariencia casi frágil, transcristalina, que corresponde a la fractura final por sobrecarga (figura 3)

Las zonas de iniciación de grietas estuvieron sometidas a frotamiento y desaparecieron por completo debido a la apertura y cerradura de la grieta de fatiga. Por este motivo, el mecanismo de iniciación de la grieta no se pudo identificar.

Una de las grietas perpendiculares a la raíz del diente fue abierta y se reveló una fractura de tipo transgranular, con indicaciones de estrías de fatiga.

Discusiones.

La falta de lubricación y el alto desgaste provocado por la desalineación contribuyeron en conjunto a la falla. Debido a que el reactor en promedio carga combustible 1.3 veces al día, debió estar sometida a 4800 ciclos de carga luego de 10 años de servicio. No obstante, la pérdida de metal de la cara del diente fue de alrededor de 1mm, indicando que el alto desgaste no fue causado sólo por falta de lubricación. Dado que había desgaste hasta la mitad del diente, es claro se produjo una desalineación durante el ensamble o en un servicio de mantenimiento.

Solución del caso

Causa más probable

La razón principal para el desgaste fue la falta de alineación. Esto provocó alto desgaste asociado con altos esfuerzos, que llevaron al crecimiento de una grieta por fatiga y a la falla final.

Acciones correctivas

Se recomienda revisar la alineación y el nivel del lubricante.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Texto del caso 27.

*Fractura por fatiga de una pestaña de la rueda del tren de aterrizaje de un avión
C130*

Contexto.

Un avión tipo C130 (perteneciente a la fuerza aérea de EEUU) había aterrizado y se dirigía al hangar cuando ocurrió la falla: se separó un fragmento de pestaña del ala que estaba en la rueda del tren de aterrizaje (figura 1) La pestaña (resaltada con un círculo en la figura 1) tenía sección transversal de corona circular.

La rueda del tren de aterrizaje del C130 estaba compuesta de dos mitades unidas para soportar el neumático.

Las ruedas fueron forjadas en una aleación de aluminio endurecida por precipitación que contenía 4.4% de Cu, 0.8% de Si, 0.8% de Mn y 0.4% de Mg. Las especificaciones para este material son las siguientes: Esfuerzo último de tensión: 480Mpa, esfuerzo de fluencia 410 Mpa, 10% de elongación.

Las ruedas son inspeccionadas con tinte penetrante en cada cambio de neumático, aproximadamente cada 3 años. La última inspección no reveló grieta alguna en la pestaña.

La rueda completa fue llevada al análisis de falla, incluyendo la pieza fracturada. Una porción de la pestaña seguía intacta y fue sometida a una inspección con tinte penetrante.

Características de la superficie de fractura / grieta (a simple vista)

La inspección visual reveló que una gran parte de la superficie de fractura estaba contaminada con polvo y grasa. En la superficie de fractura se podían identificar dos regiones distintas. La región I (figura 2) contenía marcas de playa y era poco rugosa, la región II (figura 2) era muy rugosa y tenía labios.

Las marcas de playa muestran que las grietas crecieron de manera radial partiendo de varios sitios. La región II rodea a la región I. Mientras que la región II se encontraba prácticamente limpia, la región I estaba totalmente contaminada. Esto sugiere que la región II es donde ocurrió la fractura final.

Al examinar la zona de la pestaña que había quedado intacta, fue hallada una grieta de 90mm de longitud que corría paralela al perímetro de la pestaña.

Análisis SEM

La región I tiene una fractura del tipo transgranular. Se hallaron estrias por toda la región. Las estrias eran finas y los espacios entre ellas estaban bien marcados, esto sugiere que el mecanismo de falla es fatiga en altos ciclos. No aparecieron evidencias de corrosión. (Figura 3)

En la región II, el crecimiento de la fractura también fue transgranular. No obstante, en esta región predominaban las microcavidades equiaxiales, esto apoya la hipótesis de que la región II es la zona donde ocurrió la ruptura final, la cual fue por sobrecarga. (Figura 4)

Metalografía / Análisis químico

Al hacer este examen, no aparecieron anomalías en la microestructura.

Análisis de los esfuerzos

No fue posible obtener datos reales del número de ciclos a los que las ruedas estuvieron sometidas, lo mismo sucedió para las cargas. Por esta razón, se utilizaron valores estimados a partir de los datos proporcionados por el cliente.

Con estos valores, fue calculado que la rueda soportó alrededor de 800,000 ciclos como máximo (límite superior) en sus últimos 3 años de uso (transcurridos desde la última inspección) El esfuerzo máximo al que estuvieron sometidas las ruedas fue estimado en 30MPa, este valor es aproximado al máximo reportado en la literatura de mecánica de fractura para el material utilizado.

