



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SISTEMA EXPERTO PROTOTIPO PARA ANÁLISIS
DE FALLA EN ENGRANES**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO**

P R E S E N T A:

ELÍAS DÍAZ MONTANO

**DIRECTOR DE TESIS
Dr. VÍCTOR HUGO JACOBO ARMENDÁRIZ**

CD. UNIVERSITARIA D.F.

2014

Índice

Prólogo.....	3
Dedicatorias.....	3
Agradecimientos.....	3
Capítulo 1: Introducción	
1.1 Antecedentes.....	4
1.2 Objetivos, hipótesis y alcances.....	5
1.3 Limitaciones del sistema.....	6
1.4 Organización del trabajo.....	6
Capítulo 2: Conceptos Básicos de Engranés	
2.1 Características de funcionamiento.....	8
2.2 Tipos de Engranés.....	13
2.3 Características de servicio.....	15
Capítulo 3: Análisis de Falla en Engranés	
3.1 Generalidades.....	18
3.2 Modos de Falla en Elementos Mecánicos.....	19
3.3 Metodología de Análisis de Falla.....	20
3.4 Modos de Falla en Engranés.....	24
3.5 Causas de Falla en Engranés.....	38
3.6 Análisis Sistemático de Fallas en Engranés.....	39
Capítulo 4: Sistemas Expertos	
4.1 Generalidades.....	41
4.2 Estructura de un Sistema Experto.....	43
4.3 Metodología para el Desarrollo de Sistemas Expertos.....	45
4.5 Razonamiento Basado en Reglas.....	46
4.6 Metodologías para Manejo de la Incertidumbre en Sistemas Expertos.....	48
Capítulo 5: Diseño de prototipo	
5.1 Metodología para el desarrollo del sistema.....	49
5.1.1 Integración del Conocimiento.....	50
5.1.2 Estructuración del Conocimiento.....	50
5.2 Estructuras de Representación del Conocimiento.....	52
5.2.1 Árboles de Fallas en Engranés.....	54
5.3 Selección del Shell para el Desarrollo del Sistema.....	55
5.4 Interfaz gráfica.....	56
5.5 Construcción de la Base del Conocimiento.....	57
5.5.1 Manejo de la Incertidumbre.....	60
5.6 Análisis y Diseño del Sistema.....	61
5.7 Programación del Sistema Experto.....	65
Capítulo 6: Validación del Sistema	
6.1 Solución de casos de Falla en Engranés.....	68
6.2 Conclusiones y Recomendaciones.....	85
Referencias.....	87
Anexos.....	88

Prólogo

Los sistemas expertos, como una rama de la inteligencia artificial, emulan el razonamiento de un experto humano en determinadas áreas del conocimiento; en el análisis de falla de elementos mecánicos existe escasez de personal calificado para llevar a cabo dichos análisis debido a la enorme demanda de conocimientos que exigen los análisis de esta naturaleza, el presente trabajo de tesis tiene como objeto principal, desarrollar un sistema experto prototipo para el análisis de falla en engranes que tenga la capacidad de resolver casos de falla convencionales a partir de datos de entrada producto de inspecciones visuales y de la información disponible en bitácoras de mantenimiento e historia del elemento en cuestión.

El sistema experto desarrollado, consiste de una interfaz gráfica desarrollada en la plataforma de Java así como una base de conocimiento programada en CLIPS utilizando factores de certeza para el manejo de la incertidumbre obtenidos a partir de una breve investigación estadística de diversos casos de análisis de falla en engranes reportados en la literatura.

El trabajo escrito consta de 6 capítulos en los cuales se describe detalladamente las bases teóricas, metodología de desarrollo del sistema, validación del mismo así como un apartado final de conclusiones y recomendaciones.

Dedicatorias

A mis padres por ser parte fundamental en mi vida.

A ti padre por tu incansable esfuerzo y empeño, por apoyarme en todo y con todo siempre.

A ti madre por brindarme tu cariño, paciencia y comprensión en todos los momentos.

A mis hermanos por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas.

A ustedes les dedico mi tesis con mucho cariño como símbolo de mi gratitud, por su constancia y apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de estos años.

Agradecimientos

A mi director de Tesis, Dr. Víctor Hugo Jacobo Armendáriz agradezco el enorme apoyo durante todas las etapas de desarrollo del presente trabajo.

Se agradece a la dirección general de asuntos del personal académico por el apoyo brindado para la realización del presente trabajo de tesis, esto a través del proyecto PAPIIT IN117412 “Integración de conocimiento experto para asistir al análisis de falla de elementos mecánicos”.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

“Un engrane es un elemento mecánico, simplemente una rueda dentada; dos o más engranes tienen como objetivo fundamental transmitir potencia entre dos ejes con una cierta relación de velocidad y torque, la cual depende directamente de las dimensiones de dicho elemento, la transmisión de movimiento se lleva a cabo a velocidad constante y para ello es necesario manufacturar los perfiles de los dientes de modo de que dicha condición se cumpla” (Faires, 1970).

Entre las múltiples ventajas que ofrece este sistema de transmisión con respecto a otras formas, es la de transmitir potencia con mayores torques a velocidades elevadas, es por esta razón que este elemento mecánico se utiliza en un gran número de máquinas rotatorias, transmitiendo principalmente movimiento de un eje a otro.

El proceso de diseño de un engrane toma en cuenta las diversas solicitaciones a las cuales estará sometido durante la operación, de esta manera se determinan las características que debe tener dicho elemento para soportar las diversas cargas que comprometerán la vida útil del engrane, sin embargo, es común que en la aplicación masiva de este tipo de transmisión se presenten fallas, las cuales pueden depender de diversos factores, causando pérdida de funcionalidad del sistema al que pertenece el engrane en cuestión.

Las principales causas por las que un engrane puede presentar pérdida de funcionalidad se encuentran clasificadas en cinco categorías:

- Diseño inadecuado (Geometría, tratamiento térmico y materiales)
- Fabricación inadecuada (Proceso de manufactura)
- Instalación inadecuada (Montaje y alineación)
- Ambiente agresivo (Físico y químico)
- Operación inadecuada (Mantenimiento, arranque y operación)

Una vez que se presente alguna falla en particular, se debe de realizar un análisis exhaustivo para determinar la verdadera causa, a fin de implementar las medidas preventivas y/o correctivas para evitar que dicho inconveniente se siga presentando, esta metodología se le conoce como Análisis de Falla.

El método de análisis de falla proporciona una base sólida para determinar las causas de la pérdida de funcionalidad del elemento en cuestión, sin embargo el análisis involucra la aplicación de diversos campos de la ingeniería mecánica, tornando la determinación de la o las causas de falla, una tarea compleja y tardada, surgiendo la necesidad de apoyo por parte de un grupo de expertos con conocimiento en áreas como materiales, metalurgia física, manufactura y diseño mecánico. De esta manera es posible llevar a cabo un análisis confiable, cabe destacar que hoy en día, existe una muy baja disponibilidad de personas expertas en las ramas mencionadas, haciéndose aún más difícil el análisis, aumentando de manera significativa el tiempo y el costo del mismo.

Como se mencionó, para llevar a cabo el análisis de una determinada falla es necesario contar con un amplio conocimiento en diversos campos de la ingeniería mecánica, actualmente es difícil que una persona por sí sola cuente con las herramientas y los conocimientos suficientes, por tanto surge la necesidad de integrar todo el conocimiento en un programa computacional que auxilie al ingeniero encargado durante el proceso de la determinación de la falla, aumentando de esta manera las posibilidades de éxito.

“Los Sistemas Expertos como una rama de la inteligencia artificial, tienen la capacidad de emular la forma en la cual razona un experto humano en un área en específico, de esta manera es posible almacenar todo el conocimiento suficiente para llevar a cabo este tipo de análisis de falla, por tanto con ayuda de esta herramienta personas con poca experiencia pueden resolver algún problema en específico que requiera un conocimiento especializado” (Gutiérrez, 2001).

Las principales áreas de aplicaciones de los sistemas expertos están en la Medicina, Economía, Derecho, Ingeniería y en diversas otras ramas del conocimiento.

El prototipo desarrollado durante este trabajo de tesis podrá auxiliar en la solución de casos de análisis de falla en engranes, tal y como lo haría un experto humano en el tema, recomendando las acciones preventivas y/o correctivas según sea el caso.

1.2 Objetivos, Hipótesis y Alcances

Objetivo general

- Diseñar y desarrollar un Sistema Experto a nivel prototipo para el Análisis de Falla en Engranés desde una plataforma computacional, que sea capaz de auxiliar y recomendar las acciones preventivas y/o correctivas de manera general para evitar la recurrente presencia de las falla en dichos elementos.

Objetivos específicos

- Validar el prototipo de análisis de falla en engranes, con casos reportados en la literatura.
- Investigar los principales mecanismos de falla de un engrane, considerando los materiales, pasando por el diseño y la manufactura, hasta el análisis de las condiciones de servicio del mismo.
- Desarrollar una estructura de adquisición del conocimiento en análisis de falla
- Desarrollar una interfaz gráfica para el prototipo.

Hipótesis general

- Es posible integrar el conocimiento experto sobre análisis de falla de engranes en un programa computacional, que a partir de datos simples de entrada pueda ayudar a resolver diversos casos de fallas en engranes.

Alcances

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo principal desarrollar un prototipo funcional de un sistema experto en análisis de falla en engranes, el prototipo funcionará a partir de datos de entrada obtenidos durante la inspección visual así como datos de mantenimiento y servicio de un caso de falla en engranes.

Cabe destacar que el sistema experto resuelve problemas convencionales de análisis de falla en engranes con base principalmente en datos de inspección visual, de mantenimiento y servicio, a partir de dichos datos establece alguna hipótesis preliminar y en seguida muestra una descripción completa de la posible falla, principales causas y acciones preventivas y correctivas, así como recomendaciones generales.

1.3 Limitaciones del sistema

El sistema desarrollado durante el trabajo de tesis es de tipo prototipo, cabe destacar que en esta primera aproximación, el programa únicamente usa los datos de inspección visual para elaborar un diagnóstico respecto a la falla en cuestión, durante la ejecución del mismo, se observa que se introducen datos extras a los de inspección visual, dichos datos son solo complementarios para el reporte que se genera al fin de un análisis y no tienen influencia durante el mismo.

1.4 Organización del trabajo

El trabajo se divide en 6 capítulos, en los cuales se describe el procedimiento que se llevó a cabo para el diseño y desarrollo de un sistema experto para análisis de falla en engranes.

El capítulo 1 tiene como objeto principal mostrar los antecedentes del trabajo de tesis así como un panorama general de los elementos involucrados, establecer los objetivos e hipótesis del mismo, por último se muestra un listado de sistemas semejantes al desarrollado durante este trabajo.

El capítulo 2 presenta los conocimientos básicos de la teoría de engranes, generalidades que se necesitarán para entender mejor el trabajo de tesis, se abordarán únicamente aspectos relativos a los modos de falla: Características de funcionamiento, materiales, diseño, tipos de engranes y condiciones de servicio.

El capítulo 3 muestra las generalidades acerca del análisis de falla, los fundamentos teóricos de los modos de falla en elementos mecánicos en general, así como los modos de falla particularmente en los engranes, análisis sistemático y finalmente las acciones preventivas y/o correctivas para evitar la recurrencia de la falla en cuestión.

El capítulo 4 presenta las bases teóricas necesarias para entender el funcionamiento de los Sistemas Expertos, ventajas y desventajas, la metodología para el desarrollo de un sistema de esta índole. Finalmente se desarrolla un apartado en donde se abordan las metodologías principales para el manejo de la incertidumbre.

El capítulo 5 muestra brevemente el diseño y desarrollo del Sistema experto, la metodología de adquisición del conocimiento, la selección de la plataforma en donde se desarrolló dicho sistema. Aunado a esto se describe la construcción de la base de conocimientos, la determinación de los factores de certeza, el desarrollo de la interfaz gráfica y del módulo explicativo, finalmente se concluye con un apartado en donde se desarrolla el sistema como tal.

Por último se destina el capítulo 6 para presentar las pruebas de funcionamiento del sistema desarrollado, se incluye la solución de algunos casos de fallas en engranes y su respectivo análisis de resultados, de esta manera se busca validar el Sistema Experto con la finalidad de tener la certeza de que el prototipo desarrollado sea funcional.

Capítulo 2. Conceptos Básicos de Engranés

2.1 Características de funcionamiento

Propósito, función y diseño

Un engrane es un elemento de máquina cuyo objetivo principal es transmitir potencia y movimiento entre dos ejes mediante el sucesivo contacto de sus dientes, la ventaja principal de este tipo de transmisión con respecto a otras formas, es que dichos elementos son capaces de transmitir a velocidades elevadas mayores torques con una relación constante de velocidades, para ello es necesario dotar a los perfiles de los dientes de una forma tal que cumpla con dicha condición, solo de esta manera se garantizará el desempeño óptimo del elemento en cuestión.

Los tipos de perfiles disponibles para llevar a cabo la relación constante de velocidades son los perfiles de *novikov*, cicloidales y de evolvente, siendo este último es el más utilizado por sus numerosas ventajas, se describirán a continuación las características de su funcionamiento.

Perfil de evolvente

La evolvente también llamada involuta es una curva cuyas normales son tangentes a la circunferencia base, en la figura 2.1 se muestra la curva descrita por un punto de una recta generatriz que rueda sobre un círculo base. También se define como la curva que se describe al desenrollar una cuerda ideal, inicialmente enrollada en un cilindro, llamado circunferencia base (Hernández, 1995).

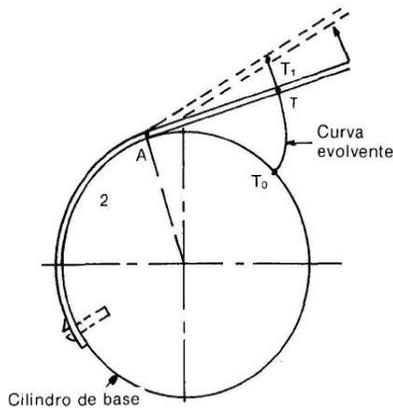


Figura 2.1. Evolvente (Hernandez, 1995).

Nomenclatura

En la figura 2.2. Se presenta la terminología para especificar un engrane recto.

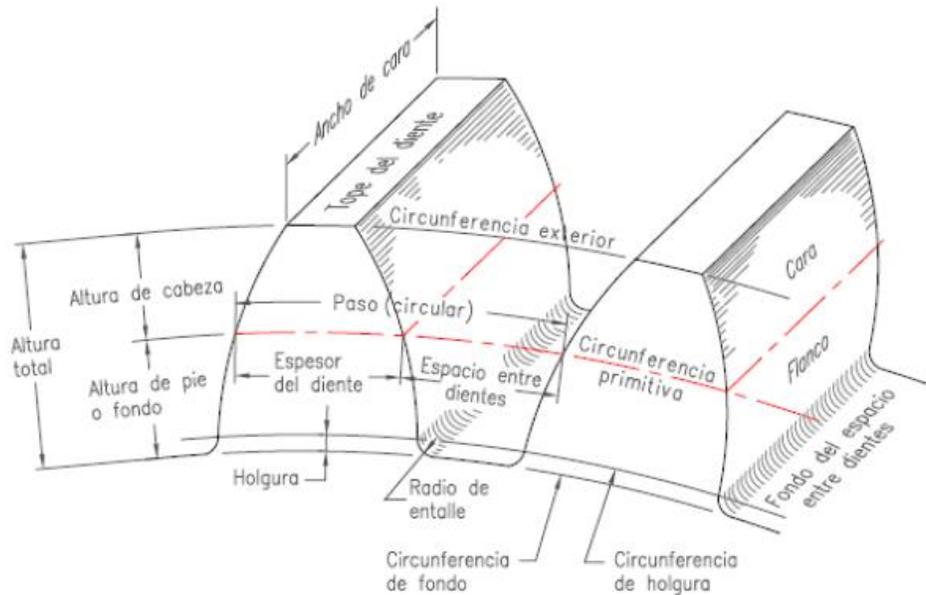


Figura 2.2. Nomenclatura de un engrane recto (Shigley, 1983)

Circunferencia primitiva: Es la circunferencia imaginaria en la cual se basan las mediciones del engrane, su diámetro expresa el tamaño del mismo, en un tren de engranes, dichas circunferencias son tangentes entre sí.

Punto primitivo: Es el punto de tangencia de las circunferencias primitivas.

Addendum o altura de cabeza: Es la distancia radial entre la circunferencia primitiva y la circunferencia exterior, la cual es la que limita al diente del engrane.

Dedendum o altura de fondo: Es la distancia radial medida desde la circunferencia primitiva a la circunferencia de fondo.

Altura total: Es la suma del *addendum* y el *dedendum*.

Holgura: Es la distancia radial medida desde la circunferencia de fondo a la circunferencia de holgura.

Espesor del diente: Es la longitud de arco o anchura del diente, medida sobre la circunferencia primitiva.

Ancho de cara: Longitud del diente en dirección axial.

Cara: Es la superficie del diente medida desde la circunferencia exterior a la circunferencia primitiva.

Flanco: Es la superficie del diente medida desde la circunferencia primitiva a la circunferencia de fondo.

Paso circular: Es la distancia medida sobre la circunferencia primitiva de un punto del diente al mismo punto del diente adyacente.

Módulo: Es la relación del diámetro primitivo sobre el número de dientes del engrane, dicho parámetro es un índice de tamaño del diente cuando se utiliza el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Círculo base: Es la circunferencia a partir de la cual se inicia la curva que genera el perfil de envolvente.

Ángulo de acción: Es el ángulo que se describe de inicio a fin del contacto entre de un par de dientes.

Ángulo de aproximación: Es el ángulo que se forma cuando se inicia el contacto de un par de dientes hasta que se alcanza el punto primitivo.

Ángulo de alejamiento: Es el ángulo que forma desde el contacto en el punto primitivo hasta el instante en donde termina dicho contacto.

Relación de engranaje: Es el número de dientes de la rueda dividido sobre el número de dientes del piñón. Cuando el piñón es el engrane conductor, esta relación es igual a la relación de velocidades.

Relación de velocidades: Se define como el cociente de la velocidad angular del engrane conductor sobre la velocidad angular del engrane conducido.

Ley de engranaje

Esta expresa que para un par de dientes obligados a transmitir una relación de velocidad constante, las curvas de los dientes deben ser tales que la normal común a los perfiles en el punto de contacto debe pasar siempre por el punto primitivo (Hernández, 1995).

Es de vital importancia mantener una relación de velocidades constante en todo momento durante la transmisión, de lo contrario se generarían vibraciones y ruido los cuales reducir drásticamente la vida útil del elemento en cuestión, es por esta razón que normalmente se utiliza el perfil de evolvente para garantizar dicha condición.

Línea de engrane en perfiles de evolvente

Durante la transmisión de potencia en un instante determinado, el contacto entre dos dientes se lleva a cabo en un punto dado, al continuar el giro el contacto se establece tal como se muestra en la figura 2.3, al unir todos los puntos de contacto se obtiene la llamada línea de engrane,

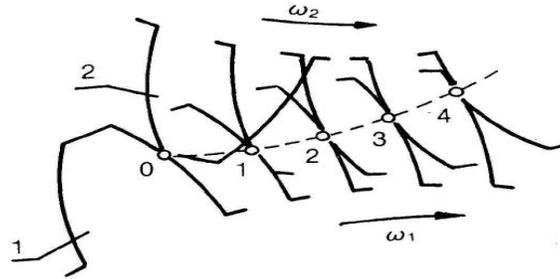


Figura 2.3. Generación de línea de engrane (Hernandez, 1995).

En el caso particular de los engranes de evolvente (figura 2.4), dicha línea es una línea recta y coincide con la normal a los perfiles de los dientes pasando por el punto primitivo formando un ángulo (α) llamado ángulo de presión con la perpendicular a la línea de los centros.

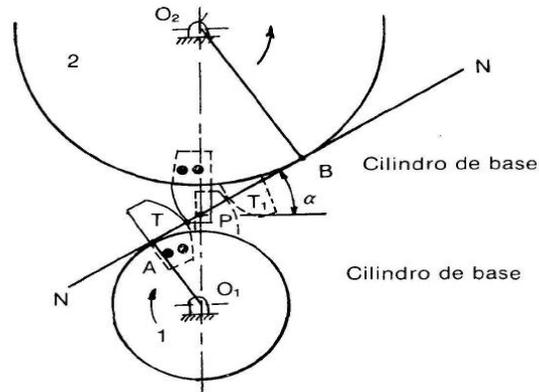


Figura 2.4. Línea de engrane en perfil de evolvente (Hernandez, 1995).

La línea de contacto es la línea AB siendo esta misma recta la generadora de la evolvente de cada engrane, será normal a los perfiles de los dientes en todos los puntos durante el contacto, de esta manera el perfil de evolvente satisface la ley de engranaje.

Materiales

Existe una extensa variedad de materiales empleados en la fabricación de engranes, entre los factores determinantes en la selección de los mismos se encuentran: el costo, la resistencia al desgaste, la templabilidad así como su respectiva dureza.

Las fundiciones de hierro proveen alta resistencia, bajo costo y cuentan con una buena respuesta al desgaste, deben de ser empleados siempre que las circunstancias así lo permitan.

Los engranes de acero forjado con un contenido de carbono de entre 0.30-0.50 % se utilizan ampliamente, así como los aceros moldeados, tanto el acero forjado como el acero moldeado deben ser tratados térmicamente a fin de elevar las propiedades mecánicas, incrementando de esta manera la resistencia al desgaste y la resistencia a la deformación respectivamente. Por otra parte se prefieren los aceros de aleación con tratamiento térmico debido a la presencia de una menor deformación bajo altas cargas, es importante mencionar que la principal limitante es la dureza de la aleación misma por la facilidad de maquinado.

Los tratamientos térmicos a los que pueden ser sometido un engrane son los que endurecen su superficie o los que endurecen toda su masa, dependiendo de la aplicación es el tipo de tratamiento que se elige. En los engranes endurecidos en toda su masa los contenidos de carbono deben ser de entre 0.35 a 0.60 % aproximadamente y las aleaciones empleadas según ASTM son 1335, 5140, 4037, 4140, 8640, 8740 y 3135 enunciados en orden del costo, los cuales también deben de ser sometidos a revenido después del temple con el fin de liberar esfuerzos internos.

Por otra parte, cuando el endurecimiento en toda la masa no produce superficies suficientemente resistentes a la fatiga superficial, el engrane debe ser endurecido superficialmente mediante un tratamiento de endurecimiento superficial como la nitruración, el cual es un tratamiento de endurecimiento poco profundo para aceros con contenido medio de carbono, dicho proceso en la actualidad es poco utilizado, por otra parte la cementación endurece la superficie sin modificar el núcleo, de esta manera se tiene un núcleo tenaz y resistente a la fatiga y una superficie resistente al desgaste. Los aceros aleados empleadas para la cementación según ASTM son: 5120, 4118, 8620, 8720, 4720, 4620, 4320, 4820 enunciados aproximadamente según el costo.

Debido a que la transmisión de potencia se lleva a cabo sobre una pequeña área, a lo largo de la línea de contacto, los esfuerzos generados son en consecuencia altos, es por ellos que los engranes se deben de fabricar de un material muy resistente, en general el material con el que se fabrica el piñón debe ser más duro que el engrane grande, (Faires, 1970).

2.2 Tipos de engranes

Engranés rectos

Los engranes rectos, el tipo más sencillo de engranes, transmiten potencia entre ejes paralelos mediante dientes rectos y paralelos al eje de transmisión.



Figura 2.5. Engrane y piñón recto

Engranés helicoidales

Los engranes helicoidales, al igual que los engranes rectos transmiten potencia entre ejes paralelos o perpendiculares entre sí, pero con mayores ventajas, es posible transmitir una mayor potencia debido a que la carga se distribuye uniformemente a lo largo del diente, la transferencia gradual de la carga da lugar a un funcionamiento más silencioso y con mayores velocidades admisibles, los dientes son hélices cilíndricas, un extremo del diente está desplazado circunferencialmente respecto al otro extremo.



Figura 2.6. Engrane y piñón helicoidal

Engrane Interno

El engrane interno es aquel en el cual se maquinan los dientes dentro del diámetro de un anillo, la característica particular de esta configuración es que tanto el piñón como la rueda giran en el mismo sentido.



Figura 2.7. Engrane interno

Engrane cónico recto

Los engranes cónicos transmiten potencia usualmente entre dos ejes perpendiculares entre sí aunque no necesariamente, pudiendo transmitir potencia entre ejes con un cierto ángulo entre ellos, experimentan casi la misma acción que los engranes rectos y helicoidales y se les diseña por pares.



Figura 2.8. Engrane cónico

Engrane cónico en espiral

Los engranes cónicos en espiral tienen la misma configuración que los engranes helicoidales solo que los dientes están maquinados sobre un cono, poseen casi las mismas ventajas que los helicoidales, un funcionamiento silencioso a mayor velocidad para altas cargas.



Figura 2.9. Engrane cónico en espiral

Engrane hipoide

Este tipo de engranes son visualmente semejantes a los engranes cónicos en espiral la diferencia radica en que la superficie primitiva en este caso es un hiperboloide, tiene como característica particular el hecho de que sus respectivos ejes no se cortan, esto es consecuencia de la misma superficie primitiva la cual así lo demanda, existen diversas desventajas acerca del funcionamiento siendo la principal la generación excesiva de calor haciéndose necesario el uso de lubricantes especiales.



Figura 2.10 Engrane Hipoide

2.3 Características de servicio

Un engrane, durante su funcionamiento, estará sometido a diversos factores que reducirán gradualmente la vida útil para la cual fue diseñado, dicho factores son un conjunto de condiciones que interactuarán de forma directa con el elemento en cuestión.

Lubricación

La lubricación juega un papel muy importante durante el servicio de un engrane, una correcta lubricación tiende a extender la vida útil del mecanismo, para llevar a cabo una correcta lubricación es necesario considerar varios puntos acerca del lubricante, (Alban, 1985).

El lubricante tiene varias funciones dentro del funcionamiento del tren de engranes:

I. Lubricación

Debido a los altos esfuerzos que se generan al transmitir potencia, la fricción entre los dientes por contacto directo sería alta, acelerando prematuramente el desgaste de la superficie del diente, la principal función del lubricante es la de reducir dicha fricción alargando la vida de la superficie, esto se logra mediante la formación de una película delgada de lubricante la cual separa las superficies de los engranes en cuestión.

II. Refrigeración

Una de las funciones principales del lubricante es la remoción de calor, generado a partir del contacto entre asperezas de los dientes engranados, la energía de contacto es convertida casi instantáneamente en calor, elevando la temperatura, el lubricante debe reducir los incrementos de temperatura a fin de evitar cualquier repercusión en el material que se asocie a la elevación de la misma.

III. Protección

El lubricante debe ser capaz de proteger al engrane de efectos corrosivos y extraer todos los desechos que se generen durante la operación del mismo.

Tipos de película lubricante

Lubricación hidrodinámica

Durante la rotación del engrane, el lubricante se adhiere a la superficie, cubriéndola en su totalidad para después ser arrastrado a la zona entre los dientes, formando una cuña de lubricante, cuando se produce el contacto, la cuña se estrecha y la presión se incrementa lo suficiente para mantener la separación entre los dientes. La eficiencia de este tipo de película depende principalmente de la viscosidad del lubricante, la temperatura, la carga y la velocidad de operación.

Lubricación de película límite

Cuando un engrane opera a baja velocidad en la presencia de una alta carga, la película que se tiende a formar es particularmente delgada, lo cual produce en la mayoría de las veces el establecimiento del contacto metal con metal. La eficiencia de este tipo de lubricación depende de la interacción de las superficies y de la naturaleza química del lubricante.

Lubricación elastohidrodinámica.

Las altas presiones producto del contacto entre dientes en su mayoría no son las que aplican para formar una película hidrodinámica ni una lubricación límite, debido a que el contacto se lleva a cabo en áreas pequeñas, las presiones son altas, sin embargo estos engranes son lubricados exitosamente con películas delgadas de aceite debido principalmente a dos razones:

- a) El incremento de la presión produce un incremento en la viscosidad del lubricante, aumentando de esta manera la capacidad de carga.
- b) Existe una deformación elástica producto de las elevadas cargas, de esta manera la carga se reparte en una mayor área.

Viscosidad: Una de las propiedades más importante del lubricante, la viscosidad es la responsable de mantener un adecuado espesor de la película de aceite entre los dientes, por tanto una mayor viscosidad formara más fácilmente dicha película, sin embargo una mayor viscosidad se traduce en pérdida de potencia sin mencionar que los aceites de alta viscosidad son poco efectivos para disipar calor, es por esto que se debe seleccionar adecuadamente la viscosidad del lubricante para alguna condición de servicio en particular, (Shell, 2006).

Tipos de lubricantes

- I. Aceites minerales
Para engranes que trabajan bajo condiciones moderadas.
- II. Aceites inhibidores contra el herrumbre y la corrosión
Se utilizan cuando existe el riesgo de contacto con agua y la temperatura es alta, dichos factores conllevan a la formación de herrumbre en los metales ferrosos. Su capacidad de adhesión es muy baja.
- III. Aceites minerales de extrema presión (E.P)
Para engranes que trabajan con altas cargas o cargas de impacto a bajas velocidades, los aditivos para resistir extrema presión normalmente son hechos a base de azufre o fósforo.
- IV. Aceites compuestos
Es una mezcla en proporciones variables de aceite mineral y sebo de animal y se utiliza cuando la acción de deslizamiento es muy elevada. Su capacidad de adhesión es alta.
- V. Aceites sintéticos
Para engranes que trabajan prolongadamente bajo un alto grado de deslizamiento y altas temperaturas, es una combinación entre aditivos y bases sintéticas fluidas.
- VI. Grasas
Su utilización es muy poca, debido a baja capacidad de remover calor, generalmente son aplicadas cuando se opera a una baja velocidad y una baja carga.
- VII. Lubricantes sólidos

Estabilidad mecánica

La transmisión de potencia se lleva a cabo por la interacción directa de los dientes del engranaje, por tanto el desempeño del mismo depende de la acción y reacción de los elementos en contacto, cada parte debe ser alineada y maquinada perfectamente asegurando las dimensiones finales y acabado superficial según sea el requerimiento.

