

**DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS DE BOLAS A TRAVÉS DE
LÓGICA DIFUSA USANDO SEÑALES DE VIBRACIÓN**

**FREDY JULIAN OTERO QUIJANO
JOHN JAIRO PARDO GONZÁLEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2010

**DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS DE BOLAS A TRAVÉS DE
LÓGICA DIFUSA USANDO SEÑALES DE VIBRACIÓN**

**FREDY JULIAN OTERO QUIJANO
JOHN JAIRO PARDO GONZÁLEZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

**JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ
MSc. Ingeniero Mecánico**

Codirector

**ALFONSO GARCÍA CASTRO
MSc. Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2010

DEDICATORIA

A Dios por ayudarme en todos los momentos difíciles, a mis padres Myriam González y Jairo Pardo por su colaboración y apoyo incondicional, por confiar en mis capacidades en todo momento.

A Angelica Camacho por brindarme sus buenos consejos en todo momento.

También a todas aquellas personas que de una u otra manera me brindaron su amistad colaboración y apoyo en el transcurso de esta etapa de mi vida.

John Jairo Pardo G.

Fija tus ojos hacia adelante en lo que puedes hacer, no hacia atrás en lo que no puedes cambiar. - Tom Clancy

DEDICATORIA

A mis padres Víctor Julio Otero Acevedo y Eliana Quijano Quijano por creer en mí y ser ejemplo de perseverancia y constancia.

A Beatriz Otero y Raque Otero por su apoyo y sabios consejos.

A mis hermanos que siempre estuvieron prestos a ayudarme.

A todos aquellas persona que durante la carrera me ofrecieron su amistad e hicieron de mi vida universitaria una experiencia de superación.

Fredy Julián Otero Quijano

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Al Ing. MSc. Jabid Quiroga por brindarnos su colaboración y asesoría para el buen desarrollo de este proyecto.

Al Ing. Alfonso García por facilitarnos su experiencia sabiduría y conocimiento en el área de vibraciones mecánicas.

A todos los profesores de la escuela de ingeniería mecánica que estuvieron dispuestos a compartir su conocimiento y a formarnos como personas y profesionales.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. SISTEMAS DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS	3
2. MÉTODOS BASADOS EN EL CONOCIMIENTO	4
3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES	5
4. ALTERNATIVAS PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS	6
5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE DIVERSOS MÉTODOS PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS	8
6. LÓGICA DIFUSA	10
6.1 FUNCIONAMIENTO DE LA LÓGICA DIFUSA	10
6.2 PROCESO DE INFERENCIA DIFUSO	11
6.2.1 Paso 1: “Fuzificación” de las variables de entrada	12
6.2.2 Paso 2: Aplicación de los operadores difusos (AND, OR, NOT)	14
6.2.3 Paso 3: Aplicación del método de implicación del antecedente al consecuente	16
6.2.4 Paso 4: Agregación de los consecuentes a través de las reglas	17

6.2.5	Paso 5: “desfuzificación”.	19
7.	APLICACIONES Y VENTAJAS DE LA LÓGICA DIFUSA	20
8.	FUNDAMENTOS DE LOS RODAMIENTOS	21
8.1	PARTES FUNDAMENTALES DE UN RODAMIENTO	21
8.1.1	Pista interior y exterior	22
8.1.2	Elemento rodante	22
8.1.3	Canastilla	22
8.2	PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE LOS RODAMIENTOS	23
8.3	CARGA EN LOS RODAMIENTOS	24
8.4	FALLAS EN PISTA INTERIOR Y PISTA EXTERIOR	25
8.5	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS RODAMIENTOS	26
8.6	ANÁLISIS DE VIBRACIONES APLICADO A RODAMIENTOS DEFECTUOSOS	28
8.7	ETAPAS Y EVOLUCIÓN DE FALLA EN RODAMIENTOS	30
8.8	CÁLCULO DE LAS FRECUENCIAS DE FALLA	32
9.	BASE DE ENTRENAMIENTO	34

9.1	SIMULACIÓN DE LAS SEÑALES	35
9.2	ENTRADAS Y SALIDAS AL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS	40
9.3	PLANTEAMIENTO DE LAS DIFERENTES REGLAS DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS	43
9.3.1	Antecedentes para cada una de las reglas de inferencia	44
9.3.2	Consecuentes para cada una de las reglas de inferencia	47
9.4	PROCESO DE VALIDACIÓN EN LA DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS	50
9.5	ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS	51
9.6	ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS	54
10.	DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN	58
11.	PRUEBAS DE VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS	60
11.1	PRIMERA MEDICIÓN	63
11.2	SEGUNDA MEDICIÓN	65
11.3	TERCERA MEDICIÓN	66

11.4 CUARTA MEDICIÓN	68
11.5 QUINTA MEDICIÓN	70
12. ANÁLISIS DE RESULTADOS	72
13. CONCLUSIONES	74
14. RECOMENDACIONES	75
15. FUTUROS DESARROLLOS	76
BIBLIOGRAFÍA	77
ANEXOS	79

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Sistema de lógica difusa.	10
Figura 2. Comparación entre la lógica difusa y lógica clásica.	12
Figura 3. Algunas funciones de membresía características.	13
Figura 4. Operaciones con conjuntos difusos.	15
Figura 5. Proceso de implicación.	17
Figura 6. Proceso de agregación.	18
Figura 7. Proceso de “defuzificación”.	19
Figura 8. Partes fundamentales de un rodamiento.	21
Figura 9. Cargas que pueden actuar sobre un rodamiento.	24
Figura 10. Evolución del descascarado de un rodamiento.	25
Figura 11. Características geométricas del rodamiento de bolas.	26
Figura 12. Curva típica de falla en rodamientos.	28

Figura 13. Proceso implementado para la base de entrenamiento.	34
Figura 14. Armónicos 1x 2x 3x presentes en la etapa inicial y durante la evolución de la falla del rodamiento.	35
Figura 15. Umbrales de amplitud normalizada [0-1].	36
Figura 16. Umbrales de frecuencias de falla de un rodamiento.	37
Figura 17. Falla en pista interior (BPFI).	38
Figura 18. Falla en pista exterior (BPFO).	39
Figura 19. Esquema del proceso para el desarrollo del sistema de detección de fallas en rodamientos de bolas a través de lógica difusa usando señales de vibración.	42
Figura 20. Proceso de validación en la detección de fallas en rodamientos.	50
Figura 21. Esquema general del sistema de inferencia difuso para la detección de fallas en rodamientos.	51
Figura 22. Algunas funciones de membresía a utilizar en el sistema de inferencia difuso para la detección de fallas en rodamientos (Gaussiana).	52
Figura 23. Algunas funciones de membresía utilizadas en las salidas del sistema de inferencia difuso para la detección de fallas en rodamientos (triangular).	53

Figura 24. Diagrama general del proceso de diagnostico de fallas en rodamientos.	55
Figura 25. Esquema general del sistema de detección de fallas en rodamientos.	56
Figura 27. Banco de pruebas para la detección de fallas en rodamientos de bolas.	59
Figura 28. Rodamiento de prueba 1.	60
Figura 29. Rodamiento de prueba 2.	61
Figura 30. Rodamiento de prueba 3.	61
Figura 31. Rodamiento de prueba 4.	62
Figura 32. Rodamiento de prueba 5.	62
Figura 33. Punto 1VV severidad leve en pista interior y severidad leve en pista exterior.	64
Figura 34. Punto 2VV severidad moderada en pista interior y severidad crítica en pista exterior.	65
Figura 35. Punto 3VV severidad leve en pista interior y severidad moderada en pista exterior.	67
Figura 36. Punto 4VV severidad leve en pista interior y severidad crítica en pista exterior.	69

Figura 37. Punto 5VV severidad crítica en pista interior y severidad moderada en pista exterior.

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Ventajas y desventajas de diversos métodos para el diagnóstico de fallas en rodamientos.	8
Tabla 2. Evolución de falla en rodamientos.	31
Tabla 3. Frecuencias de falla del rodamiento 6204 calculadas a partir de las fórmulas.	33
Tabla 4. Determinación del espacio muestral para la detección de fallas en rodamientos.	43
Tabla 5. Antecedentes para cada una de las reglas de inferencia.	45
Tabla 6. Antecedentes para cada una de las reglas de inferencia.	46
Tabla 7. Consecuentes para cada una de las reglas de inferencia.	48
Tabla 8. Consecuentes para cada una de las reglas de inferencia.	49
Tabla 10. Set de parámetros de información.	57

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. TABLA DE DIAGNÓSTICO	80
ANEXO B. CÓDIGO DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS.	81

GLOSARIO

AMPLITUD: es el máximo valor que presenta una onda sinusoidal.

ANÁLISIS ESPECTRAL: es la interpretación que se le hace a un espectro para determinar el significado físico de lo que pasa en una máquina.

ANTECEDENTE: la parte inicial (o “si”) de una regla difusa.

ARMÓNICO: son frecuencias de vibración que son múltiples integrales de una frecuencia fundamental específica.

BALANCEO: procedimiento por medio del cual se trata de hacer coincidir el centro de masa de un rotor con su centro de rotación, de manera que se pueda eliminar el mayor número de fuerzas inerciales.

BLOQUE DE INFERENCIA: bloque que mediante mecanismos de inferencia relacionan conjuntos difusos de entrada y de salida y que representa a las reglas que definen el sistema. Las entradas a este bloque son conjuntos difusos (grados de pertenencia) y las salidas también son conjuntos difusos asociados a la variable de salida.

CONSECUENTE: la parte final (o “entonces”) de una regla difusa.

DESDIFUSOR: bloque en el cual a partir del conjunto difuso obtenido en el mecanismo de inferencia y mediante los métodos matemáticos de “desdifusión” se obtiene un valor concreto de la variable de salida, es decir el resultado.

DIAGNÓSTICO: Proceso por medio del cual se juzga el estado de una máquina.

DIFUSOR: bloque en el que a cada variable de entrada se le asigna un grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos difusos que se ha considerado mediante las funciones características asociadas a estos conjuntos difusos. Las entradas a este bloque son valores concretos de las variables de entrada y las salidas son grados de pertenencia a los conjuntos difusos considerados.

DOMINIO DE LA FRECUENCIA: Es la representación gráfica de la vibración en la cual se enfrentan Amplitud vs. Frecuencia.

DOMINIO DEL TIEMPO: Es la representación gráfica de una señal de vibración en la cual se enfrentan Amplitud vs. Tiempo.

FUNCIÓN DE PERTENENCIA: indican en qué medida el elemento forma parte de un conjunto difuso. Las formas de las funciones de pertenencia más típicas son la trapezoidal, lineal y curva.

LÓGICA DIFUSA: tipo de lógica que permite tratar información imprecisa en términos de conjuntos difusos que se combinan en reglas para definir acciones.

MOTOR DE INFERENCIA: parte de la estructura del sistema de detección de fallas que modela el proceso de razonamiento humano.

ORDEN: Es otra de las unidades de frecuencia, utilizadas para maquinaria rotativa. Una orden es equivalente a la velocidad nominal de la máquina.

PICO: Cada una de las líneas que componen el espectro.

RADIAL: Posición del sensor que va perpendicular a la línea del eje.

REGLAS DE INFERENCIA: conjunto de proposiciones si-entonces que modelan el problema que se quiere resolver.

RUIDO: es información de la señal que no representa alguna importancia. Representa contaminación de la señal.

TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT): es una técnica para calcular por medio de un computador la frecuencia de las series que conforman la onda en el dominio del tiempo.

RESUMEN

TÍTULO

DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS DE BOLAS A TRAVÉS DE LÓGICA DIFUSA USANDO SEÑALES DE VIBRACIÓN

AUTORES

**FREDY JULIAN OTERO QUIJANO
JOHN JAIRO PARDO GONZÁLEZ****

PALABRAS CLAVES: lógica difusa, asistente computacional, análisis de vibraciones, inteligencia artificial.

DESCRIPCIÓN

El rodamiento como elemento mecánico es parte fundamental de toda maquinaria rotativa es por esto que la industria enfoca planes de mantenimiento basados en el monitoreo de la condición de equipos, utilizando el análisis de vibración como herramienta para el diagnóstico de fallas.

El desarrollo de este proyecto sirve como herramienta soporte en las labores de mantenimiento de una planta para obtener un diagnóstico de la condición del equipo de una forma rápida y confiable. Además de ayudar a la generación de una base de conocimiento en la línea de detección de fallas en rodamientos aplicando una de las ramas de la inteligencia artificial como lo es la lógica difusa, puesto esta permite representar el conocimiento común, que es mayoritariamente de tipo lingüístico cualitativo y no necesariamente cuantitativo, por tanto en muchas ocasiones los datos cualitativos nos brindan una información mas útil que los datos cuantitativos para el razonamiento humano.

Con la validación de este asistente computacional se encuentra que los resultados obtenidos son coherentes con el diagnóstico dado por un experto en análisis de vibraciones mecánicas y verificar la teoría de evolución de fallas en rodamientos comerciales. Con lo cual abre las puertas para fomentar la investigación y aplicación de otras ramas de la inteligencia artificial para detectar otras fallas comunes en maquinaria rotativa.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Ing. Jabid Eduardo Quiroga Méndez. Codirector: Alfonso García castro.

SUMMARY

TITLE

DETECTION OF FAULTS IN BALL BEARINGS THROUGH FUZZY LOGIC USING VIBRATION SIGNALS

AUTHORS

**FREDY JULIAN OTERO QUIJANO
JOHN JAIRO PARDO GONZÁLEZ****

KEYWORDS: fuzzy logic, computer wizard, vibration analysis, artificial intelligence.

DESCRIPTION

The bearing and mechanical element is a fundamental part of any rotating machinery that is why the industry focuses maintenance plans based on condition monitoring of equipment using vibration analysis as a tool for diagnosing faults.

The development of this project serves as a support tool in the maintenance work of a plant to obtain a diagnosis of the condition of the equipment in a fast and reliable. In addition to helping generate a knowledge base on-line fault detection in bearings by applying a branch of artificial intelligence is as fuzzy logic, since this allows us to represent the common knowledge, which is mostly of a linguistic qualitative rather than quantitative necessarily therefore often qualitative data give us an information more useful than quantitative data for human reasoning.

With the validation of this wizard is that computational results are consistent with the diagnosis given by an expert in mechanical vibration analysis and test the theory of evolution of commercial bearing failures. Thus opens the doors to promote research and implementation of other branches of artificial intelligence to detect other common faults in rotating machinery.

* Work degree

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director Ing. Msc. Jabid Eduardo Quiroga Méndez. Codirector: Ing. Msc. Alfonso García castro.

INTRODUCCIÓN

Las fallas que se presentan en equipos que conforman sistemas de ingeniería son inevitables y pueden ocasionar consecuencias serias como: paradas no programadas en equipos o ciclos de producción, disminución de la vida útil, generar elevados costos de reparación o reemplazo y afectar la calidad del producto. Por medio de un apropiado monitoreo de los equipos y el uso de esquemas de detección de fallas pueden obtenerse alertas tempranas para llevar a cabo acciones de mantenimiento preventivo con las cuales evitar estas situaciones perjudiciales.

La detección de fallas en rodamientos de bolas a través de lógica difusa usando señales de vibración proporciona una base de conocimiento consolidada en la línea de detección y diagnóstico de fallas en rodamientos, donde se considera una aplicación de la inteligencia artificial, en el cual, el estudiante tiene la posibilidad de analizar, comprender y comparar la falla presente en un rodamiento utilizando diversos métodos para obtención de un diagnóstico rápido y confiable.

Debido al avance tecnológico que se ha dado en el campo de la informática, de ciencias del conocimiento como la inteligencia artificial, en los siguientes capítulos se presenta la elaboración de un asistente computacional para el diagnóstico de fallas en rodamientos de bolas usando lógica difusa. Al cual durante su fase de desarrollo se genera una base de entrenamiento que simulan espectros característicos de fallas en pista interior y la pista exterior. Luego se valida experimentalmente en rodamientos que presentan diferentes

severidades de falla. En el que se logra como resultado en su primera parte un diagnostico preliminar del rodamiento y las entradas al motor de inferencia, después mediante el bloque de decisión el asistente computarizado brinda un diagnostico de la falla presente en el elemento del rodamiento.

1. SISTEMAS DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS

Todo sistema dinámico es susceptible de operar en condiciones de falla. Las consecuencias asociadas a este estado dependen de: la localización de la falla, su complejidad, los subsistemas involucrados y la magnitud de la falla. El mantenimiento basado en la condición permite identificar las fallas cuando éstas no son significativas sin detener la producción, tal mantenimiento puede ejecutarse antes que la falla se torne severa o la máquina pueda programarse para mantenimiento cuando ésta no sea requerida para producción.

Los sistemas para detección de falla involucran una evaluación continua para determinar, basados en la condición del sistema, la presencia de falla. Por lo tanto, aspectos como la eliminación de posibles fuentes de falsa alarma deben ser considerados en todo sistema de detección.

El proceso de diagnóstico de fallas incluye un mayor refinamiento de la información suministrada por el sistema de monitorización para determinar aspectos como la naturaleza de la falla, su localización, el grado de severidad, su origen, etc. Por tanto el sistema de detección de fallas debe ser inmune a otros factores que eventualmente pueden producir síntomas tales como: condiciones de operación del sistema, perturbaciones y ruido en los sensores.

2. MÉTODOS BASADOS EN EL CONOCIMIENTO

Una forma de detección de fallas basada en el conocimiento es un sistema experto, el cual es definido por Laughton¹ “Un sistema experto captura el conocimiento del humano experto en un estrecho dominio específico en una forma aplicable por una máquina. Se utiliza este conocimiento para proporcionar una decisión acertada a un nivel comparable con el del humano experto y que es capaz de justificar su razonamiento”.

El mecanismo de inferencia del sistema de detección de fallas se basa en reglas y la combinación de éstas. La base de conocimiento es en forma de una base de datos, conteniendo hechos (descriptores de propiedades y características) e información (reglas). Si el conocimiento es capturado por un conjunto de reglas, el sistema es también llamado “sistema basado en reglas”. El motor de inferencia contiene la secuencia o protocolo para procesar la información proporcionada por la base de conocimiento.

¹ Laughton, M.A., "Artificial intelligence techniques in power systems," Artificial Intelligence Techniques in Power Systems (Digest No: 1997/354), IEE Colloquium on , vol., no., pp.1/1-119, 3 Nov 1997.

3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Las vibraciones en los equipos rotativos pueden ser causadas por fuerzas de inercia, o por fuerzas del medio de trabajo, cuyos niveles se incrementan con la presencia de fallas, desperfectos o deterioros en los componentes dinámicos de las máquinas. La presencia de las distintas fallas en un equipo rotativo imprime en la señal de vibración ciertos rasgos los cuales pueden identificarse usando un análisis de la señal de vibración. El movimiento vibratorio no es el problema, pero el incremento en su nivel es la manifestación de que están apareciendo anomalías. El nivel de vibración es indicativo del estado de la máquina y el análisis de la vibración producida permite detectar los problemas de la misma, establecer la severidad y hacer seguimiento de la evolución antes de que la falla se torne severa.

El diagnóstico usando el análisis de vibraciones se basa en la relación de las frecuencias de vibración con el problema específico del equipo. El anterior análisis se obtiene utilizando técnicas de procesamiento de señal las cuales permiten descomponer la señal en sus respectivas frecuencias (FFT), o en frecuencia y tiempo (Wavelet).

4. ALTERNATIVAS PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS

Para solucionar el problema de la detección y diagnóstico de fallas en rodamientos se tiene diversas alternativas que nos brinda la rama de la inteligencia artificial², algunas de ellas son: las redes neuronales, algoritmos genéticos y lógica difusa.

Los sistemas basados en lógica difusa pueden ser aplicados a similares problemas que las redes neuronales, de modo que resultaran especialmente interesantes para problemas no lineales o no bien definidos. De la misma manera, los sistemas difusos permiten modelar cualquier proceso no lineal, y aprender de los datos haciendo uso de determinados algoritmos de aprendizaje.

No obstante, a diferencia de los sistemas neuronales, los basados en lógica difusa permiten utilizar fácilmente el conocimiento de los expertos en un tema, como punto de partida para una optimización automática, pues permite formalizar el conocimiento a veces ambiguo de un experto (o el sentido común) de una forma realizable. Además, gracias a la simplicidad de los cálculos necesarios (sumas y comparaciones, fundamentalmente), normalmente pueden realizarse sistemas baratos y rápidos.

² La inteligencia artificial en el diseño mecánico. Aplicación de algoritmos genéticos en la optimización del diseño mecánico. López García Javier, Pinzón Díaz Ricaurte Ivan. Director Ing. Jorge Enrique Meneses Flores. Bucaramanga. UIS. 1998.

La principal aplicación actual de la lógica difusa son los sistemas de control basados en lógica difusa que utilizan las expresiones de la lógica difusa para formular reglas orientadas al control de sistemas. Dichos sistemas de control difuso pueden considerarse una extensión de los sistemas expertos, pero superando los problemas prácticos que estos presentan en el razonamiento en tiempo real.

La selección de la lógica difusa como método de solución también está fundamentada en los diferentes artículos de investigación encontrados en la IEEE y ELSEVIER donde la aplicación de la lógica difusa se implementa como técnica de solución para diagnóstico de fallas.

5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE DIVERSOS MÉTODOS PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de diversos métodos para el diagnóstico de fallas en rodamientos.

SOLUCIONES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
REDES NEURONALES	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Son capaces de aprender de la experiencia, de generalizar de casos anteriores a nuevos casos, de abstraer características esenciales a partir de entradas que representan información irrelevante. ✓ Aprendizaje Adaptativo. ✓ Auto-organización. ✓ Tolerancia a fallos. ✓ Operación en tiempo real. ✓ Fácil inserción dentro de la tecnología existente. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Requieren aprender a comportarse y alguien debe encargarse de enseñarles o entrenarles, en base a un conocimiento previo del entorno del problema. ✓ Son lentas y difíciles de entrenar: cuanto más grande es una red, más le cuesta entrenarse y aprender. ✓ Necesitan bastante prueba y error.
ALGORITMOS GENÉTICOS	<ul style="list-style-type: none"> ✓ No necesitan conocimientos específicos sobre el problema que intentan resolver. ✓ Operan de forma simultánea con varias soluciones. ✓ Usan operadores probabilísticos, en vez de los típicos operadores determinísticos de las otras técnicas. ✓ Brinda soluciones a aceptables cuando no se tiene otro método de solución 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Pueden tardar mucho en converger, o no converger en absoluto. ✓ Pueden converger prematuramente debido a una serie de problemas de diversa índole. ✓ El tiempo para dar solución es poco competitivo comparado con otras técnicas.
LÓGICA DIFUSA	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La principal ventaja de este sistema de control es su facilidad de implementación. ✓ Este tipo de sistemas están dando muy buenos resultados en procesos no lineales y de difícil modelización. ✓ El modo de funcionamiento es similar al comportamiento humano. ✓ Es una forma rápida y económica de resolver un problema. ✓ No se necesita conocer el modelo matemático que rige su funcionamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cuando el problema lo podemos modelar matemáticamente, los resultados obtenidos no son precisos. ✓ En un sistema de detección de fallas es difícil definir una función y una regla confiable sin la participación y modificaciones previas de un experto humano.

Fuente. Autores del proyecto.

Como se explico en la tabla anterior la lógica difusa nos brinda una posibilidad económica de fácil implementación, además de una programación sencilla, que no requiere tiempo de entrenamiento para su desarrollo y así obtener un resultado preciso y confiable. La utilización de la lógica difusa nos permite trabajar con datos cualitativos y cuantitativos, en muchas ocasiones los resultados cualitativos nos aportan una información más útil para el razonamiento humano.

