

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA, MEXICALI

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN
RODAMIENTOS EN UN GENERADOR SÍNCRONO MEDIANTE EL
PROCESAMIENTO DE SEÑALES VIBRO-ACÚSTICAS
EMPLEANDO ESPECTROS DE ORDEN SUPERIOR”**

T E S I S

**QUE PRESENTA PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA**

ZULMA YADIRA MEDRANO HURTADO

**DIRECTOR DE TESIS
DR. CARLOS PEREZ TELLO**

**CO-DIRECTOR DE TESIS
DR. JULIO GÓMEZ SARDUY**

MEXICALI, B.C., NOVIEMBRE DE 2014

Agradecimientos

A mi *esposo*, Humberto que sin su ayuda y apoyo jamás hubiera realizado este proyecto.

A mis *hijos*, Humberto y Alejandra por su paciencia y amor.

A mis *padres*, por darme la confianza, para continuar.

A mi *director de tesis*, Dr. Carlos Pérez Tello, por el tiempo dedicado y las aportaciones realizadas a este trabajo.

A mi *co-director de tesis*, Dr. Julio Gómez Sarduy, por el tiempo dedicado y las aportaciones realizadas a este trabajo.

Al Dr. Alberto de Armas Teyra, por su guía en la realización de esta investigación.

Al *comité de tesis*: Edgar Eduardo Valenzuela Mondaca, Marco Antonio Félix Lozano, Juan de Dios Ocampo Díaz, Pedro Francisco Rosales Escobedo, por su ayuda en la revisión de esta tesis.

Gracias a todas las personas involucradas en este proyecto.

Índice

	Páginas
Resumen.....	7
Índice de figuras.....	13
Índice de tablas.....	20
Nomenclatura.....	22
 Capítulo 1. Introducción.....	 25
1.1. Descripción del problema y justificación del trabajo.....	28
1.2. Objetivos.....	31
1.3. Hipótesis.....	32
 Capítulo 2. Antecedentes.....	 33
2.1. Técnicas de detección de fallas en generadores síncronos.....	33
2.2. Clasificación de fallas en generadores síncronos	35
2.3. Terminología de los rodamientos.....	37
2.3.1. Términos y definiciones.....	38
2.3.2. Tipos de rodamientos.....	42
2.3.3. Principales causas y tipos de fallas en rodamientos.....	42
2.4. Magnitudes físicas utilizadas para el monitoreo del estado de los generadores síncronos.....	46
2.4.1. Señales de vibración.....	47
2.4.2. Transductores de vibración.....	49
2.4.3. Emisión acústica.....	52

Capítulo 3. Análisis de la señal y espectros de orden superior.....	57
3.1. Base teórica del análisis estadístico.....	57
3.1.1. Variable aleatoria.....	58
3.1.2. Función de distribución de probabilidad.....	58
3.1.3. Función de densidad de probabilidad.....	59
3.1.4. Valor esperado (valor medio).....	59
3.1.5. Varianza.....	60
3.1.6. Valor cuadrático medio.....	61
3.2. Estadísticas de orden superior (<i>HOS</i>).....	63
3.2.1. Momentos de orden “ <i>n</i> ”.....	65
3.2.2. Relación entre cumulantes y momentos.....	67
3.2.3. Propiedades de los cumulantes.....	70
3.2.4. La función de densidad espectral de potencia (<i>PSD</i>) en términos de cumulantes.....	74
3.2.5. Biespectro.....	77
Capítulo 4. Diseño y construcción del banco experimental.....	79
4.1. Evaluación de los micrófonos omnidireccionales y unidireccionales.....	81
4.1.1. Diseño de experimentos.....	81
4.2. Metodología de la experimentación.....	83
4.3. Selección del rodamiento.....	84
4.4. Falla artificial.....	85
4.5. Diseño y construcción del banco experimental.....	86
4.5.1. Configuración y especificación de los componentes.....	86

4.5.2. Localización de transductores.....	88
4.6. Sistemas de adquisición.....	89
4.6.1. Sistema de adquisición de datos para el acelerómetro.....	90
4.6.2. Sistema de adquisición de datos para los micrófonos.....	91
Capítulo 5. Experimentación y análisis de resultados.....	95
5.1. Frecuencias de falla del rodamiento <i>SKF6303 – 2RSH</i>	96
5.2. Clasificación de los datos.....	96
5.3. Interpretación de los datos adquiridos con los acelerómetros.....	97
5.3.1. Dominio del tiempo (acelerómetros y micrófonos).....	98
5.3.2. Dominio de la frecuencia <i>PSD</i> (acelerómetros y micrófonos).....	102
5.3.3. <i>BIS</i> (acelerómetros y micrófonos).....	108
5.4. Análisis de las señales de los transductores (acelerómetros y micrófonos).....	116
5.4.1. Señales graficadas con respecto al tiempo.....	116
5.4.2. Señales graficadas con respecto a la frecuencia (<i>PSD</i>).....	116
5.4.3. Señales graficadas con Biespectro (<i>BIS</i>).....	117
5.4.4. Diseño de experimentos.....	119
Capítulo 6. Conclusiones, novedad científica, aportaciones y recomendaciones para trabajos futuros.....	125

Apéndices

Apéndice	Páginas
A Tipos de rodamientos.....	136
B Interpretación de los datos adquiridos.....	142
C Interfaz gráfica.....	162
D Diseño de experimentos.....	196

Resumen

En este trabajo de tesis se presenta una metodología novedosa para diagnosticar fallas en rodamientos de generadores síncronos empleando señales acústicas capturadas mediante micrófonos unidireccionales y omnidireccionales. Asimismo, se realizó un análisis comparativo entre dicha metodología y la que se emplea tradicionalmente por medio de acelerómetros. A su vez, se analizó la ventaja de utilizar los espectros de orden superior (*HOSA*, por sus siglas en inglés) en el diagnóstico. Se desarrollaron las pruebas en una máquina síncrona de 2 HP de capacidad con una alimentación de 50 V de corriente directa a 1725 rpm en el laboratorio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Baja California. Se efectuó una comparación entre dos casos especiales de *HOSA*: densidad espectral de potencia (*PSD*, por sus siglas en inglés) y biespectro (*BIS*). Sus algoritmos fueron empleados para procesar las señales de vibración resultantes de rodamientos, *sin* falla y *con* falla artificial, respectivamente. La falla artificial consistió en una grieta producida en la jaula de un rodamiento *SKF – 6303 – 2RSH* inducido por un desarmador de precisión con punta en estrella de manera que provocara una grieta total de una de las secciones de la jaula que sostiene uno de los elementos rodantes. La razón de esto es que este tipo de falla ocurre de manera frecuente comúnmente por cargas revertidas o por sobrecargas.

La adquisición de las señales de vibración se efectuó mediante acelerómetros piezoeléctricos (*EVAL – ADXL325*), micrófonos unidireccionales (*WM – 55A103*) y micrófonos omnidireccionales (*WM – 61A*), con el fin de evaluar el desempeño de cada uno de ellos. Para la condición *sin* falla y *con* falla, las señales fueron muestreadas a la

frecuencia de rotación del eje (60 Hz). Los gráficos en el dominio del tiempo, *PSD* y *BIS* obtenidos con los dos tipos de transductores fueron consistentes.

El análisis de las señales de vibración en el dominio del tiempo, reveló que la amplitud de la vibración producida por la condición *con* falla es mayor que cuando la condición es *sin* falla. El incremento en amplitud es una clara indicación que existe una falla; sin embargo es muy difícil encontrar el origen de esta ya que no es posible identificar claramente los componentes de frecuencia de la señal.

La utilización de la *PSD* y el *BIS* en el análisis de la señales de vibración permitió determinar que los *BIS* muestran con mucha más claridad las frecuencias generadas por el defecto en el rodamiento. Las *PSD* mostraron también frecuencias características, pero fueron difíciles de identificar ya que se presentó un traslape entre dos series de picos.

El experimento fue diseñado aplicando la metodología Taguchi, se utilizaron veinticuatro arreglos ortogonales L_8 a dos niveles con tres tipos de carga como factores de estudio: Resistiva (*R*), Inductiva (*L*), y capacitiva (*C*), cada una de ellas equivalente a 100 ohms para probar su nivel de significancia sobre la variable de respuesta, en este caso, el nivel de vibración. La señal fue registrada en milivolts (*mV*). Se realizaron doce pruebas con tres réplicas. Los resultados mostraron que los acelerómetros no tienen la capacidad de detectar fallas en rodamientos no importando la carga conectada a la máquina síncrona. Los micrófonos omnidireccionales indican que se encuentran en el límite crítico de sensibilidad para las condiciones de prueba, por tanto, antes de considerar adecuado el empleo de estos micrófonos para detección de falla deberán efectuarse más pruebas aumentando la sensibilidad de los transductores a fin de encontrar los valores apropiados. Por su parte, los micrófonos unidireccionales mostraron sensibilidad significativa para la condición *con* falla

independientemente del tipo de carga conectada a la máquina tanto en la dirección horizontal como vertical por lo que se concluye que este instrumento es el más apropiado para el diagnóstico de este tipo de falla.

Palabras clave: espectros de alto orden, biespectro, densidad espectral de potencia, acelerómetro, micrófonos unidireccionales, micrófonos omnidireccionales, grieta, rodamiento.

Abstract

In this thesis work a novel methodology to diagnose faults in synchronous generators bearings using acoustic signals captured by unidirectional and omnidirectional microphones is presented. Also, a comparative analysis between this methodology and the commonly used through accelerometers was made. At the same time, the advantage of using the *HOSA* (Higher Order Spectral Analysis) for diagnosis was analyzed. Tests were developed on a 2 Hp synchronous machine with a power capacity of 50 V direct current and 1725 rpm (revolutions per minute). Tests were carried out in the laboratory of electrical engineering at the Universidad Autonoma de Baja California. A comparison between two special cases of *HOSA* was made: power spectral density (*PSD*) and bispectrum (*BIS*). These algorithms were used to process the vibration signals resulting of bearings *without* fail and *with* artificial fault, respectively. The artificial fault was a crack in the cage of a bearing *SKF – 6303 – 2RSH* made with a precision star screwdriver. The reason for this is because this type of failure is frequent and commonly caused by overloads or reversed loads.

The acquisition of the vibration signals was carried out with piezoelectric accelerometers *EVAL – ADXL325*, unidirectional microphones *WM – 55A103*, and omnidirectional microphones *WM – 61A* in order to evaluate the performance of each of them. For the condition *with* and *without* fault, the signals were sampled at the rotation frequency of the shaft (60 Hz). The *PSD* and *BIS* plots over the time domain obtained with the two types of transducers were consistent.

The analysis of these vibration signals revealed that the amplitude of the vibration caused by the condition *with* fault is greater than when the condition is *without* fault. The increase

in amplitude is a clear indication that there is a failure; however, it is very difficult to find the exact source because it is not possible to clearly identify the frequency components of the signal.

The use of the *PSD* and the *BIS* in the analysis of vibration signals allowed to determine that the *BIS* shows more clearly the frequencies generated by the defect in the bearing. The *PSD* also shows characteristic frequencies but these were difficult to identify since they presented overlapping between two series of peaks.

The experiment was designed using the Taguchi methodology, twenty four tests for each two-level L_8 orthogonal considering three types of load as control factors: resistive load (R), inductive load (L), and capacitive load (C), each load was equivalent to 100 Ω and it was investigated their statistical significance on the response variable, in this case, the resulting vibration signal that was recorded in millivolts (mV). Twelve L_8 arrays were performed with three replicates. The results showed that the accelerometers are not capable of detecting bearing fault no matter the load connected to the synchronous machine. When omnidirectional microphones were used indicate that they are in the critical limit of sensitivity for the test conditions, therefore, before considering appropriate or not the use of these microphones in fault detection it should be performed more tests to increase the sensitivity of transducers in order to find the appropriate values. When unidirectional microphones were used, they showed significant sensitivity to the condition *with* fault regardless of the type load connected to the machine, both in horizontal and vertical direction so it is concluded that this instrument is most appropriate for the diagnosis of this type of failure.

Keywords: Higher order spectral, bispectrum, power spectral density, accelerometers piezoelectric, unidirectional back electrets condenser microphone, omnidirectional back electrets condenser microphone, crack, bearing.

Índice de figuras

Figura	Páginas
2.1 Proceso de monitoreo de condiciones en línea.....	35
2.2 Porcentaje de falla en generadores.....	35
2.3 Partes constructivas de un rodamiento.....	38
2.4 Diámetros de un rodamiento.....	40
2.5 Ángulo de contacto (β).....	41
2.6 Cargas axiales y radiales en un rodamiento.....	41
2.7 Juegos internos en un rodamiento.....	42
2.8 Etapas progresivas del desconchado en un rodamiento.....	43
2.9 Sección transversal del rodamiento.....	45
2.10 Acelerómetro piezoeléctrico en circuito integrado.....	51
2.11 Vista en corte de un micrófono tipo electreto.....	54
2.12 Principales elementos de un micrófono tipo condensador.....	55
3.1 Esquema de clasificación de los espectros de orden superior para una señal discreta $x[k]$, donde F_n · representa la transformada de Fourier de dimensión n	64
3.2 Simetrías en el dominio del tiempo.....	71
4.1 Metodología de la experimentación.....	84
4.2 Aspecto físico del deterioro de la jaula.....	85
4.3 Rodamiento con hendidura en la jaula.....	86
4.4 Sistema mecánico.....	87

4.5	Colocación de los transductores micrófonos unidireccional, omnidireccionales y acelerómetro piezoeléctrico.....	89
4.6	Sistema de adquisición usando acelerómetros piezoeléctricos.....	90
4.7	Sistema de adquisición para los micrófonos.....	92
4.8	Circuito amplificador para los transductores.....	94
5.1.	Desplazamiento de la falla conforme la jaula gira y amplitud de impacto de acuerdo a su cercanía con la zona de carga.....	98
5.2.	Señal de vibración horizontal del acelerómetro para la condición <i>sin</i> falla.....	99
5.3.	Señal de vibración horizontal del acelerómetro para la condición <i>con</i> falla.....	99
5.4.	Señal acústica horizontal del micrófono omnidireccional para la condición <i>sin</i> falla.....	100
5.5.	Señal acústica horizontal del micrófono omnidireccional para la condición <i>con</i> falla.....	100
5.6.	Señal de vibración horizontal del acelerómetro para la condición <i>sin</i> falla.....	102
5.7.	Señal de vibración horizontal del acelerómetro para la condición <i>con</i> falla.....	103
5.8.	Señal acústica horizontal del micrófono omnidireccional para la condición <i>sin</i> falla.....	104
5.9.	Señal acústica horizontal del micrófono omnidireccional para la condición <i>con</i> falla.....	104
5.10.	Señal acústica horizontal del micrófono unidireccional para la condición <i>sin</i> falla.....	105
5.11.	Señal acústica horizontal del micrófono unidireccional para la condición <i>con</i> falla.....	105

5.12. Amplitud del biespectro de la señal de vibración horizontal del acelerómetro para la condición <i>sin</i> falla; (a) Vista frontal, (b) Vista superior, (c) Zoom.....	109
5.13. Amplitud del biespectro de la señal de vibración horizontal del acelerómetro para la condición <i>con</i> falla; (a) Vista superior, (b) Zoom.....	110
5.14. Amplitud del biespectro de la señal acústica horizontal del micrófono omnidireccional para la condición <i>sin</i> falla; (a) Vista superior, (b) Zoom.....	111
5.15. Amplitud del biespectro de la señal acústica horizontal del micrófono omnidireccional para la condición <i>con</i> falla; (a) Vista superior, (b) Zoom.....	112
5.16. Amplitud del biespectro de la señal acústica horizontal del micrófono unidireccional para la condición <i>sin</i> falla; (a) Vista superior, (b) Zoom.....	113
5.17 Amplitud del biespectro de la señal acústica horizontal del micrófono unidireccional para la condición <i>con</i> falla; (a) Vista superior, (b) Zoom.....	114
A.1 Rodamientos rígidos, (a) de una hilera de bolas, (b) con dos hileras de bolas.....	137
A.2 Rodamiento de bolas a rótula, (a) autoalineable, (b) autoalineable con anillo interior extendido.....	137
A.3 Rodamientos de bolas de contacto angular, (a) con cuatro puntos de contacto, (b) de alta precisión, (c) de doble hilera-anillo interior de una pieza.....	138
A.4 Rodamientos de rodillos cilíndricos, (a) de cuatro hileras, (b) de llenado completo de una hilera, (c) de llenado completo de doble hilera.....	138
A.5 Rodamientos de agujas, (a) de aguja combinado, (b) de aguja autoalineable, (c) ensamble de rodillos de aguja y su jaula, (d) de agujas con pestaña.....	139
A.6 Rodamientos axiales de bolas, (a) de simple efecto, (b) de doble efecto.....	139
A.7 Rodamiento axial de rodillos cilíndricos.....	140
A.8 Rodamiento axial de agujas.....	140

A.9	(a) Rodamiento axial de rodillos a rótula, (b) ángulo formado por la transmisión de la carga.....	140
A.10	Rodamiento tipo Y, (a) con manguito de fijación, (b) con anillo de fijación excéntrico con prisionero, (c) con prisioneros de fijación, (d) con anillo interior normal.....	141
B.1	Señal de vibración vertical del acelerómetro para la condición <i>sin</i> falla.....	142
B.2	Señal de vibración vertical del acelerómetro para la condición <i>con</i> falla.....	143
B.3	Señal acústica vertical del micrófono omnidireccional para la condición <i>sin</i> falla.....	144
B.4	Señal acústica vertical del micrófono omnidireccional para la condición <i>con</i> falla.....	144
B.5	Señal acústica horizontal del micrófono unidireccional para la condición <i>sin</i> falla.....	145
B.6	Señal acústica horizontal del micrófono unidireccional para la condición <i>con</i> falla.....	146
B.7	Señal acústica vertical del micrófono unidireccional para la condición <i>sin</i> falla.....	147
B.8	Señal acústica vertical del micrófono unidireccional para la condición <i>con</i> falla.....	147
B.9	Señal de vibración vertical del acelerómetro para la condición <i>sin</i> falla.....	149
B.10	Señal de vibración vertical del acelerómetro para la condición <i>con</i> falla.....	149
B.11	Señal acústica vertical del micrófono omnidireccional para la condición <i>sin</i> falla.....	150

B.12 Señal acústica vertical del micrófono omnidireccional para la condición <i>con</i> falla.....	151
B.13 Señal acústica vertical del micrófono unidireccional para la condición <i>sin</i> falla.....	151
B.14 Señal acústica vertical del micrófono unidireccional para la condición <i>con</i> falla.....	152
B.15 Amplitud del biespectro de la señal de vibración vertical del acelerómetro para la condición <i>sin</i> falla; (a) Vista superior, (b) Zoom.....	155
B.16 Amplitud del biespectro de la señal de vibración vertical del acelerómetro para la condición <i>con</i> falla; (a) Vista superior (b) Zoom.....	156
B.17 Amplitud del biespectro de la señal acústica vertical del micrófono omnidireccional para la condición <i>sin</i> falla; (a) Vista superior, (b) Zoom.....	157
B.18 Amplitud del biespectro de la señal acústica vertical del micrófono omnidireccional para la condición <i>con</i> falla; (a) Vista superior, (b) Zoom.....	158
B.19 Amplitud del biespectro de la señal acústica vertical del micrófono unidireccional para la condición <i>sin</i> falla; (a) Vista superior, (b) Zoom.....	159
B.20 Amplitud del biespectro de la señal acústica vertical del micrófono unidireccional para la condición <i>con</i> falla; (a) Vista superior, (b) Zoom.....	160
C.1 (a) Implementación de captura, (b) Procesamiento de la señal.....	162
C.2 Pantalla de la interfaz gráfica.....	165
C.3 Organización a bloques del software.....	166
C.4 Gráfica en función del tiempo de acelerómetro en el eje horizontal. <i>Sin</i> falla. (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada, (c) Ambas señales. <i>Con</i> falla. (d) Señal sin filtrar, (e) Señal filtrada, (f) Ambas señales.....	169

- C.5 Gráfica en función de la frecuencia. *Sin* falla. (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con* falla. (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy)..... 172
- C.6 Ventanas con zoom. *Sin* falla. a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje x (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con* falla. (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy)..... 178
- C.7 Gráfica en amplitud del biespectro. *Sin* falla. a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje x (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con* falla. (g) Acelerómetro eje horizontal (ax),

(h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).....	182
C.8 Ventanas con zoom. Sin falla. (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje x (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). Con falla. (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).....	191

Índice de tablas

Tabla.....	Páginas
3.1 Cálculo de cumulantes en términos de momentos y viceversa de hasta tercer orden.....	70
3.2 Relaciones de simetría entre los momentos y cumulantes.....	72
4.1 Factores de control.....	78
4.2 Arreglo L_8 a dos niveles.....	82
4.3 Especificación de los componentes del sistema mecánico.....	88
4.4 Especificaciones de acelerómetro piezoeléctrico.....	91
4.5 Especificación de micrófono omnidireccional de electreto-condensador.....	92
4.6 Especificación de micrófono unidireccional de electreto-condensador.....	93
5.1 Frecuencias de falla para los elementos del rodamiento <i>SKF6303 – 2RSH</i>	96
5.2 Casos de estudio para el diseño experimental.....	120
5.3 Arreglo ortogonal L_8	120
5.4 <i>ANOVA</i> para el experimento No. 1.....	121
5.5 Resultados del diseño experimental.....	122
C.1 Opciones de la Interfaz gráfica y funciones de MatLab utilizada.....	167
D.1 <i>ANOVA</i> acelerómetro eje x condición <i>sin</i> falla.....	197
D.2 <i>ANOVA</i> acelerómetro eje x condición <i>con</i> falla.....	198
D.3 <i>ANOVA</i> acelerómetro eje y condición <i>sin</i> falla.....	199
D.4 <i>ANOVA</i> acelerómetro eje y condición <i>con</i> falla.....	200
D.5 <i>ANOVA</i> micrófono unidireccional eje x condición <i>sin</i> falla.....	201
D.6 <i>ANOVA</i> micrófono unidireccional eje x condición <i>con</i> falla.....	202

D.7	<i>ANOVA</i> micrófono unidireccional eje <i>y</i> condición <i>sin</i> falla.....	203
D.8	<i>ANOVA</i> micrófono unidireccional eje <i>y</i> condición <i>con</i> falla.....	204
D.9	<i>ANOVA</i> micrófono omnidireccional eje <i>x</i> condición <i>sin</i> falla.....	205
D.10	<i>ANOVA</i> micrófono omnidireccional eje <i>x</i> condición <i>con</i> falla.....	206
D.11	<i>ANOVA</i> micrófono omnidireccional eje <i>y</i> condición <i>sin</i> falla.....	207
D.12	<i>ANOVA</i> micrófono omnidireccional eje <i>y</i> condición <i>con</i> falla.....	208

Nomenclatura

A	Amplitud
ax	Acelerómetro eje x
ay	Acelerómetro eje y
BIS_x	Biespectro de x
$BPFI$	Frecuencia de paso por la pista interior
$BPFO$	Frecuencia de paso por la pista exterior
BSF	Frecuencia de paso de los elementos rodantes
$Cov\ x,y$	Covarianza entre las variables x e y
$Cov\ x,x$	Autovovarianza de la variable x
$c_x\ I$	Cumulante del subvector x_I
$cum\ x_1, x_2, x_3$	Cumulante de tercer orden
c_{nx}	Cumulante de x de orden n
d	Diámetro de bolas (mm)
D	Diámetro de paso (mm)
dA	Diámetro nominal del agujero del rodamiento (mm)
de	Diámetro nominal exterior del rodamiento (mm)
$E\ E\ x_k^2$	Valor cuadrático medio
$E\ x_1, x_2, x_3$	Momento de tercer orden
E	Operador de la esperanza matemática
f	Frecuencia (Hz)
f_s	Frecuencia de muestreo (Hz)
FTF	Frecuencia de paso de la jaula
g	Aceleración de vibración (m_{s^2})
HOS	Estadísticas de orden superior
$HOSA$	Espectros de orden superior
$I_x\ \omega_1, \omega_2$	Biperiodograma de x
I	Es un conjunto de I_x
I_x	Conjunto de índices de x
k	Variable, conjunto de datos

M	Conjunto de muestras
m	Masa (kg)
m_n	Momentos de orden n
$M_{x_k} t$	Función generadora de momentos
$m_x l$	Momento del subvector x_l
m_{x_1, x_2, x_3}	Momento de tercer orden
m_{nx}	Momento de x de orden n
N	Muestras
n	Conjunto de datos
ne	Número de elementos rodantes
omx	Micrófono omnidireccional eje x
omy	Micrófono omnidireccional eje y
P_x	Función de distribución de la probabilidad
$Prob_{x_k}$	Probabilidad de x
PSD	Densidad espectral de potencia
$PSD_x k$	Periodograma de x
$R_{xx} t, t + \tau$	Función de autocorrelación de la variable x
$R_{x_k y_k}$	Función de correlación de las variables x e y
S	Frecuencia de operación del rotor (Hz)
$S_{nx} \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{n-1}$	Espectros de orden n
t	Variable de tiempo (seg)
umx	Micrófono unidireccional eje x
umy	Micrófono unidireccional eje y
V_{rpm}	Velocidad de rotación (rpm)
V_s	Tensión de alimentación (V)
V_{out}	Tensión de salida (V)
w_n	Ventana
x_n	Señal en tiempo discreto
x_t	Señal de longitud finita
x_k, y_k, z_k	Variables aleatorias

z	Constante
ρ_x	Función de densidad de probabilidad
τ	Variable de desplazamiento en el tiempo (<i>seg</i>)
μ_x	Valor medio ó promedio
$\sigma_{x_k}^2$	Varianza del vector x
σ_{x_k}	Desviación estándar del vector x
ω	Frecuencia radianes por segundo (rad_{seg})
φ	Fase del <i>BIS</i>
β	Ángulo de contacto entre las bolas y las pistas (<i>grados</i>)
$1X, 2X, \dots$	Múltiplos de la frecuencia de rotación

Capítulo 1

Introducción

Cualquiera de las actividades que se realizan a diario precisa del empleo de energía. En otros tiempos solamente se podía recurrir al esfuerzo físico de personas o animales, al calor de la leña ardiendo o a la fuerza del aire y del agua al mover los molinos. Actualmente en nuestra sociedad las dos formas de energía más empleadas son los combustibles fósiles como fuente primaria y la electricidad como energía final y de calidad. La facilidad con que se transporta y se transforma a la electricidad la convierte en el tipo de energía más empleado en la mayoría de aplicaciones y de uso final. La energía eléctrica es sin duda la forma de energía más utilizada en el mundo, es pilar del desarrollo industrial de todos los países, parte importante del desarrollo social, y elemento esencial para el desarrollo tecnológico.

La energía eléctrica juega un papel muy importante en la vida del ser humano, con ella se establecen una serie de comodidades que con el transcurso de los años se van haciendo indispensables para el hombre, es difícil imaginar la vida en el mundo actual sin la existencia de la energía eléctrica. La mayoría de las máquinas y equipos tecnológicos que se utilizan habitualmente funcionan con energía eléctrica y se hallan conectados al sistema de suministro sin mostrar que detrás de esta simple acción existe todo un proceso para que la electricidad llegue hasta los hogares, oficinas, escuelas, hospitales e industrias, permitiendo que estos aparatos funcionen.

La generación de energía eléctrica se realiza en centrales eléctricas y se produce a través de la transformación de distintas fuentes de energía. Las fuentes de energía se clasifican en dos grandes grupos: *renovables* son aquellas fuentes que tras ser utilizadas se pueden regenerar

de manera natural o artificial, algunas están sometidas a ciclos que se mantienen de forma más o menos constante en la naturaleza, como son el sol (energía solar), viento (energía eólica), la de ríos y corrientes de agua dulce (energía hidráulica), mares y océanos (energía mareomotriz), biomasa (vegetación); y *no renovables*, son aquellas que se agotan al transformar su energía en energía útil y se encuentran de manera limitada en el planeta como son los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural), geotérmica (energía geotermoeléctrica), uranio (energía nuclear) [1].

La gran mayoría de los tipos de generación de energía eléctrica, excepto las fotovoltaicas y las de celdas de combustible tienen en común la utilización de generadores rotatorios, ahora bien, en la práctica, el tipo de generador empleado depende, entre otras cosas, de la fuente de energía que se transforme los sistemas de generación de energía eólica utilizan mayoritariamente generadores asíncronos, mientras que el resto de los sistemas de generación de energía eléctrica utilizan generadores síncronos.

En general, los generadores síncronos generan alrededor del 99% del consumo de electricidad mundial [2], y es precisamente por su importancia en la generación eléctrica global lo que hace necesario la anticipación a la ocurrencia de fallas que puedan llegar a producir problemas indeseados por esta causa.

Por esta razón, este trabajo se orienta a los generadores síncronos debido a que son los encargados de generar la mayor parte de la energía consumida en la red eléctrica, además que estos equipos se hallan expuestos a un gran número de fallas y constituyen el equipo más costoso del sistema eléctrico de potencia [3], lo que los sitúa en una posición determinada de carácter crítico. Las fallas en los generadores se consideran de gran importancia debido a que se pueden producir daños severos y costosos en el aislamiento,

devanados y núcleo. Las pérdidas ocasionadas por una falla inesperada en un generador en el sistema de generación de energía eléctrica son de gran magnitud para la empresa generadora y pueden incluso afectar al usuario final.

Para garantizar el correcto funcionamiento de los generadores síncronos se han desarrollado una serie de técnicas de detección de fallas que permiten avalar el adecuado trabajo de estos. En el pasado, el técnico era el encargado de diagnosticar las fallas que se presentaban en el generador empleando únicamente sus sentidos físicos, por ejemplo el sentido del tacto le sirve para descubrir si existe un cambio en el nivel de vibración o de temperatura, el sentido de la vista le permite ver si existen fugas de aceite o refrigerante, el sentido del oído le permite escuchar el sonido producido por una falla [4], [5], sin embargo, estas apreciaciones tienen la desventaja de la subjetividad debido a que la información se pierde al no poder contar con un registro de datos ya que sólo se cuenta con la experiencia del personal para llevar a cabo el proceso de diagnóstico.

Para disminuir el grado de subjetividad en la que se basaba el mantenimiento en el área de diagnóstico de máquinas se ha presentado un continuo desarrollo que ha permitido el surgimiento de nuevas técnicas de detección de fallas integradas a sistemas de cómputo. Ahora es posible procesar gran cantidad de datos a alta velocidad, permitiendo utilizar técnicas de procesamiento digital de señales (PDS) para aplicarlos al diagnóstico de generadores síncronos. La densidad espectral de potencia (*PSD*, por sus siglas en inglés), es la principal técnica de procesamiento que se utiliza en el diagnóstico de máquinas debido a que permite detectar señales de alta y baja frecuencia, [5] sin embargo, esta técnica tiene limitaciones como son la pérdida de fase de la señal, incapacidad para detectar señales no

estacionarias, [6], [7]. La fase de la señal, en el análisis de vibración, es información clave ya que permite distinguir entre fallas a magnitud y frecuencia similares [8].

