

**BASE DE DATOS DE VIBRACIONES PARA ANALISIS DE FALLAS EN  
RODAMIENTOS DE BOLAS**

**ALVARO ALVAREZ FLOREZ**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2009**

**BASE DE DATOS DE VIBRACIONES PARA ANALISIS DE FALLAS EN  
RODAMIENTOS DE BOLAS**

**ALVARO ALVAREZ FLOREZ**

**Trabajo de grado para optar por el título de  
INGENIERO MECÁNICO**

**DIRECTOR  
GILBERTO FONTECHA DULCEY  
Ingeniero Mecánico  
Msc. Sonido y Vibraciones**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2009**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Bucaramanga, Enero de 2009**

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a mis padres Dora y Alvaro,  
A mis hermanos Dayan y Jorge Andrés  
Que siempre me apoyaron, para salir adelante,  
Quienes estuvieron presentes brindándome  
Su amor y comprensión*

## **AGRADECIMIENTO**

Le agradezco al Ingeniero Gilberto, por ofrecerme la oportunidad de conocer y aprender nuevas cosas; también a los docentes que tuve a lo largo de esta etapa de mi vida que ya culmina, los cuales aclararon muchas de mis dudas y los que me brindaron su amistad.

## CONTENIDO

PAGINA DE ACEPTACION.....	3
CONTENIDO.....	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABLAS.....	10
ANEXOS .....	12
RESUMEN.....	13
ABSTRACT.....	14
INTRODUCCIÓN.....	15
OBJETIVOS.....	16
OBJETIVO GENERAL.....	16
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	16
1. MARCO TEORICO.....	17
1.1. DIAGNOSTICO DE FALLAS.....	17
1.2. RODAMIENTOS.....	17
1.3. FRECUENCIAS DE LOS RODAMIENTOS.....	17
1.4. FORMULAS.....	18
1.5. METODOLOGÍA.....	19
1.5.1. METODOLOGÍA GENERAL.....	19
1.5.2. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN.....	20
1.6. TÉCNICAS DE MEDICIÓN.....	21
1.6.1. TÉCNICAS DE MEDECIÓN UTILIZADAS.....	21

2. DEARROLLO DEL BANCO DE PRUEBAS.....	25
2.1. IDENTIFICACIÓN DE FRECUENCIAS NATURALES DEL BANCO.....	28
2.2. ESTUDIOS ANALÍTICOS DE LAS CHUMACERAS.....	29
2.2.1. RESULTADOS SIMULACIÓN ANSYS 10.....	30
2.2.2. ESTUDIOS EXPERIMENTALES DE LAS CHUMACERAS.....	30
2.3. PRUEBAS.....	31
2.3.1. PRUEBA 1.....	31
2.3.1.1. PRIMERA PARTE.....	32
2.3.1.2. SEGUNDA PARTE.....	32
2.3.2. PRUEBA 2.....	33
2.3.2.1. PRIMERA PARTE.....	33
2.3.2.2. SEGUNDA PARTE.....	34
2.3.3. PRUEBA 3.....	35
2.3.3.1. PRIMERA PARTE.....	35
2.3.3.2. SEGUNDA PARTE.....	36
2.4. PRUEBAS PLACA.....	37
3. MÁQUINAS SELECCIONADAS.....	42
3.1. BOMBAS PRINCIPALES DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO DEL EDIFICIO J.....	43
3.1.1. METODOLOGÍA UTILIZADA EN LA RECOLECCIÓN DE DATOS DE LAS BOMBAS DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO DEL EDIFICIO J.....	44
3.2. MANEJADORA DE AIRE DEL LABORATORIO I-206.....	44
3.2.1. METODOLOGÍA UTILIZADA EN LA RECOLECCIÓN DE DATOS DE LA UNIDAD MANEJADORA DEL I-206.....	46
4. RESULTADOS Y ANALISIS.....	47
4.1. BOMBAS PRINCIPALES DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO DEL EDIFICIO J.....	47
4.2. MANEJADORA DE AIRE DEL LABORATORIO I-206.....	70
4.3. BANCO DE PRUEBAS.....	75

5. BASE DE DATOS.....	81
6. IMPACTO.....	86
CONCLUSIONES.....	87
BIBLIOGRAFIA.....	88

## LISTA DE FIGURAS

	PAG.
Figura 1: Partes del rodamiento de bolas.....	16
Figura 2: Metodología General.....	18
Figura 3: Metodología de Medición.....	19
Figura 4: Señal Tomada.....	20
Figura 5: Señal Después de pasa banda.....	21
Figura 6: Señal aplicándole la Envolvente.....	22
Figura 7: Procesamiento por Wavelets.....	23
Figura 8: Dimensiones rodamiento 6305.....	24
Figura 9: Banco de Pruebas rodamientos de bolas de carga radial.....	26
Figura 10: a) Simulación en ANSYS, b) Representación Solid Edge.....	28
Figura 11: Equipo usado para las Pruebas.....	30
Figura 12: Ubicación acelerómetros Prueba 1.....	30
Figura 13: a) Frecuencias de respuesta acelerómetro 1, b) Frecuencia de respuesta acelerómetro 2.....	31
Figura 14: a) Frecuencias de respuesta acelerómetro 1, b) Frecuencia de respuesta acelerómetro 2.....	32
Figura 15: Ubicación acelerómetros Prueba 2.....	32
Figura 16: a) Frecuencias de respuesta acelerómetro 1, b) Frecuencia de respuesta acelerómetro 2.....	33
Figura 17: a) Frecuencias de respuesta acelerómetro 1, b) Frecuencia de respuesta acelerómetro 2.....	33
Figura 18: Ubicación acelerómetros Prueba 3.....	34

Figura 19: a) Frecuencias de respuesta acelerómetro 1, b) Frecuencia de respuesta acelerómetro 2.....	34
Figura20: a) Frecuencias de respuesta acelerómetro 1, b) Frecuencia de respuesta acelerómetro 2.....	35
Figura 21: Ubicación de los sensores y como se suspendió la placa para la prueba.....	37
Figura 22: Equipos utilizados.....	37
Figura 23: Medición en LABVIEW.....	38
Figura 24: Primer armónico encontrado por simulación en ANSYS.....	39
Figura 25: Segundo armónico encontrado por simulación en ANSYS.....	39
Figura 26: Bomba TACO FI2508.....	42
Figura 27: Ubicación y distribución del los sensores en las Bombas TACO FI2508.....	43
Figura 28: Disposición del los rodamientos en la unidad manejadora de aire acondicionado del I-206.....	44
Figura 29: a)Enveloping rodamiento 3, b)Enveloping rodamiento 4, c) Wavelets rodamiento 3, d)Wavelets rodamiento 4; muestra 1 BAC 01.....	49
Figura 30: a)Enveloping rodamiento 3, b)Enveloping rodamiento 4, c) Wavelets rodamiento 3, d)Wavelets rodamiento 4; muestra 3 BAC 01.....	51
Figura 31: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2; muestra 2 BAC 01.....	53
Figura 32: a)Enveloping rodamiento 3, b)Enveloping rodamiento 4, c) Wavelets rodamiento 3, d)Wavelets rodamiento 4; BAF-CP-01 muestra1.....	55
Figura 33: a)Enveloping rodamiento 3, b)Enveloping rodamiento 4, c) Wavelets rodamiento 3, d)Wavelets rodamiento 4, BAF-CP-01 muestra5.....	57
Figura 34: a)Enveloping rodamiento 3, b)Enveloping rodamiento 4, c) Wavelets rodamiento 3, d)Wavelets rodamiento 4, BAF-CP-01 muestra10.....	59
Figura 35: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2, BAF-CP-01 muestra1.....	61

Figura 36: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2, BAF-CP-01 muestra 8.....	63
Figura 37: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2,BAF-CP-01 muestra18.....	65
Figura 38: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2,BAF-CP-Temperatura ambiente.....	67
Figura 39: Muestras de la BAF-CP-01 Vrs valor de la aceleración pico de la componente BPFi en gravedades.....	68
Figura 40: a)Enveloping rodamiento, b) Wavelets rodamiento. Muestra 1.....	70
Figura 41: a)Enveloping rodamiento, b) Wavelets rodamiento. Muestra 5.....	71
Figura 42: a)Enveloping rodamiento, b) Wavelets rodamiento. Muestra 8.....	72
Figura 43: a)Enveloping rodamiento, b) Wavelets rodamiento. Muestra BRG17...	73
Figura 44: Disposición del los rodamientos en el banco de pruebas.....	74
Figura 45: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2,muestra 1.....	75
Figura 46: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2,muestra 2.....	76
Figura 47: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2, muestra 4.....	77
Figura 48: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2,muestra 5-1.....	78
Figura 46: Enveloping y wavelets del rodamiento 1 banco de pruebas.....	79
Figura 47: Exposición en INGENIAR.....	86

## LISTA DE TABLAS

	PAG
Tabla 1. Propiedades Mecánicas Duraluminio.....	26
Tabla 2: Resultados analíticos de Frecuencias Naturales de las chumaceras. ....	30
Tabla 3: Frecuencias Naturales Experimental.....	36
Tabla 4: Propiedades Mecánicas Obtenidas para el Duraluminio de las Chumaceras.....	37
Tabla 5: Frecuencias obtenidas en Ansys después de hacer los ajustes en las propiedades.....	39
Tabla 6: Propiedades Mecánicas Obtenidas para la Placa.....	41
Tabla 7: frecuencias, horas y porcentaje de funcionamiento de la unidad Manejadora del I-206.....	46
Tabla 8: Armónicos del rodamiento 6207.....	47
Tabla 9: Armónicos del rodamiento 6205.....	48
Tabla 10: Armónicos del rodamiento 6210z.....	48
Tabla 11: Armónicos del rodamiento UC204-012 a 30Hz.....	70
Tabla 12: Armónicos del rodamiento UC204-012 a 45Hz.....	70
Tabla 13: Armónicos del rodamiento UC204-012 a 60Hz.....	70
Tabla 14: Armónicos del rodamiento 6305rs. ....	75
Tabla 15: ubicación y nombre de las muestras de BAC 01 del motor.....	81
Tabla 16: ubicación y nombre de las muestras de BAC 01 de la bomba.....	82
Tabla 17: ubicación y nombre de las muestras de BAF-CP-01 del motor.....	83
Tabla 17: ubicación y nombre de las muestras de BAF-CP-01 de la bomba.....	84
Tabla 19: ubicación y nombre de las muestras de la unidad manejadora de aire i-206.....	85

## LISTA DE ANEXOS

1. Manual Del Adaptador De Señal Ni-9233.
2. Manual Del Acelerómetro Pcb-352c34.
3. Manual Martillo Impulsional Pcb-086c01.
4. Manual Del Compacdaq 9172.
5. Manuales Labview, Sound And Vibration Toolkit.
6. Artículos De Interés.
7. Manual De Mantenimiento Del Edificio J.
8. Libro De Excel, Para Calcular Los Armónicos De Los Rodamientos.
9. Planos, Despiece Y Catalogo De Las Bombas Del Edificio J.
10. Armónicos Y Dimensiones De Los Rodamientos.
11. Formatos Utilizados Para La Toma De Las Muestras De Las Bombas Del J.
12. Planos Banco De Vibraciones.

## **RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

### **TITULO:**

BASE DE DATOS DE VIBRACIONES PARA ANALISIS DE FALLAS EN RODAMIENTOS DE BOLAS

### **AUTOR(ES):**

ALVARO ALVAREZ FLOREZ

### **FACULTAD:**

Facultad de Ingeniería Mecánica

### **DIRECTOR(A):**

GILBERTO FONTECHA DULCEY

### **RESUMEN**

En este trabajo de grado se realizó un monitoreo de vibraciones en 3 maquinas de servicio y una de laboratorio especialmente diseñada, con el objeto de analizar las dos técnicas de detección temprana de fallas en rodamientos de bolas. Para el cumplimiento de los objetivos se llevaron a cabo mediciones periódicas de vibraciones y sus datos organizados en bases de datos. Los resultados muestran que aun cuando con la utilización de wavelets es posible identificar fallas en rodamientos más tempranamente que con enveloping, aún se presentan dificultades relacionadas con el procesamiento de la señal para un eventual uso masivo de wavelets.

### **PALABRAS CLAVES:**

Monitoreo, vibraciones, wavelets, enveloping, rodamientos

## **RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

### **TITULO:**

BASE DE DATOS DE VIBRACIONES PARA ANALISIS DE FALLAS EN RODAMIENTOS DE BOLAS

### **AUTOR(ES):**

ALVARO ALVAREZ FLOREZ

### **FACULTAD:**

Facultad de Ingeniería Mecánica

### **DIRECTOR(A):**

GILBERTO FONTECHA DULCEY

### **RESUMEN**

This diploma work is about machinery vibration monitoring. Three service machines and one especially designed lab machine were. The aim is to test wavelets and enveloping as techniques to perform early fault detection on rolling bearings. The methodology used was to take periodic vibration measurements and the data stored in organized data bases. The results evidenced that even if using wavelets, it is possible to detect faults on rolling bearings earlier than using enveloping; there are still difficulties towards its massive use related with the signal processing.

### **PALABRAS CLAVES:**

Monitoring, vibration, wavelets, enveloping, bearings.

## INTRODUCCIÓN

Hoy día es necesario implementar en la mayor parte de los equipos industriales un mantenimiento predictivo, el cual permita ahorrar tiempo y dinero en mantenimiento de las máquinas dando así un mayor rendimiento a la industria y materias primas.

Es por esto el estudio que se realizó, fue el de comparar dos técnicas de predicción de fallas como lo son el Envelipong y Wavelets, los cuales nos permiten predecir daños generados en las pistas de los rodamientos de las maquinas a través del estudio de las vibraciones presentes en ellas y así darles un margen de vida útil de los rodamientos en las maquinas para que hagan su plan de mantenimiento y realizan las correcciones necesarias.

El objetivo de este estudio es el de contribuir en el proceso de mejora de herramientas de predicción temprana de fallas en rodamientos, que por su naturaleza de baja energía hacen de esta una tarea difícil de realizar.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

- Generar una base de datos de vibraciones en maquinaria rotativa, con rodamientos de bolas, mediante un plan de monitoreo periódico; para permitir el estudio de técnicas de análisis de fallas en rodamientos con propósitos de investigación.

### **Objetivos Específicos**

- Construir un banco de pruebas de rodamientos de bolas a partir de un diseño predefinido para toma de datos en ambiente controlado de Laboratorio.
- Generar una metodología de medición de datos mediante estudio bibliográfico de los temas relevantes para dar uniformidad y conclusión a las distintas técnicas realizadas.
- Realizar medición de vibraciones en 3 máquinas de servicio industriales a seleccionar, y una de pruebas las cuales permitan la generación de la bases de datos.
- Realizar un procesamiento de los datos mediante la aplicación de Enveloping y Wavelets para permitir el análisis de estas técnicas.

## **1. MARCO TEORICO**

## **1.1. EL DIAGNÓSTICO DE FALLAS**

Las vibraciones que se pueden medir en los alojamientos de los cojinetes y ejes de las máquinas se utilizan para predecir su falla. En general la amplitud de la vibración que se toma corresponde con la severidad de la falla que la genera. Las fuentes que generan las vibraciones algunas veces excitan algunas frecuencias naturales del sistema y no cambian con la variación de velocidad del sistema.

Con la ayuda de las vibraciones se pueden identificar los diferentes tipos de fallas que se pueden presentar en el sistema; como lo son los desalineamientos, desbalances de masa y soldaduras. La velocidad de operación es la frecuencia de referencia para diagnosticar las fallas del sistema.

### **1.2 Rodamientos**

Cuando las bolas pasan por un defecto en la canastilla o pistas se genera un pulso que excita todas las frecuencias del rodamiento. El diseño de la máquina determina la magnitud y periodicidad de la vibración obtenida en el rodamiento.

### **1.3. Las Frecuencias de los Rodamientos**

Los elementos de los rodamientos generan frecuencias de acuerdo a su geometría y velocidad de operación.

Cuatro frecuencias básicas pueden ser generadas por rodamientos defectuosos, las cuales son [5]:

- Frecuencia de paso de las bolas por la pista exterior (BPFO); que es generado por el paso de las bolas sobre los defectos de la pista.
- Frecuencia de paso de las bolas por la pista interior (BPFI); que es generado por el paso de las bolas sobre los defectos de la pista.

- Frecuencia de giro de la bola o rodillo (BSF); generado por los defectos en las bolas.
- Frecuencia fundamental del tren (FTF); generado por los defectos en la jaula o por movimientos inadecuados.

La figura 1 muestra las partes del rodamiento de bolas:

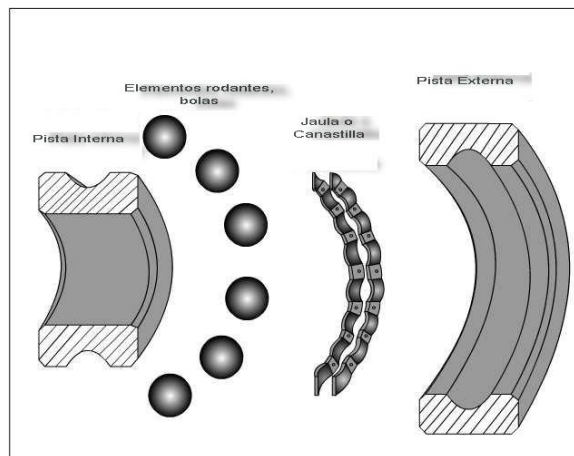


Figura 1: Partes del Rodamiento de Bolas [4]

#### 1.4. Fórmulas

$$\Omega = RPS = RPM/60. [5]$$

$$FTF = (\Omega/2) \{1 - (B/P) \cos \Phi\}. [5]$$

$$BPFI = (N/2) \Omega \{1 + (B/P) \cos \Phi\}. [5]$$

$$BPFO = (N/2) \Omega \{1 - (B/P) \cos \Phi\}. [5]$$

$$BSF = (P/2B) \Omega \{1 - (B/P)^2 \cos^2 \Phi\}. [5]$$

- $\Phi$ = Angulo de contacto; ángulo entre la línea perpendicular al eje y del centro de la bola al punto dónde la bola hace contacto con el arco de la pista,
- $N$ = Número de elementos rodantes (bolas).
- $P$ = Diámetro primitivo; en pulgadas.
- $B$ = Diámetro de la bola, en pulgadas.
- $RPS$ = velocidad de rotación, unidades en revoluciones por segundo.