El problema se centra en la detección y diagnostico de fallas en rodamientos, en la cual la lógica difusa tiene gran aplicación en este campo a demás de aplicaciones tales como el control y modelado de sistemas lineales y no lineales, el diagnóstico y aislamiento de fallas en sistemas de tiempo real y análisis de datos fuera de línea o cuando es necesario obtener una decisión completa, lo cual se convierte en una razón para su utilización en el desarrollo de este trabajo de grado.

Además para nuestro problema en particular no contamos con un modelo matemático preciso, es ahí donde la lógica difusa es un excelente método de solución. Para implementar y validar el sistema para la detección de fallas en rodamientos de bolas usando señales de vibración se utiliza el banco experimental para estudio de fallas en rodamientos mediante análisis de vibraciones del laboratorio de vibraciones mecánicas.

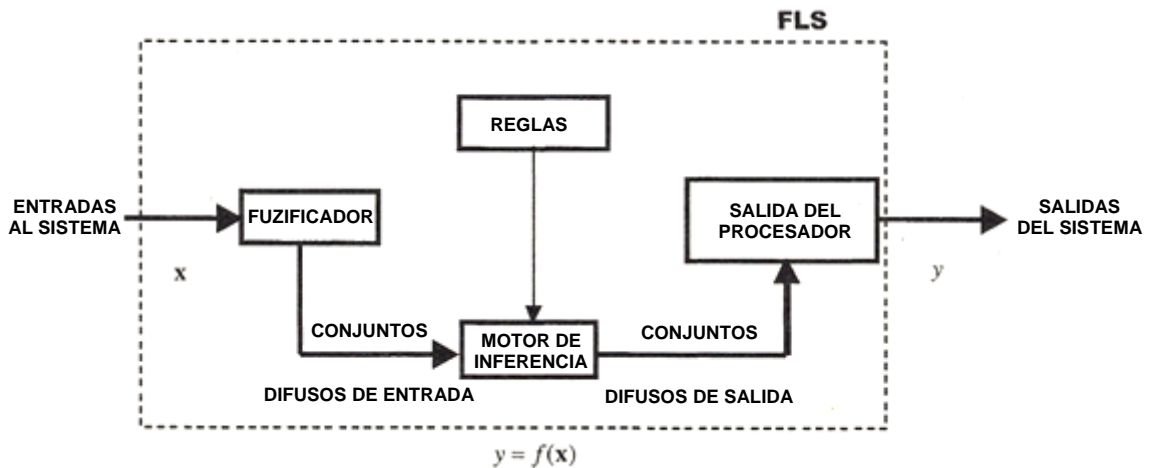
6. LÓGICA DIFUSA

La denominada lógica difusa permite tratar información imprecisa, en términos de conjuntos difusos, los cuales se combinan en reglas para definir acciones. De esta manera, los sistemas de control basados en lógica difusa combinan unas variables de entrada (definidas en términos de conjuntos difusos), por medio de grupos de reglas que producen uno o varios valores de salida.

6.1 FUNCIONAMIENTO DE LA LÓGICA DIFUSA

Un esquema de funcionamiento típico para un sistema difuso podría ser de la siguiente manera:

Figura 1. Sistema de lógica difusa.



Fuente. MENDEL M. JERRY. Rule-based fuzzy logic systems.

En la figura 1, el sistema de control hace los cálculos con base en reglas heurísticas. La salida final actuaría sobre el entorno físico, y los valores de las nuevas entradas sobre el entorno físico (modificado por la salida del sistema de control) serían tomados por sensores del sistema.

Por ejemplo, imaginando que el sistema difuso fuese el climatizador de un coche que se autoregula según las necesidades: Los chips difusos del climatizador recogen los datos de entrada, que en este caso bien podrían ser la temperatura y humedad simplemente. Estos datos se someten a las reglas del motor de inferencia (como se ha comentado antes, de la forma **SI... ENTONCES...**), resultando un área de resultados. De esa área se escogerá el centro de gravedad, proporcionándola como salida. Dependiendo del resultado, el climatizador podría aumentar la temperatura o disminuirla dependiendo del grado de la salida.

6.2 PROCESO DE INFERENCIA DIFUSO

El proceso de inferencia difuso se realiza a través de 5 pasos:

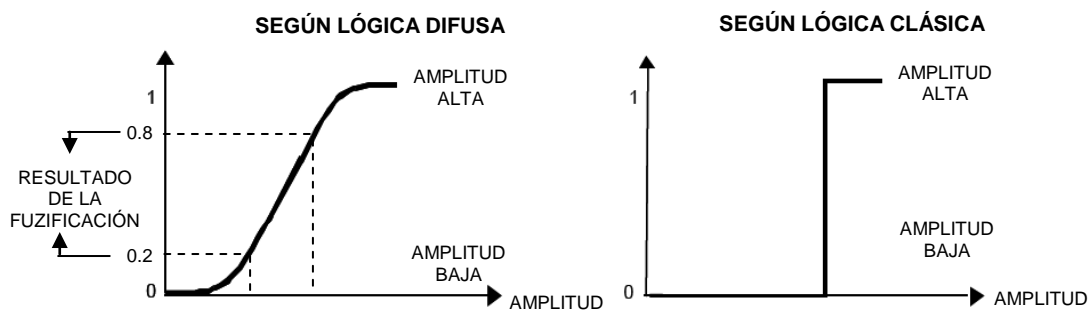
- ✓ **Paso 1.** “Fuzificación” de las variables de entrada.
- ✓ **Paso 2.** Aplicación de los operadores difusos (AND, OR, NOT) en el antecedente.
- ✓ **Paso 3.** Aplicación del método de Implicación del antecedente al consecuente.
- ✓ **Paso 4.** Agregación de los consecuentes a través de las reglas.
- ✓ **Paso 5.** “Defuzificación”.

6.2.1 Paso 1: “Fuzificación” de las variables de entrada

En la lógica clásica se contempla la pertenencia o no pertenencia de un elemento a un conjunto, sin embargo cuando se utiliza los conjuntos difusos se da un grado de pertenencia al elemento del conjunto, para el caso en particular se tiene por ejemplo los conjuntos de frecuencia (**bpfi_1**, **bpfo_1**, **bsf_1**, **ftf_1**).

El grado de pertenencia se valora generalmente entre cero y uno, por ejemplo si se tiene una amplitud alta se puede dar un grado de pertenencia de 0.8, pero por el contrario si se tiene una amplitud baja podría tener un grado de pertenencia de 0.2 , en el siguiente gráfico se muestra el resultado de la “fuzificación”.

Figura 2. Comparación entre la lógica difusa y lógica clásica.

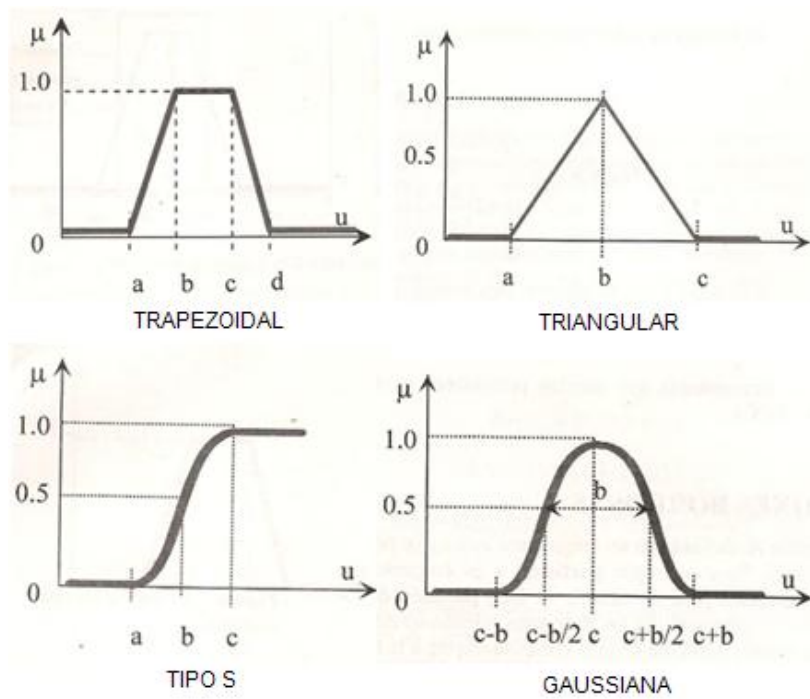


Fuente. Autores del proyecto.

De hecho ese grado de pertenencia se expresa teniendo en cuenta las funciones de membresía entre las que se encuentran funciones

características como son la triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoideal, entre otras. Esta función debe ser continua, además de tomar valores generalmente entre 0 y 1, así mismo la forma de esta función varia de acuerdo al criterio del experto, región, época, etc.

Figura 3. Algunas funciones de membresía características.



Fuente. SANZ MOLINA Alfredo, MARTIN DEL RIO Bonifacio. Redes Neuronales y Sistemas Borrosos.

6.2.2 Paso 2: Aplicación de los operadores difusos (AND, OR, NOT)

Después de la fuzificación de las variables de entrada, se encuentra que las reglas de inferencia difusa planteadas en el antecedente pueden estar compuestas por una o varias expresiones según sea el caso gracias a que la lógica difusa utiliza conectores u operadores lógicos como son el AND, OR, y NOT que cuando se aplican se obtiene un número que representa el resultado del antecedente según la parte evaluada para esa regla, por ejemplo:

If BPF1_1 es alta_1 **and** BPFO_1 es media_1 **and** BSF_1 es baja_1 **and** FTF_1 es baja_1

ANTECEDENTE

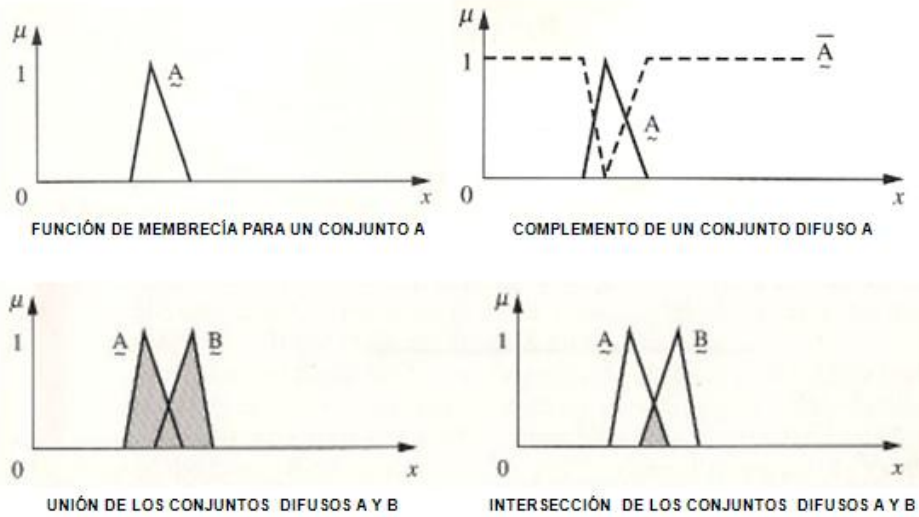
Then DEFECTO_PISTA_INTERNA es severidad_crítica **or** DEFECTO_PISTA_EXTERNA es severidad_moderada **or** DEFECTO_ELEMENTO_RODANTE es severidad_leve **or** DEFECTO_CANASTILLA es severidad_leve.

CONSECUENTE



De hecho los valores a diferencia de la lógica clásica pueden estar entre cero (completamente falso) y uno (completamente verdadero) utilizando las funciones **min(A,B)**, **max(A,B)**, y **not (1-A)**, con las cuales se pueden realizar operaciones lógicas que preservan el resultado de las tablas de verdad.

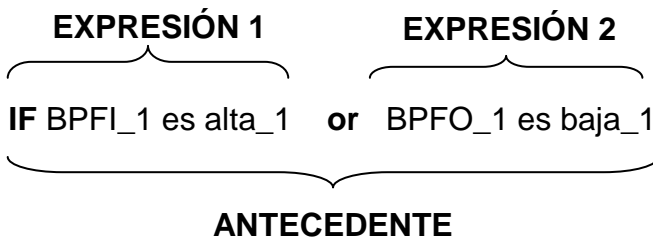
Figura 4. Operaciones con conjuntos difusos.



Fuente. ROSS Timothy. Fuzzy logic with engineering applications

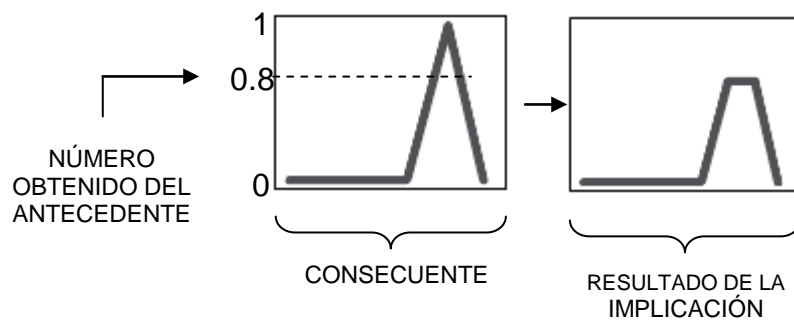
Las operaciones básicas entre conjuntos difusos son la unión, la intersección y complemento, al igual que la teoría clásica de conjuntos cumplen con las propiedades como asociativa, distributiva, entre otras.

Para comprender como funcionan los operadores difusos se explica la regla difusa anteriormente presentada:



Además se tiene que el consecuente es un conjunto difuso representado por una función de membresía la cual es posteriormente modificada dependiendo de los operadores utilizados en el proceso de implicación como puede ser **min** (mínimo) que trunca el conjunto difuso de salida, o **prod** (producto) que escala el conjunto difuso de salida. Posteriormente el proceso de implicación se implementa para cada una de las reglas que conforman el sistema de detección de fallas basado en lógica difusa. A continuación se muestra el proceso de implicación para la regla nombrada anteriormente:

Figura 5. Proceso de implicación.



Fuente. Autores del proyecto.

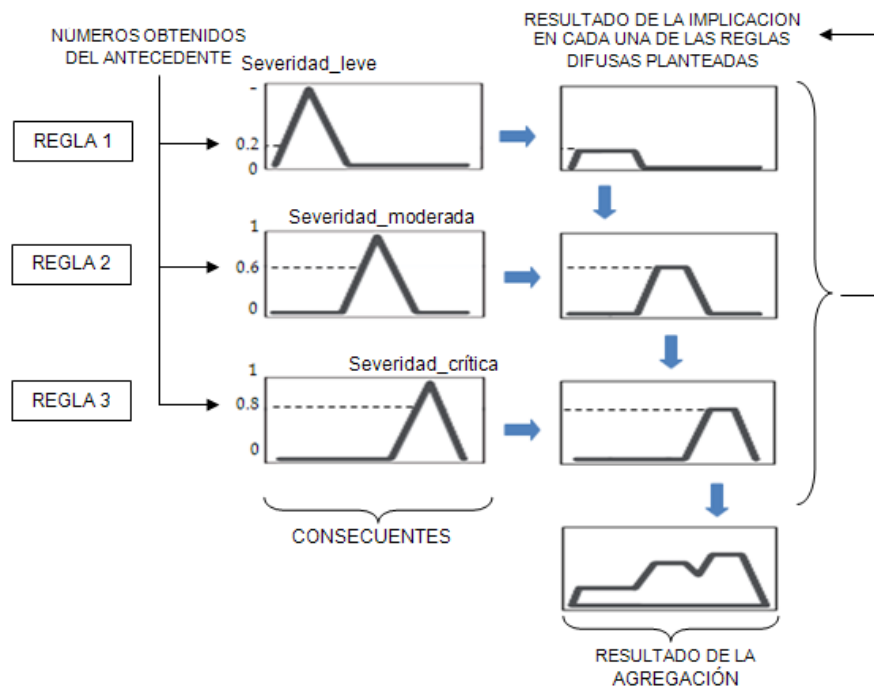
6.2.4 Paso 4: Agregación de los consecuentes a través de las reglas

Luego de realizar el proceso de implicación para cada una de las reglas difusas planteadas, se comienza con cada una de ellas a aplicar el proceso de agregación, el cual es un método conmutativo, es decir el orden en el cual las reglas sean ejecutadas no importa, además el proceso de implicación se puede realizar por medio de tres métodos de entrada como son: Max (el

máximo), Probor (probabilístico OR), Sum (simplemente la suma de cada regla del conjunto de salida).

Entonces se tiene como entradas los conjuntos difusos que representaron la salida del proceso de implicación (conjuntos del resultado del proceso de implicación) los cuales se combinan dentro de un sencillo conjunto difuso dependiendo de cual sea el método escogido se obtiene la salida del proceso de agregación el cual es un conjunto difuso por cada variable de salida, para que quede como paso final la defuzificación. A continuación se muestra un esquema del proceso de implicación mediante la aplicación del método **max**:

Figura 6. Proceso de agregación.



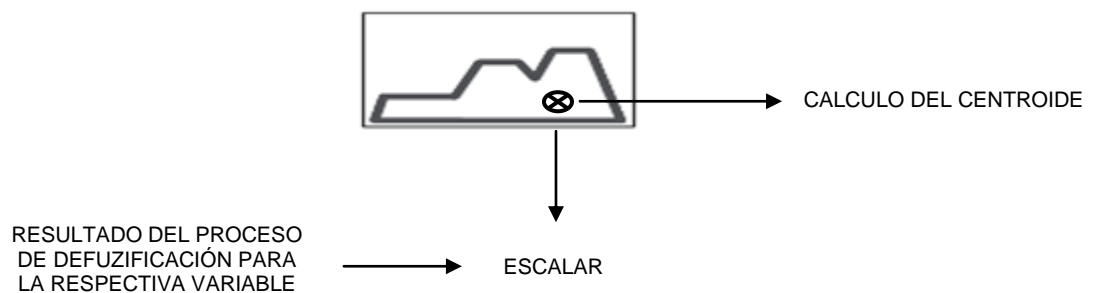
Fuente. Autores del proyecto.

6.2.5 Paso 5: “defuzificación”.

La entrada para el proceso de “defuzificación” es un conjunto difuso (conjunto difuso obtenido de la salida del proceso de agregación) y la salida es un sencillo numero (escalar) por tanto es un proceso inverso al que se realiza en el proceso de “fuzificación”.

De hecho para obtener ese el resultado se pueden aplicar diversos modelos matemáticos entre los que se encuentran: método del centroide, método del máximo, método de la altura. Sin embargo el método más utilizado es el **método del centroide** en donde se calcula el centro de gravedad del área que se encuentra bajo la curva del conjunto obtenido del proceso de agregación, además nos ofrece la ventaja de obtener una solución única para la respectiva variable de salida. El proceso de “defuzificación” se muestra a continuación:

Figura 7. Proceso de “defuzificación”.



Fuente. Autores del proyecto.

7. APLICACIONES Y VENTAJAS DE LA LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa se utiliza cuando la complejidad del proceso en cuestión es muy alta y no existen modelos matemáticos precisos, para procesos altamente no lineales y cuando se envuelven definiciones y conocimiento no estrictamente definido (impreciso o subjetivo). En cambio, no es una buena idea usarla cuando algún modelo matemático ya soluciona eficientemente el problema, cuando los problemas son lineales o cuando no tienen solución.

Como principal ventaja, cabe destacar los excelentes resultados que brinda un sistema de control basado en lógica difusa: ofrece salidas de una forma veloz y precisa, disminuyendo así las transiciones de estados fundamentales en el entorno físico que controle. A continuación se citan algunos ejemplos de la aplicación de la lógica difusa:

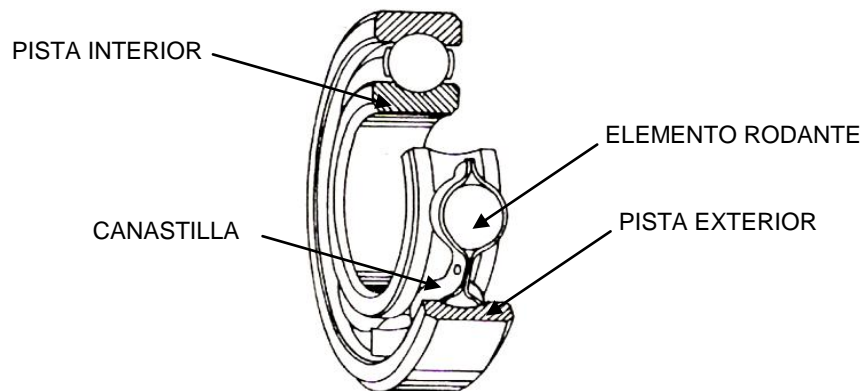
- ✓ Sistemas de control de acondicionadores de aire.
- ✓ Sistemas de foco automático en cámaras fotográficas.
- ✓ Optimización de sistemas de control industriales.
- ✓ Sistemas expertos del conocimiento (simular el comportamiento de un experto humano).
- ✓ Bases de datos difusas: Almacenar y consultar información imprecisa. Para este punto, por ejemplo, existe el lenguaje FSQL.

8. FUNDAMENTOS DE LOS RODAMIENTOS

Un rodamiento es un mecanismo que permite un movimiento de rodadura entre dos superficies opuestas separadas por elementos rodantes que pueden ser esferas o rodillos y que deslizan sobre guías o pistas. El área de contacto entre los elementos rodantes y las pistas es tan pequeña que las pérdidas por fricción son muy bajas, lo cual resulta muy favorable cuando se trata de maquinaria que posee un gran número de estos elementos. Igualmente, el incremento en su temperatura de funcionamiento es baja como resultado del poco consumo de potencia. Se conocen también con el nombre de cojinetes antifricción, son de alta precisión y de larga duración, especialmente si han sido correctamente montados y se lubrican adecuadamente.

8.1 PARTES FUNDAMENTALES DE UN RODAMIENTO

Figura 8. Partes fundamentales de un rodamiento.



Fuente. ALBARRACIN A. PEDRO. Tribología y lubricación industrial y automotriz.

8.1.1 Pista interior y exterior

Son anillos concéntricos también denominados caminos de rodadura. Normalmente la pista interior va solidaria al eje, mientras que la pista exterior es fijada al soporte o alojamiento, aunque esta configuración puede cambiar pero siempre una de las dos pistas permanecerá fija mientras la otra gira.

8.1.2 Elemento rodante

Entre los dos aros se disponen los elementos rodantes que giran sobre su propio eje (bolas, rodillos cilíndricos, rodillos cónicos, rodillos esféricos, etc.), los cuales ruedan sobre las pistas de rodadura practicadas en los aros, permitiendo la movilidad de la parte giratoria respecto a la fija.

8.1.3 Canastilla

Este elemento tiene como objeto alojar los elementos rodantes para conseguir que guarden la debida distancia entre si y evitar que los elementos rodantes rocen entre si.

8.2 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE LOS RODAMIENTOS

Bajo carga, una bola nunca llega a tener un solo punto de contacto. Si esta bola es presiona contra una superficie plana, el contacto tiene la forma de un pequeño círculo, cuando es cargada entre las dos pistas de un rodamiento, el efecto es diferente, resultando sobre cada pista una superficie elíptica de contacto. Esta superficie es considerablemente mayor que el círculo que se obtendrá sobre una superficie plana, con lo cual la presión por unidad de superficie resulta menor.