Uno de los algoritmos que se utilizan en la actualidad, en sustitución de la *PSD* son los espectros de orden superior (*HOSA*, por sus siglas en inglés) [6], [7], [9], [10]. La incursión de los *HOSA* en el área de diagnóstico de máquinas eléctricas proporciona información relevante que no se encuentra en la *PSD* [6], [11], [12]-[15]. La *PSD* proporciona información de las frecuencias de señales y es la técnica de procesamiento más utilizada en la actualidad pero presenta la desventaja de que no es posible detectar cuando dos frecuencias de la señal son iguales o se encuentran cercanas pudiendo llegar a enmascarse. Esto puede producir limitantes en la detección y diagnóstico de alguna avería presente en la máquina.

Por otra parte, el *BIS* (biespectro) presenta la ventaja que al ser una representación en tres dimensiones es posible desplegar gráficamente las frecuencias ofreciendo la posibilidad de detectar acoplamientos entre frecuencias similares o muy cercanas en valor. En este trabajo se muestran los dos tipos de análisis de señal y se utilizan para comprobar la ventaja de pasar del método tradicional de procesamiento de la señal a la metodología que se propone como una mejor opción que es el *BIS*.

1.1. Descripción del problema y justificación del trabajo

Los generadores síncronos están constituidos por una parte fija llamada *estator* y otra móvil llamada *rotor*. El rotor se monta en un eje que descansa en dos rodamientos o cojinetes que son dispositivos que, contribuyen a la óptima operación de las partes giratorias del sistema motor-generator. Se utilizan para sostener o fijar ejes mecánicos, para reducir la fricción provocada por el movimiento de rotación: en [16] se demuestra que de las fallas que se

presentan en los generadores síncronos una gran parte se debe a fallas en los rodamientos. De este modo, para obtener una identificación oportuna de tales fallas es necesario conocer el estado que guardan los mismos para la detección y diagnóstico antes que las fallas se manifiesten de manera perjudicial y provoquen daños irreversibles y costosos. En la mayoría de los casos no aparecen de manera inesperada sino gradualmente lo que hace posible su detección antes de que las consecuencias resulten catastróficas.

La forma convencional de análisis y diagnóstico de falla en los rodamientos se ha basado en el empleo de registros de señales de vibración que juegan en la actualidad un papel importante en el mantenimiento predictivo para analizar su comportamiento pero que presenta la desventaja de tener que montar el transductor en la máquina lo que puede provocar interferencia en el funcionamiento de la misma. De este modo, se presenta la necesidad y la oportunidad de contar con una metodología distinta pero igualmente confiable que permita la utilización de otro tipo de señal que no sea invasiva ni costosa. Esto permite proponer un sistema de diagnóstico basado en la emisión acústica de las máquinas, utilizando micrófonos como sensores lo cual constituye un método no invasivo y que no interfiere con el funcionamiento de las mismas.

Por último, el uso de estas señales permiten contar con un sistema y metodología flexibles que pueden ser utilizados en varios equipos y máquinas de manera frecuente debido a la facilidad de instalación, montaje, desmontaje y transportación que representa este tipo de dispositivos al no tener que permanecer de manera permanente dentro de la máquina de manera única.

Como se conoce, cualquiera que sea la causa de la vibración en un generador síncrono, esta resulta en una emisión acústica. Por tanto, en este trabajo se propone un método de diagnóstico basado en la emisión acústica de un generador síncrono como una técnica no

invasiva que no interfiere con el funcionamiento del mismo. Esta técnica detecta cambios acústicos internos provocados por fenómenos como el surgimiento y crecimiento de grietas, el desprendimiento de pequeños fragmentos de material, las deformaciones metálicas, entre otras, y se basa en que parte de la energía que liberan al ocurrir se transmite al exterior en forma de ondas acústicas, es decir, emiten sonido. En todo caso, cada máquina posee un patrón único de sonido que puede ser proporcionado por el fabricante o, en su defecto, registrarse mediante la metodología propuesta en este trabajo cuando la máquina se encuentra en condiciones adecuadas de operación el cual servirá de base para que, en caso de detectarse cualesquier desviaciones con respecto a dicho patrón, esto sea el indicativo de la aparición de una posible falla o mal funcionamiento. El registro de estas ondas acústicas se puede realizar mediante el uso de transductores (micrófonos) instalados en las proximidades del generador. Los transductores convierten las ondas acústicas en señales eléctricas que pueden procesarse y analizarse para realizar el diagnóstico.

Algunas características y ventajas dentro de la emisión acústica son:

1. La emisión acústica detecta el movimiento lo que permite la detección temprana de fallas así como su evolución en el tiempo.
2. Es una prueba global debido a que esta metodología puede llegar a ser utilizada en muchas de las máquinas presentes en el sistema.
3. No es invasiva debido a que no se requiere el montaje de transductores o medidores directamente sobre la máquina, no interfiriendo con su funcionamiento normal.
4. Las fallas crean su propio patrón de señal de emisión acústica por lo que cada condición es única (para cada máquina, y para cada falla).
5. Es una prueba relativamente rápida.
6. Las pruebas son fácilmente repetibles.

Algunas desventajas dentro de la emisión acústica son:

1. Esta prueba es sensible al ruido ambiental de fondo.
2. El personal que vaya a llevar a cabo la prueba requiere un mayor nivel de entrenamiento técnico.

Habitualmente la técnica de procesamiento de señal que se utiliza es la *PSD* de la señal, pero esto tiene limitaciones debido a que existen interacciones no lineales de la señal en el funcionamiento de los rodamientos que no permiten observar claramente las frecuencias características de falla. La técnica de procesamiento de la señal que se utiliza es *HOSA* que se basa en el *BIS*, que representa la distribución de potencia sobre los pares de frecuencia donde llega a ocurrir una interacción y no se ve afectado por las interacciones no lineales de la señal.

1.2. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo, es desarrollar una metodología para la localización de fallas en rodamientos en un generador síncrono, mediante el procesamiento de señales vibro-acústicas empleando espectros de orden superior.

Para cumplir el objetivo, se desarrollaron las siguientes etapas:

1. Estudio del estado del arte de todos los aspectos relacionados con el diagnóstico de rodamientos en máquinas eléctricas rotativas.
2. Obtener señales de vibración y acústicas de un generador síncrono utilizando acelerómetros y micrófonos.
3. Procesar las señales a través de la utilización de espectros de orden superior.
4. Desarrollar programas que permitan consultar, graficar el funcionamiento del generador e identificar patrones o eventos para la detección de fallas.

5. Desarrollar una interfaz gráfica (GUI) a través de la utilización de MatLab que muestre de manera amigable el manejo y despliegue de la información al usuario para la detección de fallas en los rodamientos de generadores síncronos.

1.3. Hipótesis

Estas tareas tienen como fin comprobar la **Hipótesis de Trabajo** siguiente: Empleando un procedimiento basado en la captación y análisis de las señales acústicas de un generador síncrono y utilizando las técnicas de procesamiento de señal *HOSA* (o biespectro) para su análisis, es posible la detección temprana de fallas en sus rodamientos con bajo nivel de invasividad para establecer diagnósticos acertados y confiables.

Capítulo 2

Antecedentes

En este capítulo se realiza una revisión y recopilación de las principales fallas que se presentan en los generadores síncronos, además de las diferentes técnicas o métodos empleados para la detección y diagnóstico de fallas en rodamientos.

2.1. Técnicas de detección de fallas en generadores síncronos

Los motores de inducción (*IM*, por sus siglas en inglés) están presentes en la mayoría de los procesos productivos (se estima que alrededor del 90% de todas las máquinas eléctricas rotativas en funcionamiento) [17], por lo cual la mayor parte de las investigaciones que se han realizado concernientes con máquinas eléctricas están relacionadas con este tipo de máquinas, lo que hace fundamental escalar esta información a otro tipo de máquinas eléctricas rotativas principalmente a los generadores síncronos (*SG*, por sus siglas en inglés), por el importante papel que desempeñan dentro del proceso de generación de energía eléctrica.

Un estudio completo sobre generadores síncronos debe ser capaz de correlacionar diferentes tipos de datos para representar una imagen fiable de la máquina cuando se analiza, para detectar cambios no deseados, así como la causa de las fallas. En las últimas décadas se han desarrollado nuevas técnicas de detección de fallas que permiten obtener análisis y resultados más precisos. Las más aplicadas son las que involucran análisis de vibraciones (*MVA*, por sus siglas en inglés), análisis espectral de corrientes (*MCSA*, por sus siglas en inglés), análisis del flujo axial de dispersión (*AF*, por sus siglas en inglés), emisión acústica (*AE*, por sus en inglés) y las más recientes que combinan modelos de

simulación del comportamiento de las fallas y la aplicación de redes neuronales artificiales (*ANN*, por sus siglas en inglés) para identificar fallas [18].

Exceptuando el análisis de vibraciones, no se ha generalizado la aplicación de estas técnicas de diagnóstico tanto a nivel industrial como de generación de energía eléctrica, encontrándose muchas de ellas en fase experimental, sin embargo, es de gran interés profundizar en su estudio ya que teóricamente aventajan a los métodos convencionales por su fácil aplicación y sensibilidad en la detección de fallas.

Derivado de la importancia que tienen los generadores síncronos resulta de gran interés la detección temprana de fallas por las pérdidas que pueden llegar a ocasionar a la empresa generadora la presencia de fallas inesperadas. La no detección a tiempo de estas tiende a aumentar el deterioro de los generadores y en consecuencia provoca un aumento en los costos de mantenimiento correctivo, reducción en la generación de electricidad, paros no programados, etc. con la posibilidad de que algunas de las fallas que puedan sufrir los generadores sean destructivas, lo que hace necesario conocer el estado general que guardan los mismos para así poder evitar paradas imprevistas y alargar su vida útil. Debido a de que en la mayoría de los casos, las fallas no se manifiestan de manera inesperada sino gradualmente, es posible la detección de muchas de ellas antes que sus consecuencias resulten catastróficas.

La figura 2.1 muestra un diagrama de bloques del enfoque general sobre el proceso de detección y diagnóstico de fallas. En el diagrama, en la parte izquierda se muestran los tipos más comunes de fallas, el siguiente bloque muestra los diferentes tipos de transductores que se pueden utilizar para medir las señales para detectar dichas fallas. Existen diversas técnicas de procesamiento de señales que pueden ser aplicadas a las señales de los transductores que permiten la extracción de características particulares que

son sensibles a la presencia de fallas. Finalmente, en la etapa de detección, se toma la decisión en cuanto a si existe o no una falla, basado en el método seleccionado que representa un patrón característico de señal.

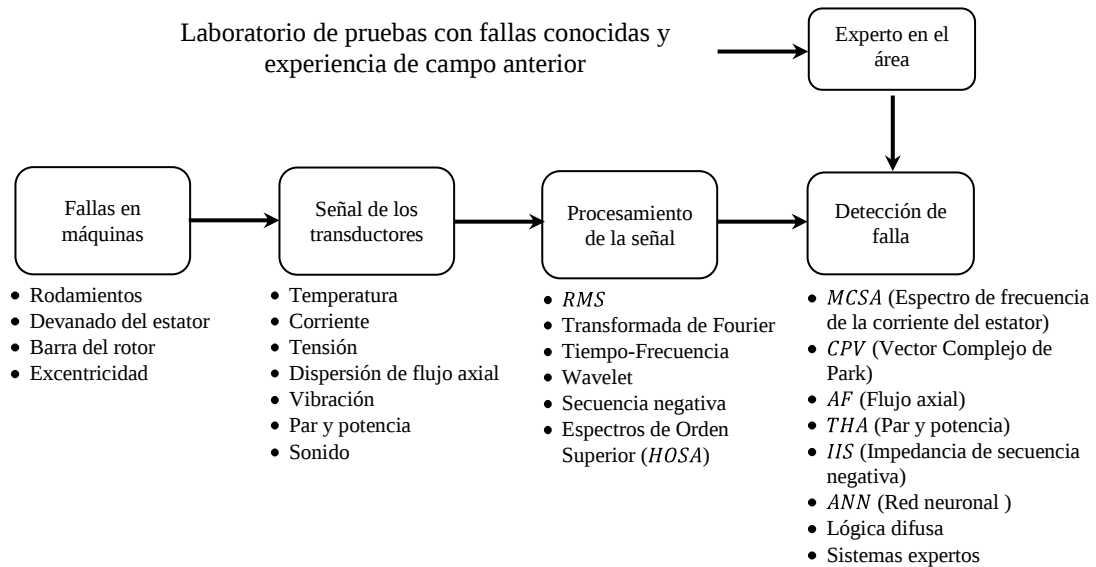


Figura 2.1. Proceso de monitoreo de condiciones en línea.

2.2. Clasificación de fallas en generadores síncronos

Investigaciones relacionadas con fallas en generadores han encontrado los elementos más comunes donde estas se presentan. Estos han sido clasificados de acuerdo a los componentes principales de los generadores (figura 2.2): fallas relacionadas con el estator, con el rotor, con los rodamientos, y otras fallas.

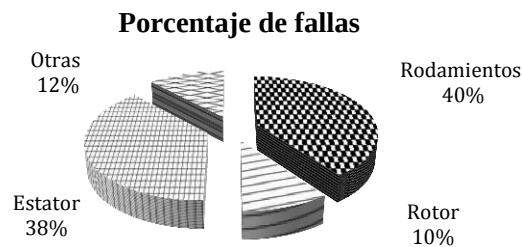


Figura 2.2. Porcentaje de falla en generadores [16].

La falla de rodamientos representa un porcentaje, cercano a la mitad del total de las fallas [16], tiene un carácter mecánico y generalmente es producido por el desgaste ya que los rodamientos soportan todas las fricciones del movimiento. Otro gran porcentaje se produce en el estator en el cual se producen tanto fallas eléctricas (por ejemplo cortocircuito entre fases), como mecánicas, (por ejemplo excentricidad en el estator). Las fallas relacionadas con el rotor ocupan un menor porcentaje y también pueden ser fallas de tipo mecánico (por ejemplo excentricidad estática o dinámica) y de tipo eléctrico (por ejemplo, cortocircuitos entre espira) (por ejemplo rotura de anillos de cortocircuito) [17]. Las fallas en los generadores dependen del tipo, las condiciones de trabajo, la ubicación, así como del tiempo de trabajo al que estén sometidos.

Las fuentes que pueden producir fallas en los generadores se dividen y agrupan principalmente en dos tipos, fuentes de fallas internas y fuentes de fallas externas al propio generador [17], la clasificación de las fallas puede responder a diversos criterios, por ejemplo se pueden clasificar debido a la naturaleza de la falla según sea su origen de tipo eléctrico o mecánico [17].

1. Fuentes de fallas externas (no dependen del generador síncrono sino de los equipos auxiliares y de la ubicación de este).
 - a. *Fallas eléctricas* (fluctuaciones en las tensiones de alimentación, tensiones desbalanceadas, etc.).
 - b. *Fallas mecánicas* (sobrecargas, cargas pulsantes, etc.) y del entorno de trabajo (temperatura, humedad, etc.) [17].
2. Fuentes de fallas internas (debidas a pequeñas irregularidades constructivas):

- a. *Fallas eléctricas*: que pueden desembocar en fallas como juego en las cuñas que fijan los devanados, cortocircuitos entre espiras, fallas a tierra de los devanados o anillos, etc., debidas principalmente a:
 - i. Fallas en el estator o armadura,
 - ii. Falla en el devanado,
 - iii. Fallas en el rotor,
- b. *Fallas mecánicas*: que pueden desembocar en fallas como excentricidades, fallas en el rotor, laminaciones, etc.

Casi todas las fallas mecánicas se producen en el rotor, ya que es la parte móvil, se identifican como desequilibrios, desalineamientos, fallas en los rodamientos, fallas en los engranajes y excentricidades en todas sus variantes.

A pesar de los avances realizados en el ámbito del monitoreo no se encuentra estandarizado un método en línea capaz de supervisar los patrones de vibración de manera no invasiva. Debido a esto sobre la base de los resultados de una exhaustiva revisión bibliográfica, donde se encontró que la utilización de emisión acústica se ha utilizado en diferentes áreas como la medicina, y recientemente en el estudio y diagnóstico de algunos tipos de máquinas tanto eléctricas como de combustión interna, se desarrolla un método de detección en línea no invasivo capaz de clasificar y diagnosticar fallas por medio de señales vibro-acústicas.

2.3. Terminología de los rodamientos

Todos los generadores síncronos disponen de rodamientos que se emplean para la transmisión de fuerza o movimiento se utilizan para guiar y reducir la fricción de la flecha, son una de las causas más comunes de falla debido a que están sometidos a una continua fricción y movimiento. Los rodamientos consisten de dos anillos, un anillo interior unido

fuertemente al árbol o eje, otro anillo exterior unido al soporte del rodamiento y un conjunto de elementos rodantes que pueden ser bolas, rodillos o conos, colocados entre ambos anillos, generando con esto movimiento o rotación [20]. Esto aplica especialmente para generadores de pequeña capacidad, como los utilizados en este trabajo. En el caso de generadores síncronos de mayor capacidad como los empleados en las plantas de generación eléctrica a gran escala se utilizan cojinetes hidrodinámicos, comúnmente conocidos como chumaceras los cuales, a diferencia de los de pequeño tamaño, se hallan por la parte externa de la máquina.

A continuación se presentan algunas definiciones y tipos de rodamientos utilizados en generadores síncronos. Se puede encontrar información detallada acerca de otros tipos de rodamientos, términos y definiciones, en la norma *ISO 5593:1997* o en los catálogos de los fabricantes de rodamientos.

2.3.1. Términos y definiciones

Existen diferentes diseños de rodamientos, sin embargo, todos ellos están compuestos de cinco elementos; los cuales se muestran en la figura 2.3. Para facilitar el entendimiento, a continuación se describe cada componente:

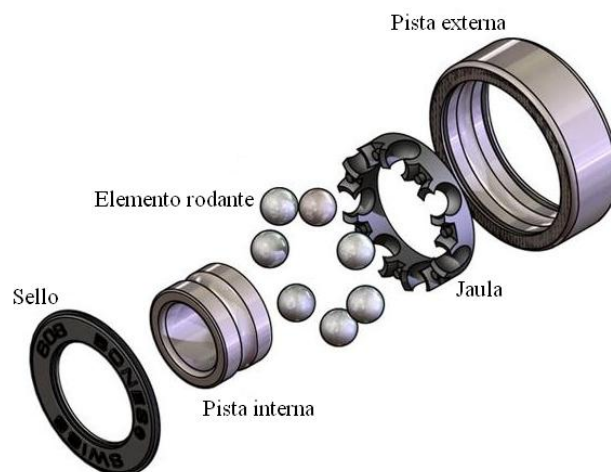


Figura 2.3. Partes constructivas de un rodamiento [21].

Pista interna: Se refiere al camino sobre el cual ruedan los elementos rodantes o rodillos. Este camino, se encuentra en toda la periferia externa del anillo más pequeño (o interior) del rodamiento. El anillo interior se ocupa para fijar el rodamiento sobre la flecha o eje.

Pista externa: Es el camino sobre el cual ruedan las bolas o rodillos. Este camino, se encuentra en toda la periferia interna del anillo más grande (o exterior) del rodamiento. El anillo exterior se ocupa para sujetar el eje y a la vez permitirle girar libremente.

Elemento rodante: Se refiere al elemento que permite la movilidad entre los dos anillos y, por ende, entre los dos elementos mecánicos. Pueden ser bolas pero también existen en forma de rodillos o cilindros y también existen combinaciones de ambos. Así pues, cuando se hace mención a rodamientos de bolas o rodamientos de rodillos, se hace referencia a la forma de los elementos rodantes que componen dicho rodamiento.

Jaula: Es un componente (especie de “barandal”) cuyo objetivo es permitir mantener a los elementos rodantes uniformemente separados de forma que no se toquen entre sí.

Sello: Es un elemento fabricado en caucho reforzado con acero, es montado en el anillo exterior y toca el anillo interior ligeramente. Brinda una mejor protección, requiere muy poco mantenimiento, pero produce más fricción y menos velocidad.

Diámetros: En un rodamiento existen diferentes diámetros, pero los dos que suelen ser de vital importancia son el diámetro nominal exterior (d_e) y el diámetro nominal del agujero (d_A); el primero se usa para determinar el espacio radial necesario de las chumaceras, y el interior es el que se toma en cuenta para el tamaño de la flecha o eje como se muestran en la figura 2.4.

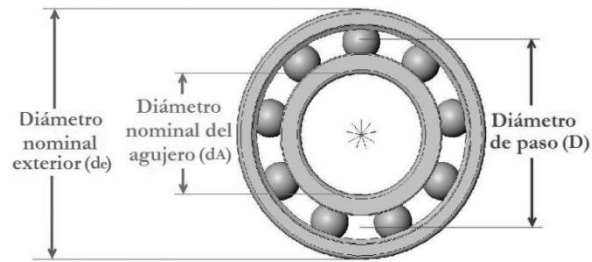


Figura 2.4. Diámetros de un rodamiento [20].

Diámetro de paso (D): Es el diámetro a lo largo del cual los centros de los elementos rodantes giran, mostrado en la figura 2.4. En otras palabras, es la distancia máxima entre los centros de los elementos rodantes más alejados.

Vida media de un rodamiento: Se define como el número de revoluciones (o de horas a una determinada velocidad constante) que el rodamiento puede dar antes de que se manifieste el primer signo de fatiga en uno de sus aros o elementos rodantes.

Vida nominal: Este valor está basado en la vida alcanzada o sobrepasada por el 90% de rodamientos idénticos de un grupo suficientemente grande. La vida media de los rodamientos es aproximadamente cinco veces la vida nominal.

Ángulo de contacto (β): Es el ángulo que forman la línea virtual que atraviesa los puntos de contacto (punto de contacto que se produce entre los elementos rodantes con los anillos) y el eje del rodamiento, como se aprecia en la figura 2.5. El rodamiento de una sola hilera de bolas tiene generalmente un ángulo de contacto de cero grados (para cargas únicamente radiales) o algunos grados (si combina cargas axiales y radiales) [22].

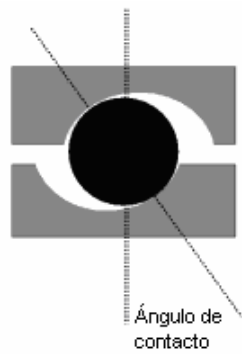


Figura 2.5. Ángulo de contacto (β) [20].

Magnitud de la carga: Es la carga a la que el rodamiento será sometido, existen cargas dinámicas y estáticas; este es uno de los factores que suele tener una gran importancia al momento de seleccionar el rodamiento a utilizar, ya que por ejemplo, para rodamientos de las mismas dimensiones, los de rodillos soportan una mayor carga que los de bolas.

Sentido de la carga: Se refiere al sentido en el que el rodamiento experimentará la mayor fuerza, puede ser axial, radial o una combinación de ambas, como se ve en la figura 2.6.

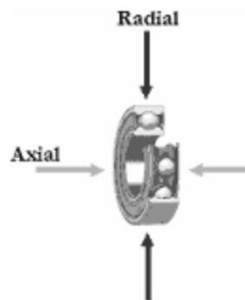


Figura 2.6. Cargas axiales y radiales en un rodamiento [20].

Zona de carga: Se define como la zona en la que ocurren los mayores esfuerzos, la forma y disposición de esta zona varía de acuerdo a si la máquina se encuentra montada en sentido vertical u horizontal.

Velocidad de operación: Es la velocidad máxima a la cual un rodamiento puede funcionar de forma segura y está limitada por la temperatura máxima permisible de funcionamiento.

Juego interno: Es la distancia total que puede desplazarse uno de sus aros con relación al otro en dirección radial (juego radial) o en sentido axial (juego axial) ambos tipos de muestran en la figura 2.7.

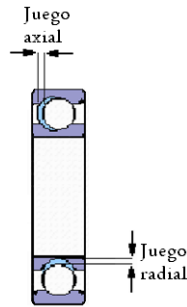


Figura 2.7. Juegos internos en un rodamiento [20].

Existen algunos otros factores que se llegan a tomar en cuenta a la hora de seleccionar un rodamiento como son: el valor de rozamiento, tolerancias y los materiales usados para la construcción de cada uno los elementos principales del rodamiento.

2.3.2. Tipos de rodamientos

Los rodamientos se clasifican principalmente según la dirección en que actúe la carga, esto es, radiales y axiales. Existen algunos tipos de rodamientos que son capaces de soportar cargas axiales y radiales, se les denomina rodamientos para cargas combinadas [20].

En general, los rodamientos de bolas se recomiendan para cargas de pequeñas a moderadas, mientras que los rodamientos de rodillos se recomiendan para grandes cargas [20]. Más información sobre los tipos más comunes de rodamientos utilizados en máquinas rotatorias [20] (Ver *anexo A*).

2.3.3. Principales causas y tipos de fallas en rodamientos

La falla de un rodamiento se puede producir por diversos motivos, como son: soportar cargas mayores para las que fue diseñado, lubricación deficiente o inadecuada, una incorrecta manipulación, ajustes demasiados apretados que dan lugar a un juego interno

demasiado pequeño del rodamiento, desalineamiento, desbalanceo, etc. [20], [23]-[27]. Cada uno de estos factores produce un tipo de daño particular que deja una huella única en el rodamiento. Por lo que analizando el daño sufrido en el rodamiento, permite en la mayoría de los casos, determinar la causa de la falla y en base a esto, adoptar las acciones preventivas necesarias para evitar una recurrencia.

Tipos de fallas

El diagnóstico de la condición mecánica de un generador síncrono mediante el análisis de sus vibraciones, se basa en que las fallas generan fuerzas dinámicas que alteran su comportamiento vibratorio. La fatiga en los componentes de un rodamiento está en función del número de revoluciones y se ve efectuada por la magnitud de la carga, la lubricación y la limpieza del lubricante. La fatiga es el resultado de esfuerzos de cizallamiento y aparecen cíclicamente inmediatamente por debajo de la superficie que soporta la carga [24]-[27]. Después de cierto tiempo, estos esfuerzos originan grietas que se extienden gradualmente hasta alcanzar la superficie. A medida que los elementos rodantes van pasando sobre las grietas se produce el desprendimiento de fragmentos de material y a este hecho se le conoce con el nombre de desconchado. El desconchado inicial generalmente es muy leve. No obstante, el aumento de los esfuerzos en los bordes y los fragmentos transportados por el lubricante en circulación hacen que el área desconchada se propague, ver figura 2.8.

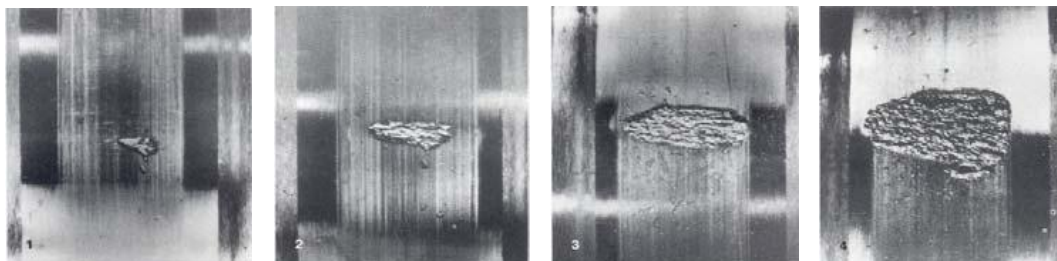


Figura 2.8. Etapas progresivas del desconchado en un rodamiento [28].

Este tipo de daño de los rodamientos es un proceso de degradación relativamente largo que se advierte por un incremento de la emisión acústica y las vibraciones de la maquinaria, informando con suficiente anticipación para que se cambie el rodamiento antes de que este falle totalmente. Existen diversas causas de fallas pero todas generan ya sea un desconchado o una grieta en sus componentes.

El parámetro de vibración es el mejor indicador para detectar fallas en rodamientos. Siempre que sea posible el transductor de medición se deberá ubicar en la zona de carga del rodamiento. Por ejemplo, para un rodamiento radial bajo carga radial, los mejores resultados se obtienen si el transductor se coloca con el eje de máxima sensibilidad en la dirección radial. De igual forma, se debe medir donde la función de transferencia del conjunto sea la mejor, es decir, se prefiere medir sobre la cabeza de un tornillo de fijación de la tapa del rodamiento y no sobre la propia tapa de éste.

Fallas en el camino interior de rodadura, camino exterior de rodadura o en los elementos rodantes producirá componentes de frecuencia de vibración únicas en las mediciones del generador síncrono y otras señales del transductor. Bajo condiciones normales de funcionamiento, los rodamientos fallan por desgaste o fatiga del material, cuando comienzan a fallar se incrementan las vibraciones de los generadores síncronos y los niveles de emisión acústica aumentan. Estas frecuencias de falla de rodamientos están en función de la geometría de los rodamientos y la velocidad de marcha [9], [15], [23]-[26], [29], [30]. Cada uno de los componentes del rodamiento presenta una frecuencia de falla única y están definidos por ecuaciones teóricas en al menos cinco frecuencias:

1. Frecuencia de operación del rotor (S),
2. Frecuencia de paso de la jaula (FTF),
3. Frecuencia de paso por la pista exterior ($BPFO$),

4. Frecuencia de paso por la pista interior (*BPFI*),
5. Frecuencia de paso de los elementos rodantes (*BSF*).

La figura 2.9, muestra las dimensiones necesarias a tener en cuenta para calcular teóricamente estas frecuencias.

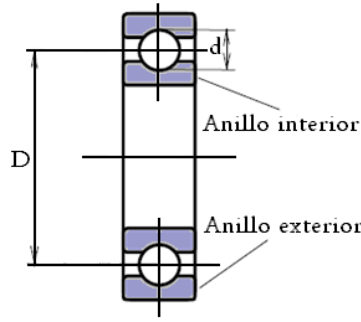


Figura 2.9. Sección transversal del rodamiento [20].

Así pues la frecuencia característica que se produce en los rodamientos cuando la falla es producida en la pista exterior es la siguiente:

$$BPFO = \frac{n}{2} \cdot \frac{N}{60} \cdot \left(1 - \frac{d}{D} \cdot \cos \beta \right) \quad (2.1)$$

La frecuencia característica que se produce en los rodamientos cuando la falla es producida en la pista interior es la siguiente:

$$BPFI = \frac{n}{2} \cdot \frac{N}{60} \cdot \left(1 + \frac{d}{D} \cdot \cos \beta \right) \quad (2.2)$$

La frecuencia característica que se produce en los rodamientos cuando existe una falla en los elementos rodante (bolitas) es la siguiente:

$$BSF = \frac{D}{d} \cdot \frac{N}{60} \cdot \left(1 - \frac{d}{D} \cdot \cos^2 \beta \right) \quad (2.3)$$

Si la falla se produce en la jaula (*FTF*, fundamental train frequency, por sus siglas en inglés) la frecuencia característica es la siguiente:

$$FTF = \frac{N}{120} \cdot \left(1 - \frac{d}{D} \cdot \cos \beta \right) \quad (2.4)$$

donde:

D = diámetro de paso (mm),

d = diámetro de bolas (mm),

β = ángulo de contacto entre las bolas y las pistas,

V_{rpm} = velocidad de rotación (rpm),

n = número de elementos rodantes.

Las frecuencias de falla, son puntos de referencia al analizar el espectro obtenido de las señales de vibración de los rodamientos. Si en un rodamiento existe un problema, el espectro proporciona información para ayudar a determinar la localización del problema, la causa del problema, la tendencia y hasta qué tanto llega a ser crítico [24], [25].

Todas las técnicas de detección de fallas requieren un conocimiento previo de las señales obtenidas con el fin de distinguir situaciones normales de trabajo de las condiciones de operación bajo falla.