Para el cálculo de las anteriores frecuencias se deben consultar además bases de datos del fabricante del rodamiento para conocer con exactitud los parámetros físicos necesarios. Actualmente existen también herramientas de cálculo de frecuencias como The Bearing Expert tm.[5]

## 1.5. METODOLOGÍA

### 1.5.1. Metodología general

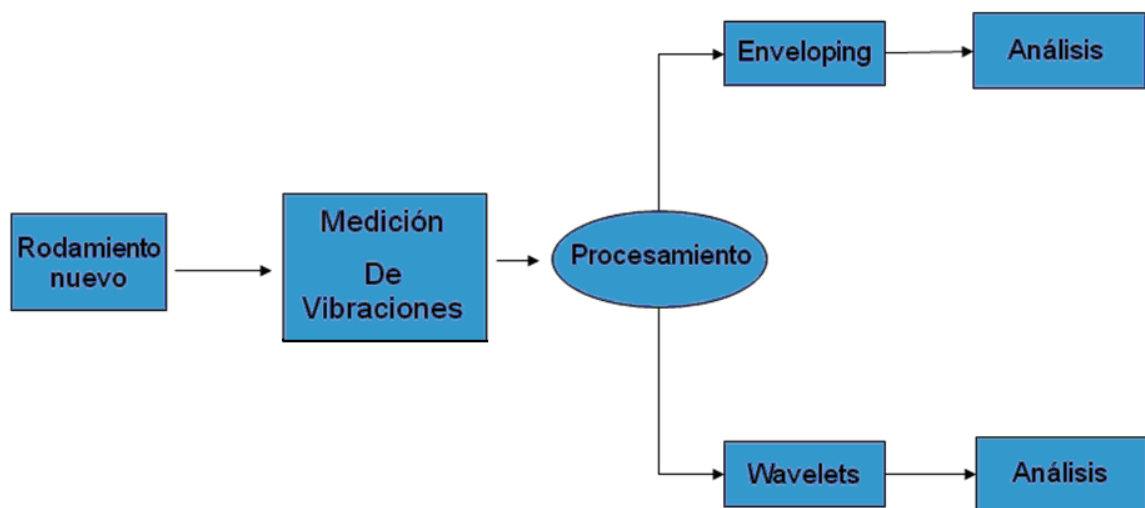


Figura 2: Metodología General.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 2 vemos la Metodología General que se utilizó en este estudio y cuáles fueron los pasos a seguir en el:

- se partía de saber que el rodamiento que se estaba sensando era nuevo y no tenía ninguna falla en ninguno de sus elementos.

- Se hacia la medición en las maquinas seleccionadas, se obtiene la señal de vibraciones donde se encuentra inmersa la frecuencia que estamos buscando.
- Luego se hace el procesamiento de los datos de la señal adquirida, por las técnicas, enveloping y wavelets.
- Se analiza cada uno de los resultados obtenidos en cada una de las técnicas y se hacia la observación correspondiente.

### 1.5.2. Metodología de Medición

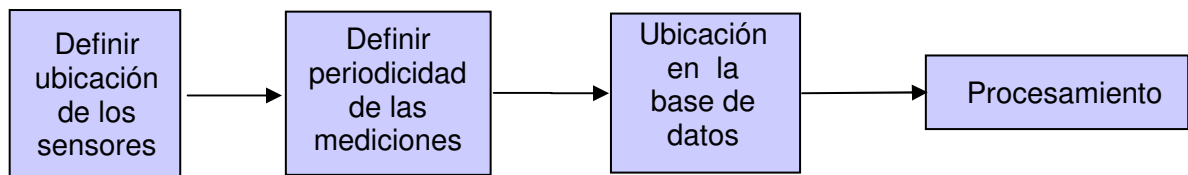


Figura 3: Metodología de Medición.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 3 se observa la metodología de medición utilizada:

- Lo primero era definir donde se ubicarán los sensores, estos deben estar lo mas cerca al rodamiento (lo ideal seria que se midiera directamente sobre el rodamiento), para obtener la muestra lo mas pura posible.
- Al definir la periodicidad de las mediciones se hace sabiendo cuanto tiempo trabaja la máquina; y se determina que las muestras sean tomadas con la misma intensidad de horas de funcionamiento de las máquinas para tener un periodo de desgaste uniforme.
- La ubicación en la base de datos se hace de forma automática, en carpetas las cuales tienen el nombre de la máquina y unas subcarpetas con la parte de la maquina y el nombre de la muestra que se realiza.
- El procesamiento se realiza por las dos técnicas enveloping y wavelets.

### .1.6. TÉCNICAS DE MEDICIÓN

El análisis de las vibraciones en las máquinas para predecir fallas en los rodamientos abarca los mismos principios de los equipos de velocidad moderada y baja. Todas las mediciones deben efectuarse lo más cerca del rodamiento y en la zona de carga. La medición radial se emplea para rodamientos radiales.

Es necesario tener en cuenta que las señales grandes son producidas por la velocidad de rotación, desbalance y demás frecuencias pueden tener ocultas las amplitudes pequeñas de los defectos del rodamiento. Las frecuencias discretas se presentan en la fase inicial de la falla; las bandas vecinas en las últimas etapas.

### 1.6.1. TÉCNICAS DE MEDICIÓN UTILIZADAS

- **Enveloping**

Esta técnica permite la detección y análisis de vibraciones impulsionales de baja energía y altas frecuencias como las provenientes de rodamientos en su etapa temprana de falla mediante su extracción de la señal de aceleración de vibración general medida en la carcasa de una máquina.

La figura 4 representa la señal original tomada antes del procesamiento

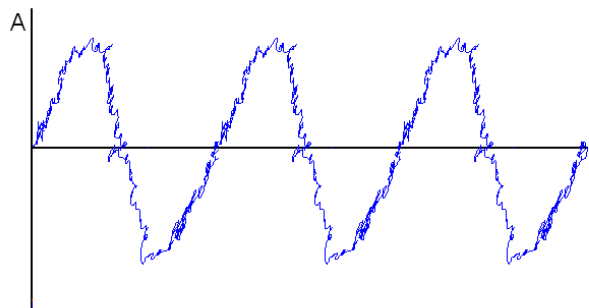


Figura 4: Señal Tomada.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

El primer paso para la aplicación de enveloping consiste en someter la señal original a un filtro pasa banda, cuyos límites superior e inferior deben configurarse de tal manera que solo pasen aquellas frecuencias relativas a la vibración natural de la carcasa de la máquina y que elimine tanto las frecuencias bajas relativas al giro del rotor como las frecuencias altas relativas a ruidos. [4] [5] [6] [9]

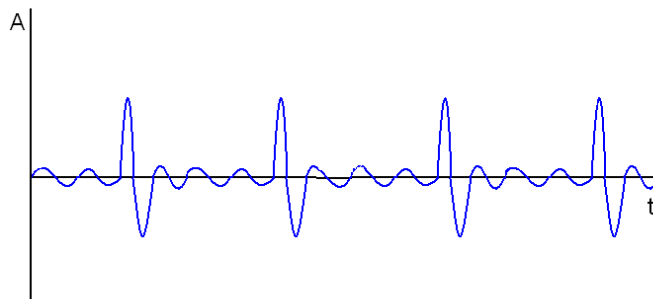


Figura 5: Señal Después de pasa banda.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

Conocer las frecuencias naturales de la estructura de la máquina implica realizar un análisis modal de esta, lo que puede realizar en software de simulación como ANSYS, no sin antes haber modelado completamente la estructura y conocer sus propiedades mecánicas. Otra manera es la medición de la frecuencia de respuesta al impulso mediante impacto con un martillo cuya señal de fuerza de entrada debe ser medida simultáneamente con la respuesta del sistema. Debido a que la señal resultante de la aplicación del filtro pasa-banda se caracteriza por una sucesión de impulsos a las frecuencias naturales de la carcasa de la máquina Figura 5, el siguiente paso corresponde entonces a la demodulación de esta señal mediante aplicación de enveloping para obtener una tercera señal que se caracteriza porque sus componentes de frecuencia corresponden a la periodicidad de los impulsos. [4] [5] [6] [9]

El proceso de demodulación por enveloping se basa en la aplicación de la transformada de Hilbert, en donde la señal en cuestión en el dominio de la frecuencia es movida  $-90$  grados para frecuencias positivas y  $90$  grados para frecuencias negativas, obteniendo así un espectro modificado que al aplicarle transformada inversa de Fourier se obtiene una nueva señal en el tiempo de tipo complejo; la magnitud de este resultado corresponde a la envolvente como se ve en la figura 6.

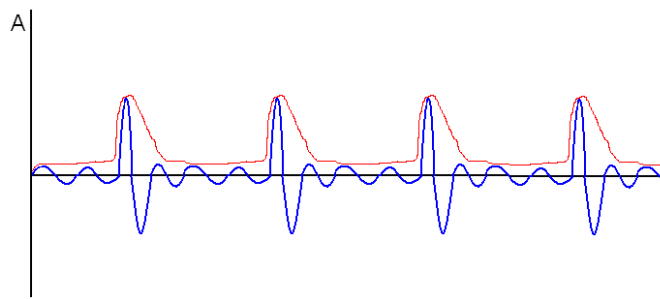


Figura 6: Señal aplicándole la Envolvente.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

Una vez obtenida una señal demodulada, y con el fin de obtener la periodicidad de las señales impulsionales, es posible aplicar nuevamente FFT (Fast Fourier Transform) para obtener un espectro cuyas componentes frecuenciales son comparadas con las frecuencias de falla del rodamiento para determinar una posible falla.[4] [5] [6] [9]

#### • Wavelets

Wavelets utiliza funciones para descomponer señales, muy similares a usar funciones sinusoidales complejas como la transformada de Fourier. La transformada wavelet calcula el interior de la señal analizada utilizando una familia de wavelets. En contraste con las sinusoides, las wavelets están localizadas tanto en el tiempo como en el dominio de las frecuencias, de modo que este

procesamiento de señales de onda es adecuado para señales no estacionarias, cuyo espectro cambia con el tiempo.

La adaptación de la resolución de la frecuencia y el tiempo de la señal, permite un procesamiento con múltiple resolución de esta (escalograma). Las propiedades de las wavelets y su flexibilidad para ser seleccionadas hacen de wavelets una herramienta útil para aplicarse en la extracción de las características en el procesamiento de señales.[2]

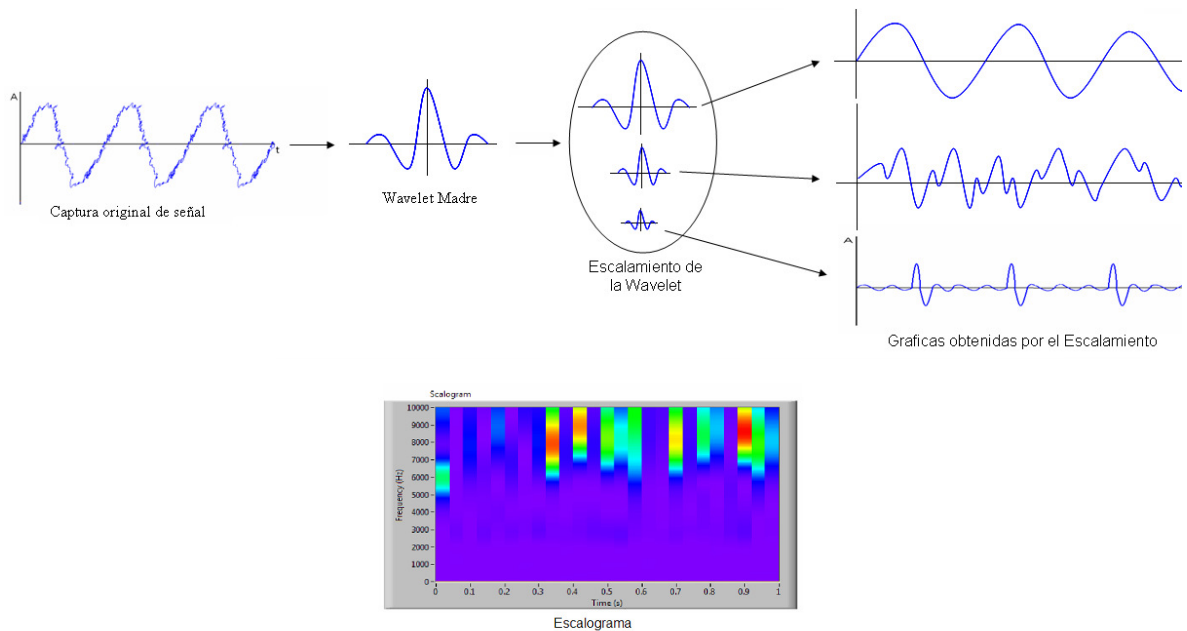


Figura 7: Procesamiento por Wavelets  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 7 se muestra un breve ejemplo de como funciona la técnica de wavelets, partiendo de capturar la señal, definiendo la wavelets madre que se utilizara, dando el escalamiento el cual consiste en definir cuantos tamaños de la wavelets madre van a ver en nuestro procesamiento y por ultimo veremos el escalograma que es una grafica 3D donde nos visualiza tiempo del suceso, amplitud de la muestra o wavelet y la severidad del daño.

## 2. DESARROLLO DEL BANCO DE PRUEBAS

El desarrollo del banco de pruebas se inicializó partiendo de un diseño predefinido que se realizó durante el desarrollo de las clases de vibraciones mecánicas del primer semestre de 2007; donde surgió la idea de hacer un banco de pruebas para rodamientos de bola de carga radial, donde se pudiera estudiar el comportamiento y eventual desarrollo de las fallas en los rodamientos de bola de carga radial.

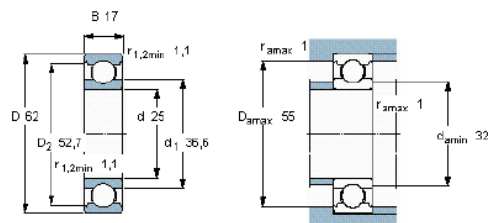
En las clases se desarrollaron las chumaceras que tenían que presentar facilidades de instalación y reemplazo de los rodamientos, se fijó el rodamiento 6305 por conveniencia de precio y facilidad de ubicación en el mercado, para realizar las chumaceras y así cumplir con los parámetros establecidos.

Las chumaceras se encuentran fabricadas en duraluminio por estética y sus propiedades mecánicas diferentes a las de los rodamientos, para provocar alteraciones en la transmisión de vibraciones desde estos hasta la ubicación de lo acelerómetros. Estas se encuentran seccionadas para poder cambiar el rodamiento en el momento que se desee, como cuando se presenta una falla.

La figura 8 muestra las dimensiones del rodamiento utilizado para desarrollar el banco de pruebas.

### Rodamientos rígidos de bolas, de una hilera

Dimensiones principales			Capacidades de carga		Carga límite de fatiga $P_u$	Velocidades		Masa	Designación
d	D	B	C	$C_0$		Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	rpm		kg	* - Rodamiento SKF Explorer
25	62	17	23,4	11,6	0,49	24000	16000	0,23	6305 *



#### Factores de cálculo

$k_f$  0,03  
 $f_n$  12

Figura 8: Dimensiones rodamiento 6305. [3]

La base también se encuentra fabricada en duraluminio, siendo esta la que permite ubicar y alinear las chumaceras y el motor con buenos grados de precisión, ya que se encuentran mecanizadas todas sus especificaciones a escuadra en una de las fresadoras de la compañía Metalizadora del Oriente en Bucaramanga<sup>1</sup>, permitiendo generar distintos grados de alineación y ajuste del banco de vibraciones. En la tabla 1, se muestran las propiedades mecánicas del duraluminio de interés para este estudio.

<b>Propiedades <i>duraluminio</i></b>	
<b>Nombre</b>	<b>Valor</b>
Density	2,800.0 kg/m <sup>3</sup>
Poisson's Ratio	2.6×10 <sup>-3</sup>
Young's Modulus	7.4×10 <sup>10</sup> Pa

Tabla 1. Propiedades Mecánicas Duraluminio.[10]  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

El soporte del motor se encuentra fabricado en Acero Inoxidable, se le realizó procesos de mecanizados tales como soldadura TIC, y escareado para que no se presentaran soldaduras a la hora de instalar el motor, se encuentra alineado y centrado con el eje de las chumaceras para hacer un prealineamiento entre el eje del motor y el eje que se encuentra entre las chumaceras.

El eje se encuentra fabricado en acero 4140, al cual hubo que realizarle un mecanizado de reducción de diámetro en torno, se paso de 1" a ¾" para que el eje entrara más fácilmente en resonancia, al realizarse este proceso hubo un leve

---

<sup>1</sup> Metalizadora del Oriente Ltda. Carrera 14 No 16-30 Bucaramanga. Tel 6712962.  
<http://www.metalizadora.com>

curvamiento en el eje dándonos la posibilidad de usarlo en nuestro estudios aplicando este desalineamiento natural del eje para hacer la precarga en el sistema y ver la evolución de fallas en el rodamiento. La razón de la selección de este material, radica en que se deseaba que de igual forma tuviera propiedades mecánicas distintas a las de rodamientos y marco principal, para permitir estudios de transmisibilidad de vibraciones, además que el de permitir la instalación de sensores de proximidad tipo corrientes de Eddy<sup>2</sup> para monitoreo de posición relativa de ejes en maquinaria rotativa, los cuales principalmente responden mejor ante la presencia de acero 4140.

Los planos de diseño detallado del banco de pruebas se encuentran en el Anexo 12.

También cuenta con un motor General Electric de 1Hp a corriente directa el cual puede variar su velocidad por medio de un modulo que consta de una tarjeta controladora de motor con giro invertido cód: 350-590-016, tres potenciómetros lineales con los cuales se puede graduar la velocidad deseada para el funcionamiento del banco, tres pulsadores que inician el sentido de giro y parada del motor.



Figura 9: Banco de Pruebas rodamientos de bolas de carga radial.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

---

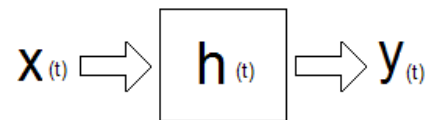
<sup>2</sup> Iguales o similares a los sistemas de Proximidad Bently Nevada 3300

## 2.1. IDENTIFICACIÓN DE FRECUENCIAS NATURALES DEL BANCO

La identificación de frecuencias naturales del banco de vibraciones se ejecutó tanto de forma analítica como experimental. Esto permite identificar más precisamente las propiedades mecánicas de los materiales que lo componen al hacer coincidir ambos resultados y visualizar las formas modales para interpretar la fenomenología física de su dinámica y sus efectos sobre la ubicación de sensores. En trabajos posteriores al presente, este estudio también permitirá la modelación precisa de modificaciones al diseño para lograr un mejor comportamiento vibratorio.

Para todas las pruebas, las especificaciones técnicas de software y hardware utilizados pueden consultarse en los anexos 1, 2,3, 4 y 5.

Para la identificación de frecuencias naturales se adopta el siguiente modelo:



Donde:  $x_{(t)}$  → Señal de excitación del sistema.

$y_{(t)}$  → Señal de respuesta del sistema.

$h_{(t)}$  → Propiedades físicas del sistema.

En todo el sistema se asume que cumple con las siguientes propiedades. [5]

- Linealidad.
- Repetibilidad.
- Superposición.

## 2.2. ESTUDIOS ANALÍTICOS DE LAS CHUMACERAS.

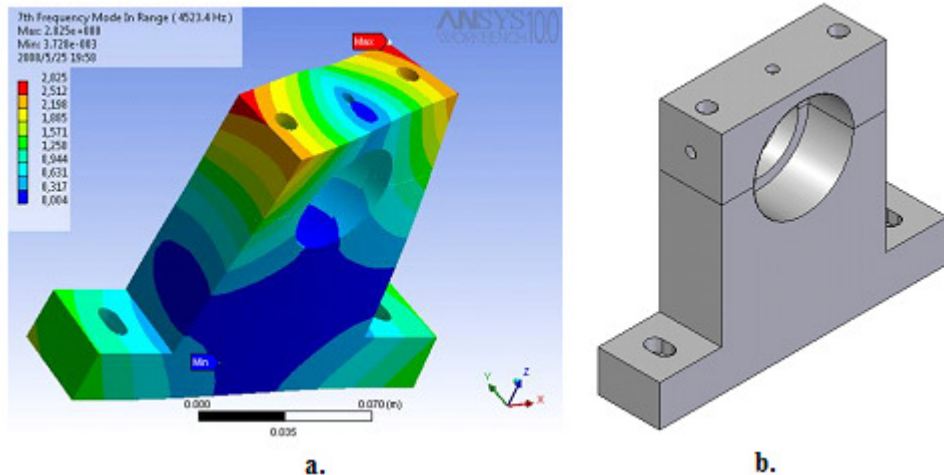


Figura 10: a) Simulación en ANSYS, b) Representación Solid Edge.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

Se le hizo el estudio de frecuencias naturales a la chumacera, el cual consiste en utilizar las herramientas CAD “Solid Edge 18 y Ansys Workbench 10” como se muestra en la figura 10; para hallar las frecuencias naturales de la chumacera de forma teórica. En esta forma se ven todas las frecuencias naturales de la chumacera y su comportamiento en cada una de ellas.