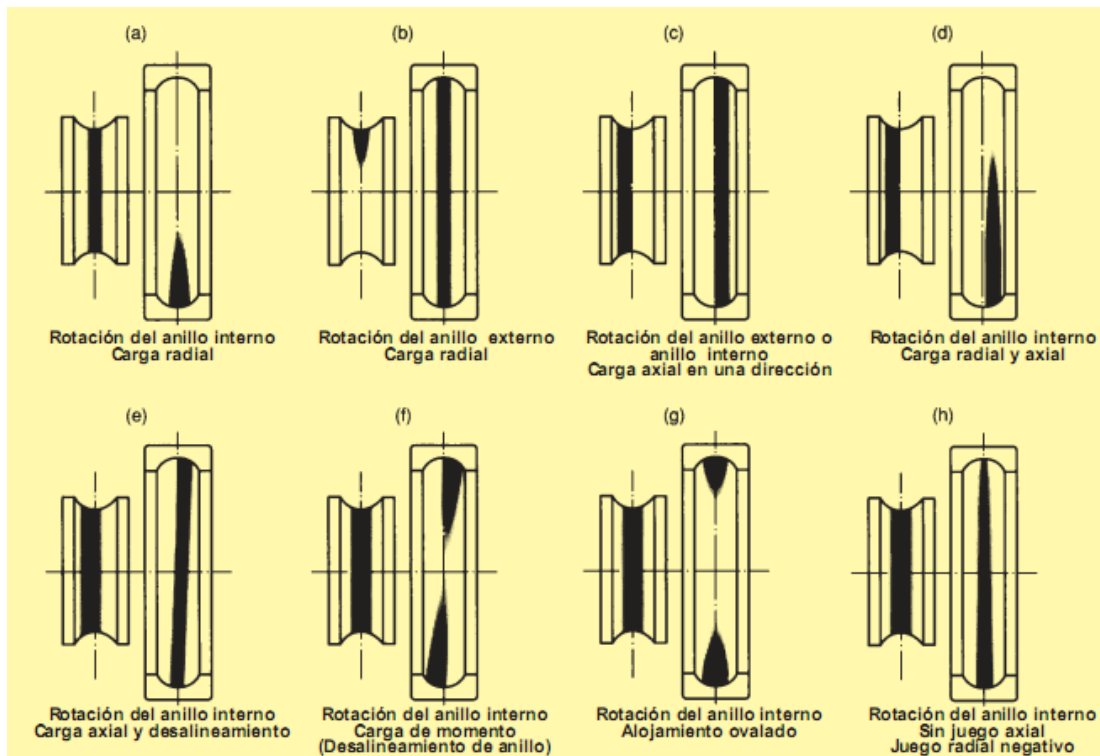
En operación, las bolas ruedan alrededor de la pista. A medida que una bola se acerca al área de carga o de presión, se produce una pequeña deformación, tanto del elemento rodante como de las pistas. Esta deformación desaparece a medida que las bolas salen del área de presión. En realidad, el metal en el área de contacto esta comprimido pero la parte que rodea esta zona de compresión sufre un esfuerzo de tracción. Todos los puntos de la pista tienen estos ciclos de compresión y elongación, a medida que van pasando las bolas.

Todo el calor desarrollado en el rodamiento es principalmente el resultado de estas presiones y de la deformación del rodamiento que las acompaña la vida de un rodamiento se define como el numero de reducciones (o de horas, a una velocidad constante determinada) que el rodamiento puede dar antes de que se manifieste el primer signo de fatiga (desconchado) en uno de sus aros o de sus elementos rodantes. Sin embargo, la fatiga no es la causa principal del fallo de un rodamiento, sino el desgaste, la corrosión, obturaciones (sellos) deficientes, etc.

8.3 CARGA EN LOS RODAMIENTOS

La carga a actuar sobre el rodamiento tiene un comportamiento que puede ser normal o anormal, dando lugar a que el rodamiento alcance su vida a la fatiga, o que esta se vea progresiva o bruscamente interrumpida por alguno de los diferentes tipos de fallas que pueden ocurrir. La figura 9. (a) muestra el trazado más común cuando el anillo interior sólo gira con carga radial. Las figuras de 3 (e) hasta 3 (h) muestran varios tipos de cargamentos y la reducción de la vida como uno de sus efectos adversos.

Figura 9. Cargas que pueden actuar sobre un rodamiento.

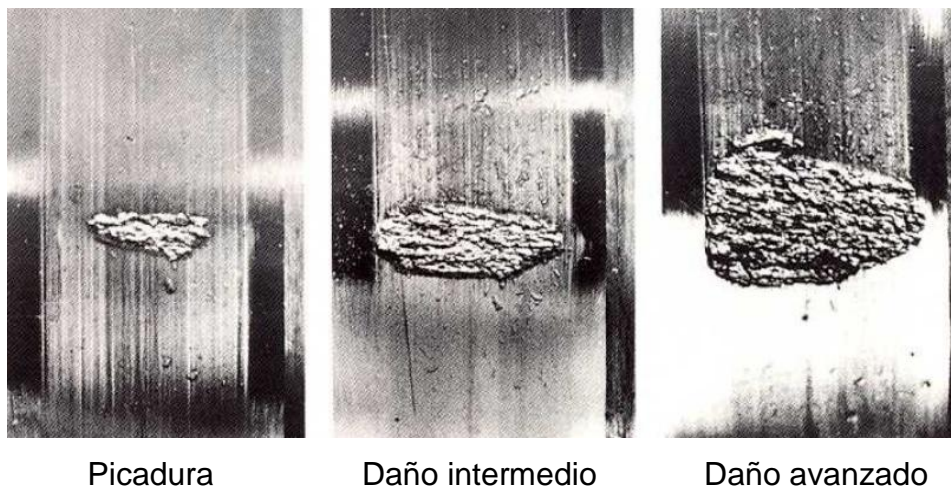


Fuente. NSK BEARING DOCTOR. Diagnóstico rápido de fallas en rodamientos.

8.4 FALLAS EN PISTA INTERIOR Y PISTA EXTERIOR

Para la etapa de validación se utiliza el rodamiento 6204 al cual se indujeron fallas tanto en pista interior como exterior. Con cierto grado de severidad, es decir desde picadura (severidad_leve) pasando por un daño intermedio (severidad_moderada) hasta un daño avanzado (severidad_crítica). Estas fallas introducidas corresponden a la progresión del descascarado en los rodamientos, que es una de las fallas más comunes, la cual nos permite comparar las señales para las diferentes etapas de evolución de la falla, y compararlas con un rodamiento en buen estado. A continuación se muestra la evolución de la falla en rodamientos.

Figura 10. Evolución del descascarado de un rodamiento.



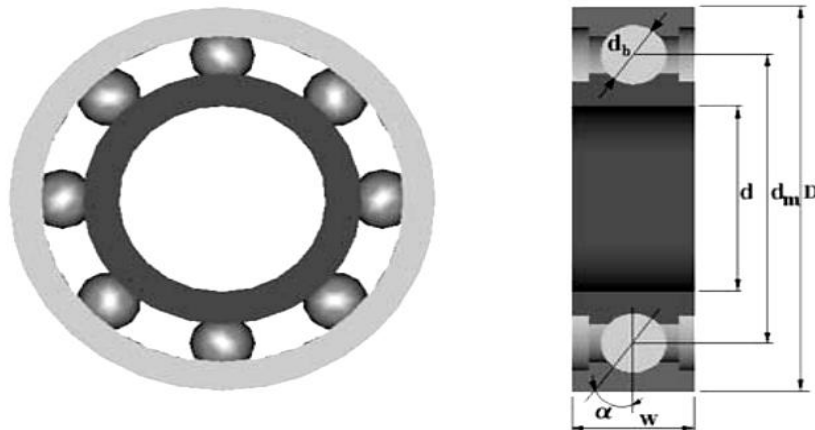
Fuente. MANUAL SKF. Mantenimiento en rodamientos.

Para la inducción de las fallas se utiliza un motor tool con unas fresas de odontología, se fresa la superficie de las pistas con base en la teoría de evolución de falla anteriormente nombrada³.

8.5 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS RODAMIENTOS

Para determinar los distintos valores de frecuencia de falla es preciso conocer la geometría del rodamiento además de la velocidad de giro. En la siguiente figura se muestra la geometría característica de un rodamiento de bolas.

Figura 11. Características geométricas del rodamiento de bolas.



Fuente. ZEKI KIRAL, HIRA KARAGULLE. Simulation and analysis of vibration signals generated by rolling element bearing with defects.

³ Banco experimental para el estudio de fallas en rodamientos. Castro Martínez Yira Alejandra, Páez Páez Edwin Germán. Director: Ing. García Castro Alfonso .Bucaramanga. UIS. 2008. Pg. 85-88.

Donde:

- ✓ $w = \text{ancho del rodamiento}$
- ✓ $d = \text{diametro interior del rodamiento}$
- ✓ $D = \text{diametro exterior}$
- ✓ $Z = \text{numero de elementos rodantes (bolas o rodillos)}$
- ✓ $d_b = \text{diametro del elemento rodante (mm o in)}$
- ✓ $d_m = \text{diametro medio del rodamiento (mm o in)} = \frac{D + d}{2}$
- ✓ $\alpha = \text{angulo de contacto (grados)}$

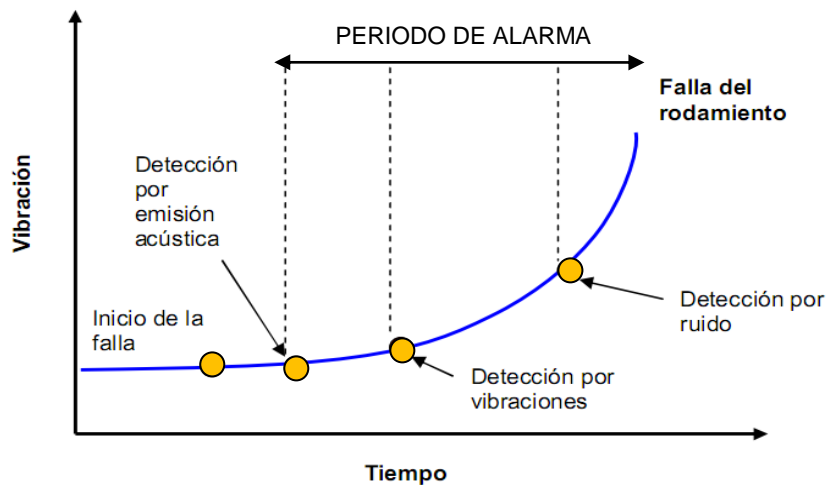
El rodamiento utilizado para el desarrollo de este proyecto es el rodamiento de referencia 6204, el cual tiene las siguientes características geométricas:

- ✓ Número de bolas: 8
- ✓ Bola/diámetro de la rueda : 0.3130/ 7.9502
- ✓ Diámetro primitivo de las pistas: 1.320/33.528
- ✓ Ángulo de contacto (grados): 0
- ✓ Pista interna rotando: si

8.6 ANÁLISIS DE VIBRACIONES APLICADO A RODAMIENTOS DEFECTUOSOS

Probablemente la técnica más común y universalmente aceptada para el monitoreo de condiciones en maquinaria rotativa es el monitoreo y análisis de vibración. Todas las máquinas tienen un nivel de vibración que puede ser considerado normal o inherente a su funcionamiento. Cuando este nivel aumenta y empieza a ser excesivo, es normalmente el síntoma de la presencia de una falla. A continuación se muestra la curva típica de falla en rodamientos.

Figura 12. Curva típica de falla en rodamientos.



Fuente. SKF condition monitoring, curso de entrenamiento en análisis de vibraciones, SKF 2000.

Diferentes métodos han sido utilizados para la detección y diagnóstico de defectos de rodamientos, estos métodos son principalmente:

- ✓ Análisis de vibración, ruido y ondas.
- ✓ Análisis de temperatura.
- ✓ Análisis de partículas en el aceite.

El método de análisis de vibraciones usa de diferentes técnicas como son: el análisis de vibración en tiempo y frecuencia, análisis de ondas de choque, análisis del ruido, análisis de emisión acústica, etc.

Para realizar el análisis y diagnóstico de fallas utilizando la medición de la vibración, se han desarrollado diferentes técnicas e instrumentos, dependiendo del rango de frecuencias dentro del cual se desea hacer el análisis. Unas están enfocadas a la zona de las altas frecuencias y otras a la zona de frecuencias bajas e intermedias.

8.7 ETAPAS Y EVOLUCIÓN DE FALLA EN RODAMIENTOS

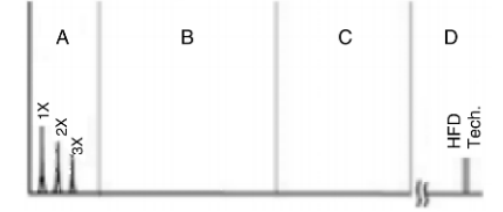
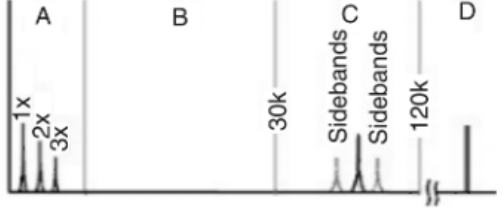
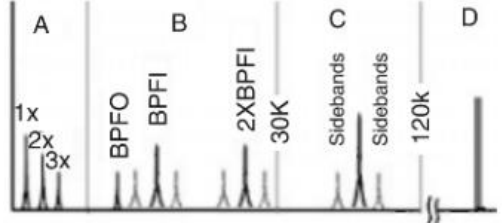
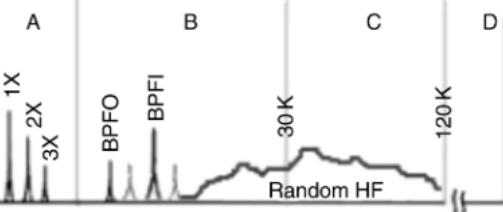
Durante la evolución de falla en rodamientos el espectro puede ser dividido en cuatro zonas:

- ✓ **ZONA A:** Zona de armónicos y RPM de la maquina.
- ✓ **ZONA B:** Zona de frecuencias defecto del rodamiento (5-30 Kcpm).
- ✓ **ZONA C:** Zona de componentes de frecuencias naturales del rodamiento (30-120 Kcpm).
- ✓ **ZONA D:** Zona de detección de alta frecuencia (mas de 120 Kcpm).

Para el desarrollo de este trabajo de grado se considera el deterioro del rodamiento desde la etapa 1 hasta la etapa 3 debido a que la vida remanente del rodamiento en esta etapa es menos del 1%, lo cual amerita su reemplazo.⁴

⁴ Banco experimental para el estudio de fallas en rodamientos. Castro Martínez Yira Alejandra, Páez Páez Edwin Germán. Director: Ing. García Castro Alfonso .Bucaramanga. UIS. 2008. Pg. 85-88.

Tabla 2. Evolución de falla en rodamientos.

ETAPA	ESPECTRO
<p>ETAPA 1 (Defecto incipiente): Se presentan pequeños defectos no visibles (microscópicos) en las pistas del rodamiento y en el espectro aparecen los armónicos 1x, 2x, 3x.</p>	 <p>The spectrum shows a baseline with three distinct peaks labeled 1x, 2x, and 3x. A vertical line labeled A is at the 1x frequency. A vertical line labeled B is at a higher frequency. A vertical line labeled C is at a higher frequency. A vertical line labeled D is at the 120k frequency. A small peak at 120k is labeled HFD Tech.</p>
<p>ETAPA 2 (Defectos moderado del rodamiento): El defecto se desarrolla más allá del tamaño microscópico y comienza a excitar las frecuencias naturales. A medida que el defecto crece causa mayores impactos los cuales causan mayor respuesta en los picos de las frecuencias naturales. Cuando el desgaste progresa aparecen bandas laterales en ambos lados del pico de la frecuencia natural del rodamiento.</p>	 <p>The spectrum shows peaks at 1x, 2x, and 3x. A peak at 30k is labeled. Two peaks on either side of 30k are labeled Sidebands. A vertical line labeled A is at the 1x frequency. A vertical line labeled B is at the 30k frequency. A vertical line labeled C is at the sideband frequencies. A vertical line labeled D is at the 120k frequency.</p>
<p>ETAPA 3 (Defecto crítico en el rodamiento): Desgaste claramente visible sobre la periferia del rodamiento, aparecen picos a las frecuencias de falla de los elementos del rodamiento y a los armónicos de estas. Al aumentar el desgaste aparecen bandas laterales en ambos lados de las frecuencias de falla del rodamiento.</p>	 <p>The spectrum shows peaks at 1x, 2x, and 3x. Peaks at BPFO and BPFI are labeled. A peak at 2xBPFI is labeled. A peak at 30k is labeled. Two peaks on either side of 30k are labeled Sidebands. A vertical line labeled A is at the 1x frequency. A vertical line labeled B is at the BPFO frequency. A vertical line labeled C is at the sideband frequencies. A vertical line labeled D is at the 120k frequency.</p>
<p>ETAPA 4 (Defecto total en el rodamiento): la amplitud 1x crece y normalmente causa crecimiento de muchos armónicos de la velocidad de giro. Algunos picos a las frecuencias de falla y frecuencias naturales empiezan a desaparecer y son reemplazadas por vibración aleatoria en una banda amplia de alta frecuencia.</p>	 <p>The spectrum shows peaks at 1x, 2x, and 3x. Peaks at BPFO and BPFI are labeled. A peak at 30k is labeled. A peak at 120k is labeled. A broad band at high frequencies is labeled Random HF. A vertical line labeled A is at the 1x frequency. A vertical line labeled B is at the BPFO frequency. A vertical line labeled C is at the 30k frequency. A vertical line labeled D is at the 120k frequency.</p>

Fuente. SCHEFFLER CORNELIUS. Practical machinery vibration analysis & predictive maintenance.

8.8 CÁLCULO DE LAS FRECUENCIAS DE FALLA

Para controlar el estado de funcionamiento de los rodamientos se utilizan diversas técnicas, si bien, el denominador común de todas ellas es que la frecuencia de un defecto en pista interior, la frecuencia de un defecto en la pista exterior, la frecuencia de un defecto en la canastilla y la frecuencia de un defecto en un elemento rodante son distintas. Estas frecuencias se pueden calcular a partir de las formulas correspondientes. Sin embargo es preciso saber su geometría, y la velocidad (rpm) a la cual gira el rodamiento.

El cálculo de las frecuencias de falla de los rodamientos se determina en base a la geometría y velocidad de rotación del rodamiento o directamente de diferentes software comerciales. Estas frecuencias son comúnmente designadas por:

- ✓ **BPFO (Ball pass frequency of the outer race):** es la frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista externa.
- ✓ **BPMI (Ball pass frequency of the inner race):** es la frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista interna:
- ✓ **BSF (Ball spin frequency):** es la frecuencia de giro de los elementos rodantes.
- ✓ **FTF (Fundamental train frequency):** es la frecuencia de rotación de la canastilla o jaula que contiene los elementos rodantes.

Tabla 3. Frecuencias de falla del rodamiento 6204 calculadas a partir de las fórmulas.

SIGLA	ECUACIÓN	FRECUENCIA EN ORDENES	FRECUENCIA DE FALLA [Hz] A 1800 RPM
BPFI	$\frac{Z}{2} \left(1 + \frac{d_b}{d_m} \cos \alpha \right) * RPM$	4.9484	148.452
BPFO	$\frac{Z}{2} \left(1 - \frac{d_b}{d_m} \cos \alpha \right) * RPM = Z * FTF$	3.052	91.56
BSF	$\frac{Z}{2d_b} \left[1 - \left(\frac{d_b}{d_m} \cos \alpha \right)^2 \right] * RPM$	1.99	59.7
FTF	$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_b}{d_m} \cos \alpha \right) * RPM$	0.3815	11.445

Fuente. Autores del proyecto

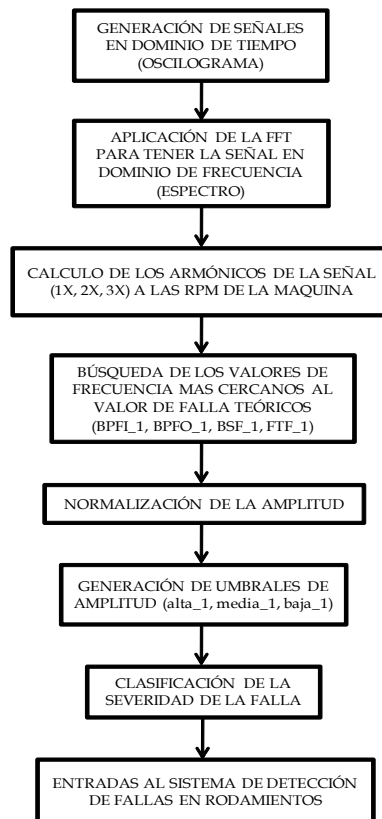
Donde:

- ✓ $Z = \text{numero de elementos rodantes (bolas o rodillos)}$
- ✓ $d_b = \text{diametro del elemento rodante (mm o in)}$
- ✓ $d_m = \text{diametro medio del rodamiento (mm o in)} = \frac{D + d}{2}$
- ✓ $\alpha = \text{angulo de contacto (grados)}$

9. BASE DE ENTRENAMIENTO

Durante la etapa inicial en el desarrollo del sistema para la detección y diagnóstico de fallas en rodamientos usando la lógica difusa se generó un conjunto de espectros característicos las cuales simulan cada una de las fallas presentes en los rodamientos, este grupo de espectros sirven de base de entrenamiento para luego validar experimentalmente el sistema propuesto usando el banco para estudio de fallas en rodamientos, a continuación se muestra un esquema general del proceso implementado para la base de entrenamiento.

Figura 13. Proceso implementado para la base de entrenamiento.

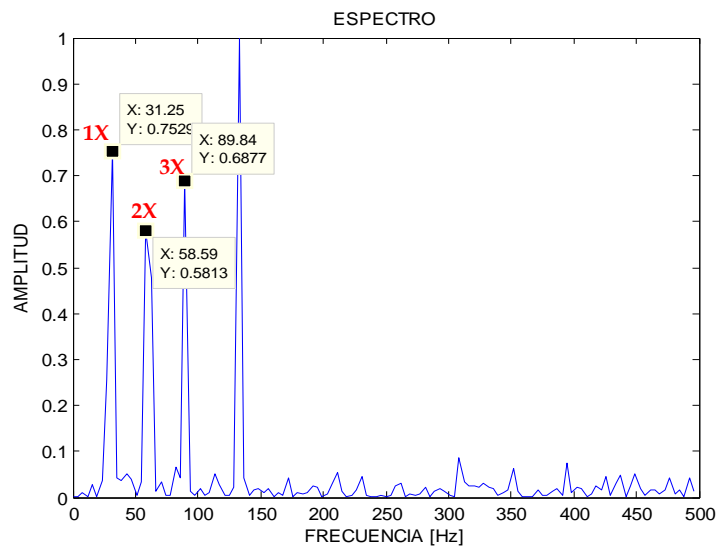


Fuente. Autores del proyecto.

9.1 SIMULACIÓN DE LAS SEÑALES

Durante el análisis de un espectro de falla en un rodamiento se encuentran picos característicos a la velocidad de rotación del elemento (zona de armónicos 1x, 2x, 3x), ver tabla 2, los cuales están presentes en la etapa inicial y durante la evolución de la falla en el rodamiento. Se tiene en cuenta una velocidad de rotación de 1800 rpm para determinar los valores de frecuencia de falla (BPFI, BPFO) del rodamiento.

Figura 14. Armónicos 1x 2x 3x presentes en la etapa inicial y durante la evolución de la falla del rodamiento.



Fuente. Autores del proyecto.