2.4. Magnitudes físicas utilizadas para el monitoreo del estado de los generadores síncronos

A continuación, se abordarán los conceptos básicos de las señales de vibración y se mencionarán los transductores que suelen usarse en el monitoreo de generadores síncronos. Asimismo, se busca relacionar los conceptos descritos con el trabajo de tesis desarrollado.

La teoría de las vibraciones trata con el estudio de movimientos oscilatorios y las fuerzas asociadas con estos movimientos [31]. En el caso de la vibración mecánica, esta se transmite a través de bases y estructuras causando fatiga en elementos estáticos e incluso vibraciones moduladas. Por eso en el análisis de maquinaria se requiere de toda la información de la cadena cinemática: el tipo de rodamientos, las velocidades de giro, el número de dientes de las ruedas dentadas, el número de aspas de los ventiladores, las

condiciones de soporte, etc. La severidad de la vibración está muy relacionada con las frecuencias resonantes del sistema que pueden llevarlo a condiciones críticas e inestables [32].

2.4.1. Señales de vibración

La vibración es la oscilación de un cuerpo alrededor de un punto de reposo y existen dos conceptos relacionados con ella: la frecuencia y la amplitud.

Estas oscilaciones pueden ser producidas por:

- a) Desequilibrio en el acoplamiento del sistema motor-generator,
- b) Falla de algún elemento en el generador síncrono.

Sea cualquiera la causa de la vibración, su reducción es necesaria debido a sus consecuencias entre las cuales se tienen: aumento de los esfuerzos y las tensiones, pérdidas de energía, desgaste de los materiales, y las más peligrosas: daños por fatiga de los materiales, además de sonidos molestos en el ambiente laboral, etc.

Si se tuviese un generador síncrono el cual fuese teóricamente perfecto no existiría ninguna vibración ya que todas las fuerzas existentes en el generador estarían compensadas. Pero en los generadores síncrono reales existen imperfecciones constructivas que hacen que existan vibraciones. La falla de algún componente induce la aparición de nuevas fuerzas, provocando una variación en las vibraciones o en las frecuencias de las mismas, por lo que un seguimiento periódico de las vibraciones de los generadores puede aportar mucha información sobre su estado y la de sus componentes.

El hecho de que la condición del generador síncrono esté íntimamente ligada con las vibraciones que ella produce hace que la medición de éstas, el análisis de sus señales y el análisis mecánico sean herramientas básicas para establecer el estado general del generador y proporcionen una buena concepción de fallas a través del nivel de vibración.

En la práctica la vibración aparece como producto de la transmisión normal de fuerzas cíclicas a través de los mecanismos lo que provoca el desgaste y/o deterioro de los generadores. Cuando las fallas comienzan a aparecer, los procesos dinámicos del generador son alterados, modificándose las fuerzas que, como resultado darán un cambio al espectro de vibración.

Si se es capaz de transformar el movimiento mecánico, proporcional a las fuerzas actuantes, en señales eléctricas, entonces la señal de vibración contendrá la información relativa a las condiciones del funcionamiento de la máquina, que de por sí caracteriza el estado técnico de sus partes y componentes. Cada uno de los elementos que componen un generador posee características que lo identifican en cuanto a diseño y velocidad de operación; en consecuencia, cada uno de ellos tiene una frecuencia característica de vibración. Es recomendable entonces que antes de realizar un diagnóstico a un generador se deban determinar las frecuencias de falla teóricas que no son más que las frecuencias que se esperan observar en la *PSD* cuando exista un problema.

La teoría mecánica arriba expuesta conduce a definir el análisis de vibración y se basa en los siguientes principios:

- 1) Todo generador en correcto estado de operación tiene ciertos niveles de vibración y emisión acústica debidos a los pequeños defectos de fabricación. Esto puede considerarse como el patrón de referencia, nivel base característicos o estado básico de ese generador en operación normal.
- 2) Cualquier falla en una máquina, incluso en fase incipiente, lleva asociado un incremento en el nivel de vibración perfectamente detectable mediante la medición.
- 3) Cada falla, aún en fase incipiente, lleva asociado cambios específicos en las vibraciones que produce (espectros) lo cual permite su identificación.

La importancia del método de análisis por vibraciones mecánicas, sustentado en los avances de la moderna tecnología de medición y en el análisis dinámico temporal y frecuencial de señales, y utilizado como herramienta del mantenimiento predictivo, permite hoy en día, detectar con gran precisión desgastes de rodamientos. Una de las principales ventajas que reporta el análisis por vibraciones aplicado a los generadores síncronos es el seguir la evolución de la falla en el transcurso del tiempo.

Cuando las fuerzas que se presentan a diferentes frecuencias interactúan en el generador de manera no lineal, el resultado es la generación de frecuencias de suma y de diferencia, es decir, nuevas frecuencias que no están presentes en las frecuencias forzadas. Estas frecuencias de suma y diferencia forman las bandas laterales que se encuentran en los espectros de rodamientos con elementos rodantes.

2.4.2. Transductores de vibración

El transductor de vibraciones es un dispositivo que produce una señal eléctrica que es una réplica del movimiento vibratorio al cual está sujeto. Un buen transductor no debe agregar falsos componentes (ruido) a la señal, y deberá producir señales uniformes en todo el rango de frecuencias de interés.

Los **acelerómetros** son el transductor más difundido a nivel mundial para la medición de las vibraciones mecánicas. Estos dispositivos convierten la aceleración de gravedad o de movimiento, en una señal eléctrica analógica proporcional a la fuerza aplicada al mecanismo sometido a vibración. Esta señal analógica indica en tiempo real la aceleración instantánea del objeto sobre el cual el acelerómetro está montado. Los acelerómetros miden la aceleración en unidades “g”.

Los acelerómetros son direccionales, esto quiere decir que sólo miden aceleración en un eje. Para monitorear aceleración en tres dimensiones, se emplean acelerómetros multi-ejes

(ejes x , y , z), los cuales son ortogonales. Existen dos tipos de acelerómetros: *pasivos* y *activos*.

Los *acelerómetros pasivos* envían la carga generada por el elemento sensor (puede ser un material piezoeléctrico) y debido a que esta señal es muy pequeña estos acelerómetros requieren de un amplificador para incrementar la señal. Los *acelerómetros activos* incluyen circuitos internos para convertir la carga del acelerómetro a una señal de tensión, pero requieren de una fuente constante de corriente para alimentar el circuito.

Las opciones de salida eléctrica dependen del sistema utilizado con los acelerómetros. Las opciones analógicas comunes son tensión, corriente y frecuencia. Existen básicamente dos tipos de acelerómetros:

Los acelerómetros se pueden clasificar según su impedancia de salida:

1. Acelerómetros de *alta impedancia*,
2. Acelerómetros de *baja impedancia*.

En los *acelerómetros de alta impedancia* la salida de carga del cristal tiene una impedancia de salida muy alta y se puede obtener fácilmente. La alta impedancia del acelerómetro es útil donde las temperaturas exceden los 120°C , donde no es conveniente el uso de sistemas microelectrónicos dentro del transductor y requiere el uso de conductores para bajo ruido. Generalmente, si la sensibilidad de salida es especificada en unidades de pC/g se tiene un transductor de alta impedancia.

En los *acelerómetros de baja impedancia* se deben emplear en sistemas microelectrónicos ubicados dentro de la carcasa del transductor para detectar la carga generada por el cristal piezoeléctrico. De esta manera, la transformación de alto a bajo es hecha en el punto de medición y sólo se transmiten señales de baja impedancia desde el transductor. Una salida de baja impedancia es deseable cuando se requiere instalar el transductor a una gran

distancia en relación con el generador donde se van a realizar las mediciones, también proveen una impedancia propia para la mayoría de los sistemas de adquisición de datos. Generalmente, si la sensibilidad de salida está especificada en mV/g tales como $10mV/g$ o $100mV/g$, se tiene un transductor de baja impedancia.

Acelerómetro tipo piezoeléctrico

Este tipo de transductor es el que se decidió utilizar a lo largo de la investigación debido a sus características (figura 2.10). Los acelerómetros de este tipo aprovechan los fenómenos piezoeléctricos para generar una señal eléctrica proporcional a la aceleración de la vibración a la que son sometidos. El elemento activo del acelerómetro es un cristal piezoeléctrico pegado a una masa conocida. Un lado del cristal está conectado a un poste rígido en la base del transductor. En el otro lado se encuentra adjunto a un material llamado masa sísmica. Cuando el acelerómetro se encuentra sometido a vibración se genera una fuerza, la cual actúa sobre el elemento piezoeléctrico. Esta fuerza es igual al producto de la aceleración por la masa sísmica. Puesto que la masa sísmica es constante, la señal de salida de carga es proporcional a la aceleración de la masa.

Este tipo de acelerómetros son extremadamente versátiles y ampliamente usados para la supervisión de maquinarias industriales. Los acelerómetros industriales típicos miden niveles de vibración en *micro-g's* desde 1 a 15,000 Hertz.

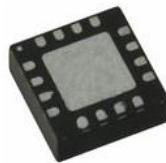


Figura 2.10. Acelerómetro piezoeléctrico en circuito integrado [33].

Comparado con otro tipo de transductores, los acelerómetros piezoeléctricos tienen las siguientes ventajas: un rango de medición bastante elevado, bajo ruido de salida, excelente

linealidad en todo su rango dinámico, amplio rango de frecuencias, tamaño compacto, no lleva partes móviles, auto-generación (no requiere alimentación externa). Los acelerómetros piezoeléctricos son muy estables y mantienen su calibración si no se les maltrata.

2.4.3. Emisión acústica

En los generadores síncronos el espectro de la emisión acústica está compuesto principalmente por ruidos electromagnéticos, de ventilación y ruido ambiental. La emisión acústica provocada por el sonido de ventilación está asociada con las turbulencias en el aire que se producen periódicamente por las partes móviles del generador síncrono. El ruido electromagnético se debe a los esfuerzos de Maxwell. Estas fuerzas inducen vibraciones en la estructura del estator el cual se irradia en forma de emisión acústica. El nivel de emisión acústica depende de la relación entre la aerodinámica y las vibraciones mecánicas que se incrementan generalmente con la velocidad del generador. Realizando el análisis de estas emisiones acústicas se puede identificar si el generador se encuentra sin falla o con alguna falla o anomalía de tipo mecánico. Sea cualquiera la causa de la vibración en un generador síncrono esta resulta en emisión acústica. El sonido se caracteriza por la frecuencia con la que se propagan las ondas y por la intensidad de las mismas.

Transductores de emisión acústica

Un micrófono es un dispositivo diseñado para producir una señal eléctrica que refleja la presión acústica presente en el aire inmediatamente frente al micrófono. Se pueden encontrar muchos tipos de micrófonos comercialmente disponibles para diferentes aplicaciones como, comunicaciones, grabación de voz y música, de uso general y micrófonos para mediciones.

Cuatro tipos de propiedades determinan la conveniencia de utilizar un micrófono en alguna aplicación específica, [34]:

Desempeño electroacústico: habilidad de un micrófono para desempeñar una tarea para el cual fue diseñado, generalmente medido en términos de su sensibilidad, directividad, respuesta en frecuencia, respuesta transitoria, linealidad, relación señal a ruido y el rango dinámico.

Características eléctricas: la impedancia de salida de un micrófono determina el método conveniente para amplificar su señal.

Sensibilidad a influencias externas: la habilidad de un micrófono para operar independientemente de la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento.

Costo: Factor muy importante en casos en donde el presupuesto es bajo (investigación académica) y alguna de las propiedades anteriores se tienen que sacrificar, como por ejemplo, los arreglos de micrófonos, donde se requieren varios de estos dispositivos.

La importancia relativa de cada una de las propiedades depende de la aplicación que se le pretende dar al micrófono, por ejemplo, si deseamos un transductor para uso general la sensibilidad a influencias externas no será un factor importante para su selección.

Los micrófonos son transductores que reciben y sensan fluctuaciones de presión y las convierte en señales eléctricas. La calidad de un micrófono determina la precisión de un sistema de medición. Cuatro tipos de micrófonos son los más utilizados en procesos de medición:

1. Dinámico,
2. Cerámico,
3. Electreto,

4. Tipo condensador.

Micrófono tipo dinámico

Los *micrófono tipos dinámico* producen una señal eléctrica a través del movimiento de una bobina conectada al diafragma en un campo magnético. Estos son en realidad bocinas operando en sentido inverso, recibiendo una señal acústica y convirtiéndola en pulsaciones eléctricas. Tienen la desventaja de no poder ser usados cerca de campos magnéticos emitidos por generadores síncronos.

Micrófono tipo cerámico

Los *micrófonos tipo cerámico* consisten en un elemento piezoeléctrico unido a la parte trasera del diafragma. La presión acústica hace que el diafragma vibre produciendo una fuerza variable sobre el elemento cerámico y este a su vez genera una señal eléctrica. Tienen una alta capacitancia y un buen rango dinámico y no requieren de una tensión de polarización externa como los del tipo condensador.

Micrófono de electreto o electreto-condensador

Los *micrófonos de electreto o electreto-condensador* mostrado en la figura 2.11, tienen un diafragma con una capa delgada autopolarizada de electreto.

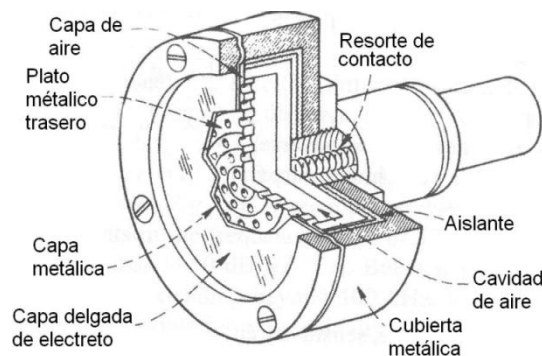


Figura 2.11. Vista en corte de un micrófono tipo electreto [34].

La presión del sonido ocasiona que el diafragma tenga un movimiento relativo respecto al plato metálico trasero del micrófono haciendo variar su capacitancia produciendo una señal eléctrica. Estos micrófonos son más baratos que los de tipo condensador y pueden ser utilizados en ambientes húmedos sin presentar arqueos.

Micrófono tipo condensador

Los *micrófonos tipo condensador* son dispositivos de capacitancia variable; estos consisten de dos placas cargadas eléctricamente separados por una capa de aire. El diafragma sirve como un placa que se defleca bajo la influencia de presiones de sonido, ocasionando que la distancia entre las dos placas varíe. La variación resultante en capacitancia es traducida en una señal eléctrica. La figura 2.12, muestra los principales componentes de un micrófono tipo condensador.

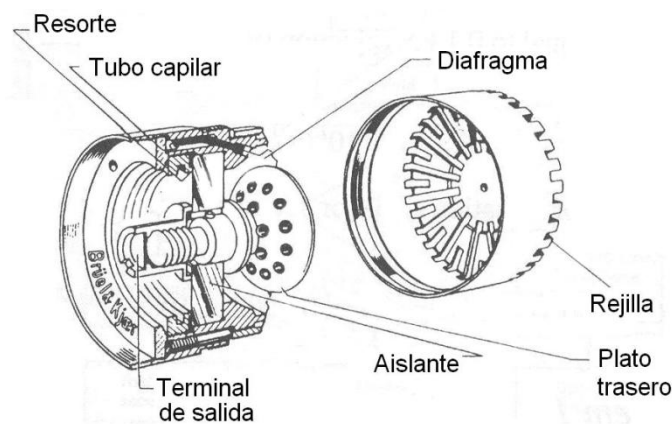


Figura 2.12. Principales elementos de un micrófono tipo condensador [34].

Estos dispositivos tienen relativamente una baja capacitancia pero a diferencia de los tipo electreto, requieren de una tensión de polarización externa así como una etapa de preamplificación que provee la impedancia apropiada para que el micrófono sea conectado al sistema de medición. Debido a su estabilidad de largo plazo, su alta respuesta en frecuencia, e insensibilidad a excitación por vibración, estos micrófonos son generalmente

utilizados para mediciones de precisión. Tienen la desventaja que son afectados por las condiciones de humedad la cual causa fugas eléctricas.

Sin importar el tipo de micrófono de que se trate, su desempeño acústico está determinado por sus dimensiones físicas tales como el área del diafragma, la distancia entre el diafragma y el plato trasero, la rigidez y la masa del diafragma, y el volumen interno del micrófono. Estos factores determinan la respuesta en frecuencia del micrófono, su sensibilidad y el rango dinámico. La respuesta en frecuencia se caracteriza por la intensidad de la señal eléctrica producida por el micrófono para una amplitud determinada de presión acústica a diferentes frecuencias. La respuesta ideal sería una gráfica completamente plana. En el caso real, para bajas frecuencias, la respuesta está limitada por la frecuencia de resonancia de la vibración mecánica del diafragma y para frecuencias muy altas, decrece rápidamente cuando la longitud de onda de la onda sonora es menor que el tamaño del diafragma.

Además de la respuesta en frecuencia, la sensibilidad constituye uno de las principales características de un transductor. La sensibilidad de un micrófono está definida como la relación de la salida eléctrica a la entrada mecánica.

El rango dinámico se refiere al rango de niveles sonoros en los que la señal eléctrica producida por el micrófono es lo suficientemente grande para ser utilizada [34].

Capítulo 3

Análisis de la señal y espectros de orden superior

En este capítulo se presenta la base de la captura y procesamiento de la señal así como la descripción matemática de los algoritmos de la *PSD* y el *BIS*, este último caso especial de los espectros de orden superior (*HOSA*).

3.1. Base teórica del análisis estadístico

Una caracterización estadística completa de una variable o proceso estocástico requiere que sea posible determinar la probabilidad de cualquier evento definido dentro de su espacio muestral. Sin embargo, no siempre es necesario realizar una caracterización completa si se puede conocer el comportamiento promedio del proceso estocástico. El empleo de las *HOS* (Estadísticas de orden superior, por sus siglas en inglés) hace posible caracterizar sistemas o procesos en los cuales las estadísticas convencionales no tienen éxito, como en sistemas sujetos a ruido de tipo gaussiano.

Las técnicas de análisis estocástico se dividen en dos tipos: las basadas en el dominio del tiempo y las que se basan en el dominio de la frecuencia. Las que se basan en el dominio del tiempo son las que soportan el cálculo de los coeficientes de autocovarianza y autocorrelación, que se expresan en función del *retardo* del conjunto de separación entre observaciones estudiadas. Los datos determinísticos y estocásticos a su vez se dividen en diferentes subgrupos [12] [20] [35].

Un fenómeno estocástico se define como una muestra en tiempo finito y se representa en un período de tiempo y sus propiedades pueden describirse (hipotéticamente) en cualquier instante de tiempo al promediar los valores de las funciones-muestra que describen el proceso estocástico [12] [20] [35].

Un proceso estocástico puede ser clasificado como *estacionario* o *no estacionario*. Los procesos no estacionarios pueden ser categorizados en términos de sus propiedades no estacionarias específicas.

Para analizar y describir las propiedades de datos de procesos estocásticos se utilizan procedimientos estadísticos, que difieren de las consideraciones utilizadas para datos definidos sólo por una función variante en el tiempo llamados determinísticos. Las siguientes propiedades y definiciones se aplican para datos estocásticos estacionarios.

3.1.1. Variable aleatoria

En la teoría de probabilidad, una variable aleatoria escalar x_k es considerada una función conjunta definida para k puntos del espacio muestral que representa la colección de las posibles salidas. Cuando la variable aleatoria x_k puede asumir sólo un número finito de valores en cualquier intervalo finito de observación, se dice que x_k es una variable aleatoria discreta. Si la variable aleatoria x_k puede tomar cualquier valor en el intervalo de observación, se dice que es una variable aleatoria continua. Para una variable aleatoria x_k , se puede definir su probabilidad en función de un valor x , es decir la probabilidad del evento $x_k \leq x$, como [12] [20] [35]:

$$Prob\ x_k \leq x \tag{3.1}$$

donde:

$Prob\ x_k \leq x$ = probabilidad del evento $x_k \leq x$,

x = valor cualquiera, dentro del intervalo de valores que la variable puede tomar.

3.1.2. Función de distribución de probabilidad

De la ecuación 3.1, se observa que la probabilidad es función de la variable x . La función de distribución de probabilidad $P\ x$ se define como [12] [20] [35]:

$$P(x) = \text{Prob } x_k \leq x \quad (3.2)$$

La función de distribución de probabilidad es una función de la variable independiente x , no de la variable aleatoria x_k . Para cada valor de x , $P(x)$ expresa una probabilidad.

3.1.3. Función de densidad de probabilidad

Una descripción alternativa de la probabilidad de una variable aleatoria x_k se obtiene usando la derivada de $P(x)$ para obtener la función de densidad de probabilidad de la variable aleatoria x_k [12] [20] [35].

$$\rho(x) = \frac{dP(x)}{dx} \quad (3.3)$$

Esta función de densidad de probabilidad representa la razón de cambio de la probabilidad de aparición de un valor en específico dentro del conjunto de datos. El área bajo la curva de la función de densidad de probabilidad será la unidad porque representa la probabilidad de que los datos obtenidos tomen un valor entre $-\infty$ y $+\infty$ [31]. El término densidad de probabilidad, considera que la probabilidad de que $x_1 \leq x_k \leq x_2$ es [31]:

$$P(x_1 \leq x_k \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} \rho(x) dx \quad (3.4)$$

3.1.4. Valor esperado (valor medio)

El símbolo E es usado como operador en las variables aleatorias. Es llamado *esperanza*, valor esperado o valor promedio. El valor esperado de una variable aleatoria x_k , en el rango de $-\infty$ a $+\infty$ (*variable aleatoria continua*), se define como [35]:

$$E(x_k) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \rho(x) dx = \mu_x = m_x \quad (3.5)$$

donde:

$\rho(x)$ = función de densidad de probabilidad del proceso estocástico,

para *variables aleatorias discretas*, para N datos, se tiene:

$$E x_k = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \quad (3.6)$$

En ambos casos, es E el operador de la esperanza matemática, ya sea de un conjunto de datos o de una función de acuerdo a lo que se encuentre entre los corchetes. Este valor indica la tendencia central (que es el promedio simple del conjunto de datos). Al promedio estadístico de x_k se le llama momento de primer orden. Por otra parte, existen momentos de orden superior los cuales son útiles para determinar otras relaciones estadísticas tales como la correlación y la varianza.

3.1.5. Varianza

Otra propiedad de las variables aleatorias es la varianza, la cual se define como el valor cuadrático medio con respecto a la media.

$$\sigma_{x_k}^2 = Var x_k = E x_k - E x_k^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x - E x_k^2 \rho x dx \quad (3.7)$$

Esta función representa la dispersión de los valores de los datos (da una medida del ancho efectivo de la función de densidad de probabilidad en torno a la media). La varianza de una variable aleatoria es en cierta forma una medida del grado de aleatoriedad de la variable, debido a que proporciona una indicación de cuánto se desvía la variable con respecto a su valor medio.

Desarrollando el término cuadrático de la ecuación 3.7, se tiene:

$$\sigma_{x_k}^2 = E x_k - E x_k^2 = E x_k^2 - 2x_k E x_k + E x_k^2 \quad (3.8)$$

aplicando las propiedades del operador de esperanza matemática, la ecuación 3.8 se expresa:

$$\sigma_{x_k}^2 = E x_k^2 - 2E x_k E E x_k + E E x_k^2 \quad (3.9)$$

el valor esperado de una constante, es la misma constante, por lo que el término $E E x_k$

es $E E x_k = E x_k$ y $E E x_k^2 = E x_k^2$, por lo tanto:

$$\sigma_{x_k}^2 = E x_k^2 - 2E x_k^2 + E x_k^2 \quad (3.10)$$

la varianza es entonces,

$$\sigma_{x_k}^2 = E x_k^2 - E x_k^2 \quad (3.11)$$

De la ecuación 3.11, se puede ver la relación entre la varianza y el valor cuadrático medio $E x_k^2$.

La raíz cuadrada de la *varianza* es la *desviación típica* o *estándar*, se define como:

$$\sigma_{x_k} = \sqrt{\sigma_{x_k}^2} \quad (3.12)$$

tiene la ventaja que se encuentra en las mismas unidades de la media y de la variable aleatoria.

3.1.6. Valor cuadrático medio

Es igual a la varianza más el cuadrado de la media, constituye una medición combinada de la tendencia central y la dispersión. Suele utilizarse como un indicador de la calidad de un estimado.

$$E x_k^2 = \sigma_{x_k}^2 + E x_k^2 \quad (3.13)$$

Correlación y autocorrelación

La correlación es una medida de la semejanza entre dos cantidades. Cuando se aplica a señales es un análisis en el dominio del tiempo. Es útil para detectar señales periódicas ocultas entre el ruido así como para determinar alguna información relacionada con las características espectrales de la señal, se define como [35]:

$$R_{x_k y_k} = E x_k y_k = \int_a^b \int_a^b x y \rho_{x,y} dx dy \quad (3.14)$$

en el caso de que la correlación entre dos variables sea cero ($E x_k y_k = 0$), se dice que las variables son ortogonales y no se puede tener idea del comportamiento de una de ellas en base al comportamiento de la otra. Comparando la ecuación 3.14 con la ecuación:

$$M_{x_k+y_k} t = E e^{t x_k+y_k} \quad (3.15)$$

se observa que la función de correlación es un momento conjunto.

La función de autocorrelación se define como el valor esperado del producto de una variable aleatoria en un instante t , por la misma variable desplazada un cierto tiempo τ ; no es más que la función de correlación aplicada a una misma variable, matemáticamente se define como:

$$R_{xx} t, t + \tau = E x_k t x_k t + \tau = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k t x_k t + \tau \quad (3.16)$$

Analizando la función de autocorrelación de la ecuación anterior cuando $\tau = 0$, se analiza la señal en el mismo punto, por lo que se tiene una correlación completa, conforme τ se vaya haciendo más grande, el valor de la correlación decrecerá. Funciones altamente aleatorias pierden rápidamente su semejanza dentro de un pequeño desplazamiento de tiempo por lo que su autocorrelación tiene una gran amplitud en $\tau = 0$ y decrece rápidamente con $\pm \tau$ [35].

Covarianza y autocovarianza

Las correlaciones entre los momentos centrados con respecto al origen de dos variables aleatorias se denomina covarianza, se expresa como:

$$Cov x, y = E x_k - m_x y_k - m_y \quad (3.17)$$

de la ecuación:

$$E x_k^n = \int x_i^n P x_k = x_i = m_n \quad (3.18)$$

$m_x = E x_k$ y que $m_y = E y_k$, por las propiedades del operador E , se tiene que:

$$Cov\ x,y = E\ x_k - E\ x_k\ y_k - E\ x_k = E\ x_k y_k - E\ x_k E\ y_k \quad (3.19)$$

en el caso de que x_k o y_k tengan media cero, la covarianza es igual a la correlación (de las ecuaciones 3.14 y 3.19).

Cuando las variables aleatorias son de la misma señal pero con un cierto desplazamiento, se denomina autocovarianza, para un proceso estocástico $x_k\ t$ se define como:

$$Cov\ x,x = E\ x_k\ t - m_x\ t\ x_k\ t + \tau - m_x\ t + \tau \quad (3.20)$$

Que es equivalente a,

$$Cov\ x,x = R_{xx}\ t, t + \tau - m_x\ t\ m_x\ t + \tau \quad (3.21)$$

sustituyendo m_x por $E\ x_t\ t$:

$$Cov\ x,x = E\ x_k\ t\ x_k\ t + \tau - E\ x_k\ t\ E\ x_k\ t + \tau \quad (3.22)$$

Si un proceso $x_k\ t$, tienen media cero, su correlación y covarianza son iguales [30], [31] los valores de la media y covarianza son los mismos para todos los valores de t , lo que significa que son independientes de las transiciones en el tiempo. Cuando todas las distribuciones de probabilidad son independientes de las relaciones en el tiempo, el proceso estocástico es estacionario.

3.2. Estadísticas de orden superior (HOS)

La mayor parte de los métodos clásicos de estimación espectral se caracterizan porque durante su estimación se procesa una señal cuyo espectro se interpreta como una superposición de componentes frecuenciales armónicas estadísticamente no correlacionadas, y se obtiene su distribución de potencia a lo largo de sus componentes frecuenciales, perdiéndose las relaciones de fase existentes entre estas componentes. La información contenida en el módulo espectral de una señal se corresponde, esencialmente, con la información presente en su secuencia autocorrelación, y resulta ser suficiente para la

caracterización estadística completa de una señal con distribución gaussiana cuya media sea conocida. Sin embargo, hay situaciones reales donde es necesario extraer información referente a la desviación que una determinada señal o proceso presenta respecto a la gaussianidad o, incluso, disponer de la información contenida en su fase espectral, entonces el método clásico de autocorrelación resulta ciego en lo referente a las características anteriores [36], [37].

Esta información se encuentra presente en los espectros de orden superior (poliespectros), definidos a partir de las estadísticas de orden superior (cumulantes) de una señal. Caso particular de estos espectros de orden superior son el espectro de tercer orden (biespectro) que por definición se corresponde con la transformada de Fourier de las estadísticas de tercer orden. El espectro de potencia clásico puede verse como el espectro de segundo orden dentro del entorno de las estadísticas de orden superior. La figura 3.1, muestra la clasificación de los espectros de orden superior correspondientes a una señal discreta dada.

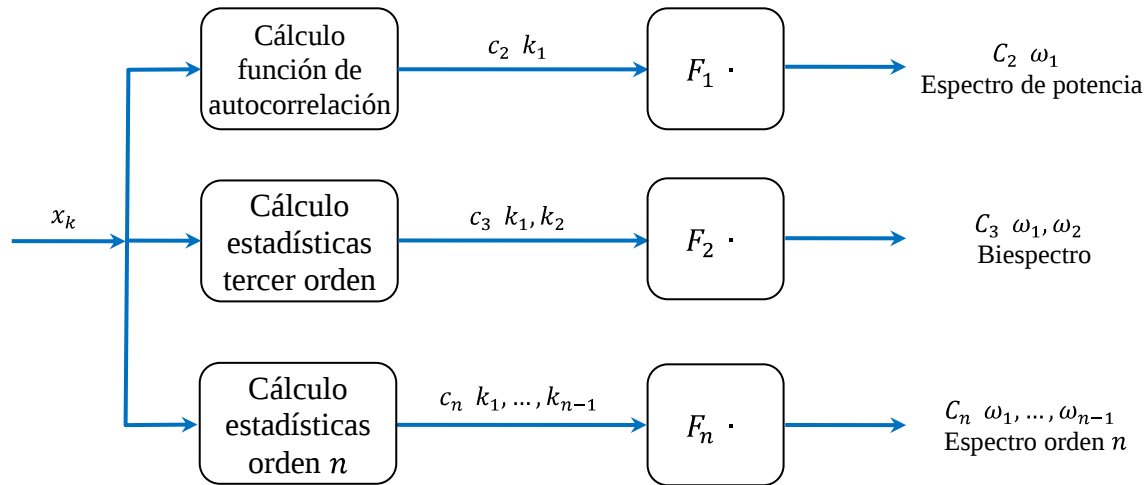


Figura 3.1. Esquema de clasificación de los espectros de orden superior para una señal discreta x_k , donde $F_n \cdot$ representa la transformada de Fourier de dimensión n .