Para un estudio más profundo de los esfuerzos, los analistas propusieron una grieta inicial de 13mm de longitud, profundidad de 25mm y ancho de 6.5mm en el aluminio. Con estos datos y el esfuerzo (30Mpa), una simulación arrojó el valor de 750,000 ciclos para que se produjera la falla.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Discusión.

Las evidencias de la fractografía indican que el crecimiento inicial de la grieta se dio por fatiga a altos ciclos. No hay evidencia de defectos en el material o de productos de corrosión. Existen múltiples sitios de iniciación, y al no haber defectos en el material, indican que la resistencia a la fatiga del material había sido sobrepasada.

Los resultados de la mecánica de fractura (que suponen una grieta ya existente) concuerdan con los estimados a partir de los datos del cliente. Por esta razón, surge la hipótesis de que una grieta no fue identificada en la inspección anterior.

*Solución del caso**Causa más probable*

La grieta fue causada por fatiga en altos ciclos.

La grieta que causó la falla tenía una longitud de 200mm. Bajo las condiciones de operación, es imposible que esta grieta se desarrollara totalmente en tres años, por este motivo, debió existir una grieta tres años antes de la falla.

Acciones correctivas

Fue sugerido que todas las piezas con un tiempo de servicio similar debían ser revisadas. Otra sugerencia fue que el tiempo de inspección se redujera de 3 años a un año.

Cómo pudo evitarse la falla

La última inspección debió hacerse con más precaución para evitar que la grieta existente pasara desapercibida.

Comparación entre los casos

Las tablas siguientes presentan las semejanzas y las diferencias más importantes que guardan el caso histórico 17 (tabla 4.2) y el caso histórico 27 (tabla 4.3) con el caso en estudio (punto 4.3)



	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: estrias
	No existe corrosión	No existe corrosión
Carac. 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 signos de sobrecalentamiento	Evidencias de sobrecalentamiento en la superficie de la pieza

Tabla 4.2. Comparación del caso histórico 17 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
Características distintas	Se infiere por los signos de fatiga que el elemento estaba sometido a cargas cíclicas.	El elemento estaba sometido a cargas cíclicas
	Presencia de desgaste por frotamiento	No hay desgaste.
	No hay estrias	Existen estrias.
	Material: Acero AISI 4140	Material: Aluminio
	Elemento: flecha	Elemento: Pestaña
	Sistema al que pertenece: Transmisión de potencia	Sistema al que pertenece: soporte.

Tabla 4.3. Comparación del caso histórico 27 con el caso en estudio

Las tablas 4.2 y 4.3 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

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

más importantes que el sistema halló, pues evidencian el mecanismo de falla del caso de ejemplo, que es la fatiga.

En las tablas 4.2 y 4.3 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.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CONCLUSIONES

Los últimos desarrollos realizados en la materia de sistemas inteligentes de análisis de falla 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 desarrollar un prototipo con mayor facilidad y posteriormente, desarrollarlo hasta tener un sistema funcional.

La contribución de esta tesis es que el software construido, significa un avance para el proyecto del sistema inteligente de UDIATEM, un proyecto para apoyar a la industria nacional en la resolución de problemas de análisis de falla.

Dentro de la construcción del sistema RBC, las etapas más importantes fueron la elaboración del modelo de organización del conocimiento (estructura de organización) y del mecanismo de indexación (llaves primarias)

Para construir la estructura de organización, se revisaron varias fuentes de información, en las cuales diversos autores expusieron sus propuestas de clasificar los datos de un caso de análisis de falla; con base en esta revisión, se obtuvo la estructura de organización definitiva. La lista de atributos significativos de los casos, que pertenece a dicha estructura, se modificó bastantes veces antes de poder hablar de una lista adecuada.

Para construir los índices se utilizó un método analítico que no funcionó como se esperaba, por lo que fue necesario buscar una alternativa, la cual tampoco brindó resultados satisfactorios; por esta razón, se concluyó que era necesario acudir al experto para pedir su apoyo en esta tarea, de esta manera se pudieron construir los índices de manera apropiada.

No habría sido posible construir el sistema RBC, sin la ayuda del experto en análisis de falla, pues este campo de conocimiento se caracteriza entre otros aspectos, por no

contar con modelos claros, por brindar soluciones particulares y por el uso de un vocabulario especializado.