La elevación de la temperatura tiene como consecuencia un incremento en las dimensiones del engrane debido a que el coeficiente de expansión térmica en los metales es alto, un error en la alineación o en la manufactura en engranes que trabajan a alta velocidad puede causar la falla inminente del mismo al incrementar la carga en una determinada área, la presión ejercida provocará la falla de la película de lubricante provocando un desgaste acelerado de la pieza en cuestión, por esta razón, cuando se realiza la inspección de la falla de un engrane en busca de la causa de la misma, se debe analizar la dirección de la falla así como la alineación de los ejes en los que se encuentra acoplado el tren engrane, las deflexiones provocarán a menudo vibraciones, que en la mayoría de los casos se manifiestan por ruido e inestabilidad, por otra parte se revisan las características del diente así como sus dimensiones para descartar errores en la manufactura del mismo, de esta forma es posible determinar si la causa fue debida a un error en la estabilidad mecánica del sistema en cuestión, (Alban, 1985).

Personal involucrado en el uso de engranes

Las actividades del personal en contacto con el sistema de transmisión de potencia, en este caso engranajes, tienen un papel en el desempeño y vida útil del mismo.

- Operador: Está comprobado que las buenas prácticas de operación durante el servicio evitan cualquier falla debida a cargas excesivas.
- Personal de mantenimiento: Un buen plan de mantenimiento a los equipos que utilizan trenes de engranes en su funcionamiento, incrementará significativamente la vida útil del elemento en cuestión, remplazando las partes que están desgastadas o que así lo requieran, asegurando que la alineación durante el reensamble sea la adecuada e inspeccionando los equipos periódicamente en busca de fugas y manteniendo una buena limpieza del lubricante por mencionar un algunos ejemplos, todo esto como parte del mantenimiento preventivo del sistema.

Capítulo 3. Análisis de Falla en Engranés

3.1 Generalidades

El análisis de falla en elementos mecánicos es un tema ampliamente estudiado, tanto por cuestiones competitivas como por cuestiones de seguridad, la palabra falla es un término que se usa en ingeniería para designar que un sistema, elemento o componente ha dejado de cumplir su función. Es importante definir las condiciones en las cuales se considera que un sistema, elemento o componente ha fallado (Tovar):

- I. Cuando se vuelve completamente inoperable
- II. Cuando el componente aún es operable pero no es capaz de cumplir la función para el cual fue concebido, diseñado y manufacturado.
- III. Cuando el deterioro del componente ha llegado a una condición seria que lo hace inoperable o inseguro para continuar en servicio.

Aunque teóricamente los elementos mecánicos se conciben, diseñan y manufacturan para un propósito en específico y una larga vida útil, teniendo en cuenta las sollicitaciones, cargas y factores ambientales a las cuales estará sometido durante la operación, es natural que dichos elementos mecánicos fallen durante el servicio, cuando ocurre una determinada falla es necesario establecer una análisis minucioso para determinar la causa raíz que provocó la falla en cuestión.

El proceso es conocido como análisis de falla, el cual se lleva a cabo mediante una serie de etapas, el seguimiento de las mismas y la profundidad de estudio varían dependiendo de la naturaleza de la misma falla. La información arrojada durante las primeras etapas del análisis de falla es el punto de partida para establecer hipótesis por la cual se presentó la falla en cuestión, para después ser comprobadas o eliminadas con ayuda de las etapas posteriores. Es importante mencionar que para llevar a cabo un análisis exitoso es necesario tener conocimientos sólidos en distintas áreas de la ingeniería, tornando bastante complejo y tardado el análisis de falla en elementos mecánicos.

De esta manera, una vez encontrando y entendiendo la causa de la falla, se establecerán las medidas preventivas o correctivas para evitar la recurrencia de la misma.

3.2 Modos de Falla en Elementos Mecánicos

Los distintos elementos mecánicos que existen hoy en día fallan de diversos modos, durante el análisis de falla es de vital importancia identificar el mecanismo por el cual falló el elemento en cuestión, solo de esta manera se asegura el éxito del análisis.

Los diversos modos de falla se suelen clasificar de la siguiente manera:

I. Fallas por desgaste

Cuando existe movimiento relativo entre elementos mecánicos, el desgaste se hará evidente en un cierto grado como pérdida de material de la superficie alterando con el tiempo las dimensiones del elemento en cuestión.

II. Fallas por fatiga

Esta falla es causada por someter la pieza a cargas cíclicas, dichas cargas generalmente son inferiores al límite elástico del material, demasiado bajas para provocar la fractura instantánea de la pieza, pero con la suficiente capacidad para agrandar las grietas inherentes en el material a través de repetidos ciclos.

En la fatiga se considera que existen tres etapas:

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

III. Fallas por fractura

Las fallas por fractura son la consecuencia de sobrecargar al elemento o de someterlo a cargas cíclicas por encima del límite de fatiga del material.

IV. Fallas por flujo plástico

Diversas pueden ser las causas que conducen a una falla por flujo plástico, que se define como la deformación permanente del elemento en cuestión, la falla por sobrecarga, genera una deformación excesiva, distorsiones de tamaño o de forma. Por otra parte la falla por flujo plástico se puede presentar por fluencia, resultado de cargar el elemento por periodos prolongados de tiempo.

3.3 Metodología de Análisis de falla

Cuando se presenta una determinada falla en algún elemento mecánico dejando temporalmente fuera de servicio el sistema al que pertenece, es necesario establecer un análisis sistemático a fin de conocer la causa raíz que provocó la falla en cuestión, entendiendo de esta manera el por qué y las características de la misma, a fin de establecer las acciones preventivas o correctivas mitigando en la medida de lo posible la recurrencia de la falla.

El análisis de falla de elementos mecánicos contiene las siguientes etapas (Tovar):

I. Evidencia documental

La primera etapa de un análisis de falla trata de documentar cualquier tipo de información que caracteriza al elemento en cuestión, especificaciones técnicas: tipo de material, fabricación, dimensiones, tratamientos térmicos, función que desempeña así como pruebas de ensayo de fabricantes.

II. Condiciones de servicio

La información con respecto a la operación del elemento, esfuerzos y fuerzas involucradas es de vital importancia, en este apartado se recopila toda la información disponible acerca de las características de operación, tales como velocidad de operación, temperatura y presión así como los datos de mantenimiento del equipo, condición del medio en el que trabaja: humedad, fluido que lo rodea y contaminación.

III. Entrevistas

Las entrevistas forman parte importante durante la correcta determinación de la causa de falla en un elemento mecánico, la información recolectada en las etapas anteriores es complementada mediante el testimonio de las personas que tienen información acerca de la misma, de esta manera no sólo se analiza la información recolectada anteriormente si no que se le da cierta flexibilidad al análisis.

IV. Inspección Visual

En esta etapa del análisis se buscará y registrará cualquier tipo de dato que se pueda identificar a simple vista. En primera instancia se debe determinar el modo de falla predominante después se revisará minuciosamente la condición de la misma: Apariencia superficial, presencia de marcas, ralladuras y picaduras, ubicación y textura de la falla así como la existencia de deformaciones y concentradores de esfuerzos.

V. Hipótesis preliminar

Una vez que se cuenta con la información de las etapas anteriores es posible plantear una hipótesis preliminar de la causa por la cual fallo el elemento en cuestión, dicha hipótesis deberá ser comprobada en etapas posteriores dando lugar a la inspección física y metalúrgica según se requiera.

VI. Inspección Física

a) Ensayos no destructivos

En esta etapa del análisis se realizan los ensayos necesarios no destructivos para comprobar la hipótesis planteada durante las etapas posteriores, ensayos que revelan el inicio de falla en el caso de la inspección con partículas magnéticas, líquidos penetrantes, ultrasonido, corrientes eddy; detectando grietas y discontinuidades superficiales principalmente.

b) Ensayos mecánicos

Por otra parte, para la correcta determinación de la causa de falla, se requerirán ensayos destructivos como pruebas de dureza, ensayo de tracción, compresión, flexión o impacto, con el fin último de tener información acerca del material, fuera y dentro de la zona de falla.

VII. Examen y análisis macroscópico

Con ayuda de un estereoscopio o con un Microscopio Electrónico de barrido (SEM) en la superficie de fractura, se busca la presencia grietas secundarias así como fenómenos superficiales como corrosión, desgaste y erosión.

VIII. Examen microscópico de la estructura

En algunos casos se requerirá examen microscópico para determinar la estructura a nivel microscópico del material a fin de poder localizar inconsistencias en el material como microporosidad.

IX. Determinación del tipo de fractura (fractografía)

En esta etapa se determina el tipo y las características de la fractura, la cual puede ser de tipo frágil, dúctil, combinada, morfología de fatiga, torsión entre otras.

X. Inspección metalúrgica

Mediante análisis de composición de material, se verificará que el material del componente que presentó la falla en cuestión sea el indicado para tal aplicación.

XI. Ensayos simulados de servicio

Esta etapa, como una de las finales, busca recrear o simular las mismas condiciones que produjeron la falla en cuestión con el fin de tener un mejor entendimiento de la misma, monitoreando cuales son los parámetros que afectaron el desempeño de la pieza.

XII. Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones

La información recolectada en las etapas anteriores debe ser suficiente para determinar la causa raíz de la falla, mediante este análisis sistemático, en las primeras etapas es posible plantear una hipótesis de la causa de falla, la cual se comprueba o desecha mediante los ensayos mencionados, una vez que se determinó la causa de la pérdida de funcionalidad se deben de establecer las acciones preventivas o correctivas, según sea el caso, para evitar la recurrencia de la misma.

Cabe destacar que la secuencia de análisis depende de cada caso específico de falla y de la profundidad que se le quiera dar al mismo.

Las fuentes fundamentales de falla en engranes son las siguientes (Tovar):

I. Diseño

Deficiencias durante la etapa de diseño pueden llevar a la pieza a fallar irremediablemente durante el servicio, los principales causantes de falla por diseño son todos aquellos aspectos geométricos que concentran esfuerzos, tal es el caso de cuñeros o cambios repentinos en la sección transversal.

II. Selección inadecuada de material

Una incorrecta selección del material para la pieza en cuestión terminara tarde o temprano en la falla de la misma, este error se comete a menudo cuando no se tiene un buen conocimiento de las sollicitaciones a las cuales estará sometida dicha pieza, durante el servicio.

III. Tratamiento térmico defectuoso

Un mal control de los parámetros durante algún tratamiento térmico afín incrementar la resistencia del material puede llevar a la pieza a fallar durante el servicio, se debe tener especial cuidado en cumplir con todas las condiciones que requiere el tratamiento térmico aplicado, tales como alcanzar la temperatura austenítica, el control del enfriamiento para el caso del templeado, así como para los tratamientos térmicos posteriores con el fin último de aliviar esfuerzos en el material o tratamientos térmicos de endurecimiento superficial según sea el caso o requerimiento.

IV. Manufactura defectuosa

Durante la manufactura del elemento, existen diversos procesos que alteran inevitablemente las propiedades del material volviéndolo en ocasiones susceptible a presentar una determinada falla.

V. Maquinado defectuoso

Existen diversos procesos de mecanizado que rasgan y dejan asperezas las cuales con el tiempo se convierten en concentradores de esfuerzos debilitando el material.

VI. Montaje defectuoso, operación y mantenimiento deficiente

Los errores en el montaje de la pieza a menudo son la causa de falla del elemento, durante el acoplamiento de elementos mecánicos se requiere de precisión debido a la poca holgura que existe en el ensamble, es frecuente que la piezas sean forzadas a ensamblar a golpes, provocando un daño o maltrato de la pieza en cuestión, por otra parte los desalineamientos cargarán la pieza por encima de las condiciones de diseño, otro factor importante que puede reducir la vida de la pieza, es la carencia de un mantenimiento adecuado y eficiente, en muchas ocasiones, el desconocimiento de las condiciones de servicio pueden llevar al operario de la máquina a trabajar la misma, por encima de las sollicitaciones máximas de diseño.

3.4 Modos de Falla en Engranés

Un engrane durante su servicio, se encuentra sometido a diversas sollicitaciones, condiciones de carga y factores ambientales, que reducen significativamente la vida útil para la cual fue diseñado, los diversos modos de falla en un engrane se ilustran en la figura 3.1.

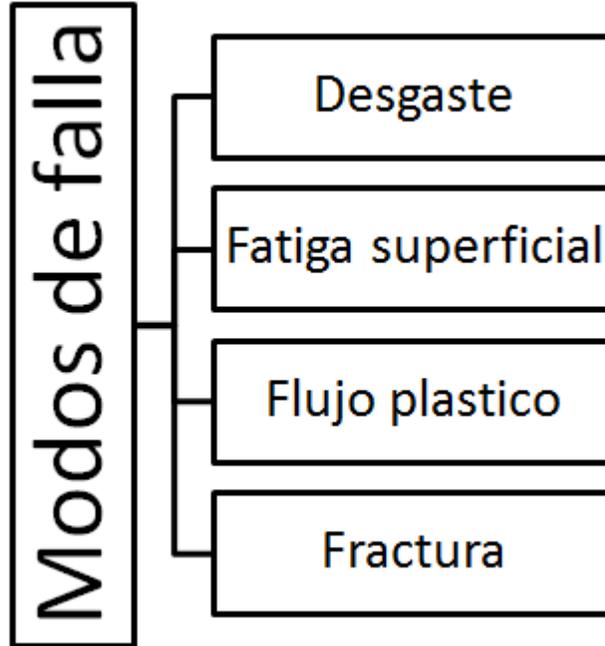


Figura 3.1. Modos de falla

Si bien es cierto que la correcta determinación de la falla en un engrane es una tarea compleja, cada uno de los modos de falla deja huellas características, que con ayuda de un análisis sistemático será posible encontrar la o las causas que generan la falla en cuestión. A continuación se presentan una breve descripción de los principales modos de falla en engranes.

Fallas por desgaste

El desgaste en dientes de engranes se caracteriza por la remoción o desplazamiento de material debido a la acción mecánica. Existen principalmente tres tipos de desgaste, los cuales se enuncian a continuación:

- I. Desgaste adhesivo: Adhesión es la transferencia de material de una superficie a otra entre los dientes en contacto debido a las altas fuerzas de atracción entre átomos, depende principalmente de la composición química y dureza de los materiales en cuestión.
- II. Desgaste abrasivo: Este tipo de desgaste es causado principalmente por contaminantes en el lubricante tales como virutas de mecanizado, arena, soldadura, partículas del mismo desgaste entre otros dejando a su paso marcas o rayas paralelas que van desde finas marcas que remueven una cantidad insignificante de material de la superficie hasta la abrasión severa que remueve todas las marcas inherentes del maquinado, el espesor del diente se reduce significativamente y en algunos casos la punta del diente queda como un borde afilado.

- III. Desgaste pulimentado: Este tipo de desgaste se caracteriza por dejar la superficie del diente con un aspecto pulido, removiendo y asentando las marcas inherentes al maquinado.

En general el desgaste se puede definir como la remoción de capas de material de la superficie de los dientes con un patrón más o menos uniforme, el deterioro del diente en el cual se reduce el espesor y el perfil del mismo se ve afectado, entre las principales causas de este tipo de falla está el contacto de metal contra metal debido a la falla en la película de lubricante entre dientes y la presencia de partículas abrasivas provenientes del medio ambiente acelerando aún más, este tipo de falla. (Hernandez, 1995)

Desgaste por pulido

En este tipo de desgaste, (figura 3.2). La rugosidad superficial inherente al maquinado de los dientes, se ve sometida a un proceso de pulido resultado del contacto metal con metal durante la operación, cuando la velocidad es baja y la lubricación está cercana a la límite, no es necesario prevenirla, una vez que se presenta simplemente se debe de utilizar un lubricante más viscoso, reducir la carga y la temperatura de operación. Se considera que la lubricación es límite cuando la película lubricante en espesor no es mayor que la altura combinada de las dos superficies en contacto.

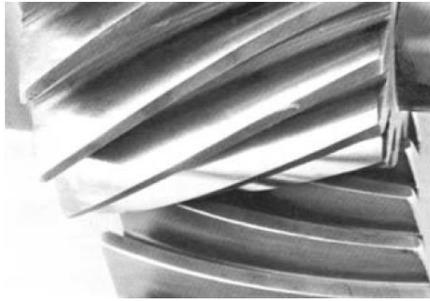


Figura 3.2. Desgaste por pulido (Rexnord Industries, 1978)

Desgaste moderado y excesivo

En este tipo de desgaste (figura 3.3) la línea de paso permanece intacta mientras las superficies de adendo y dedendo se ven afectadas por la remoción de material, las causas principales son que el lubricante este contaminado o que se trabaje con lubricación límite.

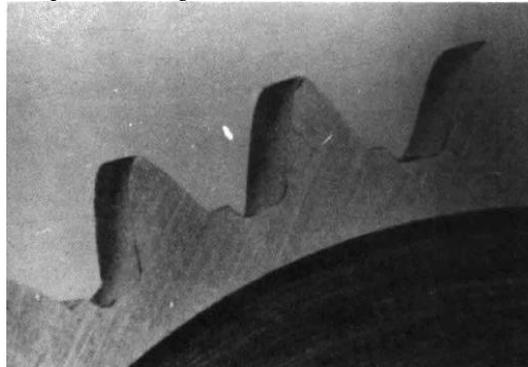


Figura 3.3. Desgaste excesivo (Hernandez, 1995)

Se puede notar la destrucción del perfil del diente así como el desgaste en las superficies de *adendo* y *dedendo* pronunciando de esta manera la *línea de paso*, esto puede causar elevadas cargas dinámicas sobre el diente, llevándolo finalmente a la ruptura.

Desgaste abrasivo

Este tipo de desgaste se debe principalmente a la acción de partículas o elementos ajenos al lubricante, los cuales desgastan el perfil del diente, se localiza en la parte inferior de contacto y termina en la línea de paso, después comienza en ese mismo punto para luego finalizar en el punto de contacto más alto, es en esos puntos donde existe un alto grado de deslizamiento y por ende elevadas cargas de contacto dejando rayas o marcas radiales en dirección del deslizamiento de los dientes, la figura 3.4, muestra un ejemplo del desgaste abrasivo.



Figura 3.4. Desgaste abrasivo (Hernandez, 1995)

Desgaste adhesivo

Es un desgaste muy rápido de los dientes, figura 3.5, sucede cuando la lubricación es incapaz de prevenir el contacto metal con metal, debido a la rugosidad superficial de los dientes, fuerzas adhesivas se desarrollan en los puntos en donde la superficie de un diente toca con puntos del diente engranado, el incremento de temperatura en dichos puntos resulta en la soldadura de las partes involucradas, naturalmente el movimiento continua, las partes soldadas se rompen aunque no necesariamente en el punto original de unión, de esta manera en la superficie del diente se adhieren pequeños fragmentos del material soldado, deteriorando la superficie y acelerando el desgaste después de repetidos ciclos, (Rexnord Industries, 1978).



Figura 3.5. Desgaste adhesivo (Rexnord Industries, 1978)

Desgaste corrosivo

Diversas sustancias corrosivas en el lubricante provocan un gran número de pequeñas picaduras en toda la superficie del diente. Estas picaduras se deben principalmente a la afinidad por el vapor de agua de algunos aditivos de los aceites, la figura 3.6, muestra un engrane afectado por el desgaste corrosivo.

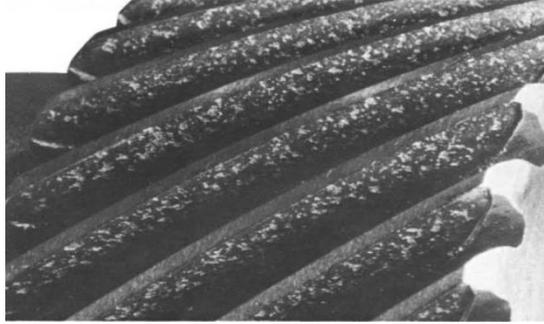


Figura 3.6. Desgaste corrosivo (Xtek Inc., 1967)

Rallado y escoriado

Una vez que la lubricación falla en la región de contacto, se establece una interacción directa entre las superficies en cuestión, existe un proceso de soldadura entre las mismas, como el movimiento debe continuar, en la mayoría de las veces el desprendimiento de la unión no se lleva a cabo en las superficies originales sino que parte del material de uno u otro engrane es arrancado de la superficie dejando a su paso una pequeña cavidad, cabe destacar que la temperatura del lubricante, velocidad y carga de operación son factores importantes en el desarrollo de las fallas por escoriación en los engranes.

El principal rastro característico de este tipo de falla es la presencia de rayas ligeras (figura 3.7) o reducidas zonas de atascamiento en la superficie del diente, causadas por el frotamiento, cuando se establece el contacto metal con metal, se generan elevadas temperaturas debido a la fricción producto del movimiento relativo entre los dientes engranados, evitando la correcta formación de la película de aceite.

La presencia de este tipo de falla nos indica que la carga y la velocidad de servicio son distintas a las apropiadas para el lubricante, este tipo de falla conduce a picaduras serias, que de no ser tratadas a tiempo el diente se verá afectado permanentemente.

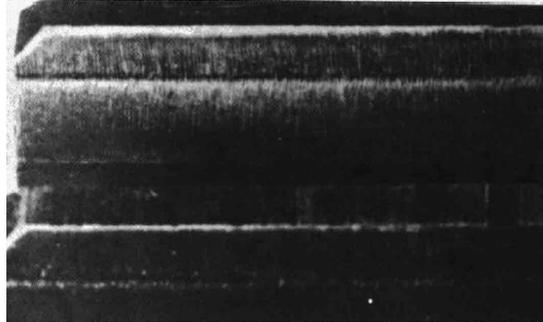


Figura 3.7. Rayado (Hernandez, 1995).

Escoriado moderado

Generalmente se localiza en el *adendo* y/o en el *dedendo*, se manifiesta como pequeños parches.

Escoriado destructivo

En este tipo de falla, (figura 3.8) la remoción de material en el adendo y en el *dedendo* llega a tal nivel, que la línea de paso a simple vista se nota demasiado pronunciada, destruyendo de esta manera el perfil del diente, por otra parte se pueden percibir rayas muy definidas y profundas en dirección del deslizamiento entre los dientes.

Ante este tipo de falla es recomendable agregar aditivos de alta presión al lubricante o en su defecto utilizar lubricantes que soporten altas cargas, velocidades y temperatura.

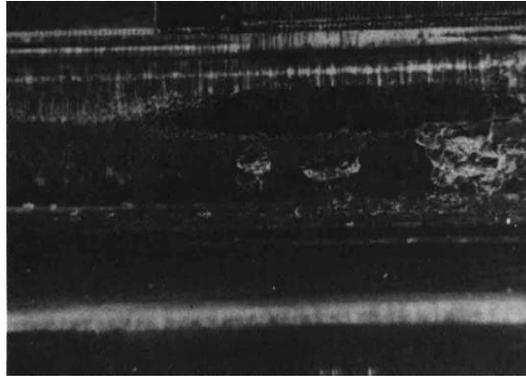


Figura 3.8. Escoriado destructivo (Xtek Inc., 1967)

Fatiga superficial

Se le considera otro modo de falla en los engranes, llamado de fatiga de contacto o hertziana, es causada por la acción de esfuerzos repetidos en la superficie del diente provocando grietas superficiales. Los tipos de fatiga de contacto son:

- I. *Micropitting*: La superficie es cubierta por finas picaduras (menores a 20 μm de profundidad)
- II. *Macropitting*: Ocurre cuando las grietas se originan sobre o por debajo de la superficie del diente, cuando las grietas crecen y se interceptan se forman pequeñas picaduras. Para picaduras menores de 1 mm de diámetro se le considera picado no progresivo, mientras que para picaduras mayores a 1 mm de diámetro a la falla se le conoce como picadura progresiva, las cuales cubren una superficie considerable del diente.

Este tipo de falla se presenta por lo general después de un tiempo prolongado de servicio del elemento en cuestión, se manifiesta como pequeñas picaduras superficiales producto de esfuerzos repetidos en la superficie del diente, cuando un engrane funciona bajo carga, induce esfuerzos superficiales constantes, por la acción simultánea de fuerzas de contacto y el movimiento combinado de deslizamiento y rodadura, si el ciclo se repite con bastante frecuencia y posee la misma intensidad sobrevendrá la fatiga en algunas zonas del material, originando de esta manera las picaduras.

Picado inicial

El picado inicial, figura 3.9, se debe principalmente a errores en el perfil del diente, irregularidades superficiales o pequeños desalineamientos del diente.

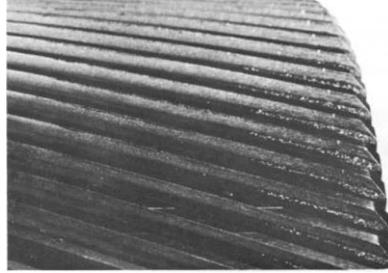


Figura 3.9. Picado inicial (Gopinath, 2006)

Picado destructivo

Una vez que se presenta el picado inicial, se generan cráteres de distintas formas y tamaños sobre grandes proporciones del diente (figura 3.10), destruyendo el perfil del mismo, a partir de dichos cráteres se originan grietas de fatiga por flexión que terminan por llevar al diente a una fractura.

Una de las medidas principales para evitar este tipo de falla es no someter al diente a una carga por encima del límite de fatiga del material o en su defecto es necesario aumentar la dureza del mismo.

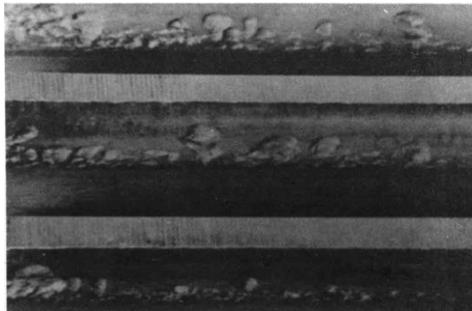


Figura 3.10. Picado destructivo (Hernandez, 1995)

Desprendido o desconchado

La característica particular de este tipo de falla es el desprendimiento de pedazos de metal relativamente grandes de la superficie de los dientes debido a una falla por fatiga metalúrgica, durante el servicio, el diente es sometido a esfuerzos cortantes, de compresión y de tensión, el primero alcanza su valor máximo a una cierta distancia por debajo de la superficie, de esta manera la superficie del diente tiende a deformarse elásticamente, durante el diseño, los valores estimados de estos esfuerzos se encuentran dentro de los límites de resistencia del diente mismo, sin embargo, bajo ciertas condiciones, en la mayoría de las veces, estos esfuerzos exceden los valores permisibles de resistencia del material, provocando grietas superficiales por fatiga resultando en el irremediablemente desprendimiento de material, estas condiciones se deben generalmente a un desalineamiento o son producto de una sobrecarga del sistema.

Este tipo de falla se presenta con mayor frecuencia en la superficie que se encuentra por debajo de la *línea de paso* y en mayor proporción en el piñón, el cual por tener un menor número de dientes que están engranados, los esfuerzos superficiales son mayores, en engranes de temple superficial, las picaduras o desconchado progresaran rápidamente debido a que el daño se origina en el límite entre la superficie templada y el núcleo del engrane.

Fractura de la superficie templada

Este tipo de fractura se debe a una falla en el material del núcleo, se manifiesta en una etapa inicial por grietas longitudinales paralelas a la *línea de paso* en la superficie de trabajo, debido a que el material se ha fatigado antes de que las grietas superficiales se hagan presentes, la progresión de dicha falla es muy rápida.

Algunas de las medidas que se toman para evitar este tipo de falla son: aumentar la profundidad de la capa endurecida, cambiar el material básico para el tratamiento térmico, aumentar la dureza en el núcleo del material o en su defecto variar el diseño del mismo diente, si en el original existen altos esfuerzos durante la operación.

Flujo plástico

Este tipo de falla se caracteriza por una deformación permanente en el diente, se asocia a cargas elevadas por encima de la carga de deformación permanente del metal o por temperaturas altas durante el servicio, se presenta frecuentemente en engranes con capa endurecida fuertemente cargados y en engranes endurecidos completamente. Por otra parte, si las cargas de compresión son demasiado elevadas o la vibración causa cargas intermitentes altas generando un efecto de golpe de martillo, la superficie del diente tenderá a laminarse o descamarse.

Se define como un tipo de trabajo en frío en las superficies de los dientes causado principalmente por los altos esfuerzos de contacto seguido de la acción de deslizamiento y rodadura inherente al funcionamiento del sistema, la superficie deformada resulta de la carencia del material superficial. Generalmente este tipo de falla se asocia a engranes fabricados con materiales relativamente blandos aunque en ocasiones se puede presentar en engranes hechos de materiales total o superficialmente endurecidos fuertemente cargados.

Existen diversos tipos de flujo plástico que se presentan en los engranes, los cuales se mencionan a continuación:

I. Flujo frío

Se causa principalmente por la acción de deslizamiento durante el funcionamiento del engrane. Dicha acción tiende a empujar el material sobre la punta del diente, como consecuencia la superficie muestra evidencia de flujo de material, este tipo de daño se causa por la carga dinámica del engrane debido a errores durante la manufactura del perfil, figura 3.11.

II. Ondulación

En este tipo de falla, se forman pequeñas ondas periódicas en dirección del deslizamiento o movimiento. Usualmente se observa en engranes endurecidos aunque también se puede presentar en engranes de materiales blandos bajo ciertas condiciones, este tipo de falla

superficial se causa por altos esfuerzos de contacto que obligan al material a fluir, por otra parte también se asocia en operaciones de baja velocidad debido a que no es posible desarrollar un buen espesor de película de lubricante, figura 3.12.

III. Arrugamiento

La formación de pequeños picos y valles en dirección del deslizamiento caracterizan a este tipo de falla y se debe principalmente a altos esfuerzos de compresión así como a altas velocidades de deslizamiento, figura 3.13.