Las estadísticas y espectros de orden superior pueden expresarse en función de los momentos o de los cumulantes. Mientras que los momentos y sus correspondientes espectros resultan muy provechosos para el análisis de señales deterministas (periódicas o transitorias), los cumulantes y sus espectros son de gran importancia durante el análisis de procesos estocásticos [6], [12], [19], [20], [37].

En este trabajo, las siglas *HOSA* se utilizan para nombrar a los espectros de orden superior y no para las estadísticas de orden superior (*HOS*). Se hace esta diferenciación debido a que los *estadísticos de orden superior* son herramientas en el dominio del tiempo mientras que los *espectros de orden superior* son en el dominio de la frecuencia.

No obstante que las estadísticas de orden superior no se utilizan explícitamente en este trabajo, a continuación se explican los conceptos básicos, los cuales serán útiles para la comprensión de los algoritmos del *PSD* y *BIS*.

3.2.1. Momentos de orden “n”

Dada una variable aleatoria, los momentos son números (características numéricas), asociados a ella que suministran una cierta información sobre su comportamiento.

Pueden definirse dos funciones que permitan calcular los momentos de una variable aleatoria, estas son la *función característica* y la *función generadora de momentos* [12], [20], [35], [38], [39].

Función característica

La función característica de una variable aleatoria x_k se define como [12], [20], [35], [38], [39]:

$$\Phi_{x_k}(t) = E e^{tx_k} \quad (3.23)$$

donde t es un número real de $-\infty < t < +\infty$. La ventaja de usar $\Phi_{x_k}(t)$ para encontrar momentos es que $\Phi_{x_k}(t)$ siempre existe [12], [20], [35], [38], [39].

Un promedio estadístico relacionado fuertemente con la función característica es la función generadora de momentos.

Función generadora de momentos

La función generadora de momentos de una variable aleatoria x_k se define como [12], [20], [35], [38], [39]:

$$M_{x_k}(t) = E[e^{tx_k}] \quad (3.24)$$

donde t es un número real de $-\infty < t < +\infty$. Así, $M_{x_k}(t)$ está dado por:

$$M_{x_k}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{tx_k} \rho(x) dx \quad (3.25)$$

La mayor ventaja de la función generadora de momentos se deriva de su habilidad de dar momentos [40]. Los momentos se relacionan con $M_{x_k}(t)$ por la expresión:

$$E[x_k^n] = \frac{d^n M_{x_k}(t)}{dt^n} \bigg|_{t=0} = m_n \quad (3.26)$$

Su principal desventaja, a diferencia de la función característica, es que esta puede no existir para todas las variables aleatorias. De hecho $M_{x_k}(t)$ existe sólo si todos los momentos existen [12], [20], [35], [38], [39], [40], [41].

Una propiedad importante de la función generadora de momentos es que la función generadora de momentos de la suma de variables aleatorias independientes es el producto de las funciones individuales generadoras de momentos [12], [20], [35], [38], [39], [40], [41].

$$M_{x_k+y_k}(t) = E[e^{t(x_k+y_k)}] \quad (3.27)$$

$$M_{x_k+y_k}(t) = E[e^{tx_k} e^{ty_k}] \quad (3.28)$$

$$M_{x_k+y_k}(t) = E[e^{tx_k}] E[e^{ty_k}] \quad (3.29)$$

$$M_{x_k+y_k}(t) = M_{x_k}(t) M_{y_k}(t) \quad (3.30)$$

Momentos centrados con respecto del origen (valor esperado)

Dada la variable aleatoria x_k , con función de distribución $P x$, se llamará momento de orden “ n ” con respecto al origen, siendo n un número positivo, m_n , se define como:

$$E x_k^n = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n dP x = m_n \quad (3.31)$$

cuando x_k es una *variable aleatoria continua*, y:

$$E x_k^n = \sum_i x_i^n P x_k = x_i = m_n \quad (3.32)$$

cuando x_k es un *variable aleatoria discreta*. Se suele dar especial importancia al momento de primer orden con respecto al origen, que recibe el nombre de *esperanza* de la variable aleatoria x_k de las ecuaciones 3.4 y 3.5.

Momentos centrados con respecto de la media

Dada la variable aleatoria x_k , con función de distribución $P x$ y esperanza $E x_k$, se le llamará momento de orden n con respecto a la media, o simplemente momento centrado de orden n a σ_n , definido como:

$$\sigma_n = E x_k - E x_k^n = \int_{-\infty}^{+\infty} x - E x_k^n dP x \quad (3.33)$$

si la integral existe. Para $n = 1$, el momento centrado es cero. El momento con respecto a la media más utilizado es la varianza de la ecuación 3.10, que es el momento centrado de segundo orden. Con las definiciones anteriores se puede ver claramente la fuerte relación entre los momentos y la esperanza matemática.

3.2.2. Relación entre cumulantes y momentos

Los cumulantes pueden ser encontrados de los momentos y viceversa.

Existen relaciones matemáticas para referir los cumulantes en términos de los momentos y los momentos en términos de los cumulantes [19].

“Sea x una colección de variable aleatoria, $x = col \ x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ e $I_x = 1, 2, 3, \dots, k$ el conjunto de índices de los componentes de x . Además, si $I \subseteq I_x$ (si I es un subconjunto de I_x), $I = i_1, i_2, i_3, \dots, i_m$, entonces $x_I = x_{i_1}, \dots, x_{i_m}$ es el vector que consiste de estos componentes de x cuyos índices pertenecen a I ”.

Donde $m_x I = E \ x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_m}$, $c_x I = cum \ x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_m}$, son los momentos y cumulantes respectivamente de la variable aleatoria [19], [20]. La partición de I_x es una colección de conjuntos no intersectados, no vacíos de I , cuya unión forma I_x .

El cumulante de orden k es obtenido de los momentos de orden menores a k , por la fórmula:

$$c_x I = cum \ x_1, x_2, \dots, x_k = \sum_{q=1}^k \frac{(-1)^{q-1}}{(q-1)!} \sum_{P \in \mathfrak{P}_q} \prod_{I \in P} m_x I \quad (3.34)$$

donde:

$$\sum_{q=1}^k \frac{(-1)^{q-1}}{(q-1)!} \sum_{P \in \mathfrak{P}_q} = \text{sumatoria de todas las particiones de } I,$$

q = número de subconjuntos del vector x ,

P = índice de los subconjuntos del vector x ,

$m_x .$ = momento de orden x ,

$\prod_{I \in P} .$ = producto de los elementos desde P a q .

e inversamente los momentos pueden ser obtenidos de los cumulantes por la fórmula:

$$m_x I = E \ x_1, x_2, \dots, x_k = \sum_{q=1}^k \sum_{P \in \mathfrak{P}_q} \prod_{I \in P} cum_x I \quad (3.35)$$

donde:

$$\sum_{q=1}^k \sum_{P \in \mathfrak{P}_q} = \text{sumatoria de todas las particiones de } I,$$

$cum_x .$ = cumulante de orden x .

El término cumulante se refiere a momentos acumulados; existe una estrecha relación entre momentos y cumulantes, tanto así, que en procesos de media cero los cumulantes y momentos son iguales, esto se cumple hasta el tercer orden.

La tabla 3.1 muestra los cumulantes y momentos para $I = 1, 2, 3$. El significado práctico de los momentos de una variable aleatoria depende del orden del momento. Por ejemplo, el momento de primer orden representa la **media del proceso**; el momento de segundo orden es conocido también como la **varianza de los datos**, mientras que la raíz cuadrada de la varianza es la desviación estándar. Además, el momento de tercer orden de la variable aleatoria llamado “**asimetría**” (*skewness*) da una medida de la simetría alrededor de la media, es decir, que para una distribución simétrica es igual a cero [19], [42].

Tabla 3.1. Cálculo de cumulantes en términos de momentos y viceversa de hasta tercer orden.

I_1	I_2	I_3	q	Momentos a cumulantes $\sum_{q=1}^k \frac{(-1)^{q-1}}{(q-1)!} m_x I$	Cumulantes a momentos $\sum_{q=1}^k \frac{1}{q!} cum_x I$
1			1	$E x_1$	$c x_1$
1	2		2	$-E x_1 E x_2$	$c x_1 c x_2$
1	2	3	3	$2E x_1 E x_2 E x_3$	$c x_1 c x_2 c x_3$
1	2, 3		3	$-E x_1 E x_2, x_3$	$c x_1 c x_2, x_3$
1, 2			2	$E x_1, x_2$	$c x_1, x_2$
2	1, 3		3	$-E x_2 E x_1, x_3$	$c x_2 c x_1, x_3$
3	1, 2		3	$E x_3 E x_1, x_2$	$c x_3 c x_1, x_2$
1, 2, 3			3	$E x_1, x_2, x_3$	$c x_1, x_2, x_3$
				$cum x_1, x_2, x_3$	$E x_1, x_2, x_3$

Los cumulantes no cuentan con una interpretación tan práctica, sin embargo, presentan propiedades estadísticas más robustas que los momentos por lo que se utilizan más comúnmente para el cálculo de estadísticas de orden superior.

3.2.3. Propiedades de los cumulantes

Los cumulantes pueden usarse como un operador, de la misma forma que tratamos el operador esperanza estadística. Las principales propiedades de los cumulantes pueden encontrarse en [6], [12], [19], [37], [43], [44], [45].

Condiciones de simetría de los cumulantes

Adicionalmente, los cumulantes cuentan con propiedades de simetría que facilitan su obtención de tal manera que solamente es necesario calcular el cumulante en una región

determinada para conocer todo su comportamiento, a esta región se le llama región no redundante. Esta propiedad permite disminuir la cantidad de operaciones necesarias para calcular el cumulante. La región no redundante del cumulante de tercer orden $c_{3x} \tau_1, \tau_2$ está determinada por la región delimitada en la figura 3.2.

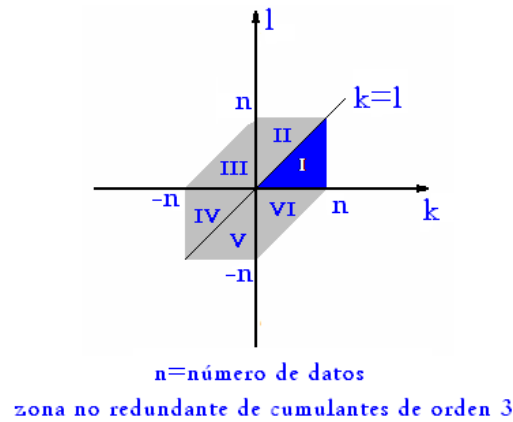


Figura 3.2. Simetrías en el dominio del tiempo [18].

Nótese que cada una de estas regiones contiene a su frontera. Así, por ejemplo, la región *I* es una región infinita caracterizada por $0 < l \leq k$ (sector de 45° perteneciente al primer cuadrante). Para procesos no estacionarios estas seis regiones de simetría desaparecen. Para sistemas estacionarios, conociendo el cumulante en esta sección (en general en cualquiera de las regiones *I* a *IV*) puede obtenerse el valor completo de la matriz de cumulantes de tercer orden. Esto se justifica debido a que el cumulante de tercer orden está relacionado con los momentos de tercer orden y estos últimos tienen las propiedades de simetría siguiente (análogas a las propiedades de simetría de la autocorrelación):

Tabla 3.2. Relaciones de simetría entre los momentos y cumulantes.

$m_{\tau_1, \tau_2} = m_{\tau_2, \tau_1}$	$\rightarrow$	$c_{3x} \tau_1, \tau_2 = c_{3x} \tau_2, \tau_1$
$m_{\tau_1, \tau_2} = m_{-\tau_1, \tau_2 - \tau_1}$	$\rightarrow$	$c_{3x} \tau_1, \tau_2 = c_{3x} -\tau_1, \tau_2 - \tau_1$
$m_{\tau_1, \tau_2} = m_{\tau_1 - \tau_2, -\tau_2}$	$\rightarrow$	$c_{3x} \tau_1, \tau_2 = c_{3x} \tau_1 - \tau_2, -\tau_2$
$m_{\tau_1, \tau_2} = m_{\tau_1 - \tau_2, -\tau_1}$	$\rightarrow$	$c_{3x} \tau_1, \tau_2 = c_{3x} \tau_1 - \tau_2, -\tau_1$
$m_{\tau_1, \tau_2} = m_{-\tau_2, \tau_1 - \tau_2}$	$\rightarrow$	$c_{3x} \tau_1, \tau_2 = c_{3x} -\tau_2, \tau_1 - \tau_2$

Uso de cumulantes en lugar de momentos

A la representación en frecuencia de los espectros de las estadísticas de orden superior (*HOS*) se le conoce como espectro de orden superior o simplemente poliespectro. El poliespectro, a diferencia de las representaciones espectrales convencionales, como el espectro de potencia y la función de autocorrelación, revela más información como presencia de armónicos y acoplamientos frecuenciales lo que lo vuelve una base de estudio de procesos o fenómenos.

El poliespectro de orden “ n ” puede ser definido en términos de los cumulantes o momentos de orden “ n ” [46]. Debido a que los cumulantes presentan propiedades estadísticas más completas que los momentos se prefiere definir el poliespectro de orden “ n ” en términos de cumulantes; de hecho se considera a la función de cumulante como un operador lineal. Derivado de estas propiedades se generan ciertas ventajas que resaltan los beneficios de definir el poliespectro en términos de cumulantes, tales como [19], [43], [44]:

1. La función de la covarianza del ruido blanco es una función impulso y el espectro es plano.

2. Los cumulantes de orden superior del ruido blanco son funciones multidimensionales de impulsos y su poliespectro es plano multidimensionalmente.
3. El cumulante es una función simétrica y multilineal en sus argumentos.
4. El cumulante de dos procesos estocásticos estadísticamente independientes, es igual a la suma de los cumulantes de los procesos estocásticos individuales. Si $x_k = s_k + w_k$, donde x_k y w_k son procesos estocásticos estacionarios y estadísticamente independientes; entonces $c_{n x} \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1} = c_{n s} \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}$. Mientras que para los momentos no es igual. Esta propiedad, permite considerar al cumulante como un operador.
5. Si x_k es un proceso estocástico estacionario gaussiano, todos los momentos de orden “ n ”, para $n \geq 3$ no proporcionan información adicional perteneciente al proceso. La función espectral del cumulante muestra esto explícitamente ya que los cumulantes de orden superior $n \geq 3$ son iguales a cero para procesos Gaussianos.
6. Si las variables aleatorias $x_1, \dots, x_n$ son divididas en dos o más grupos los cuales son estadísticamente independientes, entonces sus cumulantes de orden “ n ” son iguales a cero. Por lo tanto, el espectro del cumulante provee una forma apropiada de medir la dependencia estadística.

Estas propiedades permiten determinar lo siguiente:

Para señales determinísticas, los *HOSA* pueden definirse en términos de momentos; mientras que para procesos estocásticos los *HOSA* son definidos con cumulantes. Dado que la mayoría de los procesos físicos contienen tanto componentes determinísticos y estocásticos, es común encontrar que los *HOSA* estén definidos en términos de cumulantes.

3.2.4. La función de densidad espectral de potencia (PSD) en términos de cumulantes

La *PSD* es la herramienta más usada actualmente para el análisis de las señales en frecuencia. La *PSD* mide la potencia promedio de una señal por unidad de frecuencia, además muestra las periodicidades de los procesos o sistemas [19], [47].

Los espectros de orden superior o poliespectros de orden “ n ” $S_{nx}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{n-1})$ del conjunto de variable aleatoria x_k ; se definen como la transformada de Fourier $\mathfrak{F}$ de dimensión $n - 1$ de los cumulantes de orden “ n ” $c_{nx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1})$.

$$S_{nx} = \mathfrak{F}_{n-1} c_{nx} \quad (3.36)$$

Esto es:

$$S_{nx}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{n-1}) = \int_{-\pi}^{\pi} \dots \int_{-\pi}^{\pi} c_{nx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}) e^{-j(\omega_1 \tau_1 + \dots + \omega_{n-1} \tau_{n-1})} d\tau_1 \dots d\tau_{n-1} \quad (3.37)$$

de manera discreta

$$S_{nx}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{n-1}) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{+\infty} \dots \sum_{\tau_{n-1}=-\infty}^{+\infty} c_{nx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}) e^{-j(\omega_1 \tau_1 + \dots + \omega_{n-1} \tau_{n-1})} \quad (3.38)$$

en general $S_{nx}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{n-1})$ es complejo y una condición suficiente para su existencia es que $c_{nx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1})$ sea absolutamente sumable.

Si $n = 2$

$$S_{2x}(\omega_1) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{+\infty} c_{2x}(\tau_1) e^{-j\omega_1 \tau_1} \quad (3.39)$$

La *PSD* es un caso especial de los espectros de orden superior. La *PSD* es la más estudiada y es la herramienta más utilizada en el campo de análisis de señales y se denotará como:

$$PSD_x(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n) e^{-j2\pi f n} \quad (3.40)$$

$$PSD_x(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n) e^{-j\omega n} \quad (3.41)$$

donde:

$$\omega = 2\pi f$$

De acuerdo a la definición de la *PSD* dada en la ecuación 3.39; no es computable debido a que el número de datos con el que se trabaja son acotados y, en la mayoría de los casos de longitud muy pequeña. Además, los datos normalmente suelen estar contaminados por ruido o por una señal de interferencia.

Para resolver estos problemas, mediante métodos no paramétricos se ha desarrollado una técnica conocida como *periodograma*. Estos métodos se basan en la idea de estimar las secuencias de correlación de los procesos estocásticos de un grupo de datos medidos, calcular su transformada de Fourier y obtener el estimado de la *PSD*.

Puede entonces reescribirse como:

$$PSD_x(\omega) = \sum_{\tau=-\infty}^{+\infty} c_{2x}(\tau) e^{-j\omega\tau} \quad (3.42)$$

y de la definición del cumulante de segundo orden para un proceso de media cero

$$C_{2x}(\tau) = E[x(t)x^*(t+\tau_1)] \quad (3.43)$$

la *PSD* de un proceso estacionario se define como [6], [12], [19]:

$$PSD_x(\omega) = \sum_{\tau=-\infty}^{+\infty} C_{2x}(\tau) e^{-j\omega\tau} \quad (3.44)$$

donde $C_{2x}(\tau) = E[x(t)x^*(t+\tau_1)]$. Acotando a N muestras, se tiene:

$$PSD_x(\omega) = \sum_{m=0}^{N-1} C_{2x}(m) e^{-j\omega\frac{m}{N}} \quad (3.45)$$

$$PSD_x(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1-m} x(i)x^*(i+m) e^{-j\omega\frac{m}{N}} \quad (3.46)$$

Por tanto, el periodograma se escribe:

$$PSD_x(k) = \frac{1}{N} X(k) X^*(k) \quad (3.47)$$

$$PSD_x(k) = \frac{1}{N} |X(k)|^2 \quad (3.48)$$

donde:

$X(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) e^{-j2\pi f n}$ es la transformada de Fourier de tiempo discreto de la secuencia de datos de N puntos.

El periodograma así modificado tiene por objetivo solucionar el problema de enmascaramiento espectral producido por el periodograma ocasionado por la gran amplitud de los lóbulos secundarios la ventana rectangular. Para ello, se propone enventanar el proceso con una ventana general ($w(n) = 1$). Welch, en 1967 hizo dos modificaciones básicas al método de Bartlett (1948) [48].

En *primer lugar*, permitió el solapamiento (*overlap*) de segmentos de datos.

La *segunda* modificación consiste en pasar a través de una ventana cada secuencia $x_i(n)$ con una ventana general $w(n)$, antes de calcular el periodograma. De esta manera se obtiene el periodograma modificado para cada secuencia.

El espectro mediante el periodograma modificado, puede expresarse como:

$$P_{xx}^i(k) = \frac{1}{U} E \{ c_k(k) c_k^*(k) \} \quad (3.49)$$

donde:

$$c_k = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) w\left(\frac{n}{A}\right) e^{-j2\pi k n/A}$$

El parámetro A determina el ancho de la ventana y es un entero dependiente del tamaño de la sección N . Se recomienda un método empírico [44], [49] para la elección del parámetro A , es decir, iniciar calculando el espectro de potencia para valores pequeños de A , a continuación se va incrementando mientras se observan los efectos en el espectro. Se observa que a medida que incrementamos el valor de A , el ancho de banda de las ventanas decrece y se obtiene un espectro menos suave y con mejor resolución. La ventana que se usará en el trabajo será la rectangular.

3.2.5. Biespectro

El biespectro (*BIS*) es otro caso especial de los espectros de orden superior.

Si $n = 3$

$$S_{3x}(\omega_1, \omega_2) = \int_{\tau_1=-\infty}^{+\infty} \int_{\tau_2=-\infty}^{+\infty} c_{3x}(\tau_1, \tau_2) e^{-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 \quad (3.50)$$

Esta función es conocida como *BIS*, y se define como:

$$BIS_x(\omega_1, \omega_2) = \int_{\tau_1=-\infty}^{+\infty} \int_{\tau_2=-\infty}^{+\infty} c_{3x}(\tau_1, \tau_2) e^{-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 \quad (3.51)$$

La función *BIS* es una función compleja de dos índices de frecuencia que representa los acoplamientos armónicos de pares de frecuencias. La diferencia principal entre la *PSD* y el *BIS* consiste en que, mientras la primera representa la distribución de la potencia de la señal sobre un rango de frecuencias, la última solamente representa la distribución de potencia sobre los pares de frecuencia donde ocurra una interacción entre ellos.

Existen varias formas para calcular el *BIS*, se clasifican básicamente en métodos paramétricos y no paramétricos. La forma no paramétrica o directa se basa en funciones estadísticas aplicadas a los datos muestreados. El método que se usará en el trabajo será el no paramétrico.

El *BIS* es un caso particular de los espectros de orden superior y por definición es la transformada de Fourier bidimensional de los cumulantes de tercer orden. Una de las principales razones del uso del *BIS* es que contiene la información de amplitud y fase de las señales. Al igual que la *PSD*, el *BIS* no es computable.

El *BIS* definido en la ecuación

$$BIS_x(\omega_1, \omega_2) = \int_{\tau_1=-\infty}^{+\infty} \int_{\tau_2=-\infty}^{+\infty} c_{3x}(\tau_1, \tau_2) e^{-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 \quad (3.52)$$

donde $C_{3x} = E \{ x(t) x(t + \tau_1) x(t + \tau_2) \}$. Acotando a N muestras, se tiene:

$$BIS_x(\omega_1, \omega_2) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} c_{3x}(n, m) e^{-j \frac{\omega_1 n + \omega_2 m}{N}} \quad (3.53)$$

$$BIS_x \omega_1, \omega_2 =$$

$$\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} x_i x_{i+n} x_{i+m} e^{-j \omega \frac{m}{N}} c_{3x} n, m e^{-j \frac{\omega_1 n + \omega_2 m}{N}} \quad (3.54)$$

$$BIS_x \omega_1, \omega_2 = \gamma X_{\omega_1} X_{\omega_2} X_{\omega_1 + \omega_2}^* \quad (3.55)$$

donde γ es una constante de proporcionalidad, del cual su magnitud será:

$$|BIS \omega_1, \omega_2| = |BIS \omega_1, \omega_2| \quad (3.56)$$

y la fase es:

$$\angle BIS \omega_1, \omega_2 = \angle X_{\omega_1} + \angle X_{\omega_2} - \angle X_{\omega_1 + \omega_2} \quad (3.57)$$

Este resultado indica que el *BIS* tiene magnitud y fase, la cual no se encontraba con la *PSD*.

Al igual que el periodograma, el biperiodograma se definirá directamente como [12], [20], [35]:

$$I_x \omega_1, \omega_2 = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M BIS_x \omega_1, \omega_2 \quad (3.58)$$

$$I_x \omega_1, \omega_2 = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} x_{l,i} x_{l,i+n} x_{l,i+m} e^{-j \frac{\omega_1 n + \omega_2 m}{N}} \quad (3.59)$$

que será un biperiodograma promediado en frecuencia, para las M conjuntos de muestras.

Las muestras usadas pueden ser conjuntos de datos obtenidos del mismo proceso (en las mismas condiciones y considerando que es un proceso estacionario) en diferentes instantes de tiempo o segmentos de igual longitud de una muestra de datos obtenidos de una sola adquisición [12], [20], [35]. De la ecuación 3.55, se observa que el *BIS* representa la contribución del producto medio de tres componentes de Fourier, donde una frecuencia es igual a la suma de las otras dos [12], [20], [35]. El contenido frecuencial de los biespectros muestra los acoplamientos de sus diferentes frecuencias.

Capítulo 4

Diseño y construcción del banco experimental

En este capítulo se muestra la metodología utilizada para la evaluación de la condición de un generador síncrono, así como los argumentos sobre los que se estableció la construcción del banco experimental.

Como se mencionó en el capítulo 1, por la enorme importancia que representa en los sistemas de generación de energía fue que se seleccionó el generador síncrono como objeto de estudio, además se determinó el tipo de falla a analizar decidiéndose por la falla en rodamientos debido a que estas representan aproximadamente el 50% de total de las falla en estas máquinas. Asimismo, se determinó que los tipos de transductores más adecuados para la adquisición de las señales acústicas y de vibración eran micrófonos tipo electreto (omnidireccionales y unidireccionales) y acelerómetros piezoeléctricos. Con esto en mente se procedió a desarrollar la estrategia de diseño experimental que consistió en especificar el tipo de máquina a analizar, el tipo de falla, así como la instrumentación y las características de los transductores, sistemas de adquisición de datos, procesamiento e interpretación de señales, análisis de resultados y obtención de conclusiones.

Se determinó que la falla en la *jaula* no puede ser detectada a través de la utilización de acelerómetros pero que presenta un aumento en la emisión acústica que permite la utilización de micrófonos para su detección lo cual es el aspecto innovador en este trabajo.

La metodología general empleada para la detección de fallas en rodamientos en generadores síncronos se muestra a continuación:

1. Determinación del tipo de máquina a analizar (generador síncrono) así como conocer su funcionamiento en condiciones normales de operación para poder contar

con una referencia respecto a cambios de condiciones al momento de presentarse una falla.

2. Determinación del tipo de falla a analizar (falla en rodamiento).
3. Determinación de la utilización de señales acústicas (por medio de micrófonos) y vibración (acelerómetros direccionales) para detección de falla.
4. Conocer las características de los transductores a utilizar (acelerómetros y micrófonos).
5. Desarrollo de diseño experimental para comprobar la respuesta de los micrófonos en relación al transductor convencional que se utiliza para detectar falla en rodamientos (acelerómetro).
6. Conocer las técnicas convencionales de diagnóstico en vibraciones para una falla en rodamientos.
7. Conocer las características de geometría del rodamiento a analizar.
8. Conocer los tipos de fallas en rodamientos.
9. Determinación del tipo de falla a analizar.
10. Diseño y construcción del banco de pruebas.
11. Adquisición de señales de vibración y sonido (en condiciones normales de operación y *con* falla artificial).
12. Análisis de las señales a través de los métodos de procesamiento de señal convencional (*PSD*) y propuesto (*BIS*).
13. Relación entre fallas y *BIS*.
14. Obtención de conclusiones.

Inicialmente se desarrollaron pruebas preliminares realizando mediciones en el sistema motor-generador a través de la utilización de un osciloscopio marca Tektronix TPS 2024

Four Channel Digital Storage Oscilloscope 200 MHz 2GS/s, lo que permitió poder observar de manera inmediata la forma y el patrón de las señales a analizar. Sin embargo se presentaba el inconveniente de contar únicamente con cuatro entradas que limitaba la cantidad de transductores a utilizar.

4.1. Evaluación de los micrófonos omnidireccionales y unidireccionales

En este trabajo se propone la utilización de micrófonos como una herramienta alternativa, segura, no invasiva y relativamente fácil de utilizar para la detección de fallas en máquinas eléctricas. Asimismo, se realiza un comparativo de los resultados obtenidos con esta metodología contra la metodología usualmente empleada para este fin y que implica el uso de acelerómetros. Se espera que los resultados obtenidos sean equiparables en cuanto al diagnóstico de fallas ya que los micrófonos registran señales acústicas en tanto que un acelerómetro, señales de vibración en la máquina misma. Es precisamente esta propuesta la contribución que en el campo del diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas se pretende con el presente trabajo.

Tratando de compensar la problemática del ruido ambiental en el área donde se encuentra trabajando la máquina a examinar, con respecto a la emisión acústica específica de la falla que se está analizando, y como se menciona líneas arriba, para las máquinas nuevas el proveedor debe de proporcionar las gráficas de diseño de la máquina (*certificado de nacimiento*) y si por alguna razón no se contara con este tipo de información, a toda máquina, antes de ser instalada deben de realizársele las pruebas fuera de línea que permiten confirmar el estado que guarda la misma.

4.1.1. Diseño de experimentos

El experimento se planificó basado en un arreglo ortogonal L_8 considerando tres tipos de carga: Resistiva (R), Inductiva (L), y capacitiva (C) con dos interacciones, a dos niveles

[50], [56]. La tabla 4.1, muestra los factores de control y la tabla 4.2, el arreglo ortogonal L_8 .

Tabla 4.1. Factores de control.

	Factores de control	Nivel 1*	Nivel 2*
L	Inductancia	0 Ω	100 Ω
R	Resistencia	0 Ω	100 Ω
RL	Resistencia-Inductancia	0 Ω	100 Ω
C	Capacitancia	0 Ω	100 Ω
RC	Resistencia-Capacitancia	0 Ω	100 Ω

* Se reportan valores estandarizados en Ohms (Ω) en las capacitancias e inductancia para mantener unidades homogéneas. En la sección 5.4.4, se indican los valores equivalentes de capacitancia e inductancia en Henrios (H) y Farads (F) para las reactancias utilizadas en la experimentación.

Tabla4.2. Arreglo L_8 a dos niveles.

No. de Prueba	No. de Columna						
	Col.1	Col.2	Col.3	Col.4	Col.5	Col.6	Col.7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Se realizó el experimento y los resultados totales se muestran en el *anexo B*. Estos arreglos se analizaron estadísticamente de acuerdo a la metodología establecida para ello [50].

4.2. Metodología de la experimentación

Es necesario entender cómo se realiza un diagnóstico por medio de técnicas convencionales; en especial usando la *PSD*. La figura 4.1, muestra la metodología convencional (cuadros con líneas continuas), también se definen los pasos para evaluar el desempeño del *BIS* (cuadros con líneas punteadas). El uso de la *PSD* requiere conocer las frecuencias de falla del rodamiento (ver sección 4.5.2). Siempre que exista un defecto en alguno de los componentes del rodamiento deben aparecer las frecuencias de falla en el espectro y estas se pueden calcular por medio de las ecuaciones 2.1 a la 2.4. La falla que se analiza en el rodamiento es una grieta en la jaula, el espectro muestra la frecuencia de falla de paso de la jaula (*FTF*). El primer paso en la metodología es determinar las frecuencias de falla del rodamiento a diagnosticar.