Los resultados obtenidos en la simulación en Ansys Workbench 10, son de gran ayuda para determinar donde debemos ubicar los acelerómetros para la prueba experimental, teniendo en cuenta que también nos da el margen de cuales son nuestras frecuencias naturales; se muestra en tabla de colores siendo el azul oscuro donde menos desplazamiento se tiene y el color rojo donde este mayor al entrar en resonancia; para la prueba experimental los acelerómetros se ubican en estos puntos para determinar los valores reales de las frecuencias naturales.

### 2.2.1. Resultados simulación en Ansys 10

Nombre	Frecuencia
"1th Frequency Mode In Range"	4.523,4 Hz
"2nd Frequency Mode In Range"	5.660,93 Hz
"3rd Frequency Mode In Range"	6.094,29 Hz
"4th Frequency Mode In Range"	6.919,33 Hz
"5th Frequency Mode In Range"	7.392,35 Hz
"6th Frequency Mode In Range"	8.992,06 Hz
"7th Frequency Mode In Range"	9.430,29 Hz

Tabla 2: Resultados analíticos de Frecuencias Naturales de las chumaceras.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en Ansys, los cuales son los resultados analíticos de las chumaceras y se usaron para compararlos con los obtenidos en el estudio experimental de las mismas.

### 2.2.2. Estudios experimentales de las chumaceras.

De manera similar se realizaron mediciones experimentales, las cual consistieron en tomar la chumacera y hacerle su análisis de frecuencia de la siguiente forma:

- La figura 11 muestra como se suspende de soportes elásticos la chumacera, para aislarlas como sistema y para que ninguna frecuencia naturale se oculte por oscilaciones de cuerpo rígido; se le adecuan dos acelerómetros que recolectaran los datos de la prueba en puntos diferentes, esto con ayuda del modelamiento de Ansys. Se ubican los acelerómetros donde se muestra la mayor y menor respuesta a las frecuencias naturales y se le da un pequeño golpe para excitar todas las frecuencias de la chumacera. Luego se analizan las imágenes que se tomaron con el uso del CompacDAQ 9172, un acondicionador de señal NI 9233,

el software LabView 8.5, los acelerómetros PCB 325C34 y un martillo PCB 086C01 el cual tenía instalada la punta más dura, para ampliar el ancho del espectro útil de la señal de entrada.

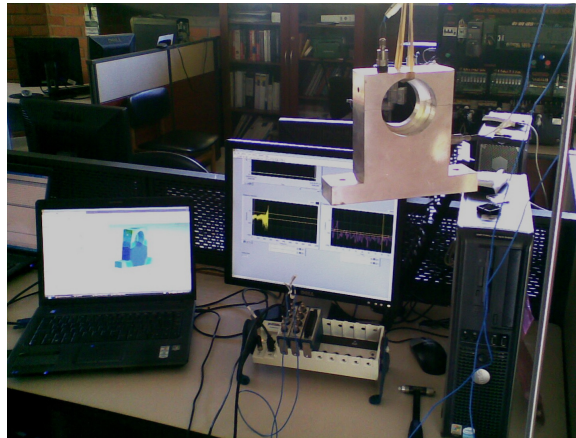


Figura 11: Equipo usado para las Pruebas.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

## 2.3. PRUEBAS

### 2.3.1. PRUEBA 1:



Figura 12: Ubicación acelerómetros Prueba 1.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

### 2.3.1.1. Primera Parte:

En esta prueba se ubicaron los acelerómetros como se muestran en la Figura 12, se le ocasionó un golpe en la parte inferior a la chumacera con el martillo de pruebas con punta dura y obteniendo las siguientes figuras de frecuencias de respuestas de las chumaceras (Fig. 13):

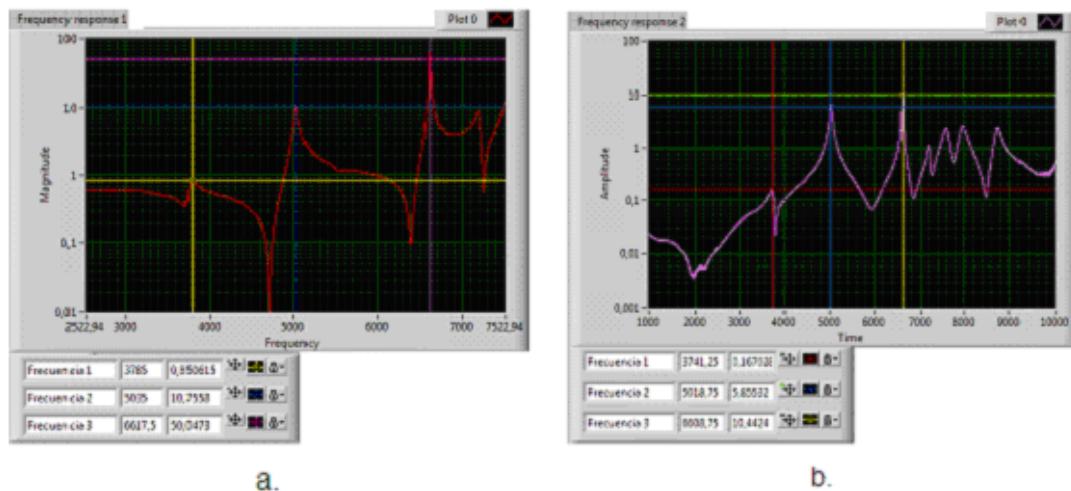


Figura 13: a) Frecuencias de Respuestas Acelerómetro 1, b) Frecuencias de Respuestas Acelerómetro 2.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

### 2.3.1.2. Segunda Parte:

En esta prueba se ubicaron los acelerómetros como se muestran en la Figura 12, se le indujo un impacto en la parte Posterior con el martillo de pruebas con punta dura y obteniendo las siguientes figuras de frecuencias de respuestas de las chumaceras (fig. 14):

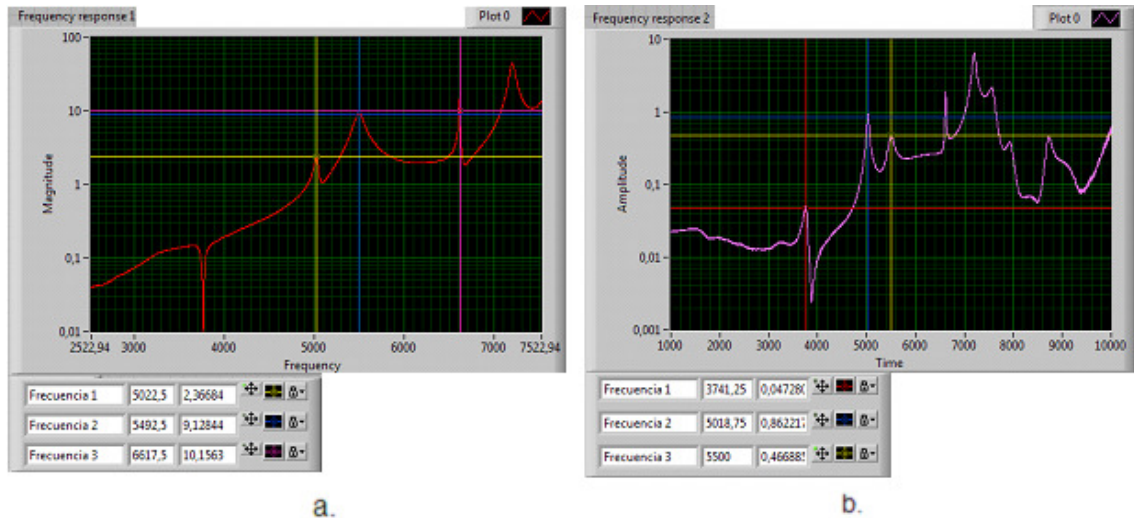


Figura 14: a) Frecuencias de Respuestas Acelerómetro 1, b) Frecuencias de Respuestas Acelerómetro 2.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

### 2.3.2. PRUEBA 2:



Figura 15: Ubicación acelerómetros Prueba 2. [1].

Autor: Alvaro Alvarez Florez

#### 2.3.2.1. Primera Parte:

En esta prueba se ubicaron los acelerómetros como se muestran en la Figura 15, se le ocasiono un impacto en la parte inferior a la chumacera con el martillo de pruebas y obteniendo las siguientes figuras (Fig. 16):

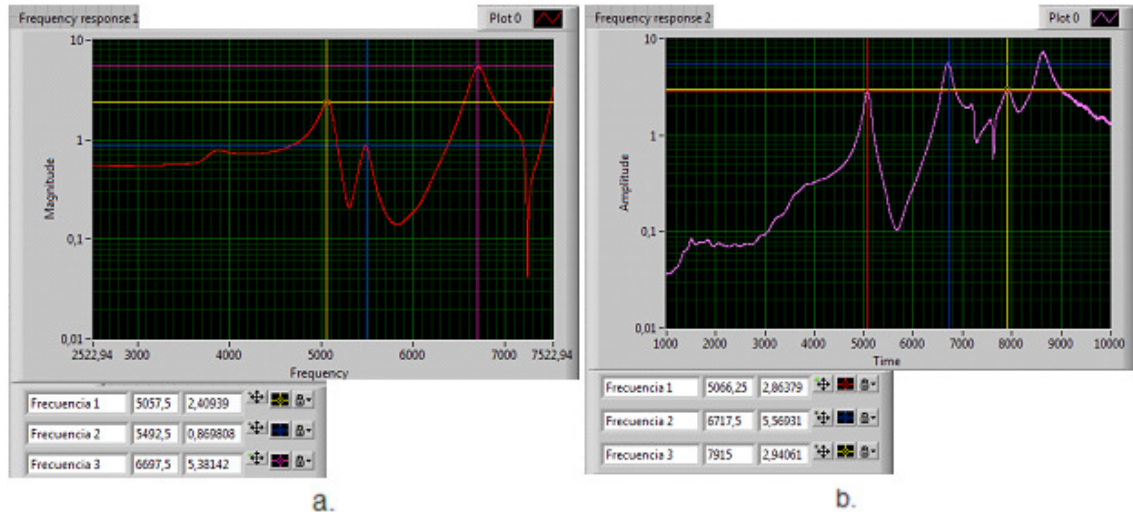


Figura 16: a) Frecuencias de Respuestas Acelerómetro 1, b) Frecuencias de Respuestas Acelerómetro 2.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

### 2.3.2.2. Segunda Parte:

En esta prueba se ubicaron los acelerómetros como se muestran en la Figura 15, se le ocasionó un impacto en la parte posterior a la chumacera con el martillo de pruebas y obteniendo las siguientes figuras (Fig. 17):

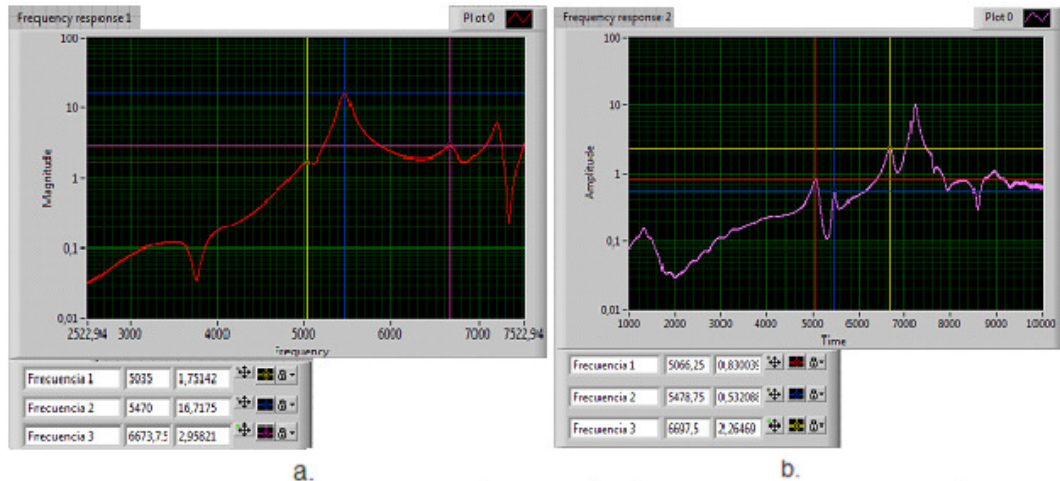


Figura 17: a) Frecuencias de Respuestas Acelerómetro 1, b) Frecuencias de Respuestas Acelerómetro 2. [1].

Autor: Alvaro Alvarez Florez

### 2.3.3. PRUEBA 3:



Figura 18: Ubicación acelerómetros Prueba 3.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

#### 2.3.3.1 Primera Parte:

En esta prueba se ubicaron los acelerómetros como se muestran en la Figura 18, se le ocasiono un impacto en la parte inferior a la chumacera con el martillo de pruebas y obteniendo las siguientes figuras (Fig. 19):

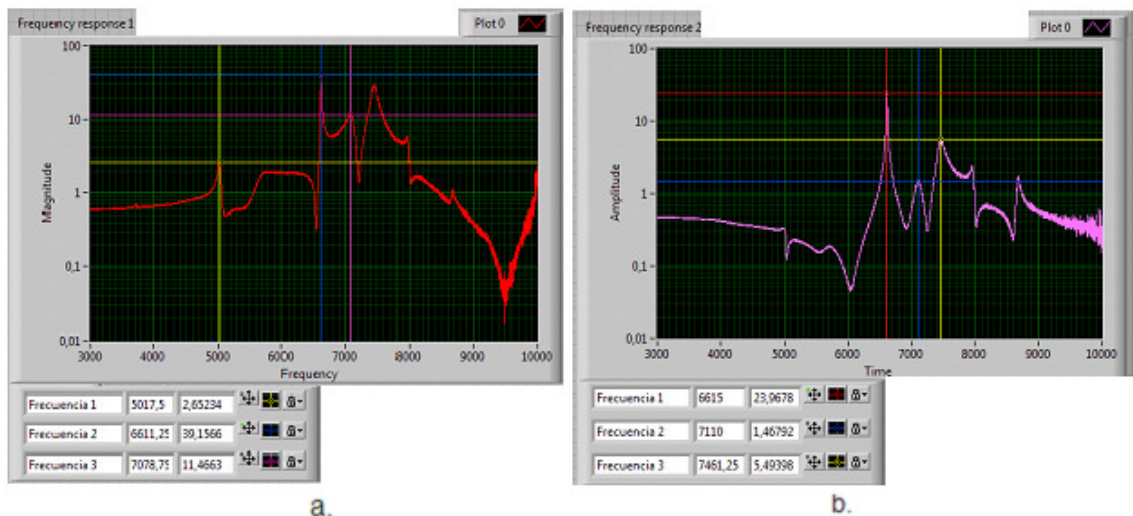


Figura 19: a) Frecuencias de Respuestas Acelerómetro 1, b) Frecuencias de Respuestas Acelerómetro 2.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

### 2.3.3.2. Segunda Parte:

En esta prueba se ubicaron los acelerómetros como se muestran en la Figura 18, se le ocasiono un impacto en la parte posterior a la chumacera con el martillo de pruebas y obteniendo las siguientes figuras (Fig.20):

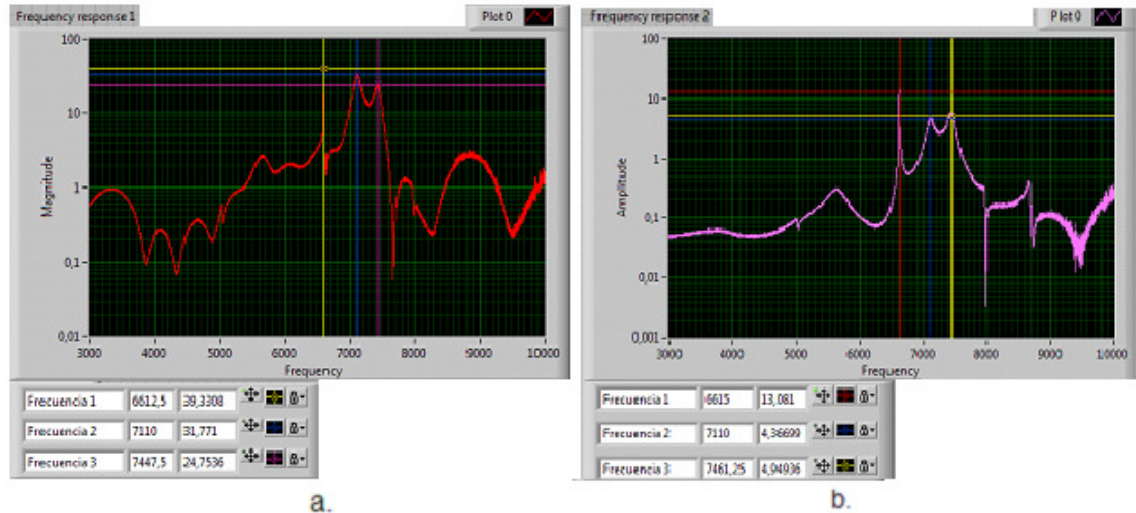


Figura 20: a) Frecuencias de Respuestas Acelerómetro 1, b) Frecuencias de Respuestas Acelerómetro 2.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

Al hacer el estudio de las anteriores figuras se obtuvieron como resultados que las frecuencias armónicas experimentales de las chumaceras son los que se muestran el tabla 3.

Nombre	Frecuencia
"1st Frequency "	3,756.03 Hz
"2nd Frequency"	5,026.25 Hz
"3rd Frequency"	5,486.5 Hz
"4th Frequency"	6,645.5 Hz
"5th Frequency"	7,725,25 Hz
"6th Frequency"	7,452.3 Hz

Tabla 3: Frecuencias Naturales Experimental.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

Los resultados obtenidos entre la prueba experimental y la teórica tuvieron algunas diferencias en las frecuencias; una de las posibles causas es que no concuerdan las propiedades mecánicas del material obtenidas en Tabla 1 con las reales. Se procede entonces a realizar los ajustes en ANSYS hasta obtener las mismas frecuencias naturales, obteniendo como resultado las siguientes propiedades mecánicas para el duraluminio, tabla 4:

<b>Propiedades <i>duraluminio</i></b>	
<b>Nombre</b>	<b>Valor</b>
Density	3,500 kg/m <sup>3</sup>
Poisson's Ratio	2.6×10 <sup>-3</sup>
Young's Modulus	7.3×10 <sup>10</sup> Pa

Tabla 4: Propiedades Mecánicas Obtenidas para el Duraluminio de las Chumaceras luego de ajustes.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

#### **2.4. Prueba Placa**

Para la toma de mediciones de la placa de duraluminio, que sirve como base para el banco de pruebas de rodamientos de bolas, fue necesario el uso del CompacDAQ 9172, un acondicionador de señal NI 9233, el software LabView 8.5, los acelerómetros PCB 325C34 y un martillo PCB 086C01 el cual tenía instalada la punta más dura, un martillo el cual tenía punta dura (Fig. 22) y se realizó de la siguiente manera, se ubicaron los sensores en las esquinas de la placa como se muestra en la figura 21, y se le originó el golpe en el centro de la placa con la punta dura; la placa fue suspendida con soportes flexibles para poder determinar las frecuencias de pandeo.