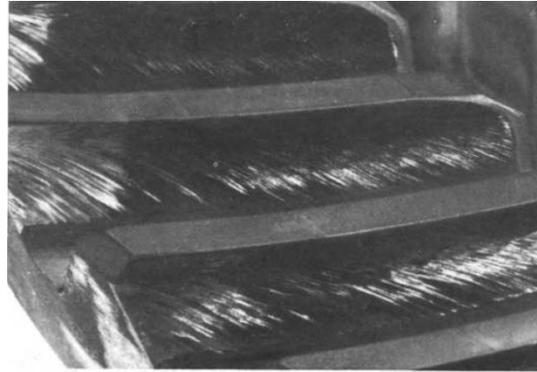
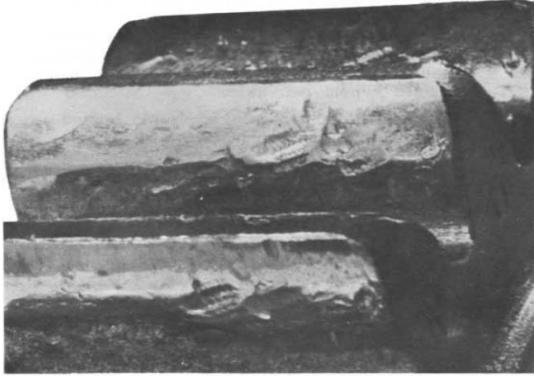


Figura 3.11. Flujo frio (Xtek Inc., 1967) **Figura 3.12. Ondulación** (Rexnord Industries, 1978)

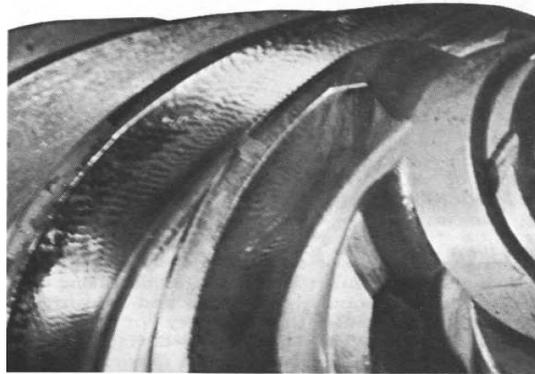


Figura 3.13. Arrugamiento (Xtek Inc., 1967)

Fractura de dientes

Este tipo de falla se caracteriza por que la pieza en cuestión es fraccionada en dos o más partes, la fractura del diente es resultado de someter al elemento a sobrecargas o ciclos de esfuerzo por encima del límite de fatiga del material, cada falla deja evidencias muy particulares, siendo relativamente sencillo identificar las fracturas debidas a sobrecargas o las que se deben a cargas cíclicas, evidencias como marcas de playa, una inclusión o grietas debidas al tratamiento térmico en el caso de las fallas por carga cíclica o por otra parte una apariencia fibrosa, es evidencia de que el material fue arrancado, que es lo más característico en fracturas por sobrecarga.

Fractura por fatiga

Es una de las fallas más comunes que se presentan de lento desarrollo, la falla progresiva se causa por cargas repetidas y generalmente ocurre en tres estados.

- I. Iniciación de grietas: Deformación plástica en áreas de concentraciones de esfuerzos o discontinuidades tales como muescas o inclusiones, dejando grietas microscópicas.
- II. Propagación de grietas: Las grietas crecen perpendicularmente al máximo esfuerzo que se presente
- III. Fractura: Cuando las grietas crecen lo suficiente sobreviene una fractura súbita

La fractura por fatiga se caracteriza por dejar una serie de marcas de playa visibles a simple vista, la mayoría de las fallas de este tipo se dan en la raíz del diente, donde los esfuerzos son los máximos.

La característica principal de este tipo de falla es la presencia de curvas semielípticas con marcas perpendiculares en la superficie de la fractura las cuales son generadas desde el foco de la fractura, siendo el producto de cargar cíclicamente al elemento en cuestión, dichas cargas no son lo suficientemente elevadas para provocar la fractura total, pero si tienen la capacidad para agrandar las grietas inherentes al material, la figura 3.14 muestra un ejemplo de la fractura por fatiga.



Figura 3.14. Fractura por fatiga

Fractura por fatiga a flexión

Un diente, al transmitir carga actúa como una viga empotrada experimentando los máximos esfuerzos en la raíz de la misma del lado en que se trabaje a tensión, si existe en dicha zona la presencia de entalladuras, inclusiones, pequeñas fisuras productos del tratamiento térmico y además esfuerzos residuales, es muy probable que la fractura comience en estos puntos.

Generalmente el diseño del perfil prevé los factores mencionados, estimando que la carga transmitida esté por debajo de la resistencia del material, entre otros aspectos importantes, por otra parte, medidas como aumentar el área de la raíz del diente y mejorar el acabado del mismo evitaran aún más la presencia de este tipo de fractura.

Fractura por sobrecarga

Una apariencia fibrosa de la falla generalmente caracterizan a fallas de esta naturaleza como indicativo de que el material fue arrancado abruptamente como consecuencia de cargar al engrane por encima de las condiciones establecidas en el diseño, se considera como una falla que inicia en la raíz del diente del lado sometido a tensión, las sobrecargas pueden deberse a desalineamiento del sistema o errores operativos, la figura 3.15 muestra un ejemplo de un caso de fractura por sobrecarga en un engrane recto.

Es muy difícil predecir este tipo de falla y por ende establecer medidas preventivas ya que no se sabe a ciencia cierta cuándo se presentará alguna sobrecarga en el sistema.

La fractura del diente producto de una sobrecarga presenta en la superficie de falla una fractura tenaz y fibrosa, esto se puede interpretar como que el material fue arrancado rápidamente, este tipo de evidencia solo la puede causar una carga elevada generalmente por encima de la resistencia a la tensión del material mismo.

La sobrecarga puede venir probablemente de una desalineación de los ejes de los engranes conjugados creando altas cargas durante el servicio, este se debe a que generalmente una desalineación genera valores de esfuerzos no considerados durante la etapa de diseño.



Figura 3.15. Fractura por sobrecarga

Fallas combinadas

En una gran parte de los casos de fallas en engranes, se presentan dos o más tipos de ellas, cadenas de eventos que conducen finalmente a la pérdida de funcionalidad del elemento en cuestión, es de vital importancia comprender todas y cada una de las fallas que se presentan en engranes a fin de determinar la secuencia de fallas que llevaron a la fractura.

A continuación se muestra en la tabla 3.1, un resumen con información relevante acerca del tipo de falla, identificación, causas y acciones correctivas.

Tabla 3.1. Resumen de tipos de fallas en engranes

Tipo de falla	Identificación	Causas	Acciones correctivas
Desgaste por pulido	-Tiempo alto -Superficie lisa y pulida (rugosidad del maquinado es asentada)	-Establecimiento contacto metal con metal debido a la falla en la lubricación - Aplicaciones de baja velocidad -Velocidad o viscosidad insuficiente para el desarrollo de una buena película elastohidrodinámica (lubricación límite)	-Generalmente no se establecen acciones preventivas -Sustitución del lubricante (aumento en la viscosidad) -Reducir la carga -Aumentando la velocidad de operación
Desgaste moderado	-Periodo relativamente alto de tiempo -Material removido en el adendo y dedendo -Línea de paso luce como una línea continua -Preferentemente en el dedendo	-Establecimiento contacto metal con metal debido a la falla en la lubricación -Lubricación Inadecuada o límite (película de aceite demasiado delgada para la carga) -Suciedad en el lubricante	-Sustitución del lubricante (aumento en la viscosidad) -Aumento de la velocidad (desarrollo de una mejor película de lubricante) -Aumentar la resistencia al desgaste del material
Desgaste excesivo	-Mayor cantidad de material removido -Línea de paso es muy predominante -Indicios de picaduras -Destrucción del perfil	-Consecuencia del desgaste moderado -Finas partículas abrasivas en el lubricante -Película de lubricante muy delgada	-Sustitución del lubricante (aumento de la viscosidad) -Aumento de la velocidad de operación(desarrollo de una mejor película de lubricante) -Asegurar una lubricación adecuada (revisión del sistema de lubricación)
Desgaste abrasivo	-Superficies de contacto se muestran planas y desgastadas -Marcas o estrías radiales en el adendo y dedendo en dirección del deslizamiento -Lomos prominentes en la línea de paso y en el punto inferior de contacto -Reducción del	-Presencia de materiales ajenos en el sistema de lubricación (arena) -Partículas metálicas en el lubricante; partículas provenientes del desgaste en cojinetes y herrumbre -Diferencia alta de dureza entre los	-Instalar un filtro o cambiar el actual por uno más fino -Sustitución del lubricante (incremento de la viscosidad) -Cambios periódicos de lubricante -Limpiar minuciosamente el tren de engranes después del uso

Tipo de falla	Identificación	Causas	Acciones correctivas
Picado inicial	<ul style="list-style-type: none"> -Presencia de pequeñas picaduras de 25 a 50 μm de profundidad -Picaduras usualmente en la línea de paso o justo por debajo de ella 	<ul style="list-style-type: none"> -Superficies en contacto no conformadas -Errores mínimos en el perfil -Irregularidades superficiales -Mala alineación 	<ul style="list-style-type: none"> -Mejorar el acabado superficial -Mejorar la precisión en el perfil del diente -Modificación del diseño a fin de reducir las cargas dinámicas en el engrane -En la mayoría de las veces este tipo de picado se considera como normal y no requiere acción preventiva alguna
Picado destructivo	<ul style="list-style-type: none"> -Presencia de picaduras de diversas formas y tamaños -presencia de picaduras cerca de la línea de paso en donde las fuerzas de fricción son mayores -Ruido durante la operación 	<ul style="list-style-type: none"> -Superficies altamente cargadas -Altos ciclos -Las cargas se acercan o están en la carga máximo permisible 	<ul style="list-style-type: none"> -Reducir la carga por debajo del límite de fatiga del material -Incremento de la dureza del material -incrementar la dureza solo en el engrane conductor (piñón) -Todas las del picado inicial
Astillamiento (<i>spalling</i>)	<ul style="list-style-type: none"> -Similar al picado destructivo -Picaduras largas y poco profundas -Picaduras no uniformes en forma -Se presenta en materiales de dureza media o en materiales totalmente endurecidos fuertemente cargados 	<ul style="list-style-type: none"> -Altos esfuerzos de contacto -defectos en la superficie -Excesivos esfuerzos internos producto de un mal tratamiento térmico 	<ul style="list-style-type: none"> -Aumento del límite de fatiga del material -Endurecimiento superficial -Rediseño de los elementos del engrane a fin de incrementar la capacidad de la carga
<i>Glaseado</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Etapas tempranas del escoriado -Usualmente se presenta en el dedendo del engrane conductor -Campos de finas picaduras de 2.5μm en profundidad -La falla regularmente sigue las marcas del maquinado 	<ul style="list-style-type: none"> -Lubricación marginal (incremento en la temperatura de operación) 	<ul style="list-style-type: none"> -Reducir la temperatura del lubricante

Tipo de falla	Identificación	Causas	Acciones correctivas
Escoriado moderado	-Marcas de lagrimeo -Falla en el adendo y dedendo	-Calor excesivo a causa de la falla en la lubricación	-Reducción de la temperatura de operación
Escoriado destructivo	-Marcas y rayas muy definidas en la dirección de deslizamiento -Material removido por arriba y debajo de la línea de paso -Línea de paso luce predominante -Destrucción del perfil -Material removido sobre la punta de los dientes -Transferencia de metal entre los engranes -Rápido desarrollo una vez que el lubricante falla	-Lubricación inadecuada, marginal o límite -Temperatura excesiva de operación -Carga superficial alta -Velocidad de operación alta -Cualquier factor que incremente la temperatura de operación del sistema -Baja dureza de capa endurecida -Alta presión en las áreas de contacto	-Sustitución del lubricante (incremento de la viscosidad) -Uso de lubricantes de extrema presión -Uso de fluidos sintéticos anti escoriación -Análisis cuidadoso del calor generado -Reducción de la carga, velocidad y temperatura de entrada del lubricante) -Rediseño de los elementos del engrane a fin de minimizar los esfuerzos generados
Escoriado localizado	-Similar al escoriado moderado -Escoriado concentrado en pequeñas aéreas	-Carga localizada por mal diseño -Mala alineación -Mala manufactura -Gradientes de temperatura	-Eliminar carga localizada -Alinear el sistema correctamente
Fractura por fatiga	-Grietas originadas en la raíz -Punto focal -Marcas de playa (marcas elípticas concéntricas a un punto) -Área pequeña con apariencia áspera (aspecto irregular indicando que esta fue la última porción en fallar) -La falla es cóncava	-Carga excesiva en los dientes (esfuerzos en la raíz por encima del límite de fatiga del material) -Altos esfuerzos inducidos por muescas, inclusiones metalúrgicas, grietas de tratamiento térmico y esfuerzos residuales	-Rediseño de los elementos del engrane a fin de incrementar la capacidad de carga del mismo -Empleo de materiales con alta resistencia -Granallado -Utilizar radios de filetes completos -Asegurar un buen tratamiento térmico obteniendo la mejor estructura posible así como minimizando la posibilidad de esfuerzos residuales inherentes al maquinado o tratamientos térmicos -Aumentar el área de la raíz del diente

Tipo de falla	Identificación	Causas	Acciones correctivas
Fractura por sobrecarga	<ul style="list-style-type: none"> -Apariencia fibrosa para materiales dúctiles (evidencia de que el material fue rápidamente arrancado o rasgado) -Apariencia sedosa o lisa para materiales duros -Comienza sobre el lado de la tensión de la raíz del filete -La falla es convexa 	<ul style="list-style-type: none"> -Causada por una sobrecarga que excedió la resistencia del material -Desalineamiento repentino (la falla ocurre en un extremo del diente generalmente en línea diagonal) -Dureza de capa endurecida elevada - 	<ul style="list-style-type: none"> -Debido a su carácter impredecible es muy difícil establecer acciones preventivas o correctivas -Incorporar alguna protección contra sobrecargas
Flujo plástico	<ul style="list-style-type: none"> -Deformación del material -Cizallamiento en los dientes -Flujo de material sobre la punta del diente 	<ul style="list-style-type: none"> -Acción del deslizamiento tiende a empujar el material en la misma dirección -Sobrecarga por elevado torque -Dureza de capa endurecida baja -Ausencia de capa endurecida -Esfuerzos de contacto por encima del límite de carencia del material -Asociado a materiales suaves también se presentan en materiales endurecidos fuertemente cargados 	<ul style="list-style-type: none"> -Reducir el esfuerzo durante el contacto (revisar alineamiento y errores en el ángulo de presión) -Incrementar la dureza superficial del material -Incrementar precisión del espaciamiento entre diente y diente -Reducir las desviaciones en el perfil a fin de reducir los esfuerzos generados durante la operación.

3.5 Causas de Falla en Engranés

Las principales fuentes de falla que existen se enuncian de la siguiente manera.

- I. Diseño defectuoso
Esta fuente se debe principalmente a errores en el diseño de la geometría de la pieza, especialmente en el perfil del diente, aristas o esquinas agudas las cuales generan altos esfuerzos en zonas localizadas provocando la irremediable falla.
- II. Selección inadecuada de material
Una incorrecta selección de material se debe principalmente a que no se cuenta con el conocimiento de las diversas sollicitaciones, condiciones de carga y medio ambiente a las cuales será sometido el engrane en cuestión.
- III. Tratamiento térmico defectuoso
Existen una serie de repercusiones asociadas a los tratamientos térmicos defectuosos tensiones internas y micro grietas, las cuales reducen significativamente la vida útil de la pieza en cuestión.
- IV. Manufactura defectuosa
Los procesos de manufactura con las cuales se fabrican los diversos tipos de engranes generalmente producen una gran cantidad de esfuerzos residuales y diversas irregularidades, es importante tener en cuenta las consecuencias que se generan a fin de establecer las medidas pertinentes para tratar de eliminarlos o reducirlos en la medida de lo posible.
- V. Maquinado incorrecto
Durante el maquinado del engrane, pueden existir imperfecciones superficiales, rugosidades que acortan de manera significativa la vida útil de la misma.
- VI. Montaje, operación y mantenimiento deficiente
Es normal que existan diversos errores durante el montaje de la pieza, desalineación provocando condiciones de esfuerzo anormales. Por otra parte, factores como una operación fuera de las condiciones, elevada temperatura de operación, mala lubricación comprometerán el desempeño de la pieza.

Es evidente que una determinada falla se puede dar por una o la combinación de algunas de las fuentes antes mencionadas, debido a esto se hace necesario un análisis exhaustivo del caso y la solución de los mismos constituye una herramienta para prevenir las posibles fallas en el futuro, validar, tanto los diseños como la selección de materiales, entre otras tantas ventajas.

3.6 Análisis Sistemático de Fallas en Engranés

Etapas del análisis de falla

La metodología para el análisis sistemático de falla en engranes se puede dividir en varias etapas, aunque cada falla en particular tiene diversas formas de manifestarse, el método es el mismo sin embargo la secuencia de análisis puede variar dependiendo de la falla en cuestión (Tovar, 2012).

I. Evidencia documental

En la medida de lo posible es necesario recopilar información relacionada con datos técnicos de la pieza: datos de fabricante, tratamientos térmicos, especificaciones, planos de montaje, dimensiones, método de fabricación y el tipo de función que desempeña.

II. Condiciones de servicio

Se debe de capturar todo tipo de información relacionada con las condiciones de servicio y mantenimiento del elemento en cuestión: Temperatura, presión y velocidad de operación, tipo de carga, tipo de servicio, condiciones de lubricante, tipo de lubricante, remplazo periódico de lubricante, condiciones de sellos, existencia de fugas, entre otras.

III. Inspección visual

En esta etapa se lleva a cabo una inspección visual de la pieza fracturada, se examina detenidamente la condición de la falla: Apariencia superficial, marcas, ralladuras, ubicación e inicio de la falla, textura, picaduras superficiales y deformaciones.

IV. Inspección física

En este apartado se establecen y seleccionan las características de las probetas para llevar a cabo los ensayos mecánicos según sea el caso, ensayos como pruebas de tracción, compresión, flexión o impacto o ensayos de dureza por otra parte. Igualmente en esta etapa se practicarán todas aquellas pruebas no destructivas que sean necesarias, inspecciones con líquidos penetrantes, partículas magnéticas, pruebas ultrasónicas y corrientes eddy para la detección de grietas y discontinuidades superficiales.

V. Determinación del tipo de fractura

Una vez que las etapas anteriores se han completado a partir de dichos datos es posible formular una hipótesis preliminar de la causa raíz que causó la falla en cuestión, dicha hipótesis será comprobada o desechada dependiendo de los resultados de las siguientes inspecciones.

VI. Análisis de composición

El análisis de composición muestra la composición real de los elementos que componen el material en cuestión, de esta manera es posible determinar si el material utilizado es el indicado para dicha aplicación.

VII. Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones

Como etapa final se tiene el análisis de resultados en donde se exponen toda la información obtenida durante las inspecciones y análisis anteriores de esta manera se desecha o se comprueba la hipótesis formulada en etapas tempranas del análisis de falla así una vez que se determina el tipo de falla es posible formular las acciones preventivas o correctivas, según sea el caso, para evitar la recurrencia de la misma.

Capítulo 4. Sistemas Expertos

4.1 Generalidades

Los Sistemas Expertos como una rama de la inteligencia artificial tratan de emular el razonamiento de un experto humano en una determinada área, hasta hace unas cuantas décadas se pensaba que muchos de los problemas de la vida diaria y profesional podrían ser solucionados única y exclusivamente por seres humanos; reconocimiento de voz y de patrones, la demostración de teoremas matemáticos así como la simple habilidad de pensar, observar, memorizar y razonar se consideraban aptitudes que solo poseían las personas. Sin embargo hasta hace unos cuantos años, gracias al gran desarrollo en el campo de la Inteligencia Artificial fue posible dotar a las computadoras de dichas habilidades, dando lugar a los sistemas expertos.

Un Sistema Experto es un sistema informático que simula los procesos de aprendizaje, memorización, razonamiento, comunicación y acción de un experto humano en una determinada rama de la ciencia, suministrando, de esta forma, un consultor que puede sustituirle con ciertas garantías de éxito. (Quintanar, 2007).

Hoy en día, gracias al rápido desarrollo de la tecnología, existen diversas definiciones de lo que es un Sistema Experto. En resumen un sistema de esta índole debe ser capaz de procesar y razonar la información existente, sea o no suficiente; debe de ser capaz de tomar decisiones adecuadas y explicar la naturaleza de las mismas, con el fin de darle solución a un determinado problema.

A la fecha existen un gran número de Sistemas Expertos en diversas áreas del conocimiento, el siguiente grafico muestra el desarrollo de este tipo de sistemas, clasificándolos por áreas de aplicación, la muestra fue de 2,500 sistemas expertos. (Castillo, 2003)

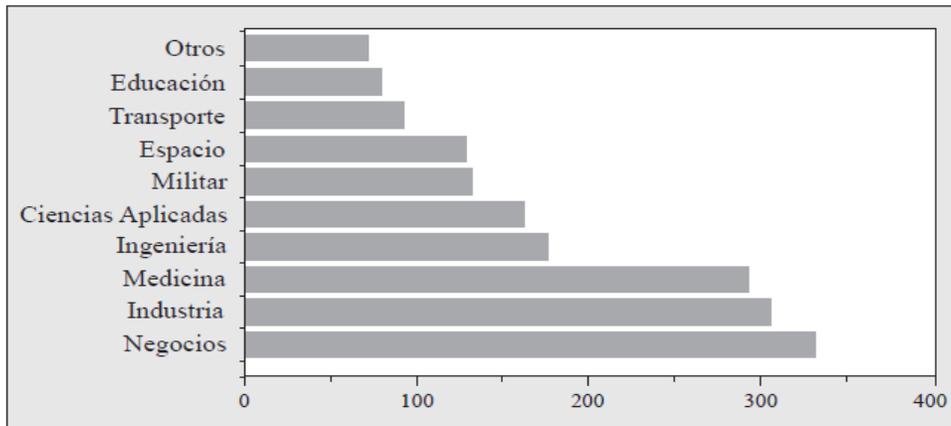


Figura 4.1. Campo de aplicación de los Sistemas Expertos. (Castillo, 2003)

En la figura 4.1 se puede apreciar el rápido desarrollo de los sistemas expertos en diversas áreas del conocimiento humano, principalmente en la industria y en el campo de los negocios seguidos por los sistemas desarrollados para la medicina y la ingeniería, de esta manera se puede dar cuenta de la gran utilidad que tienen dichos sistemas en la vida profesional.

Existen diversos sistemas con los que se convive hoy en día, aplicaciones sencillas en donde los sistemas expertos son gran utilidad e importancia.

Tipos de Sistemas Expertos

Según sea la naturaleza de los problemas a resolver, será el tipo de Sistema Experto que se diseñara, existen dos tipos principales: determinísticos y estocásticos. (Armendáriz, 2005)

Los sistemas determinísticos son construidos a base de reglas, las cuales relacionan un conjunto de objetos bien definidos, este tipo de sistemas se les conoce como Sistemas Expertos basados en reglas, por que obtienen conclusiones basándose en un conjunto de reglas utilizando un mecanismo de razonamiento lógico.

Si bien es cierto que en la mayoría de los casos o problemas se trabaja con información incompleta o incierta, existen diversas propuestas para medir la incertidumbre: factores de certeza, lógica difusa y teoría de la evidencia, dichas medidas de cierta manera ponderan la base de reglas obteniendo una conclusión más certera ante información incompleta o escasa.

Por otra parte existe otra medida para tratar con la incertidumbre: la probabilidad. Los Sistemas Expertos que utilizan la probabilidad en su arquitectura se les conoce como Sistemas Expertos probabilísticos o estocásticos, los cuales hacen uso de algunos teoremas de la probabilidad para obtener conclusiones a partir de información incompleta o escasa, conocido como razonamiento probabilístico o inferencia probabilística.

Características de los sistemas expertos

Como se mencionó anteriormente, un sistema experto ayuda en el proceso de solución de un determinado problema, emula o auxilia al profesional durante dicho proceso manejando gran cantidad de información acerca del área del conocimiento en la que se maneje el problema en cuestión, a partir de la información disponible es capaz de llegar a conclusiones certeras de manera rápida e imparcial, debido a que el conocimiento contenido en el sistema es producto de muchos expertos en el área, teniendo diversidad de criterios durante el análisis. A su vez el sistema ayuda ante la ausencia de expertos, dando lugar a que aún los profesionistas con una formación básica en ingeniería o con poca experiencia en los análisis de falla de elementos mecánicos puedan llegar a soluciones correctas en tiempo y forma adecuada siendo de esta manera más productivos cada quien en su área de desarrollo.

4.2 Estructura de un Sistema Experto

Los componentes principales e indispensables en la arquitectura de un Sistema Experto son la base de conocimiento, la cual contiene las variables y el conjunto de reglas que definen sistema como tal y el motor de inferencia, que se encarga de obtener las conclusiones aplicando la lógica clásica a dichas reglas. Una regla es una preposición lógica que relaciona dos o más objetos y está formada de dos partes, la premisa y la conclusión.

Base de conocimiento

La base de conocimiento conforma la parte medular de un Sistema Experto, contiene el conocimiento efectivo y heurístico de un tema en específico, dicho conocimiento se representa mediante una notación específica: reglas, predicados, redes semánticas y objetos.

El conocimiento heurístico, un tanto menos estricto que el conocimiento efectivo, se basa en la experimentación y la experiencia, el conocimiento adquirido de la buena práctica y del buen juicio, el conocimiento producto de buen inferir. Generalmente dicho conocimiento se representa mediante una regla, la cual se compone en: una parte SI (la condicional) y por otra parte ENTONCES (la consecuencia), de esta manera si la parte SI se satisface por tanto la parte ENTONCES puede ser concluida, de esta manera es como funciona una Sistema Experto basado en reglas.

La base de conocimiento contiene el conocimiento especializado, extraído directa o indirectamente del experto humano en un área en específica, en otra palabras es el conocimiento en general sobre el dominio en el que se trabaja, cabe destacar que la base de conocimiento es independiente del motor de inferencia, por tanto es relativamente fácil actualizar el conocimiento ya sea con el fin de corregir o robustecer el sistema como tal.

De esta forma es como un conjunto de reglas puede llegar a emular el razonamiento de un experto humano, el sistema puede contener tantas reglas como sea posible y el encadenamiento de las mismas nos lleva a conclusiones más certeras.

Motor de inferencia

Una vez que el conjunto de reglas está definido, el motor de inferencia se encarga de encadenar dichas reglas, evaluando la parte de la condicional, disparando nuevas reglas e incluso concluyendo a partir de las mismas, recorriendo la base de conocimientos con el fin último de alcanzar una solución, todo esto se realiza a partir de la información proporcionada por el usuario acerca de un problema en específico, llamada base de hechos.

Como se mencionó anteriormente, la determinación de una cierta solución se lleva a cabo mediante el encadenamiento de reglas de la base del conocimiento, dicho encadenamiento se puede dar de dos maneras posibles: encadenamiento hacia atrás o encadenamiento hacia adelante.

En el encadenamiento hacia adelante, se parte de hechos disponibles, proporcionados por el usuario, y se buscan reglas que satisfacen dichos hechos, generalmente dicha forma de inferencia sigue los siguientes puntos:

- Identificar las reglas que se pueden aplicar a partir de la información proporcionada por el usuario a fin de evaluar las condicionales de dichas reglas.
- Si en alguna regla se cumple, la parte condicional se ejecuta la parte de la conclusión, lo cual puede disparar nuevas reglas o en el mejor de los casos concluir acerca del problema con que se trabaja.

En el encadenamiento hacia atrás, en la mayoría de los casos es guiado por objetivos, es decir se comenzará por el objetivo y se ira retrocediendo encontrando la manera o el camino por el cual se puede obtener dicho objetivo a partir de los hechos proporcionados, en síntesis lo que se busca, son los hechos necesarios a modo de probar una determinada hipótesis.

Por otra parte, uno de los complementos importantes de un Sistema Experto es la interfaz de usuario, mediante la cual se facilita la descripción del problema del usuario a la máquina, además un buen sistema experto debe contener un módulo de explicación, diseñado principalmente para aclarar al usuario el modo por el cual se llevó a cabo la conclusión o resolución de dicho problema.

Componente explicativo

El componente explicativo es el encargado de mostrar el camino por el cual el motor de inferencia llegó a las conclusiones finales, las reglas que se dispararon en la base del conocimiento, a partir de la información de entrada permitiendo relacionar dichos datos con la solución del problema en cuestión.

Interfaz de usuario

La interfaz de usuario es el componente del sistema experto que ayuda al mismo en la captura de los datos precisos que el análisis requiere, evitando la entrada de datos erróneos, es una vía de comunicación eficaz entre el usuario y el sistema el cual debe incorporar mecanismos adecuados para mostrar y obtener la información en forma fácil y amigable.

Shell

Una vez que se cuenta con la información en la base del conocimiento representada mediante un determinado número de reglas lógicas, es necesario un programa computacional que facilite la inserción de las mismas así como su manipulación dando lugar a los mecanismos de inferencia, este programa a la vez debe de ser capaz de contener la interfaz de usuario además de un componente explicativo, en palabras simples un Shell es una herramienta en donde la programación del Sistema Experto se facilita sin la necesidad de dominar lenguajes de programación avanzados, hoy en día existen diversas Shells para el desarrollo de sistemas expertos, cabe destacar que se debe de seleccionar el Shell de acuerdo a los requerimientos del sistema ya que la mayoría sirve para aplicaciones particulares.