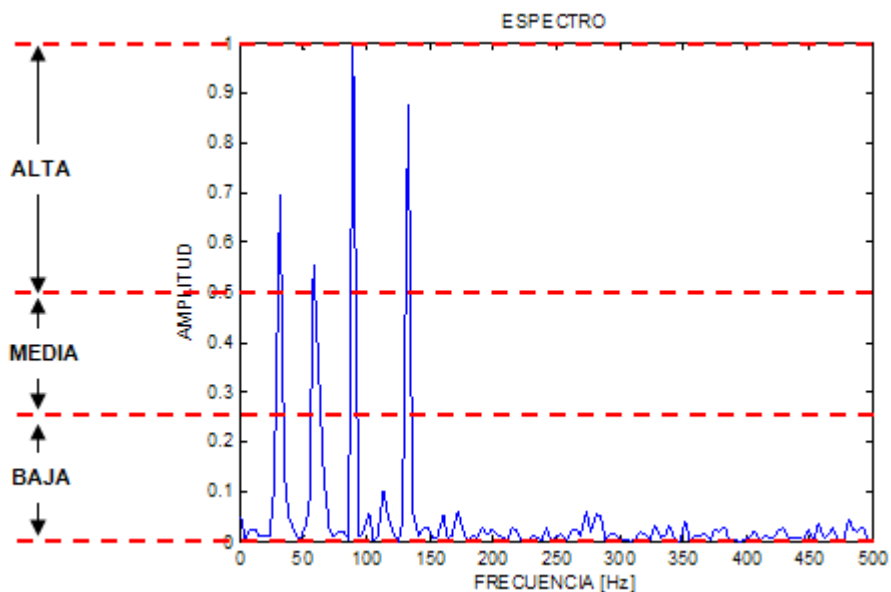
Teniendo como base artículos tipo revista científica del ELSEVIER⁵ En el que se trata la severidad de la falla (determinación de si el valor de un pico se encuentra dentro de los límites de alarma) se normaliza los valores de amplitud y se tiene umbrales de amplitud, los cuales han sido de uso

⁵ Expert system development for vibration analysis in machine condition monitoring. Ebersbach Stephan. Peng Zhongxiao. ELSEVIER. School of Engineering, James Cook University, Townsville, Qld 4811. Australia.

frecuente en la ingeniería de mantenimiento en industria para la detección y diagnóstico de fallas en rodamientos.

Dichos umbrales han sido determinados por la experiencia, aunque también pueden ser estimados usando estándares como la ISO 10816⁶. Por tanto se generan tres “umbrales de amplitud” llamados: **alta_1**, **media_1**, **baja_1**, donde el umbral más significativo de falla es **alta_1**. La siguiente figura ilustra los umbrales de amplitud normalizada.

Figura 15. Umbrales de amplitud normalizada [0-1].



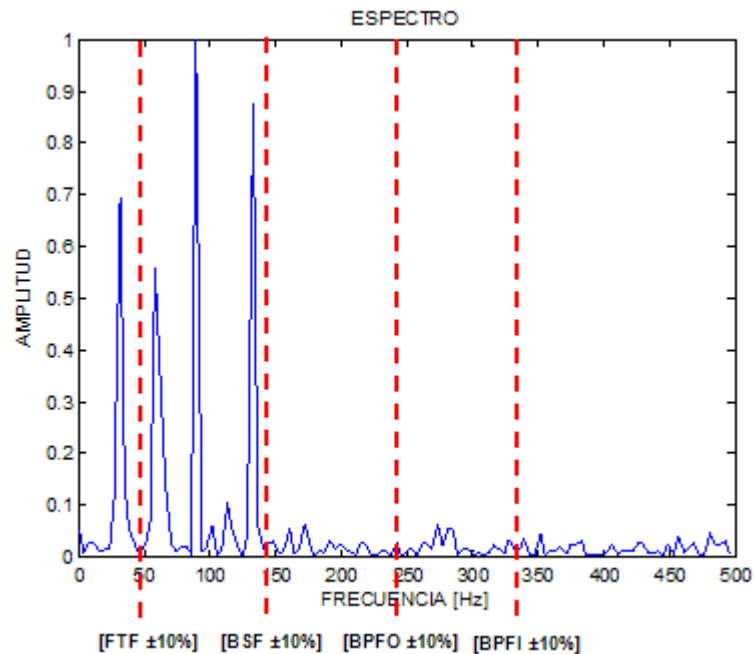
Fuente. Autores del proyecto.

Para cada uno de los umbrales de amplitud (**alta_1**, **media_1**, **baja_1**), se selecciona el pico máximo en un rango de frecuencias del $\pm 10\%$ del correspondiente valor de frecuencia calculado y pueda detectar componentes en ese rango y asumirlas como las componentes de falla.

⁶ Norma ISO 10816.

Estos valores de amplitud máxima se almacenan en (vectores) llamados respectivamente **BPFI_1**, **BPFO_1**, **BSF_1**, Y **FTF_1** los cuales se constituyen en las **entradas al sistema para la detección de fallas en rodamientos**. La siguiente figura es un ejemplo del proceso de generación de los diferentes rangos de frecuencia.

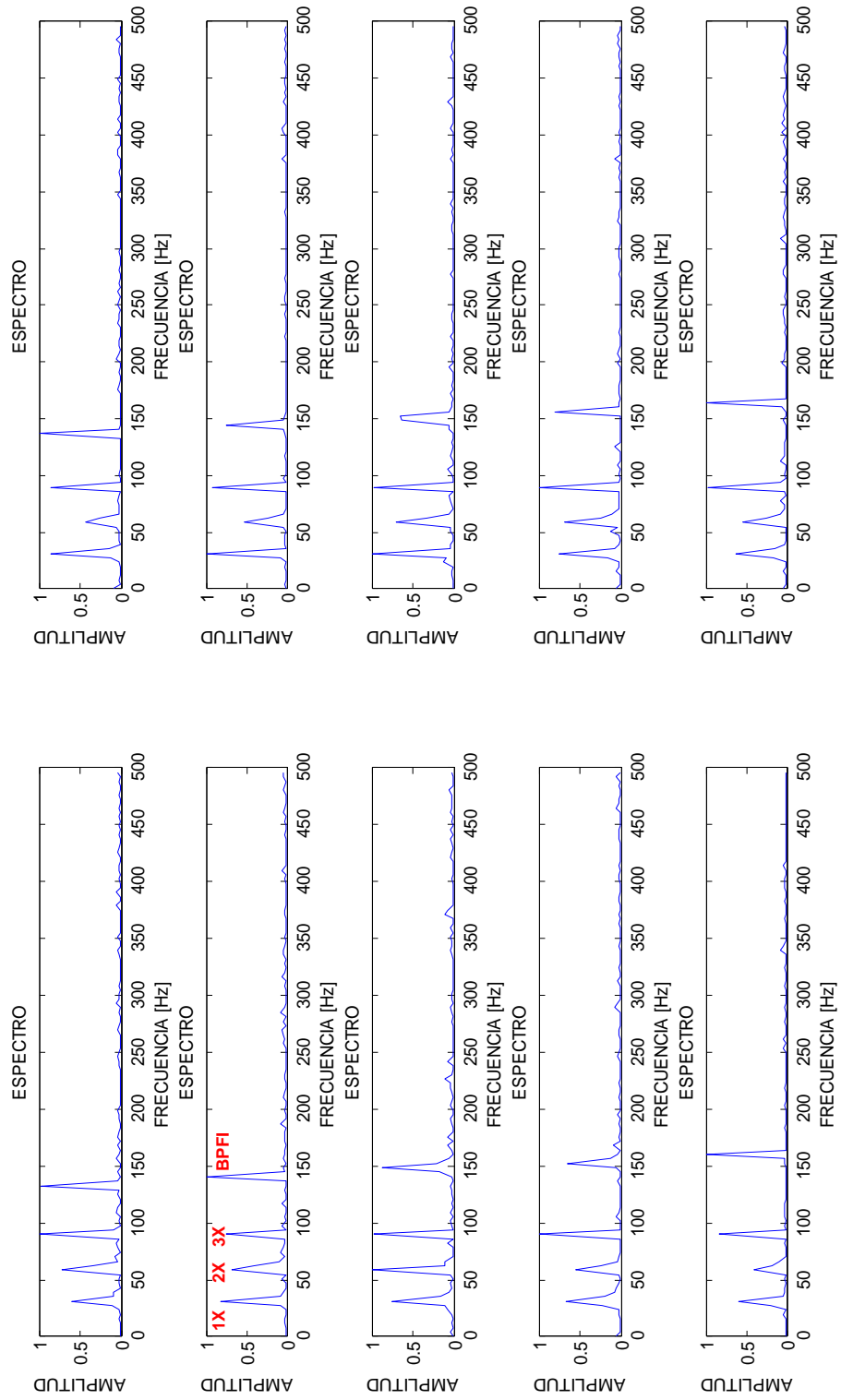
Figura 16. Umbrales de frecuencias de falla de un rodamiento.



Fuente. Autores del proyecto.

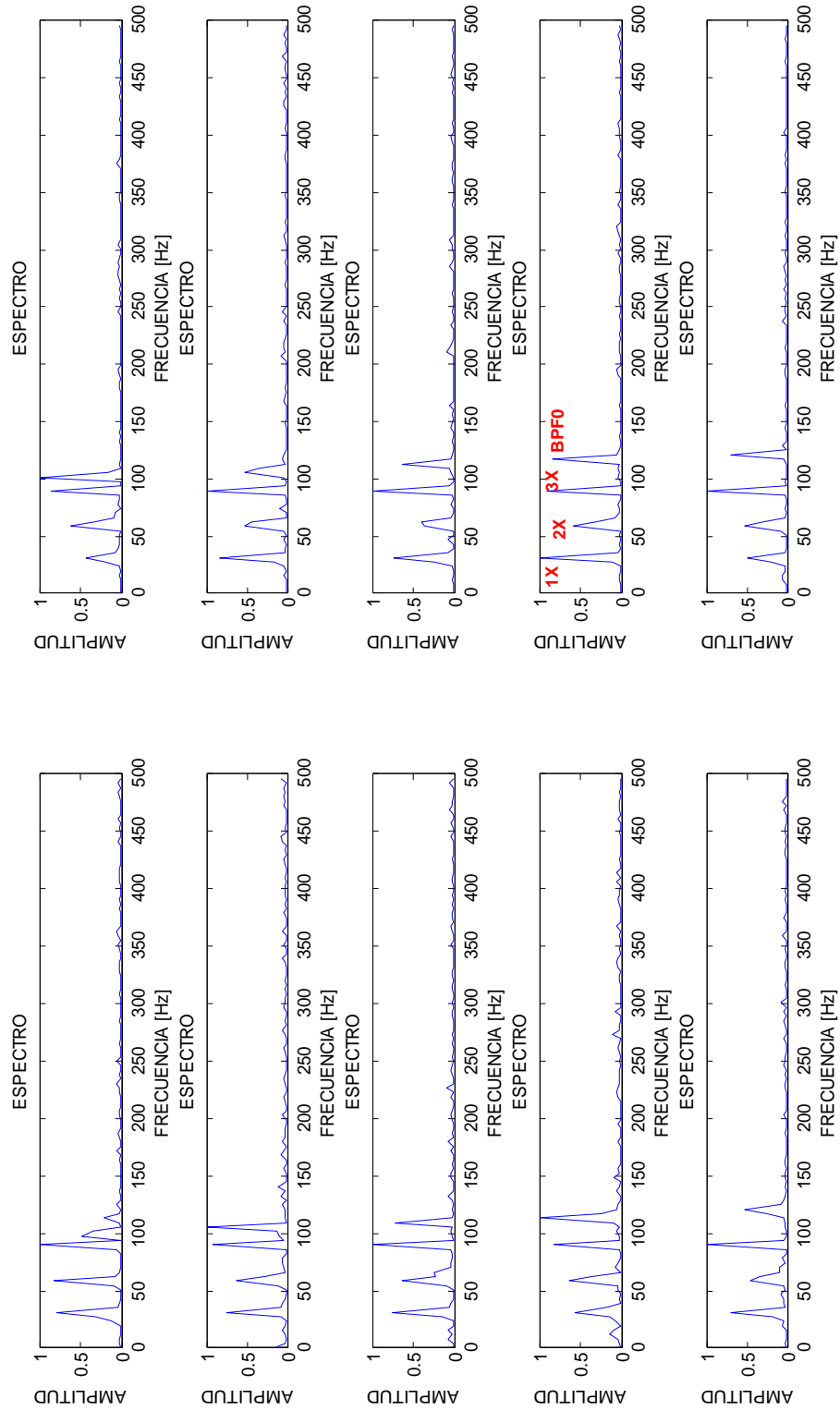
En las figuras 19 y 20 se muestran espectros generados aleatoriamente de la base de entrenamiento que simulan diferentes severidades de falla de la pista interior y la pista exterior, respectivamente, para el rodamiento de referencia 6204. Además se observan los armónicos 1x, 2x y 3x y la frecuencia de falla BPFI y BPFO, con sus correspondientes en amplitud las cuales están normalizadas.

Figura 17. Falla en pista interior (BPM).



Fuente. Autores del proyecto.

Figura 18. Falla en pista exterior (BPF0).



Fuente. Autores del proyecto.

9.2 ENTRADAS Y SALIDAS AL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS

Las respectivas entradas al sistema difuso se muestran a continuación con sus respectivas funciones de membresía:

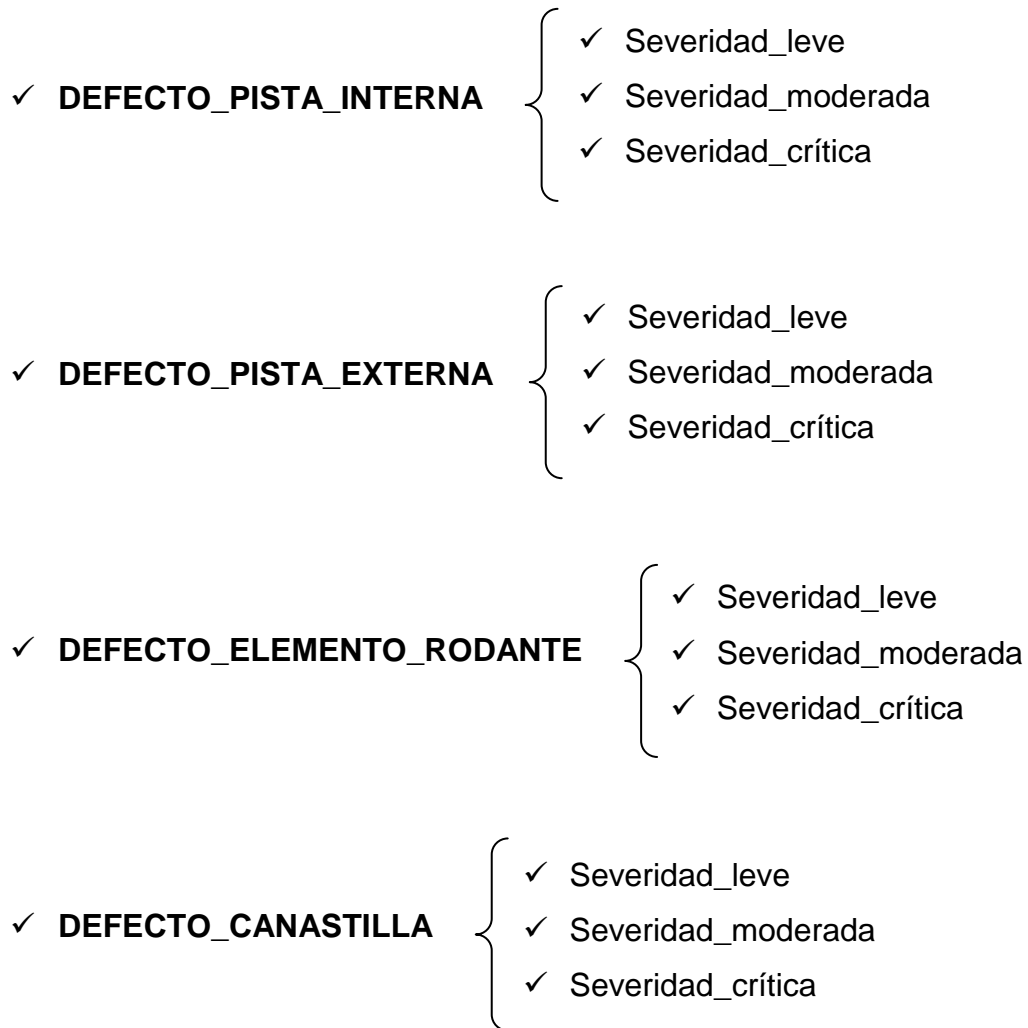
$$\checkmark \text{ BPFI}_1 \left\{ \begin{array}{l} \checkmark \text{ alta}_1 \\ \checkmark \text{ media}_1 \\ \checkmark \text{ baja}_1 \end{array} \right.$$

$$\checkmark \text{ BPFO}_1 \left\{ \begin{array}{l} \checkmark \text{ alta}_1 \\ \checkmark \text{ media}_1 \\ \checkmark \text{ baja}_1 \end{array} \right.$$

$$\checkmark \text{ BSF}_1 \left\{ \begin{array}{l} \checkmark \text{ alta}_1 \\ \checkmark \text{ media}_1 \\ \checkmark \text{ baja}_1 \end{array} \right.$$

$$\checkmark \text{ FTF}_1 \left\{ \begin{array}{l} \checkmark \text{ alta}_1 \\ \checkmark \text{ media}_1 \\ \checkmark \text{ baja}_1 \end{array} \right.$$

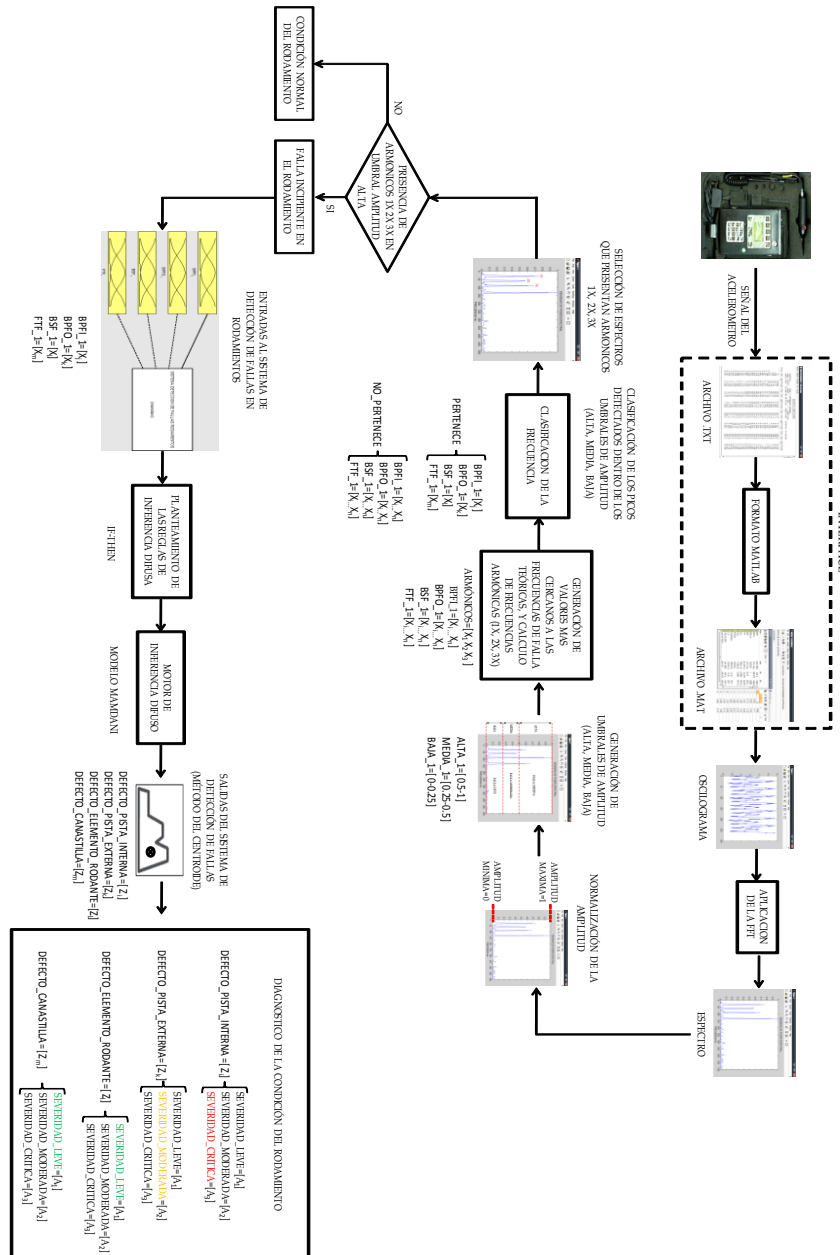
De igual manera tenemos las salidas del sistema para la detección de fallas difuso⁷.



En el siguiente esquema se muestra el proceso para el desarrollo del sistema de detección de fallas en rodamientos de bolas a través de lógica difusa usando señales de vibración.

⁷ Expert system development for vibration analysis in machine condition monitoring. Ebersbach Stephan. Peng Zhongxiao. ELSEVIER. School of Engineering, James Cook University, Townsville, Qld 4811. Australia.

Figura 19. Esquema del proceso para el desarrollo del sistema de detección de fallas en rodamientos de bolas a través de lógica difusa usando señales de vibración.



Fuente. Autores del proyecto.

9.3 PLANTEAMIENTO DE LAS DIFERENTES REGLAS DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS

Se denomina espacio muestral al conjunto de todos los posibles sucesos elementales. Cada experimento aleatorio tiene definido su espacio muestral (es decir, un conjunto con todas las soluciones posibles). Para determinar el espacio muestral en el proyecto de la detección de fallas en rodamientos tenemos 4 variables, y cada variable tiene tres posibilidades que son alta, media, baja, para el caso del antecedente, y severidad_leve, severidad_moderada, severidad_crítica para el caso del consecuente, con lo que obtenemos el número de combinaciones posibles:

Tabla 4. Determinación del espacio muestral para la detección de fallas en rodamientos.

FALLA	POSIBILIDADES
BPFI	3
BPFO	3
BSF	3
FTF	3

Fuente. Autores del proyecto.

Por tanto el número de combinaciones posibles que tenemos es: $3^4=81$ reglas. A continuación se muestran las 81 reglas que utiliza la lógica difusa para dar solución al problema. Se debe tener en cuenta que en la formulación del consecuente se tuvo en cuenta la evolución típica de falla en rodamientos, es decir que falla primero la pista interior (BPFI), luego la pista exterior (BPFO), seguido del elemento rodante (BSF), y por último la canastilla (FTF).

9.3.1 Antecedentes para cada una de las reglas de inferencia

Las reglas difusas combinan uno o más conjuntos difusos de entrada, llamados antecedentes o premisas y les asocian un conjunto difuso de salida llamado consecuente. A continuación se muestra la base de reglas para el antecedente de cada una de las reglas de inferencia del sistema de detección de fallas según el ítem 8.3.

Tabla 5. Antecedentes para cada una de las reglas de inferencia.