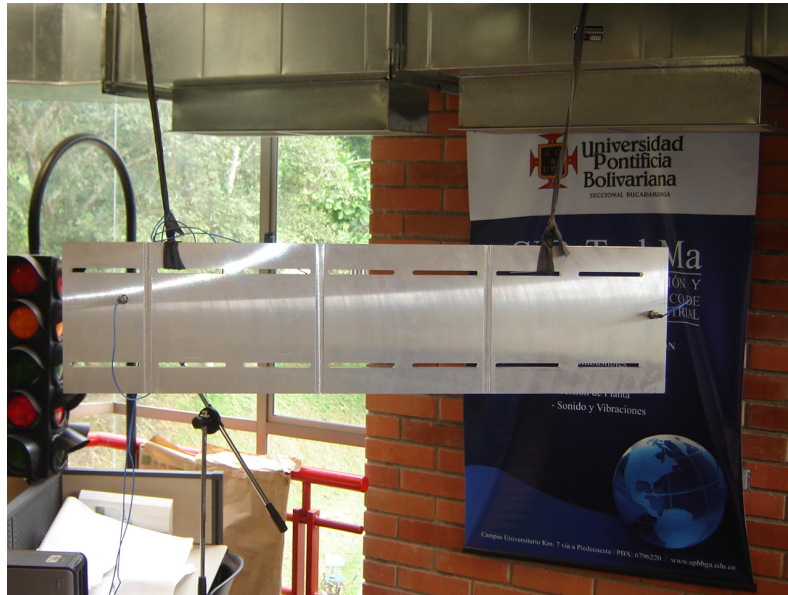


Figura 21. Ubicación de los sensores y como se suspendió la placa para la prueba.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez



Figura 22. Equipos utilizados.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

Con el uso de LABVIEW los armónicos que se presentan se pueden observar en la figura 23 y son los siguientes:

- El primer armónico fue de de 152Hz, el cual esta representado en la grafica roja.
- El segundo armónico fue de de 416Hz, el cual esta representado en la grafica verde.

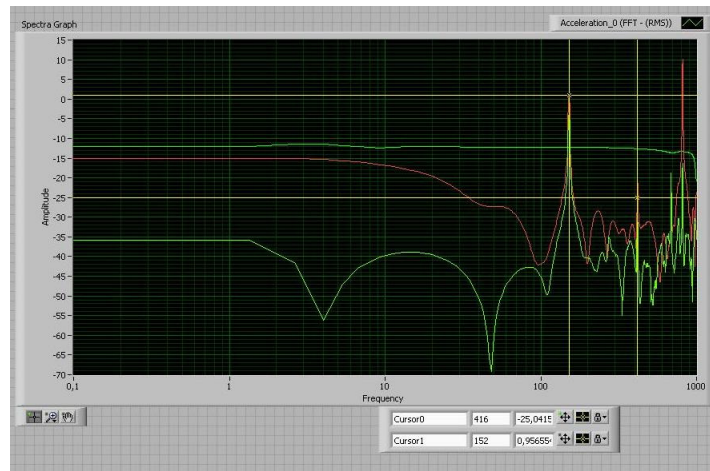


Figura 23: Medición en LABVIEW.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

Además se hizo una simulación en ANSYS de la placa para hallar sus frecuencias naturales y tener puntos de referencia de las medidas reales; y los resultados obtenidos se pueden ver el la tabla 5.

Name	Frequency
"1st Frequency "	160.74 Hz
"2nd Frequency"	418.33 Hz
"3rd Frequency"	441.63 Hz
"4th Frequency"	854.79 Hz
"5th Frequency"	862.1 Hz
"6th Frequency"	1,164.48 Hz

Tabla 5: Frecuencias obtenidas en Ansys después de hacer los ajustes en las propiedades.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

- El primer armónico fue 160.74Hz en el cual se observa una oscilación en forma de pandeo con un nodo central y mostrando sus deformaciones por colores con su respectiva escala.(figura 24)

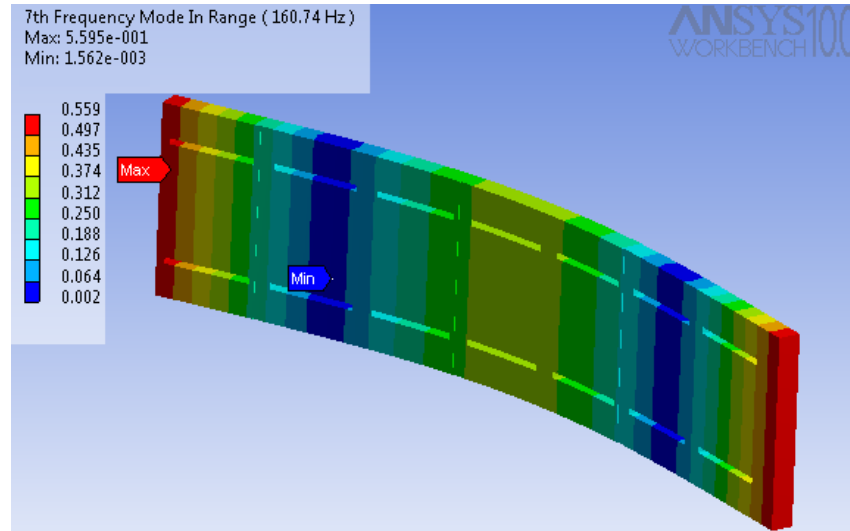


Figura 24: Primer armónico encontrado por simulación en ANSYS.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

- El segundo armónico fue 418.33Hz en el cual se observa una torsión y mostrando sus deformaciones por colores con su respectiva escala.(figura 25)

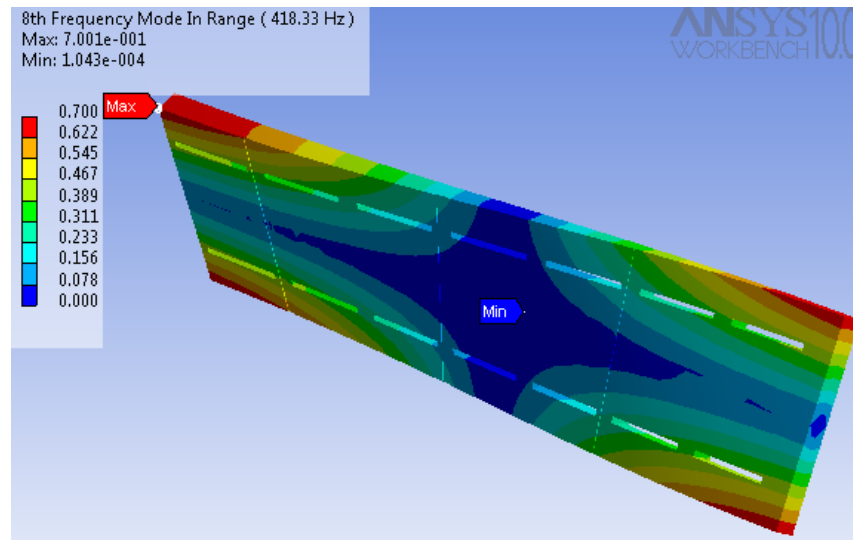


Figura 25: Segundo armónico encontrado por simulación en ANSYS.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

Partiendo de lo aprendido en las simulaciones y mediciones de las chumaceras, se hizo un preajustes a las propiedades mecánicas de la placa partiendo que es el mismo material; aquí se ve que las propiedades son similares pero no las mismas, esto se debe posiblemente a que las chumaceras se fabricaron con 6 meses de anterioridad que la placa y el material no provenía de la misma matriz de las chumaceras. Solo nos vario la densidad del Duraluminio, manteniendo sus demás propiedades intactas como se puede observar en la tabla 6.

<b>Propiedades <i>duraluminio</i></b>	
<b>Nombre</b>	<b>Valor</b>
Density	2,760 kg/m <sup>3</sup>
Poisson's Ratio	2.6×10 <sup>-3</sup>
Young's Modulus	7.3×10 <sup>10</sup> Pa

Tabla 6: Propiedades Mecánicas Obtenidas para la Placa.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

### 3. MÁQUINAS SELECCIONADAS

Las máquinas seleccionadas para realizar las mediciones y crear la base de datos, fueron las bombas principales del sistema de Aire Acondicionado del Edificio J utilizando como referencia las manuales y planos entregados por la empresa Proyectos y Servicios, que fue la empresa encargada de la instalación del sistema de aire acondicionado y la Unidad manejadora de aire del laboratorio de aire acondicionado I-206 de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

Razones de selección de las bombas:

- Cercanía con las instalaciones del laboratorio de vibraciones UPB
- Las máquinas están nuevas
- Son de alta calidad ingenieril, evidente con el bajo nivel de ruido que producen.
- Funcionan permanentemente junto en horarios de demanda de Aire Acondicionado del Edificio J
- El trabajo proporciona información útil para el departamento de Mantenimiento UPB (impacto en el medio)

Razones de selección de la Unidad manejadora del laboratorio de Aire Acondicionado

- Cercanía
- La máquina estaba totalmente a disposición de los requerimientos de uso y manipulación de este trabajo.
- Se utilizan mecanismos muy similares a las unidades manejadoras instaladas en la UPB, proporcionando así información útil para el departamento de Mantenimiento UPB (impacto en el medio).

### 3.1. Bombas Principales Del Sistema De Aire Acondicionado Del Edificio J

Son dos bombas de iguales características pero prestan un servicio diferente cada una, tenemos una bomba para agua fría y una para agua de condensación, las bombas son marca TACO, modelo FI2508. [7]



Figura 26: Bomba TACO FI2508. [7]

Para poder hacer las pruebas, fue necesario hacer unos soportes para los sensores porque la temperatura de los motores es demasiado alta para ponerlos con la cera adhesiva.

Se instalaron abrazaderas de 9 in de diámetro que fueron recortadas a  $7\frac{3}{4}$  in para que quedaran ajustadas a los motores de las bombas de sistema, y así poder hacer la toma de datos; también se le soldó una base roscada de  $\frac{1}{4}$  in para poder poner en ellas los sensores.

El proceso de arreglo del las abrazaderas consistió en cortarles el exceso de material y luego soldarles para que quedaran ajustadas a la medida del diámetro

del motor, se le hizo un agujero por el cual se paso el tornillo que va a soportar los sensores para tomar las muestras; el montaje se hicieron sobre las dos puntas del motor que es donde se encuentran los rodamientos a monitorear para hacerle el análisis predictivo basado en vibraciones.

La figura 27 muestra la ubicación de los sensores y distribución de los rodamientos; además es la nomenclatura utilizada en el procesamiento de los datos.

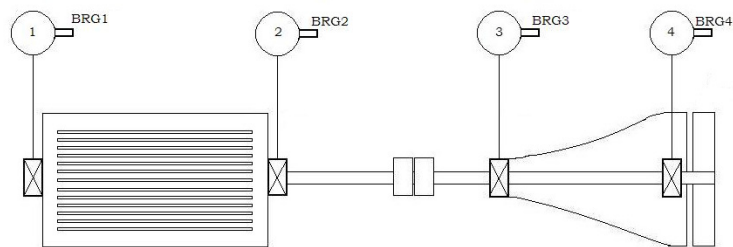


Figura 27: Ubicación y distribución de los sensores en las Bombas TACO FI2508.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

### 3.1.1. Metodología Utilizada En La Recolección De Datos De Las Bombas Del Sistema De Aire Acondicionado Del Edificio J.

La metodología utilizada para hacer la toma de datos de las bombas del sistema de aire acondicionado del edificio J de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga:

- Ubicación de las bombas del sistema de aire acondicionado.
- Ubicación de los rodamientos del motor y de la bomba.
- Identificar el rodamiento y su referencia usado por cada componente.
- Calcular o Investigar cuáles son los armónicos de las componentes de cada rodamiento.

- Se ideó una rutina para la toma datos, la cual consistía en ir los lunes y jueves en horas de la tarde, para que tuvieran las mismas horas de trabajo entre muestras.
- Se conformó una base de datos de las muestras en carpetas diferentes en el computador teniendo una carpeta para la bomba de condensación con el nombre de BAC 01 y una para agua fría con el nombre de BAF-CP-01; cada carpeta tiene dos subcarpeta con el nombre de MOTOR y BOMBA respectivamente, en las cuales se iban almacenando las muestras tomadas. Esta se encuentra ubicado en el CD en el que se entrega este trabajo y organizado de acuerdo a las tablas 14, 15, 16 y 17.

### 3.2. Manejadora de Aire del Laboratorio I-206 UPB Bucaramanga

Unidad manejadora de aire que presta servicio en el laboratorio I-206, consiste en un blower que se encuentra apoyado en dos chumaceras UC204-012 y conectado mecánicamente a un motor eléctrico por poleas, las cuales tienen una relación de 0.7.

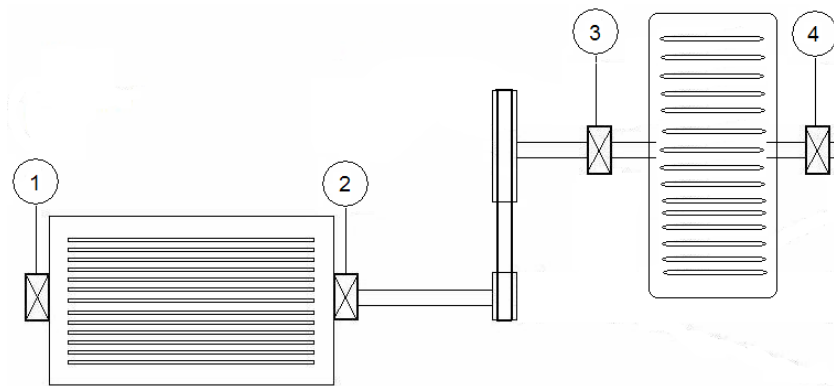


Figura 28: Disposición de los rodamientos en la unidad manejadora de aire acondicionado del I-206

Autor: Alvaro Alvarez Florez

Nota1: los rodamientos aquí estudiados estaban nuevos, y se les removió todo tipo de lubricación para acelerar su proceso de desgaste analizando así los daños que presentaban en los rodamientos y cómo se verían en las gráficas enveloping y wavelets.

La figura 28 muestra la ubicación y numeración de los rodamientos en la unidad manejadora del I-206; además es la nomenclatura utilizada en el procesamiento de los datos.

Para efectuar las pruebas con el rodamiento antes mencionado se usó el rodamiento 4, por su fácil disposición para cambiarlo y hacerle el monitoreo.

### 3.2.1. Metodología Utilizada En La Recolección De Datos De La Unidad Manejadora Del I-206.

La metodología utilizada para hacer la toma de datos de la Unidad manejadora de aire del laboratorio I-206 de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga:

- Ubicación de la manejadora del sistema de aire acondicionado.
- Ubicación de los rodamientos de apoyo del blower.
- Averiguar el rodamiento en el que se encuentra apoyado el blower.
- Calcular u Investigar cuales son los armónicos de las componentes del rodamiento.
- Se le tomaban datos con periodicidad de 12 horas
- Los datos eran almacenados en el computador en carpetas separadas por su frecuencia de giro al hora de tomar la muestra, esto se debe a que el motor tiene un variador de frecuencia para graduar la cantidad de flujo que corre por el.

Durante el periodo de pruebas la unidad manejadora operaba continuamente bajo las siguientes condiciones de velocidad y tiempo (tabla 7).

Frecuencias Funcionamiento	Horas Funcionamiento	% Funcionamiento
30	62.5	55.76
45	22	32.72
60	106.5	11.52
Total	191	100

Tabla 7: frecuencias, horas y porcentaje de funcionamiento de la unidad manejadora del I-206.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

## 4. RESULTADOS Y ANALISIS

Para el análisis se debe tener en cuenta que las mediciones no se realizan directamente sobre el rodamiento, sino sobre los soportes de estas y la carcasa de las máquinas lo cual hace que algunas frecuencias se oculten en sus etapas tempranas, por eso se hizo la evaluación con las dos técnicas en estudio; para tener una excelente anticipación lo ideal sería medir directamente sobre las partes de los rodamientos.

Para el estudio con la técnica de Wavelets, se utilizó la herramienta AWT (Analytic Wavelet Transform) de Lab View 8.5 [2], esta utiliza la función madre MOORLET, la cual según estudios de realizados en el área de análisis de vibraciones en las vías férreas por el paso constante de los trenes ha arrojado buenos resultados.[11]

En el análisis de resultados aquí mostrados solo se presentan las muestras que se consideran más representativas en el proceso de evaluación ya que el propósito de este estudio es hacerlo en la etapa temprana de la falla. El total de las muestras se encuentran en el CD y se relacionan en las tablas 15, 16, 17 y 18.

### 4.1. Bombas Principales Del Sistema De Aire Acondicionado Del Edificio J

Las frecuencias de fallas de los rodamientos de las bombas son:

- Para el rodamiento 1

Armónicos del rodamiento 6207	
BSF	67.0775
BPFO	103.95
BPFI	158.55

Tabla 8: Armónicos del rodamiento 6207.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

- Para el rodamiento 2

Armónicos del rodamiento 6205	
BSF	68.5125
BPFO	104.475
BPFI	158.025

Tabla 9: Armónicos del rodamiento 6205.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

- Para el rodamiento 3

Armónicos del rodamiento 6210z	
BSF	75.78083333
BPFO	118.7375
BPFI	172.9291667

Tabla 10: Armónicos del rodamiento 6210z.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

- Para el rodamiento 4

No esta dentro de los alcances de este trabajo analizar este tipo de rodamiento ya que es un rodamiento mixto (de carga radial y axial).

Los armónicos anteriores se pueden calcular de dos formas:

1. conociendo las rpm del motor que conduce la bomba y conociendo las constantes harmónicas para cada uno de los rodamientos que contiene el motor y la bomba.

RPM                    1750

Constante multiplicación  
rodamiento 6207

BSF                    2.2998  
BPFO                  3.564  
BPFI                   5.436

$$BSF = (rpm/60) * Cte \text{ BSF} \quad [5]$$

$$BSF = (1750/60) * (2.2998)$$

$$BSF = (29.16) * (2.2998)$$

$$BSF = 67.0775$$

2. conociendo las rpm del motor que conduce la bomba y conociendo las todas las especificaciones de cada uno de los rodamientos que contiene el motor y la bomba y usando las formulas anteriormente mencionadas.

$$\text{RPM} = 1750$$

$$\Omega = \text{RPS} = \text{RPM}/60$$

$$\text{BSF} = (P/2B) \Omega \{1 - (B/P)^2 \cos^2 \Phi\}$$

$$\text{BSF} = (43.5/(2*9)) \Omega \{1 - (9/43.5)^2 \cos^2 0\}[5]$$

$$\text{BSF} = 67.46$$

Los valores de armónicos aquí presentados se calcularon de la primera forma, con la ayuda de una hoja Excel que se encuentra en el Anexo 8, la cual se ha alimentado con las fórmulas indicadas para calcular cada uno de los armónicos de sus piezas.