4.3 Metodología para el desarrollo de Sistemas Expertos

El desarrollo de un sistema de esta índole no es tarea sencilla y menos cuando no se establece una metodología precisa, entre las fuentes consultadas se destacan las siguientes etapas a *grosso modo*:

- I. En primer lugar es necesario definir el tipo de problema a solucionar, a esta primera etapa se le conoce como planteamiento del problema es en donde se determina el objetivo principal así como el tipo de respuestas que se esperan del sistema experto.

- II. En segundo lugar es necesario la recopilación de información tanto de la literatura como la que proviene de expertos en el área del conocimiento donde se presenta el problema, a fin de construir la base de conocimiento del sistema.

El conjunto de las etapas anteriores comúnmente se le conoce como la fase de Adquisición del conocimiento la cual consiste principalmente en identificar los elementos involucrados en la solución del problema, la información recabada servirá para construir las reglas lógicas y de esta manera definir la interfaz de usuario teniendo especial interés en obtener la información necesaria del usuario del sistema, esta podría ser la fase más tardada en el desarrollo del mismo.

- III. A partir de la información recabada en la tercera etapa se diseña el sistema como tal, la parte medular del mismo, base de reglas, motor de inferencia, componente explicativo así como la interfaz de usuario, esta podría ser la etapa más tardada durante el desarrollo, a partir de los requerimientos que demande el sistema tales como: tipo de sistema, tamaño de la base de conocimiento (número de reglas), tipo de mecanismo de inferencia (encadenamiento hacia adelante o hacia atrás), características del componente explicativo e interfaz de usuario, como parte final de esta etapa es necesario la selección del Shell que se ajuste a dichas necesidades.
- IV. Una vez que la etapa de diseño se completó se procede a la construcción del sistema experto, para ello es necesario que el desarrollador tenga conocimientos del lenguaje de programación en el que se maneja el Shell seleccionado.

Las etapas anteriores conforman la fase de representación del conocimiento, como se mencionó anteriormente, a partir de información recabada una vez sintetizada se procede a construir las reglas que gobiernan la solución del problema, las reglas no son más que la abstracción de las relaciones causa-efecto, relaciones entre las posibles acciones con las posibles soluciones de un determinado problema, las estructuras que mejor se adaptan a los lenguajes de programación son las de control de decisiones (SÍ-ENTONCES/DE LO CONTRARIO).

- V. La siguiente etapa después de la construcción del sistema es de probar y refinar el sistema en cuanto a su funcionamiento, corrigiendo fallas e incorporando mejoras al diseño inicial.

4.4 Razonamiento Basado en Reglas

Diversos son los problemas de la vida diaria que son gobernados por reglas deterministas, dichas reglas son una de las metodologías más sencillas utilizadas en la construcción de un sistema experto, es decir que en situaciones determinísticas, las relaciones entre objetos se representan mediante un conjunto de reglas, por tanto la llamada base de conocimiento contendrá el conocimiento de un determinado problema, un conjunto de objetos y reglas que dictan la relación entre los objetos participantes. (Gutiérrez, 2001)

La estructura básica de una regla contiene las siguientes partes:

- La expresión lógica, la premisa o condicional, la cual puede contener una o varias condicionales que relacionan diversos objetos con la ayuda de conectores de tipo Y, O, o NO.
- La conclusión o consecuencia, la cual es representada después de la expresión lógica ENTONCES.

Por tanto la estructura básica de una regla es: “Si premisa ENTONCES conclusión” a este tipo de estructura se le denomina regla básica, cuando la regla involucra diversos objetos conectados por los operadores Y, O, o NO, se le denomina regla compuesta, de esta manera es como se crean las relaciones entre objetos dentro de la base de conocimiento.

Existen dos tipos de reglas, las cuales se describen a continuación:

I. Modus Ponens

Este tipo de regla es la más utilizada, como se mencionó, la regla lógica se compone de una premisa y una determinada conclusión, por tanto si se tiene la siguiente regla, “Si A es cierto, entonces B es cierto” en primer lugar se examina la premisa y si logra ser que “A es cierto” se concluye que “B es cierto” por medio de la regla *modus ponens*.

II. Modus Tollens

Esta regla se usa para obtener conclusiones igualmente simples como en la regla *modus ponens*, sólo que en este caso en primera instancia se examina la conclusión y de cierta manera es falsa entonces se concluye que la premisa es también falsa para el ejemplo de la regla anterior.

Estos dos tipos de trabajar con las reglas determinan las características del motor de inferencia, el cual se describirá a continuación.

El motor de inferencia en los sistemas basados en reglas posee características importantes, como se mencionó, este motor se encarga de buscar conclusiones a partir de los datos de entrada o base de hechos, los cuales disparan ciertas reglas en la base de conocimiento de esta manera se llega a conclusiones y que a su vez dichas conclusiones pueden o no disparar nuevas reglas.

Encadenamiento de reglas

El encadenamiento de reglas se utiliza para obtener conclusiones compuestas a partir de las conclusiones simples producto de los tipos de reglas antes mencionados, esto se logra cuando las conclusiones de algunas reglas coinciden con las premisas de otras reglas, dando lugar a nuevos hechos, disparando de esta manera nuevas reglas, llegando a conclusiones compuestas por un determinado número de reglas a partir de una cierta base de hechos.

El algoritmo de inferencia generalmente comienza con las reglas cuyas premisas son un hecho, de esta manera se obtienen conclusiones que se vuelven nuevos hechos para nuevas reglas, es un proceso continuo hasta que las reglas en la base de conocimiento se agoten, llegando de esta forma a la solución final del problema en cuestión.

Encadenamiento de reglas orientado a un objetivo

Este tipo de encadenamiento es gobernado por un objetivo, en primera instancia se selecciona alguna solución del problema en cuestión, el algoritmo navega en la base de conocimiento y busca el camino por el cual se llega a dicha solución, durante el proceso el sistema puede preguntar al usuario nueva información sobre elementos relevantes para la obtención del objetivo. De esta manera una vez que se encuentra el camino a la solución requerida, el sistema debe de ser capaz de explicar la serie de hechos que se deben de llevar a cabo para que dicha solución converja.

4.5 Metodologías para el manejo de la Incertidumbre en Sistemas Expertos

En la mayoría de las veces, al tratar de resolver algún problema se encuentra con información incompleta, escasa o incierta. Existen diversas fuentes de incertidumbre con las que se trata en la vida diaria, desde la simple percepción que varía de persona en persona respecto algún problema, hasta errores de medición

En situaciones inciertas es necesario apoyarse de algún método para cuantificar dicha incertidumbre, durante la construcción de la base de conocimiento de un Sistema Experto basados en reglas se introduce una medida para tratar con la incertidumbre de los datos de entrada o base de hechos, algunos ejemplos de estas medidas son (Gutiérrez, 2001):

- Factores de Certeza

Los factores de certeza se incorporan dentro de las reglas, ya sea en la premisa o en la parte de la conclusión o incluso en ambas, dichos factores se obtienen generalmente de experiencias, la combinación de dichos factores proporcionan una medida de certeza a la conclusión, con base en experiencias pasadas de cuando el mismo caso se presentó.

- Lógica Difusa

La lógica difusa hace uso de enunciados simples de un problema en específico en donde los datos de entrada son inciertos para tomar alguna conclusión efectiva, dichos enunciados son representados por funciones de membresía, estas funciones son combinadas de tal forma que a cualquier dato de entrada dentro de los valores disponibles tendrá una cierta salida o respuesta, la cual considera todos las soluciones dentro de los enunciados que contienen los datos de entrada.

- Probabilidad

La incertidumbre en este tipo de medida se maneja mediante teoremas de la probabilidad, en la mayoría de los sistemas expertos se hace uso del teorema de Bayes y de probabilidad condicional, de esta manera se puede cuantificar dicha incertidumbre, los Sistemas Expertos que incorporan o hacen uso de la probabilidad se les considera un tipo distinto a los Sistemas Expertos basados en reglas.

Capítulo 5. Diseño del prototipo

5.1 Metodología para el desarrollo del Sistema

La metodología utilizada durante el desarrollo del sistema experto de:

I. Documentación bibliográfica sobre la teoría de engranes

Esta etapa consistió principalmente en consultar literatura con respecto a la teoría de engranes: Características de funcionamiento, nomenclatura, materiales, tipos de engranes, características de servicio y generalidades con respecto a la lubricación del engrane.

II. Documentación bibliográfica sobre la teoría de análisis de falla

El propósito de esta etapa fue investigar a fondo la teoría de análisis de falla en elementos mecánicos: modos principales de falla, metodología para el análisis de falla, fuentes o causas principales de los diversos modos de falla para después ahondar sobre los modos de falla en engranes particularmente, separando dos importantes grupos de fallas en este tipo de elementos: a) pérdida de geometría del diente b) pérdida total o parcial del diente del engrane, seguido de una breve investigación sobre las principales causas de falla en elementos de este tipo, finalizando con el establecimiento del análisis sistemático de fallas en los mismos.

III. Documentación bibliográfica sobre el desarrollo de sistemas expertos

Esta etapa del proyecto tuvo como propósito principal investigar todo lo relativo a los sistemas expertos: generalidades, funcionamiento, estructura general, tipos de sistemas expertos así como la metodología para el desarrollo de los mismos finalizando con una breve investigación sobre las metodologías para el manejo de la incertidumbre en sistemas de esta naturaleza.

IV. Definición de las estructuras de la representación del conocimiento

De entre las estructuras utilizadas para representación del conocimiento en el desarrollo de sistemas expertos se definió el uso de reglas lógicas del tipo SI-ENTONCES-DE LO CONTRARIO por la facilidad de programación.

V. Selección de la plataforma de desarrollo del sistema

Este apartado se concentró en la búsqueda, selección del Shell y plataforma de la interfaz gráfica para el desarrollo del sistema experto identificando los requerimientos del sistema se comparó entre los diversos Shells existentes en el mercado para el desarrollo de sistemas expertos.

VI. Construcción de la base de conocimiento

Con base en la información recabada en etapas tempranas del proyecto se estructuró una serie de reglas lógicas para la determinación de la causa raíz de los diversos tipos de falla que se presentan en los engranes.

VII. Desarrollo del sistema experto

Esta etapa del sistema consistió principalmente en la programación e integración de la base de conocimiento con la interfaz gráfica del sistema.

VIII. Validación del prototipo

La etapa final de este proyecto fue la validación del sistema como tal, se tomaron diversos casos reportados en la literatura de análisis de falla en engranes, se alimentó al sistema con los datos disponibles de servicio, mantenimiento, desensamble así como los que resultan de una detallada inspección física y se corroboró que el sistema arrojará resultados semejantes a los que se concluyeron durante el análisis reportado.

5.1.1 Integración del conocimiento

Una vez que las primeras etapas de investigación del proyecto se completaron, el siguiente paso consistió en la integración de todo el conocimiento requerido para el desarrollo del sistema experto, el cual hace uso de la metodología utilizada en el análisis de falla aplicándolo a un elemento mecánico específico que a su vez debía de ser representado mediante un programa computacional, a continuación se enuncian brevemente las etapas de la integración del conocimiento:

- I. Identificación de los atributos y sus respectivos valores que caracterizan o diferencian una falla de otra en engranes.
- II. Identificación de las partes fundamentales de un sistema experto así como la forma de representación y programación del conocimiento en análisis de falla en engranes.

5.1.2 Estructuración del conocimiento

En la etapa de diseño y construcción del sistema experto, a fin de realizar un análisis sistemático de los casos alimentados al mismo, se definieron atributos y sus respectivos valores a fin de sintetizar el conocimiento, el cual se estructuró como se menciona en los siguientes incisos:

a) Datos generales del sistema

Esta etapa trata de todos los datos relativos al sistema en donde se produjo la falla en cuestión: Equipo al que pertenece, material del engrane, método de fabricación, tratamientos térmicos empleados, así como el tipo de función que desempeñaba el elemento de máquina.

b) Datos de servicio

Esta etapa trata acerca de la información con respecto al servicio del engrane: horas operativas, tipo de carga, tipo de servicio así como las condiciones generales del lubricante utilizado.

c) Datos de desensamble del sistema

En esta etapa se detallan los datos relativos al desensamble de la pieza que falló, durante esta etapa se deberá incluir datos acerca de la condición del lubricante, facilidad de desensamble, condición de pernos y sellos, existencia de fugas de aceite así como la detección de partículas ajenas en suspensión o precipitadas en el lubricante.

d) Inspección visual

Este apartado identifica todas las características visuales propias de cada falla: apariencia física, textura, geometría de una determinada falla, condiciones del perfil del diente así como la presencia de picaduras o marcas superficiales. De esta manera es posible diferenciar las posibles fallas que se pueden presentar en un engrane.

e) Inspección física

Esta etapa aborda todas las pruebas físicas destructivas o no destructivas que se practicarán en el análisis de falla en engranes de esta manera se busca comprobar las hipótesis planteadas en etapas tempranas del análisis.

f) Tipos de fallas en engranes

Este apartado contiene la información con respecto a los principales modos, tipos y grados de fallas en engranes, así como el impacto que tienen cada uno de los datos de las etapas anteriores.

g) Causas de fallas en engranes

Identificación de las causas probables dependiendo del tipo de falla.

h) Acciones correctivas y/o preventivas para fallas en engranes

Establecimiento de las causas correctivas y/ preventivas para evitar la recurrencia de la falla en cuestión, este apartado considera las acciones a implementar principalmente en los conceptos de diseño, condiciones de servicio, mantenimiento.

El principal propósito de esta estructuración es el de llevar un orden durante el análisis de un caso en específico mediante el sistema experto desarrollado durante este trabajo de tesis, se consideran las etapas de datos de entrada así como los resultados emitidos por el mismo.

5.2 Estructuras de Representación del conocimiento

El conocimiento acerca de los diferentes modos, fuentes y causas de falla en engranes se organizaron en reglas deductivas, las cuales tienen la cualidad de ser fácilmente adaptables a lenguajes de programación, de esta manera a través de rutinas en un programa de cómputo, dicho conocimiento proporciona una solución lógica y coherente a un determinado problema. A partir de una serie de datos de entrada o base de hechos, en una primera instancia se deben construir diagramas de dependencia los cuales tienen la estructura que se muestra en la figura 6.1.

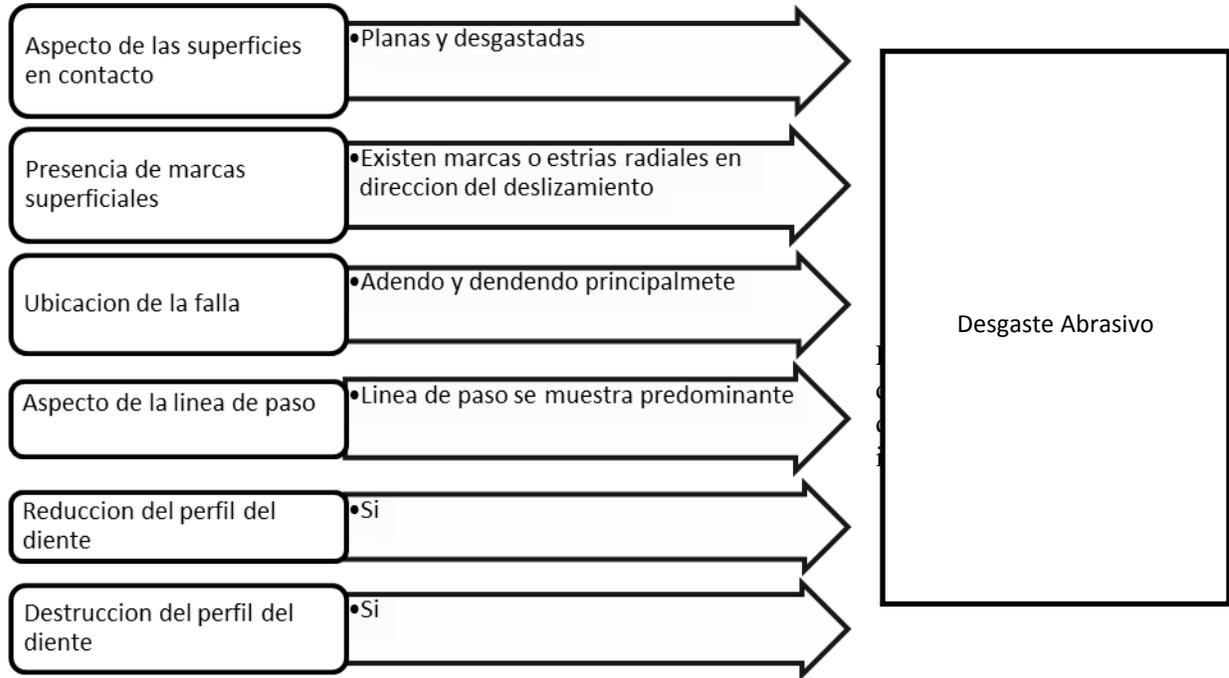


Figura 5.1. Representación del conocimiento.

Mediante los diversos atributos así como las diversas combinaciones de valores definidos, es posible caracterizar alguna falla en específico, a partir de un diagrama de dependencias es posible derivar una regla lógica general para el caso del desgaste abrasivo, la cual tendrá la siguiente estructura:

Regla ejemplo: Desgaste Abrasivo

SI Superficies de contacto se muestran planas y desgastadas
 Y existen marcas o estrías radiales en dirección del deslizamiento
 Y la falla se ubica en el *adendo* y *dedendo*
 Y la línea de paso de muestra predominante
 Y existe una reducción y destrucción del perfil del diente

ENTONCES Desgaste Abrasivo

Cuadro 5.1. Regla lógica

La manera en que a partir de un determinado número de reglas se obtiene una solución o una conclusión compuesta a un problema en específico, es el encadenamiento de las mismas, así en reglas lógicas con la estructura SI-ENTONCES-DE LO CONTRARIO, es necesario conocer ciertas

premisas las cuales disparan algunas reglas llegando a conclusiones intermedias que dispararán nuevas reglas, obteniendo así conclusiones o soluciones compuestas, de esta manera es como se produce el encadenamiento de reglas, este proceso se le conoce como encadenamiento hacia adelante el cual se ejemplifica en el cuadro 5.2.

Regla No.1: Picado destructivo

SI Presencia de picaduras de buen tamaño y diversas formas
Y presencia de picaduras en el *dedendo* del piñón o en el *adedendo* del engrane
Y Ruido durante la operación

ENTONCES Picado destructivo

Regla No.2: Fractura por fatiga

SI Picado destructivo
Y Grietas originadas en la raíz
Y Presencia de un punto focal
Y Existencia de marcas de playa
Y Presencia de un área pequeña con apariencia áspera (aspecto irregular indicando que esta fue la última porción en fallar)

ENTONCES Fractura por fatiga

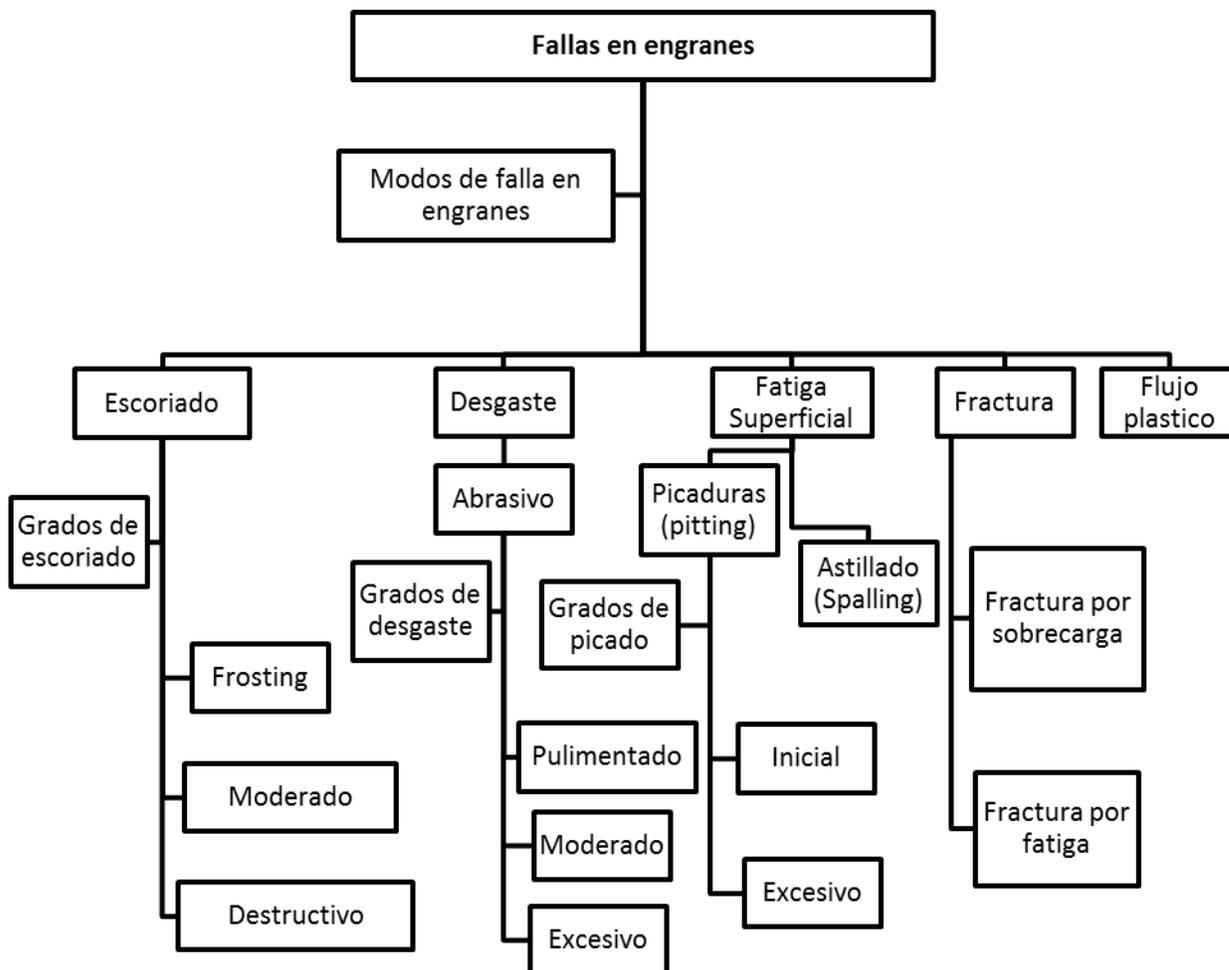
Cuadro 5.2. Encadenamiento de reglas

En este ejemplo que se muestra en el cuadro 5.2, la conclusión de la regla No. 1 forma parte de los atributos necesarios para llegar a una conclusión compuesta establecida por la regla No.2, este proceso se le conoce como encadenamiento de reglas en un sistema experto, lo que en teoría de fallas en engranes se le conocería como una falla combinada.

Si bien es cierto que en la mayoría de los casos una falla superficial conlleva a una determinada fractura no siempre puede ser así, en estos casos debido a la ambigüedad y complejidad de los procesos en fallas de engranes surge la necesidad de establecer coeficientes de certeza, los cuales estarán basados en la experiencia de algún experto en la materia para determinar la frecuencia y dependencia de un determinado tipo de falla con la fractura total o parcial del diente, por tanto la regla antes mencionada puede o no presentarse bajo los valores de los atributos que la conforman.

5.2.1 Árbol de Fallas en Engranés

El esquema 5.1 es una representación de los modos, tipos y grados de falla en engranes con el objetivo de tener una idea de la relaciones entre los conceptos mencionados.



Esquema 5.1. Árbol de falla en engranes

Con ayuda del diagrama es posible diferenciar entre modos, tipos y grados de las diversas fallas que se pueden presentar durante el servicio de un engrane, dicho árbol contempla el alcance de este trabajo de tesis.

5.3 Selección del Shell para el desarrollo del Sistema

Existen en el mercado diversos Shells con características y limitaciones particulares para el desarrollo de sistemas expertos, cabe destacar que no existe ningún Shell que por sí solo sea aplicable para describir todos los sistemas expertos en desarrollo, por el contrario se debe seleccionar el que mejor cumpla con los requerimientos del sistema.

Para la selección del Shell en primera instancia se tomaron en cuenta los requerimientos técnicos del sistema, tales como: capacidad de la base de conocimiento (número de reglas), tipo de inferencia (encadenamiento hacia adelante), complejidad de programación así como facilidad de integración con una interfaz gráfica, por otra parte el costo de la paquetería influyó notablemente durante la selección del mismo, cabe destacar que CLIPS es de los pocos Shells de uso libre.

Después de buscar y comparar diversos Shell que existen en el mercado, el Shell que cumple que más se amoldó a las necesidades y requerimientos, resultó ser la plataforma Clips (C Language Integrated Production System) la cual es una herramienta desarrollada por la NASA para facilitar el desarrollo de software con la principal función de modelar el conocimiento humano, a continuación se mencionan algunas ventajas del Shell seleccionado:

- Alta portabilidad, bajo costo y facilidad de integración.
- Permite la integración completa con otros lenguajes de programación como Java y C.
- Puede ser llamado desde lenguaje procedimental, realizando su función para después devolver el control al programa que lo llamó, por otra parte también clips se puede definir como lenguaje procedimental llamando a funciones externas para que realicen una determinada función dentro del mismo

Clips ofrece algunos elementos básicos de programación:

- **Constructores**

Son estructuras sintácticas identificadas por una palabra que permite definir funciones, reglas, hechos y clases principalmente, añadiendo dichas estructuras a la base de conocimientos

- **Funciones**

Una función es un código ejecutable que tiene como objeto principal el devolver algún valor o efecto

- **Tipos primitivos de datos**

Son utilizados para representar información de tipo simbólico, numérico o simplemente direcciones de hechos o instancias en el entorno de CLIPS

5.4 Interfaz gráfica

La interfaz gráfica se desarrolló usando lenguaje java mediante el IDE Netbeans, debido a que ofrece una programación bastante sencilla, de esta manera se dotó al sistema de una interfaz amigable que apoya al usuario en todo momento durante el proceso de análisis mediante comentarios, imágenes e iconos para después finalizar con la descripción completa de la falla resultante, generando en última instancia un resumen en un archivo de texto con la información relevante del análisis.

Por otra parte una ventaja más del uso de este IDE fue la facilidad de integración con el motor de inferencia programado en Clips, la comunicación entre el motor de inferencia y la interfaz gráfica es la parte más importante ya que sin una interfaz gráfica el programa carecería de un análisis completo debido a que dicha interfaz guía al usuario durante el proceso de la determinación de la causa de falla.

A continuación, en la figura 5.2, se muestra la pantalla de inicio del sistema experto.

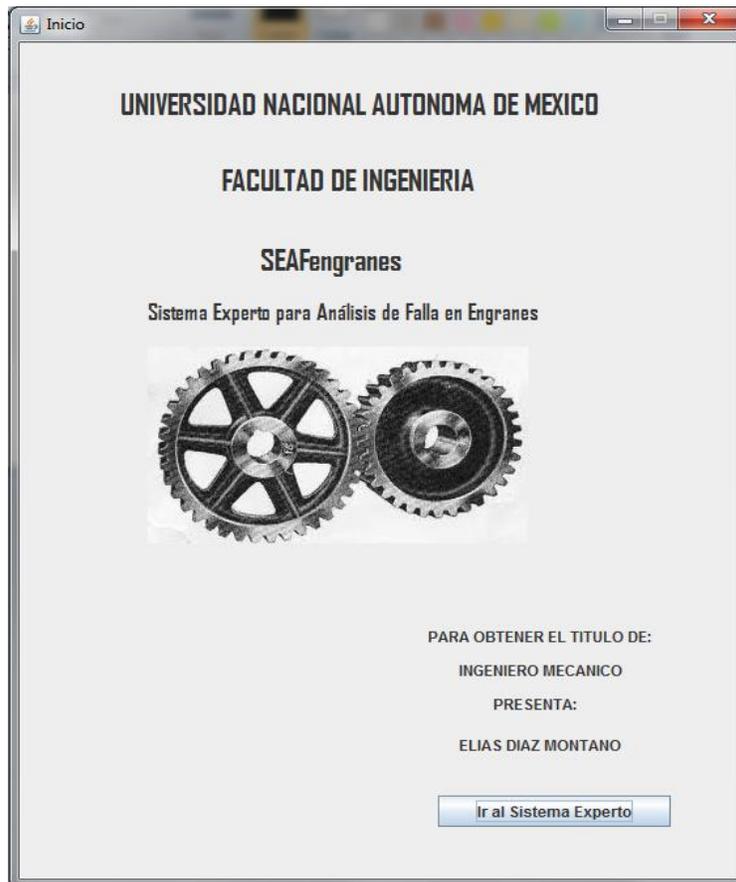


Figura 5.2. Pantalla de inicio del sistema experto

5.5 Construcción de la Base del conocimiento

Con base en la información recabada durante las primeras etapas del proyecto, se estructuró una serie de reglas lógicas que definen los distintos tipos de falla que se presentan en un engrane, teniendo como valores de los atributos datos del sistema, servicio, mantenimiento, desensamble y los que resultan de una detallada inspección física, de esta manera es posible concluir con una hipótesis preliminar de la causa raíz de la falla en cuestión, la cual deberá ser corroborada a través de diversas pruebas de laboratorio dependiendo de la naturaleza de la misma.

En principio, a partir de los diagramas de dependencia se derivaron una serie de reglas generales para todos los tipos de falla, las reglas generadas durante esta etapa, compuestas de un determinado número de atributos a su vez derivó en un número mayor de reglas con las combinaciones sin repetición de los atributos que las componen, esto se debe a que generalmente en la mayoría de los casos se cuenta con información incompleta, de esta manera si el sistema solo contará con las reglas originales sería demasiado inflexible ya que no podría dar una posible solución como resultado de no contar con la información completa para el análisis, por tanto a través de la generación de un número mayor de reglas el sistema arrojará resultados con una mayor certeza.