ANTECEDENTE				
REGLA	BPFL_1	BPFO_1	BSF_1	FTF_1
1	ALTA	BAJA	MEDIA	BAJA
2	ALTA	BAJA	BAJA	MEDIA
3	ALTA	MEDIA	BAJA	BAJA
4	ALTA	MEDIA	MEDIA	BAJA
5	ALTA	MEDIA	BAJA	MEDIA
6	ALTA	BAJA	MEDIA	MEDIA
7	ALTA	ALTA	MEDIA	BAJA
8	ALTA	ALTA	BAJA	MEDIA
9	ALTA	MEDIA	ALTA	BAJA
10	ALTA	MEDIA	BAJA	ALTA
11	ALTA	BAJA	MEDIA	ALTA
12	ALTA	BAJA	ALTA	MEDIA
13	BAJA	ALTA	MEDIA	BAJA
14	BAJA	ALTA	BAJA	MEDIA
15	BAJA	MEDIA	ALTA	BAJA
16	BAJA	MEDIA	BAJA	ALTA
17	BAJA	BAJA	MEDIA	ALTA
18	BAJA	BAJA	ALTA	MEDIA
19	BAJA	ALTA	MEDIA	MEDIA
20	BAJA	MEDIA	ALTA	MEDIA
21	BAJA	MEDIA	MEDIA	ALTA
22	BAJA	ALTA	MEDIA	ALTA
23	BAJA	ALTA	ALTA	MEDIA
24	BAJA	MEDIA	ALTA	ALTA
25	MEDIA	ALTA	BAJA	BAJA
26	MEDIA	BAJA	ALTA	BAJA
27	MEDIA	BAJA	BAJA	ALTA
28	MEDIA	ALTA	MEDIA	BAJA
29	MEDIA	ALTA	BAJA	MEDIA
30	MEDIA	MEDIA	ALTA	BAJA
31	MEDIA	MEDIA	BAJA	ALTA
32	MEDIA	BAJA	MEDIA	ALTA
33	MEDIA	BAJA	ALTA	MEDIA
34	MEDIA	ALTA	ALTA	BAJA
35	MEDIA	ALTA	BAJA	ALTA
36	MEDIA	BAJA	ALTA	ALTA
37	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
38	MEDIA	ALTA	ALTA	ALTA
39	BAJA	ALTA	ALTA	ALTA
40	ALTA	MEDIA	ALTA	ALTA
41	ALTA	BAJA	ALTA	ALTA

Fuente. Autores del proyecto.

Tabla 6. Antecedentes para cada una de las reglas de inferencia.

ANTECEDENTE				
REGLA	BPFL_1	BPFO_1	BSF_1	FTF_1
42	ALTA	ALTA	MEDIA	ALTA
43	ALTA	ALTA	BAJA	ALTA
44	ALTA	ALTA	ALTA	MEDIA
45	ALTA	ALTA	ALTA	BAJA
46	MEDIA	MEDIA	MEDIA	MEDIA
47	ALTA	MEDIA	MEDIA	MEDIA
48	BAJA	MEDIA	MEDIA	MEDIA
49	MEDIA	ALTA	MEDIA	MEDIA
50	MEDIA	BAJA	MEDIA	MEDIA
51	MEDIA	MEDIA	ALTA	MEDIA
52	MEDIA	MEDIA	BAJA	MEDIA
53	MEDIA	MEDIA	MEDIA	ALTA
54	MEDIA	MEDIA	MEDIA	BAJA
55	BAJA	BAJA	BAJA	BAJA
56	MEDIA	BAJA	BAJA	BAJA
57	ALTA	BAJA	BAJA	BAJA
58	BAJA	MEDIA	BAJA	BAJA
59	BAJA	ALTA	BAJA	BAJA
60	BAJA	BAJA	MEDIA	BAJA
61	BAJA	BAJA	ALTA	BAJA
62	BAJA	BAJA	BAJA	MEDIA
63	BAJA	BAJA	BAJA	ALTA
64	ALTA	ALTA	MEDIA	MEDIA
65	ALTA	ALTA	BAJA	BAJA
66	MEDIA	MEDIA	BAJA	BAJA
67	MEDIA	MEDIA	ALTA	ALTA
68	BAJA	BAJA	ALTA	ALTA
69	BAJA	BAJA	MEDIA	MEDIA
70	ALTA	MEDIA	MEDIA	ALTA
71	ALTA	BAJA	BAJA	ALTA
72	MEDIA	ALTA	ALTA	MEDIA
73	MEDIA	BAJA	BAJA	MEDIA
74	BAJA	ALTA	ALTA	BAJA
75	BAJA	MEDIA	MEDIA	BAJA
76	BAJA	MEDIA	BAJA	MEDIA
77	BAJA	ALTA	BAJA	ALTA
78	MEDIA	ALTA	MEDIA	ALTA
79	MEDIA	BAJA	MEDIA	BAJA
80	ALTA	MEDIA	ALTA	MEDIA
81	ALTA	BAJA	ALTA	BAJA

Fuente. Autores del proyecto.

9.3.2 Consecuentes para cada una de las reglas de inferencia

Las reglas difusas permiten expresar el conocimiento que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes. Para expresar este conocimiento de forma completa normalmente se precisa de varias reglas. En la siguiente tabla se muestra los consecuentes para cada una de las reglas de inferencia.

Tabla 7. Consecuentes para cada una de las reglas de inferencia.

CONSECUENTE				
REGLA	DEFECTO_PISTA_INTERNA	DEFECTO_PISTA_EXTERNA	DEFECTO_ELEMENTO_RODANTE	DEFECTO_CANASTILLA
1	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
2	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
3	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
4	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE
5	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
6	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
7	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE
8	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
9	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE
10	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA
11	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA
12	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
13	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE
14	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
15	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE
16	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA
17	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA
18	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
19	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
20	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
21	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA
22	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
23	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
24	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
25	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
26	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE
27	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA
28	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE
29	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
30	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE
31	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA
32	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA
33	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
34	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE
35	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA
36	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
37	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_CRITICA
38	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
39	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
40	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
41	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA

Fuente. Autores del proyecto.

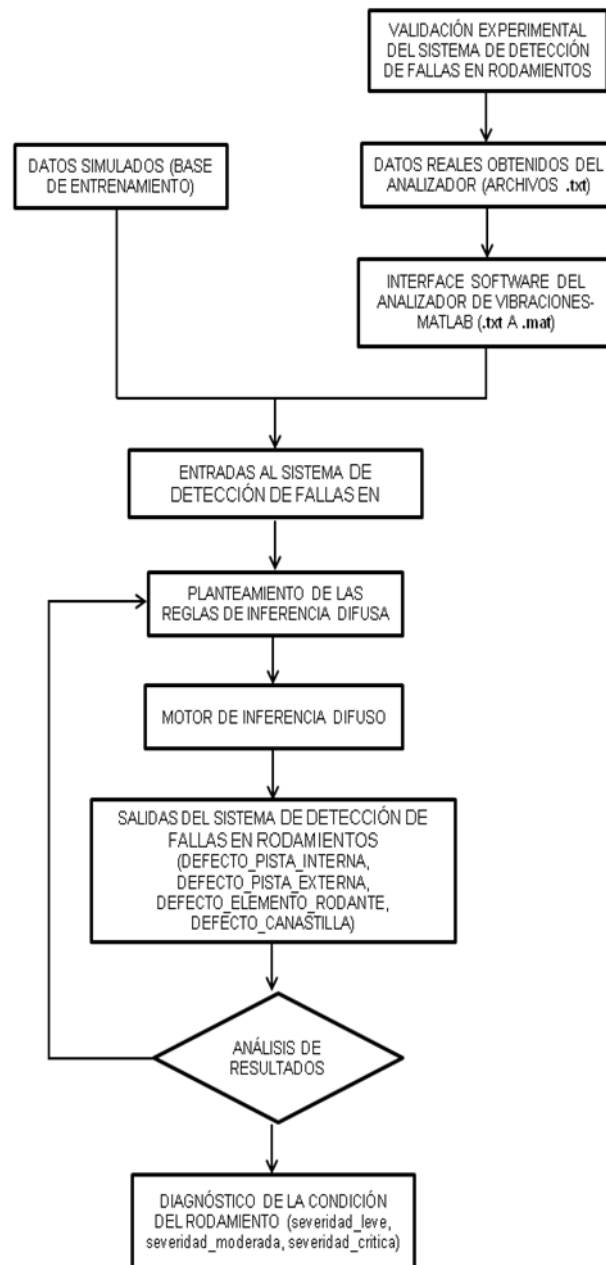
Tabla 8. Consecuentes para cada una de las reglas de inferencia.

CONSECUENTE				
REGLA	DEFECTO_PISTA_INTERNA	DEFECTO_PISTA_EXTERNA	DEFECTO_ELEMENTO_RODANTE	DEFECTO_CANASTILLA
42	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
43	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA
44	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_MODERADA
45	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_LEVE
46	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
47	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
48	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
49	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
50	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
51	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
52	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
53	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
54	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE
55	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
56	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
57	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
58	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
59	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
60	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
61	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE
62	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
63	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA
64	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
65	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
66	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
67	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
68	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
69	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
70	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
71	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA
72	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
73	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
74	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE
75	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
76	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
77	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA
78	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
79	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_LEVE
80	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_MODERADA
81	SEVERIDAD_CRITICA	SEVERIDAD_LEVE	SEVERIDAD_MODERADA	SEVERIDAD_LEVE

Fuente. Autores del proyecto.

9.4 PROCESO DE VALIDACIÓN EN LA DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS

Figura 20. Proceso de validación en la detección de fallas en rodamientos.

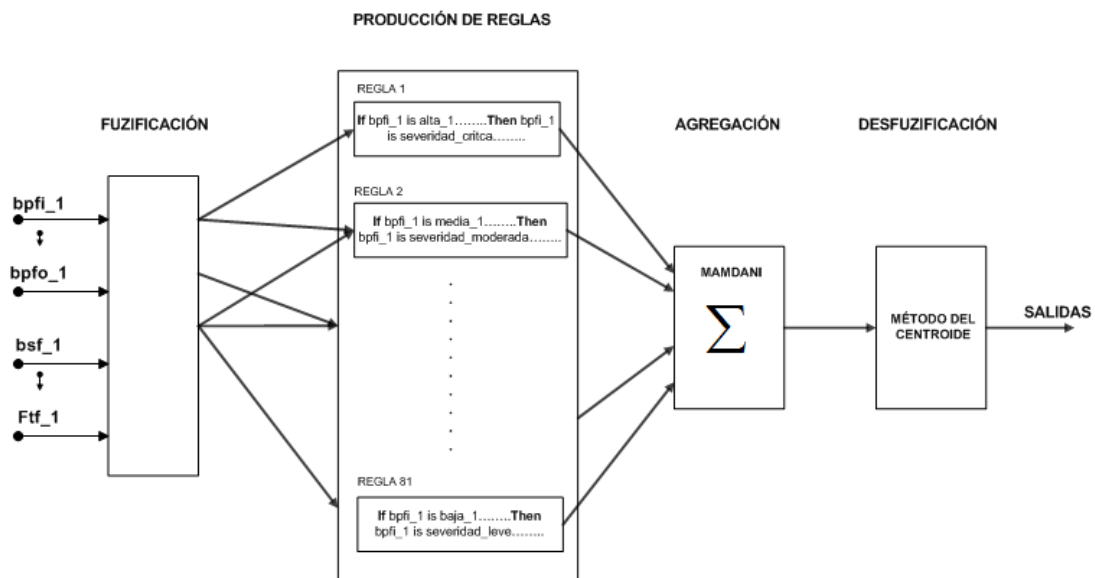


Fuente. Autores del proyecto.

9.5 ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS

En la siguiente figura se presenta un esquema general del sistema de detección de fallas en rodamientos donde se observa las entradas al motor de inferencia difuso y las salidas.

Figura 21. Esquema general del sistema de inferencia difuso para la detección de fallas en rodamientos.

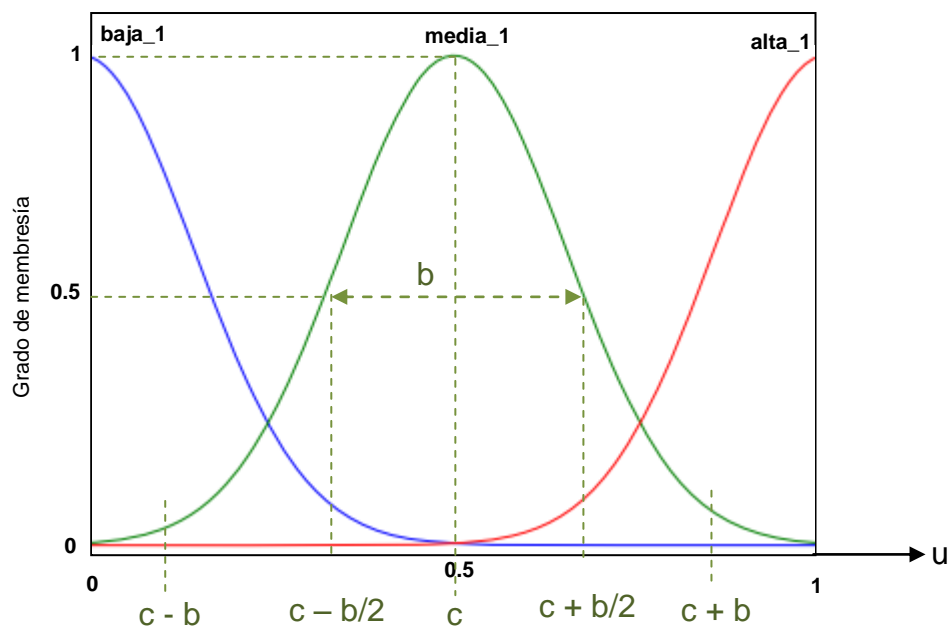


Fuente. Autores del proyecto.

A continuación se ilustra el grado de pertenencia que se le puede dar a el elemento tomando como ejemplo $BPFI_1$ utilizando diversas funciones de membresía en este caso de forma gaussiana, generando los conjuntos $baja_1$, $media_1$, $alta_1$. Esta función puede definirse de la siguiente forma:

$$G(u; b, c) = \begin{cases} S(u; c-b, c-b/2, c) & u \leq c \\ S(u; c-b, c-b/2, c) & u \geq c \end{cases}$$

Figura 22. Algunas funciones de membresía a utilizar en el sistema de inferencia difuso para la detección de fallas en rodamientos (Gaussiana).



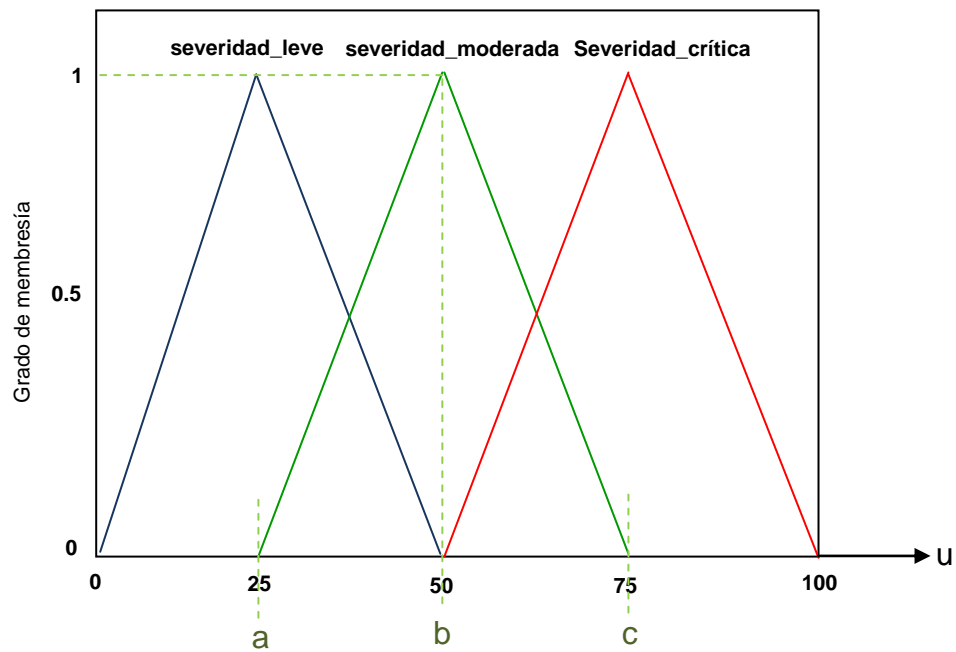
Fuente. Autores del proyecto.

Para el caso de las salidas del sistema se utilizarán funciones de membresía de tipo triangular llamadas **severidad_leve**, **severidad_moderada** y **severidad_crítica**, donde se podrá valorar el grado de pertenencia de los elementos **DEFECTO_PISTA_INTERNA**, **DEFECTO_PISTA_EXTERNA**, **DEFECTO_ELEMENTO_RODANTE**, **DEFECTO_CANASTILLA**.

La función de membresía tipo triangular puede definirse como:

$$T(u; a, b, c) = \begin{cases} 0 & u < a \\ (u - a)/(b - a) & a \leq u \leq b \\ (c - u)/(c - b) & b \leq u \leq c \\ 0 & u > c \end{cases}$$

Figura 23. Algunas funciones de membresía utilizadas en las salidas del sistema de inferencia difuso para la detección de fallas en rodamientos (triangular).

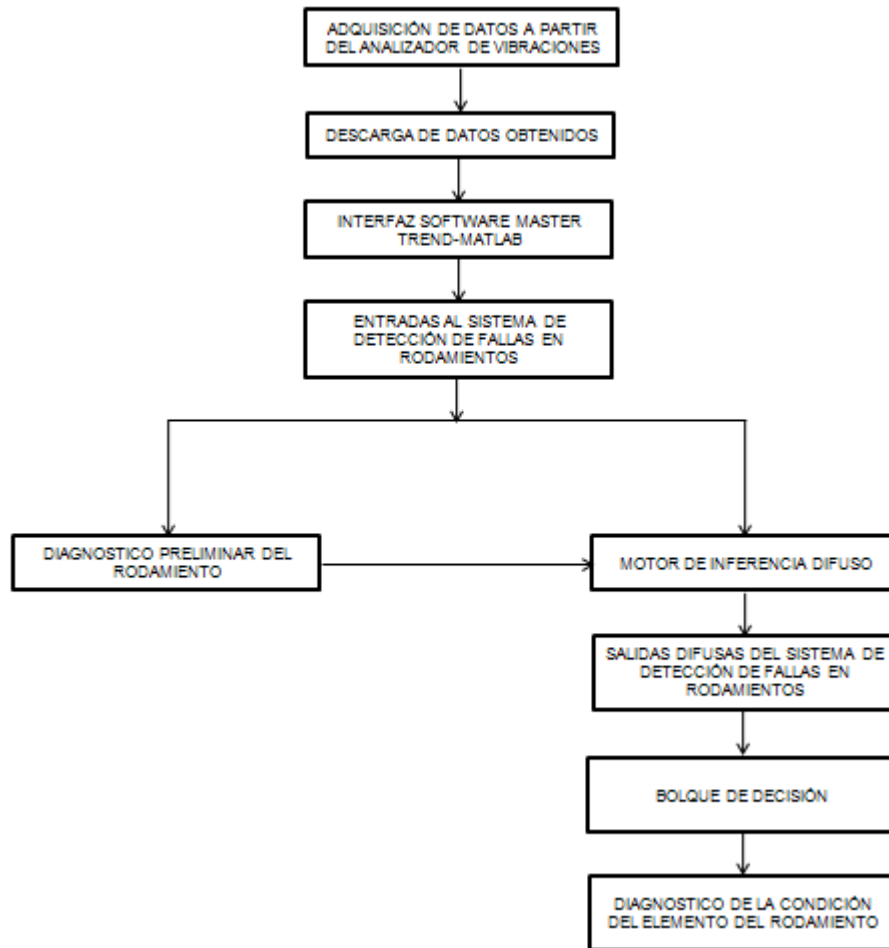


Fuente. Autores del proyecto.

9.6 ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS

Para las variables de entrada el universo de discurso se definen en términos de 4 conjuntos difusos que son $bpfi_1$, $bpfo_1$, bsf_1 y fft_1 , y a su vez cada conjunto difuso tiene 3 subconjuntos que son $baja_1$, $media_1$, $alta_1$. Estos subconjuntos usan funciones de membresía tipo gaussiana que le dan un grado de pertenencia entre cero y uno a la variable de entrada. El sistema de inferencia difuso (FIS) emplea el método mamdani, y para la defuzificación de las salidas se aplica es el método del centroide, que utiliza como salida el centro de gravedad de la función característica de salida en donde se obtiene una solución única. Mediante el bloque de decisión este escalar es transformado términos de variables cualitativas para brindar de esta manera un diagnostico de la falla.

Figura 24. Diagrama general del proceso de diagnostico de fallas en rodamientos.

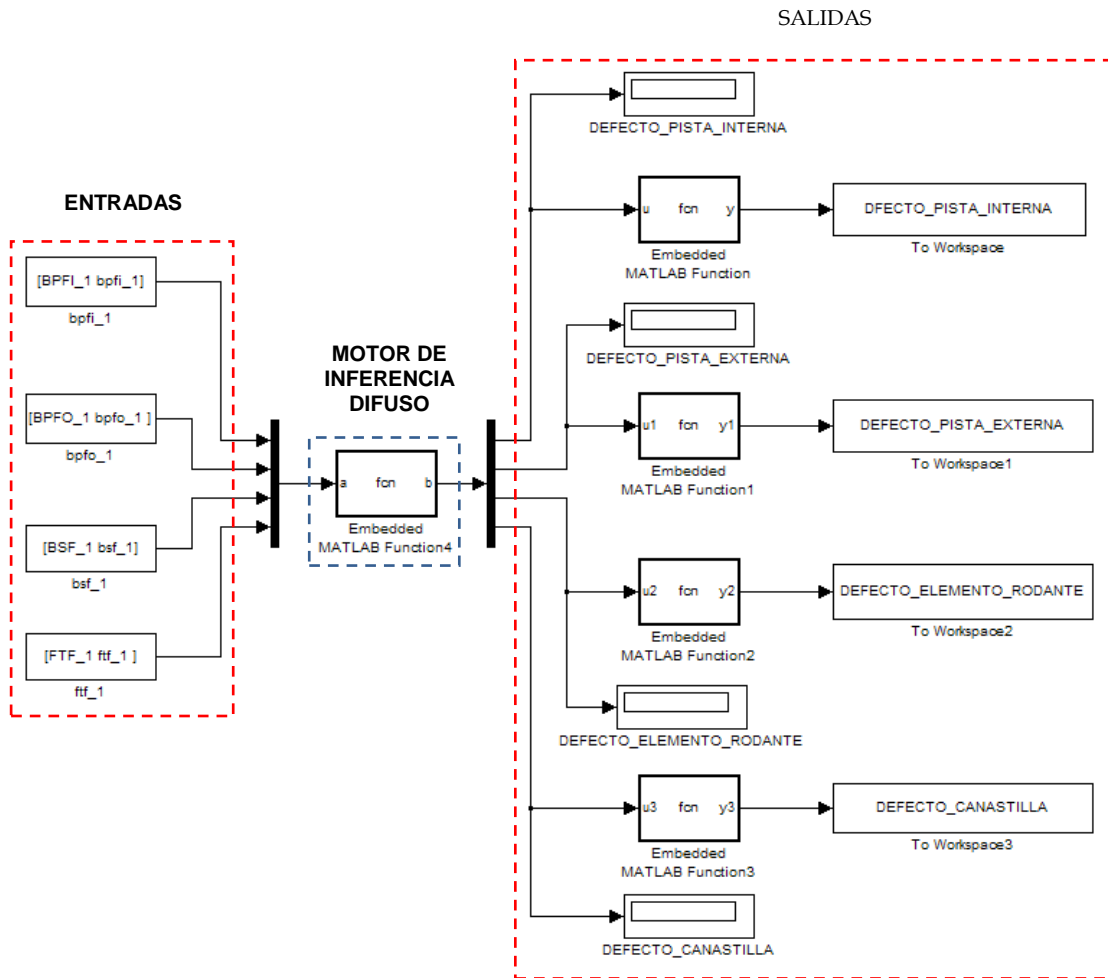


Fuente. Autores del proyecto.

Una vez construido el sistema de inferencia difuso (FIS), se crea el sistema de detección de fallas en rodamientos utilizando Simulink que es una herramienta de programación en bloques que nos brinda el software Matlab. En donde se carga el sistema de inferencia difuso por medio del bloque “embedded matlab function”, el cual es el encargado de ejecutar el sistema de inferencia difuso, y de esta manera obtener un diagnostico de la severidad

de la falla presente en un rodamiento. En la siguiente figura se ilustra el sistema de detección de fallas implementado en Simulink.

Figura 25. Esquema general del sistema de detección de fallas en rodamientos.



