# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

"ESTABLECIMIENTO DE UNA BASE DE DATOS DE SEÑALES DE VIBRACIONES MECÁNICAS DE UNA CAJA REDUCTORA COMBINANDO FALLOS DE RODAMIENTOS Y ENGRANAJES RECTOS PARA FINES INVESTIGATIVOS EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA"

> Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Autor:

Carangui Vintimilla Marcos Rene

Director:

Ing. René Vinicio Sánchez M.Sc

Cuenca, Febrero 2014

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

"ESTABLECIMIENTO DE UNA BASE DE DATOS DE SEÑALES DE VIBRACIONES MECÁNICAS DE UNA CAJA REDUCTORA COMBINANDO FALLOS DE RODAMIENTOS Y ENGRANAJES RECTOS PARA FINES INVESTIGATIVOS EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA"

Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Autor:

Carangui Vintimilla Marcos Rene

marcs-cv@hotmail.com

Director:

Ing. René Vinicio Sánchez M.Sc

rsanchezl@ups.edu.ec

Cuenca, Febrero 2014

## AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento a ti Dios por haber hecho realidad este sueño, ya que con tu sabiduría y el amor que nos rodeas eh podido culminar este proyecto.

A mis padres, Marco y Mariana, quienes siempre estuvieron a mi lado brindándome el amor necesario y el ejemplo de constancia para salir adelante.

A mis hermanas, Karla y Nataly, quienes con su amistad, cariño y alegría me motivaron para salir adelante en cada año de estudio universitario.

A mi abuelita, Luisa, quien con su apoyo incondicional y su preocupación me ayudó a poner disciplina en cada una de mis actividades.

Al Ing. Vinicio Sánchez M.Sc, por el apoyo y confianza brindada en todos estos años de estudio para que este trabajo de tesis hoy se encuentre concluido.

A mi amigo, Pedro Espinoza, quien con su gran amistad y confianza es una de las principales personas que me apoyo para que mi carrera universitaria llegue a su fin.

Al Ing. Omar Llerena y Adrian Arpi, quienes con su amistad y su profesionalismo aportaron sus conocimientos para que este proyecto se realice de la mejor manera posible.

Marcos

### DECLARATORIA

El trabajo de grado que se presenta, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana. En tal virtud los fundamentos técnicos-científicos y los resultados son exclusiva responsabilidad de los autores

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la Normativa Institucional Vigente.

Marcos Carangue

Marcos Rene Carangui Vintimilla

### **CERTIFICADO**

Que el presente proyecto de tesis "Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas de una caja reductora combinando fallos de rodamientos y engranajes rectos para fines investigativos en la Universidad Politécnica Salesiana", realizado por el estudiante: Carangui Vintimilla Marcos Rene, fue dirigido por mi persona.

T.

Ing. René Vinicio Sánchez M.Sc

### RESUMEN

El presente trabajo presenta la investigación de vibraciones mecánicas en una caja reductora, esto para entender que el exceso de estas vibraciones son causantes de daños en los equipos. Adicionalmente se analiza las vibraciones mecánicas como fundamento principal en prácticas de mantenimiento predictivo.

Posteriormente se determina la ubicación de los diferentes elementos en la caja de engranajes para luego analizar los fallos más comunes que se presentan en la industria tanto en engranajes rectos cuanto rodamientos rígido de bolas , para finalmente analizar otros estudios realizados por diferentes instituciones sobre fallos en los elementos ya mencionados y de esta manera especificar las medidas de construcción de los diferentes fallos a ser analizarlos ,cabe anotar que estos fallos son diferentes a los ya realizados por dichas instituciones .

Después se describe el protocolo utilizado para identificar cada uno de los fallos montados en las diferentes pruebas, de manera que al ingresar en la base de datos las pruebas realizadas y aquellas que se realizaran en el futuro sean totalmente fáciles de identificar.

Para la adquisición de señales se utilizo el software VIBRACIONES realizado en la Universidad Politécnica Salesiana, así como acelerómetro uniaxial DIGIVIBE del fabricante ERBESSD, por último se presentan diagramas UML en los cuales se explica la utilización y constitución del software.

Finalmente se realiza el levantamiento de la base de datos con un total de 60 pruebas es decir 60 combinaciones diferentes acaparando fallos en engranajes rectos, rodamientos rígidos de bolas y combinando fallos en ambos elementos al mismo tiempo, con un total de 60000 muestras.

# ÍNDICE

### <u>Pág.</u>

LISTA DE FIGURAS
LISTA DE TABLASxiii
1 INTRODUCCIÓN A LAS VIBRACIONES MECÁNICAS1
1.1 Mantenimiento predictivo
1.1.1 Objetivos del mantenimiento predictivo1
Monitoreo de máquinas2
Diagnóstico de fallos
Estimación de la vida útil
1.2 Vibración
1.2.1 Señales vibratorias
Amplitud
Fase
1.2.2 Vibraciones mecánicas
1.2.3 Adquisición de datos
Formas de la transformada de Fourier6
La serie de Fourier7
Los coeficientes de Fourier7
La transformada integral de Fourier7
La transformada discrecional de Fourier7
La transformada rápida de Fourier
1.2.4 Procesamiento digital de señales de vibración
Análisis tradicional

Análisis académico e investigativo9
Espacio de representación9
Estimación de características9
Extracción de características relevantes10
Clasificación de señales10
1.2.5 Unidades de vibración10
1.3 Análisis vibratorio
1.3.1Composición del espectro vibratorio
1.3.2Técnicas de análisis de vibraciones12
Análisis frecuencial
Análisis de forma de onda14
Análisis de la fase de las vibraciones14
Análisis de orbitas y posición del eje en el descanso15
Análisis de vibraciones durante partidas y paradas15
2 CONFIGURACIÓNDE LOS SISTEMAS MECÁNICOS PARA SIMULAR LOS FALLOS
DE ENGRANAJES RECTOS Y RODAMIENTOS EN LA CAJA DE ENGRANAJES 16
2.1 Disposición de fallos en engranajes
2.1.1 Fallos en los engranajes
Fatiga superficial
Fallo por desgaste
Rotura de dientes
Rayado y escoriado
2.1.2 Selección y construcción de los fallos
Fatiga superficial
Fallo por desgaste
Rotura de dientes
Rayado y escoriado

2.1.	.3 Combinaciones de fallos de ruedas dentadas en la caja de engranajes			
2.2	Disposición de fallos en rodamientos			
2.2.	.1 Fallos en los rodamientos			
F	Fallo en la pista externa			
F	Fallo en la pista interna			
F	Fallo en el elemento rodante			
2.2.	.2 Selección y construcción de fallos			
F	Fallo en la pista externa			
F	Fallo en la pista interna 41			
F	Fallo en el elemento rodante			
2.2.	.3 Combinaciones de fallos en la caja de elementos dentados para rodamientos 45			
2.3	Disposición de fallos combinados entre engranajes y rodamientos			
2.3.	.1 Combinación de fallos en la caja de elementos dentados para rodamientos y			
eng	granajes en un mismo instante			
3 PRO	OCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE SEÑALES DE VIBRACIÓNES MECÁNICASDE			
ENGRA	NAJES RECTOS Y RODAMIENTOS CON SUS DIFERENTES FALLOS			
3.1	Protocolo para la toma de señales de la base de datos			
3.1.	.1 Descripción del banco de experimentación			
3.1.	.2 Parámetros variables en el banco de vibraciones 50			
3.1.	.3 Unidades del banco de vibraciones			
L	Jnidad de mando			
	Variador de frecuencia			
	Panel de control			
τ	Jnidad motriz			
	Motor			
Encoder				
U	Jnidad de pruebas			

Acelerómetro	. 56
Caja de engranajes	. 58
Ruedas dentadas disponibles para el uso del banco de vibraciones	. 60
Rodamientos	. 60
3.1.4 Tipo y nivel de aceite en la caja de engranajes	. 61
Tipo de aceite	. 61
Nivel de aceite	. 62
3.1.5 Posición de los acelerómetros	. 63
3.1.6 Nomenclatura de los elementos para pruebas	. 64
4 BASE DE DATOS	. 71
4.1 Protocolo de la base de datos	. 71
4.2 Diagrama UML para el banco de vibraciones mecánicas de la Universidad Politécnica	
Salesiana de la base de datos	. 72
4.3 Implementación del software para el banco de vibraciones mecánicas	. 73
4.3.1 Diagrama de bloques para la utilización del software de vibraciones mecánicas	. 73
4.4 Disponibilidad de la base de datos	. 74
5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES	. 75
5.1 Conclusiones	. 75
5.2 Recomendaciones	. 76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	. 77
ANEXO A – PLANOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE FALLOS EN ENGRANAJES RECTOS .	. 83
A1 Plano para construcción de picadura en una rueda dentada diente recto	. 84
A2 Plano para construcción de desgaste en una rueda dentada diente recto	. 85
A3 Plano para construcción de grieta en una rueda dentada diente recto	. 86
A4 Plano para construcción de escoriado al 25% en una rueda dentada diente recto	. 87
A5 Plano para construcción de escoriado al 100% en una rueda dentada diente recto	. 88
ANEXO B – PLANOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS	
RÍGIDOS DE BOLAS	. 89

B1	Plano para construcción de 2 picaduras en pista exterior de un rodamiento rígido de bolas 90
B2	Plano para construcción de 4 picaduras en pista exterior de un rodamiento rígido de bolas 91
B3	Plano para construcción de 2 picaduras en pista interior de un rodamiento rígido de bolas 92
B4	Plano para construcción de 4 picaduras en pista interior de un rodamiento rígido de bolas 93
B5	Plano para construcción de picadura en 2 bolas de un rodamiento rígido de bolas
B6	Plano para construcción de picadura en 4 bolas de un rodamiento rígido de bolas

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Formas de medir la amplitud vibratoria
Figura 2: Señales sinusoidales separadas 90 °
Figura 3: Relación entre velocidad aceleración y desplazamiento
Figura 4: Componentes de un espectro vibratorio 11
Figura 5: Espectro con vibraciones altas
Figura 6: Mismo espectro anterior luego de lubricar los descansos
Figura 7: Distribución de engranajes en la caja de elementos dentados 16
Figura 8: Tipos de fallos en ruedas dentadas
Figura 9: Picadura: a.) Inicial, b.)Progresiva
Figura 10: Desgaste
Figura 11: Desgaste Excesivo
Figura 12: Desgaste Abrasivo
Figura 13: Rotura de diente
Figura 14: Escoriado
Figura 15: Escoriado Destructivo
Figura 16: Fallos seleccionados para análisis
Figura 17: Ancho de picadura
Figura 18: Desgaste Abrasivo
Figura 19: Grieta en el diente de una rueda dentada
Figura 20: Rotura completa de diente en una rueda dentada
Figura 21: Escoriado 25%

Figura 22: Escoriado 100%.	
Figura 23: Distribución en Matlab de fallos en ruedas dentadas	
Figura 24: Distribución de rodamientos en la caja de elementos dentados	
Figura 25: Tipos de fallos en Rodamientos	
Figura 26: Picadura en pista externa.	
Figura 27: Picadura en pista interna.	
Figura 28: Picadura en elemento rodante	
Figura 29: Distribución en Matlab de fallos en rodamientos.	
Figura 30: Distribución de rodamientos y engranajes en la caja de engranajes	
Figura 31: Distribución en Matlab de fallos combinados.	
Figura 32: Banco de vibraciones mecánicas.	
Figura 33: Parámetros de prueba	50
Figura 34: Unidades del banco de pruebas.	51
Figura 35: Variador de frecuencia	52
Figura 36: Panel de control.	53
Figura 37: Motor	54
Figura 38: Encoder.	55
Figura 39: Tarjeta DAQ.	56
Figura 40: Acelerómetro	57
Figura 41: Caja de engranajes.	58
Figura 42: Características del rodamiento	60
Figura 43: Características del aceite Gulf EP Lubricant HD 220.	62
Figura 44: Deposito de lubricante	62
Figura 45: Nivel de aceite.	63

Figura 46: Posición correcta de los acelerómetros.	. 64
Figura 47: Señalización de los elementos.	. 65
Figura 48: Señalización de los acelerómetros en el eje I	. 65
Figura 49: Señalización de los acelerómetros en el eje J.	. 66
Figura 50: Señalización de los acelerómetros en el eje K	. 66
Figura 51: Diagrama UML para el banco de vibraciones mecánicas	. 72
Figura 52: Diagrama de bloques para el software de vibraciones mecánicas.	. 74
Figura A1: Dimensiones de picadura en rueda dentada	. 84
Figura A2: Dimensiones de desgaste en rueda dentada.	. 85
Figura A3: Dimensiones de desgaste en rueda dentada.	. 86
Figura A4: Dimensiones de escoriado al 25% en rueda dentada.	. 87
Figura A5: Dimensiones de escoriado al 100% en rueda dentada.	. 88
Figura B1: Dimensiones de 2 picaduras en pista exterior de un rodamiento rígido de bolas	. 90
Figura B2: Dimensiones de 4 picaduras en pista exterior de un rodamiento rígido de bolas	91
Figura B3: Dimensiones de 2 picaduras en pista interior de un rodamiento rígido de bolas	. 92
Figura B4: Dimensiones de 2 picaduras en pista interior de un rodamiento rígido de bolas	. 93
Figura B5: Dimensiones de picadura en 2 bolas de un rodamiento rígido de bolas	. 94
Figura B6: Dimensiones de picadura en 4 bolas de un rodamiento rígido de bolas	. 95

# LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Técnicas de análisis. 2
Tabla 2: Datos del piñón y rueda dentada.  17
Tabla 3: Pruebas de fatiga para engranajes.  23
Tabla 4: Pruebas de desgaste para engranajes
Tabla 5: Pruebas de fatiga para engranajes.  27
Tabla 6: Pruebas de escoriado para engranajes.  30
Tabla 7: Tipo de fallo y numeración.  33
Tabla 8: Numeración de las ruedas dentadas dentro de la caja de engranajes.     34
Tabla 9: Pruebas de fallo en pista externa
Tabla 10: Pruebas de fallo en pista interna
Tabla 11: Pruebas de fallo en pista interna
Tabla 12: Tipo de fallo y numeración.  45
Tabla 13: Numeración de los rodamientos dentro de la caja de engranajes
Tabla 14: Tipo de fallo y numeración.  48
Tabla 15: Datos de las ruedas dentadas.  58
Tabla 16: Datos de construcción.  59
Tabla 17: Ruedas dentadas disponibles para uso del banco de vibraciones
Tabla 18: Nomenclatura en ruedas dentadas
Tabla 19: Nomenclatura de acelerómetros en la caja de engranajes.  68
Tabla 20: Tipo de carga empleada en las pruebas de vibraciones mecánicas.  68

Tabla 21: Condiciones para la toma de señales	. 68
Tabla 22: Nomenclatura en rodamientos	. 69
Tabla 23: Características generales para la toma de señales de vibración.	. 71
Tabla 24: Pruebas realizadas en la caja de engranajes en dos etapas	77
Tabla 25: Pruebas realizadas en la caja de engranajes en una sola etapa	.77

### **1** INTRODUCCIÓN A LAS VIBRACIONES MECÁNICAS

En este capítulo se presenta una introducción a las vibraciones mecánicas, se describe la importancia del mantenimiento predictivo en las maquinarias mediante control de vibraciones; también se presenta conceptos generales sobre el fenómeno de vibración.

### 1.1 Mantenimiento predictivo

El propósito del mantenimiento predictivo es evaluar constantemente la condición de la máquina, mediante ciertos indicadores que ésta emite al exterior y donde mediante el control de vibraciones y ondas de refuerzo se pueda determinar si es o no necesario aplicar medidas correctivas en la maquinaria [1].

Este tipo de mantenimiento es mucho más eficiente comparándolos con mantenimientos como el preventivo, funcionar hasta fallar, entre otros.

Este mantenimiento permite tener el control sobre las máquinas y sus programas de mantenimiento y no que las máquinas controlen estos procesos, por tal motivo conocer el estado general de la maquinaria en cualquier momento es lo que busca el mantenimiento predictivo [2].

#### 1.1.1 Objetivos del mantenimiento predictivo

Los objetivos principales del mantenimiento predictivo son:

- Monitoreo de maquinas
- Diagnóstico de fallos
- Estimación de la vida útil

#### Monitoreo de máquinas

Es de gran importancia revisar periódicamente las señales externas que el equipo emite con las técnicas que se hayan escogido, con las características idóneas que permitan determinar que algo anormal está sucediendo en la máquina.