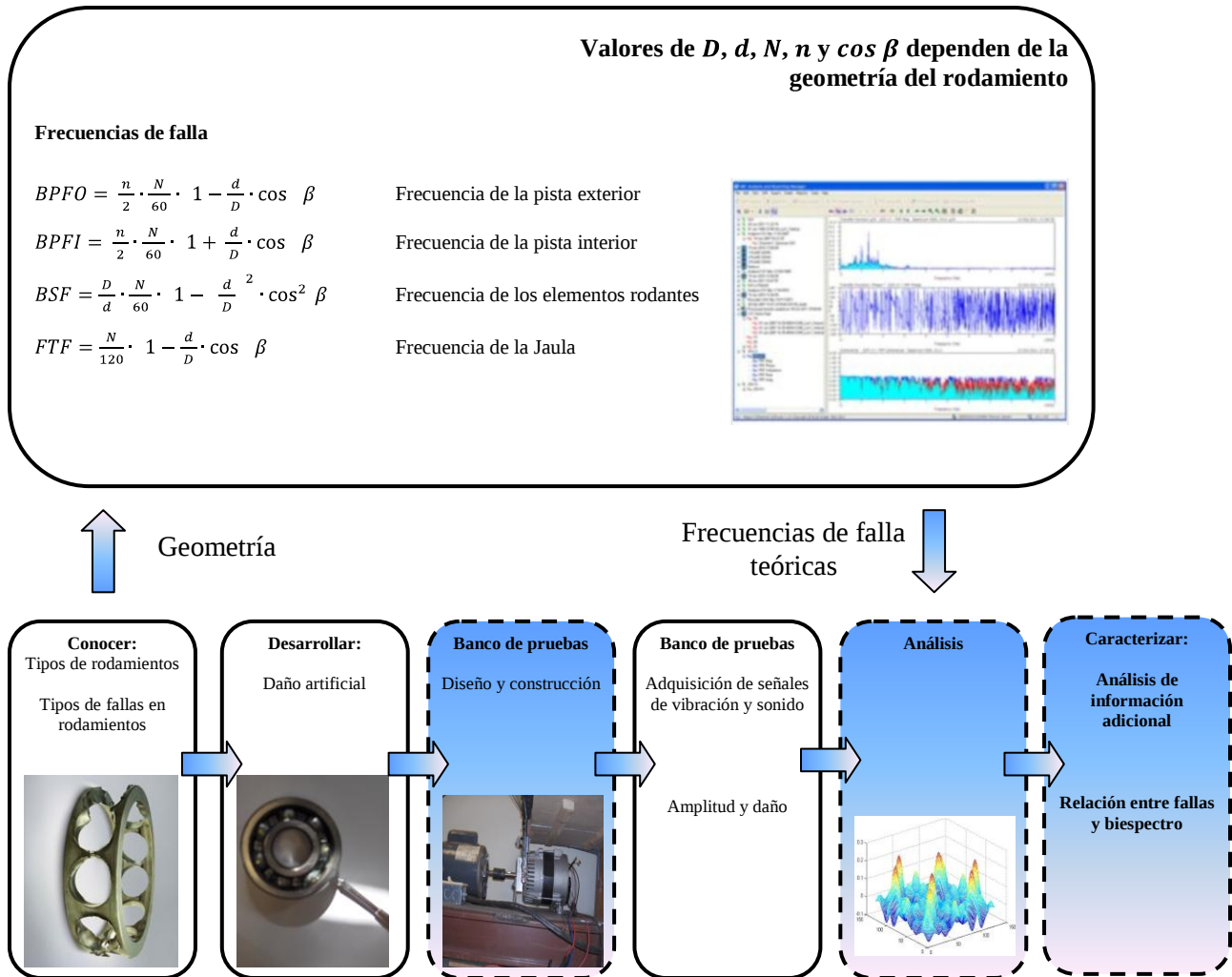


Figura 4.1. Metodología de la experimentación.

4.3. Selección del rodamiento

El rodamiento seleccionado fue el *SKF6303 – 2RSH*, que es un rodamiento rígido de una sola hilera de bolas. Bajo los siguientes argumentos:

- Este tipo de rodamientos es utilizado en una amplia gama de maquinaria, resultando de fácil adquisición. Se fabrican en diversos diámetros interiores para diversas aplicaciones [25].
- El costo de este tipo de rodamiento es comparativamente bajo, lo que permite disponer de un conjunto de varios rodamientos para el análisis.

4.4. Falla artificial

Para establecer el tipo falla artificial fue necesario analizar las fallas más comunes en rodamientos; con el propósito de seleccionar una que se pudiese llegar a detectar a través de la utilización de micrófonos.

El análisis de las fallas más comunes en rodamientos [9], [24]-[27], permite establecer las causas por las que estas ocurren, en su fase terminal se distinguen solo dos tipos de defectos; que son el desconchado y las grietas. En este trabajo se analizan las grietas producidas en la jaula de los rodamientos, como se muestra en la figura 4.2.



(a) Real [53]



(b) Artificial

Figura 4.2. Aspecto físico del deterioro de la jaula.

Este tipo de falla se origina por un deterioro de jaula. Generalmente un defecto en jaula va acompañado por defectos en pistas, la frecuencia fundamental de giro de la jaula (FTF), es la velocidad rotacional de la jaula o frecuencia fundamental de deterioro de la jaula, y representa el número de giros que realiza la jaula del rodamiento cada vez que el eje realiza un giro completo.

Para crear el deterioro de la jaula artificialmente se utilizó un desarmador de precisión con punta de estrella.

En todo el desarrollo del trabajo se analiza el rodamiento que tiene una hendidura en la jaula (figura 4.3) y mostró un cambio significativo del nivel de vibración respecto a una condición *sin* falla.



Figura 4.3. Rodamiento con hendidura en la jaula.

4.5. Diseño y construcción del banco experimental

El banco experimental donde se llevaron a cabo los ensayos se construyó en el laboratorio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Baja California (*UABC*). Se diseñó una base de metal compuesta por 4 secciones de polín de calibre 12 y una plancha de metal de $\frac{1}{4}$ de pulgada; la cual sirvió como soporte para los componentes del banco de pruebas. Para proporcionar mayor rigidez a la base de trabajo se colocaron amortiguadores de vibración compuestos de corcho y neopreno bajo el sistema motor-generador y se sujetó al suelo por medio de tornillos.

4.5.1. Configuración y especificación de los componentes

En la figura 4.5 se presenta la configuración del banco experimental y se puede observar que la transmisión de velocidad del motor a la flecha se realiza por medio de un acoplamiento elástico *lovejoy* de $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{2}$ pulgada. Al utilizar este tipo de acoplamiento se evitó el problema de desalineamiento entre el eje motriz y el eje conducido.

Dos argumentos importantes para la construcción del banco experimental fueron los siguientes:

1. La carcasa proporciona área suficiente para la colocación de los acelerómetros y la posibilidad de poder montar diferentes rodamientos (permitió colocar el rodamiento *SKF6303 – 2RSH*).
2. Para el maquinado del eje conducido, se tomó en cuenta el diseño de la máquina así como del fabricante de rodamientos.

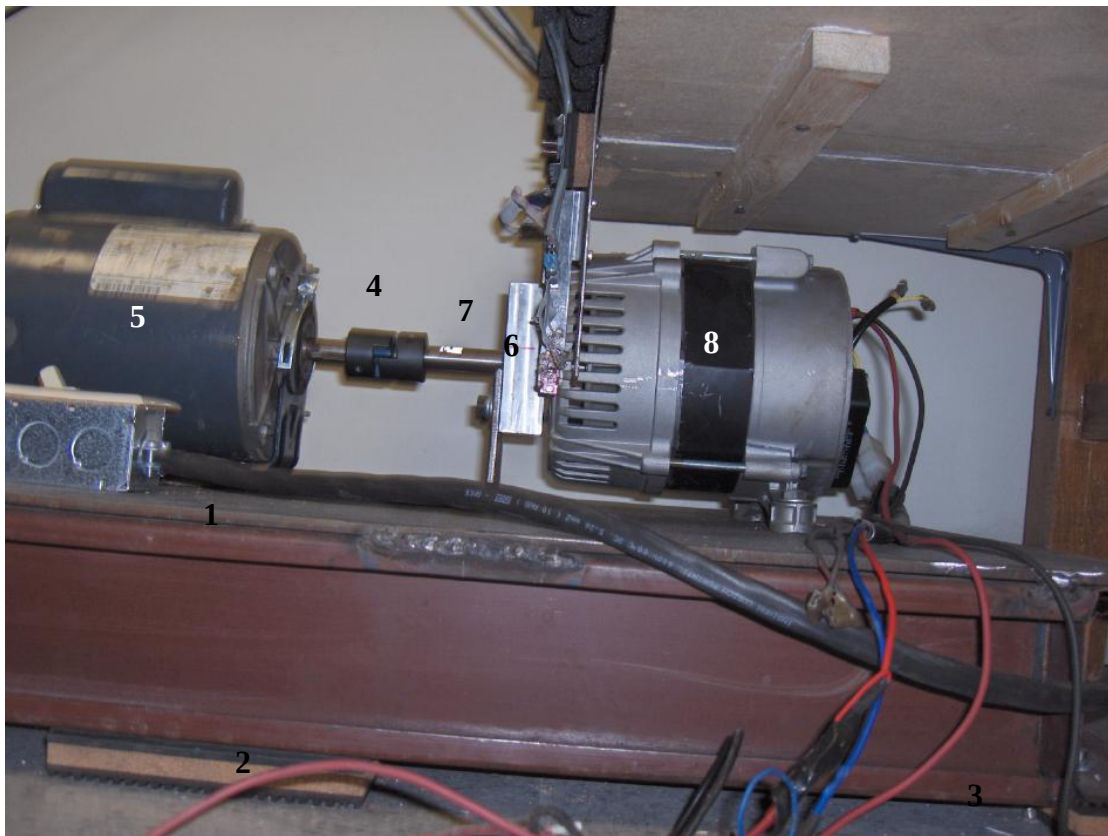


Figura 4.4. Sistema mecánico.

En la tabla 4.3 se listan los componentes mostrados en la figura 4.4.

Tabla 4.3. Especificación de los componentes del sistema mecánico.

Núm.	Cant.	Descripción
1	1	Base (plancha de metal $\frac{1}{4}$ de pulgada, polín calibre 12)
2	4	Amortiguadores de corcho y neopreno
3	4	Tornillos roscables
4	1	Acoplamiento elástico <i>lovejoy</i> de $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{2}$ pulgada
5	1	Motor de inducción monofásico <i>GE, CAT NO. C1158</i> , 1 Hp , 60 Hz , $\frac{115}{208} - 230\text{ V}$, 1725 rpm , 14.7 A .
6	1	Base de aluminio de $(10 \times 10 \times 3\text{ cm})$
7	2	rodamiento <i>SKF6303 – 2RSH</i>
8	1	Generador síncrono, 2Hp , 50 Vcd

4.5.2. Localización de transductores

Para determinar la posición en la carcasa donde se colocarían los acelerómetros se consideró aquella que estuviese lo más cercano posible al rodamiento *SKF6303 – 2RSH*.

En la figura 4.5 se observa la colocación del acelerómetro piezoeléctrico (denominado *a*).

Los dos micrófonos tipo electreto utilizados son: “*omnidirectional back electret condenser microphone*” (denominados *omx* y *omy*), “*unidirectional back electret condenser microphone*” (denominados *umx* y *umy*). Las especificaciones del acelerómetro piezoeléctrico y los micrófonos se encuentran en las tablas 4.4, 4.5 y 4.6, respectivamente.

Los acelerómetros piezoeléctricos miden la vibración en tres direcciones, mientras que los micrófonos unos son omnidireccionales y otros son unidireccionales, según lo indica la flecha correspondiente.

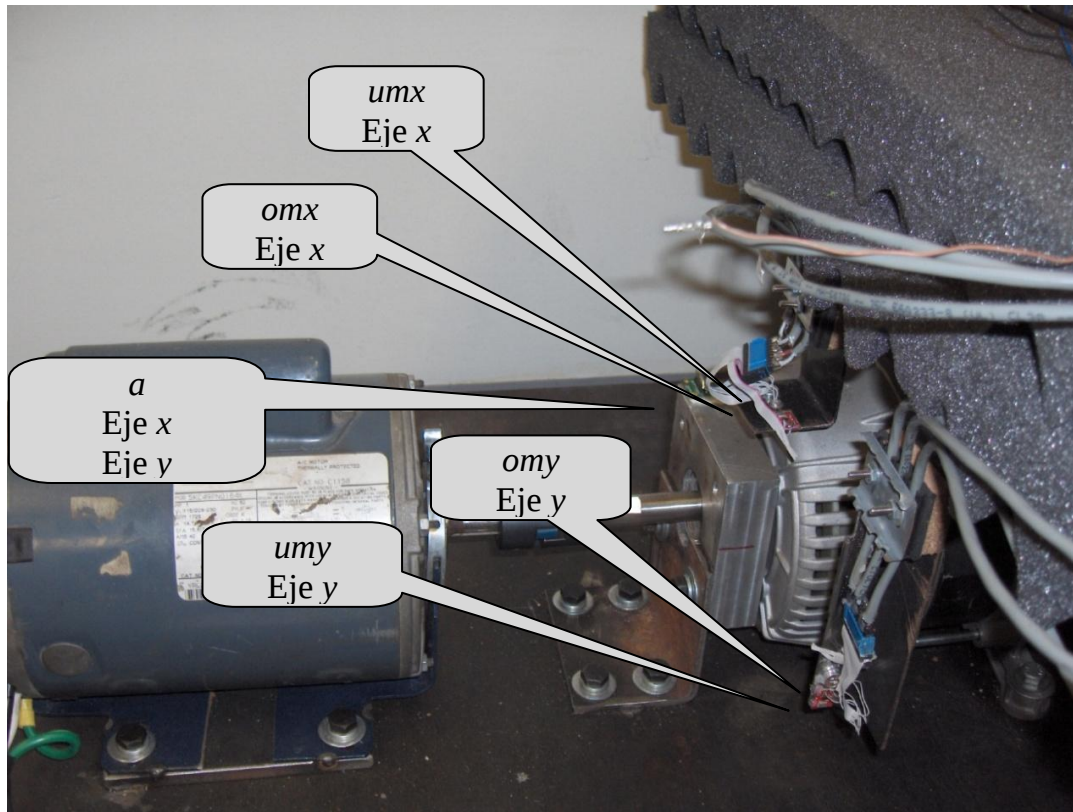


Figura 4.5. Colocación de los transductores: micrófonos unidireccional, omnidireccionales y acelerómetro piezoeléctrico.

El acelerómetro a permitió medir el eje vertical y horizontal, de la señal de vibración.

En todo el desarrollo del trabajo de investigación sólo se analizan las vibraciones verticales y horizontales tanto para el acelerómetro como para los micrófonos.

4.6. Sistemas de adquisición

Las señales de vibración producidas en el rodamiento de estudio fueron muestreadas a través de un sistema de adquisición que realiza la medición simultánea de la señal del acelerómetro (eje x y eje y), así como con los micrófonos unidireccionales (eje x y eje y) y omnidireccionales (eje x y eje y). De esta manera se pudieron validar las mediciones realizadas por los micrófonos y los transductores estaban colocados en diferentes lugares de la carcasa de la máquina, pero muy cercanos.

4.6.1. Sistema de adquisición de datos para el acelerómetro

Este sistema de adquisición se implementó a través de una tarjeta para adquisición de datos National Instruments, modelo *NI USB – 6009* la cual se insertó al puerto USB de una computadora portátil. La configuración del sistema de adquisición de los datos experimentales se presenta en la figura 4.6.

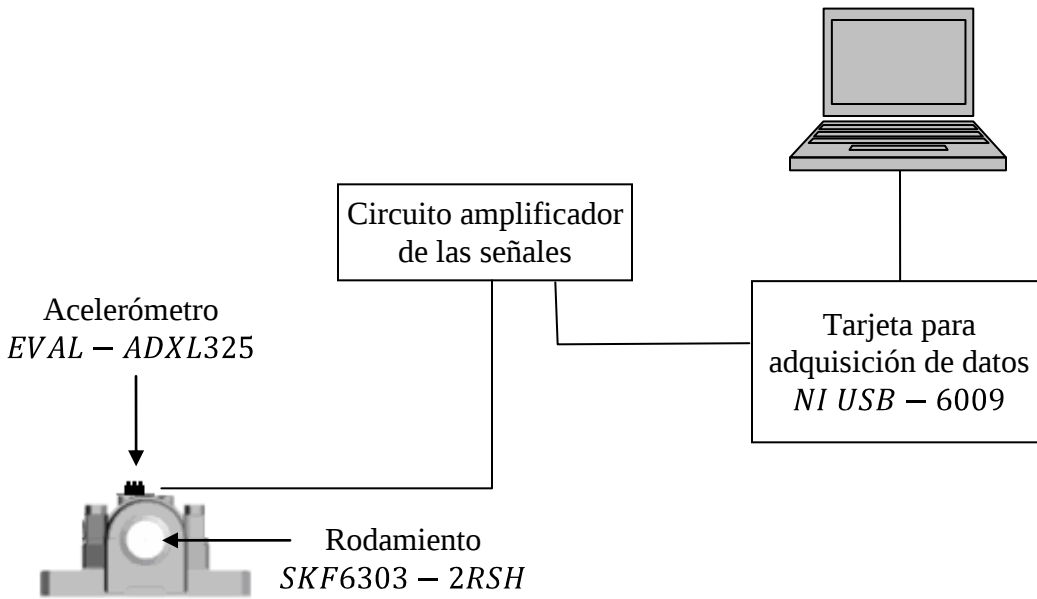


Figura 4.6. Sistema de adquisición usando acelerómetros piezoeléctricos.

Este sistema permite adquirir datos en el dominio del tiempo.

En la tabla 4.4 se muestran las especificaciones del acelerómetro piezoeléctrico usado en la experimentación.

Tabla 4.4. Especificaciones de acelerómetro piezoeléctrico

Transductor	Acelerómetro
Tipo	3 ejes (Analog Device <i>EVAL – ADXL325</i>)
Rango de medición:	$\pm 5 \text{ g}$
Sensibilidad	$156 \sim 192 \text{ mV/g}$
Sensibilidad transversal	$\pm 1 \%$
Frecuencia de resonancia	5.5 kHz
Temperatura de operación	$-40 \sim +85 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Ancho de banda	0.5 Hz a 1600 Hz para el eje x y el eje y

4.6.2. Sistema de adquisición de datos para los micrófonos

El segundo sistema de adquisición de datos experimentales cuyo esquema se presenta en la figura 4.7, se implementó a través de una tarjeta para adquisición de datos marca National Instruments, modelo *NI USB – 6009* la cual se insertó en el puerto USB de una computadora portátil. La configuración del sistema de adquisición de los datos experimentales se presenta en la figura 4.7.

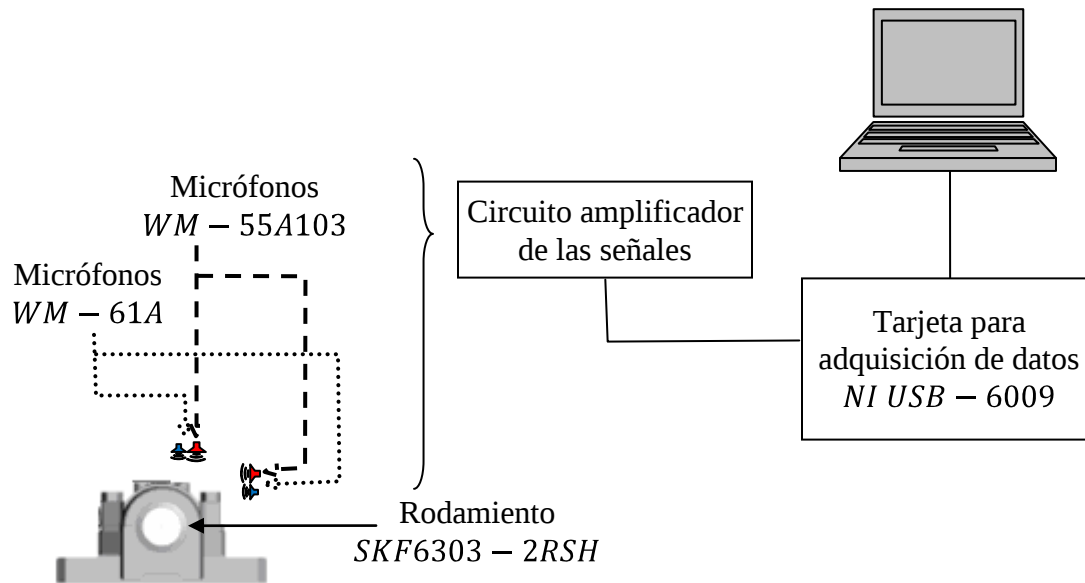


Figura 4.7. Sistema de adquisición para los micrófonos.

Este sistema permite adquirir datos en el dominio del tiempo. Las tablas 4.5 y 4.6, muestran las especificaciones de los micrófonos usados en la experimentación.

Tabla 4.5. Especificación de micrófono omnidireccional de electreto-condensador.

Transductor	Micrófono
Tipo	Omnidireccional (Panasonic WM – 61A)
Sensibilidad	$-35 \pm 4dB$
Impedancia	$< 2.2k\Omega$
Frecuencia	20-20,000 Hz
Tensión máxima de operación	10 V
Tensión de operación estándar	2 V
Consumo de corriente	Max. 0.5 mA
Relación señal ruido (SNR)	$> 62 dB$

Tabla 4.6. Especificación de micrófono unidireccional de electreto-condensador.

Transductor	Micrófono
Tipo	Unidireccional (Panasonic <i>WM – 55A103</i>)
Sensibilidad	$-47 \pm 4dB$
Impedancia	$< 680 \Omega$
Frecuencia	100-16,000 <i>Hz</i>
Tensión máxima de operación	10 <i>V</i>
Tensión de operación estándar	1.5 <i>V</i>
Consumo de corriente	Max. 0.5 <i>mA</i>
Relación señal ruido (SNR)	$> 60 dB$

Este sistema utiliza un circuito amplificador para concentrar las señales del acelerómetro y de los micrófonos omnidireccionales y unidireccionales para enviarlas a la tarjeta para adquisición de datos.

El sistema amplificador permite alimentar a los micrófonos con 3 volts y 15 volts.

La figura 4.8, muestra el esquema de conexión del circuito amplificador de los transductores.

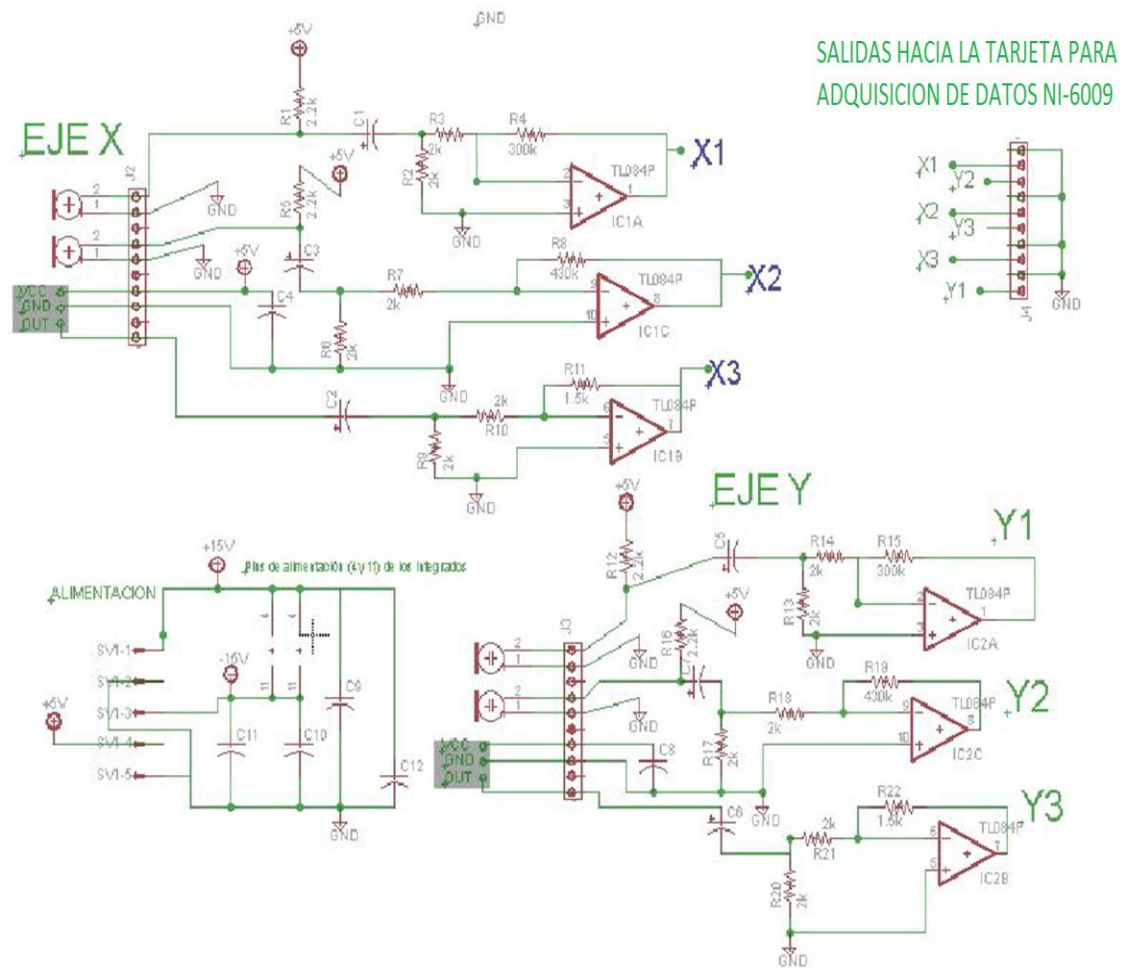


Figura 4.8. Circuito amplificador para los transductores.

Capítulo 5

Experimentación y análisis de resultados

Las fallas en rodamientos originan señales de vibración muy complejas debido a las vibraciones provenientes de otros elementos de la máquina que son difíciles de interpretar y comprender. En estos casos el análisis espectral (*PSD*) presenta ciertas limitaciones ya que no muestra la interacción no lineal entre componentes frecuenciales [6], [12], [19], [20]. Se tiene conocimiento que el *BIS* proporciona información relevante que no es posible mostrar con la *PSD*, en la detección de barras rotas en rotores, desbalanceo, desalineación, etc. [11], [12], [14].

En este trabajo se obtuvieron las señales de vibración del prototipo experimental descrito en el capítulo anterior con transductores de aceleración (acelerómetros) y transductores acústicos (micrófonos) a partir de un rodamiento *sin* falla. Posteriormente, y una vez caracterizadas dichas señales se generó artificialmente una falla la cual consistió en provocar una grieta en la jaula de un rodamiento *SKF6303 – 2RSH* de la máquina analizada. A continuación, se calculó la *PSD* y el *BIS* para cada condición y se realizó un análisis comparativo con el propósito de obtener las características de la señal de salida que permitieran distinguir sin lugar a dudas entre una condición *sin* falla y otra *con* falla.

La importancia de esta investigación se basa en la interpretación de los gráficos biespectrales para ambas condiciones del rodamiento. Conjuntamente, se presenta una comparación entre las gráficas obtenidas a través de los transductores de aceleración y los transductores acústicos.

5.1. Frecuencias de falla del rodamiento *SKF6303 – 2RSH*

Un deterioro en alguno de los componentes del rodamiento produce un pico a cierta frecuencia, el valor de esta frecuencia depende de la geometría del rodamiento así como de su velocidad de rotación [24]-[22]. El rodamiento en estudio operó con una grieta en la jaula generando frecuencias características de vibración en la jaula. Se calcularon las frecuencias de vibración utilizando las ecuaciones 2.1 a 2.4, se requiere contar entonces con las siguientes características del rodamiento [26], [22].

$D = 32 \text{ mm}$ $d = 8.731 \text{ mm}$ $\beta = 0^\circ$ $n = 7 \text{ bolas}$ $V_{rpm} = 1725 \text{ rpm}$
(revoluciones de operación del impulsor).

La tabla 5.1 muestra los valores de las frecuencias de vibración para todos los elementos que lo componen.

Tabla 5.1. Frecuencias de falla para los elementos del rodamiento *SKF6303 – 2RSH*.

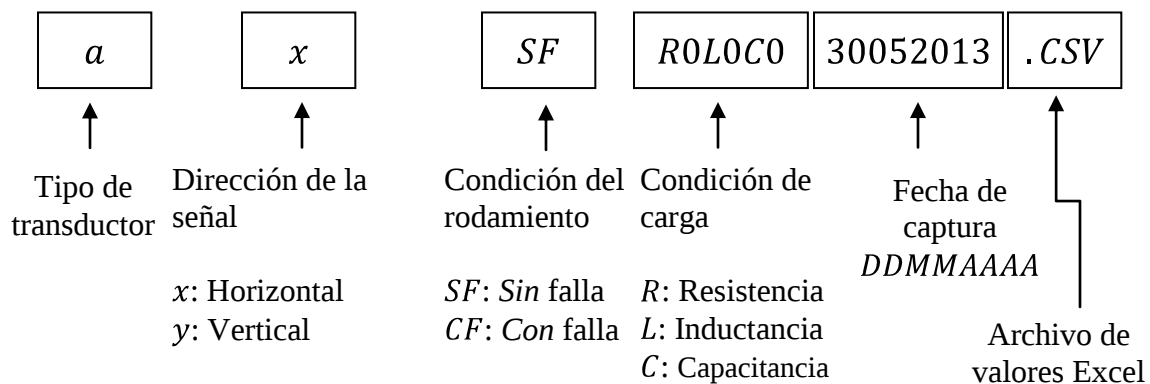
Frecuencia de rotación		Frecuencias (Hz)			
Hz	rpm	Defecto en la pista interior	Defectos en la pista exterior	Defectos en la jaula	Defectos en los elementos rodantes
60	1725	128.080	73.170	10.453	97.527

5.2. Clasificación de los datos

Para todos los casos las señales de vibración y acústicas del rodamiento fueron adquiridas a una tasa de 6000 muestras/segundo debido a las limitaciones de las entradas de la tarjeta para adquisición de datos *NI USB – 6009* (ver *anexo C*), tomando una muestra representativa de 6000 muestras evitando los transitorios del arranque registrando la muestra después de cinco minutos de operación. Por tanto, los resultados obtenidos son representativos del estado estacionario de la operación de la máquina. Enseguida se indica

la secuencia (y el nombre de los archivos) en la que fueron registrados los datos en el sistema de adquisición. La estimación de la *PSD* y del biespectros se realizó sin hacer particiones.

Nombre del archivo: AX_SF_R0LOC0_30052013.CSV



5.3. Interpretación de los datos adquiridos con los acelerómetros

Con la información adquirida se obtuvieron las gráficas con respecto al tiempo de la *PSD* y del biespectro. La comparación entre ellas permitió mostrar las ventajas de utilizar el biespectro en el diagnóstico de fallas en rodamientos. Se encontró que la falla en rodamientos genera armónicos de frecuencia definida que se calcula a través de la ecuación 2.3. A continuación se muestran y describen, las gráficas correspondientes a la frecuencia de rotación de 60 *Hz*.

La figura 5.1 muestra el giro del anillo interior y el correspondiente desplazamiento de la falla y se indica que cada vez que existe un choque, y la grieta se encuentra cerca o en la zona de carga, se producirá un impulso de gran amplitud; mientras que si el impacto es entre la grieta y una bola y no sea en la dirección de la carga, los picos serán de menor amplitud. Esta característica de vibración es propia para la falla en la jaula del rodamiento y es consecuencia de que en esta zona es donde actúa el vector de la carga (que puede incluir el peso mismo de la flecha).