## Bomba Agua de Condensación Edificio J (BAC 01)

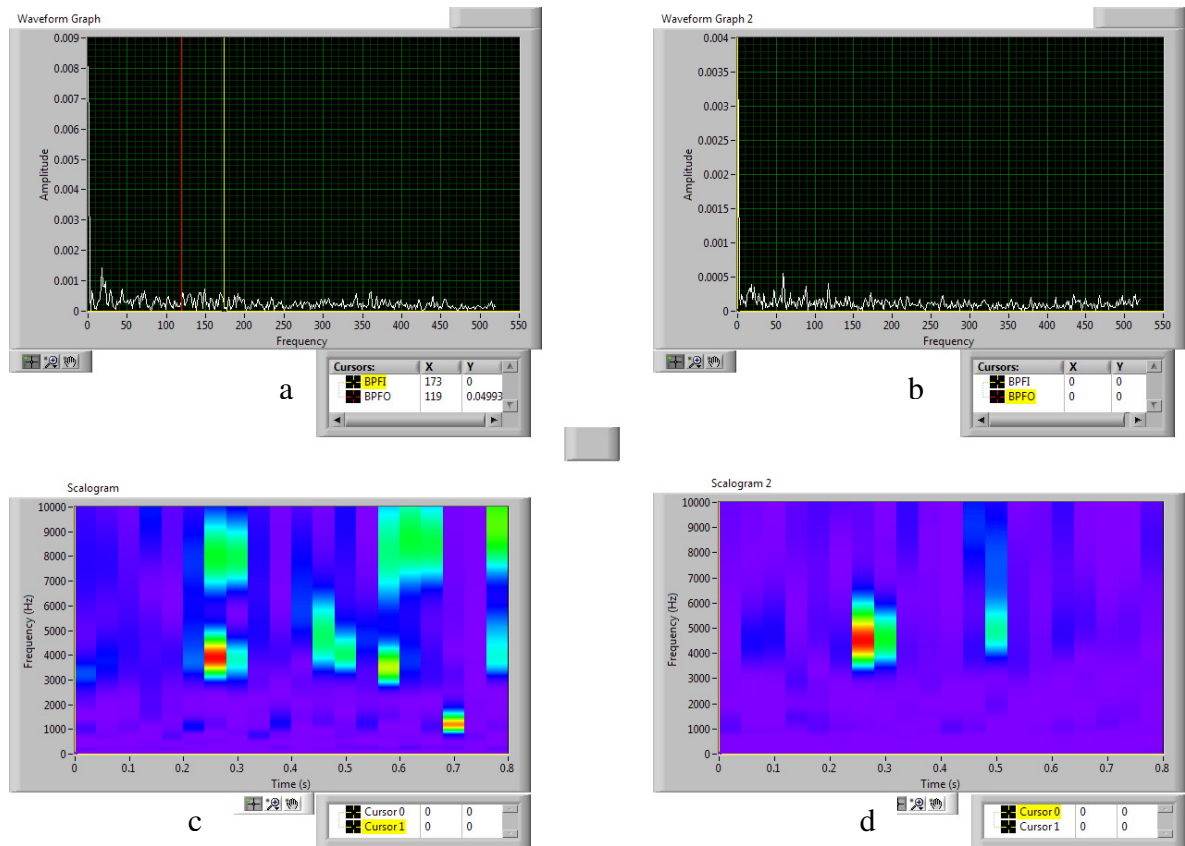


Figura 29: a)Enveloping rodamiento 3, b)Enveloping rodamiento 4, c) Wavelets rodamiento 3, d)Wavelets rodamiento 4; muestra 1 BAC 01.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 29 se ven los resultados obtenidos en la primera muestra que se tomó a la Bomba de Agua Condensación (BAC 01) del edificio J de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En la figura 29 (a) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número tres de la BAC 01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

En la figura 29 (b) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número cuatro de la BAC 01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

En la figura 29 (c) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número tres de la BAC 01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

En la figura 29 (d) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número cuatro de la BAC 01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

La contaminación que se ve en la figura 29 (a) y (b), es probablemente por el cheque que se encuentra instalado en la tubería de retorno del sistema hacia la bomba y el paso forzado del caudal por ella.

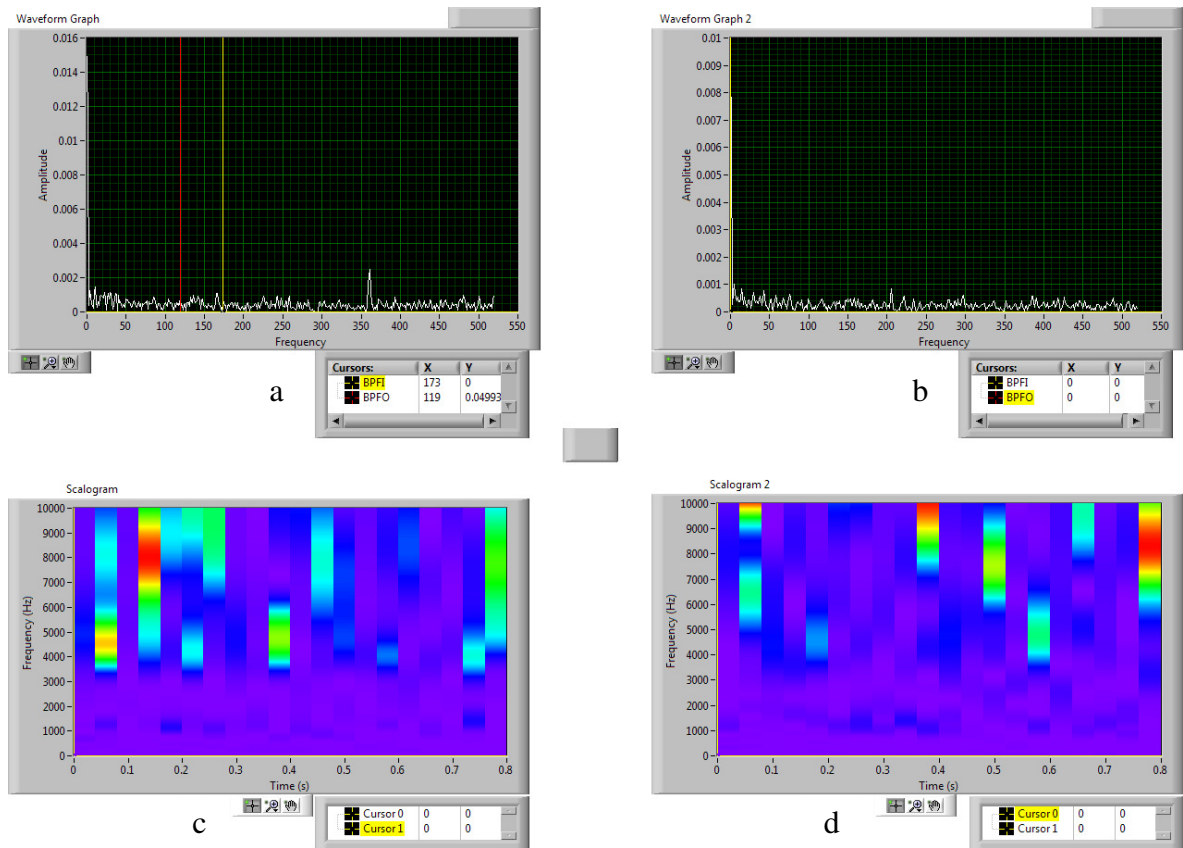


Figura 30: a)Enveloping rodamiento 3, b)Enveloping rodamiento 4, c) Wavelets rodamiento 3, d)Wavelets rodamiento 4; muestra 3 BAC 01.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 30 se ven los resultados obtenidos en la tercera muestra que se tomó a la BAC 01 del edificio J de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En la figura 30 (a) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número tres de la BAC 01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

En la figura 30 (b) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número cuatro de la BAC 01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

En la figura 30 (c) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número tres de la BAC 01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

En la figura 30 (d) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número cuatro de la BAC 01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

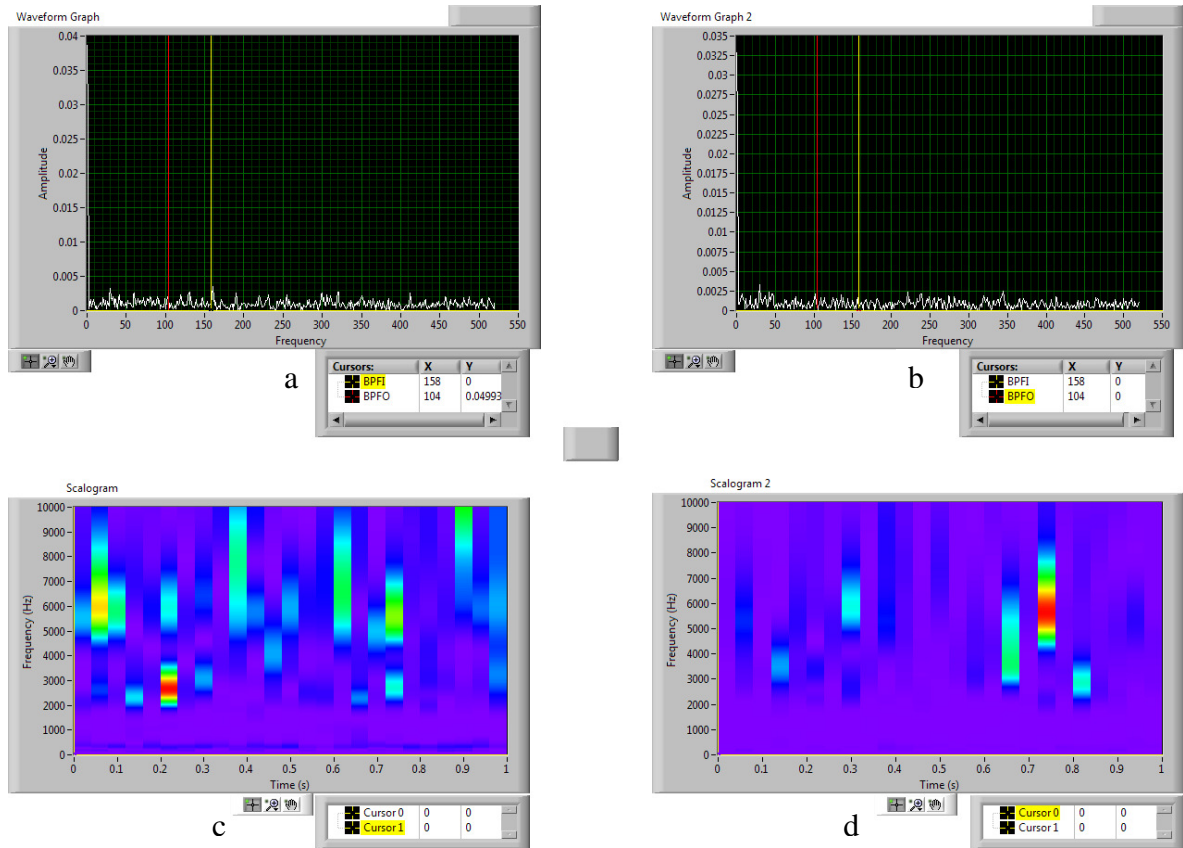


Figura 31: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2; muestra 2 BAC 01.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 31 se ven los resultados obtenidos en la segunda muestra que se tomó a la Bomba de Agua Condensación (BAC 01) del edificio J de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En la figura 31 (a) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número uno de la BAC 01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

En la figura 31 (b) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número dos de la BAC 01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

En la figura 31 (c) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número uno de la BAC 01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

En la figura 31 (d) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número dos de la BAC 01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

## Bomba de Agua Fría Edificio J (BAF-CP-01)

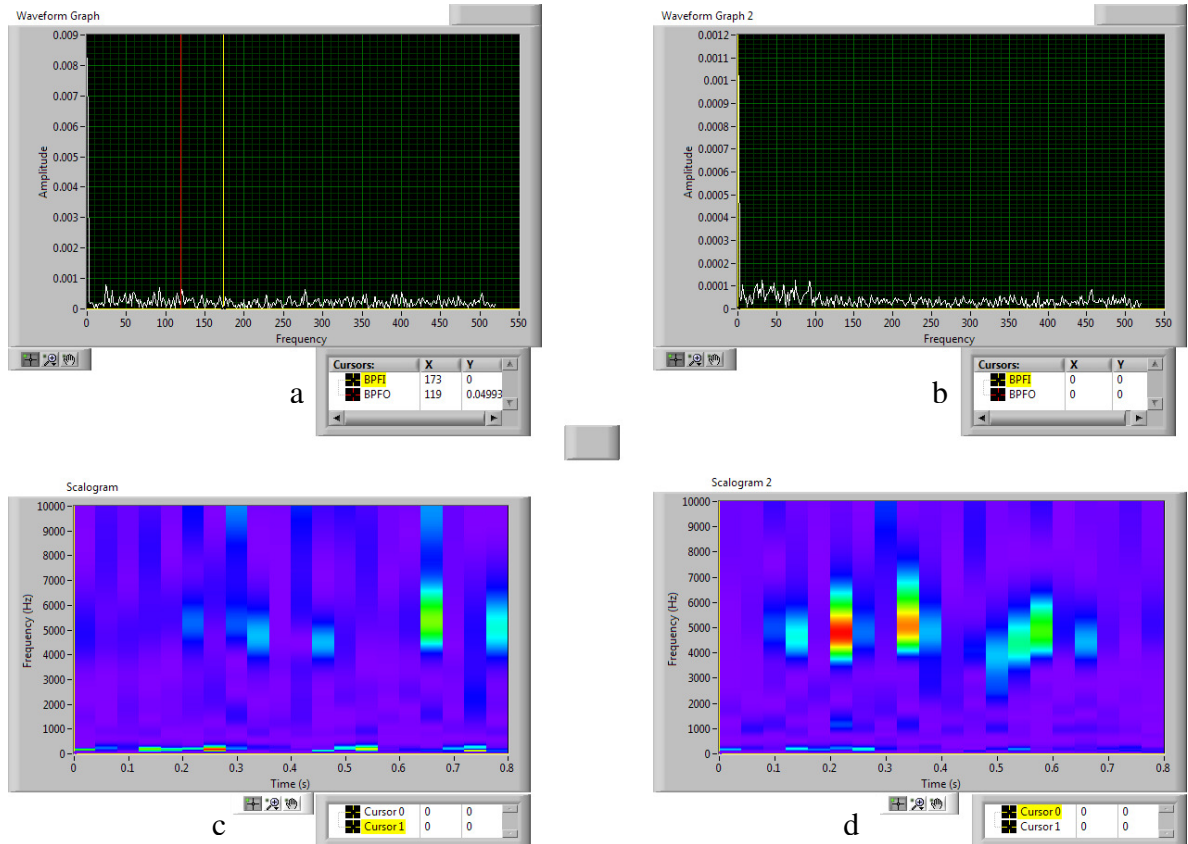


Figura 32: a)Enveloping rodamiento 3, b)Enveloping rodamiento 4, c) Wavelets rodamiento 3, d)Wavelets rodamiento 4; BAF-CP-01 muestra1.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 32 se ven los resultados obtenidos en la primera muestra que se tomó a la Bomba de Agua Fría (BAF-CP-01) del edificio J de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En la figura 32 (a) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número tres de la BAF-CP-01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

En la figura 32 (b) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número cuatro de la BAF-CP-01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

En la figura 32 (c) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número tres de la BAF-CP-01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

En la figura 32 (d) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número cuatro de la BAF-CP-01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

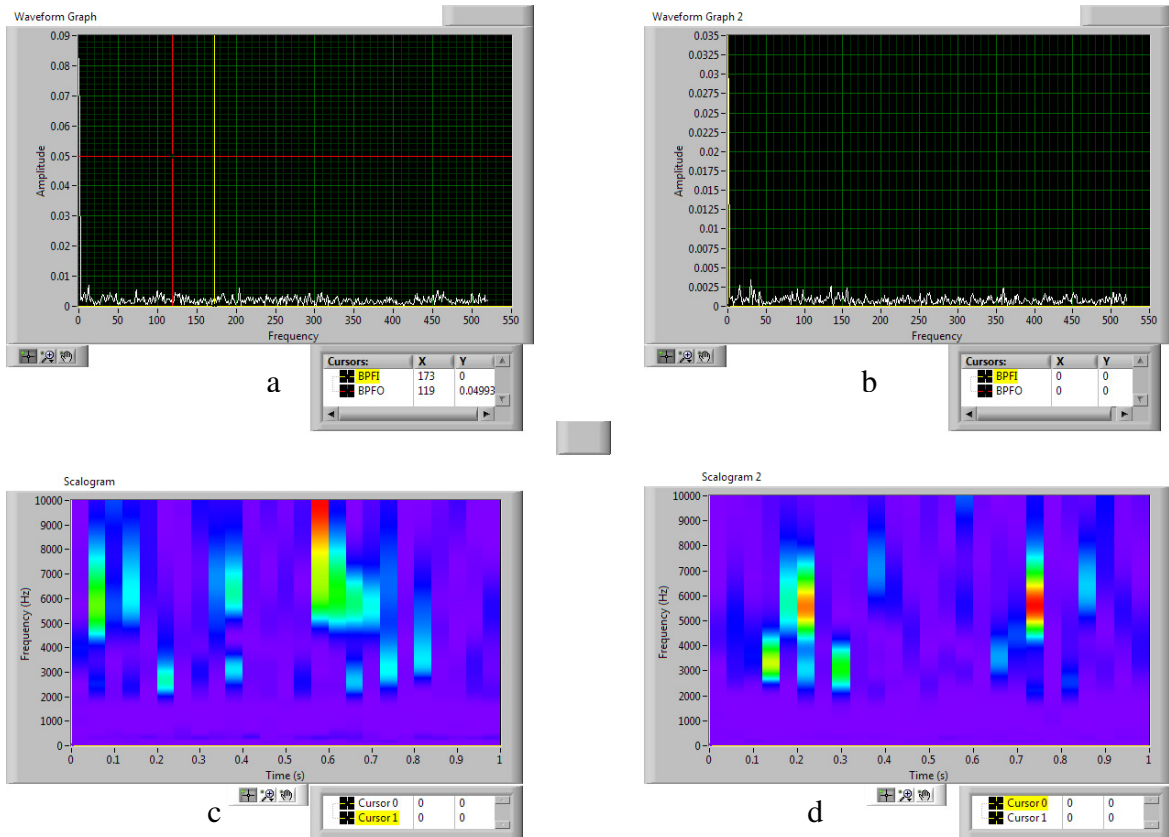


Figura 33: a)Enveloping rodamiento 3, b)Enveloping rodamiento 4, c) Wavelets rodamiento 3, d)Wavelets rodamiento 4, BAF-CP-01 muestra5. [1]  
 Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 33 se ven los resultados obtenidos en la quinta muestra que se tomó a la BAF-CP-01 del edificio J de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En la figura 33 (a) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número tres de la BAF-CP-01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

En la figura 33 (b) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número cuatro de la BAF-CP-01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

En la figura 33 (c) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número dos de la BAF-CP-01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

En la figura 33 (d) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número cuatro de la BAF-CP-01, donde se evidencia el no deterioro en las partes del rodamiento.