Para el monitoreo de máquinas es imprescindible analizar la condición mecánica de los equipos y los síntomas que acusarán un fallo en el mismo, ya que se producirá cambios en la condición de este.

El fallo se puede producir por causas como problemas mecánicos, eléctricos, etc. Las técnicas utilizadas para analizar estos problemas en las maquinarias son los mostrados en la Tabla 1.

Técnica de análisis	Aplicación
Análisis periódico de vibraciones	Todos los equipos rotatorios de planta
Análisis de vibraciones en tiempo real	Equipos críticos y estratégicos de planta
Análisis de aceites	Equipos críticos y de baja velocidad
Termografías	Aislamientos térmicos
Análisis espectral de corriente eléctrica	Motores eléctricos
Pulsos de eco ultrasónicos	Espesores de estanques y cañerías
Sonido ambiental(ultrasonido)	Detección de fugas de fluidos de proceso
	(vapor, vacio, etc.)

	Tabla 1:	Técnicas	de	análisis.	Fuente :	[3].
--	----------	----------	----	-----------	----------	------

Es importante considerar que no se busca hacer un diagnóstico inmediato pues es necesario tener los parámetros fundamentales y a partir de estos conocer si la máquina está funcionando en buenas o malas condiciones.

Para determinar la frecuencia de monitoreo en las diferentes máquinas, se debe clasificar cada equipo de acuerdo a su importancia, de la siguiente manera.

- Equipos críticos: Se deben monitorear periódicamente con mayor frecuencia que a equipos normales
- Equipos estratégicos: Se monitorean por un sistema de análisis en tiempo real
- **Equipos normales:** Se monitorean mensualmente y solo en casos específicos se recurre a otra frecuencia de monitoreo
- **Equipos de bajo impacto:** Se aplica el mantenimiento reactivo, es decir se cambian las piezas cuando estas hayan dejado de funcionar [3].

#### Diagnóstico de fallos

La amplitud de las vibraciones que se toman en las máquinas analizadas, corresponden a la severidad del fallo generado. Algunas veces las fuentes que generan vibraciones excitan la frecuencia natural del sistema y no cambian con la variación de la velocidad. [4]

Resulta esencial que los sistemas de monitoreo presenten filtros de manera que se pueda recibir la señal lo más pura posible sin presencia de ruido externo.

#### Estimación de la vida útil

Lo que se pretende con el mantenimiento predictivo es alargar la vida útil de la maquinaria y que esta no se vea disminuida por factores que pueden ser corregidos de manera temprana sin llegar a una parada completa de la planta [3].

El pronóstico de vida útil de los elementos de una maquina requieren de una gran experiencia del analista además de utilizar en forma correcta las técnicas de diagnóstico.

Entre estos conocimientos tenemos:

- **Próximo paro programado de la máquina**: Tener en cuenta el próximo paro programado de la máquina, ayudara a tener un tiempo de referencia para conocer si la máquina o los elementos de esta llegaran en buenas condiciones hasta esa fecha
- **Disponibilidad de los repuestos en bodega**: Conocer el fallo en forma temprana permite tener disponible lo más pronto posible en bodega los repuestos necesarios para que la máquina siga funcionando en forma correcta [1].

### 1.2 Vibración

"Se considera vibración a la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es la a la que llegara cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Este tipo de vibración se llama de cuerpo entero, lo que quiere decir que todas las partes del cuerpo se mueven juntas en la misma dirección en cualquier momento" [2].

Para que se produzca vibración en un objeto debe existir una fuerza de excitación la misma que puede aplicarse externamente al objeto o puede empezar dentro del mismo.

A continuación se enumera los tres tipos de vibración [3].

• Vibración libre

- Vibración forzada
- Vibración compuesta

#### 1.2.1 Señales vibratorias

La característica principal en una señal de vibración en el dominio del tiempo son las ondas sinusoidales. Estas ondas representan las oscilaciones puras y presentan amplitud y fase.

#### Amplitud

La amplitud enfocada desde las vibraciones es la cantidad de movimiento de una masa partiendo desde una posición neutral, como se muestra en la Figura 1.



Figura 1: Formas de medir la amplitud vibratoria. Fuente: [3].

#### Fase

Fase es la medida de tiempo entre la separación de dos señales vibratorias, esta puede ser relativa o absoluta. La figura 2 presenta dos señales sinusoidales de igual amplitud y periodo separadas 90 grados, es decir presentan un desfase de 90 grados.



Figura 2: Señales sinusoidales separadas 90 °. Fuente: [3].

#### 1.2.2 Vibraciones mecánicas

Se define a la vibración mecánica como el movimiento oscilatorio de una máquina, de una estructura o de una parte de ella, alrededor de su posición de reposo original.

Las características de la onda frecuencia, amplitud y fase que se produce por vibración se expresan en la siguiente ecuación.

 $D(t) = D_{\circ}Sen(2\pi f \cdot t + \phi); \quad (1.1)$ 

Donde  $D_0$  = desplazamiento máximo o desplazamiento pico; f =frecuencia;  $\phi$  =fase ; t=tiempo

Esta onda es medida a través de un transductor o sensor de vibraciones. La Figura 3 presenta la relación entra la velocidad aceleración y desplazamiento [1].



Figura 3: Relación entre velocidad aceleración y desplazamiento. Fuente: [1].

#### 1.2.3 Adquisición de datos

Un análisis correcto debe tener el respaldo de una adquisición de datos segura, la misma que se realiza por el recolector y analizador que toma muestras a tiempo real durante un intervalo dado y las registra en el computador o en la pantalla del instrumento utilizado.

Este análisis se realiza mediante la descomposición espectral basada en el algoritmo FFT.

#### Formas de la transformada de Fourier

Las cuatro formas de la transformada de Fourier son las siguientes:

- La serie de Fourier: transforma una señal infinita periódica en un espectro de frecuencia infinito discrecional.
- La transformada integral de Fourier: transforma una señal continua de tiempo infinito en un espectro de frecuencias continuo infinito
- La transformada discrecional de Fourier: (TDF) transforma una señal discrecional periódica de tiempo en un espectro de frecuencias discrecional periódico
- La transformada rápida de Fourier: un algoritmo de computadora para calcular la TDF

#### - La serie de Fourier

La serie de Fourier se basa en una señal de tiempo que es periódica, es decir una señal de tiempo en la que su forma se repite en una cantidad infinita de veces. Fourier demostró este tipo de señales equivale a una colección de funciones senos y cosenos cuyas frecuencias son múltiplos del reciproco del periodo de la señal de tiempo.

Cualquier forma de onda, siempre que no sea infinita en longitud se puede representar como la suma de una serie de armónicos en la que su frecuencia fundamental es 1 entre la longitud de la forma de onda.

Los coeficientes de Fourier son las amplitudes de los varios armónicos, y sus valores pueden ser calculados fácilmente si se conoce la ecuación para la forma de onda.

#### - Los coeficientes de Fourier

Una transformada matemática del dominio de tiempo hacia el dominio de frecuencia permite definir los coeficientes de Fourier.

Es posible transformar del dominio de frecuencia y regresar hacia el dominio de tiempo sin que se pierda la información.

#### - La transformada integral de Fourier

La transformada integral de Fourier permite transformar cualquier señal continua de tiempo de forma arbitraria en un espectro continuo con una extensión de frecuencias infinita.

Una característica de la transformada de Fourier es el hecho que en un evento que abarca un periodo de tiempo corto se extenderá sobre un largo rango de frecuencias y viceversa.

#### - La transformada discrecional de Fourier

La transformada discrecional de Fourier (TDF) fue desarrollada para realizar cálculos fácilmente en computadoras digitales.

La TDF opera con una señal de muestras discreta en el dominio del tiempo y a partir de esta se genera un espectro discreto en el dominio de la frecuencia.

El espectro que da como resultado es una aproximación de la serie de Fourier ya que se perdió la información entre las muestras de la forma de onda. Lo importante de la TDF es la existencia de una forma de onda de la que se tomaron muestras, esto es la posibilidad de representar la forma de onda en una serie de números para generar esta serie de números desde una señal análoga se requiere un procedimiento de muestreo y una conversión de análogo a digital.

Si la proporción de muestreo es alta como para asegurar una representación razonable de la forma de la señal, la TDF produce un espectro bastante similar al verdadero.

#### - La transformada rápida de Fourier

La transformada rápida de Fourier (TRF) es un algoritmo para calcular la TDF de manera rápida y eficaz. La TRF permite adaptar la TDF para el uso con computadoras digitales.

El rango de frecuencias que cubre la TRF va a depender de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo [2].

#### 1.2.4 Procesamiento digital de señales de vibración

El procesamiento digital de señales de vibración en el diagnostico de fallos se aborda a través de dos contextos:

- Análisis tradicional
- Análisis académico e investigativo

#### Análisis tradicional

Este análisis básicamente está sujeto al conocimiento del especialista que va a interpretar las señales de vibración obtenidas, así como la agudeza de los sentidos(oído, tacto, visión) que este posea cuando se encuentre en contacto con la maquina, puesto que la maquina manifiesta síntomas de su estado.

El análisis tradicional se basa en el análisis de la señal en el dominio del tiempo y la frecuencia, siendo la frecuencia el punto más relevante, debido a la naturaleza de la señal.

Este análisis es muy utilizado y a dado excelentes resultados, pero está sujeto a algunas restricciones como por ejemplo la maquina debe estar operando en condiciones máximas de trabajo y la velocidad de giro debe ser constante, a más de tener un conocimiento de los mecanismos que contienen la máquina.

Para obtener el espectro de la señal de vibración, se emplea la FFT. A partir del espectro de vibración el especialista tiene que observar los picos correspondientes a la velocidad de giro y sus armónicos, para así determinar el estado de la maquina, basándose en la amplitud, comparándolo con registros anteriores de la maquina en buen estado.

#### Análisis académico e investigativo

Este análisis comprende el reconocimiento y clasificación de patrones en las señales de vibración, este proceso es dividido en varias etapas de acuerdo a la teoría de aprendizaje de la maquina.

Estas etapas son:

- Espacio de representación
- Estimación de características
- Extracción de características relevantes
- Clasificación de señales

#### - Espacio de representación

El espacio de representación corresponde a un espacio transformado es decir, la señal en el dominio del tiempo es una señal cruda en la que se encuentra concentrado todo el aporte de vibración que ofrece cada mecanismo presente en la maquina.

El espacio de representación que se utiliza es el dominio de la frecuencia, donde se puede observar la influencia de cada fallo como una componente individual ligada a una amplitud especifica.

#### - Estimación de características

La estimación de características no es más que el cálculo de características que permitan diferenciar los posibles fallos que se presentan en la maquina, es decir que faciliten el proceso de clasificación, este proceso permite obtener un conjunto de características que ayudan a la interpretación de señales y mejoran el rendimiento de clasificación, pues reducen la dimensión del espacio de características, disminuyendo el costo computacional.

#### - Extracción de características relevantes

La extracción de características es un complemento a la estimación de características, pues mediante un análisis estadístico se reduce el conjunto de características para así optimizar el proceso de clasificación en tiempo y precisión, donde es indispensable eliminar todas aquellas características que sean redundantes e irrelevantes.

#### - Clasificación de señales

La clasificación de señales es aquella mediante la cual, un índice de rendimiento determina la capacidad de generalización y la efectividad para discriminar tipos de fallos, partiendo de un conjunto de características reducido que contenga la mayor cantidad de información del proceso [5].

#### 1.2.5 Unidades de vibración

Las unidades de vibración velocidad, aceleración y desplazamiento, cumplen una parte muy importante en la visualización del espectro vibratorio.

La velocidad generalmente se mide en pulgadas por segundo, también se suele ocupar el m por segundo aunque lo más usado es el valor pico.

La aceleración se mide generalmente en Gs. 1 G es la aceleración debida a la gravedad en la superficie de la tierra .El G no es una unidad de aceleración es una cantidad de aceleración a la que estamos sometidos como habitantes de la tierra.

La aceleración también se mide en pulgadas por segundo cuadrado o metros por segundo cuadrado.

### 1.3 Análisis vibratorio

El análisis de vibraciones ha sido estudiado por diferentes investigadores en varios aspectos tales como:

- Análisis de vibraciones según los tipos de fallos a analizar: Pues el análisis está enfocado a detección de fallos en particular como fallos en el eje, rodamientos o en ruedas dentadas y no se considera la maquina en su totalidad
- Análisis de vibraciones de acuerdo a la concepción del funcionamiento: Puede ser velocidad constante o condiciones de carga y velocidad variable [5].

El inicio de un diagnóstico de fallo en máquinas rotatorias es el análisis de frecuencia o espectral de vibraciones que son medidas en diferentes puntos de la maquina o equipo. Esta técnica se sustenta en descomponer la señal en el dominio del tiempo, la cual es captada por un transductor, en componentes espectrales o de frecuencia [1].

El análisis de vibración moderno permite seguir cambios de comportamiento durante condiciones de operación y carga variable, pero los transductores son susceptibles al ruido, por lo que es necesario aplicar filtros en el analizador de vibraciones para obtener una señal más limpia.

El análisis de vibraciones es un método en constante desarrollo, el cual cada vez aporta mayor información al técnico encargado del mantenimiento de la planta industrial sin la necesidad que éste tenga una gran experiencia en este campo. Un diagnóstico acertado en el fallo está relacionado en forma directa con la experiencia del técnico en el análisis del espectro obtenido, pero un error en esta interpretación puede llevar a cambios en las piezas equivocadas [5].

#### 1.3.1 Composición del espectro vibratorio

La Figura 4 presenta las componentes de un espectro vibratorio, las cuales son indispensable conocerlas para poder establecer un diagnostico sobre la condición mecánica de un equipo.



Figura 4: Componentes de un espectro vibratorio. Fuente: [3].

Para analizar correctamente un espectro vibratorio se debe seguir los siguientes pasos:

- 1. Relacionar en forma correcta la frecuencia de las vibraciones con la velocidad de rotación de la máquina
- 2. Determinar para cada componente de frecuencia vibratoria las causas que la generan estas pueden ser:

- Vibraciones propias al funcionamiento de la máquina: Componentes a la frecuencia de engrane en reductores (fe=numero de dientes x RPM) etc.
- Vibraciones generadas por condiciones inapropiadas: Bombas centrífugas que trabajan a bajo flujo
- Vibraciones generadas por fallos en la maquina: Desalineamiento, soltura, entre otras.

Tener la referencia del espectro base es decir el espectro tomado en buenas condiciones de funcionamiento permitirá compararlo con el espectro medido y así facilitar el análisis y diagnostico de fallos.

En un espectro se debe buscar lo siguiente:

- Componentes a la velocidad de rotación de la máquina
- Armónicos de la velocidad de rotación
- Todas las frecuencias más bajas de la velocidad de rotación. En esta se debe distinguir si son subarmónicos o subsincrónicos(0.48x 0.5x)
- Identificación de bandas laterales
- Vibraciones de banda ancha [3]

#### 1.3.2 Técnicas de análisis de vibraciones

Existen 5 técnicas de análisis de vibraciones que van a ser enfocadas de manera general en este trabajo. Estas técnicas son las siguientes:

- Análisis frecuencial
- Análisis de forma de onda
- Análisis de la fase de las vibraciones
- Análisis de orbitas y posición del eje en el descanso
- Análisis de vibración durante partidas y paradas

#### Análisis frecuencial

La función principal de este análisis es relacionar la frecuencia de las vibraciones con la velocidad de rotación en la maquina, determinando las causas que las generan, las mismas que pueden ser:

- Vibraciones propias de funcionamiento de la máquina
- Vibraciones provocadas por condiciones inapropiadas de la máquina
- Vibraciones emitidas por otras máquinas
- Vibraciones generadas por fallos de la máquina

La Figura 5 muestra el espectro con altas vibraciones y la Figura 6 muestra el mismo espectro luego de lubricar los descansos.



Figura 5: Espectro con vibraciones altas. Fuente: [3].



Figura 6: Mismo espectro anterior luego de lubricar los descansos. Fuente: [3].

Como se puede apreciar en la Figura 6 se disminuyó mucho las vibraciones luego de lubricar los descansos, comparándola con la Figura 5en la que no aplico lubricación alguna en los descansos [3].