Fuente. Autores del proyecto.

Normalmente las mediciones más confiables para la detección de fallas en rodamientos es en la dirección en la que actúa la carga⁸, para el caso en particular se toman en la dirección radial, es decir en la dirección horizontal y vertical.

Para la adquisición de la señal de vibración se configura para un número de 800 líneas, un número de 6 promedios y 1024 puntos, de esta manera se obtiene un espectro con una resolución adecuada como se muestra en la siguiente figura.

Tabla 9. Set de parámetros de información.

BANCO DE RODAMIENTOS 6204	
SET 3 – ROLLER BRG (ORDERS 50xRPM)	
FFT	0.0-50.5 ORDERS
LOW FREQUENCY CUT-OFF	2.0 Hz
LINES/AVERAGES	800/6
AVERAGING MODE	NORMAL
WINDOW TYPE	HANNING
ANALYSIS PARAMETER SET ISPECTRAL WEIGHTING	NONE
THIRD-OCTAVE ANALYSIS	NO
SST CONTROL	NO
ENABLE DEMODULATION/PEAKVUE	NO
FILTER SETTING	NONE
PEAK ANALYSIS METHOD	OFF
SPECIAL TIME WAVEFORM	NO
FMAX	50.5 Hz
DATA UNITS	DEFAULT
NUMBER OF POINTS	1024
TRIGGER	NONE

Fuente. Autores del proyecto.

⁸www.a-maq.com

10. DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN

Durante el desarrollo de las mediciones realizadas en el Banco experimental para estudio de fallas en rodamientos mediante análisis de vibraciones, se encuentra diversas fallas como desalineamiento, desbalanceo y precarga ocasionada por el ajuste mecánico.

A continuación se hacen algunas modificaciones al banco empezando por el cambio en la parte motriz, colocando un motor de menor potencia 0.5 HP. Se trata de corregir los problemas anteriormente nombrados pero los espectros obtenidos no son satisfactorios, por tanto surge la necesidad de elaborar y acondicionar un banco sencillo que nos brinde la posibilidad de detectar las fallas inducidas previamente en el rodamiento. La construcción del banco de experimentación se basa en un montaje similar al encontrado en el esquema planteado en un artículo tipo revista científica⁹.

En la siguiente figura se muestra el banco elaborado para la validación del sistema de detección de fallas en rodamientos.

⁹ CHOUDHURY A., TANDON N. Application of acoustic emission technique for the detection of defects in rolling element bearings. ITMME Centre, Indian institute of technology, Hauz Khas, New Delhi, 110016 Indian.

Figura 26. Banco de pruebas para la detección de fallas en rodamientos de bolas.



Fuente. Autores del proyecto.

Antes de ejecutar la ruta de medición se acondiciona el banco de pruebas corrigiendo problemas de desbalanceo y desalineamiento utilizando técnicas de balanceo en un plano, además de utilizar el comparador de caratula para lograr un buen alineamiento, junto con la ayuda del analizador de vibraciones.

11. PRUEBAS DE VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS

Para la validación experimental del sistema de detección de fallas se utilizan 5 rodamientos a los cuales se le inducen fallas tanto en pista interior y la pista exterior con diferentes severidades de falla como se nombra a continuación:

- ✓ **Rodamiento 1:** severidad leve en pista interior y severidad leve pista exterior.

Figura 27. Rodamiento de prueba 1.



Fuente. Autores del proyecto.

- ✓ **Rodamiento 2:** severidad moderada en pista interior y severidad crítica en pista exterior.

Figura 28. Rodamiento de prueba 2.



Fuente. Autores del proyecto.

- ✓ **Rodamiento 3:** severidad leve pista interior y severidad moderada pista exterior.

Figura 29. Rodamiento de prueba 3.



Fuente. Autores del proyecto.

- ✓ **Rodamiento 4:** severidad leve pista interior y severidad crítica en pista exterior.

Figura 30. Rodamiento de prueba 4.



Fuente. Autores del proyecto.

- ✓ **Rodamiento 5:** severidad critica pista interior y severidad moderada pista exterior.

Figura 31. Rodamiento de prueba 5.



Fuente. Autores del proyecto.

Por tanto se realizan 5 mediciones, una para cada rodamiento, las diversas mediciones se realizan en la dirección vertical, pues generalmente la medida más confiable es en la dirección de la carga.

11.1 PRIMERA MEDICIÓN

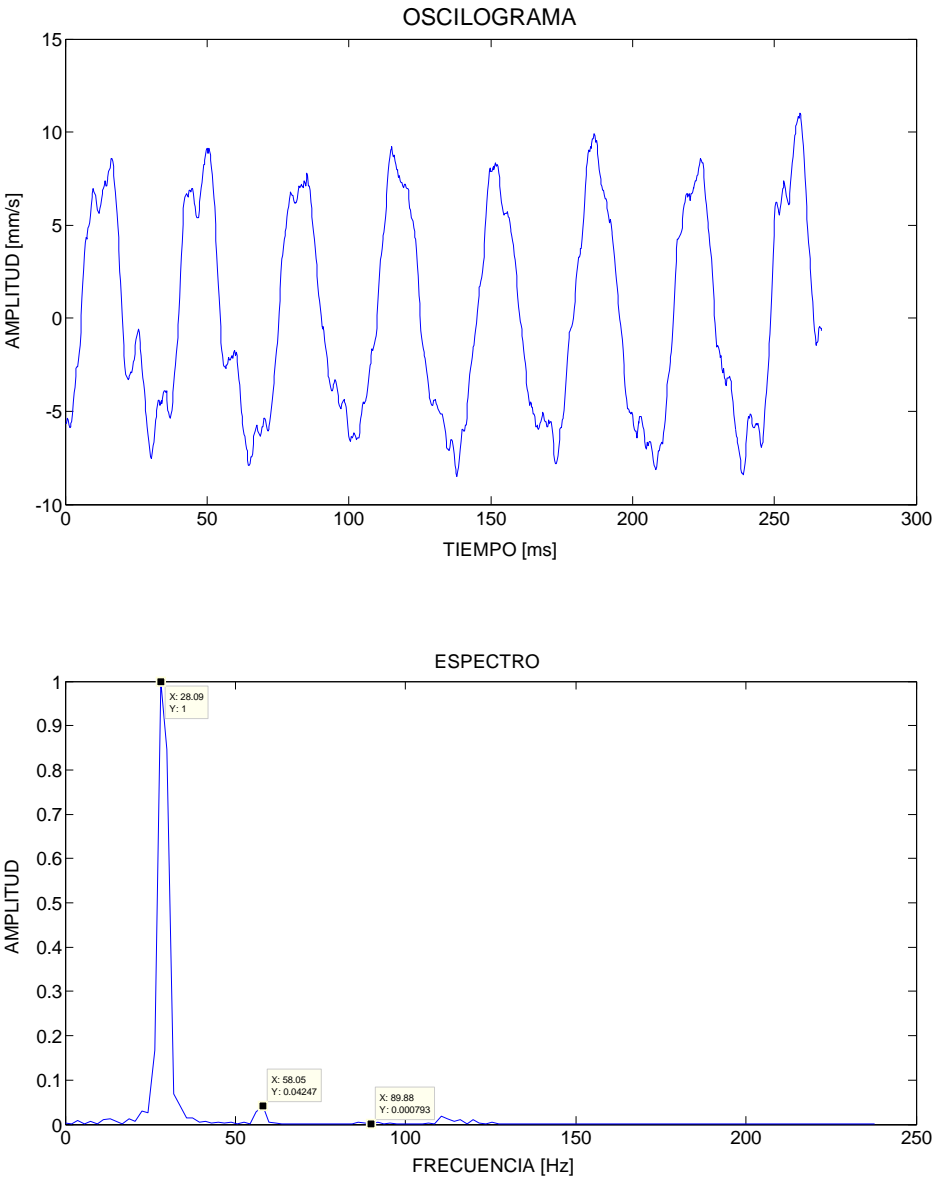
En esta primera medición se analiza el rodamiento 1 con condición normal al cual no se le han inducido ninguna falla, este sirve de referencia para determinar la condición normal del rodamiento. A continuación se muestra los espectros y oscilogramas obtenidos en la dirección vertical.

El espectro ha sido analizado usando el análisis por amplitud normalizada. En donde se detectan picos significativos al 1x y 2x, los demás picos son ignorados o no significativos.

En esta medición, se corrobora que las mediciones más confiables se obtienen en la dirección de la carga, para el caso en particular la carga a la que se encuentra sometido el rodamiento de prueba es en la dirección vertical. En el espectro obtenido observamos que presenta una condición normal, pues no se presentan armónicos a la frecuencia de falla BPFI o BPFO.

RODAMIENTO 1		
UBICACIÓN DE LA FALLA	DIAGNOSTICO SEGÚN EXPERTO	DIAGNOSTICO DEL SISTEMA
Pista interior	Sin daño	Severidad leve
Pista exterior	Sin daño	Severidad leve

Figura 32. Punto 1VV severidad leve en pista interior y severidad leve en pista exterior.



Fuente. Autores del proyecto.

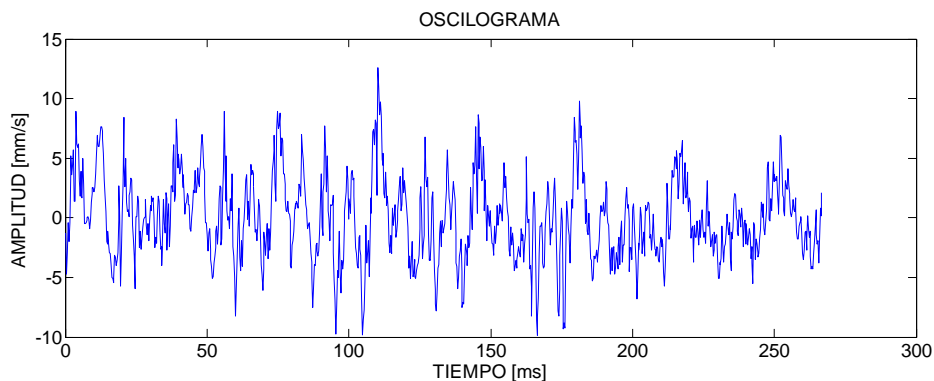
11.2 SEGUNDA MEDICIÓN

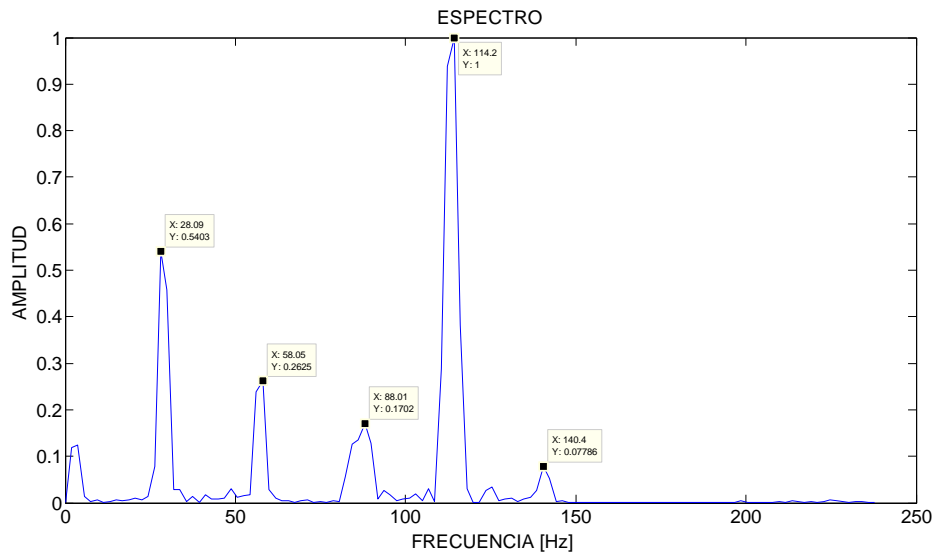
Para el desarrollo de la segunda medición se utiliza el rodamiento 2, este presenta fallas en la pista interior y la pista exterior con severidades de falla moderada y crítica respectivamente. En la siguiente figura se observan los espectros y oscilogramas correspondientes a estas fallas.

El espectro presentan armónicos visibles al 1x, 2x, 3x, además de observarse frecuencias BRFI y BRFO con su correspondiente en amplitud, moderada y crítica respectivamente, lo cual concuerda con lo expresado en la tabla 3. Evolución de falla en rodamientos.

RODAMIENTO 2		
UBICACIÓN DE LA FALLA	DIAGNOSTICO SEGÚN EXPERTO	DIAGNOSTICO DEL SISTEMA
Pista interior	Daño intermedio	Severidad moderada
Pista exterior	Daño avanzado	Severidad crítica

Figura 33. Punto 2VV severidad moderada en pista interior y severidad crítica en pista exterior.





Fuente. Autores del proyecto.

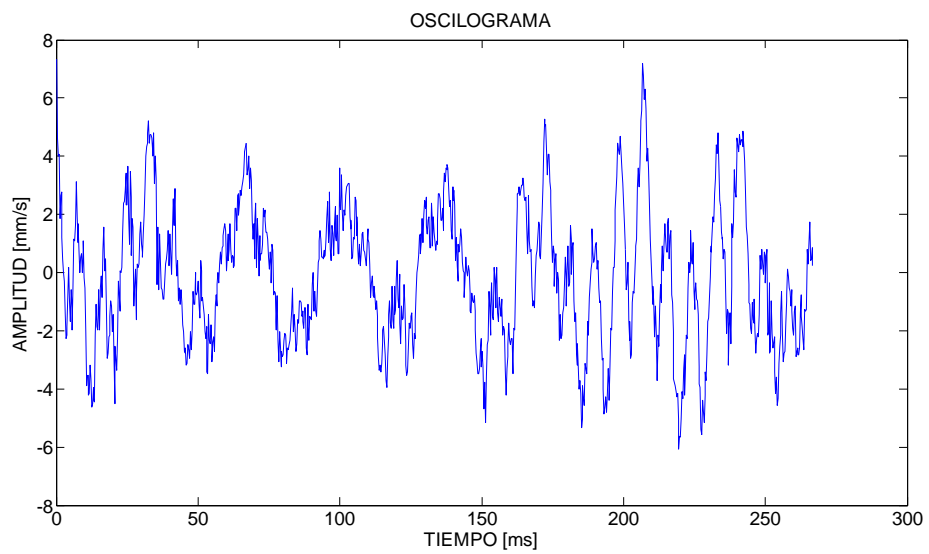
11.3 TERCERA MEDICIÓN

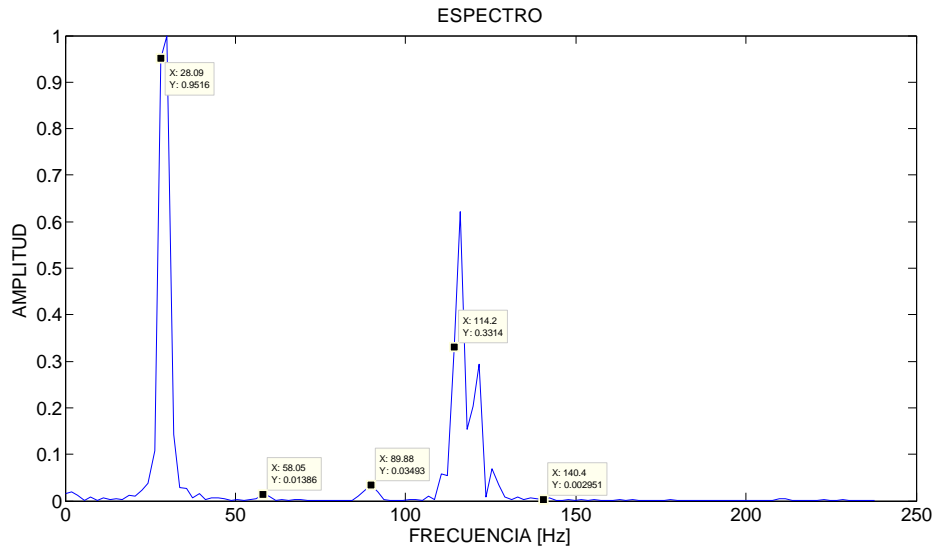
En esta medición se usa el rodamiento 3 con severidad leve en la pista interior y severidad moderada en pista exterior. Para aumentar el desgaste y aumentar la amplitud en el espectro se coloca en operación el rodamiento con una lubricación deficiente.

A pesar del ruido el sistema de detección encuentra amplitudes significativas a las frecuencias de falla, por tanto se cuenta con un sistema con buena sensibilidad para detectar picos que indican anomalías. El espectro y oscilograma que a continuación se muestra presenta una falla BPFO con una severidad moderada, consecuencia de una falla inducida en la pista externa generada por un mototool y una fresa de odontología.

RODAMIENTO 3		
UBICACIÓN DE LA FALLA	DIAGNOSTICO SEGÚN EXPERTO	DIAGNOSTICO DEL SISTEMA
Pista interior	Sin daño	Severidad leve
Pista exterior	Daño intermedio	Severidad moderada

Figura 34. Punto 3VV severidad leve en pista interior y severidad moderada en pista exterior.





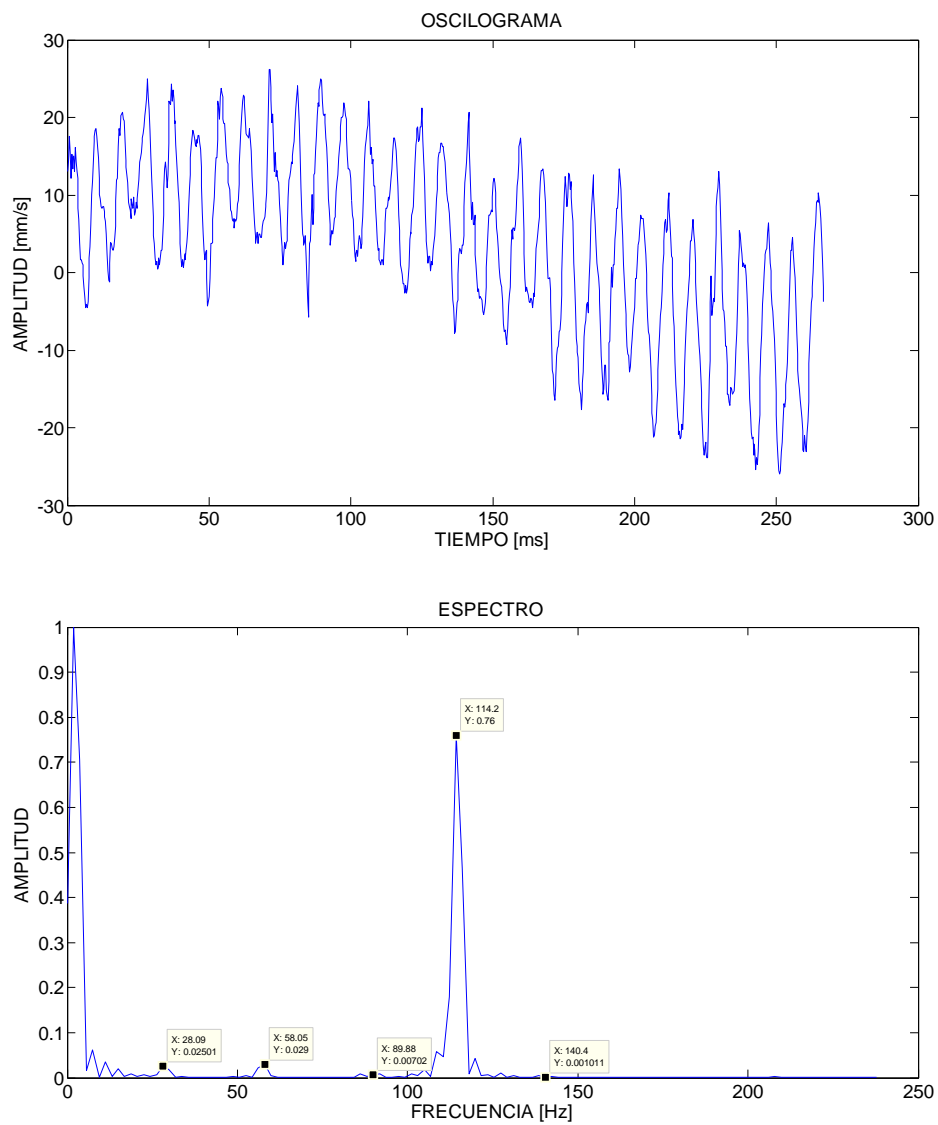
Fuente. Autores del proyecto.

11.4 CUARTA MEDICIÓN

Durante el desarrollo de la medición se utiliza el rodamiento 4 con severidad leve pista interior y severidad crítica en pista exterior, el espectro presenta la frecuencia de falla BPFO con una amplitud mayor que la presentada en la medición anterior, lo cual corresponde a un deterioro severo del rodamiento el cual amerita su cambio. El sistema de detección de fallas en su primera fase brinda un diagnostico preliminar de falla en el rodamiento, luego el sistema de inferencia difuso por medio del bloque de decisión diagnostica una severidad critica de la falla en la pista exterior y una severidad leve en la pista interior, corrobora y además especifica la severidad de la falla y su ubicación.

RODAMIENTO 4		
UBICACIÓN DE LA FALLA	DIAGNOSTICO SEGÚN EXPERTO	DIAGNOSTICO DEL SISTEMA
Pista interior	Sin daño	Severidad leve
Pista exterior	Daño avanzado	Severidad crítica

Figura 35. Punto 4VV severidad leve en pista interior y severidad crítica en pista exterior.



Fuente. Autores del proyecto.

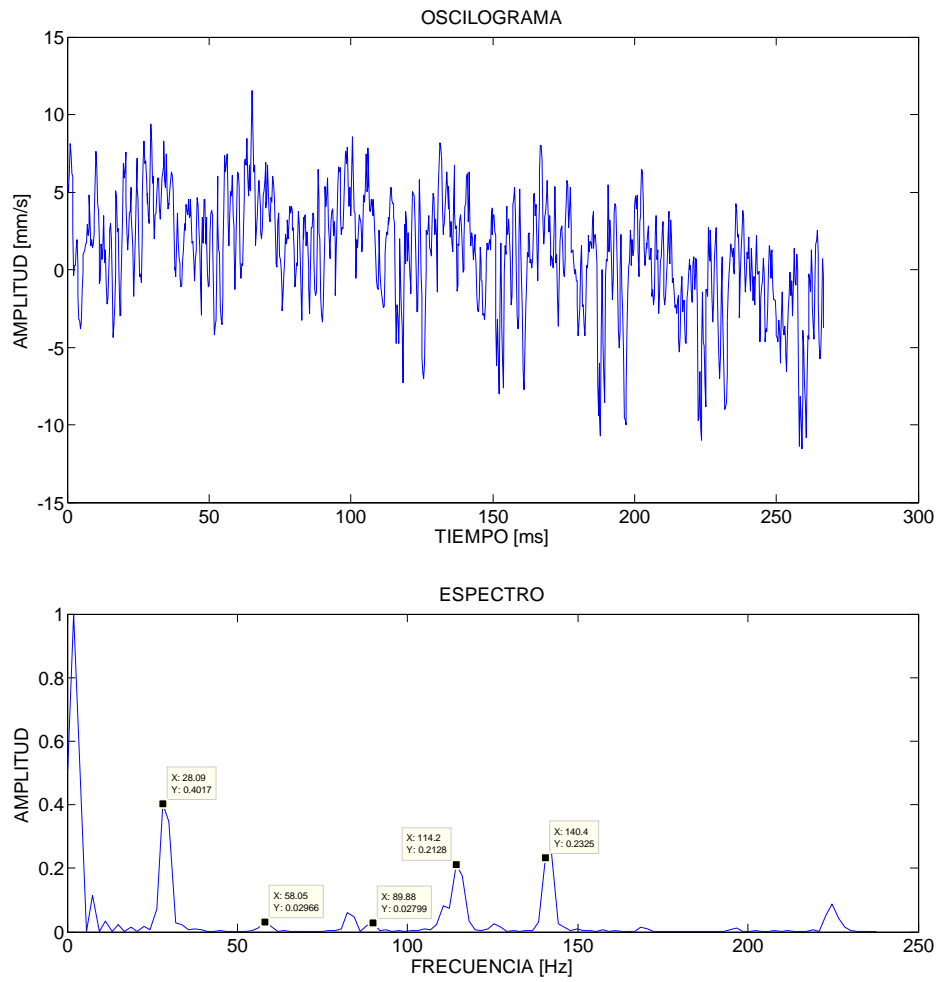
11.5 QUINTA MEDICIÓN

Para esta medición se emplea el rodamiento 5 que presenta una severidad crítica en la pista interior y una severidad moderada en la pista exterior, en el espectro que se presenta a continuación se observa claramente una amplitud considerable a la frecuencia bpfi y una amplitud menor a la frecuencia de falla bpfo. También se detalla picos no sincrónicos que representan las frecuencias de falla del rodamiento, lo cual concuerda con un rodamiento en un estado de deterioro avanzado, por tanto su vida útil no es mayor al 1%, siendo recomendable el cambio inmediato.