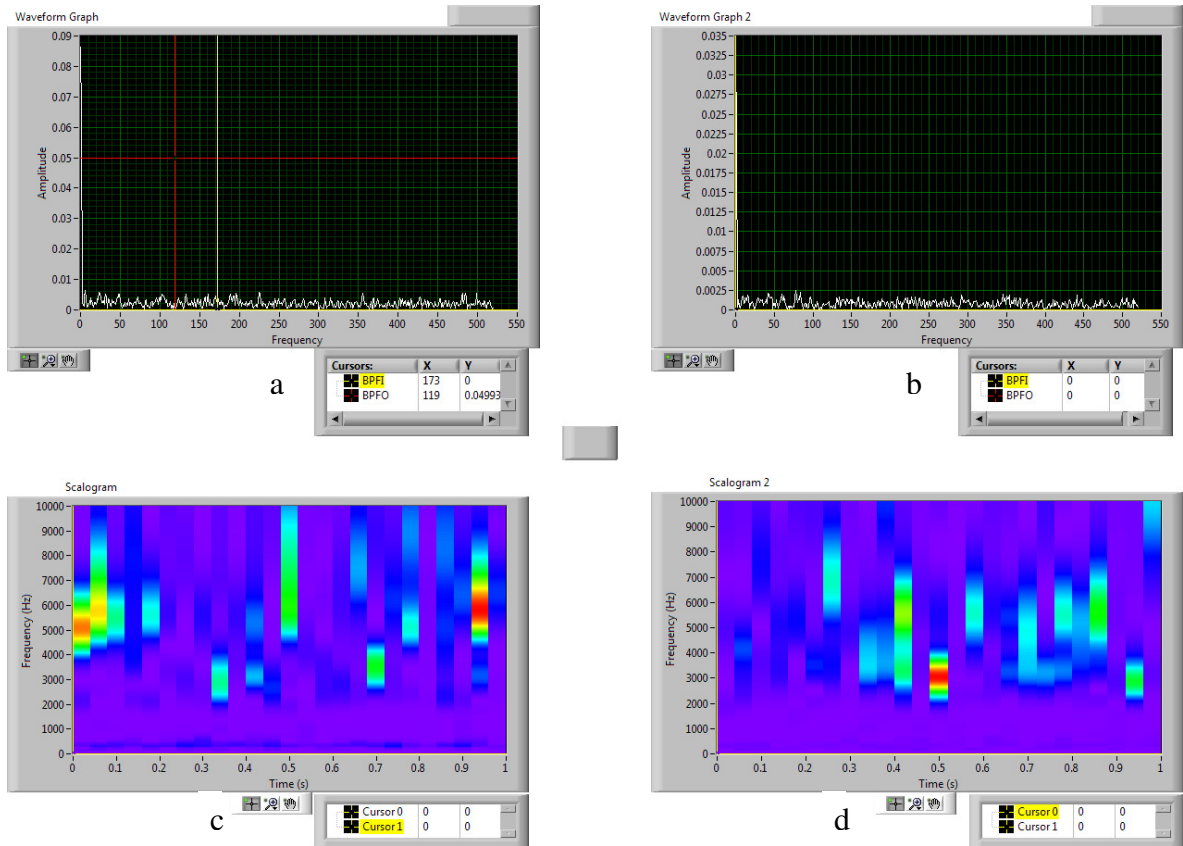


Figura 34: a)Enveloping rodamiento 3, b)Enveloping rodamiento 4, c) Wavelets rodamiento 3, d)Wavelets rodamiento 4, BAF-CP-01 muestra10.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 34 se ven los resultados obtenidos en la décima muestra que se tomó a la BAF-CP-01 del edificio J de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En la figura 34 (a) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número tres de la BAF-CP-01, donde se evidencia el no deterioro en el rodamiento.

En la figura 34 (b) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número cuatro de la BAF-CP-01, donde se evidencia el no deterioro en el rodamiento.

En la figura 34 (c) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número tres de la BAF-CP-01, donde se evidencia el no deterioro en el rodamiento.

En la figura 34 (d) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número cuatro de la BAF-CP-01, donde se evidencia el no deterioro en el rodamiento.

Lo que se puede ver son los esfuerzo que hace el impeler de la bomba cuando hay carga térmica, la cual ocasiona la contracción de las paredes de la bomba e impeler, también se evidencia cuando el chiler esta en funcionamiento; lo cual deja en evidencia que los amortiguadores del chiler no logran aislarle y deja que pasen algunas vibraciones hacía la BAF-CP-01, por su proximidad.

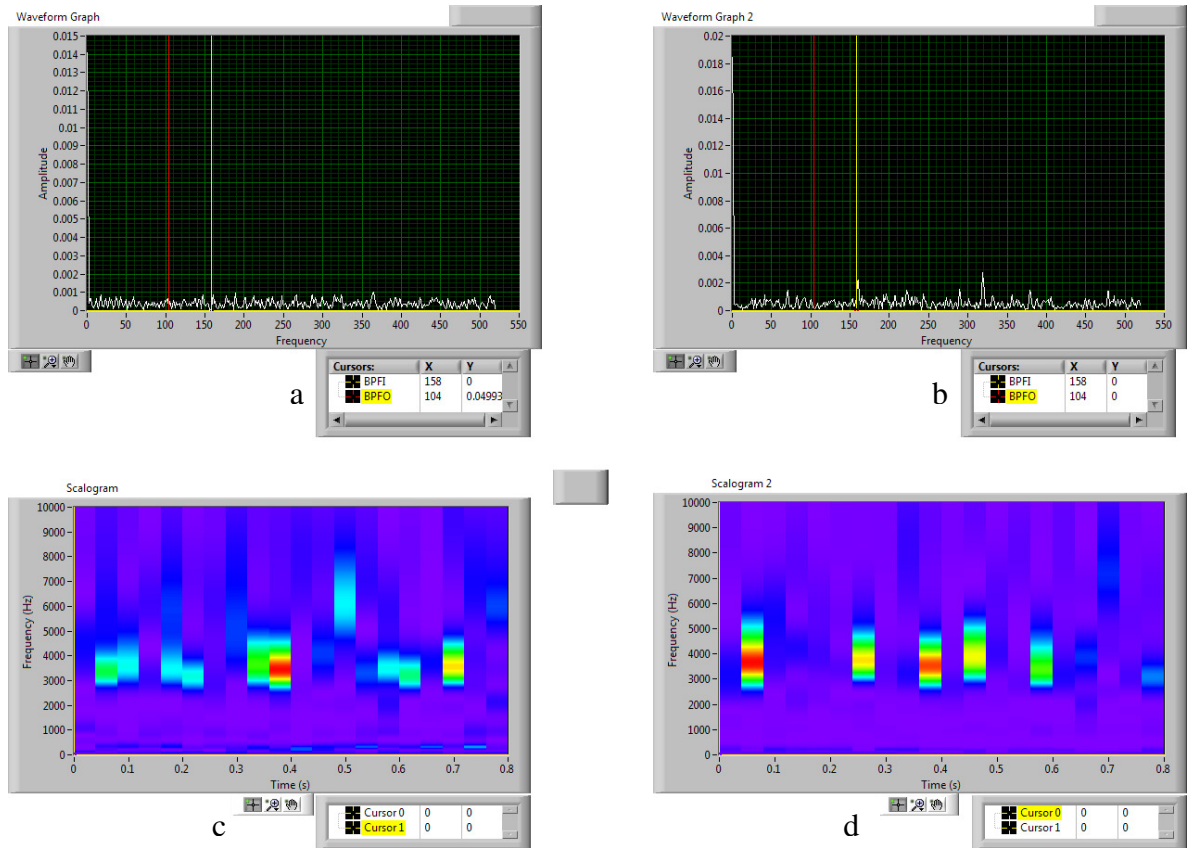


Figura 35: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2, BAF-CP-01 muestra1.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 35 se ven los resultados obtenidos en la segunda muestra que se tomó a la Bomba de Agua Fría (BAF-CP-01) del edificio J de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En la [figura 35 \(a\)](#) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número uno de la BAF-CP-01, donde se evidencia el no deterioro en el rodamiento.

En la [figura 35 \(b\)](#) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número dos de la BAF-CP-01 donde se evidencia el daño en el rodamiento numero dos en la pista interna (BPFI).

En la figura 35 (c) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número uno de la BAF-CP-01, donde se evidencia el daño en el rodamiento numero dos.

En la figura 35 (d) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número dos de la BAF-CP-01, donde se evidencia el daño en el rodamiento número dos.

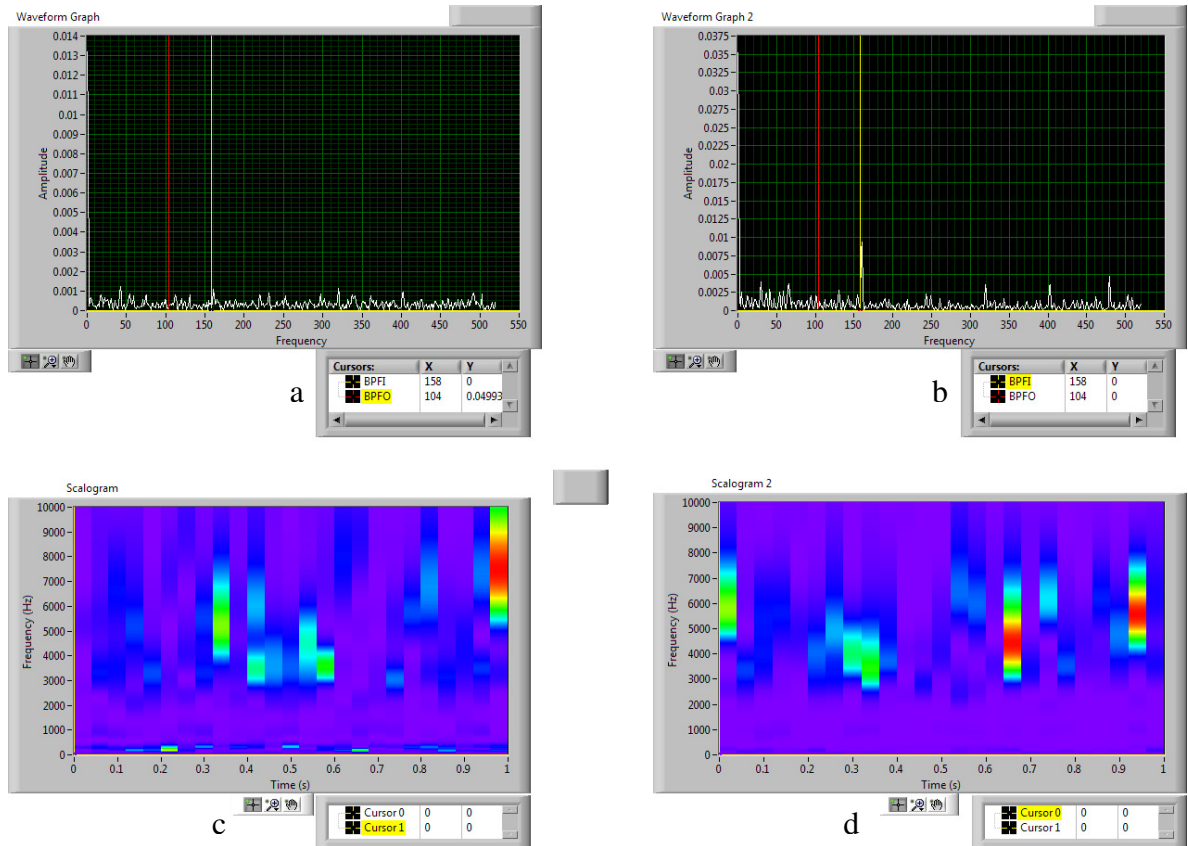


Figura 36: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2, BAF-CP-01 muestra 8.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 36 se ven los resultados obtenidos en la segunda muestra que se tomó a la Bomba de Agua Fría (BAF-CP-01) del edificio J de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En la figura 36 (a) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número uno de la BAF-CP-01, donde se evidencia el no deterioro en el rodamiento.

En la figura 36 (b) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número dos de la BAF-CP-01 donde se evidencia el daño en el rodamiento numero dos en la pista interna (BPFI).

En la figura 36 (c) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número uno de la BAF-CP-01, donde se evidencia el daño en el rodamiento numero dos.

En la figura 36 (d) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número dos de la BAF-CP-01, donde se evidencia el daño en el rodamiento número dos.

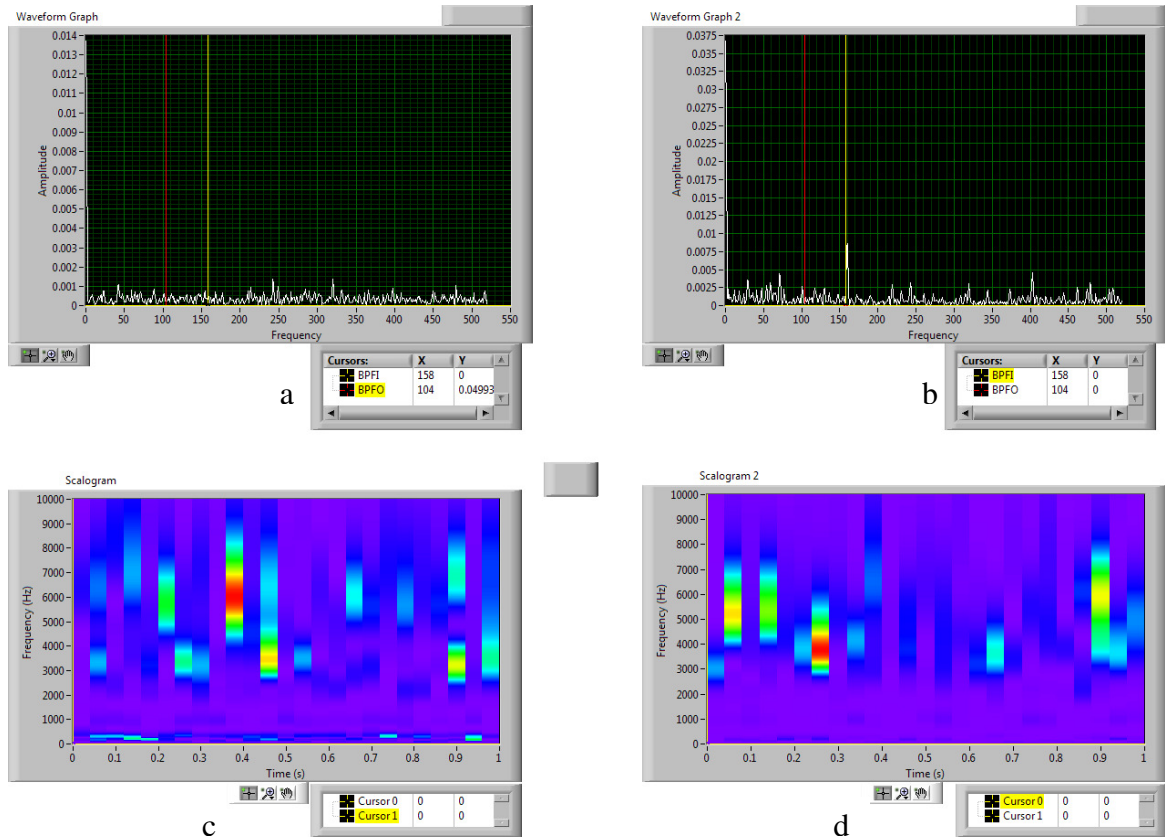


Figura 37: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2,BAF-CP-01 muestra18.  
 Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 37 se ven los resultados obtenidos en la décimo octava muestra que se tomó a la Bomba de Agua Fría (BAF-CP-01) del edificio J de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En la figura 37 (a) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número uno de la BAF-CP-01, donde se evidencia el no deterioro en el rodamiento.

En la figura 37 (b) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número dos de la BAF-CP-01 donde se evidencia el daño en el rodamiento numero dos en la pista interna (BPF1) y comienza a hacerse presente la picadura en la pista externa (BPFO).

En la figura 37 (c) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número uno de la BAF-CP-01, donde se evidencia el daño en el rodamiento numero dos.

En la figura 37 (d) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número dos de la BAF-CP-01, donde se evidencia el daño en el rodamiento número dos.

Este daño se debe al esfuerzo que tiene que hacer el motor de la bomba, al tener que bombear el agua fría (6°C), la cual hace contraer las paredes de la bomba y el impeler por la baja temperatura; para corroborar esto se hicieron pruebas si encender el chiler y sin tener carga térmica en el agua (agua temperatura ambiente 23°C), obteniendo como resultado la figura 37.

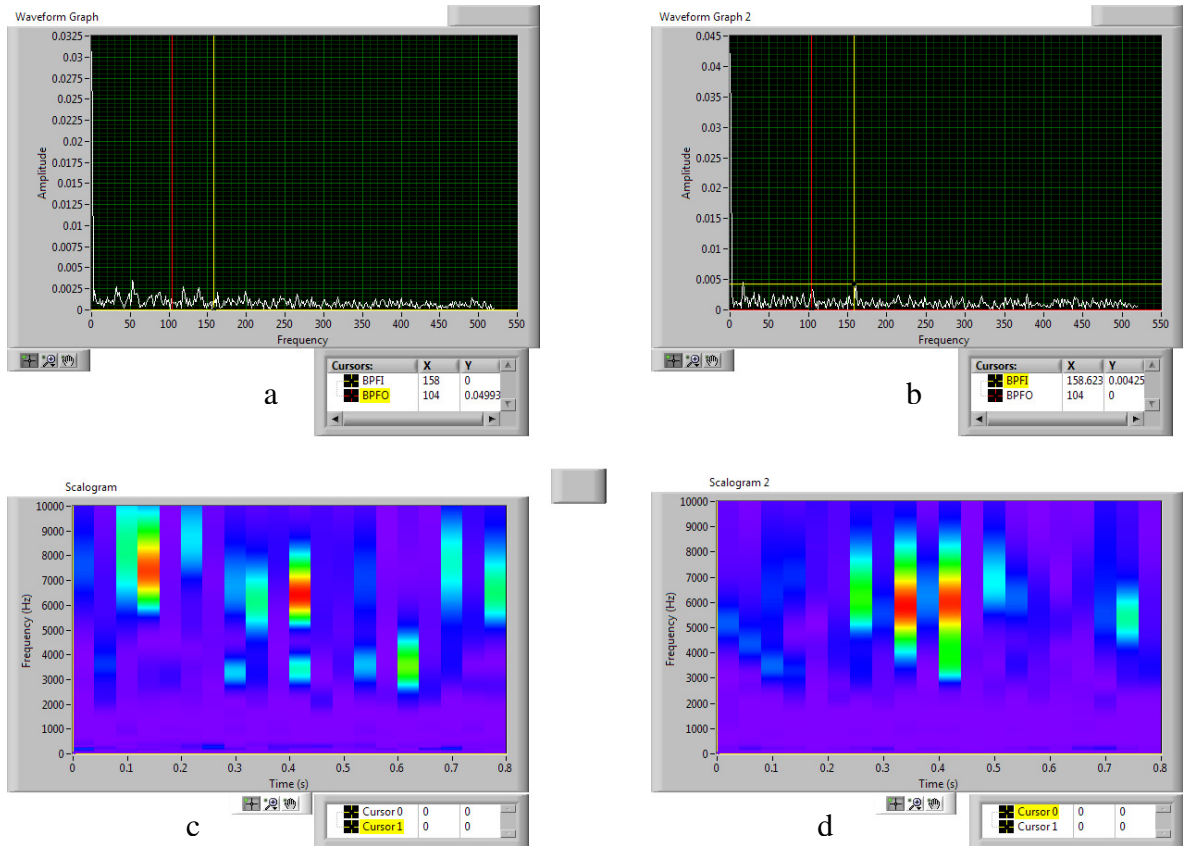


Figura 38: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2,BAF-CP-Temperatura ambiente.  
 Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 38 se observa la presencia de picadura en la pista interna (BPF1), tanto como la picadura en la pista externa(BPFO); dejando en evidencia tanto por ENVELOPING como por WAVELETS lo anteriormente dicho, esta muestra se realizo para disminuir el ruido presente en las anteriores muestras por parte del chiller y la carga termina en el sistema.