#### Análisis de forma de onda

Diferentes formas de onda en el tiempo presentan el mismo espectro de frecuencias, con lo que es necesario volver a la forma de onda recolectada para analizar algunos parámetros que nos ayuden a diferenciar de entre algunos fallos lo siguiente:

- **Periocidades**: Diferencias entre desalineamiento con solturas, diferenciar componentes que parecen ser armónicos y no lo son
- Impactos(Spikes de energía): Engranaje desastillado
- **Discontinuidades**: Lapso de velocidad vibratoria constante
- **Transcientes**: Vibraciones generadas en partidas o frecuencias naturales generadas por impactos
- **Truncasión o restricciones**: Saturación del analizador o restricciones de movimiento del rotor
- Vibraciones de baja frecuencia: No son analizadas por el recolector, son observables en la forma de onda [3]

#### Análisis de la fase de las vibraciones

Este análisis se utiliza para distinguir problemas a 1x, es decir este análisis mide la fase que existe entre el punto de referencia y el sensor, pero solo para la velocidad de giro, muchas veces esto se desconoce y se piensa que la fase corresponde a la vibración total medida en un punto.

- **Desbalanceamiento**: Se presenta una diferencia de 90° o 270° entre vibraciones horizontales y verticales en un mismo descanso, igual diferencia de fase entre vibración horizontal y vertical en ambos descansos
- Eje doblado: Fases diferentes en distintos puntos de la cara del descanso
- **Resonancia**: cambio brusco al variar ligeramente la velocidad
- **Polea excéntrica**: diferencia de fase entre vibración horizontal vertical o a 180° en descansos de polea [3]

#### Análisis de orbitas y posición del eje en el descanso

Este análisis es más utilizado cuando la medición se hace directamente sobre el eje (descansos hidrodinámicos) y esta información es más completa que aquella que se logra obtener con acelerómetros adheridos magnéticamente a la carcasa del equipo.

Para esto se utilizan dos transductores montados a  $90^{\circ}$  y un tercer sensor que genera el punto de referencia con la rotación del eje.

Se presentan dos componentes de la vibración medida.

- 1. Componente continua ,posición media del muñón al alojamiento
- 2. Componente variable, entrega la vibración del muñón al descanso
  - Análisis de la posición radial del eje en el descanso
  - Se requiere conocer la posición del eje cuando está detenido
  - Las mediciones son referidas a esta posición
  - Se aplica para: Determinar la posición y espesor mínimo de la película, dirección de cargas adicionales(desalineamiento),determinar excesivo juego o desgaste de descansos [3]

#### Análisis de vibraciones durante partidas y paradas

Este análisis consiste en obtener gráficos de amplitud y de fase en función de la velocidad de rotación. Deben estar presentes los siguientes puntos:

- Frecuencia natural: Es la frecuencia a la que el sistema vibra libremente
- **Resonancia**: Frecuencia de las fuerzas dinámicas
- Velocidad critica: Velocidades de giro de rotor a los cuales se produce picos de amplitud
- Una resonancia sin picos de amplitud puede deberse a: Fuerza excitadora resonante pequeña, sistema fuertemente amortiguado [3]

# 2 CONFIGURACIÓN DE LOS SISTEMAS MECÁNICOS PARA SIMULAR LOS FALLOS DE ENGRANAJES RECTOS Y RODAMIENTOS EN LA CAJA DE ENGRANAJES

En este capítulo se presenta el montaje de las ruedas dentadas rectas y rodamientos dentro de la caja de engranajes. Posteriormente se describen los fallos seleccionados y las dimensiones establecidas para su construcción en cada uno de los elementos. El número de combinaciones de fallos posibles dentro de la caja de engranajes se abordara en este capítulo.

### 2.1 Disposición de fallos en engranajes

Conocer los fallos comunes en las ruedas dentadas, permite un mejor criterio de selección, de aquellos que se toman en consideración para su análisis en el banco de vibraciones mecánicas. En la Figura 7 se observa la distribución de las ruedas dentadas en la caja de engranajes.



Figura 7: Distribución de engranajes en la caja de elementos dentados.

La caja de engranajes cuenta con cuatro ruedas dentadas (Z1-Z2-Z3-Z4), con las características presentadas en la Tabla 2.

Descripción	Modulo	Numero de dientes	Φ de presión
Rueda dentada (Z1)	2	27	20
Rueda Dentada (Z2)	2	53	20
Rueda dentada (Z3)	2	53	20
Rueda Dentada (Z4)	2	80	20

Tabla 2: Datos del piñón y rueda dentada. Fuente: [6].

#### 2.1.1 Fallos en los engranajes

En los engranajes los fallos se producen a causa de:

- Construcción inadecuada de las ruedas dentadas
- Rectificado incorrecto de las ruedas dentadas
- Tratamiento térmico imperfecto en los dientes de las ruedas dentadas

Según AGMA las ruedas dentadas deben ser correctamente rectificadas para que tengan un amplio periodo de vida útil.

Los fallos en las ruedas dentadas muchas de las veces empiezan por fallos en los rodamientos [7].

En la Figura 8 se presenta los principales fallos en ruedas dentadas.



Figura 8: Tipos de fallos en ruedas dentadas. Fuente: [7].

#### Fatiga superficial

La fatiga superficial básicamente se presenta como remoción de metal con lo que se forma cavidades. Se procede a analizar en este fallo la picadura en los dientes de la rueda dentada, la cual empieza en los pies de los mismos cerca de la línea de paso, esta puede ser inicial Figura 9a o progresiva Figura9b.

Esta picadura puede ser pequeña (0.38-0.76 mm)de profundidad o grandes (2-5 mm)de profundidad [8].



(a)

(b)



#### Fallo por desgaste

Los efectos de desgaste normalmente tardan años en desarrollarse como para que se tomen como condición de gran preocupación.

Como se presenta en la Figura 10 el desgaste de vez en cuando se produce muy rápidamente [10].



Figura 10: Desgaste. Fuente: [9].

Este es un fenómeno de superficies de metal, por el cual se elimina o desgasta uniformemente a partir de las superficies en contacto de la rueda dentada. En este caso el pulido muchas veces resulta como un tipo de desgaste por lo que las asperezas superficiales de rugosidad de las superficies de contacto se reducen y las superficies se vuelven lisas como un espejo.

El desgaste se produce cerca de la punta y raíz del diente siendo casi inexistente en la línea de paso de deslizamiento.

Un desgaste excesivo es una progresión del desgaste moderado, este desgaste se presenta con gran pérdida de parte del diente de la rueda dentada, como se presenta en la Figura 11 [8].



Figura 11: Desgaste Excesivo. Fuente: [8].

La abrasión es un desgaste causado por partículas con dureza cerca de o superior a la dureza de la rueda dentada las cuales se suspenden en la película de aceite, estas partículas deben ser más grandes en diámetro que la partícula de aceite.

La abrasión se muestra como pequeñas ranuras que están tallados hacia afuera desde el eje de la rueda dentada, como se presenta en la Figura 12 [8].


Figura 12: Desgaste Abrasivo. Fuente: [8].

#### Rotura de dientes

La rotura de dientes consiste en una fractura total del diente o de una parte considerable de este, motivada por tensiones cíclicas que exceden el límite de resistencia del material, como se presenta en la Figura 13.

Esta rotura inicia con una grieta en la raíz del diente y progresa hasta que el diente se rompe, esto se produce por concentraciones de tensión tales como escalones o entalladuras en la raíz del diente, pequeñas grietas o inclusiones no metálicas, grietas producidas por el tratamiento térmico, desgarraduras o huellas dejadas por las herramientas de corte, estas causas pueden condicionar en la aparición de la rotura de dientes [9].



Figura 13: Rotura de diente. Fuente: [9].

#### Rayado y escoriado

Se presenta como rayas y pequeñas zonas de atascamiento en la superficie del diente, como se presenta en la Figura 14, estas rayas se deben a la fricción entre los puntos altos de las superficies en los dientes de las ruedas dentadas, pues en estos puntos se crean elevadas temperaturas con lo que se evita la formación de la película de aceite en esta zona. En el contacto metal-metal los puntos en relieve se desgastan distribuyéndose más uniformemente la carga en la superficie de los dientes.



Figura 14: Escoriado. Fuente: [7].

En la Figura 15, se presenta escoriado destructivo el que consta de rayas radiales definidas y marcas de desgarramiento en la dirección de deslizamiento. También se visualiza remoción de material arriba y abajo de la línea de paso la cual se nota muy pronunciada [7].



Figura 15: Escoriado Destructivo. Fuente: [7].

# 2.1.2 Selección y construcción de los fallos

Con la información antes mencionada se presenta la selección y disposición de fallos para simular en el banco de vibraciones, como se presenta en la Figura 16.



#### Figura 16: Fallos seleccionados para análisis

#### Fatiga superficial

Para fatiga superficial se construye el fallo correspondiente a picadura, el que se presenta como un agujero con diámetro y profundidad, ó también se presenta como una ranura con longitud, ancho y profundidad. La Tabla 3 presenta una serie de experimentaciones realizadas por otras instituciones.

Referencia	Tipo de fallo	Dimensiones y características
[11]	Picadura	<ul><li>Diámetro: 0.7mm</li><li>Profundidad: 0.1mm</li></ul>
[12]	Picaduras severa Picadura moderada	<ul> <li>3 líneas separadas 1cm a lo largo del diente ,con:</li> <li>Longitud: 5mm</li> <li>Ancho:3mm</li> <li>Profundidad:2mm</li> <li>12 líneas separadas 3mm a lo largo del diente ,con:</li> <li>Longitud: 5mm</li> <li>Ancho:3mm</li> <li>Profundidad:4mm</li> <li>8 líneas juntas de 2 en 2 separadas 1cmcada par a lo largo del</li> </ul>

	Picadura severa	diente ,con: • Longitud: 5mm • Ancho:3mm • Profundidad:2mm
[13]	Picadura severa	Longitud continua de 2.5 mm a lo largo del área de contacto de un diente
[14]	Picaduras severa	<ul> <li>En el primer diente una picadura centrada, en el segundo diente tres picaduras juntas y centradas ,en el cuarto diente una picadura en el centro del mismo con dimensiones de:</li> <li>Diámetro: 2 mm</li> <li>Profundidad: 0.5mm</li> </ul>
	Picadura media	<ul> <li>En el primer diente tres picaduras juntas centradas ,en el segundo diente 10 picaduras centradas en dos filas 5 picaduras, el tercer diente tres picaduras centradas juntas y en el cuarto diente una sola picadura centrada, con dimensiones de:</li> <li>Diámetro: 2 mm</li> </ul>
	Picadura Severa	<ul> <li>Profundidad: 0.5mm</li> <li>En el primer diente cinco picaduras juntas centradas ,en el segundo diente dos filas de picaduras a lo largo de toda la longitud del diente, el tercer diente dos filas centradas de cinco picaduras cada y en el cuarto diente tres picaduras juntas y centradas, con dimensiones de:         <ul> <li>Diámetro: 2 mm</li> <li>Profundidad: 0.5mm</li> </ul> </li> </ul>
[15]	Picadura	<ul> <li>Profundidad 0.025mm</li> <li>Ancho: 0.25mm</li> <li>Largo: 0.050mm</li> </ul>
[16]	Picadura	<ul> <li>25% del área de la cara del diente</li> <li>50% del área de la cara del diente</li> <li>Profundidad 1mm</li> </ul>
[17]	Picadura	<ul> <li>Varias picaduras a través de todo el ancho de la cara del diente con las siguientes dimensiones:</li> <li>Diámetro: 5mm</li> <li>Profundidad: 2mm</li> </ul>
[18]	Picadura	<ul> <li>Una picadura de:</li> <li>Profundidad: 8mm</li> <li>Con un diámetro que abarque el 50% del ancho de la cara del diente</li> </ul>
[19]	Picadura	Una picadura de: • Longitud:5mm • Ancho: 3mm

		Profundidad:2mm
[20]	Picadura	Una picadura de:
		Longitud: 8mm
		• Ancho: 5mm
		Profundidad :3mm
[21]	Picadura	1 picadura en el diente de:
		• Diámetro:2mm
		Profundidad: 1mm
[22]	Picadura	7 picaduras centradas a lo ancho de la cara del diente con las
		siguientes dimensiones:
		• Diámetro: 4mm
		Profundidad: 2mm

La construcción de picadura en la rueda dentada para el banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana tiene las siguientes características:

- 0.050 mm de profundidad
- 0.5 mm de ancho
- 0.050mm de largo

En la Figura 17se aprecia el fallo a detalle.



Figura 17: Ancho de picadura. Fuente: [15].

En el Anexo A.1 se presenta el plano para la construcción del fallo de picadura.

# Fallo por desgaste

La Tabla 4 presenta diferentes experimentaciones realizadas por otras instituciones con desgaste en engranajes.

Referencia	Tipo de fallo	Dimensiones
[23]	Desgaste de un diente	• Desgaste del 20% del ancho del diente
[24]	Desgaste de dos dientes	<ul> <li>Ancho:5mm</li> <li>Largo: Longitud de todo el diente</li> <li>Profundidad: 2mm</li> </ul>
[25]	Desgaste de un diente	<ul> <li>Líneas juntas con una profundidad de 0.5mm en la totalidad de la cara del diente</li> <li>0.5mm de ancho</li> <li>0.25mm de separación entre cada línea</li> </ul>
[26]	Desgaste en un diente	<ul> <li>Profundidad de 1mm</li> <li>A lo ancho de la cara de incidencia de un solo diente</li> </ul>
[27]	Desgaste en un diente	Desgaste en la cresta del diente con las siguientes dimensiones: • Todo el ancho del diente Profundidades de: • 0.75mm • 1.5mm • 2mm
[28]	Desgaste en un diente	<ul> <li>85% de desgaste en el ancho de la cara del diente</li> <li>Profundidad :1mm</li> </ul>
[29]	Desgaste en un diente	<ul> <li>40% de desgaste a través del ancho del diente</li> <li>Profundidad de 1mm</li> </ul>
[30]	Desgaste en un diente	<ul> <li>Desgaste en la cresta del diente con dimensiones de:</li> <li>Ancho: 8mm</li> <li>Profundidad 0.5mm</li> <li>Espesor:50%</li> </ul>

Tabla 4: Pruebas de desgaste para engranajes.

La construcción de desgaste en la rueda dentada para el banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana tiene las siguientes características:

- Líneas juntas con una profundidad de 0.40mm en la totalidad de la cara del diente
- 0.7mm de ancho
- 0.30mm de separación entre cada línea

Nótese en la Figura 18 no se aprecian las líneas de desgaste, lo cual representa un desgaste abrasivo con líneas demasiado juntas por lo avanzado que se presenta el fallo.



Figura 18: Desgaste Abrasivo. Fuente: [25].

En el Anexo A.2 se presenta el plano para la construcción del fallo de desgaste.

#### Rotura de dientes

Este fallo se debe tomar muy en cuenta pues es el más peligroso y uno de los principales conductores a producir daños irreversibles en la maquinaria. La Tabla 5 presenta experimentaciones realizadas por otras instituciones con grieta y rotura de dientes en las ruedas dentadas.

Referencia	Tipo de fallo	Dimensiones
[31]	Rotura de diente	• 10%,20%,30%,40%,50% del ancho del diente
[32]	Grieta para rotura de diente	<ul> <li>Longitud: 2mm</li> <li>Ancho: 0.1mm</li> <li>Profundidad: 1mm</li> </ul>
[33]	Rotura de diente	• Diente Roto.100%

Tabla 5: Pruebas de fatiga para engranajes.