Las frecuencias obtenidas en el sistema de detección de fallas difieren en cierta medida de las teóricas pues la velocidad de rotación para el cálculo de estas fue de 1800 rpm y la velocidad de empleada para el experimento fue de aproximadamente 1780 rpm, esta diferencia en frecuencia se debe también a deslizamiento existente entre las pistas y los elementos rodantes.

RODAMIENTO 5		
UBICACIÓN DE LA FALLA	DIAGNOSTICO SEGÚN EXPERTO	DIAGNOSTICO DEL SISTEMA
Pista interior	Daño avanzado	Severidad crítica
Pista exterior	Daño intermedio	Severidad moderada

Figura 36. Punto 5VV severidad crítica en pista interior y severidad moderada en pista exterior.



Fuente. Autores del proyecto.

12. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Cuando se producen amplitudes bajas de vibración, que entran dentro de los umbrales de amplitud previamente establecidos y normalizados, el sistema de detección de fallas obtiene un diagnóstico de severidad leve, a medida que esta amplitud de vibración aumenta el asistente computacional nos ofrece como resultado un diagnóstico que corresponde con la severidad de la falla.

En los espectros obtenidos se observa que los valores de frecuencia de falla difieren un poco de los valores teóricos calculados a partir de las ecuaciones, debido a que el banco experimenta otras fallas, además de factores como el ruido de los sensores, número de puntos con el cual trabaja el analizador y el deslizamiento existente entre los elementos rodantes y las pistas.

Para realizar un análisis confiable y poder identificar correctamente las amplitudes a las frecuencias de fallas BPFI y BPFO, los armónicos 1x, 2x y 3x, deben presentar amplitudes de vibración menores que las amplitudes de falla.

Para los elementos que están en la periferia del rodamiento se hace más fácil detectar su frecuencia de falla, por tanto la falla inducida en la pista interna no se detecta fácilmente debido a que la señal capturada en el analizador tiene que viajar desde la falla hasta la parte externa del rodamiento.

En la validación experimental del sistema de detección de fallas, los espectros obtenidos difieren de los generados en la base de entrenamiento, con lo cual se hace necesario ajustar los umbrales de amplitud, pues las amplitudes de vibración, tanto de los armónicos de la maquina como de las fallas en el rodamiento, son menores que las señales simuladas en dicha base.

13. CONCLUSIONES

- ✓ Se cumplió con los objetivos propuestos desarrollando una aplicación de la inteligencia artificial, diseñando e implementado un sistema de detección de fallas en rodamientos de bolas a través de lógica difusa usando señales de vibración.

- ✓ Se construyó un banco de pruebas para rodamientos de bolas que permite la validación experimental del asistente computacional. Este banco queda como material didáctico fomentando el desarrollo tecnológico en la línea de detección de fallas.

- ✓ Se logro realizar el diagnóstico de fallas caracterizadas previamente en los rodamientos, en presencia de otras fallas que presenta el banco experimental, las cuales fueron minimizada disminuidas a unos niveles de vibración adecuados.

- ✓ Cuando se tiene un mayor número de puntos en es espectro se tiene una mayor certeza de encontrar el valor mas cercano al valor teórico de falla con su correspondiente en amplitud más alta, y de esta forma el sistema de detección de fallas sea más confiable.

14. RECOMENDACIONES

- ✓ En el desarrollo de las mediciones se utilizó un número de 800 líneas y 6 promedios, a pesar de no ser la máxima resolución se logró obtener espectros donde muestra frecuencias de falla y armónicos muy cercanas a las calculadas teóricamente, permitiendo que el sistema de detección de fallas realice un diagnóstico confiable del rodamiento.
- ✓ Para tener un sistema de detección de fallas de mayor confiabilidad en el diagnóstico de fallas en rodamientos, es necesario que se trabaje con una mayor resolución, lo cual implica adquirir un número mayor de puntos en la señal de vibración obtenida del analizador.
- ✓ Cuando se induce una falla bien sea en la pista externa o interna para su respectiva caracterización, es recomendable que el defecto pueda ser medible por equipos especiales para diferenciar que tan severa es la falla.
- ✓ Contar con herramientas adecuadas para el montaje y desmontaje del rodamiento de prueba, además de equipos para inducción de fallas en rodamientos.

15. FUTUROS DESARROLLOS

- ✓ Complementar el sistema de detección de fallas en rodamientos basado en lógica difusa usando métodos de aprendizaje de otras técnicas de la inteligencia artificial como redes neuronales o algoritmos genéticos para identificar y optimizar los parámetros del asistente computacional.

- ✓ Agregar módulos basados en lógica difusa que permitan dar el establecer la severidad de otras fallas presentes en maquinaria rotativa con el fin de realizar un diagnostico mas completo.

- ✓ Realizar un procesamiento de las señales de vibración obtenidas, con el fin de refinar la información depurando factores como ruido, condiciones de operación de la maquina y perturbaciones, para que estos factores no afecten el sistema de detección de fallas y así determinar los síntomas de interés que presenta el equipo.

- ✓ Implementar un sistema en donde el usuario simplemente adquiera la señal de vibración y el asistente computacional de a conocer el resultado **on line** del diagnostico de la falla.

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ **CASTRO M. Yira Alejandra, PAEZ P. Edwin German.** Banco experimental para estudio de fallas en rodamientos mediante análisis de vibraciones. Trabajo de grado. UIS. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2008.

- ✓ **GARCÍA CASTRO Alfonso.** Vibraciones mecánicas. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga. 2001.

- ✓ **KELLER Robert.** Expert System Technology. Development Application. Editorial prentice Hall Inc. 1987. New Jersey.

- ✓ **KULKARNI D. Arun.** Computer Vision and Fuzzy-Neural Systems. Editorial Prentice-Hall.2001. Capitulo 3.

- ✓ **MENDEL M. Jerry.** Rule-Based Fuzzy Logic Systems. University Southern California, Los Angeles C.A. Editorial Practice Hall PTR. 2001.

- ✓ **NSK BEARING DOCTOR.** Diagnostico rápido de fallas en rodamientos.

- ✓ **RICH Elane, KNIGHT Kevin.** Inteligencia Artificial. Segunda edición. Madrid. Editorial Mc Graw-Hill. 1994.

- ✓ **ROJAS Hernán.** Rodamientos parte I. Ediciones UIS. 1984.

- ✓ **SANZ MOLINA Alfredo, MARTIN DEL RIO Bonifacio.** Redes Neuronales y Sistemas Borrosos. Tercera edición. México D.F. Editorial Alfaomega. 2007. Parte II.

- ✓ **SCHEFFLER Cornelius, GIRDHAR Paresh.** Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance. ELSEVIER.

ANEXOS

ANEXO A. TABLA DE DIAGNÓSTICO

Apéndice - Tabla de Diagnóstico Rápido

Ocurrencia	Localización (Fenómeno)	Causa											Notas			
		Manejo		Partes colgadas			Lubricación		Carga		Rotación			Selección del rodamiento		
		Almacenamiento - Transporte	Instalación	Eje alojamiento	Dispositivos de sellos	Temperatura	Lubricante	Método de lubricación	Exceso de carga Carga de impacto	Momento	Carga muy baja	Alta velocidad Alta aceleración y desaceleración			Vibración	
1. Descamación	Pistas y superficies del rodamiento		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>				
2. Desgaste (peeling)	Pistas y superficies del rodamiento		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>				
	Superficies externas de contacto			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>								
3. Rayaduras	Superficie lateral del rodillo o reborde del anillo		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>				
	Superficie de la guía de la jaula o casilla de la jaula		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>								
4. Patinaje	Pistas y superficies del rodamiento				<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					
5. Fracturas	Rebordes o elementos rodantes	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					<input type="radio"/>	<input type="radio"/>						
6. Rajaduras y grietas	Pistas o elementos rodantes		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				<input type="radio"/>	<input type="radio"/>						
	Rebordes, superficie lateral de los rodillos o superficie de la guía de la jaula			<input type="radio"/>				<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>						
7. Jaula dañada	(Deformación), (Fractura)		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					<input type="radio"/>	<input type="radio"/>						
	(Desgaste)		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>				
8. Abolladuras (Impresiones)	Pistas y superficies del rodamiento				<input type="radio"/>			<input type="radio"/>								
	Pistas (contaminación de los elementos rodantes)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>						<input type="radio"/>				<input type="radio"/>			
9. Pitting	Pistas y superficies del rodamiento				<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>								
10. Deterioro (Desgaste)	Pistas, superficies del rodamiento, rebordes o superficie lateral de los rodillos		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>								
11. Corrosión por contacto	Pistas y superficies del rodamiento	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>				
	Superficies externas del agujero y anillo externo, laterales (contacto con el alojamiento y el eje)		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					<input type="radio"/>							
12. Falso brinel	Pistas y superficies del rodamiento	<input type="radio"/>					<input type="radio"/>	<input type="radio"/>					<input type="radio"/>			
13. Deslizamiento	Superficie de ajuste		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>					*Ajuste con juego
14. Agarrotamiento	Pistas, elementos rodantes o jaula		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
15. Corrosión eléctrica	Pistas y superficies del rodamiento		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>												*Corriente eléctrica que pasa por los elementos radiantes
16. Oxidación y corrosión	Pistas, elementos rodantes o jaula	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>								
17. Falla de instalación	Pistas y superficies del rodamiento		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>												
18. Sobrecalentamiento	Pistas, elementos rodantes o jaula					<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>								

Nota: Esta tabla solamente describe las ocurrencias mas comunes , sus causas y síntomas. Se debe utilizarla apenas como referencia.

ANEXO B. CÓDIGO DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS.

```
clear all;
clc;
close;

load DETECCION_DE_FALLAS_RODAMIENTOS

open SIMULACION_PRUEBA.mdl

%INTERFAZ SOFTWARE ANALIZADOR DE VIBRACIONES-MATLAB (.TXT)

[dir com]=uigetfile('*.txt');
name=strcat(com,dir);

file=textread(name,'%s','delimiter','/n');
dat = char (file);
[fila, colm] = size (dat);
SuperDatos = str2num(dat([14:end], :));
T_A=cat(1,SuperDatos(:, [1 2]),SuperDatos(:, [3 4]),SuperDatos(:, [5
6]),SuperDatos(:, [7 8]));

%TRANSFORMADA DE FOURIER

Y = fft(T_A(:,2),2048);
Pyy = Y.*conj(Y)/2048;
Z= max(Pyy);
h= Pyy/Z;
f= 1498/800*(0:127);

plot(T_A(:,1),T_A(:,2));
title('OSCILOGRAMA')
    xlabel('TIEMPO [ms]')
    ylabel('AMPLITUD [mm/s]')

figure()
plot(f,h(1:128))

title('ESPECTRO')
    xlabel('FRECUENCIA [Hz]')
    ylabel('AMPLITUD')

%PROCESO DE FILTRADO

[filas columnas]=size(Pyy);      %calcular el tamaño del vector de
amplitudes
```

```

valor=max(Pyy);           %calcular su maximo
umbral=0;                %definir el umbral

for i=1:filas            %Permite moverse en torno al vector
    if Pyy(i)<umbral*valor %definiendo el filtro -los valores
menores se vuelven cero-
        Pyy2(i)=0;       %si son menores se vuelven cero y se
guardan en la variable ppy2
    else
        Pyy2(i)=Pyy(i); %si los valores son >= se dejan como
están
    end
end

%DEFINIR LOS PICOS DEL SISTEMA- SE GUARDA EN LA VARIABLE PICOS

cont=0;                  %cont permite verificar
cuando se cumpla el delta de pendiente...
for i=1:128              %moverse en torno a los
valores de del vector
    if i==1 && (Pyy2(i+1)-Pyy2(i))<0 %para el primer
dato...cosiste en comparar la pendiente del punto siguiente es
negativa
        cont=1;
        picos(cont,1)=f(1,i);       %guardar los valores de los
picos tiempo
        picos(cont,2)=Pyy2(1,i);    % guarda la amplitud de los
picos
    elseif i>1 && (Pyy2(i)-Pyy2(i-1))>0 && (Pyy2(i+1)-Pyy2(i))<0
%analisis de los demas valores de picos
        cont=cont+1;                %pernite conocer el # de
picos y ubicarlos en una posicion del vector
        picos(cont,1)=f(1,i);       %guarda...tiempo
        picos(cont,2)=Pyy2(1,i);    %guarda...amplitud
    end
end

frecuencia=f';
amplitud=h;

%CALCULO DE LOS ARMONICOS

rpm=1780;

conversion=60;

a= rpm/conversion;
b=a*2;
c=a*3;

```

```
% CALCULO DE FALLA PRELIMINAR (ARMONICOS A 1800 RPM)
```

```
L=[];  
M=[];  
N=[];
```

```
D=[];  
J=[];  
B=[];
```

```
E=[];  
T=[];  
G=[];
```

```
%CALCULO DEL VALOR MAS CERCANO A 30
```

```
for i=1:length(frecuencia);  
    if (frecuencia(i)-a)>=0;  
        L= [L abs(frecuencia(i)-a)];  
        minimof=min(L);  
        VALOR_f=abs(minimof+a);  
    end  
    if (frecuencia(i)-a)<=0;  
        D= [D abs(frecuencia(i)-a)];  
        minimoD=min(D);  
        VALOR_D=abs(minimoD-a);  
    end  
end  
VALOR_f;  
VALOR_D;
```

```
V=[VALOR_f VALOR_D];
```

```
for i=1:length(V)  
    E= [E abs(V(i)-a)];  
end
```

```
for i=1:length(E)  
    if i==2  
        P=E(1,1);  
        W=E(1,2);  
    elseif i==1  
        P=E(1,1);  
        W=E(1,1);  
    end  
end
```

```

if P<=W;
    final= VALOR_f;
elseif P>=W;
    final=VALOR_D;
end

final;

%CALCULO DEL VALOR MAS CERCANO A 60

for i=1:length(frecuencia);
    if (frecuencia(i)-b)>=0;
        M= [M abs(frecuencia(i)-b)];
        minimoX=min(M);
        VALOR_X=abs(minimoX+b);
    end
    if (frecuencia(i)-b)<=0;
        J= [J abs(frecuencia(i)-b)];
        minimoJ=min(J);
        VALOR_J=abs(minimoJ-b);
    end
end
VALOR_X;
VALOR_J;

H=[VALOR_X VALOR_J];

for i=1:length(H)
    T= [T abs(H(i)-b)];
end
R= T(1,1);
F= T(1,2);

if R<=F;
    finalmente= VALOR_X ;
elseif R>=F;
    finalmente=VALOR_J;
end

finalmente;

%CALCULO DEL VALOR MAS CERCANO A 90

for i=1:length(frecuencia);
    if (frecuencia(i)-c)>=0;
        N= [N abs(frecuencia(i)-c)];
        minimoY=min(N);
        VALOR_Y=abs(minimoY+c);
    end
end

```

```

        if (frecuencia(i)-c)<=0;
            B= [B abs(frecuencia(i)-c)];
            minimoB=min(B);
            VALOR_B=abs(minimoB-c);
        end
    end
    VALOR_Y;
    VALOR_B;

    S=[VALOR_Y VALOR_B];

    for i=1:length(S)
        G= [G abs(S(i)-c)];
    end
    Q= G(1,1);
    K= G(1,2);

    if Q<=K;
        finalisimo= VALOR_Y;
    elseif Q>=K;
        finalisimo=VALOR_B;
    end

    finalisimo;

    finality=[final finalmente finalisimo];

%FILTRO PARA TENER REALMENTE EL VALOR CERCANO CON +/- 10% DE
EXACTITUD

A=[];
O=[];
C=[];

for i=1:length(finality)
    if finality(i)>=0.9*a && finality(i)<=1.1*a
        A=[A finality(i)];
    elseif finality(i)>=0.9*b && finality(i)<=1.1*b
        O=[O finality(i)];
    elseif finality(i)>=0.9*c && finality(i)<=1.1*c
        C=[C finality(i)];
    end
end
A;
O;
C;

FALLA_RODAMIENTO=[A O C];

SI_HAY_FALLA=[];

```

```

NO_HAY_FALLA=[];

for j=1:length(FALLA_RODAMIENTO)
    if length(FALLA_RODAMIENTO)==3;
        SI_HAY_FALLA= j;
        NO_HAY_FALLA=0;
    elseif length(FALLA_RODAMIENTO)~=3;
        FALLA_RODAMIENTO=[];
        NO_HAY_FALLA=0;
        SI_HAY_FALLA=0;
    end
end

FALLA_RODAMIENTO;
SI_HAY_FALLA;
NO_HAY_FALLA;

%VECTORES DE AMPLITUD

baja_1=[];

media_1=[];

alta_1=[];

maximo=1;

[r,u]=size(amplitud);

%GENERACION DE LOS UMBRALES DE AMPLITUD BAJA, MEDIA, Y ALTA

for n=1:length(amplitud(1:128))
    if amplitud(n)>=0 && amplitud(n)<=0.3*maximo;
        alta_1=[alta_1 amplitud(n)];
    elseif amplitud(n)>0.3*maximo && amplitud(n)<=0.5*maximo
        media_1=[media_1 amplitud(n)];
    elseif amplitud(n)>0.5*maximo
        baja_1=[baja_1 amplitud(n)];
    end
end

%CONDICION QUE SE DEBEN CUMPLIR PARA SABER SI HAY FALLA EN EL
RODAMIENTO EN
%LA PARTE DE AMPLITUD

```

```

amplitud_A11=interp1(f,h(1:128),A);
amplitud_A12=interp1(f,h(1:128),O);
amplitud_A13=interp1(f,h(1:128),C);

amplitud_1=[amplitud_A11 amplitud_A12 amplitud_A13];

%VECTORES PARA SABER SI LOS VALORES AMPLITUD_1 SE ENCUENTRAN EN EL
VECTOR
%ALTA_#

%AMPLITUD_1

amplitud_1_true=[];
amplitud_1_false=[];

for i=1:length(amplitud_1)
    for j=1:length(alta_1)
        if
num2str(alta_1(j),'%6.4f')==num2str(amplitud_1(i),'%6.4f')
            amplitud_1_true=[amplitud_1_true alta_1(j)];
            break
        elseif alta_1(j)~=amplitud_1(i)
            amplitud_1_false=[amplitud_1_false alta_1(j)];
        end
    end
end

%VECTORES DE FRECUENCIA DE FALLA PARA BPF1

bpfi=140;

VECTOR_BPFI_1=[];

for i=1:length(frecuencia)
    if frecuencia(i)>=bpfi*0.9 && frecuencia(i)<=bpfi*1.1
        VECTOR_BPFI_1=[VECTOR_BPFI_1 frecuencia(i)];
    end
end

%CALCULO DEL VALOR MAS CERCANO PARA BPF1_1

DIFERENCIA_BPFI_LL1=[];
DIFERENCIA_BPFI_DD1=[];
DIFERENCIA_BPFI_EE1=[];

```

```

VALOR_DIFERENCIA_BPFI_1=[];

for i=1:length(VECTOR_BPFI_1);
    if (VECTOR_BPFI_1(i)-bpfi)>=0;
        DIFERENCIA_BPFI_LL1= [DIFERENCIA_BPFI_LL1
abs(VECTOR_BPFI_1(i)-bpfi)];
        minimoDIFERENCIA_BPFI_LL1=min(DIFERENCIA_BPFI_LL1);
        VALOR_DIFERENCIA_BPFI_1=abs(minimoDIFERENCIA_BPFI_LL1+bpfi);
    end
    if (VECTOR_BPFI_1(i)-bpfi)<=0;
        DIFERENCIA_BPFI_DD1= [DIFERENCIA_BPFI_DD1
abs(VECTOR_BPFI_1(i)-bpfi)];
        minimoDIFERENCIA_BPFI_DD1=min(DIFERENCIA_BPFI_DD1);
        VALOR_DIFERENCIA_BPFI_DD1=abs(minimoDIFERENCIA_BPFI_DD1-
bpfi);
    end
end
VALOR_DIFERENCIA_BPFI_1;
VALOR_DIFERENCIA_BPFI_DD1;

V_CERCANO_BPFI_1=[VALOR_DIFERENCIA_BPFI_1
VALOR_DIFERENCIA_BPFI_DD1];

for i=1:length(V_CERCANO_BPFI_1)
    DIFERENCIA_BPFI_EE1= [DIFERENCIA_BPFI_EE1
abs(V_CERCANO_BPFI_1(i)-bpfi)];
end

for i=1:length(DIFERENCIA_BPFI_EE1)
    if i==2
        P_BPFI_1=DIFERENCIA_BPFI_EE1(1,1);
        W_BPFI_1=DIFERENCIA_BPFI_EE1(1,2);
    elseif i==1
        P_BPFI_1=DIFERENCIA_BPFI_EE1(1,1);
        W_BPFI_1=DIFERENCIA_BPFI_EE1(1,1);
    end
end

if P_BPFI_1<W_BPFI_1;
    BPFI_1= VALOR_DIFERENCIA_BPFI_1;
elseif P_BPFI_1>=W_BPFI_1;
    BPFI_1=VALOR_DIFERENCIA_BPFI_DD1;
end

BPFI_1;

%PLANTEAMIENTO PARA HACER LA CONDICION FINAL 1

```

```

SI_HAY_FALLA_BPFI_1=[];
NO_HAY_FALLA_BPFI_1=[];

for j=1:length(BPFI_1)
    if length(BPFI_1)==1;
        SI_HAY_FALLA_BPFI_1= j;
        NO_HAY_FALLA_BPFI_1=0;
    elseif length(BPFI_1)~=1;
        BPFI_1=[];
        NO_HAY_FALLA_BPFI_1=0;
        SI_HAY_FALLA_BPFI_1=0;
    end
end

BPFI_1;

SI_HAY_FALLA_BPFI_1;
NO_HAY_FALLA_BPFI_1;

%CONDICION QUE SE DEBEN CUMPLIR PARA SABER SI HAY FALLA EN EL
RODAMIENTO EN
%LA PARTE DE AMPLITUD

amplitud1_BPFI_A11=interp1(f,h(1:128),BPFI_1);
amplitud1_BPFI_1=[amplitud1_BPFI_A11];

%VECTORES DE AMPLITUD

baja1_1=[];

medial_1=[];

alta1_1=[];

maximo=1;

%CALCULO PARA SABER SI EL VECTOR la pareja de BPFI ESTA EN LA ZONA
BAJA, MEDIA, ALTA

for n=1:length(amplitud1_BPFI_1)
    if amplitud1_BPFI_1(n)>=0 && amplitud1_BPFI_1(n)<=0.25*maximo;
        baja1_1=[baja1_1 amplitud1_BPFI_1(n)];
    end
end