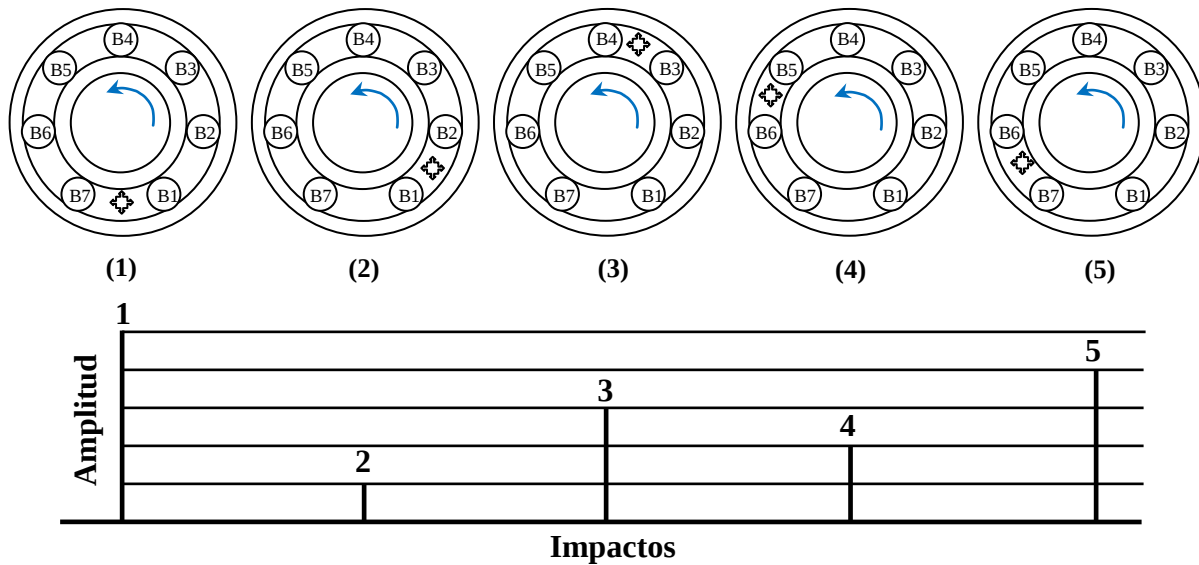


Figura 5.1. Desplazamiento de la falla conforme la jaula gira y amplitud de impacto de acuerdo a su cercanía con la zona de carga.

La figura 5.1 muestra que los impactos no ocurren en posiciones simétricas del rodamiento de tal manera que no siempre se obtendrá la misma amplitud de vibración. Al mismo tiempo pueden presentarse posiciones de deslizamiento entre los elementos rodantes y las pistas [51]. Estos deslizamientos producen una pequeña variación en los cálculos de las frecuencias de falla, ya que son aleatorios lo que contribuye a que la amplitud de la vibración obtenida presente cierta aleatoriedad; por lo que no es posible determinar de manera exacta la desviación que se obtendrá con respecto a las frecuencias de falla esperadas.

5.3.1. Dominio del tiempo (acelerómetros y micrófonos)

En la figura 5.2 se muestran los resultados obtenidos para la señal horizontal de vibración del generador *sin* falla graficada en amplitud vs. tiempo. Entretanto, en la figura 5.3 se presentan los resultados de la señal horizontal de vibración del generador *con* falla graficada en amplitud vs. tiempo.

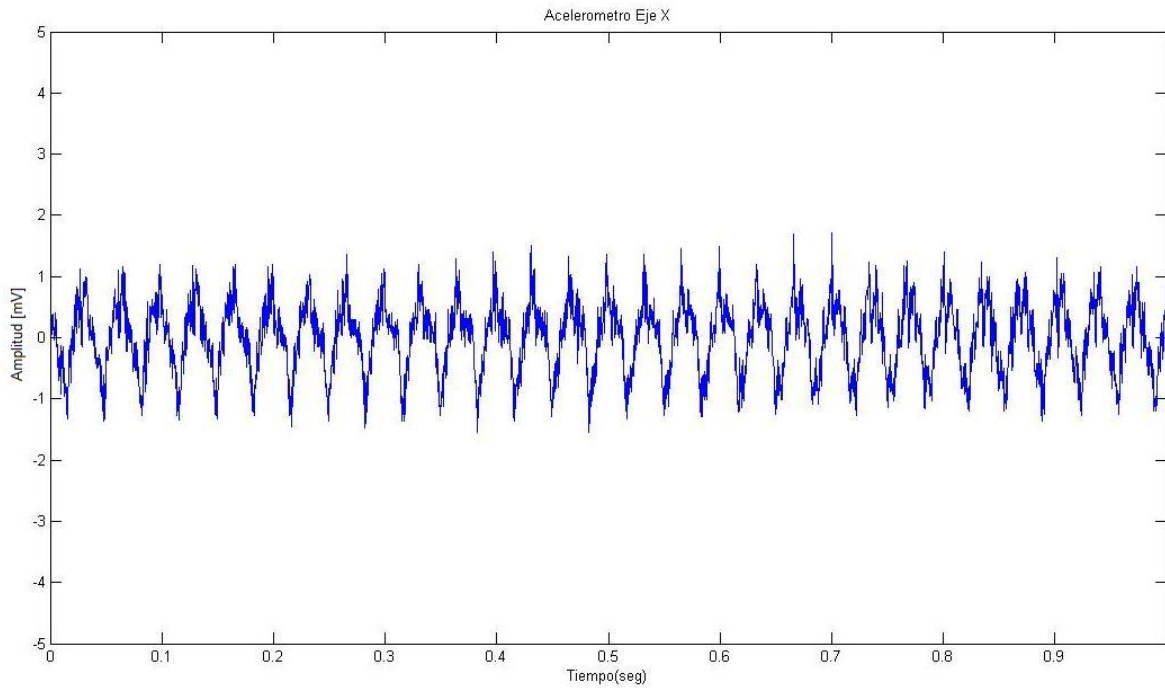


Figura 5.2. Señal de vibración horizontal del acelerómetro para la condición *sin* falla.

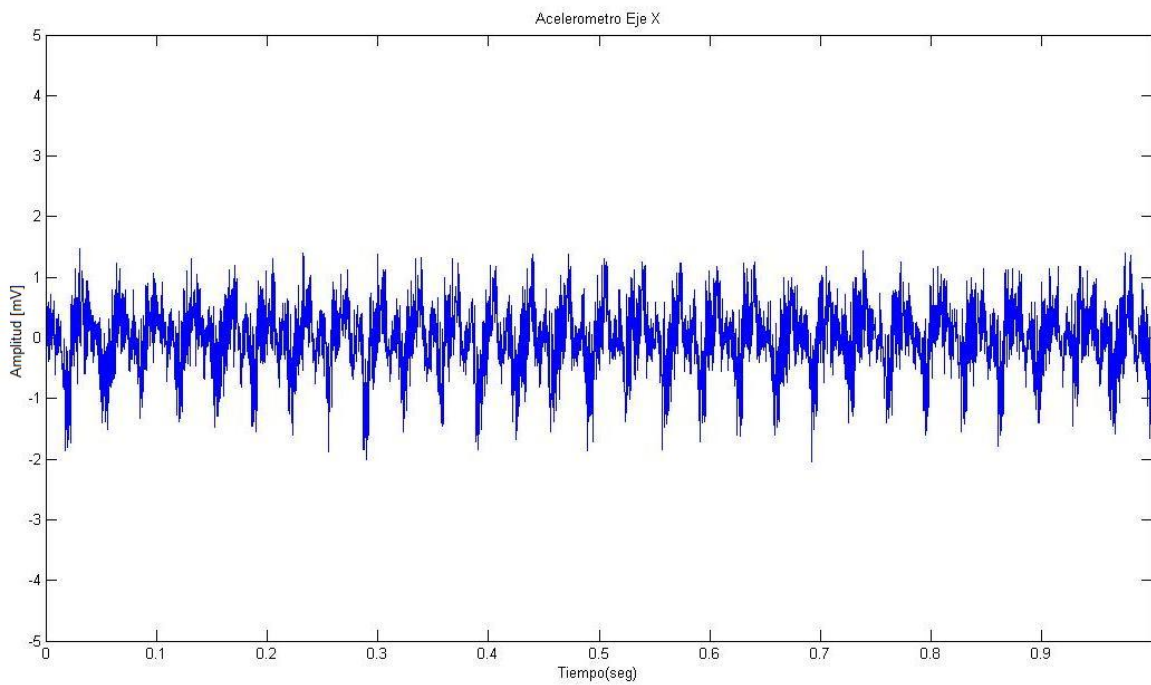


Figura 5.3. Señal de vibración horizontal del acelerómetro para la condición *con* falla.

En la figura 5.4 se muestran los resultados obtenidos para la señal horizontal acústica del generador *sin* falla graficada en amplitud vs. tiempo. La figura 5.5 presenta los resultados de la señal horizontal acústica del generador *con* falla graficada en amplitud vs. tiempo.

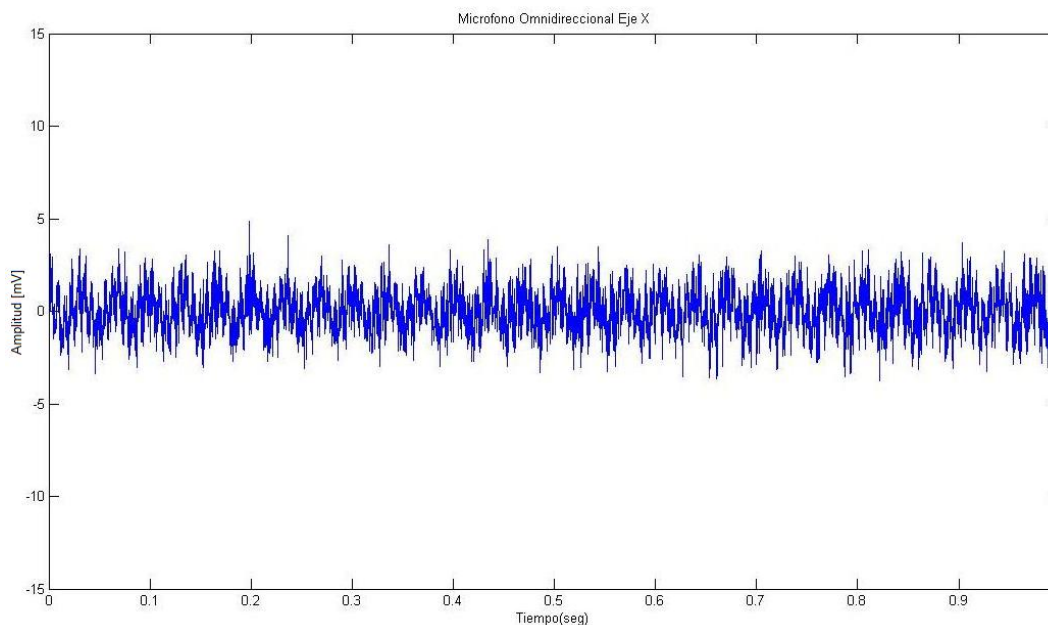


Figura 5.4. Señal acústica horizontal del micrófono omnidireccional para la condición *sin* falla.

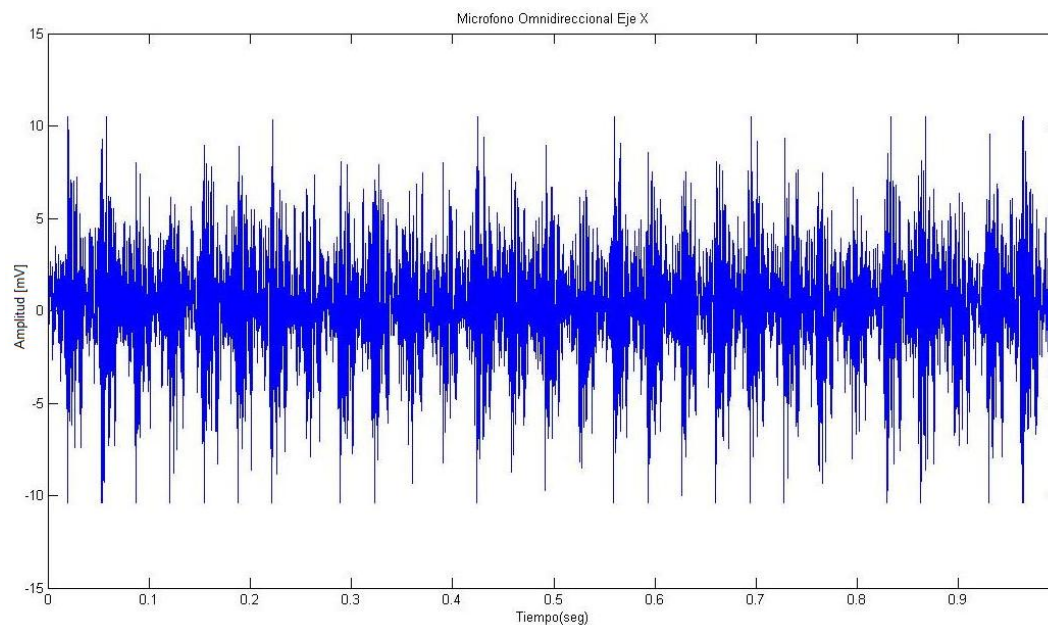


Figura 5.5. Señal acústica horizontal del micrófono omnidireccional para la condición *con* falla.

En el *anexo C* se hallan reportadas el conjunto completo de gráficas obtenidas para todas las diferentes condiciones de prueba.

Al comparar las gráficas de las figuras 5.2 vs. 5.3 en el eje horizontal de los acelerómetros y al comparar las gráficas de las figuras 5.4 vs. 5.5, en el eje horizontal de los micrófonos omnidireccionales se observa que la amplitud de las señales de vibración y acústicas son mayores cuando el rodamiento tiene una falla, respecto a la condición sin daño. El análisis en el dominio del tiempo indica que existe un problema en el rodamiento. Sin embargo es difícil determinar el origen del problema ya que no se puede observar una secuencia clara de impactos (vibración de falla del rodamiento).

En el diagnóstico de máquinas el análisis de la señal en el dominio del tiempo no suele ser considerada debido a que no permiten revelar aspectos esenciales de la señal del rodamiento con detalle y sin ambigüedad, por lo que se procede a realizar otro tipo de estudio, el cual consiste en el análisis de las señales en el dominio de la frecuencia el cual permite descubrir aspectos de la señal que serían muy difíciles o imposibles de observar a partir de su representación en el dominio del tiempo. Se prefieren las representaciones en el dominio de la frecuencia debido a que las componentes relevantes de la señal son fáciles de detectar a causa de que no quedan enmascaradas por señales de gran amplitud por lo que el análisis del contenido armónico de una señal es más sencillo.

Se expone en este trabajo que el uso de los micrófonos para el diagnóstico de máquinas en una falla en la jaula del rodamiento es una herramienta segura, no invasiva y en este caso es la opción ideal. Al realizar el comparativo de los resultados obtenidos contra la metodología usualmente empleada para el diagnóstico de vibraciones, que consiste en la utilización de acelerómetros se demuestra que este tipo de falla no puede ser detectada a

través de la utilización de acelerómetros debido a que las frecuencias de falla disminuyen o desaparecen presentándose un aumento en el ruido de fondo de operación de la máquina.

5.3.2. Dominio de la frecuencia *PSD* (acelerómetros y micrófonos)

En la figura 5.6 se muestran los resultados obtenidos para la señal horizontal de vibración del generador *sin* falla graficada en amplitud vs. frecuencia. Entretanto, en la figura 5.7 se presentan los resultados de la señal horizontal de vibración del generador *con* falla graficada en amplitud vs. frecuencia.

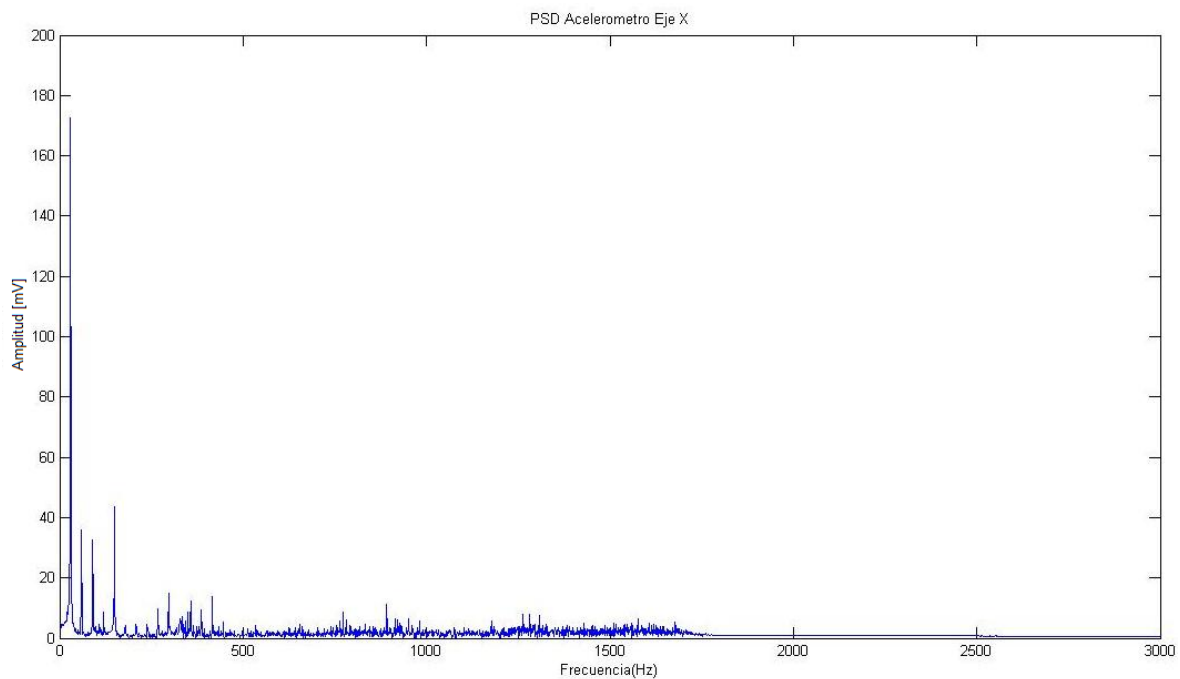


Figura 5.6. Señal de vibración horizontal del acelerómetro para la condición *sin* falla.

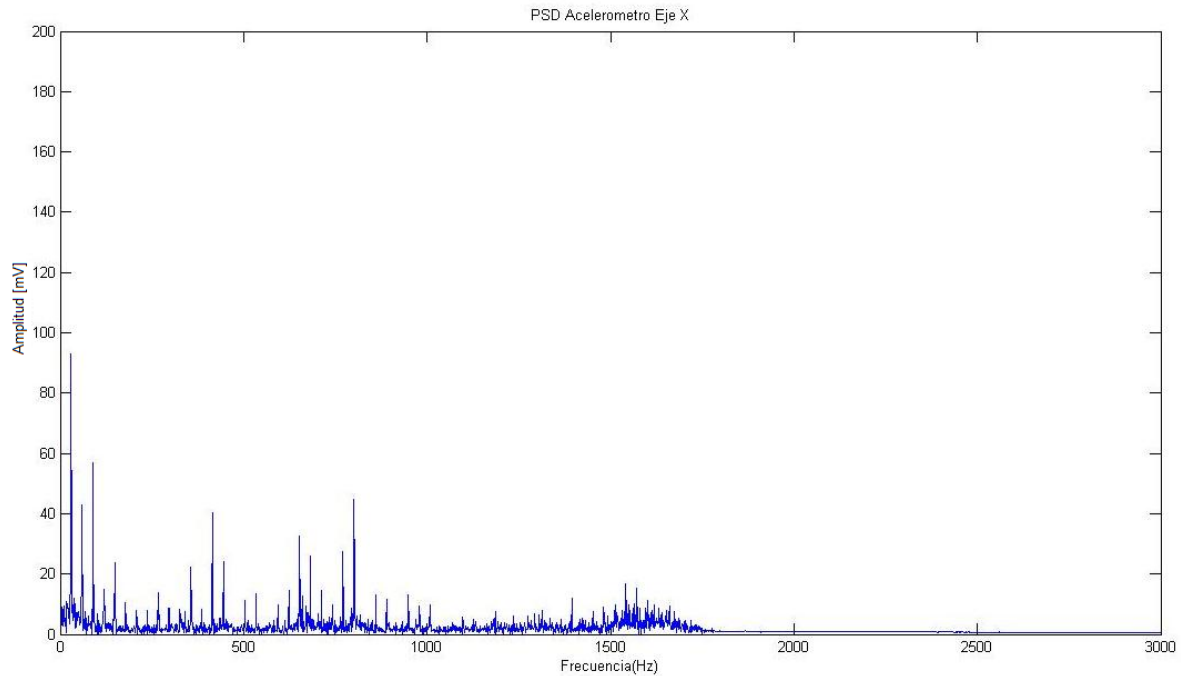


Figura 5.7. Señal de vibración horizontal del acelerómetro para la condición *con* falla.

En la figura 5.8 se muestran los resultados obtenidos para la señal horizontal acústica del generador *sin* falla graficada en amplitud vs. frecuencia del micrófono omnidireccional. La figura 5.9 presenta los resultados de la señal horizontal acústica del generador *con* falla graficada en amplitud vs. frecuencia del micrófono omnidireccional.

En la figura 5.10 se muestran los resultados obtenidos para la señal horizontal acústica del generador *sin* falla graficada en amplitud vs. frecuencia del micrófono unidireccional. La figura 5.11 presenta los resultados de la señal horizontal acústica del generador *con* falla graficada en amplitud vs. frecuencia del micrófono unidireccional.

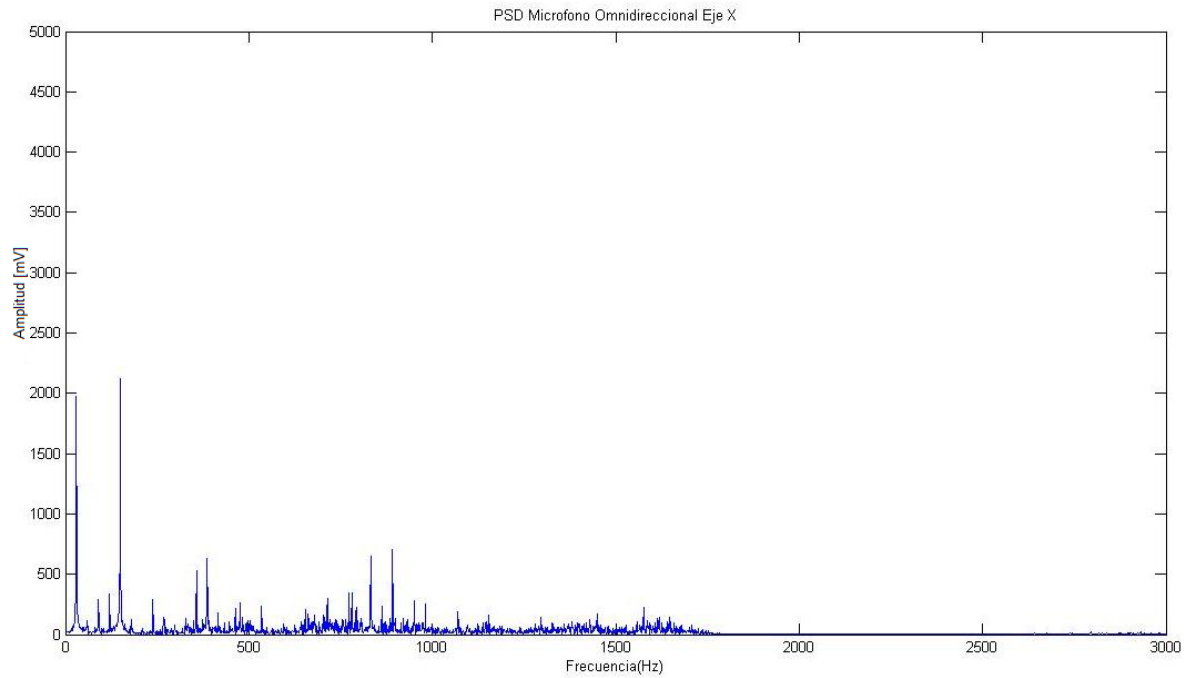


Figura 5.8. Señal acústica horizontal del micrófono omnidireccional para la condición *sin* falla.

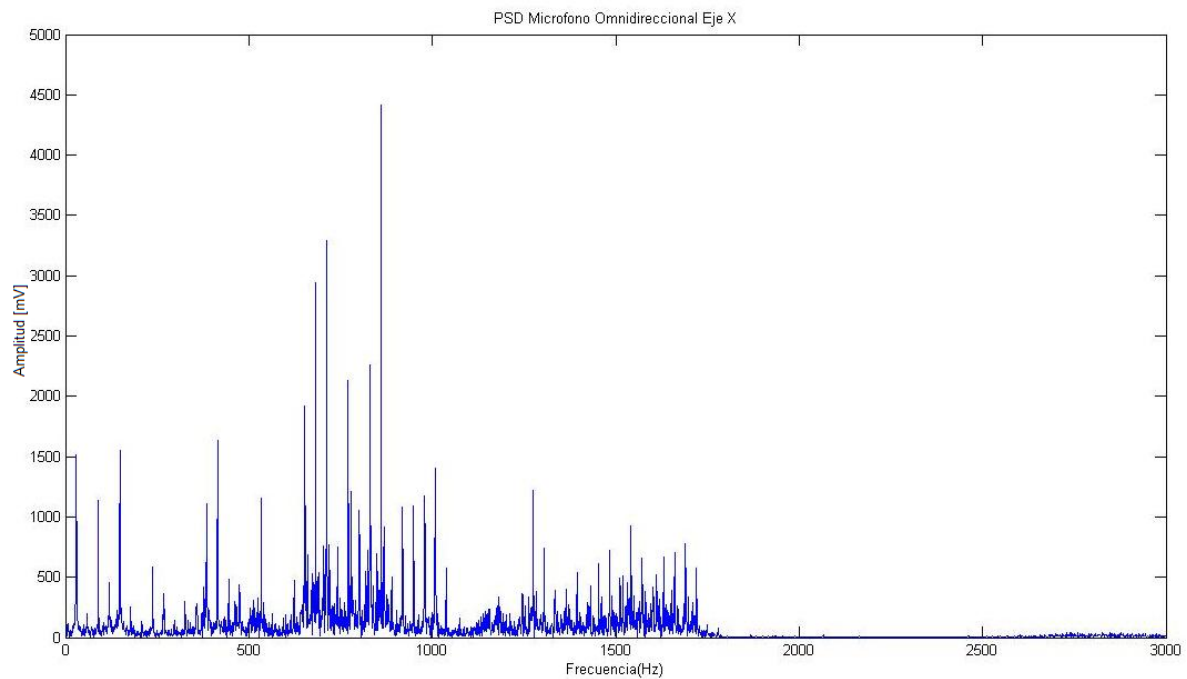


Figura 5.9. Señal acústica horizontal del micrófono omnidireccional para la condición *con* falla.

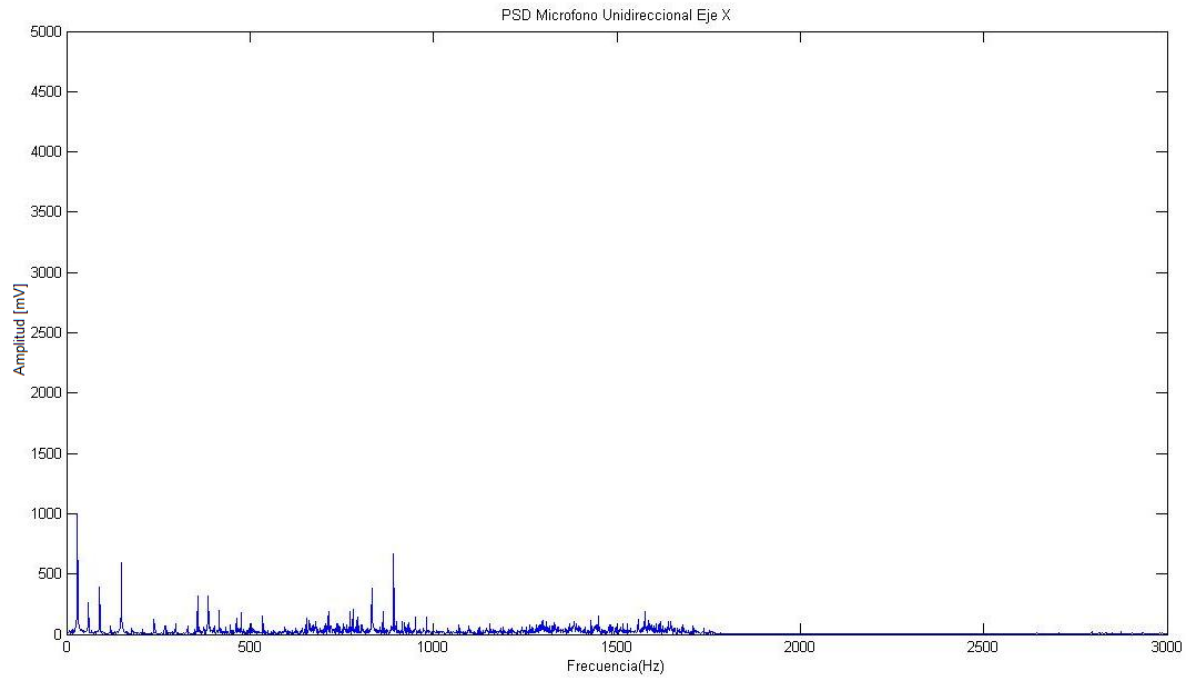


Figura 5.10. Señal acústica horizontal del micrófono unidireccional para la condición *sin* falla.

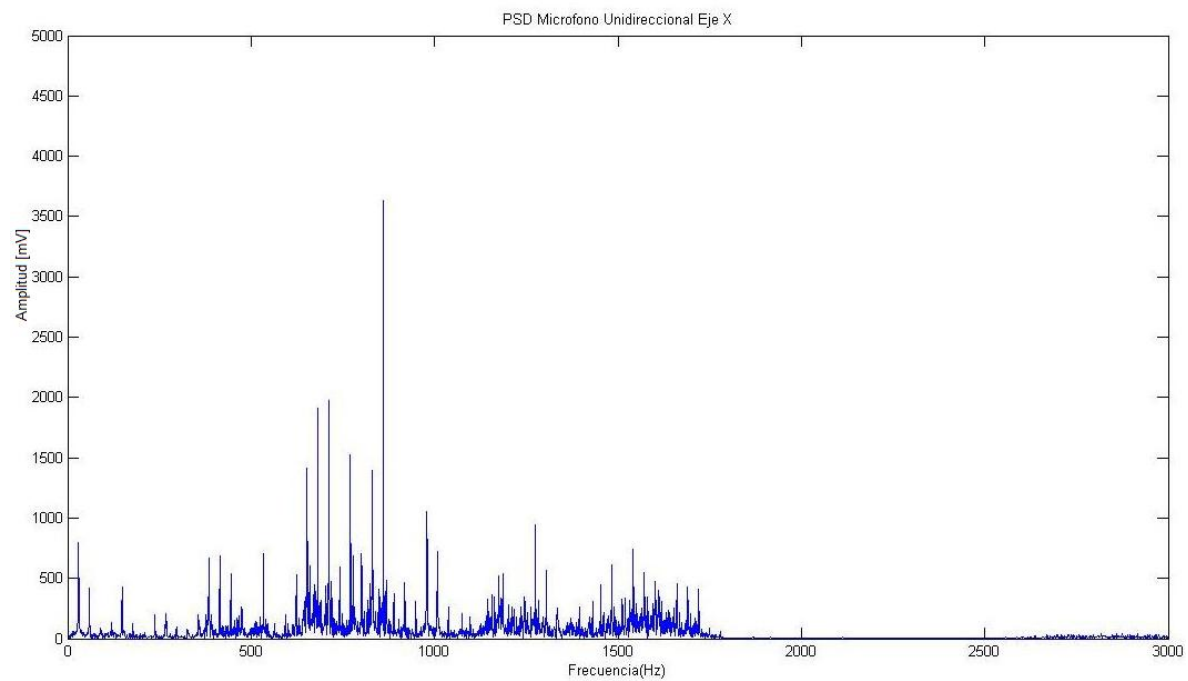


Figura 5.11. Señal acústica horizontal del micrófono unidireccional para la condición *con* falla.