[34]	Rotura de diente	<ul> <li>Pruebas hasta 7 dientes rotos</li> <li>Pruebas con dos dientes rotos 50%</li> </ul>
[35]	Rotura de diente	Rotura de 8 de los 35 dientes de un engrane
[25]	Grieta en el diente	<ul> <li>Longitud: 20mm</li> <li>Ancho: 0.5mm</li> <li>Profundidad: 0.8mm</li> </ul>
[26]	Rotura de diente	Rotura completa de un solo diente de la rueda dentada
[36]	Rotura de diente	Rotura de secciones completas de un diente a:• 2mm del ancho del diente• 4mm del ancho del diente• 6mm del ancho del diente• 9mm del ancho del diente
[37]	Grieta en el diente	<ul> <li>Longitud: 10mm</li> <li>Ancho 4mm</li> <li>Profundidad 2mm</li> </ul>
[38]	Rotura del diente	Rotura de secciones completas de un diente a:• 1mm del ancho del diente• 2mm del ancho del diente• 3mm del ancho del diente• Rotura completa del diente
[27]	Grieta en el diente	Grieta en la base del diente en todo el ancho del mismo a: Profundidad: 1mm Ancho: 0.5mm Grieta en la base del diente en todo el ancho del mismo a: Profundidad: 3mm Ancho: 0.5mm

La rotura de diente empieza con una grieta en la raíz del mismo como se presenta en la Figura 19, o en la zona que existe mayor cantidad de esfuerzo, esta grieta se propaga y se produce la rotura del diente en su totalidad o en un porcentaje del mismo dependiendo la forma que vaya tomando la grieta según la concentración de esfuerzos.[15]

La construcción de grieta del diente tiene las siguientes características:

- Longitud de grieta de 4mm
- Angulo de la grieta de 45 grados
- Profundidad de 25% del ancho de la cara del diente



Figura 19: Grieta en el diente de una rueda dentada. Fuente: [15].

En el Anexo A.3 se presenta el plano para la construcción del fallo de rotura de diente.

Generalmente si la grieta inicia en la raíz del diente suele darse rotura completa del diente como se presenta en la Figura 20 [15].



Figura 20: Rotura completa de diente en una rueda dentada. Fuente: [15].

Si la profundidad de la grieta está en un 25% o 50% se puede producir la rotura del diente.

# Rayado y escoriado

Se realiza un escoriado destructivo el cual se puede presentar en varios porcentajes de daño. La Tabla 6 presenta diferentes experimentaciones realizadas por otras instituciones con escoriado en ruedas dentadas.

Referencia	Tipo de fallo	Dimensiones
[39]	Escoriado	Ancho:0.010mm
		Profundidad:0.003mm
		Longitud:0.02mm-0.10mm
[40]	Escoriado	Ancho:4.6mm
		Profundidad:1mm
		Longitud:0.9mm

**Tabla 6:** Pruebas de escoriado para engranajes.

[41]	Escoriado 50%	<ul> <li>0,5 mm a lo largo del perfil de diente.</li> <li>6,25 mm a través de la cara del diente</li> <li>Profundidad de 0,5 mm</li> </ul>
	Escoriado 100%	<ul> <li>1,5 mm a lo largo del perfil de diente.(ancho del escoriado)</li> <li>25 mm a través de la cara del diente.(o a la totalidad del diente)</li> <li>Profundidad de 0,01 mm</li> </ul>
[42]	Escoriado	Escoriado en un diente con las siguientes dimensiones: • Longitud: todo el diente • Ancho: Mitad del diente • Profundiad:2mm
[43]	Escoriado	Una ranura en la base del diente a través de todo el ancho del diente con las siguientes dimensiones: • Ancho:0.15-0.25 • Profundidad:0.1-0.3mm
[22]	Escoriado	Escoriado en la cara de un diente con las siguientes dimensiones: • Longitud:11 mm • Ancho:4mm • Profundidad:1mm
[44]	Escoriado	Escoriado en la cara de un diente con las siguientes dimensiones: • Longitud:4mm • Ancho:3mm • Profundiad:0.05mm
[45]	Escoriado	Escoriado de un diente en forma perpendicular del mismo con las siguientes dimensiones. • Longitud: 6mm • Ancho:2mm • Profundidad 1mm

La construcción de escoriado para la rueda dentada tiene las siguientes características:

Escoriado destructivo 25% como se presenta en la Figura 21 con las siguientes características:

- 0,7 mm a lo largo del perfil del diente
- 8 mm a través de la cara del diente
- Profundidad de 0,5 mm



Figura 21: Escoriado 25%. Fuente: [41].

En el Anexo A.4 se presenta el plano para la construcción del fallo de escoriado al 25%.

Escoriado destructivo 100% como se muestra en la Figura 22 con las siguientes características.

- 1 mm a lo largo del perfil de diente (ancho del escoriado)
- 25 mm a través de la cara del diente (o a la totalidad del diente)
- Profundidad de 0,05 mm



Figura 22: Escoriado 100%. Fuente: [41].

En el Anexo A.5 se presenta el plano para la construcción del fallo de escoriado al 100%.

#### 2.1.3 Combinaciones de fallos de ruedas dentadas en la caja de engranajes

El tipo de fallo y su numeración es el parámetro necesario para establecer las combinaciones posibles en las cuatro ruedas dentadas. Estos parámetros se aprecian en la Tabla 7.

Numeración	Tipo de fallo
1	Sin fallo
2	Fallos por
	desgaste
3	Rayado y
	escoriado
4	Fatiga Superficial
5	Rotura de diente

Tabla 7: Tipo de fallo y numeración.

Con estos dos parámetros establecidos se procede a utilizar la siguiente programación:

#### • unique(nchoosek(repmat(1:n,1,K),K),'rows');

La que acompañada del comando general repmat permite sacar las combinaciones deseadas. En este caso proporciono un total de 1926 combinaciones, la Figura 23presenta una parte de las combinaciones de engranajes.

Combinaciones en Fallas de los engranajes				
	Z1	Z2	Z3	Z4
combinacion 1	1	1	1	1
combinacion 2	1	1	1	2
combinacion 3	1	1	1	3
combinacion 4	1	1	1	4
combinacion 5	1	1	1	5
combinacion 6	1	1	2	1
combinacion 7	1	1	2	2
combinacion 8	1	1	2	3
combinacion 9	1	1	2	4
combinacion 10	1	1	2	5
combinacion 11	1	1	3	1
combinacion 12	1	1	3	2
combinacion 13	1	1	3	3
combinacion 14	1	1	3	4
combinacion 15	1	1	3	5
combinacion 16	1	1	4	1
combinacion 17	1	1	4	2
combinacion 18	1	1	4	3
combinacion 19	1	1	4	4
combinacion 20	1	1	4	5
combinacion 21	1	1	5	1
combinacion 22	1	1	5	2
combinacion 23	1	1	5	3
combinacion 24	1	1	5	4
combinacion 25	1	1	5	5
combinacion 26	1	2	1	1

Figura 23: Distribución en Matlab de fallos en ruedas dentadas.

# Con la siguiente representación presentada en la Tabla 8.

Tabla 8: Numeración de las ruedas dentadas dentro de la caja de engranajes.

Rueda dentada	Numero de rueda dentada
Z1	Rueda dentada 1 de la caja de engranajes
Z2	Rueda dentada 2 de la caja de engranajes
Z3	Rueda dentada 3 de la caja de engranajes
Z4	Rueda dentada 4 de la caja de engranajes

En el capitulo 2 se establece la selección de las combinaciones a realizar en el banco de pruebas. Un archivo adjunto de excel contiene todas las 1926 combinaciones presentadas por Matlab.

# 2.2 Disposición de fallos en rodamientos

Conocer los fallos en los rodamientos resulta indispensable para una selección adecuada de aquellos que se toman en cuenta para la simulacion en el banco de vibraciones.Su disposicion en la caja de engranajes se presenta en la Figura 24.



Figura 24: Distribución de rodamientos en la caja de elementos dentados.

#### 2.2.1 Fallos en los rodamientos

Los rodamientos son dispositivos que permiten el movimiento limitado, el movimiento general de rotación. Con el paso del tiempo estos han evolucionado a una variedad de configuraciones las cuales dependen de su aplicación [8].

Estos elementos cumplen la función de ser un componente esencial para el funcionamiento de maquinaria rotativa, pues los fallos en rodamientos constituyen en promedio el 41% del total de las fallas registradas en maquinarias rotativas [46], [47].

En la Figura 25 constan los fallos principales en rodamientos:



Figura 25: Tipos de fallos en Rodamientos. Fuente: [48], [49].

Estos fallos están distribuidos en las diferentes partes de un rodamiento, por lo que se consideraran para el análisis tres de ellas:

- Fallo en la pista externa
- Fallo en la pista interna
- Fallo en el elemento rodante

El principal motivo del fallo en un rodamiento es presencia de partículas externas ingresadas dentro del elemento por el lubricante o por el medio que lo rodea [50].

# Fallo en la pista externa

Este fallo se caracteriza por agrietamiento o desastillamiento del material en la pista externa, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente, como se muestra en la Figura 26.

El rodamiento se debe cambiar para asegurarnos que el problema no continúe [51].



Figura 26: Picadura en pista externa. Fuente: [51].

#### Fallo en la pista interna

Principalmente producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, lubricante deficiente, se presenta como agrietamiento o desatillamiento del material en la pista interna, como se muestra en la Figura 27 [51].



Figura 27: Picadura en pista interna. Fuente: [51].

#### Fallo en el elemento rodante

Este fallo se produce básicamente por factores externos como lubricación deficiente, corrosión, como se muestra en la Figura 28 [51].



Figura 28: Picadura en elemento rodante. Fuente: [51].

# 2.2.2 Selección y construcción de fallos

Con la información descrita anteriormente sobre fallos en rodamientos, se procede a detallar cada parte del elemento en que se realiza el fallo y las dimensiones que este tendrá.

# Fallo en la pista externa

La Tabla 9 presenta experimentaciones realizadas por otras instituciones con picadura y ranura en la pista externa.

Referencia	Tipo de fallo	Dimensiones
[52]	Una picadura en pista externa	<ul><li>Longitud: 2mm</li><li>Ancho: 2mm</li></ul>
[53]	Una picadura en pista externa	<ul><li>Longitud: 10mm</li><li>Ancho: 5mm</li><li>Profundidad:3mm</li></ul>
[54]	Una ranura en pista externa	<ul> <li>Longitud:13mm</li> <li>Profundidad: 1mm</li> <li>Ancho: 0.2, 0.5, 1, 1.5 mm</li> </ul>
[55]	Una ranura en pista externa	<ul><li>Ancho: 0.15</li><li>Profundidad: 0.13</li></ul>
[56]	Una raya en pista externa	<ul><li>Longitud: 4mm</li><li>Ancho:1mm</li></ul>

#### Tabla 9: Pruebas de fallo en pista externa.

[50]	Picadura en pista exterior con tres alternativas.	<ul> <li>Diametro:0.8mm</li> <li>Profundidad:0.35mm</li> <li>Diametro:1mm</li> <li>Profundidad:0.40mm</li> <li>Diametro:2mm</li> <li>Profundidad:0.40mm</li> </ul>
	Variando la siguiente posición.	<ul> <li>Dos picaduras separadas 60°</li> <li>Cuatro picaduras separadas ángulos de 45°</li> </ul>
[57]	Una ranura en pista externa	<ul> <li>Profundidad:0.3mm</li> <li>Ancho:1.2mm</li> <li>Esta ranura ocupa todo el ancho de la pista externa</li> </ul>
[58]	Una ranura en pista externa	<ul> <li>Profundidad :1mm</li> <li>Ancho:1mm</li> <li>Esta ranura ocupa todo el ancho de la pista externa</li> </ul>
[59]	Una picadura en pista externa	<ul> <li>Diámetro :0.7</li> <li>Profundidades:</li> <li>0.05</li> <li>0.15</li> <li>0.25</li> </ul>
[60]	Una picadura en pista externa con tres alternativas	<ul> <li>Diámetro 0.17mm</li> <li>Profundidad:0.27mm</li> <li>Diametro:0.35mm</li> <li>Profundidad:0.27mm</li> <li>Diametro:0.53mm</li> <li>Profundidad:0.27mm</li> <li>Diametro:0.71mm</li> <li>Profundidad:1.27mm</li> </ul>

[21]	Una ranura en pista externa	<ul> <li>Profundidad:1mm</li> <li>Ancho:2mm</li> <li>Esta ranura ocupa todo el ancho de la pista externa</li> </ul>
[61]	Una raya en pista externa	<ul> <li>Profundidad:0.1mm</li> <li>Esta ranura ocupa todo el ancho de la pista externa</li> </ul>

La construcción del fallo en la pista exterior tiene las siguientes características:

- Rodamiento con dos picaduras en pista exterior separada 11.4mm o 60 °, de 0.7mm de diámetro y 0.4mm de profundidad. En el Anexo B.1 se presenta el plano para la construcción de este fallo
- Rodamiento con cuatro picaduras en pista exterior, 2 y 2 opuestas con ángulo de 45, de 1mm de diámetro y 0.5mm de profundidad. En el Anexo B.2 se presenta el plano para la construcción de este fallo

#### Fallo en la pista interna

La Tabla 10 presenta experimentaciones realizadas por otras instituciones con picadura y ranura en la pista interna.

Referencia	Tipo de fallo	Dimensiones
[52]	Una picadura en pista interna.	<ul><li>Longitud: 2mm</li><li>Ancho: 2mm</li></ul>
[53]	Una picadura en pista interna.	<ul><li>Longitud: 10mm</li><li>Ancho: 5mm</li><li>Prof:3mm</li></ul>

#### Tabla 10: Pruebas de fallo en pista interna.

[55]	Una ranura en pista interna.	<ul><li>Ancho: 0.15</li><li>Profundidad: 0.13</li></ul>
[56]	Una raya en pista interna.	<ul><li>Longitud: 4mm</li><li>Ancho:1mm</li></ul>
[50]		• Diametro:0.8mm
[]		Profundidad:0.35mm
	Picadura en pista interna	• Diametro:1mm
	con tres alternativas.	Profundidad:0.40mm
		• Diametro:2mm
		Profundidad:0.40mm
		<ul> <li>Dos picaduras separadas 60°</li> </ul>
	Variando la siguiente	<ul> <li>Cuatro picaduras separadas ángulos de</li> </ul>
	posición.	45°
[57]	Una ranura en pista interna	Profundidad:0.3mm
		• Ancho:1.2mm
		• Esta ranura ocupa todo el ancho de la
		pista interna
[58]	Una ranura en pista interna	Profundidad :1mm
[50]	ena ranara en pista interna	• Ancho:1mm
		<ul> <li>Esta ranura ocupa todo el ancho de la</li> </ul>
		pista interna
[59]	Una picadura en pista	• Diámetro :0.7
	interna	Profundidades:
		• 0.05
		• 0.15
		• 0.25
[60]		Diámatro 0.17mm
[00]		• Diametro $0.17$ mm
		• Profundidad:0.27mm
		• Diametro:0.35mm
		Profundidad:0.27mm
	Una picadura en pista	
	interna con tres alternativas	• Diametro:0.53mm
		Profundidad:0.27mm
		• Diametro:0.71mm
		Profundidad:1.27mm

[21]	Una ranura en pista interna	<ul> <li>Profundidad:1mm</li> <li>Ancho:2mm</li> <li>Esta ranura ocupa todo el ancho de la pista interna</li> </ul>
[61]	Una raya en pista interna	<ul> <li>Profundidad:0.1mm</li> <li>Esta ranura ocupa todo el ancho de la pista interna</li> </ul>

La construcción del fallo en la pista interna tiene las siguientes características:

- Rodamiento con dos picaduras en pista interior separadas 11.4mm o 60°, de 1mm de diámetro y 0.5mm de profundidad. En el Anexo B.3 se presenta el plano para la construcción de este fallo
- Rodamiento con cuatro picaduras en pista interior,2 y 2 opuestas con ángulo de 45°, de 0.7mm de diámetro y 0.4mm de profundidad . En el Anexo B.4 se presenta el plano para la construcción de este fallo

#### Fallo en el elemento rodante

La Tabla 11 presenta experimentaciones realizadas por otras instituciones con picadura y rayado en elemento rodante.