```

```

        elseif amplitud1_BPFI_1(n)>0.25*maximo &&
amplitud1_BPFI_1(n)<=0.5*maximo
            medial_1=[medial_1 amplitud1_BPFI_1(n)];
        elseif amplitud1_BPFI_1(n)>0.5*maximo
            alta1_1=[alta1_1 amplitud1_BPFI_1(n)];
        end
    end
end

%VECTORES PARA SABER SI LOS VALORES AMPLITUD_1 SE ENCUENTRAN EN EL
VECTOR
%MALO_#

%AMPLITUD_1

amplitud1_BPFI_1_true=[];
amplitud1_BPFI_1_false=[];

for i=1:length(alta1_1)
    for j=1:length(amplitud1_BPFI_1)
        if amplitud1_BPFI_1(j)==alta1_1(i)
            amplitud1_BPFI_1_true=[amplitud1_BPFI_1_true
amplitud1_BPFI_1(j)];
        elseif amplitud1_BPFI_1(j)~=alta1_1(i)
            amplitud1_BPFI_1_false=[];
        end
    end
end

for i=1:length(medial_1)
    for j=1:length(amplitud1_BPFI_1)
        if amplitud1_BPFI_1(j)==medial_1(i)
            amplitud1_BPFI_1_true=[amplitud1_BPFI_1_true
amplitud1_BPFI_1(j)];
        elseif amplitud1_BPFI_1(j)~=medial_1(i)
            amplitud1_BPFI_1_false=[];
        end
    end
end

for i=1:length(baja1_1)
    for j=1:length(amplitud1_BPFI_1)
        if amplitud1_BPFI_1(j)==baja1_1(i)
            amplitud1_BPFI_1_true=[amplitud1_BPFI_1_true
amplitud1_BPFI_1(j)];
        elseif amplitud1_BPFI_1(j)~=baja1_1(i)

```

```

                                amplitud1_BPFI_1_false=[];
                                end
                                end
                                end

amplitud1_BPFI_1_true;
amplitud1_BPFI_1_false;

%UNION DE LOS VECTORES DE AMPLITUD DE LOS ARMONICOS Y AMPLITUD DE
BPFI

amplitud_entrada_BPFI_1=[amplitud1_BPFI_1_true amplitud_1];

% ENTRADAS AL SISTEMA DE DETECCION DE FALLAS EN RODAMIENTOS
(CORRESPONDIENTE DE FRECUENCIA EN AMPLITUD)

%(COORDENADA PARA INTRODUCIR EN EL BLOQUE SIMIN) [BPFI_1 bpfi_1]

bpfi_1=interp1(f,h(1:128),BPFI_1);

%VECTORES DE FRECUENCIA DE FALLA PARA BPFO

bpfo=114;

VECTOR_BPFO_1=[];

for i=1:length(frecuencia)
    if frecuencia(i)>=bpfo*0.9 && frecuencia(i)<=bpfo*1.1
        VECTOR_BPFO_1=[VECTOR_BPFO_1 frecuencia(i)];
    end
end

%CALCULO DEL VALOR MAS CERCANO PARA BPFO_1

DIFERENCIA_BPFO_LL1=[];
DIFERENCIA_BPFO_DD1=[];
DIFERENCIA_BPFO_EE1=[];

VALOR_DIFERENCIA_BPFO_1=[];

```

```

for i=1:length(VECTOR_BPFO_1);
    if (VECTOR_BPFO_1(i)-bpfo)>=0;
        DIFERENCIA_BPFO_LL1= [DIFERENCIA_BPFO_LL1
abs(VECTOR_BPFO_1(i)-bpfo)];
        minimoDIFERENCIA_BPFO_LL1=min(DIFERENCIA_BPFO_LL1);
        VALOR_DIFERENCIA_BPFO_1=abs(minimoDIFERENCIA_BPFO_LL1+bpfo);
    end
    if (VECTOR_BPFO_1(i)-bpfo)<=0;
        DIFERENCIA_BPFO_DD1= [DIFERENCIA_BPFO_DD1
abs(VECTOR_BPFO_1(i)-bpfo)];
        minimoDIFERENCIA_BPFO_DD1=min(DIFERENCIA_BPFO_DD1);
        VALOR_DIFERENCIA_BPFO_DD1=abs(minimoDIFERENCIA_BPFO_DD1-
bpfo);
    end
end
VALOR_DIFERENCIA_BPFO_1;
VALOR_DIFERENCIA_BPFO_DD1;

V_CERCANO_BPFO_1=[VALOR_DIFERENCIA_BPFO_1
VALOR_DIFERENCIA_BPFO_DD1];

for i=1:length(V_CERCANO_BPFO_1)
    DIFERENCIA_BPFO_EE1= [DIFERENCIA_BPFO_EE1
abs(V_CERCANO_BPFO_1(i)-bpfo)];
end

for i=1:length(DIFERENCIA_BPFO_EE1)
    if i==2
        P_BPFO_1=DIFERENCIA_BPFO_EE1(1,1);
        W_BPFO_1=DIFERENCIA_BPFO_EE1(1,2);
    elseif i==1
        P_BPFO_1=DIFERENCIA_BPFO_EE1(1,1);
        W_BPFO_1=DIFERENCIA_BPFO_EE1(1,1);
    end
end

if P_BPFO_1<W_BPFO_1;
    BPFO_1= VALOR_DIFERENCIA_BPFO_1;
elseif P_BPFO_1>=W_BPFO_1;
    BPFO_1=VALOR_DIFERENCIA_BPFO_DD1;
end

BPFO_1;

%PLANTEAMIENTO PARA HACER LA CONDICION FINAL 1

SI_HAY_FALLA_BPFO_1=[];
NO_HAY_FALLA_BPFO_1=[];

for j=1:length(BPFO_1)
    if length(BPFO_1)==1;
        SI_HAY_FALLA_BPFO_1= j;
    end
end

```

```

        NO_HAY_FALLA_BPFO_1=0;
    elseif length(BPFO_1)~=1;
        BPFO_1=[];
        NO_HAY_FALLA_BPFO_1=0;
        SI_HAY_FALLA_BPFO_1=0;
    end
end

BPFO_1;

SI_HAY_FALLA_BPFO_1;
NO_HAY_FALLA_BPFO_1;

%CONDICION QUE SE DEBEN CUMPLIR PARA SABER SI HAY FALLA EN EL
RODAMIENTO EN
%LA PARTE DE AMPLITUD

amplitud1_BPFO_A11=interp1(f,h(1:128),BPFO_1);
amplitud1_BPFO_1=[amplitud1_BPFO_A11];

%VECTORES DE AMPLITUD

baja2_2=[];

media2_2=[];

alta2_2=[];

maximo=1;

%CALCULO PARA SABER SI EL VECTOR la pareja de BPFO ESTA EN LA ZONA
BAJA, MEDIA, ALTA

for n=1:length(amplitud1_BPFO_1)
    if amplitud1_BPFO_1(n)>=0 && amplitud1_BPFO_1(n)<=0.25*maximo;
        baja2_2=[baja2_2 amplitud1_BPFO_1(n)];
    elseif amplitud1_BPFO_1(n)>0.25*maximo &&
amplitud1_BPFO_1(n)<=0.5*maximo
        media2_2=[media2_2 amplitud1_BPFO_1(n)];
    elseif amplitud1_BPFO_1(n)>0.5*maximo
        alta2_2=[alta2_2 amplitud1_BPFO_1(n)];
    end
end
end

```

```

%VECTORES PARA SABER SI LOS VALORES AMPLITUD_1 SE ENCUENTRAN EN EL
VECTOR
%MALO_#

%AMPLITUD_1

amplitud1_BPFO_1_true=[];
amplitud1_BPFO_1_false=[];

for i=1:length(alta2_2)
    for j=1:length(amplitud1_BPFO_1)
        if amplitud1_BPFO_1(j)==alta2_2(i)
            amplitud1_BPFO_1_true=[amplitud1_BPFO_1_true
amplitud1_BPFO_1(j)];
        elseif amplitud1_BPFO_1(j)~=alta2_2(i)
            amplitud1_BPFO_1_false=[];
        end
    end
end

for i=1:length(media2_2)
    for j=1:length(amplitud1_BPFO_1)
        if amplitud1_BPFO_1(j)==media2_2(i)
            amplitud1_BPFO_1_true=[amplitud1_BPFO_1_true
amplitud1_BPFO_1(j)];
        elseif amplitud1_BPFO_1(j)~=media2_2(i)
            amplitud1_BPFO_1_false=[];
        end
    end
end

for i=1:length(baja2_2)
    for j=1:length(amplitud1_BPFO_1)
        if amplitud1_BPFO_1(j)==baja2_2(i)
            amplitud1_BPFO_1_true=[amplitud1_BPFO_1_true
amplitud1_BPFO_1(j)];
        elseif amplitud1_BPFO_1(j)~=baja2_2(i)
            amplitud1_BPFO_1_false=[];
        end
    end
end

amplitud1_BPFO_1_true;
amplitud1_BPFO_1_false;

```

```

%UNION DE LOS VECTORES DE AMPLITUD DE LOS ARMONICOS Y AMPLITUD DE
BPFO

amplitud_entrada_BPFO_1=[amplitud1_BPFO_1_true amplitud_1];

% ENTRADAS AL SISTEMA DE DETECCION DE FALLAS EN RODAMIENTOS
(CORRESPONDIENTE DE FRECUENCIA EN AMPLITUD)

%(COORDENADA PARA INTRODUCIR EN EL BLOQUE SIMIN) [BPFI_1 bpfi_1]

bpfo_1=interp1(f,h(1:128),BPFO_1);

%VECTORES DE FRECUENCIA DE FALLA PARA BSF

bsf=59.7;

VECTOR_BSF_1=[];

for i=1:length(frecuencia)
    if frecuencia(i)>=bsf*0.9 && frecuencia(i)<=bsf*1.1
        VECTOR_BSF_1=[VECTOR_BSF_1 frecuencia(i)];
    end
end

%CALCULO DEL VALOR MAS CERCANO PARA BSF_1

DIFERENCIA_BSF_LL1=[];
DIFERENCIA_BSF_DD1=[];
DIFERENCIA_BSF_EE1=[];

VALOR_DIFERENCIA_BSF_1=[];

for i=1:length(VECTOR_BSF_1);
    if (VECTOR_BSF_1(i)-bsf)>=0;
        DIFERENCIA_BSF_LL1= [DIFERENCIA_BSF_LL1 abs(VECTOR_BSF_1(i)-
bsf)];
        minimoDIFERENCIA_BSF_LL1=min(DIFERENCIA_BSF_LL1);
        VALOR_DIFERENCIA_BSF_1=abs(minimoDIFERENCIA_BSF_LL1+bsf);
    end
    if (VECTOR_BSF_1(i)-bsf)<=0;

```

```

        DIFERENCIA_BSF_DD1= [DIFERENCIA_BSF_DD1 abs(VECTOR_BSF_1(i)-
bsf)];
        minimoDIFERENCIA_BSF_DD1=min(DIFERENCIA_BSF_DD1);
        VALOR_DIFERENCIA_BSF_DD1=abs(minimoDIFERENCIA_BSF_DD1-bsf);
    end
end

for i=1:length(DIFERENCIA_BSF_EE1)
    if i==2
        P_BSF_1=DIFERENCIA_BSF_EE1(1,1);
        W_BSF_1=DIFERENCIA_BSF_EE1(1,2);
    elseif i==1
        P_BSF_1=DIFERENCIA_BSF_EE1(1,1);
        W_BSF_1=DIFERENCIA_BSF_EE1(1,1);
    end
end

V_CERCANO_BSF_1=[VALOR_DIFERENCIA_BSF_1 VALOR_DIFERENCIA_BSF_DD1];

for i=1:length(V_CERCANO_BSF_1)
    DIFERENCIA_BSF_EE1= [DIFERENCIA_BSF_EE1 abs(V_CERCANO_BSF_1(i)-
bsf)];
end
P_BSF_1= DIFERENCIA_BSF_EE1(1,1);
W_BSF_1= DIFERENCIA_BSF_EE1(1,2);

if P_BSF_1<W_BSF_1;
    BSF_1= VALOR_DIFERENCIA_BSF_1;
elseif P_BSF_1>=W_BSF_1;
    BSF_1=VALOR_DIFERENCIA_BSF_DD1;
end

BSF_1;

%PLANTEAMIENTO PARA HACER LA CONDICION FINAL 1

SI_HAY_FALLA_BSF_1=[];
NO_HAY_FALLA_BSF_1=[];

for j=1:length(BSF_1)
    if length(BSF_1)==1;
        SI_HAY_FALLA_BSF_1= j;
        NO_HAY_FALLA_BSF_1=0;
    elseif length(BSF_1)~=1;
        BSF_1=[];
        NO_HAY_FALLA_BSF_1=0;
        SI_HAY_FALLA_BSF_1=0;
    end
end
end

```

```

BSF_1;

SI_HAY_FALLA_BSF_1;
NO_HAY_FALLA_BSF_1;

%CONDICION QUE SE DEBEN CUMPLIR PARA SABER SI HAY FALLA EN EL
RODAMIENTO EN
%LA PARTE DE AMPLITUD

amplitud1_BSF_A11=interp1(f,h(1:128),BSF_1);
amplitud1_BSF_1=[amplitud1_BSF_A11];

%VECTORES DE AMPLITUD

baja3_3=[];

media3_3=[];

alta3_3=[];

maximo=1;

%CALCULO PARA SABER SI EL VECTOR la pareja de BSF ESTA EN LA ZONA
BAJA, MEDIA, ALTA

for n=1:length(amplitud1_BSF_1)
    if amplitud1_BSF_1(n)>=0 && amplitud1_BSF_1(n)<=0.25*maximo;
        baja3_3=[baja3_3 amplitud1_BSF_1(n)];
    elseif amplitud1_BSF_1(n)>0.25*maximo &&
amplitud1_BSF_1(n)<=0.5*maximo
        media3_3=[media3_3 amplitud1_BSF_1(n)];
    elseif amplitud1_BSF_1(n)>0.5*maximo
        alta3_3=[alta3_3 amplitud1_BSF_1(n)];
    end
end

%VECTORES PARA SABER SI LOS VALORES AMPLITUD_1 SE ENCUENTRAN EN EL
VECTOR
%MALO_#

```

```

%AMPLITUD_1

amplitud1_BSF_1_true=[];
amplitud1_BSF_1_false=[];

for i=1:length(alta3_3)
    for j=1:length(amplitud1_BSF_1)
        if amplitud1_BSF_1(j)==alta3_3(i)
            amplitud1_BSF_1_true=[amplitud1_BSF_1_true
amplitud1_BSF_1(j)];
        elseif amplitud1_BSF_1(j)~=alta3_3(i)
            amplitud1_BSF_1_false=[];
        end
    end
end

for i=1:length(media3_3)
    for j=1:length(amplitud1_BSF_1)
        if amplitud1_BSF_1(j)==media3_3(i)
            amplitud1_BSF_1_true=[amplitud1_BSF_1_true
amplitud1_BSF_1(j)];
        elseif amplitud1_BSF_1(j)~=media3_3(i)
            amplitud1_BSF_1_false=[];
        end
    end
end

for i=1:length(baja3_3)
    for j=1:length(amplitud1_BSF_1)
        if amplitud1_BSF_1(j)==baja3_3(i)
            amplitud1_BSF_1_true=[amplitud1_BSF_1_true
amplitud1_BSF_1(j)];
        elseif amplitud1_BSF_1(j)~=baja3_3(i)
            amplitud1_BSF_1_false=[];
        end
    end
end

amplitud1_BSF_1_true;
amplitud1_BSF_1_false;

%UNION DE LOS VECTORES DE AMPLITUD DE LOS ARMONICOS Y AMPLITUD DE
BSF

amplitud_entrada_BSF_1=[amplitud1_BSF_1_true amplitud_1];

```

```

% ENTRADAS AL SISTEMA DE DETECCION DE FALLAS EN RODAMIENTOS
(CORRESPONDIENTE DE FRECUENCIA EN AMPLITUD)

%(COORDENADA PARA INTRODUCIR EN EL BLOQUE SIMIN) [BPFI_1 bpfi_1]

bsf_1=interp1(f,h(1:128),BSF_1);

%VECTORES DE FRECUENCIA DE FALLA PARA FTF

ftf=11.445;

VECTOR_FTF_1=[];

for i=1:length(frecuencia)
    if frecuencia(i)>=ftf*0.9 && frecuencia(i)<=ftf*1.1
        VECTOR_FTF_1=[VECTOR_FTF_1 frecuencia(i)];
    end
end

%CALCULO DEL VALOR MAS CERCANO PARA BPFI_1

DIFERENCIA_FTF_LL1=[];
DIFERENCIA_FTF_DD1=[];
DIFERENCIA_FTF_EE1=[];

VALOR_DIFERENCIA_FTF_1=[];

for i=1:length(VECTOR_FTF_1);
    if (VECTOR_FTF_1(i)-ftf)>=0;
        DIFERENCIA_FTF_LL1= [DIFERENCIA_FTF_LL1 abs(VECTOR_FTF_1(i)-
ftf)];
        minimoDIFERENCIA_FTF_LL1=min(DIFERENCIA_FTF_LL1);
        VALOR_DIFERENCIA_FTF_1=abs(minimoDIFERENCIA_FTF_LL1+ftf);
    end
    if (VECTOR_FTF_1(i)-ftf)<=0;
        DIFERENCIA_FTF_DD1= [DIFERENCIA_FTF_DD1 abs(VECTOR_FTF_1(i)-
ftf)];
        minimoDIFERENCIA_FTF_DD1=min(DIFERENCIA_FTF_DD1);
        VALOR_DIFERENCIA_FTF_DD1=abs(minimoDIFERENCIA_FTF_DD1-ftf);
    end
end
VALOR_DIFERENCIA_FTF_1;
VALOR_DIFERENCIA_FTF_DD1;

```

```

V_CERCANO_FTF_1=[VALOR_DIFERENCIA_FTF_1 VALOR_DIFERENCIA_FTF_DD1];

for i=1:length(V_CERCANO_FTF_1)
    DIFERENCIA_FTF_EE1= [DIFERENCIA_FTF_EE1 abs(V_CERCANO_FTF_1(i)-
ftf)];
end

%%%%%%%%%%%%%
for i=1:length(DIFERENCIA_FTF_EE1)
    if i==2
        P_FTF_1=DIFERENCIA_FTF_EE1(1,1);
        W_FTF_1=DIFERENCIA_FTF_EE1(1,2);
    elseif i==1
        P_FTF_1=DIFERENCIA_FTF_EE1(1,1);
        W_FTF_1=DIFERENCIA_FTF_EE1(1,1);
    end
end

if P_FTF_1<W_FTF_1;
    FTF_1= VALOR_DIFERENCIA_FTF_1;
elseif P_FTF_1>=W_FTF_1;
    FTF_1=VALOR_DIFERENCIA_FTF_DD1;
end

FTF_1;

%PLANTEAMIENTO PARA HACER LA CONDICION FINAL 1

SI_HAY_FALLA_FTF_1=[];
NO_HAY_FALLA_FTF_1=[];

for j=1:length(FTF_1)
    if length(FTF_1)==1;
        SI_HAY_FALLA_FTF_1= j;
        NO_HAY_FALLA_FTF_1=0;
    elseif length(FTF_1)~=1;
        FTF_1=[];
        NO_HAY_FALLA_FTF_1=0;
        SI_HAY_FALLA_FTF_1=0;
    end
end

FTF_1;

SI_HAY_FALLA_FTF_1;
NO_HAY_FALLA_FTF_1;

%CONDICION QUE SE DEBEN CUMPLIR PARA SABER SI HAY FALLA EN EL
RODAMIENTO EN

```

```

%LA PARTE DE AMPLITUD

amplitud1_FTF_A11=interp1(f,h(1:128),FTF_1);
amplitud1_FTF_1=[amplitud1_FTF_A11];

%VECTORES DE AMPLITUD

baja4_4=[];

media4_4=[];

alta4_4=[];

maximo=1;

%CALCULO PARA SABER SI EL VECTOR la pareja de BPFI ESTA EN LA ZONA
BAJA, MEDIA, ALTA

for n=1:length(amplitud1_FTF_1)
    if amplitud1_FTF_1(n)>=0 && amplitud1_FTF_1(n)<=0.25*maximo;
        baja4_4=[baja4_4 amplitud1_FTF_1(n)];
    elseif amplitud1_FTF_1(n)>0.25*maximo &&
amplitud1_FTF_1(n)<=0.5*maximo
        media4_4=[media4_4 amplitud1_FTF_1(n)];
    elseif amplitud1_FTF_1(n)>0.5*maximo
        alta4_4=[alta4_4 amplitud1_FTF_1(n)];
    end
end

%VECTORES PARA SABER SI LOS VALORES AMPLITUD_1 SE ENCUENTRAN EN EL
VECTOR
%MALO_#

%AMPLITUD_1

amplitud1_FTF_1_true=[];
amplitud1_FTF_1_false=[];

for i=1:length(alta4_4)

```

```

        for j=1:length(amplitud1_FTF_1)
            if amplitud1_FTF_1(j)==alta4_4(i)
                amplitud1_FTF_1_true=[amplitud1_FTF_1_true
amplitud1_FTF_1(j)];
            elseif amplitud1_FTF_1(j)~=alta4_4(i)
                amplitud1_FTF_1_false=[];
            end
        end
    end
end

for i=1:length(media4_4)
    for j=1:length(amplitud1_FTF_1)
        if amplitud1_FTF_1(j)==media4_4(i)
            amplitud1_FTF_1_true=[amplitud1_FTF_1_true
amplitud1_FTF_1(j)];
        elseif amplitud1_FTF_1(j)~=media4_4(i)
            amplitud1_FTF_1_false=[];
        end
    end
end

for i=1:length(baja4_4)
    for j=1:length(amplitud1_FTF_1)
        if amplitud1_FTF_1(j)==baja4_4(i)
            amplitud1_FTF_1_true=[amplitud1_FTF_1_true
amplitud1_FTF_1(j)];
        elseif amplitud1_FTF_1(j)~=baja4_4(i)
            amplitud1_FTF_1_false=[];
        end
    end
end

amplitud1_FTF_1_true;
amplitud1_FTF_1_false;

%UNION DE LOS VECTORES DE AMPLITUD DE LOS ARMONICOS Y AMPLITUD DE
BPMI

amplitud_entrada_FTF_1=[amplitud1_FTF_1_true amplitud_1];

% ENTRADAS AL SISTEMA DE DETECCION DE FALLAS EN RODAMIENTOS
(CORRESPONDIENTE DE FRECUENCIA EN AMPLITUD)

ftf_1=interp1(f,h(1:128),FTF_1);

%CONDICION FINAL

```

```
if bpfi_1>0.20*maximo && bpfi_1<=1*maximo || bpfo_1>0.20*maximo &&
bpfo_1<=1*maximo || bsf_1>0.20*maximo && bsf_1<=1*maximo ||
ftf_1>0.20*maximo && ftf_1<=1*maximo
    disp('EL RODAMIENTO PRESENTA FALLA EN ELEMENTO')

elseif bpfi_1>=0*maximo && bpfi_1<=0.20*maximo || bpfo_1>=0*maximo
&& bpfo_1<=0.20*maximo || bsf_1>=0*maximo && bsf_1<=0.20*maximo ||
ftf_1>=0*maximo && ftf_1<=0.20*maximo
    disp('EL RODAMIENTO PRESENTA CONDICION NORMAL')
end
```