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, brinda la oportunidad de que cualquier persona interesada pueda continuar con el proyecto y llevarlo a su culminación.
- ◆ Incluye para todos los casos, acciones correctivas para la falla.
- ◆ Muestra varios casos históricos en la interfase de usuario

Posee asimismo las siguientes desventajas:

- ◆ Su base de casos es pequeña, por lo que no hallará casos similares a muchos casos que el usuario introduzca.
- ◆ Dado que es un prototipo y cuenta con pocos casos, no se ha diseñado todavía un método estadístico para obtener los pesos de los atributos.
- ◆ No puede agregar de manera automática un caso nuevo, es necesario modificar los archivos para dar de alta un caso en la base de conocimiento.

Sin la ayuda del experto en análisis de falla, no habría sido posible construir este sistema RBC, pues este campo de conocimiento se caracteriza entre otros aspectos, por no contar con modelos claros, por brindar soluciones particulares y por el uso de un vocabulario especializado.

Recomendaciones:

Para la futura expansión del sistema, se requiere llevar a cabo lo siguiente:

- 1) Actualmente, los datos que el usuario introduce al sistema para resolver un caso, que son los valores lógicos de los atributos, no se almacenan. Es necesario que el sistema tenga la capacidad de almacenar esos valores en la base de conocimientos para dar de alta



casos nuevos. Se recomienda también, que aparte de los valores lógicos, se pida al usuario un archivo de texto con la descripción de su caso y archivos de imágenes representativas del caso, todos estos archivos deberán ser agregados a la base de conocimientos.

- 2) Para tener soluciones confiables, es necesario que el número de casos históricos sea incrementado.
- 3) Cuando la base de casos haya crecido, será necesario desarrollar un método estadístico para refinar los pesos de los atributos.
- 4) Construcción de un módulo de navegación basado en imágenes. A través de este módulo, el usuario observará imágenes y cuando halle una similar a la que presenta su caso, podrá revisar el caso histórico.
- 5) Finalmente, se debe realizar la integración con el sistema de razonamiento basado en reglas.

Perspectivas del sistema

Cuando el sistema RBC y el sistema RBR trabajen en conjunto, será posible comercializar el sistema inteligente para análisis de falla en la industria, pues las soluciones que brinde, tendrán un alto nivel de confiabilidad. De esta manera, el sistema permitirá a la industria resolver problemas de análisis de falla y abatir los costos de mantenimiento, debido a que se evitará la recurrencia de fallas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.

Libros

1. Brooks, Charlie; Choudry, Ashkon. *Metallurgical failure analysis*. Mc Graw Hill, USA, 1993.
2. Ceballos S., Francisco J. *Curso de programación de Visual Basic 6*. Editorial Alfa omega, México, 2000.
3. Das, A. K. *Metallurgy of failure analysis*. Mc Graw Hill, USA, 1997.
4. Durning, Evert D. D. (editor). *Corrosion Atlas*. Elsevier Science, the Netherlands, 1991.
5. Esakul, K. A. (editor). *ASM Handbook of failure analysis*. ASM International, USA, 1992.
6. González Q., Alfons. *Programación de bases de datos con Visual Basic*. Ed. Ra-Ma, España, 1996
7. Kolodner, Janet. *Case-based reasoning*. Morgan Kaufmann, USA, 1993
8. *Metals Handbook Ninth Edition, Volume 11: Failure analysis and prevention*. ASM International, USA, 1990.
9. Pressman, Roger S. *Software engineering: a practitioner's approach*. Mc Graw Hill, USA, 1992

Artículos

10. Agre, G., *Knowledge-based systems maintenance as learning two-tiered domain representations*. Lecture Notes in Artificial Intelligence 1010. Springer, Berlin, pp.109-120.
11. Graham-Jones, P. J.; Mellor, G. B. *Expert and knowledge-based systems in failure analysis*. Engineering failure analysis, Vol. 2, No. 2, pp 137-149. Elsevier Science.
12. Graham-Jones, P. J.; Mellor, G. B. *The development of a generic failure analysis expert system based on case-based reasoning*; Engineering Failure Analysis, Vol. 5, No. 2. Elsevier Science.
13. Liao T. W.; Zhang Z. M.; Mount, C. R. *A Case-Based Reasoning System for Identifying Failure Mechanisms*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 13. pp 199-213. Elsevier Science.



14. Ricci, F.; Avesani, P. *Learning a local similarity metric for case-based reasoning*. Proceedings of the first International Conference on Case-based reasoning (ICCBR) Springer, Berlin.
15. Roberge, P. R.; Tullmin, M. A. A.; Trethewy, K. R. *Failure analysis by case-based reasoning*. Elsevier Science - Pergamon Press
16. Surma J.; Vanhoof K. *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.

Referencias en Internet

17. The CBR Home Page. <http://www.cbr-web.org/>