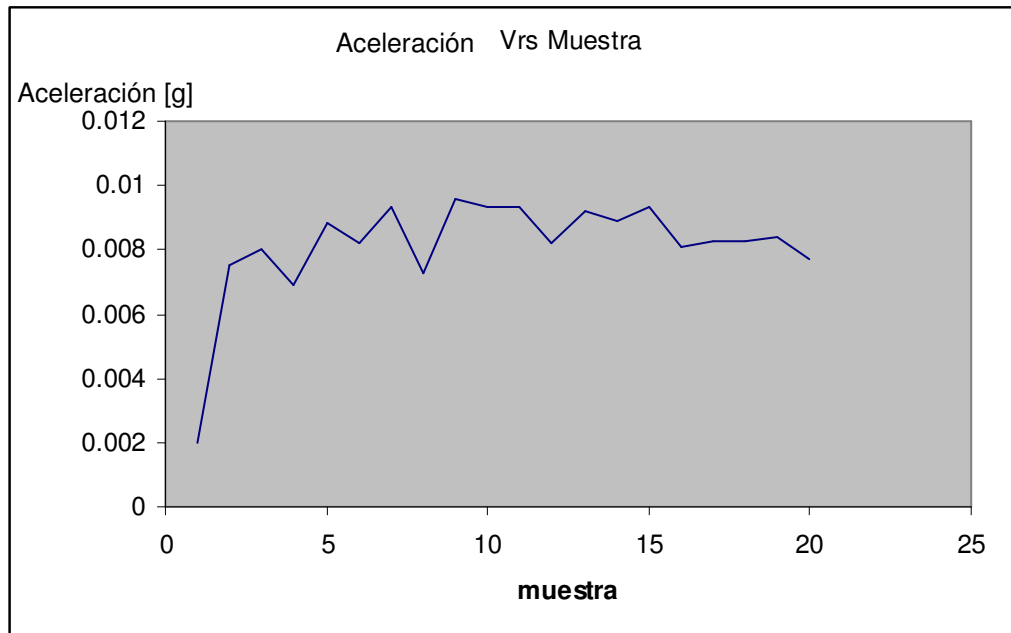


Figura 39: Muestras de la BAF-CP-01 Vrs valor de la aceleración pico de la componente BPF1 en gravedades.  
 Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 39 se presenta la tendencia del daño en las muestras, evidenciando el inicio de la falla, la cual es la picadura de la pista interna del rodamiento 2 de la Bomba de agua Fría del edificio J de la UPB Bucaramanga.

#### 4.2. Manejadora de Aire del Laboratorio I-206 UPB Bucaramanga

Conociendo las condiciones en las cuales se hicieron las pruebas con las rodamientos de la manejadora, que la velocidad del motor es variable y que la relación de poleas es de 0.7, se procede a identificar los armónicos con el mismo método que se calcularon las de la BAC-01 y la BAF-CP-01.

Armónicos del rodamiento UC204-012 a 30Hz	
BSF	43.2894
BPFO	64.701
BPFI	103.299

Tabla 11: Armónicos del rodamiento  
UC204-012 a 30Hz.

Armónicos del rodamiento UC204-012 a 45Hz	
BSF	64.9341
BPFO	97.0515
BPFI	154.9485

Tabla 12: Armónicos del rodamiento  
UC204-012 a 45Hz.

Armónicos del rodamiento UC204-012 a 60Hz	
BSF	86.5788
BPFO	129.402
BPFI	206.598

Tabla 13: Armónicos del rodamiento  
UC204-012 a 60Hz.

Habiéndole efectuado lo mencionado en la Nota<sub>1</sub> al rodamiento UC204-012, se procede a ubicarlo en la unidad manejadora y realizar las pruebas.

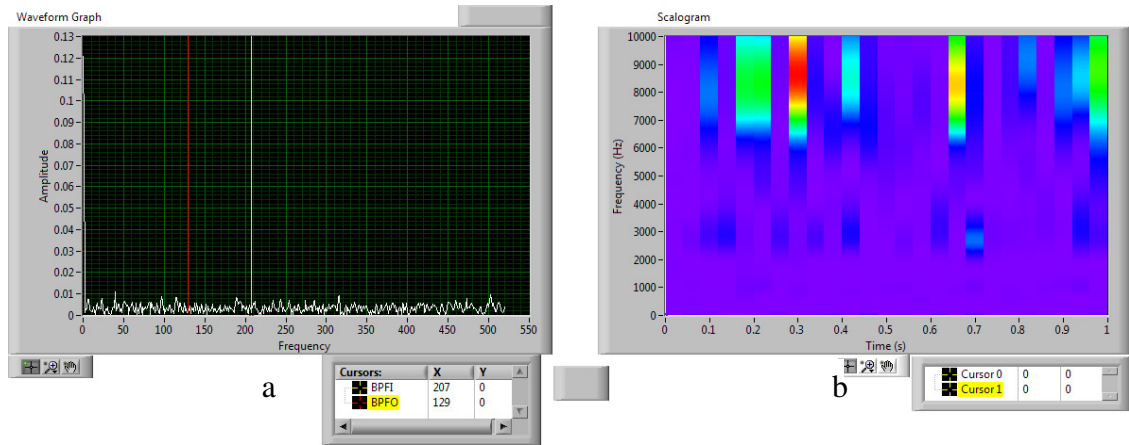


Figura 40: a) Enveloping rodamiento, b) Wavelets rodamiento. Muestra 1.  
 Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 40 se ven los resultados obtenidos en la primera muestra que se tomó a la unidad manejadora de aire acondicionado (UMA) del I-206 de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En la figura 40 (a) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento de la UMA, donde se evidencia el no deterioro en el rodamiento.

En la figura 40 (b) se observa el espectro de la técnica wavelets aplicada a la muestra del rodamiento de la UMA, donde se evidencia el no daño en el rodamiento.

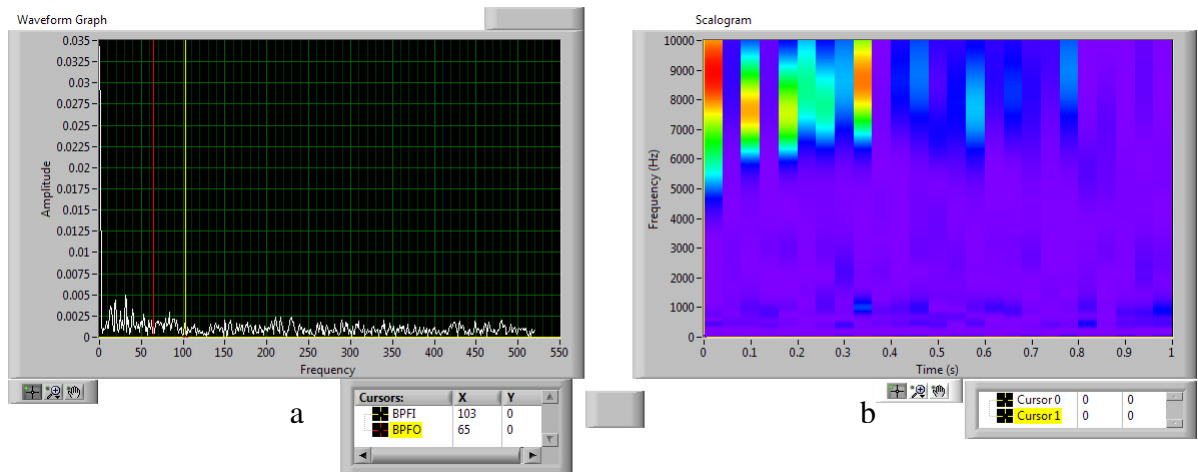


Figura 41: a) Enveloping rodamiento, b) Wavelets rodamiento. Muestra 5.  
 Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 41 se ven los resultados obtenidos en la quinta muestra que se tomó a la unidad manejadora de aire acondicionado (UMA) del I-206 de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En la figura 41 (a) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento de la UMA, donde se evidencia el no deterioro en el rodamiento.

En la figura 41 (b) se observa el espectro de la técnica wavelets aplicada a la muestra del rodamiento de la UMA, donde se comienza a ver evidencia de daño en el rodamiento.

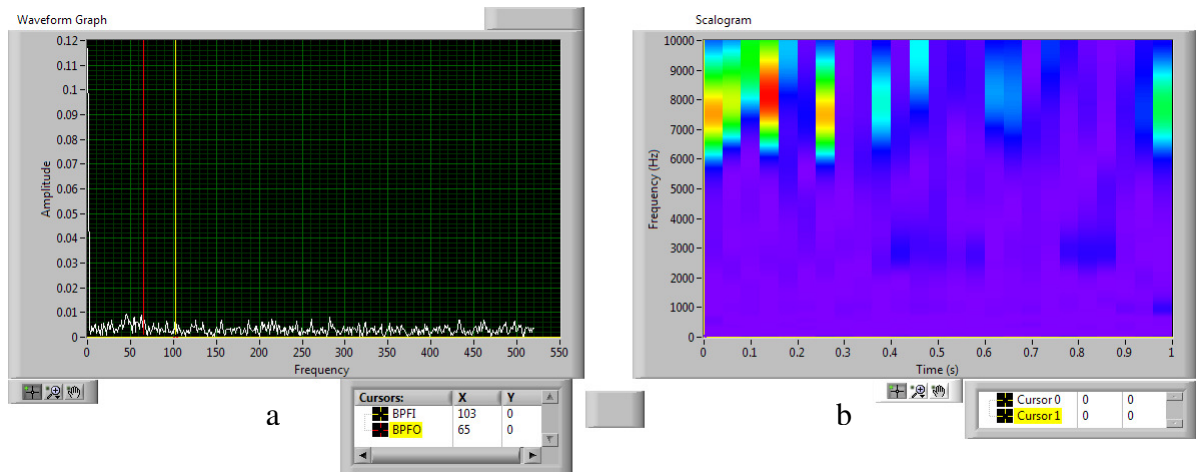


Figura 42: a) Enveloping rodamiento, b) Wavelets rodamiento. Muestra 8.  
 Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 42 se ven los resultados obtenidos en la octava muestra que se tomó a la unidad manejadora de aire acondicionado (UMA) del I-206 de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En la figura 42 (a) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento de la UMA, donde se evidencia el deterioro del rodamiento en la pista interna (BPF1).

En la figura 42 (b) se observa el espectro de la técnica wavelets aplicada a la muestra del rodamiento de la UMA, donde se confirma la evidencia de daño en el rodamiento.

El daño acelerado del rodamiento se debe, a que no presenta ningún tipo de lubricación, ya que fue removida a propósito para acelerar el proceso de desgaste para su estudio.

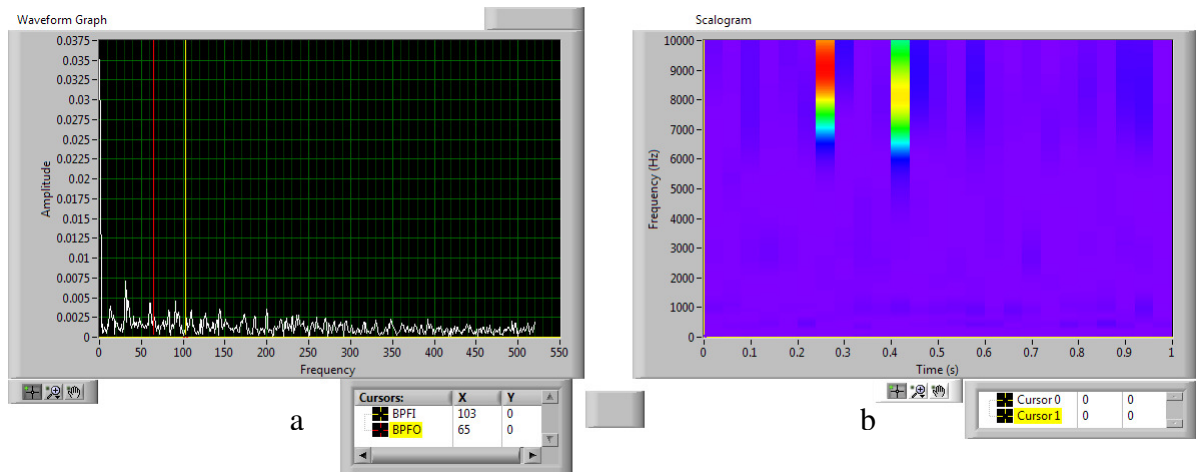


Figura 43: a) Enveloping rodamiento, b) Wavelets rodamiento. Muestra 13.  
 Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 43 se ven los resultados obtenidos en la décimo tercer muestra que se tomó a la unidad manejadora de aire acondicionado (UMA) del I-206 de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En la [figura 43 \(a\)](#) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento de la UMA, donde se evidencia el deterioro del rodamiento en la pista interna (BPF1) y comienza la etapa de mitigación de la señal antes del daño catastrófico.

En la [figura 43 \(b\)](#) se observa el espectro de la técnica wavelets aplicada a la muestra del rodamiento de la UMA, donde se confirma la evidencia de daño en el rodamiento, se confirma lo mencionado anteriormente.

### 4.3. Banco de Pruebas

Teniendo definido y construido el Banco de Pruebas, se procede a hacer una base de datos del mismo.

Se procede a identificar los armónicos con el mismo método que se calcularon las de la BAC-01 y la BAF-CP-01.

Armónicos del rodamiento 6305RS	
BSF	92.502
BPFO	138.5415
BPFI	221.4585

Tabla 14: Armónicos del rodamiento 6305rs.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

Estos armónicos fueron calculados conociendo las rpm del motor y las constantes de los armónicos para cada una de las partes por medio del anexo 8.

En la figura 44 se puede ver como era la disposición de los rodamientos en el banco de pruebas, es la nomenclatura con la cual se hace el análisis de los datos obtenidos de el.

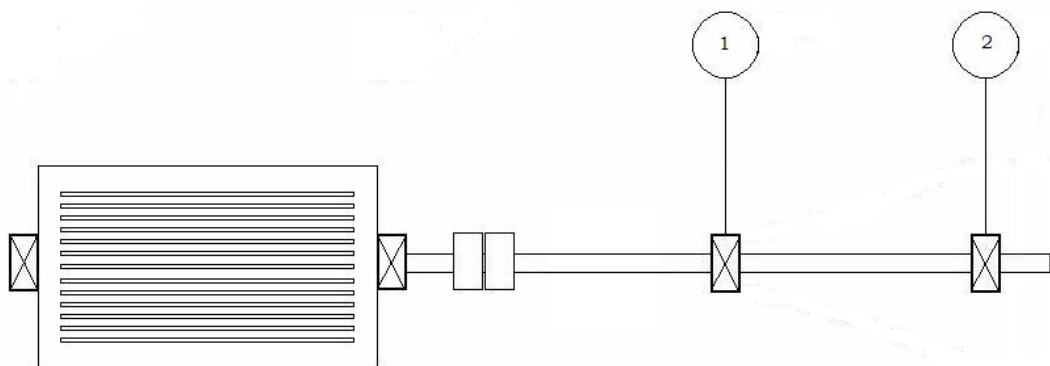


Figura 44: Disposición del los rodamientos en el banco de pruebas.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

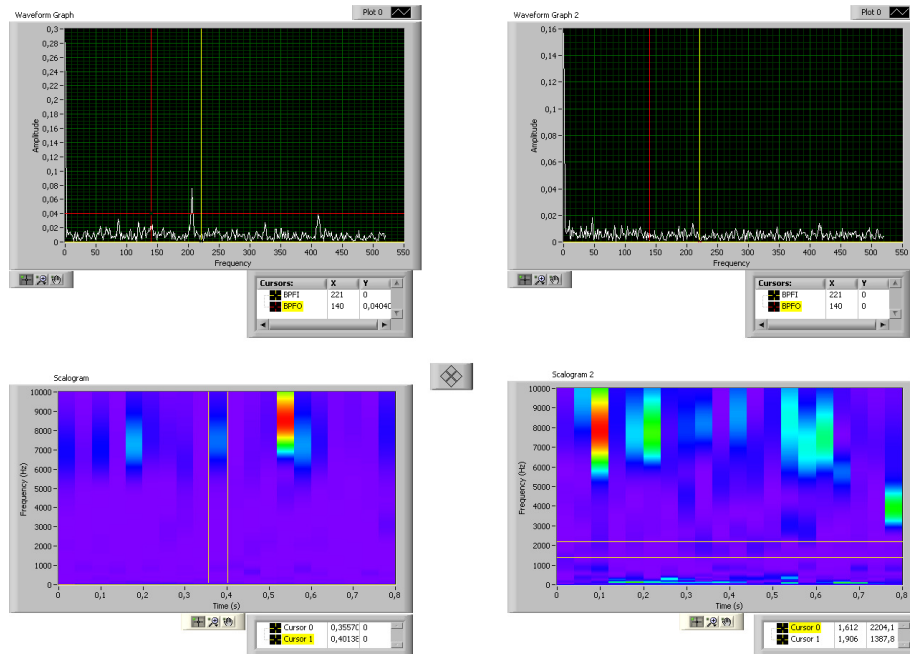


Figura 45: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2,muestra 1.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 45 se ven los resultados obtenidos en la primera muestra que se tomó en el Banco de Vibraciones.

En la figura 45 (a) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número uno del banco, donde se evidencia el no deterioro en el rodamiento.

En la figura 45 (b) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número dos del banco, donde se evidencia el no deterioro en el rodamiento.

En la figura 45 (c) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número uno del banco, donde se evidencia el no deterioro en el rodamiento.

En la figura 45 (d) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número dos del banco, donde se comienza a evidenciar daño en el rodamiento número dos.

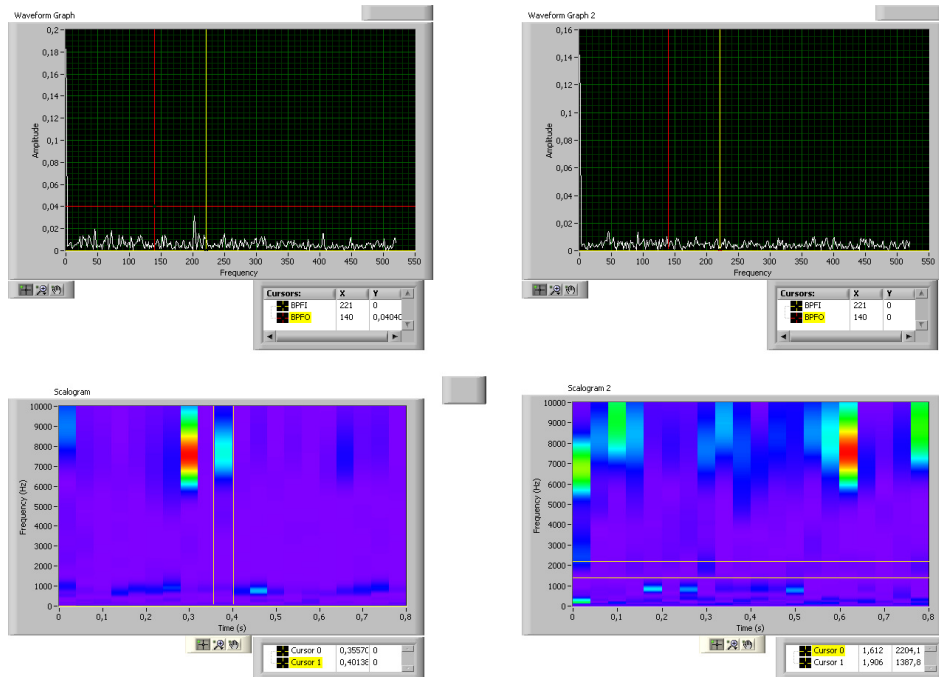


Figura 46: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2,muestra 2.  
 Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 46 se ven los resultados obtenidos en la segunda muestra que se tomó en el Banco de Vibraciones.

En la figura 46 (a) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número uno del banco, donde se evidencia el no deterioro en el rodamiento.

En la figura 46 (b) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número dos del banco, se confirma la picadura de este rodamiento con la aparición del armónico de la pista interna(BPFI) en la grafica.