A continuación, en el cuadro 5.3, se presenta un fragmento de la descomposición de una regla general para un determinado tipo de falla:

Regla general: Fractura por fatiga	
Grietas en la Raíz: SI _____	1
Presencia punto focal: SI _____	2
Marcas de playa: SI _____	3
Apariencia áspera pequeña: SI _____	4
Geometría cóncava: SI _____	5
ENTONCES Fractura por fatiga _____	6

Cuadro 5.3. Regla general fractura por fatiga

La descomposición en las combinaciones sin repetición de los atributos que componen la regla general para desgaste abrasivo, está dada por la siguiente expresión:

$$C_{n, m} = \frac{n!}{m!(n - m)!}$$

Aplicando la expresión anterior se obtienen las siguientes combinaciones posibles sin repetición, es decir un número mayor de reglas que incluye todas las combinaciones de los valores de los atributos que pueden ser introducidos como datos de entrada al sistema.

$C_{5,1} = 5 \{1, 2, 3, 4, 5\}$

$C_{5,2} = 10 \{12, 13, 14, 15, 23, 24, 25, 34, 35, 45\}$

$C_{5,3} = 10 \{123, 124, 125, 134, 135, 145, 234, 235, 245, 345\}$

$C_{5,4} = 5 \{1234, 1235, 1245, 1345, 2345\}$

$C_{5,5} = 1 \{12345\}$

El número posible de combinación sin repetición es de 31 elementos, a continuación se construyen una regla de cada conjunto de combinaciones de 1 hasta 10 elementos a modo de ejemplo:

1.- Grietas en la Raíz: SI

ENTONCES Fractura por fatiga

2.- Presencia punto focal: SI

ENTONCES Fractura por fatiga

3.- Marcas de playa: SI

ENTONCES Fractura por fatiga

4.- Apariencia áspera pequeña: SI

ENTONCES Fractura por fatiga

5.- Geometría cóncava: SI

ENTONCES Fractura por fatiga

Cuadro 5.4. Descomposición de reglas

Continuación de la descomposición de reglas generales.

<p>6.- Grietas en la Raíz: SI</p> <p>Presencia punto focal: SI</p> <p>ENTONCES Fractura por fatiga</p>
<p>7.- Grietas en la Raíz: SI</p> <p>Marcas de playa: SI</p> <p>ENTONCES Fractura por fatiga</p>
<p>30.- Grietas en la Raíz: SI</p> <p>Presencia punto focal: SI</p> <p>Apariencia áspera pequeña: SI</p> <p>Geometría cóncava: SI</p> <p>ENTONCES Fractura por fatiga</p>
<p>31.- Grietas en la Raíz: SI</p> <p>Presencia punto focal: SI</p> <p>Marcas de playa: SI</p> <p>Apariencia áspera pequeña: SI</p> <p>Geometría cóncava: SI</p> <p>ENTONCES Fractura por fatiga</p>

Cuadro 5.5. Descomposición de reglas

De esta manera se puede observar que entre más datos sean introducidos, el sistema arrojará conclusiones cada vez más certeras, por otra parte también se observa que aunque se cuente con información escasa o incompleta será posible llegar a una determinada causa de falla con una cierta certeza, en ocasiones las reglas derivadas de la descomposición no tendrán los suficientes atributos para poder confirmar alguna hipótesis en estos casos la regla se desechará por obvias razones, tal es el caso de aquellas reglas de un solo elemento en la información se le considera casi nula.

La colección completa de reglas se incluye en el anexo 1.

5.5.1 Manejo de la Incertidumbre. Definición de factores de certeza.

Debido a que el conocimiento recopilado durante el desarrollo del sistema experto para análisis de falla en engranes en ocasiones es ambiguo y complejo, es normal que exista incertidumbre durante la aplicación del mismo, por el hecho de que dicho conocimiento proviene de distintos criterios de investigadores en la rama del análisis de falla en elementos mecánicos es necesario establecer factores de certeza para cada regla, de esta manera dependiendo de los datos de entrada suministrados al sistema, este deberá arrojar una determinada conclusión con un cierto grado de certeza.

Las reglas que componen la base de conocimiento del sistema están formadas por diversos atributos y sus respectivos valores, combinaciones específicas de los mismos diferencian una regla de otra, es decir un tipo de falla de otro, cabe destacar que no todos los atributos poseen el mismo peso o importancia y que en algunas situaciones basta con la combinación de un par de los mismos para concluir de manera directa la presencia de alguna falla específica.

Los factores de certeza utilizados durante el desarrollo del prototipo de sistema experto son resultado de una investigación de diversos casos de análisis de falla reportados en la literatura, identificando en primera instancia los atributos que se presentan más comúnmente en los diversos tipos de falla en engranes, de esta manera las reglas que contengan dichos valores poseen factores de certeza altos en comparación a reglas que estén compuestas de valores de atributos que difícilmente se mencionen durante los análisis.

A continuación en la figura 5.3, se muestra la forma en la cual se determinaron los pesos de los diversos atributos y sus respectivos valores

Fractura por fatiga

Determinación de pesos de atributos							
Caso/Atributo	Grietas Raiz	Punto Focal	Marcas Playa	Apariencia Aspera	Geometría Concava	Picaduras	
1	1	0	1	1	1	0	4.00
2	1	0	1	1	0	1	3.00
3	1	0	0	1	0	1	2.00
4	1	1	1	1	0	1	4.00
5	1	1	1	1	1	1	5.00
Frecuencia Absoluta	5	2	4	5	2	4	18.00
Frecuencia Relativa	27.78%	11.11%	22.22%	27.78%	11.11%	22.22%	100.00%
% por caso	100.00%	40.00%	80.00%	100.00%	40.00%	80.00%	
Valor atributo simple	16.67%	16.67%	16.67%	16.67%	16.67%	16.67%	100.00%

No. Casos 5
No. Atributos 6

Figura 5.3. Determinación de pesos de atributos

La figura 5.3 es una tabla resumen en donde se muestra el concentrado de los atributos que se mencionan en los diferentes casos de análisis de falla de la muestra elegida, con base en la frecuencia absoluta de cada atributo se obtiene una frecuencia relativa, esta medida nos sirve para cuantificar qué atributo es el que está presente en la mayoría de los análisis y por tanto el que tiene una mayor importancia al concluir la falla en cuestión, el detalle de la determinación de dichos factores de certeza se muestra en el anexo 2.

Se puede observar que, estadísticamente, los atributos con un mayor peso en la determinación de una falla por fatiga: son la presencia de grietas en la raíz del diente y la presencia de marcas de playa en la superficie de la falla en cuestión, este tipo de análisis lleva a resultados más acertados ya que no se asignan pesos iguales a los diversos atributos que componen una regla, sino al contrario, los atributos menos mencionados durante los análisis son los que aportan porcentajes de certeza bajos en comparación a los mayoritariamente mencionados.

Por ejemplo, un caso en el cual se tenga evidencia de que existen marcas de playa, presencia de un punto focal, grietas en la raíz del diente así como una apariencia superficial áspera en una porción de la falla tendrá una certeza del 75 % mientras que en un caso que solo se tenga evidencia de una apariencia superficial áspera tendrá una certeza del 10%, dándonos a entender que ser que la falla sea de otra naturaleza, por ejemplo una fractura por sobrecarga en donde la apariencia áspera también forma parte de uno de los atributos y que además posee un mayor peso en la conclusión de la misma.

5.6 Análisis y diseño del sistema

La secuencia de solución del sistema es semejante a la que sigue en los casos de análisis de falla reportados en la literatura, a través de un análisis sistemático se busca encontrar el tipo de falla presente, en primera instancia el sistema recoge los datos obtenidos durante la una examinación en campo:

- Datos de sistema
Información con respecto a las características generales del sistema tales como equipo al que pertenece la pieza, así como información sobre el material, tratamientos térmicos y definición del tipo de engrane, figura 5.4.

The screenshot shows a software window titled "Datos generales". It contains several input fields and options:

- Equipo al que pertenece:** A text box containing "Laminadora".
- Fecha de falla:** A date picker showing "10/10/2012" with a "dd/mm/aaaa" label below it.
- Material ASTM:** An empty text box.
- Tratamiento térmico:** Two checkboxes: "Carburizado" (checked) and "Templado y revenido" (unchecked).
- Indique el tipo de engrane:** Four radio buttons with corresponding gear images:
 - Recto:** Selected. Image shows a standard spur gear.
 - Helicoidal:** Unselected. Image shows a helical gear.
 - Interno:** Unselected. Image shows an internal gear.
 - Cónico Recto:** Unselected. Image shows a bevel gear.
- Siguiete:** A blue button at the bottom right.

Figura 5.4. Pantalla de Datos de Entrada

- Datos de servicio

Los datos de servicio generalmente se refieren al tipo y horas de servicio, figura 5.5.

- Datos de mantenimiento
En este apartado trata sobre la información respecto al mantenimiento del sistema indicando principalmente la condición, características y remplazos del lubricante.
- Datos obtenidos durante el desensamble de la pieza en cuestión

Estos datos son obtenidos durante el desensamble del sistema en donde se presentó la falla, se debe observar principalmente la condición de pernos, sellos y existencia de fugas de lubricante.

Datos generales_continuacion

Datos de mantenimiento/servicio

horas operativas: 1500 [hrs]

Tipo de servicio: Continuo

Condición del lubricante: Buena Mala

Tipo de lubricante: Aceite mineral puro
 Aceite mineral AP
 Aceite compuesto
 Aceite sintético
 Grasas
 Reemplazo periódicos de lubricante

Datos de desensamble

Condición de lubricante a la hora del desensamble: Buena Mala

Partículas ajenas precipitadas o en suspensión en el lubricante

Condición de pernos y sellos: Buena Mala

Fugas de lubricante

Siguiete

Regresar

Figura 5.5. Pantalla de Datos de Servicio/Mantenimiento

Enseguida se pregunta sobre la condición de la falla como tal, conteniendo los siguientes atributos, los cuales se pueden identificar mediante una detallada inspección visual, figura 5.6.

- Apariencia superficial
- Marcas y rayaduras
- Ubicación e inicio de falla
- Textura de la superficie de falla
- Marcas Superficiales
- Deformaciones presentes
- Existencia de concentradores de esfuerzos

Figura 5.6. Pantalla de Datos de entrada

Una vez que se introduzca la información disponible del caso, el programa busca y activa las reglas de la base del conocimiento que contengan los valores de los atributos alimentados, para así establecer una posible causa raíz de la presente falla.

Enseguida, se presenta una descripción detallada de la falla en cuestión, definiendo el tipo y los grados de la misma así como las causas y acciones preventivas y/o correctivas a fin de evitar la recurrencia de la misma, acto seguido el programa muestra una ventana en donde se resume toda información introducida y concluida durante el análisis, generando finalmente un reporte en formato PDF del análisis en donde se muestran los datos relevantes del estudio.



Figura 5.7. Descripción de la falla

Las reglas generales se descompusieron en las diversas combinaciones sin repetición de los atributos y sus respectivos de valores que la conforman, asignando un coeficiente de certeza dependiendo de los mismos, de esta manera el programa será capaz de arrojar conclusiones aunque exista información escasa o incompleta.

En el caso en donde la información disponible no fuese suficiente, el programa de la misma forma concluirá que no se cuenta con la información mínima para realizar algún diagnóstico o realizará este con un menor grado de confianza. De esta manera se establece un análisis sistemático del caso evaluando todas aquellas cuestiones que caracterizan algún tipo de falla.

La información anterior es recibida mediante una interfaz gráfica, la cual hace la recolección de la información de manera correcta, con ayuda de estructuras bien definidas e imágenes evitando así la introducción de datos erróneos guiando al usuario durante el proceso de análisis, de esta manera existen una interacción continua entre el usuario y el sistema, permitiendo al programa sistematizar la información recibida y concluida.

El sistema por otra parte está diseñado para ser amigable con el usuario, a través de imágenes y descripciones, guía al usuario principiante en el tema del análisis de falla, con ayuda de las imágenes es posible tener una idea más clara de lo que pide el sistema para realizar un correcto análisis especialmente durante la etapa de la entrada de datos de la inspección visual.

Como se ha mencionado, la base de conocimiento se realizó sobre el Shell de CLIPS y la interfaz gráfica desde el lenguaje de Java con ayuda del IDE Netbeans teniendo como principal ventaja la facilidad de complementar y/o modificar la base de conocimiento así como la misma interfaz gráfica con el fin de mejorar cada vez más el sistema, teniendo la posibilidad de agregar nuevas reglas, imágenes, botones, descripciones, atributos y valores, por otra parte dichas plataformas tienen la capacidad de incorporar con cierta facilidad nuevos módulos de análisis de falla.

El sistema experto desarrollado en este trabajo de tesis es un prototipo de sistema experto en donde el diseño se enfocó en generar principalmente un sistema con un esquema general que pueda ser modificado, corregido y aumentado.

5.7 Programación del Sistema Experto

En primera instancia se programó la base de conocimiento del sistema experto, se definieron los nombres con los cuales se habrían de representar los atributos y sus respectivos valores así como los diversos tipos de falla que se presentan en un engrane.

A fin de lograr una comunicación correcta entre la interfaz gráfica y el Shell, los tipos de fallas se almacenaron en una plantilla con el objeto de obtener su localización rápidamente en la memoria una vez que el sistema así lo requiera, la plantilla tiene la sintaxis mostrada en la figura 5.5, (Giarratano, 2007).

```
CLIPS (Quicksilver Beta 3/26/08)

;;=====
;; SISTEMA EXPERTO PARA ANALISIS DE FALLA EN ENGRANES
;;=====

;;=====
;; Templates
;;=====

CLIPS>(deftemplate PerdidaGeometria
      (slot TipoFalla))
```

Figura 5.8. Sintaxis CLIPS

Las reglas almacenadas en la base de conocimiento del sistema tienen la siguiente sintaxis mostrada en la figura 5.8.

```
;;=====
;; DESGASTE ABRASIVO
;;=====

CLIPS> (defrule Regla1 (SupContDesgPlana s) (MarcasEstriasDirDeslizamiento s)
(LineaPasoPredominante s) (RedEspesorDiente s)
=> (assert (PerdidaGeometria (TipoFalla DesgasteAbrasivo))))

CLIPS> (defrule Regla2 (PerdidaGeometria (TipoFalla DesgasteAbrasivo))
=> (printout t " Diagnostico Desgaste Abrasivo " crlf))
```

Figura 5.9. Sintaxis CLIPS

En la figura 5.9, se puede observar los atributos de los cuales se conforma la regla para el desgaste abrasivo, la regla se dispara, si y solo si, los valores de los atributos están presentes, la conclusión de la primera regla dispara la segunda y de esta manera se imprime en pantalla el diagnóstico.

Esta acción se repitió para todas las reglas que conforman la base de conocimientos del sistema experto para análisis de falla en engranes.

El desarrollo de la interfaz gráfica desde la plataforma de Java se llevó a cabo mediante el IDE Netbeans, se generaron formularios para los diversos análisis, las variables se declararon de tipo público a fin de mantener el intercambio de información entre los mismos.

La entrada de información se lleva a cabo mediante botones de selección, los cuales son valores de atributos que pueden en algún momento activar o desactivar las reglas contenidas en la base de conocimiento, la declaración de valores de atributos desde la interfaz gráfica se muestra a través de la figura 5.10:

```
clips.reset();
if (rbPerdidaGeometria.isSelected())
{
    clips.assertString("(PerdidaGeometria_diente s)");
    AnalisisPerdGeometricaInicioJFrame A = new AnalisisPerdGeometricaInicioJFrame();
    A.setVisible(true);
    DefineModoFallaPredominanteJFrame.this.dispose();
}
else
{clips.assertString("(PerdidaGeometria_diente n)");}
```

Figura 5.10. Sintaxis Netbeans

Mediante el código anterior se le indica al programa que si el botón *rbPerdidaGeometrica* es seleccionado entonces el atributo *PérdidaGeometría* se declare como un hecho en el ambiente de CLIPS y que además muestre el formulario para análisis de pérdida geométrica.

La interfaz gráfica cumple con la principal función de recabar la información correcta y necesaria para llevar a cabo el análisis de falla, mediante valores de entrada predefinidos, imágenes y comentarios el sistema conduce al usuario a introducir la información precisa que requiere la base de conocimientos para formular alguna conclusión.

Una vez que todas las etapas de entrada de datos han sido completadas, el sistema muestra una pantalla que contiene la descripción, causa y acciones preventivas o correctivas de la falla en cuestión para después generar un reporte en un formato PDF donde se muestra un resumen de los datos tanto introducidos como los concluidos durante la ejecución del sistema, figura 5.11.

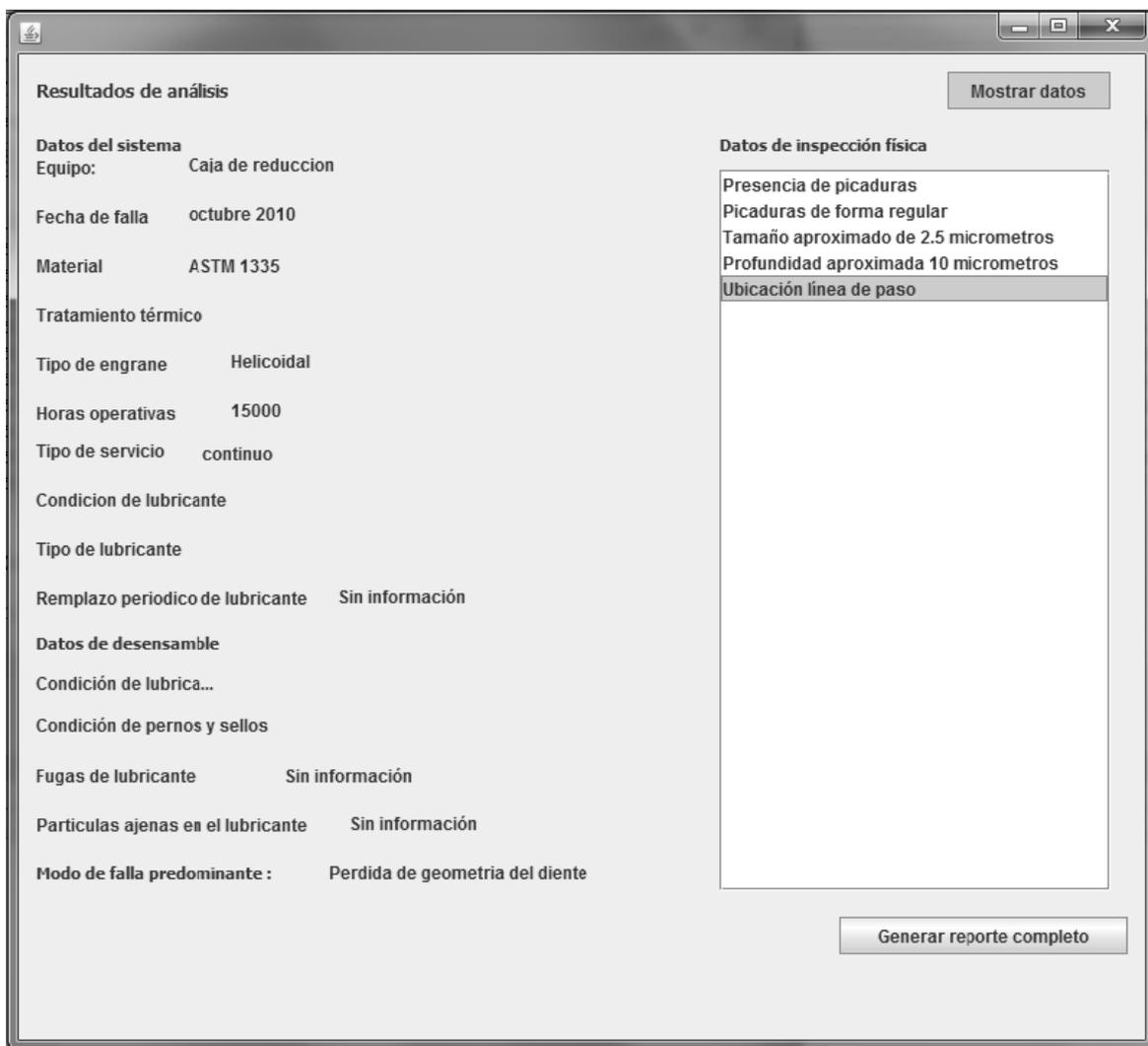


Figura 5.11. Descripción de la falla

Capítulo 6. Validación del Sistema

6.1 Validación del sistema

Con el fin de validar el funcionamiento del sistema experto desarrollado durante este trabajo de tesis se resolvieron algunos casos reportados en la literatura sobre análisis de falla en engranes esperando que los resultados arrojados por el sistema concordaran con los reportados en dichos casos, en primera instancia se presenta una breve descripción del análisis: contexto y metodología de análisis, para finalizar con los resultados obtenidos durante el mismo, de esta manera se alimenta al sistema con los datos disponibles de los casos reportados, todo esto se lleva a cabo para efecto de comparación.

6.2 Análisis de falla de un engrane helicoidal

Se reporta la falla prematura de un engrane de tipo helicoidal, figura 6.1, el cual pertenece a una caja de engranes utilizada en una laminadora de barras de acero en Tailandia, la salida de operación del sistema debido a la falla del engrane fue de 12 días con una pérdida de 3,840 toneladas de acero. La laminadora posee una capacidad de 20 toneladas por hora, el primer paso de laminación fue diseñado para tochos con una sección transversal y longitud de 100 mm² y 6 m respectivamente, posteriormente la sección transversal se incrementó en un 20 %, el motor original de 300 kW fue remplazado por uno de 600 kW para hacer frente al incremento en la potencia para laminar los tochos de mayor diámetro, acto seguido se presentó la falla de uno de los engranes que componen la reducción de la laminadora, el engrane falló prematuramente a las 15,000 horas, (Netpu, 2010).

Investigación

En primera instancia se realizó una inspección visual y macroscópica del elemento en cuestión, después se tomaron algunas muestras a fin de realizar pruebas metalográficas, microscópicas y medidas de dureza. Se llevó a cabo un análisis químico para determinar el tipo de acero del cual se encuentra fabricado el engrane.

Resultados

El examen visual mostró la fractura de dos dientes del engrane, se observó también la presencia de picaduras con formas regulares e irregulares con diversos tamaños sobre la zona de contacto, por otra parte la presencia de marcas de playa con un ancho aproximado de 44 μm.

El perfil de dureza se tomó sobre la línea de paso usando un durómetro Vickers se encontró un perfil de dureza que va desde los 713.2 HV (60.7 HRC) hasta los 440.5 HV (44.5 HRC) cerca del núcleo del engrane, dicho perfil corresponde con el obtenido tras un tratamiento térmico de carburizado.

El análisis de composición mostró que la composición del material del que fue fabricado el engrane corresponde a una aleación de acero, material típico en engranes para este tipo de aplicaciones, por otra parte mediante la examinación microestructural se encontró que la microestructura predominante era martensita templada cerca de la superficie mientras que en el núcleo se componía de una mezcla de ferrita y perlita, no se encontraron anomalías en esta parte del análisis.

Conclusiones

La presencia de picaduras de grado inicial y destructivo fue causada por altos esfuerzos de contacto como consecuencia de laminar tochos de mayor sección transversal, dichas picaduras promovieron el crecimiento de grietas, las cuales fueron creciendo hasta provocar la falla por fatiga del diente.

Medidas correctivas y/o preventivas

La modificación de los elementos del sistema se debe hacer con especial cuidado, se debe de analizar si el sistema tiene la capacidad de soportar la carga extra a la cual será sometido, por otra parte la disminución en los esfuerzos de contacto evitaran fallas por fatiga superficial principal causa de la fractura por fatiga

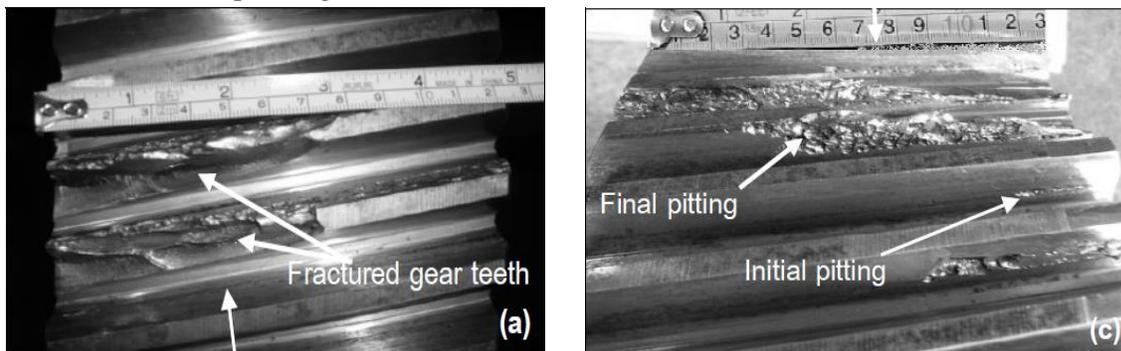


Figura 6.1. Análisis de falla de un engrane helicoidal (Netpu, 2010)

Diagnóstico SEAFengranes.

El sistema fue alimentado con todos aquellos datos que menciona el autor durante su análisis, a continuación se muestra un listado de los atributos y celdas seleccionadas en la interfaz del sistema

- Presencia de picaduras
- Picaduras en forma irregular
- Tamaño aproximado de 20 a 50 μm
- Ubicación de la falla: línea de paso
- Presencia de grietas en la raíz del diente
- Presencia de marcas de playa
- Geometría de falla cóncava
- Apariencia superficial áspera
- Apariencia superficial áspera en un pequeña área

Como resultado el sistema arrojó las siguientes pantallas.

Análisis SEAF engranes

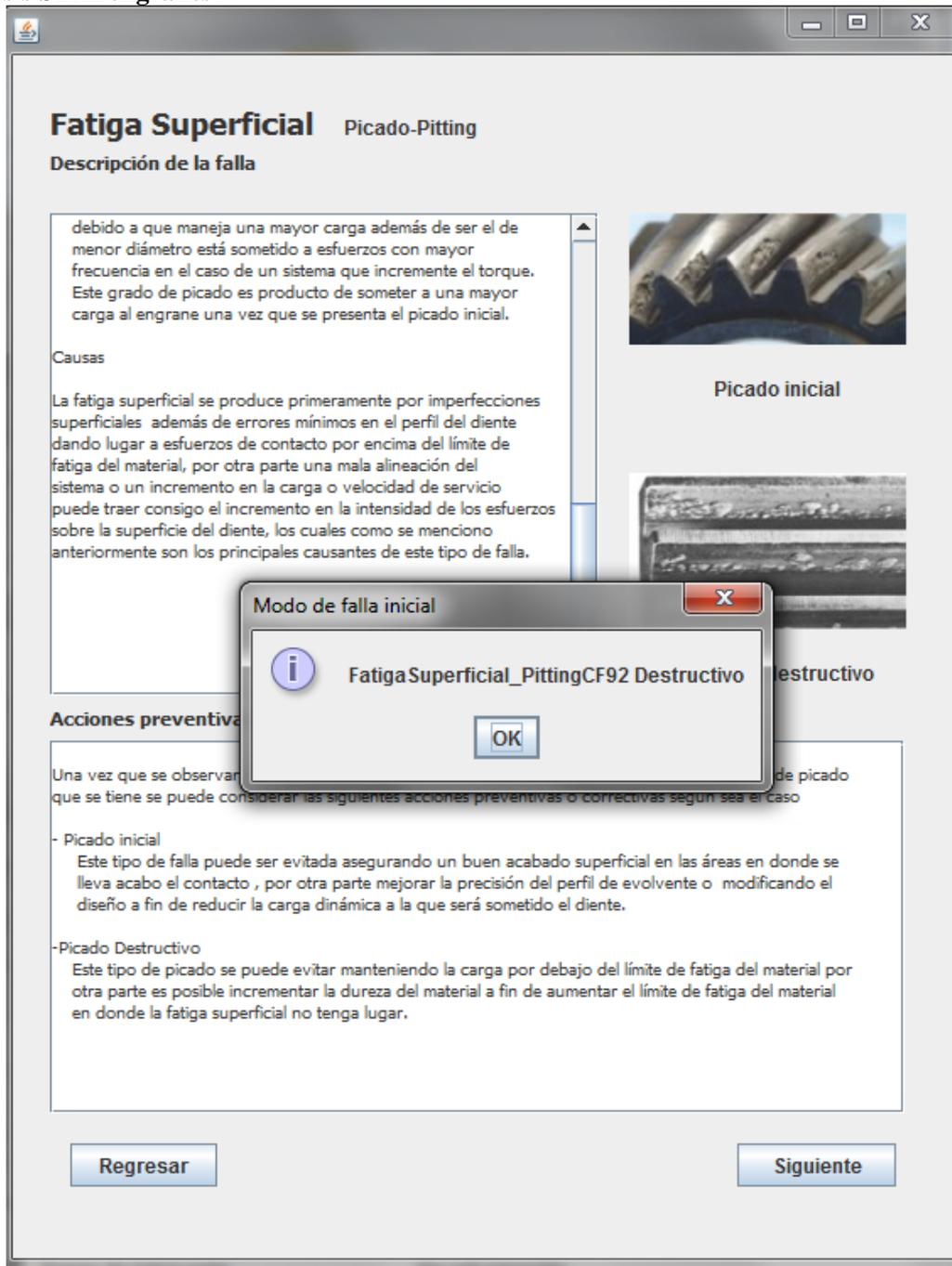


Figura 6.2. Pantalla de diagnóstico

Como primer modo de falla el sistema experto diagnóstica fatiga superficial, figura 6.2, en forma de picaduras del grado destructivo con un coeficiente de certeza del 92 %.