Referencia	Tipo de fallo	Dimensiones	
[52]	Varias picaduras en elemento	Longitud: 2mm	
	rodante.	Ancho: 2mm	
[53]	Una picadura en elemento	Longitud: 10mm	
	rodante.	Ancho: 5mm	
		Prof:3mm	
[56]	Una raya en elemento rodante	Longitud: 4mm	
		Ancho:1mm	

Tabla 11: Pruebas	de fallo	en pista	interna.
-------------------	----------	----------	----------

[50]	Picadura en elemento rodante con tres alternativas.	<ul> <li>Diametro:0.8mm</li> <li>Profundidad:0.35mm</li> <li>Diametro:1mm</li> <li>Profundidad:0.40mm</li> <li>Diametro:2mm</li> <li>Profundidad:0.40mm</li> </ul>
	Variando la siguiente posición.	<ul> <li>Dos picaduras separadas 80°</li> <li>Cuatro picaduras dispersas</li> </ul>
[57]	Ranura en el elemento rodante	<ul> <li>Profundidad:0.3mm</li> <li>Ancho:1.2mm</li> <li>Longitud :2mm</li> </ul>
[58]	Ranura en el elemento rodante	<ul> <li>Profundidad :1mm</li> <li>Ancho:1mm</li> <li>Longitud :2mm</li> </ul>
[59]	Picadura elemento rodante	<ul> <li>Diámetro :0.5</li> <li>Profundidades:</li> <li>0.05</li> <li>0.15</li> <li>0.25</li> </ul>
[60]	Picadura elemento rodante con cuatro alternativas	<ul> <li>Diámetro 0.17mm</li> <li>Profundidad:0.27mm</li> <li>Diametro:0.35mm</li> <li>Profundidad:0.27mm</li> <li>Diametro:0.53mm</li> <li>Profundidad:0.27mm</li> <li>Diametro:0.71mm</li> <li>Profundidad:3.8mm</li> </ul>
[61]	Raya elemento rodante	<ul> <li>Profundidad:0.7mm</li> <li>Esta ranura ocupa todo el ancho de la pista interna</li> </ul>

- Rodamiento con dos picaduras en bola separadas 80°, de 0.7mm de diámetro y 0.4mm de profundidad. En el Anexo B.5 se presenta el plano para la construcción de este fallo
- Rodamiento con cuatro picaduras en la bola dispersos, de 1mm de diámetro y 0.5mm de profundidad. En el Anexo B.6 se presenta el plano para la construcción de este fallo

Según [50] los fallos se construyen utilizando descargas eléctricas mediante la máquina de electroerosión, la misma que facilitara la realización de las fallos en engranajes como rodamientos.

#### 2.2.3 Combinaciones de fallos en la caja de elementos dentados para rodamientos

Establecido el número de rodamientos presentes en la caja de engranajes y con la distribución mostrada en la Figura 19, a continuación se muestra en la Tabla 12 el número correspondiente a cada fallo en los rodamientos.

Numeración	Tipo de fallo	
1	Sin fallo	
2	Deterioro pista exterior	
3	Deterioro Pista Interior	
4	Deterioro en el elemento rodante	

Tabla 12:	: Tipo de fallo	y numeración.
-----------	-----------------	---------------

De igual manera que en los engranajes se utiliza la programación

#### • unique(nchoosek(repmat(1:n,1,K),K),'rows');

La que proporciono un total de de 4096 combinaciones posibles, en la Figura 29 se muestra una parte de las combinaciones de rodamientos.

Combinaciones en fallas de rodamientos						
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Combina 1	1	1	1	1	1	1
Combina 2	1	1	1	1	1	2
Combina 3	1	1	1	1	1	3
Combina 4	1	1	1	1	1	4
Combina 5	1	1	1	1	2	1
Combina 6	1	1	1	1	2	2
Combina 7	1	1	1	1	2	3
Combina 8	1	1	1	1	2	4
Combina 9	1	1	1	1	3	1
Combina 10	1	1	1	1	3	2
Combina 11	1	1	1	1	3	3
Combina 12	1	1	1	1	3	4
Combina 13	1	1	1	1	4	1
Combina 14	1	1	1	1	4	2

Figura 29: Distribución en Matlab de fallos en rodamientos.

Con la representación mostrada en la Tabla 13.

Tabla 13: Numeración de los rodamientos dentro de la caja de engran	ajes.
---	-------

Rodamiento	Numero de rodamiento
B1	Rodamiento 1 de la caja de engranajes
B2	Rodamiento 2 de la caja de engranajes
B3	Rodamiento 3 de la caja de engranajes
B4	Rodamiento 4 de la caja de engranajes
B5	Rodamiento 5 de la caja de engranajes
B6	Rodamiento 6 de la caja de engranajes

En el Capitulo 2 se establece la selección de las combinaciones a realizar en el banco de pruebas.

Un archivo adjunto de excel contiene todas las 4096 combinaciones presentadas por Matlab.

# 2.3 Disposición de fallos combinados entre engranajes y rodamientos

En el banco de pruebas se simula fallos de engranajes y rodamientos en forma individual, pero es fundamental analizarlos en un mismo momento, combinar los fallos de las ruedas dentadas y de los rodamientos es lo que se realiza en esta sección. La Figura 30 presenta la disposición de todos los elementos en la caja de engranajes.



Figura 30: Distribución de rodamientos y engranajes en la caja de engranajes.

# 2.3.1 Combinación de fallos en la caja de elementos dentados para rodamientos y engranajes en un mismo instante

Establecido el número de rodamientos y ruedas dentadas se tiene un total de 6900 combinaciones, en la Tabla 14se aprecia la distribución del número correspondiente a cada fallo.

#### Tabla 14: Tipo de fallo y numeración.

Numeración	Tipo de fallo			
Común en Engranajes y Rodamientos				
1 sin fallo				
En sección Engranajes				
2 Fallos por desgaste				
3 Rayado y escoriado				
4 Fatiga Superficial				
5	Rotura de diente			
En sección Rodamientos				
2	2 Deterioro pista exterior			
3	Deterioro Pista Interior			
4	Deterioro de los elementos rodantes			

Una parte de las combinaciones rodamientos-engranajes se muestra en la Figura 31.

Combinaciones de fallas en engranajes y rodamientos										
	Z1	Z2	Z3	Z4	B1	B2	<b>B</b> 3	B4	B5	B6
Combina 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Combina 2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2
Combina 3	1	1	1	3	1	1	1	1	1	3
Combina 4	1	1	1	4	1	1	1	1	1	4
Combina 5	1	1	1	5	1	1	1	1	2	1
Combina 6	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2
Combina 7	1	1	2	2	1	1	1	1	2	3
Combina 8	1	1	2	3	1	1	1	1	2	4
Combina 9	1	1	2	4	1	1	1	1	3	1
Combina 10	1	1	2	5	1	1	1	1	3	2
Combina 11	1	1	3	1	1	1	1	1	3	3
Combina 12	1	1	3	2	1	1	1	1	3	4
Combina 13	1	1	3	3	1	1	1	1	4	1
Combina 14	1	1	3	4	1	1	1	1	4	2

Figura 31: Distribución en Matlab de fallos combinados.

Con la representación mostrada en la Tabla 8 y 14.

En el Capitulo 2 se establece la selección de las combinaciones a realizar en el banco de pruebas.

Un archivo adjunto de excel contiene las 6900 combinaciones presentadas por Matlab.

# **3 PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE SEÑALES DE VIBRACIÓNES MECÁNICASDE ENGRANAJES RECTOS Y RODAMIENTOS CON SUS DIFERENTES FALLOS**

En este capítulo se presenta una descripción del banco de vibraciones mecánicas. Seguidamente se asigna la nomenclatura para las diferentes pruebas con y sin fallos en los elementos de la caja de engranajes. Una disposición de libre acceso en la web es lo que se tratara como último punto de este capítulo.

# 3.1 Protocolo para la toma de señales de la base de datos

Para la creación de la base de datos, se debe tener en cuenta las características del banco de vibraciones y los pasos necesarios para la obtención de las señales.

# 3.1.1 Descripción del banco de experimentación

Con el objetivo de adquirir señales de vibración producidas en rodamientos y engranajes rectos, en estado defectuoso y normal se utilizo un banco didáctico de ensayos como se presenta en la Figura 32.



Figura 32: Banco de vibraciones mecánicas.

Las ruedas dentadas de diente recto se diseñaron conjuntamente con la construcción del banco con las características especificadas más adelante en las Tablas 12 y 13.

Los rodamientos son NTN 6005ZC3, con características propias de fabricación, en los que se realiza fallos en pista interior, exterior y en el elemento rodante, como se especifico en el capítulo 1.

# 3.1.2 Parámetros variables en el banco de vibraciones

Para la toma de señales, los parámetros variables en el banco de vibraciones son:

- Velocidad Mínima
- Carga Mínima
- Intervalos de Velocidad
- Intervalos de Carga
- Velocidad Máxima
- Carga Máxima

La Figura 33 presenta un control para variar los parámetros en cada prueba. Este software de control se realizo en la Universidad Politécnica Salesiana para simular los fallos en el banco de vibraciones.

Parametros de Ejecución		×				
Parámetros de la Prueba:						
Velocidad Minima	Intervalos de Velocidad	Velocidad Maxima				
Carga Minima	Intervalos de Carga	Carga Maxima				
	(	Aceptar				
		Cancelar				

Figura 33: Parámetros de prueba.

# 3.1.3 Unidades del banco de vibraciones

Las señales de vibración son obtenidas partir de un banco diseñado en la Universidad Politécnica Salesiana, para analizar los diferentes fallos en ruedas dentadas y rodamientos.



En la Figura 34se presenta la ubicación de cada una de las unidades en el banco de vibraciones.

Figura 34: Unidades del banco de pruebas. Fuente: [6].

Las unidades del banco de vibraciones son las siguientes:

# Unidad de mando

La unidad de mando está compuesta por los siguientes elementos:

- Alimentación 3x220VAC
- Interruptor general de 3 polos a 16A
- Interruptor diferencial de 4 polos a 16A
- Luminaria a 110 VAC

- Breaker de 3 polos a 16<sup>a</sup> para protección al Variador
- Contactor de 3 polos a 16A
- Variador de frecuencia
- Fuente de poder regulable V imp. De 100-240v/19A/50-60Hz voltaje de salida de 0 a 100 V DC/0-15A
- Analizador de energía extra
- 3 breakers de 1 polo de 2A
- 1 breaker de 1 polo de 6A
- Borneras PE
- Borneras normales
- 3 transformadores de corriente
- Panel de control
- Computador portátil

Entre los componentes más importantes de la unidad de mando están:

# - Variador de frecuencia

La función principal del variador de frecuencia Figura 35, es controlar la velocidad de rotación del motor eléctrico variando su frecuencia.



Figura 35: Variador de frecuencia.

Las características del variador de frecuencia se presentan a continuación:

- VARIADOR DE FRECUENCIA FC302 / MCB102
- Interface: 2 entradas analógicas -10..+10 VDC / 4..20 mA
- 4 entradas digitales 24 VDC programables
- 4 salidas digitales 24 VDC / relé
- 1 entrada digital para encoder (realimentación, lazo cerrado) configurable
- 1 salida analógica 0..10 VDC / 0..20 mA programable
- Potencia: 2 HP
- Frecuencia de salida: 0..1000 Hz
- Alimentación: trifásica 3x220 VAC @ 60 Hz
- Comunicación: RS485
- Certificación: CE, ISO 9001[62]

#### - Panel de control

#### La Figura 36 se presenta el panel de control, el que está compuesto por:

1Parada de emergencia.

2Analizador de energía.

**3**Variador de frecuencia.



Figura 36: Panel de control.

#### Unidad motriz

La unidad motriz está compuesta por:

- 1 Motor de 1.5 HP
- 1 Motor de 2HP
- 2 Encoder

#### - Motor

El motor permite transmitir el movimiento al eje de entrada de la caja de engranajes mediante un acople, como se muestra en la Figura 37.



Figura 37: Motor.

Los motores presentan las siguientes características:

Primer motor:

- Motor AC trifásico SIEMENS 1LA7 083-4YA60
- Potencia de 1.5 Hp
- Corriente trifásica de 220V
- Ejecución B3(montaje horizontal)

- Protección IP55
- Aislamiento clase F (para alimentación con convertidor de frecuencia)
- Revoluciones de 1800 min-1(4polos)
- Kit para montaje de encoder

#### Segundo motor:

- Motor AC trifásico SIEMENS 1LA7 090-4YA60
- Potencia de 2 Hp
- Corriente trifásica de 220V
- Ejecución B3(montaje horizontal)
- Protección IP55
- Aislamiento clase F (para alimentación con convertidor de frecuencia)
- Revoluciones de 1800 min-1(4polos)
- Kit para montaje de encoder

#### - Encoder

El encoder, Figura 38 es un codificador rotatorio el cual convierte una señal digital en un código binario. La función del encoder es medir la velocidad de giro del motor.



Figura 38: Encoder. Fuente: [63].

Las características del encoder utilizado en el motor son las siguientes:

- Modelo Sick DFS60B-S4PL10000 (1036723)
- Valor básico: 4,7 kOhm
- Rango de medida: 350 ° (sin fin)
- Resolución: 0,01 °
- Precisión: < 0,5 %

- Rango de temperatura operativa:-55..100 °C
- Protección: IP65
- Eje: 6 mm sólido
- Torque: < 0,2 Ncm
- Rodamiento: SS de doble protección
- Duración de funcionamiento: >= 100 millones ciclos
- Conector eléctrico: Plug M16x0,75; 3 pin
- Certificación: CE, ISO 9001. [63]

#### Unidad de pruebas

- Tarjeta de adquisición de datos DAQ (*data acquisition systems*)ERBESSD INSTRUMENTS
- Acelerómetro rango de entrada 0.5Hz a 20KHz

#### - Tarjeta de adquisición de datos

En la tarjeta DAQ, como se muestra en la Figura 39 se encuentra conectado cada uno de los acelerómetros que toman las respectivas señales de vibración de la caja de engranajes, estas se transmite a un PC, el que almacena todas estas señales de vibración para la base de datos.



Figura 39: Tarjeta DAQ.

#### - Acelerómetro

El acelerómetro Figura 40, es el transductor más utilizado para medir vibraciones. En su interior presenta un material piezoeléctrico. Consta de un imán pequeño para que se pueda adherir a una
superficie compatible. Está protegido de la instalación contra corto circuito, sobre voltaje, inversión de voltaje y de esta manera conectarlo con total seguridad.



Figura 40: Acelerómetro. Fuente:[64]

En el banco el acelerómetro tiene las siguientes características:

- Acelerómetro UNIAXIAL
- Marca ACS
- Modelo Acs 3411LN
- Sensibilidad de 330 m V/g
- Grado de protección IP 67
- Fabricación a prueba de agua
- Contiene un acelerómetro unidireccional regulador de voltaje, un amplificador y un filtro que limpia la señal analógico digital de 5000Hz
- Ensamble fabricado de acero inoxidable y está diseñado a prueba de agua
- Ideal para trabajos al aire libre de rutina.

### Caja de engranajes

En la Figura 41 se presenta la disposición de las cuatro ruedas dentadas en la caja de engranajes.



Figura 41: Caja de engranajes. Fuente: [6].

Con características de construcción presentadas en las Tablas 15 y 16:

Descripción	Modulo	Ν	$\Phi$ de presión
Rueda dentada Z1	2.25	27	20
Rueda Dentada Z2	2.25	53	20
Rueda Dentada Z3	2.25	53	20
Rueda Dentada Z4	2.25	80	20

Tabla 15: Datos de las ruedas dentadas. Fuente:[6]

#### Tabla 16: Datos de construcción. Fuente: [6].

Descripción primera etapa (Z1-Z2)	Cantidad
Velocidad de entrada $\omega_e$	1800rpm
Material	ACERO AISI 1020
	<i>S</i> <sub><i>fb</i></sub> =210Mpa
Razón de Velocidad Angular	$M_{v} = 0.5094$
Razón de Engranes	$M_{g} = 1.96$
Descripción segunda etapa (Z3-Z4)	Cantidad
Velocidad de entrada $\omega_e$	916.9811rpm
Material	ACERO AISI 1020
	<i>S</i> <sub><i>fb</i></sub> =210Mpa
Razón de Velocidad Angular	$M_{v} = 0.6625$
Razón de Engranes	$M_{g} = 3.4782$
DIMENSION DE LA RUEDA DENTADA Z1	DIMENSION DE LA RUEDA DENTADA Z2
Diámetro primitivo:	Diámetro primitivo:
$d_p = 60.75$ mm	$d_{G} = 119.25$ mm
Diámetro exterior:	Diámetro exterior:
$dext_p = 65.25 \text{mm}$	$dext_G = 123.75$ mm
Profundidad del diente:	Profundidad del diente:
$h_p = 5.0625 \text{mm}$	$h_p = 5.0625 \text{mm}$
Ancho del diente:	Ancho del diente:
<i>B</i> =20mm	<i>B</i> =20mm
DIMENSION DE LA RUEDA DENTADA Z3	DIMENSION DE LA RUEDA DENTADA Z4
Diámetro primitivo:	Diámetro primitivo:
$d_p = 119.25$ mm	<i>d</i> <sub><i>G</i></sub> =180
Diámetro exterior:	Diámetro exterior:
$dext_p = 23.75$ mm	$dext_G = 184.5$
Profundidad del diente:	Profundidad del diente:
$h_p = 5.0625 \text{mm}$	$h_p = 5.0625 \text{mm}$
Ancho del diente:	Ancho del diente:
B - 20mm	B = 20mm

### - Ruedas dentadas disponibles para el uso del banco de vibraciones

Para simular los fallos de engranajes se cuenta con el número de ruedas dentadas presentadas en la Tabla 17.