En la figura 46 (c) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número uno del banco, donde se evidencia el no deterioro en el rodamiento.

En la figura 46 (d) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número dos del banco, donde se evidencia daño en el rodamiento número dos.

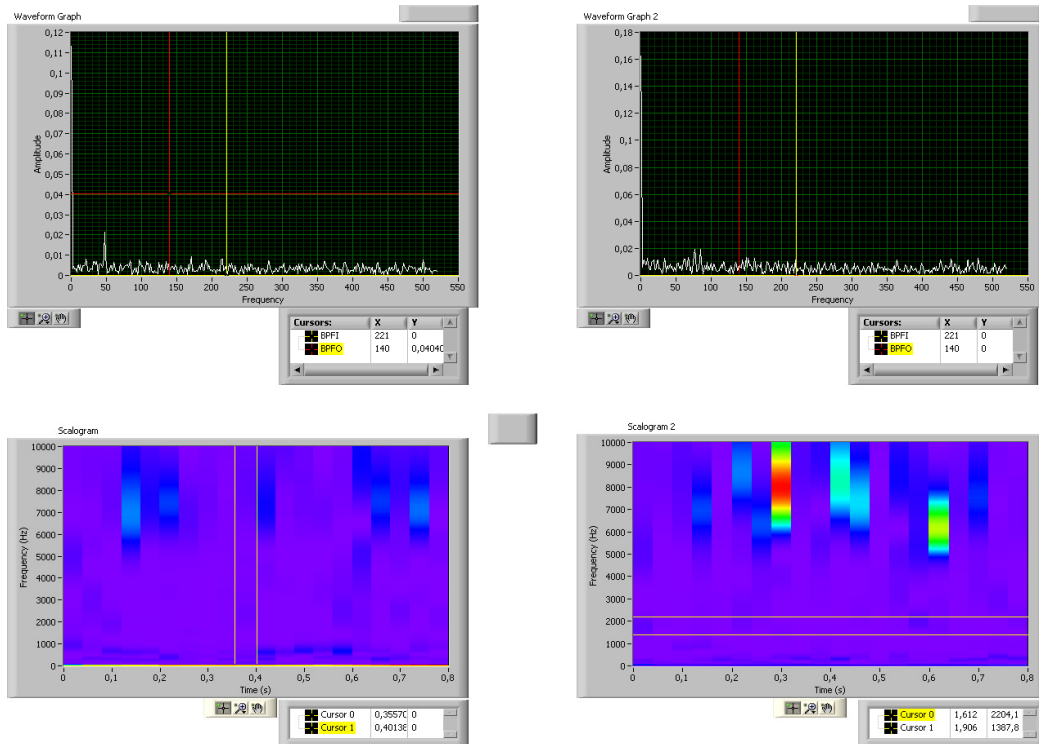


Figura 47: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2, muestra 4-  
 Autor: Alvaro Alvarez Florez

Para esta prueba se cambia el rodamiento uno, por uno nuevo por eso en las figura 47 (a) y (c) no se presenta nada, pero se mantiene el rodamiento dos para pruebas extensas.

Se decidió mantener un rodamiento durante todas las pruebas para ver como era la evolución de este tanto por enveloping como por wavelets.

En la figura 47 (b) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número dos del banco, se confirma la picadura de este rodamiento con la aparición del armónico de la pista interna(BPFI) en la grafica.

En la figura 47 (d) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número dos del banco, donde se evidencia daño en el rodamiento número dos.

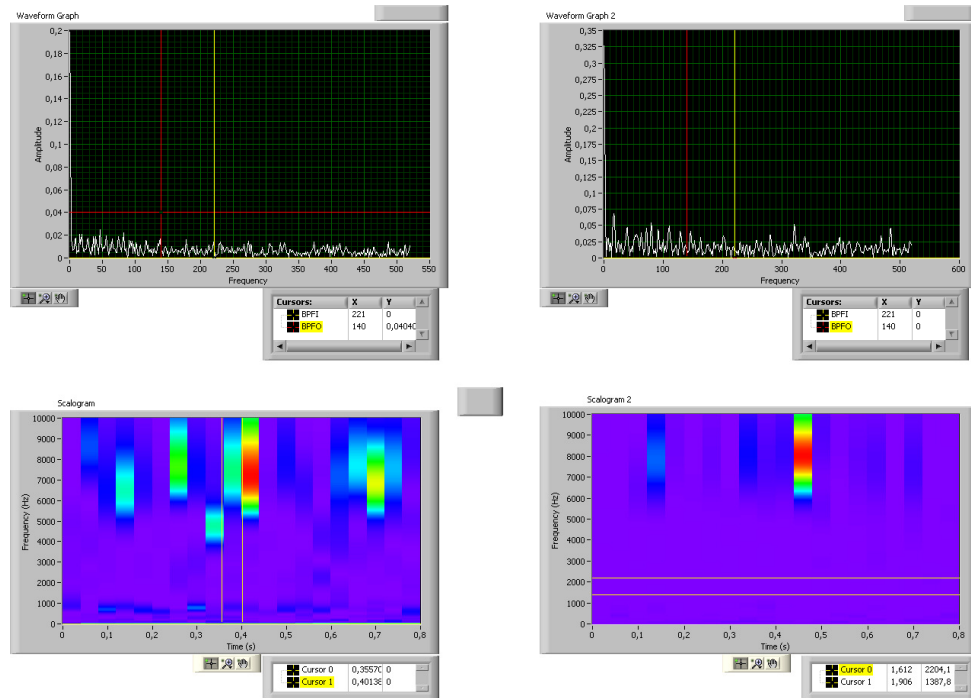


Figura 48: a)Enveloping rodamiento 1, b)Enveloping rodamiento 2, c) Wavelets rodamiento 1, d)Wavelets rodamiento 2,muestra 5-1.  
 Autor: Alvaro Alvarez Florez

En la figura 48 (a) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número uno del banco, donde se evidencia aparentemente el no deterioro en el rodamiento.

En la figura 48 (b) se observa el espectro de la técnica enveloping aplicada a la muestra del rodamiento número dos del banco, se confirma la picadura de este rodamiento con la aparición del armónico de la pista interna(BPFI) en la grafica.

En la figura 48 (c) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número uno del banco, donde se evidencia el deterioro en el rodamiento uno.

En la figura 48 (d) se observa la técnica Wavelets aplicada a la muestra del rodamiento número dos del banco, donde se evidencia daño en el rodamiento número dos.

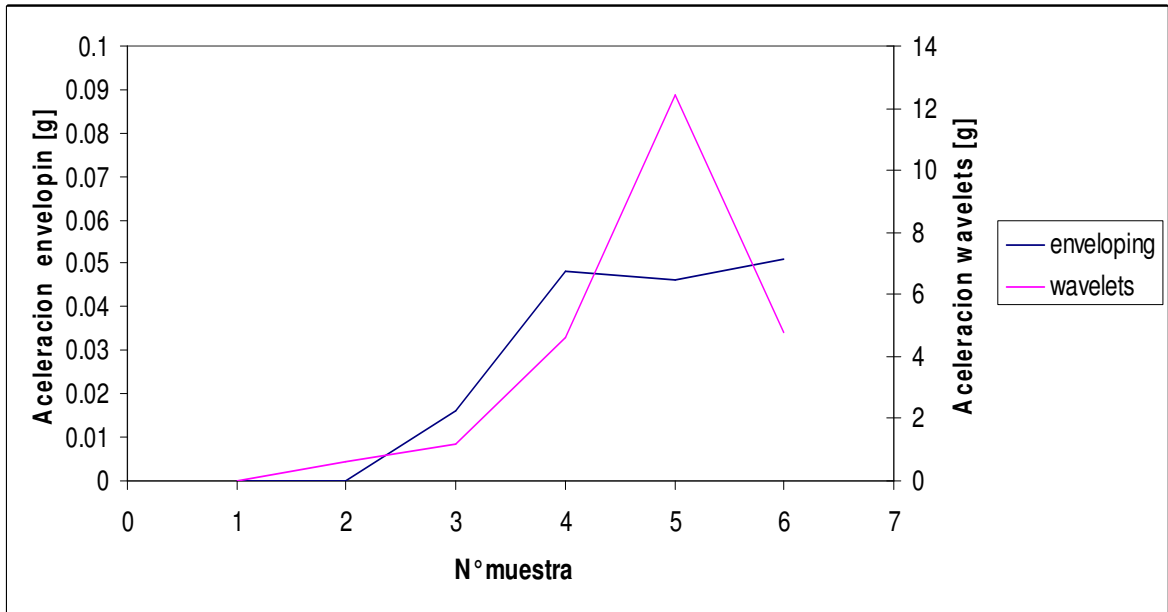


Figura 46: Enveloping y wavelets del rodamiento 1 banco de pruebas  
 Autor: Alvaro Alvarez

En la figura 46 se evidencia la diferencia que presenta cada una de las técnicas utilizadas para analizar las muestras dando como resultado que wavelets anticipando a enveloping en la detección de la falla con tiempo de anterioridad; también se observa la severidad real de la falla, esto se debe a que enveloping hace promedios de la muestra para determinar las frecuencias de respuesta en el tiempo; en tanto wavelets por utilizar la familia de wavelets las cuales compara una a una con la muestra original y da como resultado que tanto se parecen.

## 5. BASES DE DATOS

A continuación se encuentran las bases de datos que se obtuvieron de cada una de las maquinas seleccionadas, con su respectiva ubicación, nombre y fecha.

TABLA DE UBICACIÓN Y NOMBRE DE LAS MUESTRAS DE BAC 01 DEL MOTOR		
Fecha de las Muestras	Nombre de la Muestra	Ubicación de la Muestra
09/07/2008	Muestra 1	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
21/08/2008	Muestra 2	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
25/08/2008	Muestra 3	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
28/08/2008	Muestra 4	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
01/09/2008	Muestra 5	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
04/09/2008	Muestra 6	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
08/09/2008	Muestra 7	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
11/09/2008	Muestra 8	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
15/09/2008	Muestra 9	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
18/09/2008	Muestra 10	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
22/09/2008	Muestra 11	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
25/09/2008	Muestra 12	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
29/09/2008	Muestra 13	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
02/10/2008	Muestra 14	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
06/10/2008	Muestra 15	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
09/10/2008	Muestra 16	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
13/10/2008	Muestra 17	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
16/10/2008	Muestra 18	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
20/10/2008	Muestra 19	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor
23/10/2008	Muestra 20	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\motor

Tabla 15: ubicación y nombre de las muestras de BAC 01 del motor.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

TABLA DE UBICACIÓN Y NOMBRE DE LAS MUESTRAS DE BAC 01 DE LA BOMBA		
Fecha de las Muestras	Nombre de la Muestra	Ubicación de la Muestra
09/07/2008	Muestra 1	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
21/08/2008	Muestra 2	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
25/08/2008	Muestra 3	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
28/08/2008	Muestra 4	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
01/09/2008	Muestra 5	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
04/09/2008	Muestra 6	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
08/09/2008	Muestra 7	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
11/09/2008	Muestra 8	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
15/09/2008	Muestra 9	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
18/09/2008	Muestra 10	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
22/09/2008	Muestra 11	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
25/09/2008	Muestra 12	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
29/09/2008	Muestra 13	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
02/10/2008	Muestra 14	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
06/10/2008	Muestra 15	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
09/10/2008	Muestra 16	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
13/10/2008	Muestra 17	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
16/10/2008	Muestra 18	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
20/10/2008	Muestra 19	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba
23/10/2008	Muestra 20	d:\ Base de Datos\edificio J\BAC 01\bomba

Tabla 16: ubicación y nombre de las muestras de BAC 01 de la bomba.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

TABLA DE UBICACIÓN Y NOMBRE DE LAS MUESTRAS DE BAF-CP-01 MOTOR		
Fecha de las Muestras	Nombre de la Muestra	Ubicación de la Muestra
09/07/2008	-	-
21/08/2008	Muestra 2	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
25/08/2008	Muestra 3	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
28/08/2008	Muestra 4	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
01/09/2008	Muestra 5	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
04/09/2008	Muestra 6	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
08/09/2008	Muestra 7	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
11/09/2008	Muestra 8	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
15/09/2008	Muestra 9	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
18/09/2008	Muestra 10	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
22/09/2008	Muestra 11	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
25/09/2008	Muestra 12	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
29/09/2008	Muestra 13	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
02/10/2008	Muestra 14	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
06/10/2008	Muestra 15	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
09/10/2008	Muestra 16	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
13/10/2008	Muestra 17	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
16/10/2008	Muestra 18	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
20/10/2008	Muestra 19	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor
23/10/2008	Muestra 20	d:\ Base de Datos\BAF-CP-01\motor

Tabla 17: ubicación y nombre de las muestras de BAF-CP-01 del motor.  
Autor: Alvaro Alvarez Florez

TABLA DE UBICACIÓN Y NOMBRE DE LAS MUESTRAS DE BAF-CP-01 BOMBA		
Fecha de las Muestras	Nombre de la Muestra	Ubicación de la Muestra
09/07/2008	Muestra 1	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
21/08/2008	Muestra 2	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
25/08/2008	Muestra 3	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
28/08/2008	Muestra 4	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
01/09/2008	Muestra 5	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
04/09/2008	Muestra 6	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
08/09/2008	Muestra 7	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
11/09/2008	Muestra 8	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
15/09/2008	Muestra 9	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
18/09/2008	Muestra 10	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
22/09/2008	Muestra 11	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
25/09/2008	Muestra 12	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
29/09/2008	Muestra 13	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
02/10/2008	Muestra 14	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
06/10/2008	Muestra 15	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
09/10/2008	Muestra 16	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
13/10/2008	Muestra 17	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
16/10/2008	Muestra 18	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
20/10/2008	Muestra 19	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba
23/10/2008	Muestra 20	d:\ Base de Datos\edificio J\BAF-CP-01\bomba

Tabla 18: ubicación y nombre de las muestras de BAF-CP-01 de la bomba.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

TABLA DE UBICACIÓN Y NOMBRE DE LAS MUESTRAS DE LA UNIDAD MANEJADORA DE AIRE I-206			
Fecha de las Muestras	Nombre de la Muestra	Hora de la Muestra	Ubicación de la Muestra
08/04/2008	Muestra 1	8:40am	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\60hz
08/04/2008	Muestra 2	12:00m	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\30hz
08/04/2008	Muestra 3	2:30pm	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\60hz
08/04/2008	Muestra 4	5:50pm	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\30hz
09/04/2008	Muestra 5	9:00am	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\60hz
09/04/2008	Muestra 6	12:00m	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\30hz
09/04/2008	Muestra 7	2:10pm	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\60hz
09/04/2008	Muestra 8	6:00pm	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\30hz
10/04/2008	Muestra 9	9:30am	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\45hz
10/04/2008	Muestra 10	5:50pm	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\45hz
11/04/2008	Muestra 11	8:45am	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\45hz
11/04/2008	Muestra 12	12:35pm	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\45hz
11/04/2008	Muestra 13	4:35pm	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\45hz
14/04/2008	Muestra 14	5:35pm	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\30hz
15/04/2008	Muestra 15	9:30am	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\60hz
15/04/2008	Muestra 16	6:00pm	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\30hz
17/04/2008	Muestra 17	3:00pm	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\30hz
18/04/2008	Muestra 18	9:50am	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\60hz
18/04/2008	Muestra 19	5:10pm	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\30hz
19/04/2008	Muestra 20	9:50pm	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\60hz
19/04/2008	Muestra 21	9:55am	d: Base de Datos\\datos manejadora I-206\30hz

Tabla 19: ubicación y nombre de las muestras de la unidad manejadora de aire i-206.

Autor: Alvaro Alvarez Florez

## IMPACTO EN EL MEDIO

- Exposición en INGENIAR en la UPB Medellín, donde se dio a conocer tanto a estudiantes como a la industria los resultados obtenidos con el proyecto y como beneficiaría este al medio de la industria generando metodologías de mantenimiento, que no les genere pérdidas de material ni de tiempo por una parada inesperada en el proceso, por daños en un rodamiento. Ya que con las metodologías estudiadas se puede detectar los daños en las etapas tempranas y así ir haciendo un plan de mantenimiento para la máquina que presenta el daño o hacer la corrección necesaria para esta.



Figura 47: Exposición en INGENIAR

- Curso de Vibraciones Mecánicas en EPM Medellín, se mostró los resultados donde se dio a conocer tanto a estudiantes como a la industria los resultados obtenidos con el proyecto y como beneficiaría esto a EPM; ellos tienen implementado el mantenimiento predictivo por enveloping, y se les mostró que con wavelets sus resultados se podrían anticipar con anterioridad.

## CONCLUSIONES

- Eneveloping tiene como ventaja que es la técnica que actualmente se trabaja en la industria, es la más conocida; pero una de sus grandes desventajas es la de poder graduar el filtro pasa banda, el cual se encarga de limpiar la señal que estamos buscando de las demás señales que se encuentran en nuestra muestra para poder determinar en que estado se encuentra el rodamiento
- Waveletes tiene como gran ventaja que no tenemos que ponernos a filtrar la señal seleccionando la wavelets madre y teniendo el escalamiento necesario se obtendrá la que se esta buscando, además que nos anticipa con buen tiempo de anterioridad, nos muestra la severidad de las falla; pero su gran desventaja se encuentra en el procesamiento de los datos, esta técnica se tiene que hacer en postprocesamiento ya que implica un gran consumo de recursos del computador para realizar todos los cálculos necesarios.
- El uso de Wavelets frente a Enveloping en la predicción de daño en los rodamientos de bolas es el más adecuado; pues la medición sería precisa porque el proceso de filtrado no tendría error humano al determinar los filtros; si tuviéramos que parametrizar estos filtros podemos correr el riesgo que la medición que veamos no sea la deseada.
- Se trabajo con una técnica que es poco conocida en la industria por no decir que no; esta técnica se implemento primero en el área de la salud mas precisamente en cardiología, hasta hace poco se empezó a ver su utilidad en la industria esto representa un proyecto innovador, además que se enfoco a trabajar en la parte fallas temprana y no en la de falla avanzada que es donde la totalidad de los equipos que se encuentran en la actualidad en el mercado funcionan.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] LabVIEW TM. Sound and Vibration Toolkit User Manual. Anexo 5.
- [2] LabVIEWTM. Advanced Signal Processing Toolki, Wavelet Analysis Tools User Manual. Anexo 6.
- [3] Bearing SKF. <http://www.skf.com>
- [4] Weller Nathan. Acceleration Enveloping –Higher Sensitivity, Earlier Detection. Anexo 7.
- [5] Abbasian S., Rafsanjani A., Farshidianfar A. y Irani N.; Rolling element bearings multi-fault classification based on the wavelet denoising and support vector machine. Anexo 7.
- [6] Estupiñan Edgar , Saavedra Pedro. Tecnicas de diagnostico para el analisis de vibraciones de rodamientos. Anexos 7.
- [7] Manual de operación y mantenimiento, sistema de aire acondicionado, universidad pontificia bolivariana edificio j Bucaramanga. Anexo [6].
- [8] The Bearing Expert TM. <http://www.sourceindex.com>
- [9] Fontecha Gilberto. Análisis de la implementación de la descomposición por wavelets de la señal de aceleración de vibración de maquinaria de planta para la detección temprana y monitoreo de fallas en rodamientos de bolas.
- [10] Gallego Juan, Transductores ultrasónicos de potencia.
- [11] Florez,Elkin, Cardona Salvador. Análisis en tiempo y frecuencia de señales de vibración tomadas al Pie del carril durante el paso de un tren.
- [12] Wolfgang Kropp. Technical Acustics I.

## **ANEXOS**