Análisis SEAF en Engranés

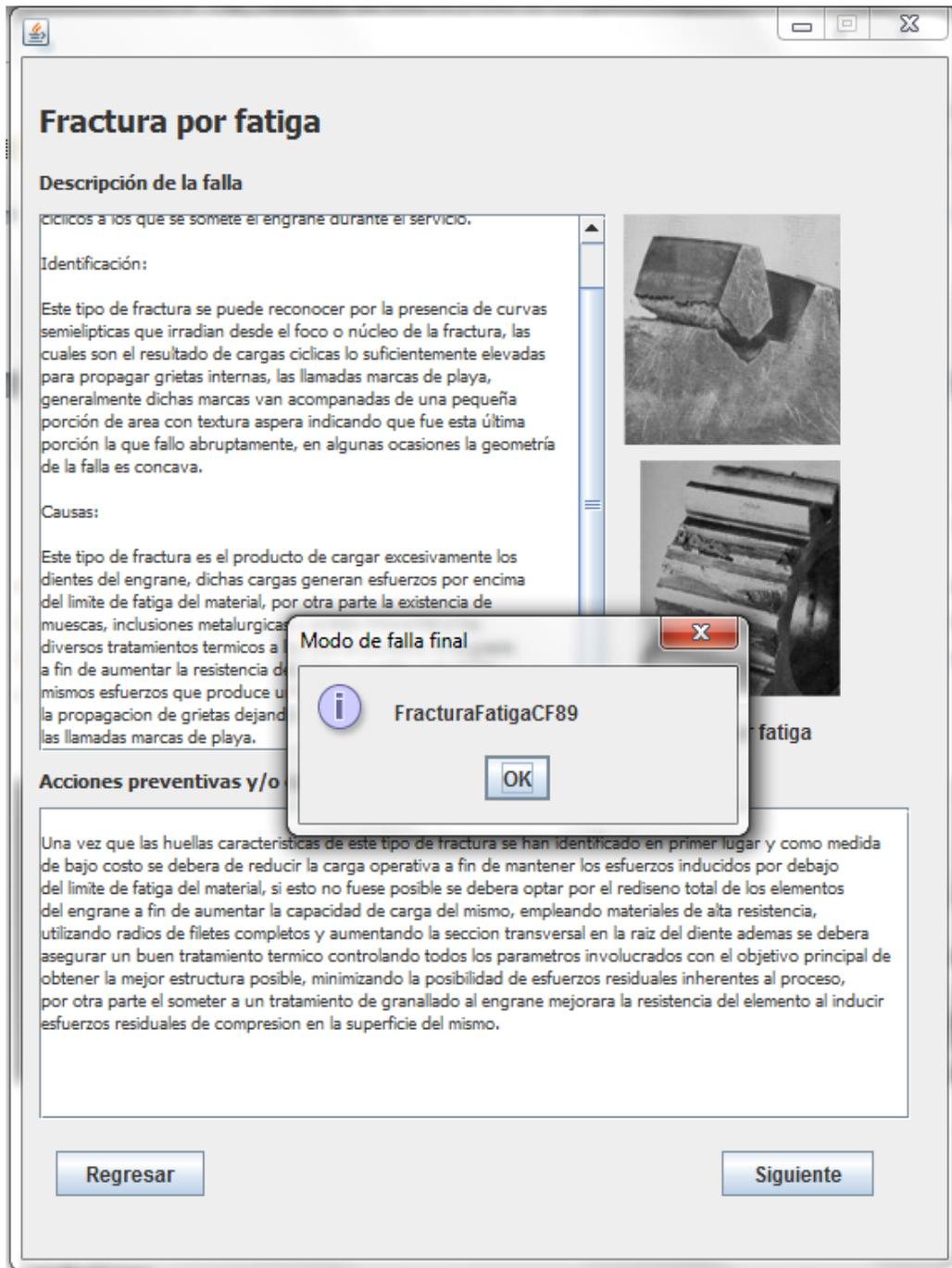


Figura 6.3. Pantalla de diagnóstico

Como modo de falla final, el sistema experto diagnostica fractura por fatiga, figura 6.3, con un coeficiente de certeza del 89 %.

Análisis SEAF engranes

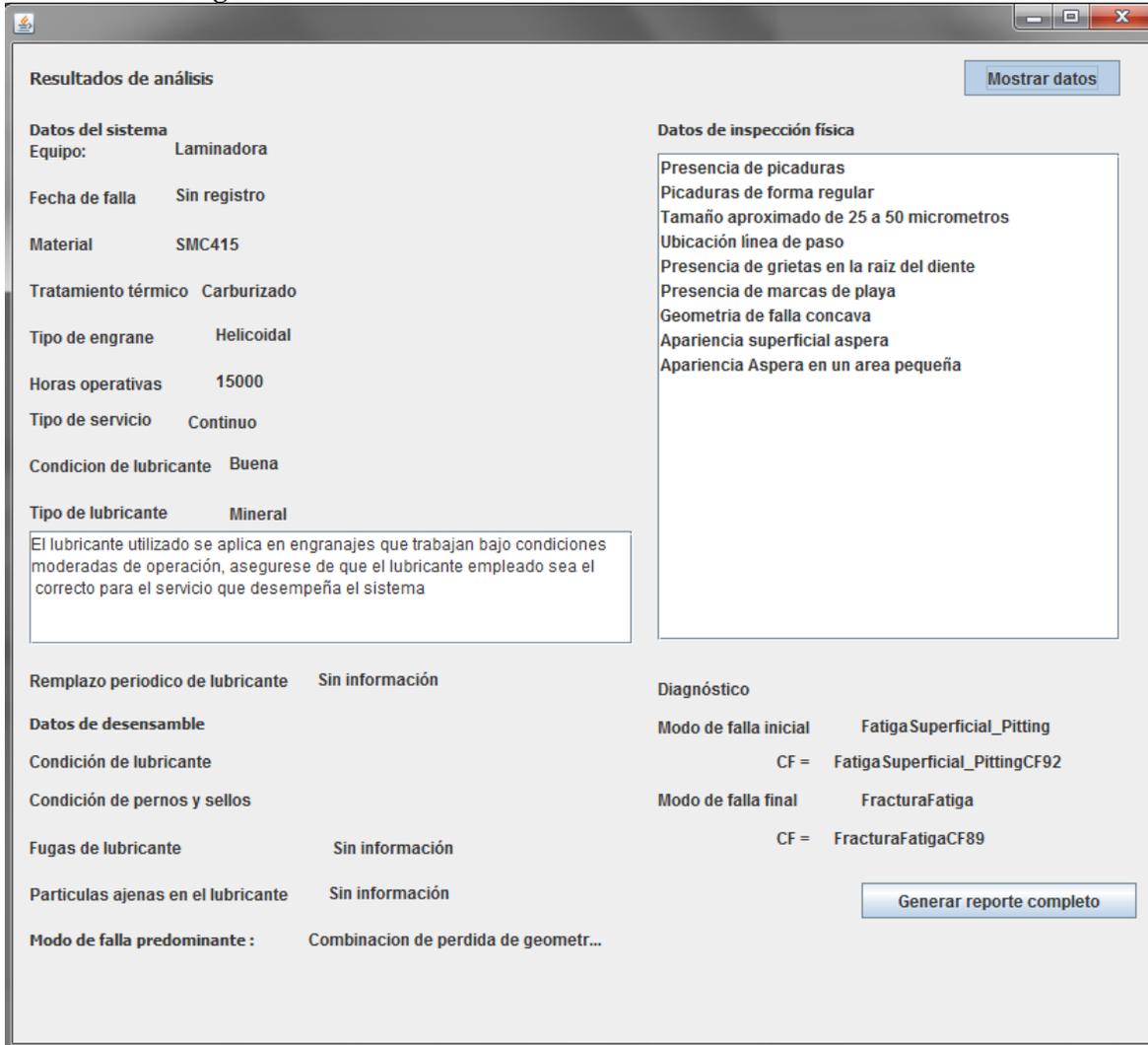


Figura 6.4. Pantalla resumen de diagnóstico

La figura 6.4, muestra el resumen de los datos introducidos así como el diagnóstico establecido de los tipos de falla presentes, en general el programa recomienda las siguientes acciones para evitar la recurrencia de la falla en cuestión:

- **Fatiga Superficial:** Este tipo de picado se puede evitar manteniendo la carga por debajo del límite de fatiga del material, por otra parte es posible incrementar la dureza del material a fin de aumentar el límite de fatiga del material en donde la fatiga superficial no tenga lugar.

- **Fractura por fatiga:** Una vez que las huellas características de este tipo de fractura se han identificado en primer lugar y como medida de bajo costo se deberá de reducir la carga operativa a fin de mantener los esfuerzos inducidos por debajo del límite de fatiga del material, si esto no fuese posible se deberá optar por el rediseño total de los elementos del engrane a fin de aumentar la capacidad de carga del mismo, empleando materiales de alta resistencia, utilizando radios de filetes completos y aumentando la sección transversal en la raíz del diente además se deberá asegurar un buen tratamiento térmico controlando todos los parámetros involucrados con el objetivo principal de obtener la mejor estructura posible, minimizando la posibilidad de esfuerzos residuales inherentes al proceso, por otra parte el someter a un tratamiento de granallado al engrane mejorará la resistencia del elemento al inducir esfuerzos residuales de compresión en la superficie del mismo.

Además muestra las posibles causas de falla del engrane en cuestión, las cuales se mencionan a continuación:

- **Fatiga Superficial:** Se produce primeramente por imperfecciones superficiales además de errores mínimos en el perfil del diente dando lugar a esfuerzos de contacto por encima del límite de fatiga del material, por otra parte una mala alineación del sistema o un incremento en la carga o velocidad de servicio puede traer consigo el incremento en la intensidad de los esfuerzos sobre la superficie del diente, los cuales como se mencionó son los principales causantes de este tipo de falla.
- **Fractura por fatiga:** Este tipo de fractura es el producto de cargar excesivamente los dientes del engrane, dichas cargas generan esfuerzos por encima del límite de fatiga del material, por otra parte la existencia de muescas, inclusiones metalúrgicas y grietas inherentes a los diversos tratamientos térmicos a los que es sometido el engrane a fin de aumentar la resistencia del mismo, pueden inducir los mismos esfuerzos que produce una carga de servicio, causando la propagación de grietas dejando como huella característica las llamadas marcas de playa.

El reporte completo de análisis de falla se incluye en el anexo 3.

6.3 Falla prematura de un engrane recto en un accesorio de tractor agrícola.

Este caso analiza la falla de una transmisión en un accesorio de tractor agrícola, se examinó detalladamente el engrane a fin de explicar las causas y establecer las acciones preventivas para evitar la recurrencia de la falla en cuestión, figura 6.5.

El accesorio para labrar la tierra es movido por el tractor y es altamente utilizado para mezclar la capa vegetal superficial de la tierra para recibir la semilla para el cultivo, (Akinci, 2005).

Investigación

En primera instancia se identificaron las características de la máquina así como las propias del engrane en cuestión: tipo de material mediante análisis químico, dimensiones del *adendo*, *dedendo*, espesor del diente entre otras, enseguida se realizó una inspección física para finalizar con la identificación de la posible causa raíz de la presente falla.

Resultados

La examinación visual mostró indicios claros de deformación así como flujo de material sobre la punta del diente, se observan las superficies de contacto planas y desgastadas, reducción en el espesor del diente y evidentemente la total destrucción del perfil del diente.

Por otra parte mediante el análisis químico se determinó que el material utilizado no es el requerido para dicha aplicación debido a su baja resistencia a la fractura así como baja dureza.

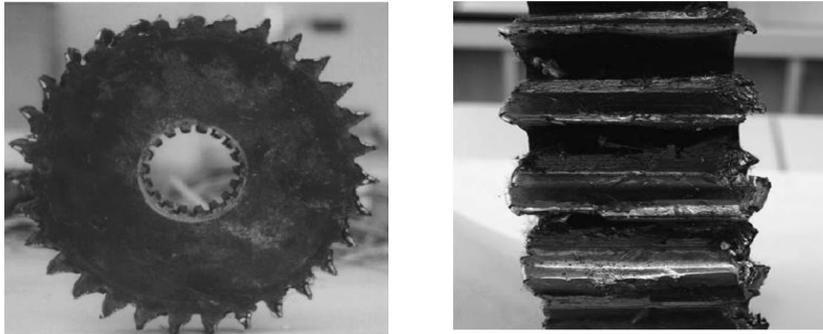


Figura 6.5. Análisis de falla de un engrane recto (Akinci, 2005)

Conclusiones

La falla se debe al desgaste abrasivo en combinación con la deformación plástica del material del engrane y las principales causas son errores en la etapa de diseño del diente así como una mala selección del material.

Acciones preventivas

Se recomienda utilizar un material con una resistencia superior, el texto recomienda particularmente el acero SAE 1050, por otra parte se sugiere revisar los parámetros de la etapa de diseño del diente en busca de posibles errores.

Diagnóstico SEAF engranes.

El sistema fue alimentado con todos aquellos datos que menciona el autor durante su análisis, a continuación se muestra un listado de los atributos y celdas seleccionadas en la interfaz del sistema

- Ubicación de falla: *Adendo*
- Reducción en el espesor del diente
- Destrucción del perfil del diente
- Superficies de contacto planas y desgastadas
- Línea de paso predominante
- Presencia de deformación
- Flujo de material sobre la punta del diente

Como resultado el sistema arrojó las siguientes pantallas.

Análisis SEAFengranes

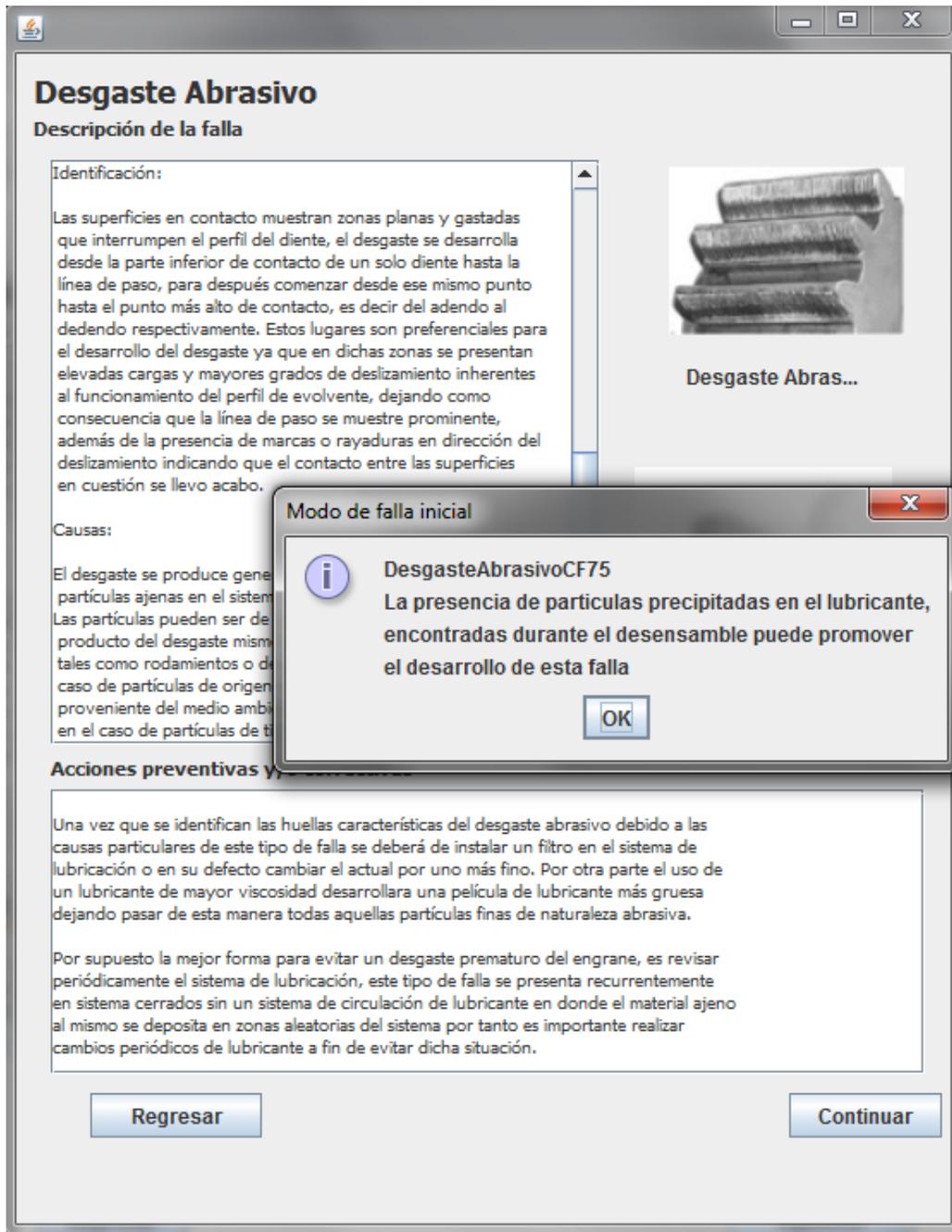


Figura 6.6. Pantalla de diagnóstico

Como primer modo de falla el sistema experto diagnostica desgaste abrasivo, figura 6.6, con un coeficiente de certeza del 75 %.

Análisis SEAFengranes

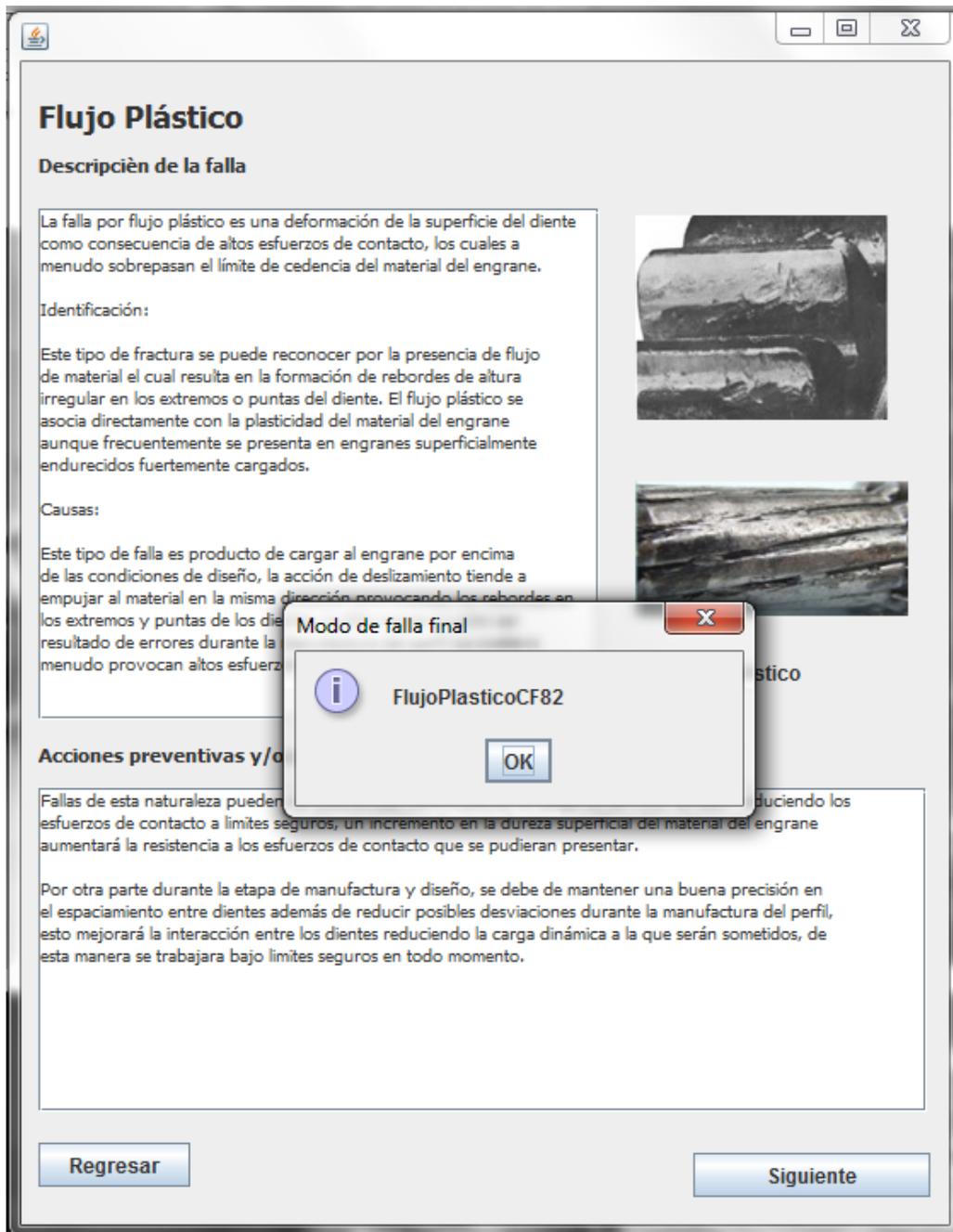


Figura 6.7. Pantalla de diagnóstico

Como modo de falla final, el sistema experto diagnostica falla por flujo plástico, figura 6.7, con un coeficiente de certeza del 82 %.

Análisis SEAFengranes

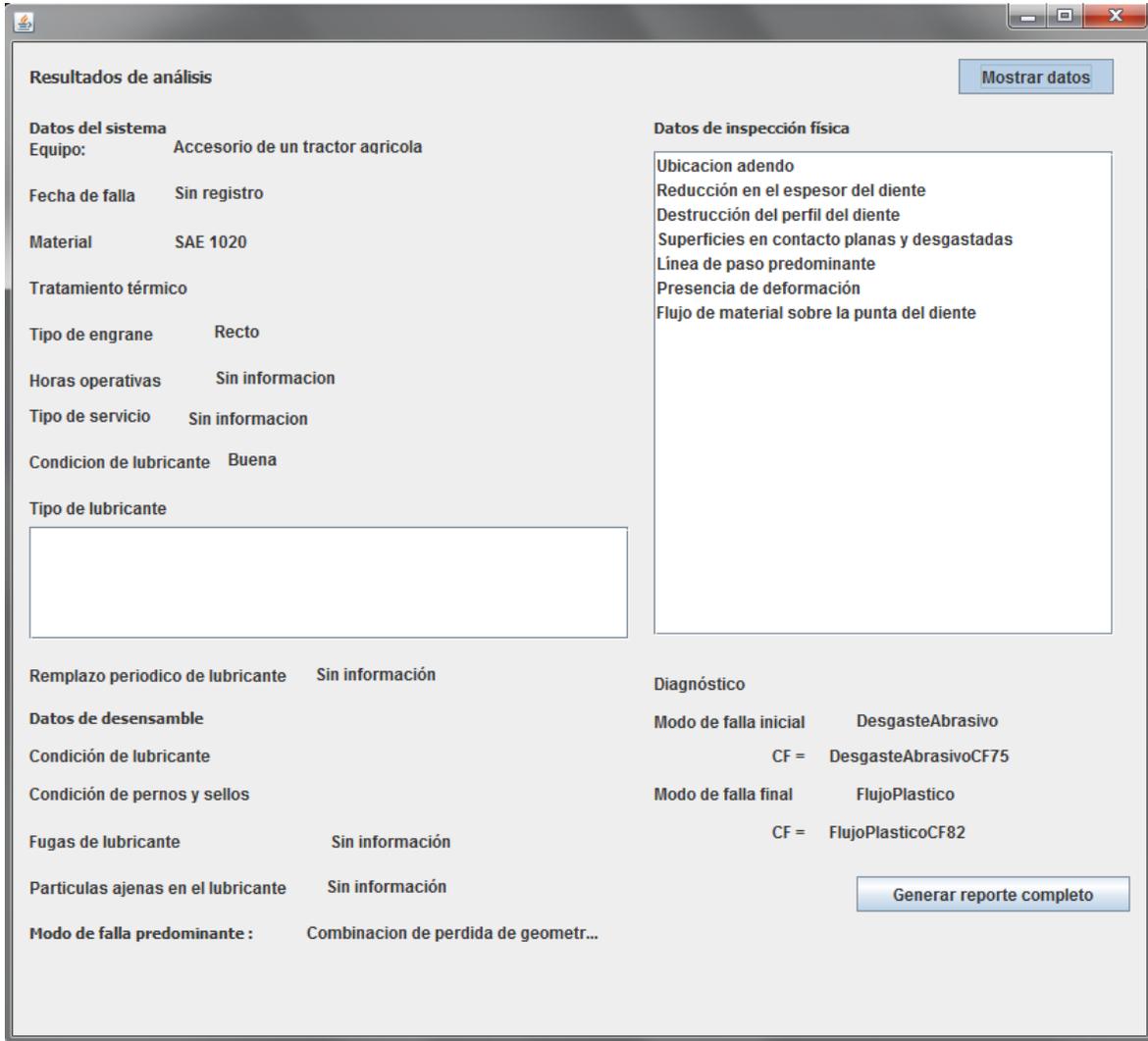


Figura 6.8. Pantalla resumen de diagnóstico

La figura 6.8, muestra el resumen de los datos introducidos así como el diagnóstico establecido de los tipos de falla presentes, en general el programa recomienda las siguientes acciones para evitar la recurrencia de la falla en cuestión:

- **Desgaste Abrasivo:** Una vez que se identifican las huellas características del desgaste abrasivo debido a las causas particulares de este tipo de falla se deberá de instalar un filtro en el sistema de lubricación o en su defecto cambiar el actual por uno más fino. Por otra parte el uso de un lubricante de mayor viscosidad desarrollará una película de lubricante más gruesa dejando pasar de esta manera todas aquellas partículas finas de naturaleza abrasiva.

- **Flujo plástico:** Por supuesto la mejor forma para evitar un desgaste prematuro del engrane, es revisar periódicamente el sistema de lubricación, este tipo de falla se presenta recurrentemente en sistema cerrados sin un sistema por tanto es importante realizar cambios periódicos de lubricante a fin de evitar dicha situación. Fallas de esta naturaleza pueden ser prevenidas disminuyendo la carga de servicio, es decir reduciendo los esfuerzos de contacto a límites seguros, un incremento en la dureza superficial del material del engrane aumentará la resistencia a los esfuerzos de contacto que se pudieran presentar.

Por otra parte durante la etapa de manufactura y diseño, se debe de mantener una buena precisión en el espaciamiento entre dientes además de reducir posibles desviaciones durante la manufactura del perfil, esto mejorará la interacción entre los dientes reduciendo la carga dinámica a la que serán sometidos, de esta manera se trabajará bajo límites seguros en todo momento.

Además muestra las posibles causas de falla del engrane en cuestión, las cuales se mencionan a continuación:

- **Desgaste abrasivo:** El desgaste se produce generalmente por la presencia de partículas ajenas en el sistema de lubricación. Las partículas pueden ser de origen metálico o cerámico, producto del desgaste mismo de otros elementos de máquina tales como rodamientos o desgaste del eje conductor en el caso de partículas de origen metálico, por otra parte arena proveniente del medio ambiente puede estar presente en el caso de partículas de tipo cerámico.
- **Flujo plástico:** Este tipo de falla es producto de cargar al engrane por encima de las condiciones de diseño, la acción de deslizamiento tiende a empujar al material en la misma dirección provocando los rebordes en los extremos y puntas de los dientes, la altas cargas pueden ser resultado de errores durante la manufactura del perfil los cuales a menudo provocan altos esfuerzos de contacto.

El reporte completo de análisis de falla se incluye en el anexo 4.

6.4 Análisis de falla de un eje de piñón cónico

Este trabajo estudió la falla prematura de un piñón cónico el cual perteneció a una caja de velocidades de un tractor agrícola, figura 6.9, las técnicas utilizadas durante esta investigación fueron: inspección visual, fractografía, metalografía, análisis químico, ensayo de dureza y por ultimo un análisis matemático teórico para calcular el estado de esfuerzos, (Ramón, 2010).

Investigación

En primera instancia se realizó una inspección general del estado del sistema al que perteneció el elemento en cuestión seguido de la recolección de muestras e información sobre el momento de la falla así como los datos técnicos de la máquina.

La inspección visual se llevó a cabo mediante observación directa y con ayuda de una lupa estereoscópica, la fractografía mediante microscopía electrónica de barrido por otra parte la metalografía y el análisis químico se realizó mediante microscopía óptica y espectroscopia de rayos X, respectivamente.

Resultados

La inspección visual mostró que en superficies de falla se observan marcas paralelas en forma de surcos así como una textura de la superficie de falla áspera, el análisis metalográfico que el material estaba constituido por martensita fina evidencia concluyente de que el engrane fue sometido a temple y revenido.

Por otra parte el ensayo de dureza mostro valores promedios de 63 HRC y 34 HRC para la superficie y el interior, respectivamente.

Conclusiones

Los valores, en su mayoría muestran estar en rangos recomendados, excepto por la presencia de martensita revenida en el centro del engrane producto de la elevada templabilidad del material originalmente de bajo contenido de carbono.

El engrane falló por fractura frágil posiblemente debida a la martensita revenida fragilizada.

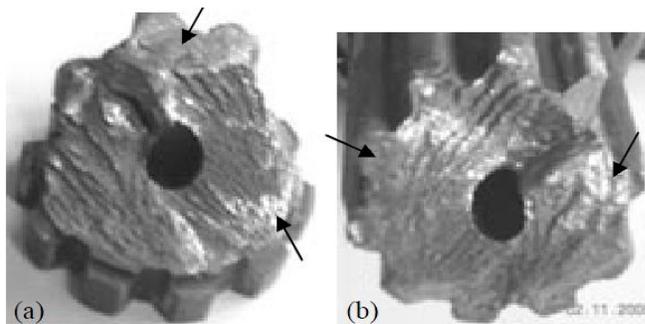


Figura 6.9. Análisis de falla de un eje piñón (Ramón, 2010)

Diagnóstico SEAF engranes.

El sistema fue alimentado con todos aquellos datos que menciona el autor durante su análisis, a continuación se muestra un listado de los atributos y celdas seleccionadas en la interfaz del sistema

- Geometría de falla convexa
- Apariencia superficial áspera
- Apariencia áspera en toda la superficie

Como resultado el sistema arrojó las siguientes pantallas.