RUEDAS DENTADAS DISPONIBLES				
Nomenclatura de las ruedas	Numero de Ruedas	Numero de		
dentadas	dentadas	Dientes		
Z1	7	27 dientes		
Z2	4	53 dientes		
Z3	4	53 dientes		
Z4	3	80 dientes		

Tabla 17: Ruedas dentadas disponibles para uso del banco de vibraciones.

#### – Rodamientos

Las características de los rodamientos a utilizar en la caja de engranajes para las pruebas son las mostradas en la Figura 42:

NTN Part Nu	umber 6005ZC3/		/0G	
W	Veight N/A (lbs)		/ N/A (kg)	
DIMENSIONS				
DIMENSION	IMF	ERIAL	METRIC	
Bore d	0	.9843 (in)	25.000 (mm)	
0.D.D.	1	.8504 (in)	47.000 (mm)	
Width B or W	0	4724 (in)	12.000 (mm)	
rs min	0	.0236 (in)	0.600 (mm)	
D1 max	1	.7559 (in)	44.600 (mm)	
a max	0	.0811 (in)	2.060 (mm)	
b min	0	.0532 (in)	1.350 (mm)	
ro max	0	.0157 (in)	0.400 (mm)	
rns min	0	.0197 (in)	0.500 (mm)	
D2 max	2	.0748 (in)	52.700 (mm)	
f max	0	.0441 (in)	1.120 (mm)	
da min	1	.1417 (in)	29.000 (mm)	
da max	1	2008 (in)	30.500 (mm)	
Da max	1	.6929 (in)	43.000 (mm)	
ras max	0	.0236 (in)	0.600 (mm)	
Dx min	2	1063 (in)	53.500 (mm)	
Cy max	0	1142 (in)	2.900 (mm)	
Cz min	0	.0472 (in)	1.200 (mm)	
rnas max	0	.0197 (in)	0.500 (mm)	

Figura 42: Características del rodamiento. Fuente: [65].

Se cuenta con 18rodamientos con las características presentadas en la Figura 42, de los cuales cada tapa de la caja de engranajes tendrá un rodamiento perfecto y tres rodamientos con fallos diferentes como se describe en el capítulo 1.

### 3.1.4 Tipo y nivel de aceite en la caja de engranajes

### Tipo de aceite

Para el correcto trabajo de la caja de engranajes del banco de vibraciones, es necesario que la lubricación sea la apropiada, por esta razón la selección de aceite es un parámetro fundamental para simular los fallos en los elementos y de esta manera recolectar señales válidas de vibraciones.

Se busca un aceite que cumpla con las siguientes características:

- Excelente lubricación y untuosidad
- Elevada estabilidad térmica
- Permita conservar sus propiedades trabajando en presiones extremas
- Propiedades de antidesgaste para disminuir la temperatura en los engranajes
- Aditivos contra la formación de corrosión
- Agentes especiales contra la oxidación
- Agentes para una baja formación de espuma

La norma encargada de regular las características de los lubricantes es la DIN51412.

Con las condiciones antes mencionadas y basándonos en la norma, se selecciona el aceite SAE 80 como ideal para la caja de engranajes [66], [67].

En el ámbito comercial se puede disponer de los siguientes aceites con características SAE 80:

- Mobil Gear 630 MOBIL
- Tivela S220-SHELL
- Gulf EP Lubricant HD 220
- Omala 220-SHELL[67][66]

Todos los aceites antes mencionados presentan similares características.

El aceite utilizado en las pruebas de la caja de engranajes es el Gulf EP Lubricant HD 220, este es un aceite mineral, altamente refinado y contiene aditivos con alto grado de calidad.

Las características de este aceite son las mostradas en la Figura 43.

Grado de Visco	sidad ISO		32	46	68	100	150	220
Cumple las sig	uientes Especificac	iones						
DIN 51517 Part	3, ISO 12925-1 Type	)	Y	x	Y	Y	x	Y
CKC, AGMA 9005, D 94		^	^	^	^	^	^	
David Brown S1.53 101(E)		X	х	х	х	х	Х	
US Steel 224				Х	Х	Х	Х	
Propiedades Tí	picas							
Parámetros de	Prueba	Método ASTM				١	/alores T	ípicos
Viscosidad @ 40	0 ℃, cSt	D 445	32.1	46.3	68.2	100.2	148.7	218.8
Indice de Viscos	idad	D 2270	99	98	98	98	97	96
Punto de Inflama	ación, ºC	D 92	208	210	224	230	240	242
Punto de Escurr	imiento, ºC	D 97	-12	-12	-12	-12	-9	-9
Densidad @ 159	°C, Kg/l	D 1298	0.873	0.878	0.884	0.889	0.893	0.897
FZG, fail load st	age	DIN 51354 PART II	>12	>12	>12	>12	>12	>12
Rust Test		D 665A/B	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Corrosión al Col	ore	D 130	1a	1a	1a	1a	1a	1a
Prueba de Emulsión	@ 54 °C	D 1401	Pass	Pass	Pass	-	-	-
30 minute max.	@ 82 °C		-	-	-	Pass	Pass	Pass

Figura 43: Características del aceite Gulf EP Lubricant HD 220. Fuente: [68].

### Nivel de aceite

El depósito del aceite en la caja de engranajes debe realizarse como se muestra en la Figura 44.



Figura 44: Deposito de lubricante. Fuente: [6].

El método de lubricación para la caja de engranajes es salpicadura, pues esta técnica es la más utilizada en la lubricación de cajas tipo reductoras. En este método el aceite se encuentra en la parte inferior de la caja y en esta se encuentra sumergido parcialmente uno o varios engranajes, los mismos que al girar transportan el aceite hasta el punto de engrane y por acción de la fuerza centrifuga otra cantidad es salpicada sobre las paredes de la caja desde donde resbalan hacia los rodamientos, él nivel de aceite en la en la caja de engranajes será del 40% de la totalidad de la caja. Como se presenta en la Figura 45.



Figura 45: Nivel de aceite. Fuente: [69].

#### 3.1.5 Posición de los acelerómetros

- La ubicación de los acelerómetros se realiza de acuerdo a la norma ISO10816-3, en la cual se contempla máquinas que contengan engranajes y rodamientos tipo reductores, la norma expresa que la medición de vibración se debe realizar en alguna parte no rotatoria de la máquina .La norma sugiere realizar la medición de la vibración en los descansos del equipo como son descanso del eje y del engranaje.
- Cuando no es posible ubicar los sensores en los descansos del equipo la norma sugiere colocarlos en la carcasa o en algún punto que sea accesible o suficientemente seguro para realizar la medición [70], [3], [4].
- En los engranajes rectos lo más recomendable es que los transductores de medición (acelerómetros) se encuentre ubicados en forma radial y tangencial, en el caso de los engranajes helicoidales y rodamientos estos transductores deben ubicarse en forma radial y

axial. La Figura 46 presenta la ubicación radial y tangencial de dos acelerómetros uniaxiales en el descanso del eje de entrada. [1], [71], [72].



Figura 46: Posición correcta de los acelerómetros.

### **3.1.6** Nomenclatura de los elementos para pruebas

La Figura 47, 48, 49 y 50 presenta las letras que representan a los elementos de la caja de engranajes para su señalización en cada prueba estos elementos son engranajes, rodamientos y se suma a estos los acelerómetros, cada uno con su respectiva posición.

La disposición de los acelerómetros en la caja de engranajes es fundamental para una correcta toma de señales.



#### Figura 47: Señalización de los elementos.







Figura 50: Señalización de los acelerómetros en el eje K.



En los engranajes se utiliza la siguiente nomenclatura según la disposición de la Figura 47:

En la cual:

Simbología	Significado
Z1-Z4	Rueda dentada 1 a la 4 respectivamente
1_1	Rueda dentada sin fallo
2_1	Rueda dentada con desgaste de 0.40mm en la totalidad de la cara de un diente
2_2	Rueda dentada con desgaste en la cara 0.5mm
3_1	Rueda dentada con escoriado en un diente al 50%
3_2	Rueda dentada con escoriado en un diente al 100%
4_1	<ul> <li>Rueda dentada con picadura en un diente de</li> <li>0.050mm de profundidad</li> <li>0.5mm de ancho</li> <li>0.050 mm de largo</li> </ul>
4_2	Rueda dentada con picadura en todos sus dientes
5_1	Rueda dentada con grieta incipiente en un diente de 4mm a 25% de profundidad y φ 45°
5_2	Rueda dentada con rotura de diente al 20%
5_3	Rueda dentada con rotura de diente al 50%
5_4	Rueda dentada con rotura de diente completa
5_5	Rueda dentada con grieta de 0.5mm

Tabla 10. Nomeneratura en ruccas demadas	Tabla 18:	Nomenclatura	en ruedas	dentadas
--	-----------	--------------	-----------	----------

Simbología	Significado
K1 -K6	Posición en el eje K del acelerómetro 1 al 6
	respectivamente
J1-J6	Posición en el eje J del acelerómetro 1 al 6
	respectivamente
I1-I2	Posición en el eje I del acelerómetro 1 Y 2
	respectivamente
A1	Acelerómetro uniaxial
A2	Acelerómetro biaxial
A3	Acelerómetro triaxial

Tabla 19: Nomenclatura de acelerómetros en la caja de engranajes.

Tabla 20: Tipo de carga empleada en las pruebas de vibraciones mecánicas.

Nomenclatura	Tipo de carga
L1	Carga constante
L2	Carga randomica
L3	Carga seno
L3	Carga cuadrática
L4	Carga triangular

Tabla 21: Condiciones para la toma de señales.

### C1 REPRESENTA LAS CONDICIONES MOSTRADAS A CPNTINUACIÓN

Frecuencia de muestreo	0,44 HZ
Tiempo de muestreo	10 s
Potencia	1000 W
Velocidad mínima	700 RPM
Velocidad máxima	1600 RPM
Carga mínima	250 W
Carga máxima	750 W
Numero de velocidades	5
Numero de cargas	4
Numero de muestras	10
Tipo de acelerómetro	Uniaxial
Marca	ACS
Modelo	Acs 3411LN

Sensibilidad	330 m V/g
Grado de protección	IP 67

En los rodamientos se utiliza la siguiente nomenclatura según la disposición de la Figura 47:



En la cual:

Tabla 22: Nomenclatura en rodamientos.

Simbología	Significado
B1-B6	Rodamiento 1 al 6 respectivamente
1_1	Rodamiento sin fallo
2_1	Rodamiento con 2 picaduras en pista exterior
2_2	Rodamiento con 4 picaduras en pista exterior
3_1	Rodamiento con 2 picaduras en pista interior

3_2	
	Rodamiento con 4 picaduras en pista interior
4_1	Rodamiento con 2 picaduras en elemento
	rodante
4_2	Rodamiento con 2 picaduras en elemento
	rodante

La nomenclatura correspondiente al número de prueba, posición del acelerómetro y tipo de acelerómetro es la misma que la descrita en la Tabla 19.

En las pruebas combinadas se sigue la igual nomenclatura de las Tablas 18, 19,21 y 22, con la particularidad que se anota una sola vez el número de prueba la posición del acelerómetro y el tipo de acelerómetro de la siguiente manera:

# Z1\_1\_1 Z2\_1\_1 Z3\_1\_1 Z4\_1\_1 B1\_1\_1 B2\_1\_1 B3\_1\_1 B4\_1\_1 B5\_1\_1 B6\_1\_1I1A3 K1 A1 K2 A2 L1C1T1

## **4 BASE DE DATOS**

En este capítulo se presenta el paso realizado para la obtención de la base de datos, así como una breve descripción de la utilización del software *Vibraciones* empleado en la obtención de señales, se abordó como último punto la disponibilidad de la base de datos.

### 4.1 Protocolo de la base de datos

Esta base de datos está dirigida para

- Estudiantes universitarios
- Estudiantes de pregrado
- Estudiantes de maestrías
- Estudiantes de doctorados
- Para todas las personas que se interesen en el tema de vibraciones

El montaje de los diferentes elementos en la caja de engranajes estuvo a cargo del estudiante encargado del proyecto de tesis en el laboratorio de vibraciones mecánicas de la Universidad Politécnica Salesiana, las señales y las pruebas se realizaron bajo la supervisión y colaboración de los ingenieros que trabajan en este proyecto.

Para la obtención de la base de datos se realizaron varias muestras las cuales fueron ejecutadas bajo las características presentadas en la tabla 23.

Combinaciones escogidas para la simulación	<ul> <li>Se escogió 40 combinaciones en forma aleatoria de las posibles que puedan darse en la caja de engranajes, de la siguiente manera: <ul> <li>10 combinaciones de fallos en engranajes en dos etapas</li> <li>50 combinaciones en una sola etapa de la caja de engranajes combinando con fallos en rodamientos y engranajes</li> </ul> </li> <li>De cada combinación se toman pruebas correspondiente a la carga: <ul> <li>Carga variable</li> </ul> </li> </ul>
Temperatura máxima Cuenca	28.2°C
Temperatura mínima Cuenca	21.1°C

Vibraciones de otras máquinas y ruido externo	En el laboratorio de vibraciones no existen maquinas cercanas que puedan ocasionar vibración sobre el banco de pruebas.
Altitud de Cuenca	2.558 metros sobre el nivel del mar
Presión en Cuenca	0.67 ATM

### 4.2 Diagrama de Lenguaje Unificado de Modelado (UML) para el banco de vibraciones mecánicas de la Universidad Politécnica Salesiana de la base de datos

La Figura 51 presenta el diagrama de Lenguaje Unificado de Modelado (UML) correspondiente al banco de vibraciones mecánicas, en el cual se presentan 5 campos: muestra, canales, velocidad, potencia y campo de cargas.

En el *Campo canales* se presenta las tres entradas disponibles de la tarjeta de adquisición de datos, el *Canal 1* y *Canal 2* sirven para la conexión de dos acelerómetros y el *Canal 3*se utiliza para la conexión del tacómetro digital. En el *Campo muestra* se asigna el nombre de la muestra que se va a tomar. En el *Campo potencia* se presenta una *Potencia de referencia* en la cual se ingresa la potencia que se impone para la prueba y una *potencia real* la cual muestra la potencia que se genera en el transcurso de la prueba. En el *Campo Velocidad* se presentan dos velocidades, la *velocidad de referencia* es aquella que se impone para la prueba y la *velocidad real* es la que se genera en el transcurso de la prueba. El *Campo cargas* muestra los diferentes tipos de carga que se puede utilizar para las pruebas.



Figura 51: Diagrama UML para el banco de vibraciones mecánicas.

### 4.3 Implementación del software para el banco de vibraciones mecánicas

El software para la utilización del banco de vibraciones mecánicas fue desarrollado en la Universidad Politécnica Salesiana y permite controlar todas las pruebas a realizarse bajo condiciones preestablecidas.

#### 4.3.1 Diagrama de bloques para la utilización del software de vibraciones mecánicas

En la Figura 52 se aprecia el diagrama de bloques para la utilización del software de *Vibraciones* mecánicas, el mismo que describe la utilización del software *s*. Para arrancar una prueba en primer lugar debemos hacer doble enter en el icono *Vibraciones*, luego de esto en nueva prueba presionar ok, seguidamente introducir el nombre de la prueba de acuerdo al protocolo ya establecido anteriormente, luego introducir los parámetros de la prueba como se desee para finalmente introducir los parámetros de encendido y descanso del motor además de el numero de muestras de la prueba.



Llenar los parámetros de		
ejecución y presionar	Parametros de Ejecución	x
iniciar prueba	Tiempo:       Número de Muestras         Encendido:       20 min       por Velocidad-Carga:         Descanso:       10 min       Muestras:         Iniciar PRUEBA       Image: Cancelar	

Figura 52: Diagrama de bloques para el software de vibraciones mecánicas.