En el *anexo C* se hallan reportadas el conjunto completo de gráficas obtenidas para todas las diferentes condiciones de prueba.

En [52] se explica el efecto de traslape en el uso de la *PSD*. De la figura 5.6, en el eje horizontal del acelerómetro se observa la amplitud respecto a la condición *sin* falla. La amplitud de la frecuencia en el eje horizontal para la condición *sin* falla en la frecuencia de 682 Hz (aproximadamente 23 veces la frecuencia de rotación de la flecha) es de 1.303 *mV/Hz*; en la figura 5.7, se observa la amplitud respecto a la condición *con* falla es de 58.57 *mV/Hz*.

Cuando la falla es grave aparecen bandas laterales alrededor de las frecuencias importantes de rotación de la máquina. En la figura 5.7, se analizaron los picos de frecuencia de 29.5 Hz, 59.5 Hz, 89 Hz, y 118.5 Hz. Se observó que estas frecuencias están relacionadas con la frecuencia de rotación de la flecha ya que la relación de cada una de estas frecuencias es de 30 Hz (aproximadamente que es el valor teórico de rotación de la flecha).

De la figura 5.8, en el eje horizontal del micrófono omnidireccional, se observa la amplitud respecto a la condición *sin* falla. La amplitud de la frecuencia en el eje horizontal para la condición *sin* falla en la frecuencia de 682 Hz es de 20.86 *mV/Hz*; en la figura 5.9, se observa la amplitud respecto a la condición *con* falla es de 4506 *mV/Hz*.

De la figura 5.10, en el eje horizontal del micrófono unidireccional se observa la amplitud respecto a la condición *sin* falla. La amplitud de la frecuencia en el eje horizontal para la condición *sin* falla en la frecuencia de 682 Hz es de 8.508 *mV/Hz*; en la figura 5.11, se observa la amplitud respecto a la condición *con* falla es de 3726 *mV/Hz*.

Cuando se presenta una falla aparecen bandas laterales alrededor de las frecuencias importantes de rotación de la máquina. En las figuras 5.9 y 5.11, se analizaron los picos de

frecuencia de 29.5 Hz, 59.5 Hz, 89 Hz, y 118.5 Hz. Se observa que estas frecuencias tienen una separación aproximada de 30 Hz. (que es el valor teórico de frecuencia de rotación de la flecha).

Cabe señalar que cuando la falla es en la jaula las frecuencias de falla decaen sin llegar a formar bandas laterales alrededor de las frecuencias de falla. Esto impide poder realizar un diagnóstico para la falla en la jaula en una fase de deterioro en el rodamiento a través de la utilización de acelerómetros.

Cuando la falla se encuentra en la fase 4 (fase final del rodamiento), las frecuencias de falla disminuyen o desaparecen apareciendo muchas componentes a frecuencias aleatorias presentándose un aumento en el ruido de fondo [53], [54].

La *PSD*, es la principal técnica de procesamiento que se utiliza en el diagnóstico de máquinas debido a que permite detectar señales de alta y baja frecuencia, sin embargo, esta técnica tiene limitaciones como son la pérdida de fase de la señal. La fase de la señal, en el análisis de vibración es información clave ya que permite distinguir entre fallas a magnitud y frecuencia similares, lo que representa una desventaja en la detección y diagnóstico de alguna avería presente en la máquina, por lo que se procede a realizar otro tipo de estudio el cual consiste en el análisis de los *HOSA* que proporciona información relevante que no se encuentra en la *PSD*.

El biespectro presenta la ventaja que al ser una representación en tres dimensiones es posible desplegar gráficamente las frecuencias ofreciendo la posibilidad de detectar acoplamientos entre frecuencias similares o muy cercanas en valor.

5.3.3. **BIS (acelerómetros y micrófonos)**

El biespectro son dos gráficas en tres dimensiones: una en amplitud y otra en fase. En la gráfica en amplitud las unidades en los ejes x e y , son en frecuencia y en el eje z se encuentra la amplitud dimensional de los picos. En la grafica en fase las unidades en los ejes x e y , son en frecuencia y en el eje z se encuentra en radianes por segundo. Comúnmente solo se usa la gráfica que representa la amplitud del biespectro, como se muestra en la figura 5.12, para identificar acoplamientos entre pares de frecuencias como fue en el caso de este trabajo de tesis. La vista en tres dimensiones (vista frontal) del biespectro no permite realizar un análisis detallado, por ello se prefiere utilizar la vista de planta (vista superior). Esta vista permite localizar los picos y también permite cuantificar la amplitud de ellos a través de la barra de colores. En la figura 5.12 se muestran los resultados obtenidos para la señal horizontal de vibración del generador *sin* falla graficada en amplitud del biespectro. Entretanto, en la figura 5.13 se presentan los resultados de la señal horizontal de vibración del generador *con* falla graficada en amplitud del biespectro.

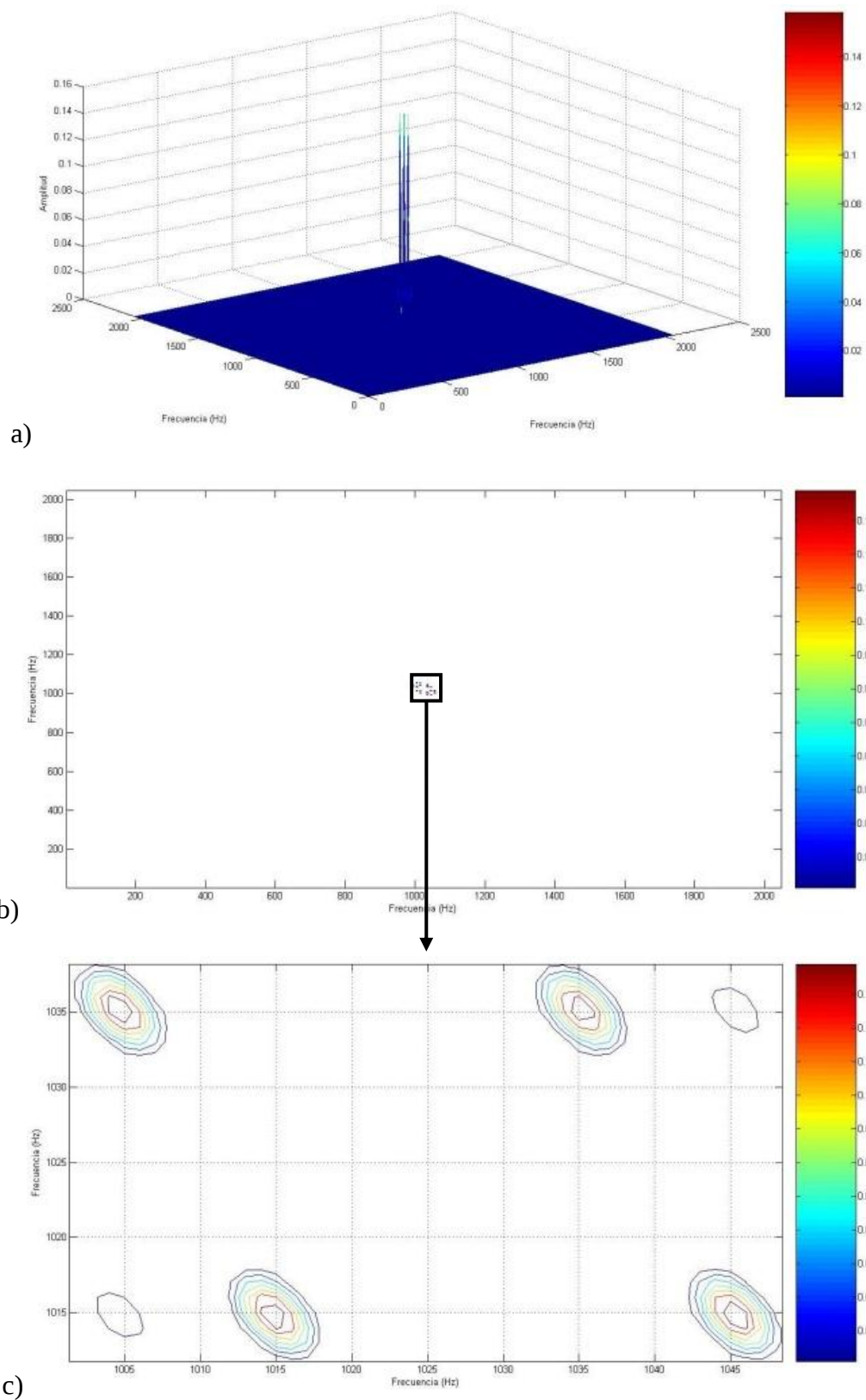


Figura 5.12. Amplitud del biespectro de la señal de vibración horizontal del acelerómetro para la condición *sin falla*; a) Vista frontal, b) Vista superior, c) Zoom.

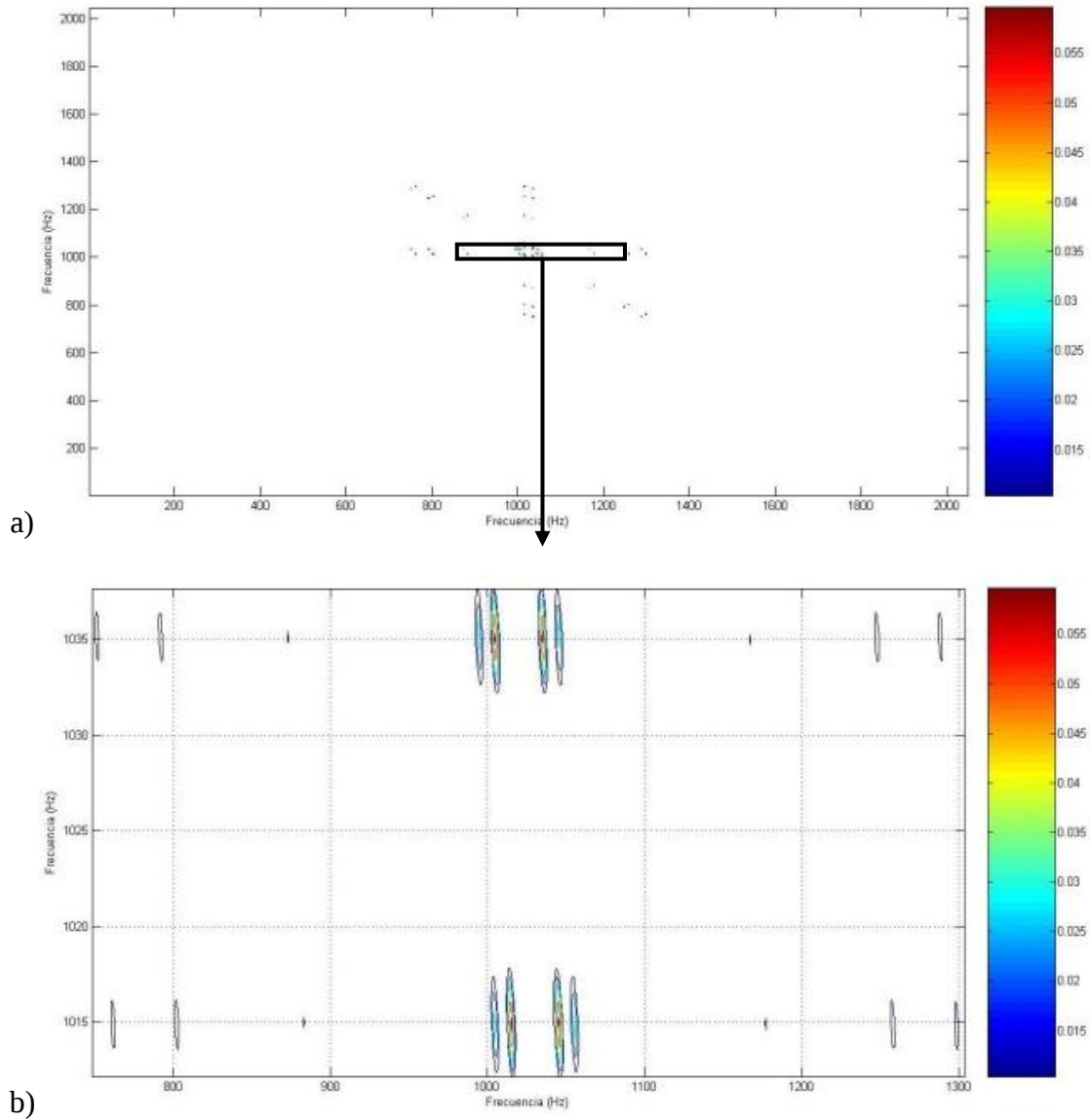


Figura 5.13. Amplitud del bispectro de la señal de vibración horizontal del acelerómetro para la condición *con falla*; a) Vista superior, b) Zoom.

En la figura 5.14 se muestran los resultados obtenidos para la señal horizontal acústica del generador *sin falla* graficada en amplitud del bispectro del micrófono omnidireccional. La figura 5.15 presenta los resultados de la señal horizontal acústica del generador *con falla* graficada en amplitud del bispectro del micrófono omnidireccional.

En la figura 5.16 se muestran los resultados obtenidos para la señal horizontal acústica del generador *sin falla* graficada en amplitud del bispectro del micrófono unidireccional. La

figura 5.17 presenta los resultados de la señal horizontal acústica del generador *con* falla graficada en amplitud del biespectro del micrófono unidireccional.

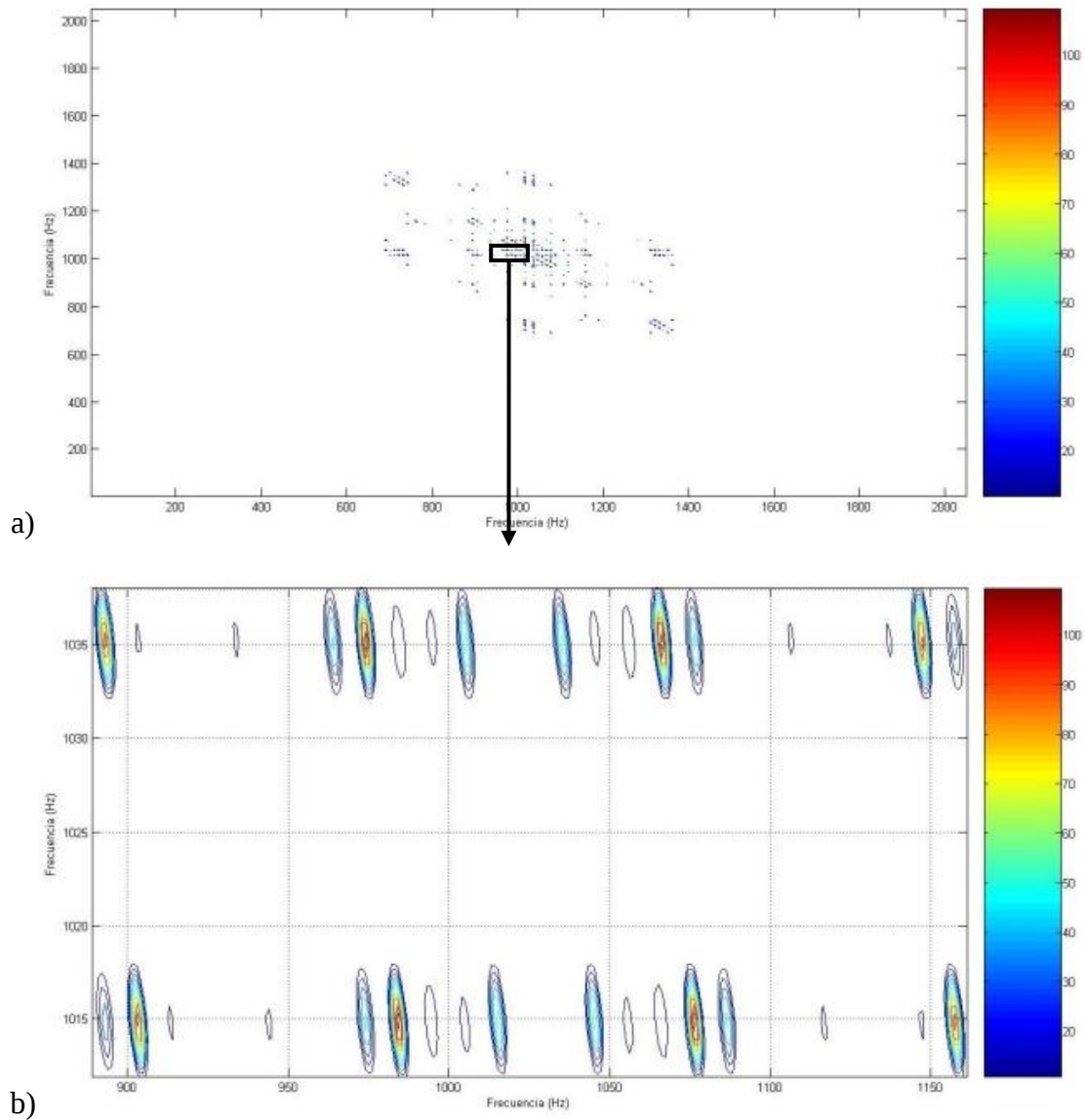


Figura 5.14. Amplitud del biespectro de la señal acústica horizontal del micrófono omnidireccional para la condición *sin* falla; a) Vista superior, b) Zoom.

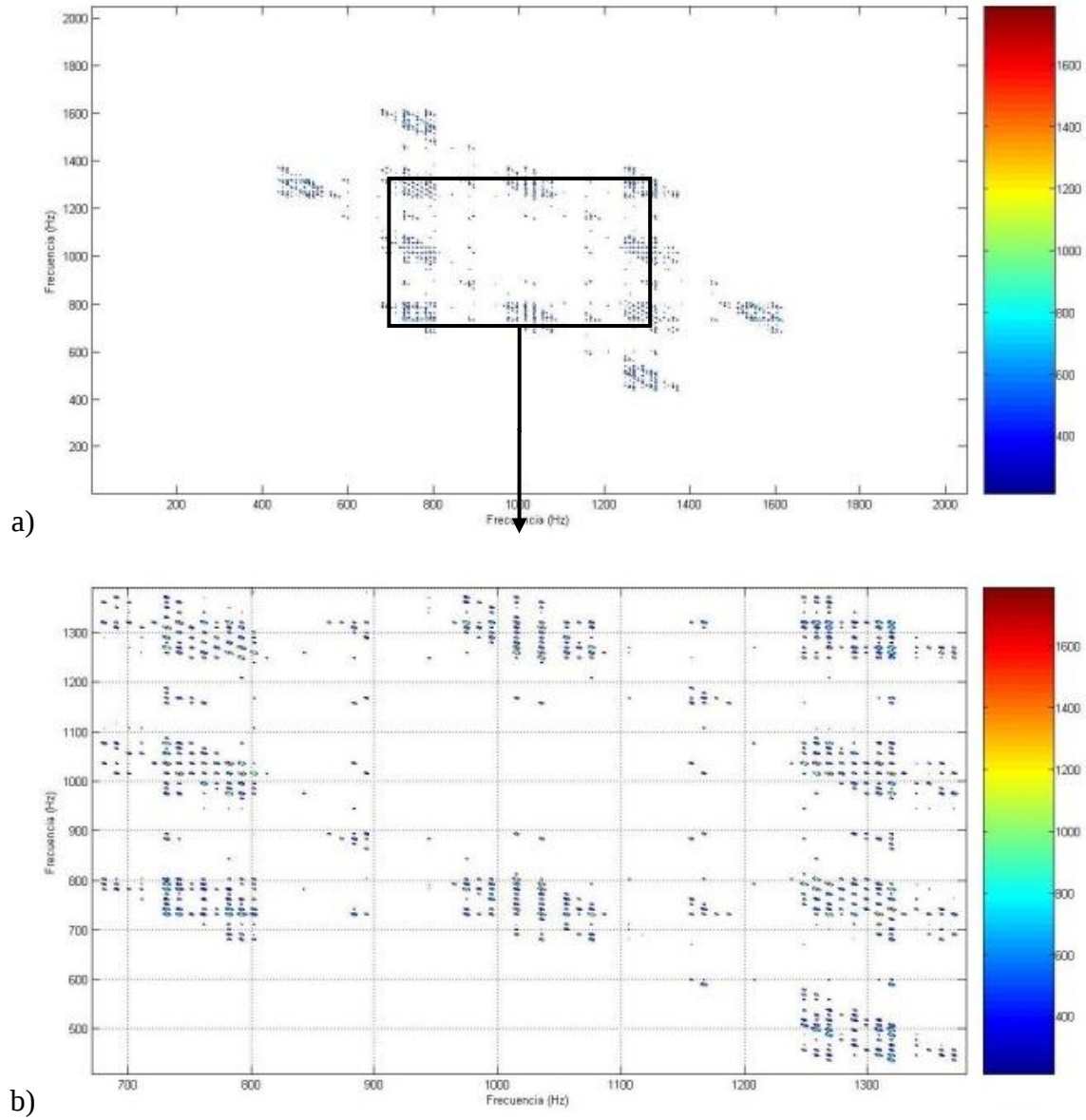


Figura 5.15. Amplitud del biespectro de la señal acústica horizontal del micrófono omnidireccional para la condición *con falla*; a) Vista superior, b) Zoom.

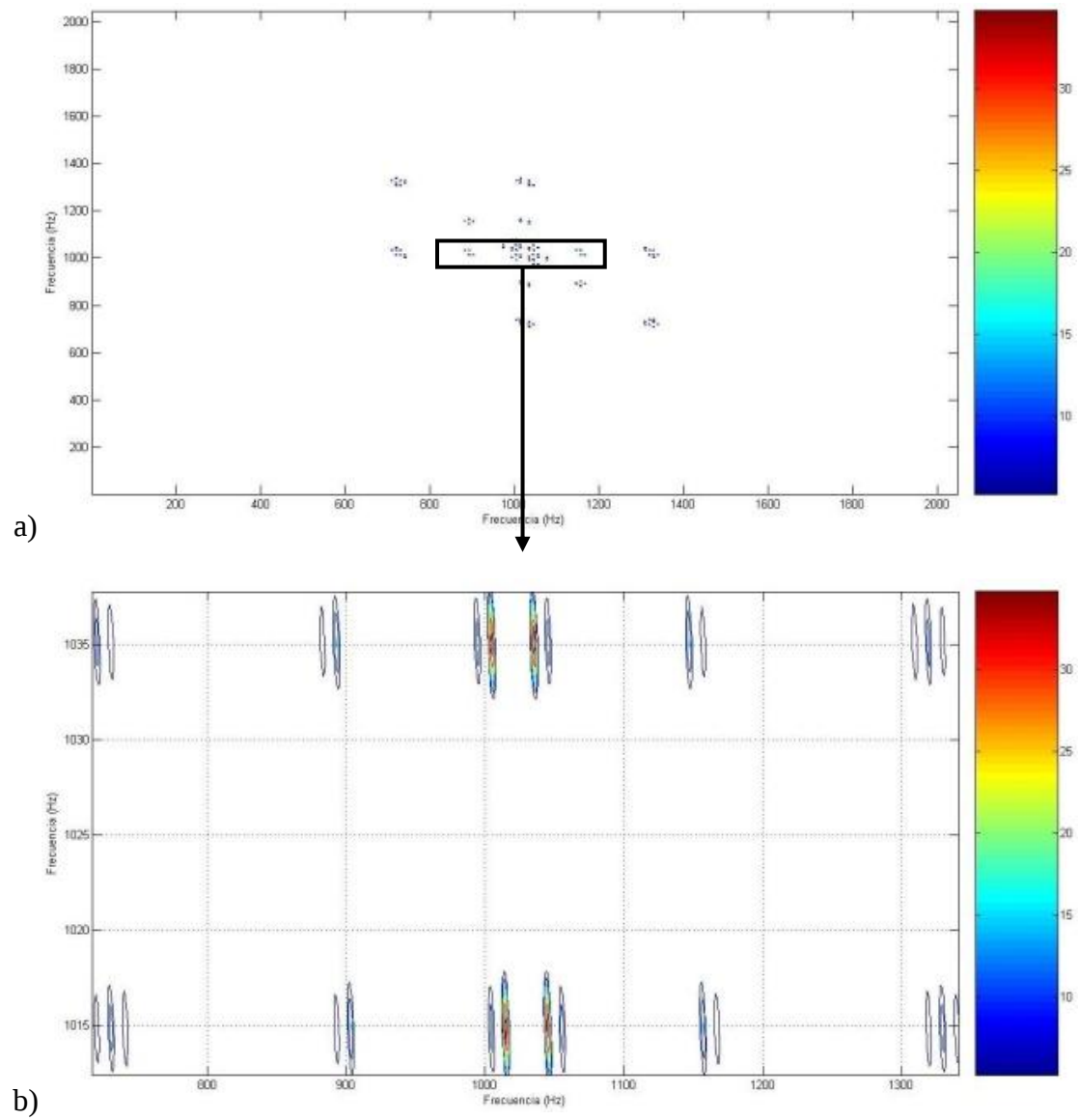


Figura 5.16. Amplitud del biespectro de la señal acústica horizontal del micrófono unidireccional para la condición *sin* falla; a) Vista superior, b) Zoom.

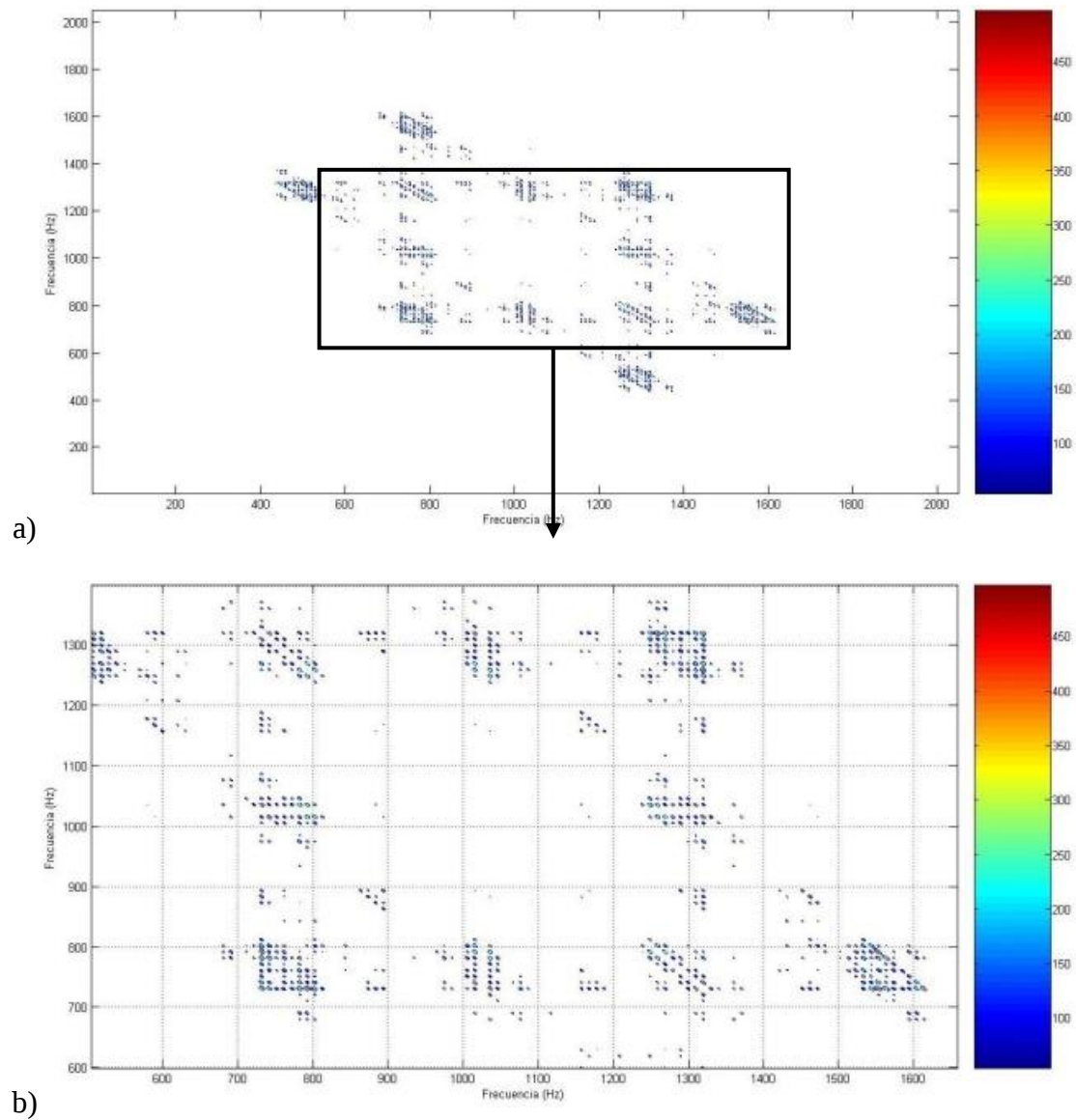


Figura 5.17. Amplitud del biespectro de la señal acústica horizontal del micrófono unidireccional para la condición *con falla*; a) Vista superior, b) Zoom.

En el *anexo C* se hallan reportadas el conjunto completo de gráficas obtenidas para todas las diferentes condiciones de prueba.

De la figura 5.12 se observa que los patrones de los biespectros para la condición *sin falla* y la condición *con falla* (figura 5.13) del rodamiento en el *eje horizontal* del acelerómetro son similares. En ambos casos aparecen las frecuencias relacionadas con el giro de la flecha del generador (aproximadamente 30 Hz). Esto indica que existe una frecuencia dominante,

característica propia del banco de pruebas, el valor de esta es de poca amplitud que representa una escasa aportación para la detección de fallas.

Como se mencionó en la sección del *PSD*, en una falla en fase 4 en la jaula del rodamiento las frecuencias de falla disminuyen o desaparecen apareciendo muchas componentes a frecuencias aleatorias presentándose un aumento en el ruido de fondo lo que impide que una falla de este tipo pueda llegar a ser detectada a través de la metodología tradicional que utiliza acelerómetros, por lo que se requiere de la utilización de otro tipo de transductor como son micrófonos (omnidireccionales, unidireccionales).

Se observa que los patrones de las magnitudes del biespectro de las señales acústicas de los micrófonos omnidireccionales y unidireccionales para la condición *sin* falla y *con* falla del rodamiento en el *eje horizontal* son totalmente diferentes. En el caso de la condición *sin* falla aparecen picos relacionados con las frecuencias de operación de la máquina, y en las condiciones *con* falla se originan frecuencias de acoplamientos relacionadas con la frecuencia de falla a analizar.