Análisis SEAF engranes

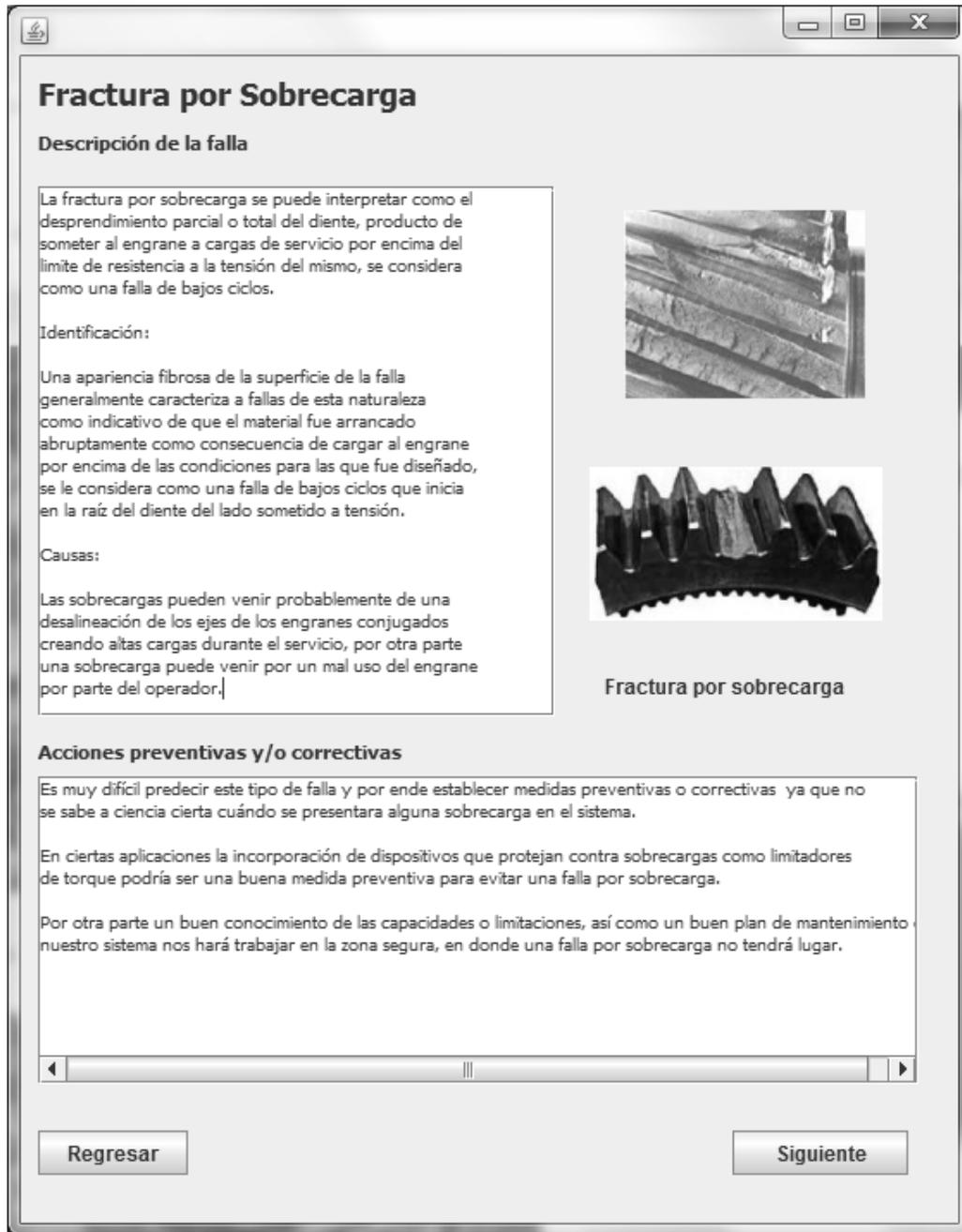


Figura 6.10. Pantalla de diagnóstico

Como modo de falla final, el sistema experto diagnostica falla frágil o por sobrecarga, figura 6.10, con un coeficiente de certeza del 82 %.

Análisis SEAF engranes

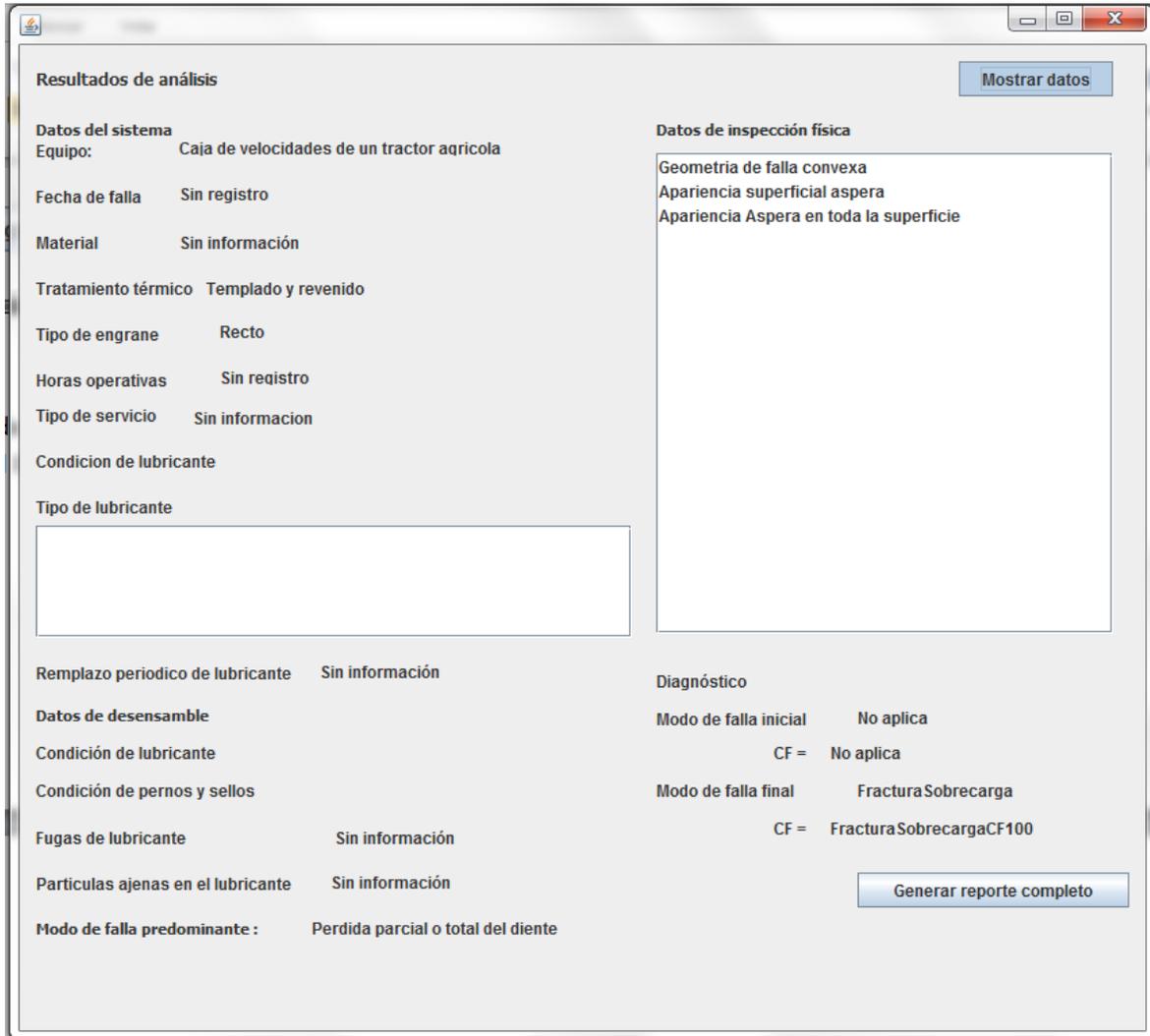


Figura 6.11. Pantalla resumen de Diagnóstico

La figura 6.11 muestra el resumen de los datos introducidos así como el diagnóstico establecido de los tipos de falla presentes, en general el programa recomienda las siguientes acciones para evitar la recurrencia de la falla en cuestión:

- **Fractura por Sobrecarga:** Es muy difícil predecir este tipo de falla y por ende establecer medidas preventivas o correctivas ya que no se sabe a ciencia cierta cuándo se presentará alguna sobrecarga en el sistema. En ciertas aplicaciones la incorporación de dispositivos que protejan contra sobrecargas como limitadores de torque podría ser una buena medida preventiva para evitar una falla por sobrecarga.

Por otra parte un buen conocimiento de las capacidades o limitaciones, así como un buen plan de mantenimiento del sistema hará trabajar en la zona segura, en donde una falla por sobrecarga no tendrá lugar

Además muestra las posibles causas de falla del engrane en cuestión, las cuales se mencionan a continuación:

- Fractura por Sobrecarga: Las sobrecargas pueden venir probablemente de una desalineación de los ejes de los engranes conjugados creando altas cargas durante el servicio, por otra parte una sobrecarga puede venir por un mal uso del engrane por parte del operador.

El reporte completo de análisis de falla se incluye en el anexo 5.

Conclusiones

El sistema experto desarrollado durante este trabajo de tesis es un prototipo funcional que permite resolver casos de análisis de falla en engranes a través de datos simples de entrada tales como la apariencia superficial, geometría de la falla, presencia de marcas, picaduras o rayaduras de cualquier naturaleza, entre otras características de la falla en cuestión, manteniendo una constante comunicación entre la base de conocimiento y la interfaz gráfica, mediante un razonamiento basado en reglas proporciona diagnósticos de la posible causa de falla para después establecer medidas generales preventivas o correctivas, según sea el caso.

El sistema desarrollado es capaz de resolver casos convencionales de falla en engranes, dicho sistema consta de las siguientes características:

- I. A partir de una serie de datos de entrada determina el tipo de falla, estableciendo las causas que propiciaron dicha falla para después establecer acciones preventivas o correctivas de manera general.
- II. Contiene una interfaz gráfica que además de facilitar la entrada de información correcta al sistema, es amigable con el usuario, ya que a través de imágenes, descripciones y botones guía al usuario durante el análisis de la falla en cuestión.
- III. Consiste de una base de conocimiento con 217 reglas con sus respectivos factores de certeza, esto con el fin último de tratar efectivamente con la incertidumbre que se pueda presentar durante el funcionamiento del sistema.

Si bien es cierto que en algunos análisis, el sistema arroja diagnósticos con factores de certeza bajos teniendo información fehaciente de que sin duda alguna es la falla diagnosticada, esto se debe a que los factores de certeza no son lo suficientemente finos para darle el peso indicado a cada atributo, cuestión que se puede ir corrigiendo incrementando la muestra de casos en la determinación de los pesos de cada atributo, de esta manera dichos valores serán más finos y aproximados a un diagnóstico elaborado por un experto en la materia.

- IV. Mantiene una interacción constante entre la base de conocimiento y la interfaz gráfica.
- V. Como producto final genera un reporte en formato PDF del caso analizado con el fin de facilitar su documentación.

Cabe destacar que durante la programación del sistema experto únicamente se utilizó software libre comprobando de esta manera que es posible el desarrollo de este tipo de sistemas a partir de plataformas de dominio público son que esto repercute en pérdida de potencial de desarrollo en cuanto a la programación se refiere.

Mediante lo anterior el sistema experto es capaz de diagnosticar las principales fallas que se presentan durante el funcionamiento de los engranes, estableciendo las acciones preventivas o correctivas de manera general para evitar la recurrencia de la misma. El sistema en general tiene la facilidad de ser completado o aumentado con respecto al conocimiento contenido en el mismo.

Recomendaciones

El sistema experto fue concebido de tal manera que pueda ser aumentado en cualquier momento y de esta manera hacerlo crecer hasta obtener una herramienta poderosa para el análisis de falla en engranes.

A continuación se enuncian las recomendaciones principales a incorporar durante el robustecimiento del sistema:

- Base de datos para materiales con el fin de determinar si el material utilizado es el recomendado para la aplicación en cuestión, se debe de programar una base de datos con los materiales comúnmente utilizados en la fabricación de engranes de acuerdo al tipo de servicio que estos desempeñen, el programa debe de ser capaz de comparar el material del engrane que falló con la base de datos del mismo, de esta manera el sistema arrojará un dictamen si dicho material es el apto para la aplicación en cuestión o por el contrario, la mala selección del mismo fue una de las causas por las cuales se experimentó la funcionalidad del elemento de estudio.
- Base de conocimiento para el análisis de perfiles de dureza en el caso de engranes con tratamiento térmico superficial con el objetivo de determinar si dicho tratamiento se llevó a cabo de manera óptima. El programa deberá de contener información sobre los perfiles de dureza típicos que se obtienen en los diversos tratamientos térmicos de endurecimiento superficial, de esta manera se podrá evaluar si el perfil de dureza es el óptimo para la aplicación en cuestión.
- Desarrollo de un módulo de cálculo teórico de esfuerzos de contacto con el fin de determinar teóricamente el esfuerzo al que fue sometido el elemento en cuestión. Se deberá de incorporar un módulo de calculo que involucre todos aquellos parámetros de servicio y diseño de esta manera se podrá determinar si el engrane fue sometido a cargas por encima de la resistencia del material mismo.
- Módulo para el análisis de pruebas de laboratorio. Este módulo se encargará de corroborar o desechar las hipótesis planteadas por el programa en etapas tempranas del análisis.
- Incrementar la muestra de casos de análisis de falla para afinar los valores de factores de certeza utilizados durante el desarrollo del prototipo. La muestra elegida durante este trabajo para determinar los factores de certeza fue relativamente pequeña, se recomienda incrementar la muestra de casos de análisis de falla a fin de que el peso de cada uno de los atributos sea estadísticamente certero, por consiguiente se espera que los atributos que se mencionen en repetidas ocasiones durante los análisis de falla tendrán pesos mayores a los que no se mencionen, de esta manera las falla en engranes diagnosticados en el sistema experto tendrán factores de certeza más acercados a la realidad.

La incorporación de los puntos antes mencionados convertirá al prototipo desarrollado durante este trabajo de tesis en un sistema más efectivo, capaz de resolver casos de análisis con un mayor grado de complejidad.

Referencias

- Akinci, I. (2005). Failure of a rotary tiller spur gear. *ELSEVIER Engineering Failure Analysis* , 5.
- Alban, L. E. (1985). *Systematic Analysis of Gear Failures*. Ohio: American Society for Metals.
- Andaluz, L. M. (2003). *Introducción a la Programación Basada en Reglas*. Málaga : Universidad de Málaga.
- Asi, O. (2006). Fatigue failure of a helical gear in a gearbox. *ELSEVIER Engineering Failure Analysis*, 10.
- Castillo, E. (2003). *Sistemas Expertos y Modelos de Redes Probabilísticas*. Cantabria: Universidad de Cantabria España.
- Das, C. (2005). Failure Analysis of a pinion . *ELSEVIER Engineering Failure Analysis* , 12.
- Espinosa, J. E. (2007). *Análisis de Falla de Fatiga por Flexión en la Ráiz de un Diente de Engranaje Recto con Pro/Engineer*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Faires, V. M. (1970). *Diseño de Elementos de Máquinas*. Barcelona: Montaner y Simón S.A.
- Giarratano, J. C. (2007). *Clips User's Guide*. USA: Clips .
- Gutiérrez, J. M. (2001). *Sistemas Expertos Basados en Reglas* . Cantabria, España: Universidad de Cantabria.
- Hernandez, L. E. (1995). Las fallas en los engranajes. *Terceras Jornadas Nacionales sobre Mantenimiento* (p. 13). Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Jiménes, J. A. (2004). *Representación del Conocimiento Basada en Reglas* . Sevilla : Universidad de Sevilla.
- K.Gopinath. (2006). *Machine Design II* . India: Indian Institute of Technology Madras.
- L.Errichello, R. (1994). *How to analyze gear failures*. USA: Geartech.
- Lee, H.-C. (2003). Failure analysis of nose landing gear assembly . *Pergamon Engineering Failure Analysis* , 8.
- Netpu, S. (2010). Failure Analysis of a Helical Gear. *The First TSME International Conference on Mechanical Engineering*. Thailand.
- Park, M. (2003). Failure Analysis of an accessory bevel gear installed on a J69 turbojet engine. *Pergamon Engineering Failure Analysis* , 12.
- Peng, C.-h. (2011). Failure analysis of a gear tooth fracture of a rolling mill decelerator. *ELSEVIER Engineering Failure Analysis* , 11.
- Pignani, J. M. (2003). *Sistemas Expertos* . Rosario: Universidad Tecnológica Nacional Rosario.
- Quintanar, T. L. (2007). *Sistemas Expertos y sus Aplicaciones* . Pachuca, Hidalgo: Univeridad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Ramón, T. (2010). Análisis de falla de un eje piñón cónico . *Ciencia e Ingeniería*, 31(2), 6.
- Rexnord Industries, G. G. (1978). *Failure Analysis*. Milwaukee: Rexnord Industries.
- Sánchez, A. S. (1998). *Sistema CLIPS Apuntes*.
- Sekercioglu, T. (2007). Pitting failure of truck spiral bevel gear. *ELSEVIER Engineering Failure Analysis* , 6.
- Shell. (2006). Engranajes. *Tutor de Lubricación Shell*, 50.
- Shigley, J. E. (1983). *Teoría de Máquinas y Mecanismos*. México: Mc. Graw Hill.
- Tovar, G. (2012). *Análisis de Falla de Componentes de Ingeniería*. Colombia: Universidad de Los Andes.
- Xtek Inc. (1967). *Gear Failures*. Ohio: Xtek Inc.
- Xu, X. (2005). Failure analysis of diesel engine flywheel ring-gears . *ELSEVIER Engineering Failure Analysis* , 10.
- Xu, X.-l. (2008). Crack failure of gears used in generating electricity equipment by wind power. *ELSEVIER Engineering Failure Analysis*, 8.
- Yu, Z. (2006). Failure analysis of an idler gear of diesel engine gearbox. *ELSEVIER Engineering Failure Analysis* , 9.

A n e x o s

Anexo 1

Base de conocimientos, colección completa de reglas.

Regla general 1

SupContactoDesgastadasPlanas: SI ____ 1

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI ____ 2

LineaPasoPredominante: SI _____ 3

ReduccionEspesorDiente: SI _____ 4

ENTONCES DesgasteAbrasivo _____ 5

Combinaciones posibles sin repetición

C_{4,1}= 4 { 1,2,3,4 }

C_{4,2}= 6 { 12,13,14,23,24,34 }

C_{4,3}= 4 { 123,124,134,234 }

C_{4,4}= 1 { 1234 }

Descomposición de reglas

1.- SupContactoDesgastadasPlanas: SI

ENTONCES DesgasteAbrasivo, CF=

2.- .- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

ENTONCES DesgasteAbrasivo, CF=

3.- LineaPasoPredominante:SI

ENTONCES DesgasteAbrasivo, CF=

4.- ReduccionEspesorDiente:SI

ENTONCES DesgasteAbrasivo, CF=

5.- SupContactoDesgastadasPlanas: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

ENTONCES DesgasteAbrasivo, CF=

6.- SupContactoDesgastadasPlanas: SI

LineaPasoPredominante:SI

ENTONCES DesgasteAbrasivo, CF=

7.- SupContactoDesgastadasPlanas: SI

ReduccionEspesorDiente:SI

ENTONCES DesgasteAbrasivo, CF=

8.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

LineaPasoPredominante:SI

ENTONCES DesgasteAbrasivo, CF=

9 .- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

ReduccionEspesorDiente:SI

ENTONCES DesgasteAbrasivo, CF=

10.- LineaPasoPredominante:SI

ReduccionEspesorDiente:SI

ENTONCES DesgasteAbrasivo, CF=

11.- SupContactoDesgastadasPlanas: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

LineaPasoPredominante:SI

ENTONCES DesgasteAbrasivo, CF=

12.- SupContactoDesgastadasPlanas: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

ReduccionEspesorDiente: SI

ENTONCES DesgasteAbrasivo, CF=

13.- SupContactoDesgastadasPlanas: SI

LineaPasoPredominante:SI

ReduccionEspesorDiente: SI

ENTONCES DesgasteAbrasivo, CF=

14.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

LineaPasoPredominante:SI

ReduccionEspesorDiente: SI

ENTONCES DesgasteAbrasivo, CF=

15.- SupContactoDesgastadasPlanas: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

LineaPasoPredominante:SI

ReduccionEspesorDiente: SI

ENTONCES DesgasteAbrasivo, CF=

Regla general 2

Presencia de picaduras: SI _____ 1

Forma picaduras: Regular _____ 2

Profundidad picaduras: 10 µm _____ 3

Ubicación de la falla: Línea de paso _____ 4

ENTONCES Fatiga Superficial Pitting _____ 5

Combinaciones posibles sin repetición

C_{4,1} = 4 { 1,2,3,4 }

C_{4,2} = 6 { 12,13,14,23,24,34 }

C_{4,3} = 4 { 123,124,134,234 }

C_{4,4} = 1 { 1234 }

Descomposición de reglas

1.- Presencia de picaduras: SI

ENTONCES Fatiga Superficial Pitting, CF=

2.- Forma picaduras: Regular

ENTONCES Fatiga Superficial Pitting, CF=

3.- Profundidad picaduras: 10 µm

ENTONCES Fatiga Superficial Pitting, CF=

4.- Ubicación de la falla: Línea de paso

ENTONCES Fatiga Superficial Pitting, CF=

5.- Presencia de picaduras: SI

Forma picaduras: Regular

ENTONCES Fatiga Superficial Pitting, CF=

6.- Presencia de picaduras: SI

Profundidad picaduras: 10 µm

ENTONCES Fatiga Superficial Pitting, CF=

7.- Presencia de picaduras: SI

Ubicación de la falla: Línea de paso

ENTONCES Fatiga Superficial Pitting, CF=

8.- Forma picaduras: Regular

Profundidad picaduras: 10 µm

ENTONCES Fatiga Superficial Pitting, CF=

9.- Forma picaduras: Regular

Ubicación de la falla: Línea de paso

ENTONCES Fatiga Superficial Pitting, CF=

10.- Profundidad picaduras: 10 µm

Ubicación de la falla: Línea de paso

ENTONCES Fatiga Superficial Pitting, CF=

11.- Presencia de picaduras: SI

Forma picaduras: Regular

Profundidad picaduras: 10 µm

ENTONCES Fatiga Superficial Pitting, CF=

12.- Presencia de picaduras: SI

Forma picaduras: Regular

Ubicación de la falla: Línea de paso

ENTONCES Fatiga Superficial Pitting, CF=

13.- Presencia de picaduras: SI

Profundidad picaduras: 10 µm

Ubicación de la falla: Línea de paso

ENTONCES Fatiga Superficial Pitting, CF=

14.- Forma picaduras: Regular

Profundidad picaduras: 10 µm

Ubicación de la falla: Línea de paso

ENTONCES Fatiga Superficial Pitting, CF=

15.- Presencia de picaduras: SI

Forma picaduras: Regular

Profundidad picaduras: 10 µm

Ubicación de la falla: Línea de paso

ENTONCES Fatiga Superficial Pitting, CF=

Regla general 3

Presencia de picaduras: SI _____1

Forma picaduras: Irregular _____2

Profundidad picaduras: 20 µm _____3

Ubicación de la falla: Línea de paso _____4

ENTONCES Fatiga Superficial Spalling _____5

Combinaciones posibles sin repetición

C_{4,1}= 4 { 1,2,3,4 }

C_{4,2}= 6 { 12,13,14,23,24,34 }

C_{4,3}= 4 {123,124,134,234}

C_{4,4}= 1 {1234 }

Descomposición de reglas

1.- Presencia de picaduras: SI

ENTONCES Fatiga Superficial Spalling, CF=

2.- Forma picaduras: Irregular

ENTONCES Fatiga Superficial Spalling, CF=

3.- Profundidad picaduras: 20 µm

ENTONCES Fatiga Superficial Spalling, CF=

4.- Ubicación de la falla: Línea de paso

ENTONCES Fatiga Superficial Spalling, CF=

5.- Presencia de picaduras: SI

Forma picaduras: Irregular

ENTONCES Fatiga Superficial Spalling, CF=

6.- Presencia de picaduras: SI

Profundidad picaduras: 20 µm

ENTONCES Fatiga Superficial Spalling, CF=

7.- Presencia de picaduras: SI

Ubicación de la falla: Línea de paso

ENTONCES Fatiga Superficial Spalling, CF=

8.- Forma picaduras: Irregular

Profundidad picaduras: 20 µm

ENTONCES Fatiga Superficial Spalling, CF=

9.- Forma picaduras: Irregular

Ubicación de la falla: Línea de paso

ENTONCES Fatiga Superficial Spalling, CF=

10.- Profundidad picaduras: 20 µm

Ubicación de la falla: Línea de paso

ENTONCES Fatiga Superficial Spalling, CF=

11.- Presencia de picaduras: SI

Forma picaduras: Irregular

Profundidad picaduras: 20 µm

ENTONCES Fatiga Superficial Spalling, CF=

12.- Presencia de picaduras: SI

Forma picaduras: Irregular

Ubicación de la falla: Línea de paso

ENTONCES Fatiga Superficial Spalling, CF= 13.- Presencia de picaduras: SI Profundidad picaduras: 20 µm Ubicación de la falla: Línea de paso ENTONCES Fatiga Superficial Spalling, CF= 14.- Forma picaduras: Irregular Profundidad picaduras: 20 µm Ubicación de la falla: Línea de paso ENTONCES Fatiga Superficial Spalling, CF= 15.- Presencia de picaduras: SI Forma picaduras: Irregular Profundidad picaduras: 20 µm Ubicación de la falla: Línea de paso ENTONCES Fatiga Superficial Spalling, CF=	C _{7,3} = 35 {123,124,125,126,127,134,135,136,137,145, 146,147,156,157,167,234,235,236,237,245,246,247,256, 257, 267, 345, 346, 347, 356, 357, 367, 456, 457,467, 567} C _{7,4} = 35 {1234,1235,1236,1237,1245,1246,1247,1256, 1257, 1267, 1345, 1346, 1347, 1356, 1357, 1367, 1456,1457, 1467,1567,2345,2346,2347,2356,2357,2367,2456,2457, 2467 2567, 3456,3457, 3467, 3567, 4567} C _{7,5} = 21 {12345,12346,12347,12356,12357,12367,12456, 12457, 12467,12567, 13456,13457, 13467, 13567, 14567, , 23456, 23457, 23467, 23567, 24567, 34567} C _{7,6} = 7 {123456,123457,123467,123567,124567, 134567, 234567}
---	--

Regla general 4

Marcas de lagrimeo: SI _____ 1
 Ubicación de falla: Adendo _____ 2
 MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI _____ 3
 Material removido: SI _____ 4
 Línea de paso predominante: SI _____ 5
 Destrucción del perfil: SI _____ 6
 Transferencia de material entre dientes: SI__ 7
 ENTONCES Escoriado _____ 8

Combinaciones posibles sin repetición

C_{7,1}= 7 { 1,2,3,4,5,6,7 }

 C_{7,2}= 21
 {12,13,14,15,16,17,23,24,25,26,27,34,35,36,37,45,
 46, 47, 56, 57,67}

C_{7,7}= 1 {1234567 }

Descomposición de reglas

1.- Marcas de lagrimeo: SI
 ENTONCES Escoriado, CF=
 2.- Ubicación de falla: Adendo
 ENTONCES Escoriado, CF=
 3.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI
 ENTONCES Escoriado, CF=
 4.- Material removido: SI
 ENTONCES Escoriado, CF=
 5.- Línea de paso predominante: SI
 ENTONCES Escoriado, CF=
 6.- Destrucción del perfil: SI
 ENTONCES Escoriado, CF=

7.- Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

ENTONCES Escoriado, CF=

17.- Ubicación de falla: Adendo

8.- Marcas de lagrimeo: SI

Dstrucción del perfil: SI

Ubicación de falla: Adendo

ENTONCES Escoriado, CF=

ENTONCES Escoriado, CF=

18.- Ubicación de falla: Adendo

9.- Marcas de lagrimeo: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

ENTONCES Escoriado, CF=

19.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

10.- Marcas de lagrimeo: SI

Material removido: SI

Material removido: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

ENTONCES Escoriado, CF=

20.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

11.- Marcas de lagrimeo: SI

Línea de paso predominante: SI

Línea de paso predominante: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

ENTONCES Escoriado, CF=

21.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

12.- Marcas de lagrimeo: SI

Dstrucción del perfil: SI

Dstrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

ENTONCES Escoriado, CF=

22.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

13.- Marcas de lagrimeo: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

ENTONCES Escoriado, CF=

23.- Material removido: SI

14.- Ubicación de falla: Adendo

Línea de paso predominante: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

ENTONCES Escoriado, CF=

24.- Material removido: SI

15.- Ubicación de falla: Adendo

Dstrucción del perfil: SI

Material removido: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

ENTONCES Escoriado, CF=

25.- Material removido: SI

16.- Ubicación de falla: Adendo

Transferencia de material entre dientes: SI

Línea de paso predominante: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

26.- Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

27.- Línea de paso predominante: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

28.- Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

29.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

30.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

Material removido: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

31.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

Línea de paso predominante: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

32.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

33.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

34.- Marcas de lagrimeo: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

35.- Marcas de lagrimeo: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Línea de paso predominante: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

36.- Marcas de lagrimeo: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

37.- Marcas de lagrimeo: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

38.- Marcas de lagrimeo: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

39.- Marcas de lagrimeo: SI

Material removido: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

40.- Marcas de lagrimeo: SI

Material removido: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

41.- Marcas de lagrimeo: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

42.- Marcas de lagrimeo: SI

Línea de paso predominante: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF

43.- Marcas de lagrimeo: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

44.- Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

45.- Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Línea de paso predominante: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

46.- Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

47.- Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

48.- Ubicación de falla: Adendo

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

49.- Ubicación de falla: Adendo

Material removido: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

50.- Ubicación de falla: Adendo

Material removido: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

51.- Ubicación de falla: Adendo

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

52.- Ubicación de falla: Adendo

Línea de paso predominante: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

53.- Ubicación de falla: Adendo

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

54.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

55.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

56.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

57.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

58.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Línea de paso predominante: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

59.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

60.- Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

61.- Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

62.- Material removido: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

63.- Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

64.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

65.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Línea de paso predominante: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