## 4.4 Disponibilidad de la base de datos

La disponibilidad de la base de datos es de libre acceso, la misma estará disponible en la siguiente dirección web:

• www.mechanicalvibrationups.org

### **5** CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

- Se levantó la base de datos con 60 pruebas y un total de 1000 muestras en cada prueba, por lo tanto se obtuvo un total de 60000 muestras en la base de datos, con diferentes fallos en engranajes rectos y rodamientos rígido de bolas, con el fin que esta información sea un aporte para temas investigativos sobre diagnóstico de fallos en engranajes y rodamientos.
- Se desarrolló una nomenclatura para la configuración de los sistemas mecánicos, en la cual se especifica mediante letras y números la ubicación de las diferentes ruedas dentadas y rodamientos en la caja de engranajes, además se investigó sobre fallos realizados por otras instituciones para el análisis de vibraciones y de esta manera construir fallos que todavía no han sido estudiados en diagnóstico.
- Para la toma de señales se desarrolló el software Vibraciones el mismo que fue realizado en LabVIEW para el banco de vibraciones mecánicas, este software permite controlar pautas de toma de señales como son números de cargas, velocidades, numero de muestras, tiempo de encendido del motor y tiempo de descanso, para de esta manera tener bien claras las condiciones de muestreo.
- Se validó de manera experimental las señales de vibración otorgadas por el software de Erbessd, para lo cual se tomó señales cuando en la caja de engranajes no se presente ningún fallo, con lo que se constató que en el espectro Frecuencia-Amplitud presentado por Erbessd mostraba los picos característicos de vibración de una caja de engranajes en su estado natural de vibración.

### 5.2 Recomendaciones

- Se debería diseñar un sistema de refrigeración más óptimo conforme a la estructura del banco de pruebas, el sistema de aire comprimido ocasiona demasiado ruido por lo que sería conveniente implementar un sistema de enfriamiento por líquidos de manera que tanto el freno magnético como el motor tenga un enfriamiento eficaz para realizar más pruebas sin peligro que ocurra daños en estos elementos.
- Se recomienda cambiar el servidor de datos del laboratorio a uno con características que garantice que los datos no se pierdan por fallos de energía o defectos del hardware.
- El motor de base de datos de Microsoft para archivos de base de datos de Microsoft Access presenta algunas limitaciones por lo que sería recomendable establecer otro sistema de base de datos.

### **Trabajos Futuros**

- El sistema de comunicación para el control del freno electromagnético puede ser reestructurado de manera que la conexión USB que controla el freno no pierda comunicación y cause un exceso de carga en el motor el cual se podría quemar.
- Se debe agregar la funcionalidad para múltiples acelerómetros de manera que estos se puedan sincronizar y al momento de tomar señales en dos etapas se cuente con dos acelerómetros.
- Se puede realizar pruebas con otro tipo de engranajes y rodamientos, puesto que la caja está diseñada para poder realizar diferentes configuraciones.

### Pruebas realizadas

Se realizaron un total de 60 pruebas de las cuales las 10 primeras se realizaron en dos etapas y las 50 siguientes en una sola etapa.

La Tabla 24 presenta las pruebas realizadas en dos etapas.

# Combinación	Z1	Z2	Z3	Z4	B1	B2	B3	B4	B5	B6	Nomenclatura
Combinación 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	Z1_1_1Z2_2_1Z3_1_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 3	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_2_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 4	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	Z1_1_1Z2_2_2Z3_2_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 5	1	2	3	1	1	1	1	1	1	1	Z1_1_1Z2_2_2Z3_3_2Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 6	1	2	5	1	1	1	1	1	1	1	Z1_1_1Z2_2_2Z3_5_2Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 7	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_3_2Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 8	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_4_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 9	4	1	4	1	1	1	1	1	1	1	Z1_4_2Z2_1_1Z3_4_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 10	4	1	4	5	1	1	1	1	1	1	Z1_4_2Z2_1_1Z3_4_1Z4_5_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1K1A1L1C1T1

**Tabla 24:** Pruebas realizadas en la caja de engranajes en dos etapas.

La Tabla 25 presenta las pruebas realizadas en una sola etapa

#Combinación	Z1	Z2	B1	B2	B3	B4	Nomenclatura
Combinación 1	1	1	1	4	2	1	Z1_1_1Z2_1_1B1_1_1B2_4_1B3_2_2B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 2	1	2	1	1	2	1	Z1_1_1Z2_2_1B1_1_1B2_1_1B3_2_2B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 3	1	2	1	3	2	1	Z1_1_1Z2_2_2B1_1_1B2_3_2B3_2_2B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 4	1	3	1	3	2	1	Z1_1_1Z2_3_2B1_1_1B2_3_1B3_2_2B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 5	1	3	1	3	2	1	Z1_1_1Z2_3_1B1_1_1B2_3_1B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 6	1	4	1	1	2	1	Z1_1_1Z2_4_1B1_1_1B2_1_1B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 7	1	5	1	4	2	1	Z1_1_1Z2_5_3B1_1_1B2_4_2B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 8	1	5	1	4	3	1	Z1_1_1Z2_5_2B1_1_1B2_4_2B3_3_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 9	1	5	1	1	3	1	Z1_1_1Z2_5_4B1_1_1B2_1_1B3_3_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 10	1	5	1	2	3	1	Z1_1_1Z2_5_5B1_1_1B2_2_2B3_3_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 11	2	1	4	3	2	1	Z1_2_1Z2_1_1B1_4_1B2_3_1B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 12	3	1	4	4	2	1	Z1_3_2Z2_1_1B1_4_1B2_4_2B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 13	4	1	4	1	1	1	Z1_4_2Z2_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 14	2	2	4	2	2	1	Z1 2 1Z2 2 1B1 4 1B2 2 1B3 2 1B4 1 1K1A1L1C1T1

 Tabla 25: Pruebas realizadas en la caja de engranajes en una sola etapa.

Combinación 15	3	3	4	3	2	1	Z1_3_2Z2_3_2B1_4_1B2_2_2B3_2_1B4_3_1K1A1L1C1T1
Combinación 16	2	3	4	3	2	1	Z1_2_1Z2_3_2B1_4_1B2_3_2B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 17	2	4	4	4	2	1	Z1_2_1Z2_4_1B1_4_1B2_4_2B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 18	2	5	4	1	2	1	Z1_2_1Z2_5_2B1_4_1B2_1_1B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 19	2	5	4	1	3	1	Z1_2_1Z2_5_3B1_4_1B2_1_1B3_3_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 20	2	5	4	3	3	1	Z1_2_1Z2_5_4B1_4_1B2_3_2B3_3_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 21	2	5	4	3	3	1	Z1_2_1Z2_5_5B1_4_1B2_3_2B3_3_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 22	3	4	4	3	2	1	Z1_3_2Z2_4_1B1_4_1B2_3_1B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 23	3	2	4	3	2	1	Z1_3_2Z2_2_1B1_4_1B2_3_2B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 24	4	2	1	1	1	1	Z1_4_2Z2_2_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 25	4	2	1	1	2	1	Z1_4_2Z2_2_2B1_1_1B2_1_1B3_2_2B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 26	1	1	1	1	2	1	Z1_1_1Z2_1_1B1_1_1B2_1_1B3_2_2B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 27	1	2	1	4	2	1	Z1_1_1Z2_2_1B1_1_1B2_4_1B3_2_2B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 28	1	2	1	4	2	1	Z1_1_1Z2_2_2B1_1_1B2_4_1B3_2_2B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 29	1	3	1	3	2	1	Z1_1_1Z2_3_2B1_1_1B2_3_1B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 30	1	3	1	1	2	1	Z1_1_1Z2_3_1B1_1_1B2_1_1B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 31	1	4	1	4	2	1	Z1_1_1Z2_4_1B1_1_1B2_4_2B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 32	1	5	1	4	3	1	Z1_1_1Z2_5_3B1_1_1B2_4_2B3_3_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 33	1	5	1	1	3	1	Z1_1_1Z2_5_2B1_1_1B2_1_1B3_3_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 34	1	5	1	2	3	1	Z1_1_1Z2_5_4B1_1_1B2_2_2B3_3_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 35	1	5	1	3	3	1	Z1_1_1Z2_5_5B1_1_1B2_3_2B3_3_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 36	2	1	4	4	2	1	Z1_2_1Z2_1_1B1_4_1B2_4_2B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 37	3	1	4	3	2	1	Z1_3_2Z2_1_1B1_4_1B2_3_1B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 38	4	1	1	1	2	1	Z1_4_2Z2_1_1B1_1_1B2_1_1B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 39	2	2	4	3	2	1	Z1_2_1Z2_2_1B1_4_1B2_3_1B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 40	3	3	4	4	2	3	Z1_3_2Z2_3_2B1_4_1B2_4_2B3_2_1B4_3_1K1A1L1C1T1
Combinación 41	2	3	4	2	2	1	Z1_2_1Z2_3_2B1_4_1B2_2_1B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 42	2	4	4	3	2	1	Z1_2_1Z2_4_1B1_4_1B2_3_2B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 43	2	5	4	4	2	1	Z1_2_1Z2_5_2B1_4_1B2_4_2B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 44	2	5	4	1	2	1	Z1_2_1Z2_5_3B1_4_1B2_1_1B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 45	2	5	4	1	3	1	Z1_2_1Z2_5_4B1_4_1B2_1_1B3_3_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 46	2	5	4	3	3	1	Z1_2_1Z2_5_5B1_4_1B2_3_2B3_3_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 47	3	4	4	3	2	1	Z1_3_2Z2_4_1B1_4_1B2_3_2B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 48	3	2	4	2	2	1	Z1_3_2Z2_2_1B1_4_1B2_2_2B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 49	4	2	1	3	2	1	Z1_4_2Z2_2_1B1_1_1B2_3_2B3_2_1B4_1_1K1A1L1C1T1
Combinación 50	4	2	1	3	2	1	Z1_4_2Z2_2_2B1_1_1B2_3_2B3_2_2B4_1_1K1A1L1C1T1

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] N. F. G. H. Pablo Hernán Jiménez Rosende, "Técnica de la Demodulación en el Diagnóstico de Fallas en Máquinas rotatorias," Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2002.
- [2] Glen White, Introducción al Análisis de Vibraciones. 2011.
- [3] Gonzalo Daza Hernández, "Apuntes del curso Vibraciones Mecánicas," Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso Chile, 1, 2007.
- [4] Alvaro Alvarez Flores, "Base de datos de vibraciones para analisis de fallas en rodamientos de bolas," Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga Colombia, 2009.
- [5] O. Cardona Morales, "Análisis tiempo-frecuencia de señales de vibraciones mecánicas para la detección de fallos en máquinas rotativas = Time-Frequency analysis of mechanic vibration signals for fault detection in rotating machines," Maestría, Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, 2011.
- [6] J. J. Juan Sinchi, "Diseño y construcción de un banco didáctico para la medición de vibraciones mecánicas en los laboratorios de instrumentación de la Universidad Politécnica salesiana sede Cuenca," Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca, 2012.
- [7] Eduardo B, "Las fallas en los Engranajes," in *1*, vol. 1, Colombia, pp. 40–52.
- [8] Oyage F, "Gearbox Modeling and Load Simulation of a Baseline 750-kW Wind Turbine Using State-of-the-Art Simulation Codes," National Renewable Energy Laboratory, Colorado, Reporte 1ro, Feb. 2009.
- [9] Hankes B, "Assessing and Monitoring Girth Gearing Wear," USA, Reporte 1ro, Jun. 2005.
- [10] A. G. Moya J and Vélez J, "Máquinas y Equipos para el ensayo de transmisiones por engranajes," vol. 1, p. 24, Feb-2012.
- [11] H. Ozturk, I. Yesilyurt, and M. Sabuncu, "Detection and Advancement Monitoring of Distributed Pitting Failure in Gears," J. Nondestruct. Eval., vol. 29, no. 2, pp. 63–73, Mar. 2010.
- [12] W. Lu, W. Jiang, G. Yuan, and L. Yan, "A gearbox fault diagnosis scheme based on near-field acoustic holography and spatial distribution features of sound field," *J. Sound Vib.*, Feb. 2013.
- [13] D. G. Lewicki, P. J. Dempsey, G. F. Heath, and P. Shanthakumaran, "Gear Fault Detection Effectiveness as Applied to Tooth Surface Pitting Fatigue Damage," DTIC Document, 2009.
- [14] X. Zhao, M. J. Zuo, and Z. Liu, "Diagnosis of pitting damage levels of planet gears based on ordinal ranking," 2011, pp. 1–8.
- [15] K. G. M.M.Mayuram, "Gear Failure," in Machine Design, vol. II, India.
- [16] B. Eftekharnejad and D. Mba, "Monitoring Natural Pitting Progress on Helical Gear Mesh Using Acoustic Emission and Vibration," *Strain*, vol. 47, pp. 299–310, Dec. 2011.
- [17] W. K. Jiang, J. J. Hou, and J. T. Xing, "Research on Diagnosing the Gearbox Faults Based on Near Field Acoustic Holography," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 305, p. 012025, Jul. 2011.
- [18] E. B. Halim, M. Shoukat Choudhury, S. L. Shah, and M. J. Zuo, "Time domain averaging across all scales: A novel method for detection of gearbox faults," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 22, no. 2, pp. 261–278, 2008.
- [19] Y. Lei, J. Lin, Z. He, and D. Kong, "A Method Based on Multi-Sensor Data Fusion for Fault Detection of Planetary Gearboxes," *Sensors*, vol. 12, no. 12, pp. 2005–2017, Feb. 2012.
- [20] Y. Lei, M. J. Zuo, Z. He, and Y. Zi, "A multidimensional hybrid intelligent method for gear fault diagnosis," *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 2, pp. 1419–1430, Mar. 2010.
- [21] F. Chen, B. Tang, and R. Chen, "A novel fault diagnosis model for gearbox based on wavelet support vector machine with immune genetic algorithm," *Measurement*, vol. 46, no. 1, pp. 220–232, Jan. 2013.

- [22] Z. Shen, X. Chen, X. Zhang, and Z. He, "A novel intelligent gear fault diagnosis model based on EMD and multi-class TSVM," *Measurement*, vol. 45, no. 1, pp. 30–40, Jan. 2012.
- [23] Z. Li, X. Yan, C. Yuan, Z. Peng, and L. Li, "Virtual prototype and experimental research on gear multi-fault diagnosis using wavelet-autoregressive model and principal component analysis method," *Mech. Syst. Signal Process.*, 2011.
- [24] F. K. Choy, V. Polyshchuk, J. J. Zakrajsek, R. F. Handschuh, and D. P. Townsend, "Analysis of the effects of surface pitting and wear on the vibration of a gear transmission system," *Tribol. Int.*, vol. 29, no. 1, pp. 77–83, 1996.
- [25] N. Saravanan and K. I. Ramachandran, "Incipient gear box fault diagnosis using discrete wavelet transform (DWT) for feature extraction and classification using artificial neural network (ANN)," *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 6, pp. 4168–4181, Jun. 2010.
- [26] I. A. Abu-Mahfouz, "A comparative study of three artificial neural networks for the detection and classification of gear faults," *Int. J. Gen. Syst.*, vol. 34, no. 3, pp. 261–277, Jun. 2005.
- [27] H. Madej and G. Wojnar, "Classification of Tooth Gear Wheel Faults of Gearbox Working in the Circulating Power Test Rig by Multilayer Perceptron and Continuous Wavelet Transform," Aug. 2012.
- [28] S. Ebersbach, Z. Peng, and N. J. Kessissoglou, "The investigation of the condition and faults of a spur gearbox using vibration and wear debris analysis techniques," *Wear*, vol. 260, no. 1–2, pp. 16–24, Jan. 2006.
- [29] W. Wang and D. Kanneg, "An integrated classifier for gear system monitoring," Mech. Syst. Signal Process., vol. 23, no. 4, pp. 1298–1312, May 2009.
- [30] A. Soleimani, M. J. Mahjoob, and M. Shariatpanahi, "Fault classification in gears using support vector machines (SVMs) and signal processing," 2009, pp. 1–4.
- [31] "Detection of incipient tooth defect in helical gears using multivariate statistics," *Mech. Syst Signal Process.*, vol. 15, no. 2, p. 303, 2001.
- [32] W. Wang, "Early Detection of Gear Tooth Cracking Using the Resonance Demodulation Technique," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 15, no. 5, pp. 887–903, Sep. 2001.
- [33] W. Li, T. Shi, G. Liao, and S. Yang, "Feature extraction and classification of gear faults using principal component analysis," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 132–143, 2003.
- [34] Y. Shao and C. K. Mechefske, "Gearbox vibration monitoring using extended Kalman filters and hypothesis tests," *J. Sound Vib.*, vol. 325, no. 3, pp. 629–648, Agosto 2009.
- [35] S. Bhatnagar, V. Rajagopalan, and A. Ray, "Incipient fault detection in mechanical power transmission systems," 2005, vol. 1, p. 472.
- [36] S. Loutridis, "A local energy density methodology for monitoring the evolution of gear faults," *Ndt E Int.*, vol. 37, no. 6, pp. 447–453, 2004.
- [37] C. San Martín, E. Estupiñán, and D. San Martín, "A Methodology for the Detection and Diagnostic of Localized Faults in Gears and Rolling Bearings Systems," *Ingeniare Rev. Chil. Ing.*, vol. 18, pp. 44–52, 2010.
- [38] W. J. Staszewski and K. Worden, "Classification of faults in gearboxes—pre-processing algorithms and neural networks," *Neural Comput. Appl.*, vol. 5, no. 3, pp. 160–183, 1997.
- [39] S. N. Endo Hiroaki, "Gearbox Simulation Models with Gear and Bearing Faults," Prince Mohammad Bin Fahd University (PMU), Mechanical Engineering Department, AlKhobar, USA, 2.
- [40] S. A. Mohamed Khalil and Ibrahim Ahmed, "An Experimental Study on the Diagnostic Capability of Vibration Analysis for Wind Turbine Planetary Gearbox," Int. J. Mod. Eng. Res. Ijmer, vol. 2, no. 3, p. 9, Jun. 2012.
- [41] H. Endo, R. Randall, and C. Gosselin, "Differential diagnosis of spall vs. cracks in the gear tooth fillet region: Experimental validation," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 23, no. 3, pp. 636–651, 2009.
- [42] J. J. Zakrajsek, D. P. Townsend, and H. J. Decker, "An analysis of gear fault detection methods as applied to pitting fatigue failure data," DTIC Document, 1993.