66.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

67.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

68.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

69.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

Material removido: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

70.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

Material removido: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

71.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

Línea de paso predominante: SI

Material removido: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

72.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

Línea de paso predominante: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

73.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

74.- Marcas de lagrimeo: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

75.- Marcas de lagrimeo: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

76.- Marcas de lagrimeo: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

77.- Marcas de lagrimeo: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

78.- Marcas de lagrimeo: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Línea de paso predominante: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

79.- Marcas de lagrimeo: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

80.- Marcas de lagrimeo: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

81.- Marcas de lagrimeo: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

82.- Marcas de lagrimeo: SI

Material removido: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

83.- Marcas de lagrimeo: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

84.- Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

85.- Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

86.- Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

87.- Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

88.- Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Línea de paso predominante: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

89.- Ubicación de falla: Adendo

Dstrucción del perfil: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

Dstrucción del perfil: SI

95.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

Material removido: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

Lnea de paso predominante: SI

90.- Ubicación de falla: Adendo

Transferencia de material entre dientes: SI

Material removido: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

Lnea de paso predominante: SI

96.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Dstrucción del perfil: SI

Material removido: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

Dstrucción del perfil: SI

91.- Ubicación de falla: Adendo

Transferencia de material entre dientes: SI

Material removido: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

Lnea de paso predominante: SI

97.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

Lnea de paso predominante: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

Dstrucción del perfil: SI

92.- Ubicación de falla: Adendo

Transferencia de material entre dientes: SI

Material removido: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

Dstrucción del perfil: SI

98.- Material removido: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

Lnea de paso predominante: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

Dstrucción del perfil: SI

93.- Ubicación de falla: Adendo

Transferencia de material entre dientes: SI

Lnea de paso predominante: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

Dstrucción del perfil: SI

99.- Marcas de lagrimeo: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

Ubicación de falla: Adendo

ENTONCES Escoriado, CF=

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

94.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Material removido: SI

Lnea de paso predominante: SI

Lnea de paso predominante: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

100.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

101.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

102.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

103.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Línea de paso predominante: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

104.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

105.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

106.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

107.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

Material removido: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

108.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

109.- Marcas de lagrimeo: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

110.- Marcas de lagrimeo: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

111.- Marcas de lagrimeo: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

112.- Marcas de lagrimeo: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

113.- Marcas de lagrimeo: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

114.- Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

115.- Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

116.- Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

117.- Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

118.- Ubicación de falla: Adendo

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

119.- MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

120.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

121.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

122.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

123.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

124.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

125.- Marcas de lagrimeo: SI

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

126.- Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

127.- Marcas de lagrimeo: SI

Ubicación de falla: Adendo

MarcasEstriasDirDesplazamiento: SI

Material removido: SI

Línea de paso predominante: SI

Destrucción del perfil: SI

Transferencia de material entre dientes: SI

ENTONCES Escoriado, CF=

Regla general 5

Grietas en la Raíz: SI _____ 1

Presencia punto focal: SI _____ 2

Marcas de playa: SI _____ 3

Apariencia áspera pequeña: SI _____ 4

Geometría cóncava: SI _____ 5

ENTONCES Fractura por fatiga _____ 6

Combinaciones posibles sin repetición

$C_{5,1} = 5 \{ 1,2,3,4,5 \}$

$C_{5,2} = 10 \{ 12,13,14,15,23,24,25,34,35,45 \}$

$C_{5,3} = 10 \{ 123,124,125,134,135,145,234,235,245,345 \}$

$C_{5,4} = 5 \{ 1234,1235,1245,1345,2345 \}$

$C_{5,5} = 1 \{ 12345 \}$

Descomposición de reglas

1.- Grietas en la Raíz: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

2.- Presencia punto focal: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

3.- Marcas de playa: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

4.- Apariencia áspera pequeña: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

5.- Geometría cóncava: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

6.- Grietas en la Raíz: SI

Presencia punto focal: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

7.- Grietas en la Raíz: SI

Marcas de playa: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

8.- Grietas en la Raíz: SI

Apariencia áspera pequeña: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

9.- Grietas en la Raíz: SI

Geometría cóncava: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

10.- Presencia punto focal: SI

Marcas de playa: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

11.- Presencia punto focal: SI

Apariencia áspera pequeña: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

12.- Presencia punto focal: SI

Geometría cóncava: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

13.- Marcas de playa: SI

Apariencia áspera pequeña: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

14.- Marcas de playa: SI

Geometría cóncava: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

15.- Apariencia áspera pequeña: SI

Geometría cóncava: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

16.- Grietas en la Raíz: SI

Presencia punto focal: SI

Marcas de playa: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

17.- Grietas en la Raíz: SI

Presencia punto focal: SI

Apariencia áspera pequeña: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

18.- Grietas en la Raíz: SI

Presencia punto focal: SI

Geometría cóncava: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

19.- Grietas en la Raíz: SI

Marcas de playa: SI

Apariencia áspera pequeña: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

20.- Grietas en la Raíz: SI

Marcas de playa: SI

Geometría cóncava: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

21.- Grietas en la Raíz: SI

Apariencia áspera pequeña: SI

Geometría cóncava: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

22.- Presencia punto focal: SI

Marcas de playa: SI

Apariencia áspera pequeña: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

23.- Presencia punto focal: SI

Marcas de playa: SI

Geometría cóncava: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

24.- Presencia punto focal: SI

Apariencia áspera pequeña: SI

Geometría cóncava: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

25.- Marcas de playa: SI

Apariencia áspera pequeña: SI

Geometría cóncava: SI

ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

26.- Grietas en la Raíz: SI

Presencia punto focal: SI

Marcas de playa: SI

Apariencia áspera pequeña: SI
ENTONCES Fractura por fatiga, CF=
27.- Grietas en la Raíz: SI
Presencia punto focal: SI
Marcas de playa: SI
Geometría cóncava: SI
ENTONCES Fractura por fatiga, CF=
28.- Grietas en la Raíz: SI
Presencia punto focal: SI
Apariencia áspera pequeña: SI
Geometría cóncava: SI
ENTONCES Fractura por fatiga, CF=
29.- Grietas en la Raíz: SI
Marcas de playa: SI
Apariencia áspera pequeña: SI
Geometría cóncava: SI
ENTONCES Fractura por fatiga, CF=
30.- Grietas en la Raíz: SI
Presencia punto focal: SI
Apariencia áspera pequeña: SI
Geometría cóncava: SI
ENTONCES Fractura por fatiga, CF=
31.- Grietas en la Raíz: SI
Presencia punto focal: SI
Marcas de playa: SI
Apariencia áspera pequeña: SI
Geometría cóncava: SI
ENTONCES Fractura por fatiga, CF=

Regla general 6

Apariencia superficial áspera: SI _____ 1
Apariencia superficial en toda la superficie _____ 2
Geometría convexa: SI _____ 3
ENTONCES Fractura por sobrecarga _____ 4

Combinaciones posibles sin repetición

C_{3,1}= 3 { 1,2,3 }
C_{3,2}= 3 { 12,13,23 }
C_{3,3}= 1 {123}

Descomposición de reglas

1.- Apariencia superficial áspera: SI
ENTONCES Fractura por sobrecarga, CF=
2.- Apariencia superficial en toda la superficie
ENTONCES Fractura por sobrecarga, CF=
3.- Geometría convexa: SI
ENTONCES Fractura por sobrecarga, CF=
4.- Apariencia superficial áspera: SI
Apariencia superficial en toda la superficie
ENTONCES Fractura por sobrecarga, CF=
5.- Apariencia superficial áspera: SI
Geometría convexa: SI
ENTONCES Fractura por sobrecarga, CF=
6.- Apariencia superficial en toda la superficie
Geometría convexa: SI
ENTONCES Fractura por sobrecarga, CF=
7.- Apariencia superficial áspera: SI
Apariencia superficial en toda la superficie
Geometría convexa: SI

ENTONCES Fractura por sobrecarga, CF=

Regla general 7

Presencia de deformación: SI _____1

Cizallamiento aparente entre dientes _____2

Flujo de material sobre punta del diente _____3

ENTONCES Flujo plástico _____4

Combinaciones posibles sin repetición

C_{3,1}= 3 { 1,2,3 }

C_{3,2}= 3 { 12,13,23 }

C_{3,3}= 1 {123}

Descomposición de reglas

1.- Presencia de deformación: SI

ENTONCES Flujo plástico, CF=

2.- Cizallamiento aparente entre dientes

ENTONCES Flujo plástico, CF=

3.- Flujo de material sobre punta del diente

ENTONCES Flujo plástico, CF=

4.- Presencia de deformación: SI

Cizallamiento aparente entre dientes

ENTONCES Flujo plástico, CF=

5.- Presencia de deformación: SI

Flujo de material sobre punta del diente

ENTONCES Flujo plástico, CF=

6.- Cizallamiento aparente entre dientes

Flujo de material sobre punta del diente

ENTONCES Flujo plástico, CF=

7.- Presencia de deformación: SI

Cizallamiento aparente entre dientes

Flujo de material sobre punta del diente

ENTONCES Flujo plástico, CF=

Total de reglas: 217

Anexo 2

Determinación de factores de certeza

Metodo para determinar los factores de certeza para la base de conocimiento del SEAFengranes

Desgaste Abrasivo

Determinación de pesos de atributos						
Caso\Atributo	Superficies en contacto	Marcas o estrías en dirección al	Línea de paso predominante	Reducción en el espesor del diente		Caso
1	1	0	1	1	3.00	1
2	1	1	0	1	3.00	2
3	0	1	1	1	3.00	3
4	1	1	1	0	3.00	4
5	1	1	1	1	4.00	5
Frecuencia Absoluta	4	4	4	4	16.00	
Frecuencia Relativa	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	100.00%	
% por caso	80.00%	80.00%	80.00%	80.00%		
Valor atributo simple	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	100.00%	
				No. Casos	5	
				No. Atributos	4	

Fatiga Superficial Pitting

Determinación de pesos de atributos						
Caso\Atributo	Presencia de picaduras	Forma regular de las picaduras	Profundidad de las picaduras de 10 µm	Línea de paso ubicación de la falla		Caso
1	1	1	0	0	2.00	1
2	1	1	0	1	3.00	2
3	1	0	0	0	1.00	3
4	1	1	0	1	3.00	4
5	1	1	1	1	4.00	5
Frecuencia Absoluta	5	4	1	3	13.00	
Frecuencia Relativa	38.46%	30.77%	7.69%	23.08%	100.00%	
% por caso	100.00%	80.00%	20.00%	60.00%		
Valor atributo simple	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	100.00%	
				No. Casos	5	
				No. Atributos	4	

Fatiga Superficial Spalling

Determinación de pesos de atributos						
Caso\Atributo	Presencia de picaduras	Forma irregular de las picaduras	Profundidad de las picaduras de >20 µm	Línea de paso ubicación de la falla		Caso
1	1	1	0	1	3.00	1
2	1	1	0	1	3.00	2
3	1	1	0	0	2.00	3
4	1	1	0	0	2.00	4
5	1	1	1	1	4.00	5
Frecuencia Absoluta	5	5	1	3	14.00	
Frecuencia Relativa	35.71%	35.71%	7.14%	21.43%	100.00%	
% por caso	100.00%	100.00%	20.00%	60.00%		
Valor atributo simple	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	100.00%	
				No. Casos	5	
				No. Atributos	4	

Sistema Experto Prototipo para Análisis de Falla en Engranajes

Escoriado

Determinación de pesos de atributos								
Caso/Atributo	Ubicación de la falla:		Marcas o estrías en dirección al	Material removido	Línea de paso predominante	Destrucción del perfil del diente	Transferencia de material entre dientes	
	Marcas de lagrimeo	Adondo						
1	1	0	1	1	0	1	1	5.00
2	1	1	1	1	1	1	0	6.00
3	0	0	1	1	1	1	1	5.00
4	0	1	1	1	1	0	1	5.00
5	1	1	1	1	1	1	1	7.00
Frecuencia Absoluta	3	3	5	5	4	4	4	28.00
Frecuencia Relativa	10.71%	10.71%	17.86%	17.86%	14.29%	14.29%	14.29%	100.00%
% por caso	60.00%	60.00%	100.00%	100.00%	80.00%	80.00%	80.00%	
Valor atributo simple	14.29%	14.29%	14.29%	14.29%	14.29%	14.29%	14.29%	100.00%

No. Casos: 5
No. Atributos: 7

Fractura por fatiga

Determinación de pesos de atributos							
Caso/Atributo	Grietas Raíz	Punto Focal	Marcas Playa	Apariencia Aspera	Geometría Concava	Picaduras	
2	1	0	1	1	0	1	3.00
3	1	0	0	1	0	1	2.00
4	1	1	1	1	0	1	4.00
5	1	1	1	1	1	1	5.00
Frecuencia Absoluta	5	2	4	5	2	4	18.00
Frecuencia Relativa	27.78%	11.11%	22.22%	27.78%	11.11%	22.22%	100.00%
% por caso	100.00%	40.00%	80.00%	100.00%	40.00%	80.00%	
Valor atributo simple	16.67%	16.67%	16.67%	16.67%	16.67%	16.67%	100.00%

No. Casos: 5
No. Atributos: 6

Fractura por sobrecarga

Determinación de pesos de atributos				
Caso/Atributo	Apariencia Aspera		Geometría convexa	Caso
	1	0		
1	1	0	1.00	1
2	1	1	2.00	2
3	1	0	1.00	3
4	1	0	1.00	4
5	1	1	2.00	5
Frecuencia Absoluta	5	2	7.00	
Frecuencia Relativa	71.43%	28.57%	100.00%	
% por caso	100.00%	40.00%		
Valor atributo simple	50.00%	50.00%	100.00%	

No. Casos: 5
No. Atributos: 2

Flujo Plástico

Determinación de pesos de atributos				
Caso/Atributo	Presencia de deformación	Cizallamiento aparente entre dientes	Flujo de material sobre la punta del diente	Caso
2	1	0	0	1.00
3	1	0	1	2.00
4	1	1	1	3.00
5	1	1	1	3.00
Frecuencia Absoluta	5	2	4	11.00
Frecuencia Relativa	45.45%	18.18%	36.36%	100.00%
% por caso	100.00%	40.00%	80.00%	
Valor atributo simple	33.33%	33.33%	33.33%	100.00%

No. Casos: 5
No. Atributos: 3

Anexo 3

Análisis completo: Análisis de falla de un engrane helicoidal

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

SISTEMA EXPERTO PARA ANALISIS DE FALLA EN ENGRANES

SEAFengranes

Reporte de analisis

DATOS GENERALES

Descripcion del sistema: Laminadora

Fecha de falla: Sin registro

MaterialSMC415

Tratamiento termico: Carburizado

DATOS MANTENIMIENTO/SERVICIO

Engrane de tipo: Helicoidal

Horas operativas: Tipo de servicio

Tipo de servicio: Continuo

Condicion de lubricante: Buena

DATOS DESENSAMBLE

Tipo de lubricante: Mineral

Descripcion del lubricante:

El lubricante utilizado se aplica en engranajes que trabajan bajo condiciones moderadas de operación, asegurese de que el lubricante empleado sea el correcto para el servicio que desempeña el sistema

Reemplazo periodico de lubricante: Sin información

Condicion de lubricante:

Condicion de pernos y sellos:

Fugas de lubricante: Sin información

Particulas ajenas en el lubricante: Sin información

Modo de falla predominante: Combinacion de perdida de geometria seguida de una perdida total o parcial del diente

DATOS INSPECCION FISICA

Se presentaron las siguientes características en la falla

[Presencia de picaduras, Picaduras de forma regular, Tamaño aproximado de 25 a 50 micrometros, Ubicación línea de paso, Presencia de grietas en la raíz del diente, Presencia de marcas de playa, Geometria de falla concava, Apariencia superficial aspera, Apariencia Aspera en un area pequeña]

DIAGNOSTICO:

MODO DE FALLA INICIAL

FatigaSuperficial_Pitting

Coefficiente de certeza ----> FatigaSuperficial_PittingCF92

DESCRIPCION DE LA FALLA:

La fatiga superficial es resultado de esfuerzos repetidos en la superficie del diente del engrane inherentes al funcionamiento del sistema, dichos esfuerzos forman grietas superficiales o subsuperficiales, este tipo de falla se presenta incluso con lubricación adecuada así como con una película ininterrumpida de aceite después de muchos millones de ciclos de esfuerzo, por consiguiente las fallas por fatiga resultan evidentes después de un tiempo prolongado de servicio.

Los engranes que funcionan bajo carga desarrollan esfuerzos superficiales constantes, solo si la carga tiene la suficiente intensidad y se repite con bastante frecuencia sobrevendrá la fatiga del material en donde fragmentos de metal son desprendidos de la superficie originando pequeñas picaduras.

Existen dos grados de fatiga superficial o picado, los cuales dependen directamente del tamaño de las picaduras, los grados en los que se presenta el picado se enuncian a continuación:

-Picado inicial

Este grado de picado se caracteriza por pequeñas picaduras de unos cuantos micrómetros de diámetro, el picado inicial se presenta en áreas localizadas en donde existan irregularidades en el perfil que concentren esfuerzos.

Por tanto el picado inicial es causado por un mal acabado superficial o pequeños errores en el perfil del diente. Este grado de picado se le considera normal y rara vez se establece alguna acción para corregirlo.

- Picado destructivo

En este grado de picado, las picaduras son considerablemente de

mayor diámetro que en el picado inicial y se extienden a lo largo de todo el diente con diversas tamaños y formas, generalmente el engrane conductor es el primero en picarse debido a que maneja una mayor carga además de ser el de menor diámetro está sometido a esfuerzos con mayor frecuencia en el caso de un sistema que incrementa el torque. Este grado de picado es producto de someter a una mayor carga al engrane una vez que se presenta el picado inicial.

Causas

La fatiga superficial se produce primeramente por imperfecciones superficiales además de errores mínimos en el perfil del diente dando lugar a esfuerzos de contacto por encima del límite de fatiga del material, por otra parte una mala alineación del sistema o un incremento en la carga o velocidad de servicio puede traer consigo el incremento en la intensidad de los esfuerzos sobre la superficie del diente, los cuales como se mencionó anteriormente son los principales causantes de este tipo de falla.

ACCIONES PREVENTIVAS Y/O CORRECTIVAS:

Una vez que se observan las huellas características de la fatiga superficial y se identifica el grado de picado que se tiene se puede considerar las siguientes acciones preventivas o correctivas según sea el caso

- Picado inicial

Este tipo de falla puede ser evitada asegurando un buen acabado superficial en las áreas en donde se lleva a cabo el contacto, por otra parte mejorar la precisión del perfil de evolvente o modificando el diseño a fin de reducir la carga dinámica a la que será sometido el diente.

-Picado Destructivo

Este tipo de picado se puede evitar manteniendo la carga por debajo del límite de fatiga del material por otra parte es posible incrementar la dureza del material a fin de aumentar el límite de fatiga del material en donde la fatiga superficial no tenga lugar.

MODO DE FALLA FINAL

FracturaFatiga

Coefficiente de certeza ----> FracturaFatigaCF89

DESCRIPCION DE LA FALLA

La fractura por fatiga generalmente resulta por la presencia de grietas en la raíz del diente las cuales son originadas debido a esfuerzos cíclicos a los que se somete el engrane durante el servicio.

Identificación:

Este tipo de fractura se puede reconocer por la presencia de curvas semielípticas que irradian desde el foco o núcleo de la fractura, las cuales son el resultado de cargas cíclicas lo suficientemente elevadas para propagar grietas internas, las llamadas marcas de playa, generalmente dichas marcas van acompañadas de una pequeña porción de área con textura áspera indicando que fue esta última porción la que fallo abruptamente, en algunas ocasiones la geometría de la falla es cóncava.

Causas:

Este tipo de fractura es el producto de cargar excesivamente los dientes del engrane, dichas cargas generan esfuerzos por encima del límite de fatiga del material, por otra parte la existencia de muescas, inclusiones metalúrgicas y grietas inherentes a los diversos tratamientos térmicos a los que es sometido el engrane a fin de aumentar la resistencia del mismo, pueden inducir los mismos esfuerzos que produce una carga de servicio, causando la propagación de grietas dejando como huella característica las llamadas marcas de playa.

ACCIONES PREVENTIVAS Y/O CORRECTIVAS

Una vez que las huellas características de este tipo de fractura se han identificado en primer lugar y como medida de bajo costo se deberá de reducir la carga operativa a fin de mantener los esfuerzos inducidos por debajo del límite de fatiga del material, si esto no fuese posible se deberá optar por el rediseño total de los elementos del engrane a fin de aumentar la capacidad de carga del mismo, empleando materiales de alta resistencia, utilizando radios de filetes completos y aumentando la sección transversal en la raíz del diente además se deberá asegurar un buen tratamiento térmico controlando todos los parámetros involucrados con el objetivo principal de obtener la mejor estructura posible, minimizando la posibilidad de esfuerzos residuales inherentes al proceso, por otra parte el someter a un tratamiento de granallado al engrane mejorara la resistencia del elemento al inducir esfuerzos residuales de compresión en la superficie del mismo.

Anexo 4

Análisis completo: Falla prematura de un engrane recto en un accesorio de tractor agrícola

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA
SISTEMA EXPERTO PARA ANALISIS DE FALLA EN ENGRANES
SEAFengranes

Reporte de analisis

DATOS GENERALES

Descripcion del sistema: Accesorio de un tractor agricola

Fecha de falla: Sin registro

MaterialSAE 1020

Tratamiento termico:

DATOS MANTENIMIENTO/SERVICIO

Engrane de tipo: Recto

Horas operativas: Tipo de servicio

Tipo de servicio: Sin informacion

Condicion de lubricante: Buena

DATOS DESENSAMBLE

Tipo de lubricante:

Descripcion del lubricante:

Reemplazo periodico de lubricante: Sin información

Condicion de lubricante:

Condicion de pernos y sellos:

Fugas de lubricante: Sin información

Particulas ajenas en el lubricante: Sin información

Modo de falla predominante: Combinacion de perdida de geometria seguida de una perdida total o parcial del diente

DATOS INSPECCION FISICA

Se presentaron las siguientes características en la falla

[Ubicación adendo, Reducción en el espesor del diente, Destrucción del perfil del diente,

Superficies en contacto planas y desgastadas

, Línea de paso predominante

, Presencia de deformación, Flujo de material sobre la punta del diente]

DIAGNOSTICO:

MODO DE FALLA INICIAL

DesgasteAbrasivo

Coefficiente de certeza —> DesgasteAbrasivoCF75

DESCRIPCION DE LA FALLA:

El desgaste es considerado como un fenómeno en donde capas de metal son removidas más o menos uniformemente desde la superficie de contacto de los dientes del engrane, dependiendo de la cantidad de material removido es el grado de desgaste que se tendrá, los grados de desgaste se enuncian a continuación:

-Desgaste Moderado

Este grado de desgaste se presenta en periodos relativamente altos de servicio. El patrón de contacto muestra que material ha sido removido del adendo y dedendo, la línea de paso se se muestra como una línea continua.

Es causada por una inadecuada lubricación, en donde el espesor del lubricante no es lo suficientemente grueso para la carga aplicada.

-Desgaste Excesivo

Este grado de desgaste se presenta cuando se deja progresar al desgaste moderado hasta que una cantidad considerable de material ha sido removido de la superficie, es entonces cuando la línea de paso se muestra demasiado prominente como consecuencia el funcionamiento se vuelve ruidoso.

Esta clase de desgaste reduce el espesor del diente causando grandes cambios geométricos en el perfil del mismo.

Identificación:

Las superficies en contacto muestran zonas planas y gastadas que interrumpen el perfil del diente, el desgaste se desarrolla desde la parte inferior de contacto de un solo diente hasta la línea de paso, para después comenzar desde ese mismo punto hasta el punto más alto de contacto, es decir del adendo al dedendo respectivamente. Estos lugares son preferenciales para

el desarrollo del desgaste ya que en dichas zonas se presentan elevadas cargas y mayores grados de deslizamiento inherentes al funcionamiento del perfil de evolvente, dejando como consecuencia que la línea de paso se muestre prominente, además de la presencia de marcas o rayaduras en dirección del deslizamiento indicando que el contacto entre las superficies en cuestión se llevo acabo.

Causas:

El desgaste se produce generalmente por la presencia de partículas ajenas en el sistema de lubricación. Las partículas pueden ser de origen metálico o cerámico, producto del desgaste mismo de otros elementos de maquina tales como rodamientos o desgaste del eje conductor en el caso de partículas de origen metálico, por otra parte arena proveniente del medio ambiente puede estar presente en el caso de partículas de tipo cerámico.

ACCIONES PREVENTIVAS Y/O CORRECTIVAS:

Una vez que se identifican las huellas características del desgaste abrasivo debido a las causas particulares de este tipo de falla se deberá de instalar un filtro en el sistema de lubricación o en su defecto cambiar el actual por uno más fino. Por otra parte el uso de un lubricante de mayor viscosidad desarrollara una película de lubricante más gruesa dejando pasar de esta manera todas aquellas partículas finas de naturaleza abrasiva.

Por supuesto la mejor forma para evitar un desgaste prematuro del engrane, es revisar periódicamente el sistema de lubricación, este tipo de falla se presenta recurrentemente en sistema cerrados sin un sistema de circulación de lubricante en donde el material ajeno al mismo se deposita en zonas aleatorias del sistema por tanto es importante realizar cambios periódicos de lubricante a fin de evitar dicha situación.

MODO DE FALLA FINAL

FlujoPlastico

Coefficiente de certeza ----> FlujoPlasticoCF82

DESCRIPCION DE LA FALLA

La falla por flujo plástico es una deformación de la superficie del diente como consecuencia de altos esfuerzos de contacto, los cuales a menudo sobrepasan el límite de cedencia del material del engrane.

Identificación:

Este tipo de fractura se puede reconocer por la presencia de flujo de material el cual resulta en la formación de rebordes de altura irregular en los extremos o puntas del diente. El flujo plástico se asocia directamente con la plasticidad del material del engrane aunque frecuentemente se presenta en engranes superficialmente endurecidos fuertemente cargados.

Causas:

Este tipo de falla es producto de cargar al engrane por encima de las condiciones de diseño, la acción de deslizamiento tiende a empujar al material en la misma dirección provocando los rebordes en los extremos y puntas de los dientes, las altas cargas pueden ser resultado de errores durante la manufactura del perfil los cuales a menudo provocan altos esfuerzos de contacto.

ACCIONES PREVENTIVAS Y/O CORRECTIVAS

Fallas de esta naturaleza pueden ser prevenidas disminuyendo la carga de servicio, es decir reduciendo los esfuerzos de contacto a límites seguros, un incremento en la dureza superficial del material del engrane aumentará la resistencia a los esfuerzos de contacto que se pudieran presentar.

Por otra parte durante la etapa de manufactura y diseño, se debe de mantener una buena precisión en el espaciamiento entre dientes además de reducir posibles desviaciones durante la manufactura del perfil, esto mejorará la interacción entre los dientes reduciendo la carga dinámica a la que serán sometidos, de esta manera se trabajara bajo límites seguros en todo momento.

Anexo 5

Análisis completo: Análisis de falla de un eje de piñón cónico

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA
SISTEMA EXPERTO PARA ANALISIS DE FALLA EN ENGRANES
SEAFengranes

Reporte de analisis

DATOS GENERALES

Descripcion del sistema: Caja de velocidades de un tractor agricola

Fecha de falla: Sin registro

MaterialSin registro

Tratamiento termico: Templado y revenido

DATOS MANTENIMIENTO/SERVICIO

Engrane de tipo: Recto

Horas operativas: Tipo de servicio

Tipo de servicio: Sin informacion

Condicion de lubricante: Buena

DATOS DESENSAMBLE

Tipo de lubricante:

Descripcion del lubricante:

Reemplazo periodico de lubricante: Sin información

Condicion de lubricante:

Condicion de pernos y sellos:

Fugas de lubricante: Sin información

Particulas ajenas en el lubricante: Sin información

Modo de falla predominante: Perdida parcial o total del diente

DATOS INSPECCION FISICA

Se presentaron las siguientes características en la falla

[Geometria de falla convexa, Apariencia superficial aspera, Apariencia Aspera en toda la superficie]

DIAGNOSTICO:

MODO DE FALLA INICIAL

No aplica

Coefficiente de certeza —> No aplica

DESCRIPCION DE LA FALLA:

No aplica

ACCIONES PREVENTIVAS Y/O CORRECTIVAS:

No aplica

MODO DE FALLA FINAL

FracturaSobrecarga

Coefficiente de certeza —> FracturaSobrecargaCF100

DESCRIPCION DE LA FALLA

La fractura por sobrecarga se puede interpretar como el desprendimiento parcial o total del diente, producto de someter al engrane a cargas de servicio por encima del limite de resistencia a la tensión del mismo, se considera como una falla de bajos ciclos.

Identificación:

Una apariencia fibrosa de la superficie de la falla generalmente caracteriza a fallas de esta naturaleza como indicativo de que el material fue arrancado abruptamente como consecuencia de cargar al engrane por encima de las condiciones para las que fue diseñado, se le considera como una falla de bajos ciclos que inicia en la raíz del diente del lado sometido a tensión.

Causas:

Las sobrecargas pueden venir probablemente de una desalineación de los ejes de los engranes conjugados creando altas cargas durante el servicio, por otra parte una sobrecarga puede venir por un mal uso del engrane por parte del operador.

ACCIONES PREVENTIVAS Y/O CORRECTIVAS

Es muy difícil predecir este tipo de falla y por ende establecer medidas preventivas o correctivas ya que no se sabe a ciencia cierta cuándo se presentara alguna sobrecarga en el sistema.

En ciertas aplicaciones la incorporación de dispositivos que protejan contra sobrecargas como limitadores de torque podría ser una buena medida preventiva para evitar una falla por sobrecarga.

Por otra parte un buen conocimiento de las capacidades o limitaciones, así como un buen plan de mantenimiento de nuestro sistema nos hará trabajar en la zona segura, en donde una falla por sobrecarga no tendrá lugar.