- [43] J. Cheng, D. Yu, and Y. Yang, "A fault diagnosis approach for gears based on IMF AR model and SVM," *Eurasip J. Adv. Signal Process.*, vol. 2008, no. 21, 2008.
- [44] N. Feki, G. Clerc, and P. Velex, "An integrated electro-mechanical model of motor-gear units—Applications to tooth fault detection by electric measurements," *Mech. Syst. Signal Process.*, Oct. 2011.
- [45] Z. Li, X. Yan, C. Yuan, J. Zhao, and Z. Peng, "Fault detection and diagnosis of a gearbox in marine propulsion systems using bispectrum analysis and artificial neural networks," J. Mar. Sci. Appl., vol. 10, no. 1, pp. 17–24, Apr. 2011.
- [46] R. B. ROSTAING G and B. O. MARONI C, "Investigations of algorithms for bearing fault detection in induction drives," *28th Annu. Conf. Ind. Electron. Soc.*, vol. 2, p. 6, Nov. 2002.
- [47] S. R. J. P. Antonio Zamarrón Ramírez, "Diagnóstico de Fallas en Motores de Inducción mediante Redes Neuronales Artificiales," p. 9.
- [48] NTN, "Principales fallas de los rodamientos y cómo prevenirlas." Millenium, 2003.
- [49] FAG Sales Europe GmbH, Averías de los rodamientos, WL 82 102/2 SB., vol. 1. España, 2002.
- [50] Eduardo F, "Análisis de vibraciones para detección temprana de fallas en cojinetes de tipo Anti-Fricción," ESPOL, Guayaquil-Ecuador, 1991.
- [51] "Tutorial de Vibraciones para Mantenimiento Mecánico," A-MAQ S.A., Medellìn-Colombia, 1, Enero 2005.
- [52] J. C. García-Prada, C. Castejón, and O. J. Lara, "Incipient bearing fault diagnosis using DWT for feature extraction," 2007.
- [53] K. M. Bhavaraju, P. K. Kankar, S. C. Sharma, and S. P. Harsha, "A Comparative Study on Bearings Faults Classification by Artificial Neural Networks and Self-Organizing Maps using Wavelets," *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 5, pp. 1001–1008, 2010.
- [54] A. Rezaei, A. Dadouche, V. Wickramasinghe, and W. Dmochowski, "A Comparison Study Between Acoustic Sensors for Bearing Fault Detection Under Different Speed and Load Using a Variety of Signal Processing Techniques," *Tribol. Trans.*, vol. 54, no. 2, pp. 179–186, Jan. 2011.
- [55] Y. Yang, D. Yu, and J. Cheng, "A fault diagnosis approach for roller bearing based on IMF envelope spectrum and SVM," *Measurement*, vol. 40, no. 9–10, pp. 943–950, Nov. 2007.
- [56] G. Marichal, M. Artes, and J. Garcia-Prada, "An intelligent system for faulty-bearing detection based on vibration spectra," *J. Vib. Control*, vol. 17, no. 6, pp. 931–942, Oct. 2010.
- [57] Z. Liu, H. Cao, X. Chen, Z. He, and Z. Shen, "Multi-fault classification based on wavelet SVM with PSO algorithm to analyze vibration signals from rolling element bearings," *Neurocomputing*, vol. 99, pp. 399–410, Jan. 2013.
- [58] M. Cocconcelli, R. Zimroz, R. Rubini, and W. Bartelmus, "STFT based approach for ball bearing fault detection in a varying speed motor," *Cond. Monit. Mach. Non-Station. Oper.*, pp. 41–50, 2012.
- [59] Fucai Li, Guang Meng, Lin Ye, and Peng Chen, "Wavelet Transform-based Higher-order Statistics for Fault Diagnosis in Rolling Element Bearings," J. Vib. Control, vol. 14, no. 11, pp. 1691–1709, Nov. 2008.
- [60] Case Western Reserve University, "Fault Specifications | Bearing Data Center."
- [61] A. Widodo, E. Y. Kim, J.-D. Son, B.-S. Yang, A. C. C. Tan, D.-S. Gu, B.-K. Choi, and J. Mathew, "Fault diagnosis of low speed bearing based on relevance vector machine and support vector machine," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, no. 3, pp. 7252–7261, Apr. 2009.
- [62] Danfoss, "VLT® AutomationDrive FC 302," Danfoss, Madrid, 2004.
- [63] "Sick DFS60B-S4PL10000 (1036723) | Vision-Supplies.com Vision, Sensors & Automation Components Distributor."
- [64] Erbessd Instruments [en línea]. [Consultado Noviembre 2012]. Disponible en: http://www.erbessd-instruments.com

- [65] Bearing Search Results | NTN Bearing [en línea]. [Consultado Noviembre 2012]. Disponible en: http://www.ntnamericas.com
- [66] Jose Antonio Cavanilles, "Proyecto Modelo:Reductora de velocidad.".
- [67] Paramax, "Paramax Serie Manual de mantenimiento." [Consultado Diciembre 2012]. Disponible en: http://www.tramecltda.com
- [68] Gulf, "Gulf EP Lubricant HD." [Consultado Diciembre 2012]. Disponible en:
- http://www.lubrisa.com/fichas tecnicas/Industriales y de proceso/Gulf EP Lubricant HD.pdf
- [69] Víctor Humberto Ayala Matus, "Guía de mantenimiento preventivo, desarme y armado de reductores de velocidad tipo KMP marca Flender utilizados en el accionamiento de molinos verticales para la fabricación de cemento," Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2010.
- [70] ISO, "International Standard ISO 10816-3," ISO, USA, 1, Mar. 2003.
- [71] ISO, "International Standard ISO 10816-1," USA, 5, Feb. 2003.
- [72] ISO, "International Standard ISO 10816-2," USA, 2, Nov. 2001.

## ANEXO A – PLANOS PARA LA CONSTRUCCIÒN DE FALLOS EN ENGRANAJES RECTOS

### A1 Plano para construcción de picadura en una rueda dentada diente recto



Figura A1: Dimensiones de picadura en rueda dentada.

## A2 Plano para construcción de desgaste en una rueda dentada diente recto



Descripción	Modulo	Numer o de dientes	Φ de presión	Diámetro primitivo	Diámetro exterior	Profundidad del diente	Ancho del diente
Z1	2.25	27	20	60.75mm	65.25mm	5.0625mm	20mm
Z3	2.25	53	20	119.25m m	123.75mm	5.0625mm	20mm





Figura A2: Dimensiones de desgaste en rueda dentada.



### A3 Plano para construcción de grieta en una rueda dentada diente recto

Figura A3: Dimensiones de grieta en rueda dentada.



### A4 Plano para construcción de escoriado al 25% en una rueda dentada diente recto

Figura A4: Dimensiones de escoriado al 25% en rueda dentada.



#### Plano para construcción de escoriado al 100% en una rueda dentada diente recto A5

Escala 0.75:1

Figura A5: Dimensiones de escoriado al 100% en rueda dentada.

## ANEXO B – PLANOS PARA LA CONSTRUCCIÒN DE FALLOS EN RODAMIENTOS RÌGIDOS DE BOLAS

B1 Plano para construcción de 2 picaduras en pista exterior de un rodamiento rígido de bolas



Figura B1: Dimensiones de 2 picaduras en pista exterior de un rodamiento rígido de bolas.

B2 Plano para construcción de 4 picaduras en pista exterior de un rodamiento rígido de bolas



NTN Part Nu	mber	6005ZC3/0G			
W	eight	N/A (lbs) / N/A (kg)			
	DIME	NSIONS			
DIMENSION	IMF	PERIAL	METRIC		
Bore d	0	.9843 (in)	25.000 (mm)		
0.D.D.	1	.8504 (in)	47.000 (mm)		
Width B or W	0	.4724 (in)	12.000 (mm)		
rs min	0	.0236 (in)	0.600 (mm)		
D1 max	1	.7559 (in)	44.600 (mm)		
a max	0	.0811 (in)	2.060 (mm)		
b min	0	.0532 (in)	1.350 (mm)		
ro max	0	.0157 (in)	0.400 (mm)		
rns min	0	.0197 (in)	0.500 (mm)		
D2 max	2	.0748 (in)	52.700 (mm)		
f max	0	.0441 (in)	1.120 (mm)		
da min	1	.1417 (in)	29.000 (mm)		
da max	1	.2008 (in)	30.500 (mm)		
Da max	1	.6929 (in)	43.000 (mm)		
ras max	0	.0236 (in)	0.600 (mm)		
Dx min	2	.1063 (in)	53.500 (mm)		
Cy max	0	.1142 (in)	2.900 (mm)		
Cz min	0	.0472 (in)	1.200 (mm)		
rnas max	0	.0197 (in)	0.500 (mm)		

Ø1

Figura B2: Dimensiones de 4 picaduras en pista exterior de un rodamiento rígido de bolas.

**B3** Plano para construcción de 2 picaduras en pista interior de un rodamiento rígido de bolas

05ZC3/0G
A (lbs) / N/A (kg)
ONS
AL METRIC
AL         METRIC           2 (in)         25.000 (mm)           4 (in)         47.000 (mm)           4 (in)         12.000 (mm)           5 (in)         0.600 (mm)           6 (in)         44.600 (mm)           1 (in)         2.060 (mm)           2 (in)         1.350 (mm)           2 (in)         0.400 (mm)           2 (in)         0.500 (mm)           3 (in)         52.700 (mm)           4 (in)         1.120 (mm)           7 (in)         29.000 (mm)           3 (in)         53.500 (mm)           3 (in)         53.500 (mm)           2 (in)         2.900 (mm)           2 (in)         2.900 (mm)           2 (in)         0.500 (mm)
5 3 2 2 7

Figura B3: Dimensiones de 2 picaduras en pista interior de un rodamiento rígido de bolas.
B4 Plano para construcción de 4 picaduras en pista interior de un rodamiento rígido de bolas

		Ø0.7 ×	Weig	ht N/A (lbs)	/ N/A (kg)	
	╼┼┼╼	<u> </u>		DIMENSIONS		
			DIMENSION	IMPERIAL	METRIC	
			Bore d	0.9843 (in)	25.000 (mm)	
			0.D.D.	1.8504 (in)	47.000 (mm)	
			Width B or W	0.4724 (in)	12.000 (mm)	
			rs min	0.0236 (in)	0.600 (mm)	
			D1 max	1.7559 (in)	44.600 (mm)	
			a max	0.0811 (in)	2.060 (mm)	
			b min	0.0532 (in)	1.350 (mm)	
			ro max	0.0157 (in)	0.400 (mm)	
			rns min	0.0197 (in)	0.500 (mm)	
			D2 max	2.0748 (in)	52.700 (mm)	
			f max	0.0441 (in)	1.120 (mm)	
			da min	1.1417 (in)	29.000 (mm)	
			da max	1.2008 (in)	30.500 (mm)	
			Da max	1.6929 (in)	43.000 (mm)	
(1)			ras max	0.0236 (in)	0.600 (mm)	
			Dx min	2.1063 (in)	53.500 (mm)	
			Cy max	0.1142 (in)	2.900 (mm)	
$\land \land $			Cz min	0.0472 (in)	1.200 (mm)	
			rnas max	0.0197 (in)	0.500 (mm)	

NTN Part Number 6005ZC3/0G

Figura B4: Dimensiones de 4 picaduras en pista interior de un rodamiento rígido de bolas.

**B5** Plano para construcción de picadura en 2 bolas de un rodamiento rígido de bolas



NTN Part Nu	mber	6005ZC3/0G						
Weight		t N/A (lbs) / N/A (kg)		g)				
DIMENSIONS								
DIMENSION	IMF	IMPERIAL		ETRIC				
Bore d	0	0.9843 (in)		000 (mm)				
O.D.D.	1	1.8504 (in)		000 (mm)				
Width B or W	0	0.4724 (in)		000 (mm)				
rs min	0.0236 (in)		0.	600 (mm)				
D1 max	1.7559 (in)		44.	600 (mm)				
a max	0	0.0811 (in)		060 (mm)				
b min	0	0.0532 (in)		350 (mm)				
ro max	0.0157 (in)		0.	400 (mm)				
rns min	0.0197 (in)		0.	500 (mm)				
D2 max	2.0748 (in)		52.	700 (mm)				
f max	0.0441 (in)		1.	120 (mm)				
da min	1.1417 (in)		29.	000 (mm)				
da max	1.2008 (in)		30.	500 (mm)				
Da max	1.6929 (in)		43.	000 (mm)				
ras max	0.0236 (in)		0.	600 (mm)				
Dx min	2.1063 (in)		53.	500 (mm)				
Cy max	0.1142 (in)		2.	900 (mm)				
Cz min	0.0472 (in)		1.	200 (mm)				
rnas max	0.0197 (in)		0.	500 (mm)				

Figura B5: Dimensiones de picadura en 2 bolas de un rodamiento rígido de bolas.

B6 Plano para construcción de picadura en 4 bolas de un rodamiento rígido de bolas



NTN Part Number		6005ZC3/0G						
W	eight	N/A (lbs) / N/A (kg)						
·								
DIMENSIONS								
DIMENSION	IMPERIAL		METRIC					
Bore d	0.9843 (in)		25.000 (mm)					
0.D.D.	1.8504 (in)		47.000 (mm)					
Width B or W	0.4724 (in)		12.000 (mm)					
rs min	0.0236 (in)		0.600 (mm)					
D1 max	1.7559 (in)		44.600 (mm)					
a max	0.0811 (in)		2.060 (mm)					
b min	0.0532 (in)		1.350 (mm)					
ro max	0.0157 (in)		0.400 (mm)					
rns min	0.0197 (in)		0.500 (mm)					
D2 max	2.0748 (in)		52.700 (mm)					
f max	0.0441 (in)		1.120 (mm)					
da min	1.1417 (in)		29.000 (mm)					
da max	1.2008 (in)		30.500 (mm)					
Da max	1.6929 (in)		43.000 (mm)					
ras max	0.0236 (in)		0.600 (mm)					
Dx min	2.1063 (in)		53.500 (mm)					
Cy max	0.1142 (in)		2.900 (mm)					
Cz min	0.0472 (in)		1.200 (mm)					
rnas max	0.0197 (in)		0.500 (mm)					

Figura B6: Dimensiones de picadura en 4 bolas de un rodamiento rígido de bolas.