Los biespectros de la figura 5.14 (micrófono omnidireccional) y los biespectros de la figura 5.16 (micrófono unidireccional) se obtuvieron de la señal acústica *horizontal* para condiciones *sin* falla. Al analizar los picos separados por las frecuencias, para los micrófonos omnidireccionales se encontraron picos separados aproximadamente por 30 Hz que es la frecuencia de rotación de la flecha y para los micrófonos unidireccionales se encontraron picos separados por 30 Hz que es la frecuencia de rotación de la flecha.

Los biespectros de las figuras 5.15 (micrófono omnidireccional) y 5.17 (micrófono unidireccional) se obtuvieron de la señal acústica *horizontal* para condiciones *con* falla. Al analizar los picos separados por las frecuencias de vibración, para los micrófonos omnidireccionales se encontraron picos separados por 11 Hz que es la frecuencia de

vibración teórica en la jaula y para los micrófonos unidireccionales se encontraron picos separados por 11 Hz que es la frecuencia de vibración teórica en la jaula.

5.4. Análisis de las señales de los transductores (acelerómetros y micrófonos)

El conocimiento de un sistema es importante al momento de realizar un diagnóstico [55].

Durante la experimentación se comprobó la frecuencia de vibración en la jaula del rodamiento *SKF6303 – 2RSH* la cual coincide con el valor teórico que marcan las fórmulas que es de aproximadamente 11 Hz, que debe aparecer en el espectro medido.

Después de analizar los datos de las señales de vibración, se puede establecer las siguientes conclusiones:

5.4.1. Señales graficadas con respecto al tiempo

- 1.- En las señales de *vibración* vertical y horizontal para la condición *con* falla, se observa un aumento en la amplitud de la señal.
- 2.- En las señales *acústicas* verticales y horizontales para la condición *con* falla, se observa un aumento significativo en la amplitud de la señal.

5.4.2. Señales graficadas con respecto a la frecuencia (*PSD*)

- 1.- Los picos que se presentan en las *PSD's* de las señales de *vibración* vertical y horizontal para la condición *sin* falla son los relacionados a la frecuencia de giro del eje de la máquina (aproximadamente 30 Hz)
- 2.- Los picos que se presentan en las *PSD's* de las señales de *vibración* vertical y horizontal para la condición *con* falla son los relacionados a la frecuencia de giro del eje de la máquina (aproximadamente 30 Hz), la frecuencia de falla para la jaula del rodamiento (aproximadamente 11 Hz) se encuentra enmascarada por otras frecuencias de operación de la máquina lo que hace complicado el poder tomar una

resolución de diagnóstico con este tipo de gráfica. En las *PSD's* de la *vibración* horizontal como vertical para la condición *con* falla, es difícil identificar los picos originados por el defecto ya que muchos de los picos son de pequeña amplitud y también porque existen dos series de picos (la frecuencia de operación del sistema que es a 60 Hz y la frecuencia de giro de la flecha que es de 30 Hz), separados por la frecuencia de falla teórica.

- 3.- Los picos que se presentan en las *PSD's* de las señales *acústicas* vertical y horizontal para la condición *sin* falla es menor respecto a la condición *con* falla, presentándose picos de frecuencia relacionados a la frecuencia de giro del eje de la máquina (aproximadamente 30 Hz)
- 4.- Los picos que se presentan en las *PSD's* de las señales *acústicas* vertical y horizontal para la condición *con* falla es la relacionada a la frecuencia de giro del eje de la máquina (aproximadamente 30 Hz), la frecuencia de falla para la jaula del rodamiento (aproximadamente 11 Hz) se encuentra enmascarada por otras frecuencias de operación de la máquina lo que hace complicado el poder tomar una resolución de diagnóstico con este tipo de gráfica.
- 5.- La *PSD* para la condición *con* falla solo indica la presencia de esta (presenta un nivel de vibración considerable), pero no proporciona información clara del origen (no presenta una secuencia *evidente* de armónicos).

5.4.3. Señales graficadas con biespectro (*BIS*)

- 1.- Los acoplamientos que se presentan en el *BIS* de las señales de *vibración* vertical y horizontal para la condición *sin* falla son los relacionados a la frecuencia de giro del eje de la máquina (aproximadamente 30 Hz)

- 2.- Los acoplamientos que se presentan en el *BIS* de las señales de *vibración* vertical y horizontal para la condición *con* falla son los relacionados a la frecuencia de giro del eje de la máquina (aproximadamente 30 Hz), la frecuencia de falla para la jaula del rodamiento (aproximadamente 11 Hz) se encuentra atenuada o no aparecen debido a la aparición de muchas componentes de frecuencias aleatorias. En el *BIS* de la *vibración* horizontal como vertical para la condición *con* falla, es difícil identificar los acoplamientos de frecuencia originados por el defecto ya que muchos de los acoplamientos son de pequeña amplitud y se encuentran enmascaradas por otras frecuencias de operación de la máquina lo que hace complicado el poder tomar una resolución de diagnóstico con este tipo de gráfica.
- 3.- Los acoplamientos de frecuencia que se presentan en el *BIS* de las señales *acústicas* vertical y horizontal para la condición *sin* falla son menores respecto a la condición *con* falla. Presentándose picos de frecuencia relacionados a la frecuencia de giro del eje de la máquina (aproximadamente 30 Hz)
- 4.- Los acoplamientos que se presentan en el *BIS* de las señales *acústicas* vertical y horizontal para la condición *con* falla son los relacionados a la frecuencia de falla para la jaula del rodamiento (aproximadamente 11 Hz) se encuentra presente de manera clara y evidente lo que permite que este tipo de metodología sea la apropiada para la detección de este tipo de fallas en el rodamiento.
- 5.- Con los *BIS*'s obtenidos en las dos direcciones (para condición *con* falla) se observan picos espaciados por la frecuencia de falla para la jaula del rodamiento *SKF6303 – 2RSH*. Pero el *BIS* obtenido de la señal *acústica* vertical, presenta

mayor amplitud. De ahí, que se consideró a la señal *acústica* vertical como el mejor indicador del estado del rodamiento.

5.4.4. Diseño de experimentos

Se desarrolló un diseño experimental con las siguientes características:

Se consideraron tres tipos de carga: Resistiva (R), Inductiva (L), y capacitiva (C) para probar su posible influencia en la variable de respuesta, en este caso, el nivel de vibración registrado por transductores específicos para convertir las señales de los acelerómetros y de los micrófonos, respectivamente. La señal fue registrada en milivolts (mV). Se seleccionaron dos niveles para cada tipo de carga, para la carga resistiva fueron de 0 y $100\ \Omega$ y las cargas inductiva y capacitiva se probaron para un valor estandarizado equivalente de 0 y $100\ \Omega$, lo que equivalen a 0 y $0.2667\ H$ y $26.4\ \mu F$.

Se seleccionó un arreglo ortogonal L_8 considerando los tres factores indicados anteriormente y además se decidió probar la posible influencia de dos interacciones, Resistencia-Inductancia (RL) y Resistencia-Capacitancia (RC). Se realizaron veinticuatro pruebas con tres réplicas por condición experimental. Se aplicó este diseño en los doce casos seleccionados que se indican en la tabla 5.2:

Tabla 5.2. Casos de estudio para el diseño experimental.

Experimento No.	Condición de prueba
	<i>Sin falla</i>
1	Acelerómetro, eje x
2	Acelerómetro, eje y
3	Micrófono unidireccional, eje x
4	Micrófono unidireccional, eje y
5	Micrófono omnidireccional, eje x
6	Micrófono omnidireccional, eje y
	<i>Con falla</i>
7	Acelerómetro, eje x
8	Acelerómetro, eje y
9	Micrófono unidireccional, eje x
10	Micrófono unidireccional, eje y
11	Micrófono omnidireccional, eje x
12	Micrófono omnidireccional, eje y

Se calcula la tabla de valores promedio por nivel para cada factor (tabla 5.3).

Tabla 5.3. Arreglo ortogonal L_8 .

Prueba	Factores							Variable de respuesta (Y_{ij})		
								Condición de prueba		
	L	R	RL	C	e	RC	e	Eje z , $z = x, y$		
1	1	1	1	1	1	1	1	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}
2	1	1	1	2	2	2	2	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}
3	1	2	2	1	1	2	2	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}
4	1	2	2	2	2	1	1	Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}
5	2	1	2	1	2	1	2	Y_{51}	Y_{52}	Y_{53}
6	2	1	2	2	1	2	1	Y_{61}	Y_{62}	Y_{63}
7	2	2	1	1	2	2	1	Y_{71}	Y_{72}	Y_{73}
8	2	2	1	2	1	1	2	Y_{81}	Y_{82}	Y_{83}

Por tanto, se obtuvieron 12 tablas de resultados como las mostradas en la Tabla 5.3 para cada una de las condiciones de prueba. El análisis estadístico se realizó de acuerdo con la metodología reportada para tal fin [50], [56]. En el *anexo D* se presentan detalladamente la metodología de cálculo y análisis de varianza.

De esta manera, se obtuvieron los resultados de significancia estadística para las doce condiciones analizadas. En la Tabla 5.4 se presentan los resultados del análisis de varianza *ANDEVA* (*ANOVA* por sus siglas en inglés) para el experimento No. 1. que indican que ningún factor es estadísticamente significativo.

En el *anexo D* se hallan reportados el conjunto completo de resultados obtenidos para todos los diferentes experimentos.

Tabla 5.4. *ANOVA* para el experimento No. 1.

Factor	<i>SS</i>	<i>g. l.</i>	<i>MS</i>	<i>F_{exp}</i>	
<i>L</i>	0.05	1	0.16	0.11	
<i>R</i>	0.15	1	0.21	0.14	
<i>RL</i>	0.76	1	2.03	1.39	
<i>C</i>	0.08	1	0.10	0.07	
<i>RC</i>	0.01	1	0.04	0.03	Se probarán contra
<i>e₁</i>	0.69	2	1.46	1.00	$F_{0.05,1,18} = 4.41$
<i>e₂</i>	5.56	16	0.88	0.60	
Total	7.31	23			
<i>e</i>	6.25	18	0.35		

De manera similar al caso anterior se realizaron los análisis estadísticos de los restantes 11 experimentos y los resultados fueron los siguientes:

Tabla 5.5. Resultados del diseño experimental

Experimento No.	Sin falla
1	No hay factores significativos, lo que indica que no importando el tipo de carga, la variable de respuesta no es sensitiva al registro obtenido por el instrumento de medición, en este caso, el acelerómetro triaxial. El nivel de confianza de la prueba estadística fue de 95%. El desplazamiento medido fue en la dirección horizontal (eje x).
2	La variable de respuesta fue medida con un acelerómetro triaxial. Es significativa la interacción resistencia-inductancia para un nivel de confianza del 95%. Sin embargo, no lo es para $\alpha = 0.025$ lo que indica que para establecer si realmente es significativa esta interacción, deberán realizarse más pruebas (réplicas) para la combinación de estas variables. No obstante, dado el comportamiento mostrado en las demás corridas de prueba y dado que $F_{exp} = 4.79$ para $\alpha = 0.05$ está prácticamente en el límite de significancia de la prueba (4.41), es muy probable que la interacción no sea relevante. Desplazamiento en la dirección vertical (eje y)
3	Se utilizó un transductor acústico, micrófono unidireccional para detectar la señal de vibración en la dirección x . A un nivel de confianza de 95% se detectó que parece ser significativa una carga capacitiva, es decir, se produce una mayor vibración en esta dirección cuando se halla conectada una carga capacitiva. Sin embargo, a un nivel de confianza del 99% la prueba no es significativa. Deberá entonces realizarse un mayor número de réplicas para establecer con certeza el grado de significancia de esta carga, ya que de otra manera puede deberse a la sensibilidad del instrumento de medición.
4	Se empleó un micrófono unidireccional en el eje vertical y . No se detectó que hubiese factores significativos al 95% de confianza de la prueba y aún al 90%, lo que indica que en este caso no importa el tipo de carga conectada o su combinación, la señal captada es esencialmente la misma.
5	Se empleó un micrófono omnidireccional en el eje horizontal x . No se detectó que hubiese factores significativos al 95% de confianza de la prueba y aún al 90%, lo que indica que en este caso no importa el tipo de carga conectada o su combinación, la señal captada es esencialmente la misma.

6	Se empleó un micrófono omnidireccional en el eje vertical y . No se detectó que hubiese factores significativos al 95% de confianza de la prueba y aún al 90%, lo que indica que en este caso no importa el tipo de carga conectada o su combinación, la señal captada es esencialmente la misma.
	<i>Con falla</i>
7	Se empleó un acelerómetro triaxial en el eje vertical x . No se detectó que hubiese factores significativos al 95% de confianza de la prueba ni al 90%, lo que indica que en este caso no importa el tipo de carga conectada o su combinación, la señal captada es esencialmente la misma. En este caso el error tipo 1 (debido al cambio en la condición experimental) resultó mayor que el error aleatorio puro lo que indica que la sensibilidad del instrumento de medición no es la adecuada bajo esta condición.
8	Se empleó un acelerómetro triaxial en el eje vertical y . No se detectó que hubiese factores significativos al 95% de confianza de la prueba ni al 90%, lo que indica que en este caso no importa el tipo de carga conectada o su combinación, la señal captada es esencialmente la misma. En este caso el error tipo 1 (debido al cambio en la condición experimental) resultó mayor que el error aleatorio puro lo que indica que la sensibilidad del instrumento de medición no es la adecuada bajo esta condición. Puede decirse que este tipo de transductor ya no es adecuado para la detección de la falla en las condiciones de prueba.
9	Se empleó un micrófono unidireccional en el eje x . A un nivel de confianza de la prueba del 95% los tres tipos de cargas conectadas resultaron significativas estadísticamente. En este caso la varianza del error aleatorio fue mayor que la del error primario (tipo 1). Esto indica que el micrófono es capaz de detectar la variación por efecto de la condición de falla. Adicionalmente, el desplazamiento no deseado en la dirección horizontal no se espera que sea fácil de detectar, sin embargo, la sensibilidad del transductor indica que en este caso sí puede hacerlo, lo cual no ocurre en el caso de usar acelerómetros.
10	Se empleó un micrófono unidireccional en el eje y . A un nivel de confianza de la prueba del 95% los tres tipos de cargas conectadas resultaron significativas estadísticamente. En este caso la varianza del error aleatorio fue mayor que la del error primario (tipo 1). Esto indica que el micrófono es capaz de detectar efectivamente la variación producida por la condición de falla.

11	Se empleó un micrófono omnidireccional en el eje x. A un nivel de confianza de la prueba del 95% los tres tipos de cargas conectadas no son estadísticamente significativas. En este caso la varianza del error aleatorio fue mayor que la del error primario (tipo 1), lo cual es siempre deseable. Esto indica que el micrófono es capaz de detectar efectivamente la variación producida por la condición de falla.
12	Se empleó un micrófono omnidireccional en el eje y. A un nivel de confianza de la prueba del 95% resulta estadísticamente significativa la interacción resistencia-inductancia, sin embargo, no lo es al 97.5% ni al 99% de confianza de la prueba. En todo caso, deberán realizarse más réplicas para establecer definitivamente el grado de significancia. Dadas las características del análisis de varianza y las condiciones físicas de la prueba, los resultados observados pueden deberse a que este tipo de transductores se hallan en el límite crítico de sensibilidad para estas condiciones dado que la señal en la dirección y es mucho más intensa que en cualesquiera de las otras dimensiones espaciales. Por tanto, antes de considerar adecuados estos micrófonos para detección de falla deberán efectuarse más pruebas confirmatorias.

Capítulo 6

Conclusiones, novedad científica, aportaciones y recomendaciones para trabajos futuros

Para la fase de experimentación se utilizó un sistema convencional de adquisición el cual consistió de acelerómetros triaxiales, micrófonos omnidireccionales y micrófonos unidireccionales para las direcciones horizontal (eje x) y vertical (eje y). Las pruebas para determinar cuáles de estos transductores eran más adecuados o si son equivalentes se realizaron mediante un diseño experimental utilizando un arreglo L_8 con tres réplicas por condición experimental. El análisis de los resultados se indica con detalle en la Tabla 5.5 y puede deducirse a partir de ella que:

1. Los *acelerómetros* no detectan diferencias estadísticas significativas para las condiciones *sin* falla y *con* falla para todas las combinaciones de cargas conectadas por lo que se concluye que este tipo de transductores no son una opción para el objetivo del trabajo que es buscar un método de medición confiable de detección de falla por análisis de señales de vibración.
2. Por su parte, los *micrófonos omnidireccionales*, aparentan tener una cierta significancia para condición de falla en el eje y con $\alpha = 0.05$, sin embargo para un mayor nivel de confianza estadística ya no lo es. Esto indica que la sensibilidad de este tipo de transductores no es suficientemente adecuada para indicar, de manera concluyente que puede ser utilizado de manera confiable como detector de falla.
3. Por otra parte, los *micrófonos unidireccionales* demuestran, para las condiciones de prueba y en todos los casos, que son capaces de detectar de manera concluyente y sin

ambigüedad una falla en la jaula del rodamiento de un generador síncrono tanto en la dirección x como en la dirección y a partir de las señales acústicas emitidas por ésta.

4. Por tanto, se concluye que el uso de micrófonos unidireccionales es una opción viable para detectar falla de rodamiento y que la captura de las señales puede realizarse de manera relativamente sencilla sin ser invasiva y con un sistema convencional de captura. El análisis de señales entonces puede realizarse a través del biespectro y para convertir estas señales en una variable cuantitativa que pueda ser comparada y analizada contra aquellas obtenidas bajo condiciones normales de operación. De esta forma puede darse seguimiento a la evolución del espectro de señales de una máquina con lo cual puede fácilmente detectarse cualquier señal anómala o cambio que pudiera indicar, con antelación una posible falla.

A pesar de que los acelerómetros piezoeléctricos y los micrófonos se montaron en diferentes puntos de la carcasa del generador, como se observa en la figura 4.5, las gráficas del *PSD* y biespectro, para ambos tipos de transductores, coinciden en los patrones de frecuencia (*con falla y sin falla*).

La estimación de la *PSD* presentó una ventaja respecto al biespectro: utiliza menos recursos computacionales. La cantidad de datos y la frecuencia de muestreo fueron la misma para estimar la *PSD* y el biespectro. La estimación de la *PSD* se obtuvo aproximadamente en 3 segundos, mientras que el biespectro en la vista frontal tarda aproximadamente 15 minutos (para 6000 datos sin particiones) y en la vista superior 3 minutos.

Tanto el *PSD* como el biespectro de los datos del acelerómetro en las direcciones x e y , no permitieron detectar ni localizar el elemento donde se encontraba la falla. Sin embargo el *PSD* y el biespectro en los datos de ambos micrófonos en las direcciones x e y permitieron

detectar y localizar el elemento donde se encontraba la falla. El incremento en amplitud del nivel acústico es un parámetro que permitió detectar el daño en el rodamiento, mientras que la serie de picos separados por la frecuencia de falla permitió determinar la ubicación del daño en la jaula. La *PSD* por otro lado, fue difícil de interpretar, ya que se presentó un decaimiento (en la señal de vibración horizontal y vertical) entre las series de picos asociados por la frecuencia de falla.

Se comprobó que los micrófonos unidireccionales, pueden ser aplicados en el monitoreo de máquinas. Representan un sistema flexible al poder ser utilizados en varias máquinas, así como son un sistema no invasivo al no interferir con el funcionamiento normal de la maquinaria (motores, generadores).

Se comprobó a través del desarrollo del diseño experimental que los transductores acústicos muestran la misma respuesta de la señal analizada que el registrado por los acelerómetros que representan la metodología usualmente empleada en la actualidad para el diagnóstico de vibraciones, el análisis en el eje y constituye el mejor eje para analizar las fallas ya que capta de mejor manera las aportaciones que se presentan con respecto al movimiento relativo del eje de la máquina, como el hecho de que de los transductores acústicos utilizados (micrófonos unidireccionales y omnidireccionales), los micrófonos unidireccionales estadísticamente son más sensibles a la presencia de la falla en el rodamiento independientemente del tipo de carga que se esté analizando, lo que permite concluir que la metodología propuesta es una buena opción en el diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas rotativas, en particular en la falla de la jaula de rodamientos.

Novedad científica

Una metodología que utiliza técnica de procesamiento de señal *HOSA* para analizar las señales acústicas de los generadores síncronos, lo que permite identificar fallas tempranas

en sus rodamientos y establecer diagnósticos acertados y confiables con menor invasividad que los obtenidos por los métodos empleados hasta el momento.

Aportaciones derivadas del trabajo

1. Procedimiento para determinar el estado técnico de los rodamientos de generadores síncronos mediante el análisis de las señales acústicas.
2. Se presentó un estudio experimental, el cual permite evaluar el desempeño del biespectro (caso especial de los *HOSA*) en el diagnóstico de fallas en rodamientos.

Se diseñó y construyó un banco de pruebas, que puede ser utilizado para análisis posteriores de otros tipos de fallas en rodamientos. El arreglo tiene la capacidad de grabar los sonidos y las vibraciones de un generador síncrono. Las señales de vibración pueden ser captadas por acelerómetros que miden la vibración en el eje horizontal y vertical. La obtención de las señales acústicas se realiza a través de 4 micrófonos electreto (dos micrófonos unidireccionales y dos micrófonos omnidireccionales) que miden el sonido en el eje horizontal y vertical, las señales se acoplan y se digitaliza la información a través de la tarjeta para adquisición de datos *NI USB – 6009*. El arreglo de micrófonos que se diseñó es adecuado para la detección de los otros tipos de fallas que se presentan en los rodamientos, basándose en el principio de que si una máquina falla la máquina vibra y, si la máquina vibra, la máquina presenta emisión acústica. Así como la posibilidad de poder trasladar este tipo de arreglo a otras máquinas por la flexibilidad que presenta.

Se elaboró un programa de adquisición (interfaz gráfica) basado en MatLab, se realizó también un manual de usuario de dicho programa. La interfaz gráfica Se desarrolló para poder realizar la correlación visual entre los eventos de vibración y acústicos del sistema motor-generador, para realizar el despliegue gráfico de las señales de los

acelerómetros y los micrófonos en la pantalla de la computadora personal y para reproducir las señales cuando sean requeridas por el especialista. Se utiliza LabView en el proceso de captura de la señal en la tarjeta para adquisición de datos y MatLab en el procesamiento de la señal por ser una herramienta técnica para el cálculo, análisis y simulaciones matemáticas.

3. Se desarrolló una metodología para detección de fallas en rodamientos a partir de señales acústicas la cual se sustentó en un diseño experimental validado estadísticamente. Esta metodología propone la utilización de micrófonos unidireccionales los cuales demostraron concluyentemente que son una opción válida para el objetivo del proyecto.
4. Se comparó el funcionamiento de los acelerómetros piezoeléctricos (*EVAL – ADXL325*), respecto a los micrófonos unidireccionales (*WM – 55A103*) y los omnidireccionales (*WM – 61A*). Lo que arrojó como resultado que los micrófonos presentan la mejor opción de detección de falla en la jaula del rodamiento, se concluyó que los micrófonos unidireccionales permiten un filtrado espacial por lo que pueden ser utilizados con mayor precisión en el diagnóstico.

Recomendaciones para trabajos futuros

1. Realizar un análisis comparativo con otros algoritmos de procesamiento, tal como: la envolvente, Wavelet, Factor de cresta, etc.
2. Utilizar micrófonos unidireccionales con mayor sensibilidad, con el objetivo se evaluar el filtrado espacial y una posible reducción de aportaciones acústicas por otros elementos o máquinas que se encuentren en las vecindades.
3. Analizar otro tipo de fallas u otro tipo de rodamientos.

4. Realizar una interfaz gráfica para el diagnóstico de fallas en rodamientos, de tal manera que sea amigable y pueda ser utilizado por personas sin mucha experiencia.

Bibliografía

- [1] Energía: tipos de recursos energéticos. Viernes 05 de Junio de 2009. <http://energiasysustipos.blogspot.mx/2009/06/energia-primarias-se-consideran-como.html>
- [2] Planeta neutro, <http://www.renovables-energia.com/2009/03/la-energia-eolica-en-el-mundo/>
- [3] Protección diferencias de generadores síncronos: Nuevo algoritmo basado en redes neuronales artificiales. 30 Marzo 2012. Fernando Villada, Esteban Velilla, Nicolás Muñoz. Editorial académica española.
- [4] DLI Engineering Corporation. “Historia del análisis de vibración y su uso en el mantenimiento de maquinaria”. <http://azimadli.com/vibman-spanish/historiadelanlisisdevibracinysuusoenelmantenimientodemaquinaria.htm>. Fecha de consulta 10 de Agosto 2013.
- [5] Análisis de vibraciones. http://www.gmingenieria.com/productos/mantenimiento/analisis_vibraciones.html. Fecha de consulta 15 de Octubre 2013.
- [6] Crysostomos Nikias, Jerry Mendel. “Introduction Special Section on Higher Order Spectral Analysis”. IEEE Trans. On Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. 38. 1990.
- [7] Peter W. Tse, Y. H. Peng, and Richard Yam. “Wavelet Analysis and Envelope Detection for Rolling Element Bearing Fault Diagnosis - Their Effectiveness and Flexibilities”. Journal of Vibration and Acoustics. Julio 2001 pp. 303-310.
- [8] Oscar Jiménez Yenny. “Casos Reales de Análisis de Vibración”. 1er. Congreso Mexicano de Confiabilidad y Mantenimiento, León Guanajuato México, Octubre 2003.
- [9] Soluciones IDEAR. “Análisis de Fallas en Rodamientos”. Alejandro Suarez. Diciembre 1998. <http://www.idearnet.com.ar/>
- [10] Levent Eren and Michael J. Devaney. “Motor Bearing Damage Detection via Wavelet Analysis of the Starting Current Transient”. IEEE Instrumentation Measurement Technology Conference. Budapest Hungary. Mayo 2001. Pp. 1797-1800.
- [11] Alessandro Rivola. “Applications Of Higher Order Spectra To The Machine Condition Monitoring”. Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni Meccaniche, Nucleari, Aeronautiche e di Metallurgia. Pubbl. DIEM. No. 07. Bologna, Italia, Luglio 2000.

- [12] Navarro, Julio y Avilés Jaime. “Procesamiento Digital de Señales de Vibración con Fines de Diagnóstico”. [Tesis de Maestría]. Cuernavaca, México, cenidet. Noviembre 2003.
- [13] Marcin Jasinski, Stanislaw Radkowski. “Biespectrum as a Symptom of Damages in a Rolling Bearing Diagnostics”. Scientific Research Comite.KBN No 9T12C04615.
- [14] A. C. McCormick and A. K. Nandi. “Bispectral and Trispectral Feature for Machine Condition Diagnosis”. IEEE Proceeding Visual Image Process. Vol. 146. October 1999. Pp. 229-234.
- [15] Jason R. Stack et. al. “An Amplitude Modulation Detector for Fault Diagnosis in Rolling Element Bearing”. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 51. October 2004. Pp. 1097-1102.
- [16] Sin, M., Soong, W., Ertugrul, N. “Induction Machine On-line Condition Monitoring and Fault Diagnosis-A Survey”. University of Adelaide. 2003. Pp. 1-6.
- [17] Puche, R. “Nuevos Métodos de Diagnosis de Excentricidad y otras Asimetrías Rotóricas en Máquinas Eléctricas de Inducción a través del Análisis de la Corriente Estatórica”. [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Valencia. 2008.
- [18] Zulma Medrano, Carlos Pérez, Marcos Alberto de Armas, César Amaro. “Un Estudio sobre la Localización, Detección y Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas”. http://www.umng.edu.co/documents/10162/4585612/articulo_3.pdf. (2013).
- [19] Jerry M. Mendel. “Tutorial on Higher-Order Statistics (Spectra) in Signal Processing and System Theory: Theoretical Results and Some Applications”. IEEE Vol. 79. No. 3. Marzo 1991. Pp. 278-298.
- [20] Gómez, Vicente y Paredes, R. “Diagnóstico de Condiciones de Operación de Rodamientos en Máquinas Usando Espectros de Orden Superior”. [Tesis de Maestría]. Cuernavaca, México. cenidet. Marzo 2005.
- [21] Rodamientos avanzado. <http://www.zonagravedad.com/modules.php?name=News&file=article&sid=472>
- [22] SKF. “Frequency calculator-Bearing frequencies calculation”. <http://www.skf.com/group/knowledge-centre/engineering-tools/skffrequencycalculator.html>
- [23] Evelio Palomino Marín. “Elementos de medición y análisis de vibraciones mecánica en máquinas rotatorias”, <http://es.scribd.com/doc/46228543/Elementos-de-medicion-y-analisis-de-vibraciones-mecanica-en-maquinas-rotatorias>. Fecha de consulta 10 julio del 2013.

- [24] Averías de los rodamientos. Reconocimiento de daños e inspección de rodamientos. No. publ. WL 82 102/2 SB. http://www.rodaunion.com/descargas/catalogos/pdf/rodamientos_y_accesorios/fag/Averias_de_Rodamientos_WL82102-2_SB_0502.pdf
- [25] NTN. Precision Rolling Bearings. CAT- No- 2260-IV/E. <http://www.ntnamericas.com/es/website/documents/brochures-and-literature/catalogs/precision-all2260.pdf>
- [26] NTN SNR. Análisis Vibratorio. http://www.ntn-snr.com/services/es/es-es/index.cfm?page=/services/home/services_industrie/maintenance_industrie/analyse_vibratoire
- [27] SKF. Fallos en los rodamientos y sus causas. <http://www.skf.com/mx/products/bearings-units-housings/roller-bearings/principles/troubleshooting/bearing-failures-and-their-causes/index.html>
- [28] SKF, “Principles of bearing selection and application-Bearing terminology”. http://www.skf.com/portal/skf/home/products?paf_dm=shared&paf_gm=content&paf_gear_id=4400006&maincatalogue=1&lang=en&newlink=1_0_1a. Fecha de consulta 10 Agosto de 2013.
- [29] Victor Wowk. “Machinery Vibration-Measurement and Analysis”. (Edit. McGraw Hill, USA, 1991).
- [30] Alexej V. Batkov and Natalia A. Barkova. “The Artificial Intelligence Systems For Machine Condition Monitoring And Diagnostics By Vibration”. (EN: Proceedings of the Saint Petersburg Post Graduate Institute of the Russian Federation Power Industry and Vibration Institute, Volume 9, 1999). <http://www.vibrotek.com/articles/intelec-eng/index.htm>
- [31] William T. Thomson. “Teoría de Análisis de Vibraciones”. Edit Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A., D. F., México, 1982.
- [32] Clarence W. De Silva. “Vibration-Fundamentals and Practice”. United States of America, Edit. CRC. Press LLC, 2000.
- [33] Hoja de datos de Small, LowPower, 3-Axis $\pm 5 g$ Accelerometer. ADXL325. Analog Devices. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL325.pdf
- [34] Amaro, C. “Visualización de fuentes de sonido mediante holografía acústica”. [Tesis Doctoral]. Universidad Autónoma de Baja California. 2009.
- [35] Bendat Julius, Piersol Allan. “Random Data Analysis and Measurement Procedures”. Third Edition. John Wiley & Sons. USA, 2000.

- [36]Grewal Mohinder, Andrews Angus. “Kalman Filtering: Theory and Practice”. Prentice Hall. USA. 1993.
- [37]Salavedra, Josep Ma. “Técnicas De Speech Enhancement Considerando Estadísticas De Orden Superior”. [Tesis Doctoral]. Universitat Politècnica De Catalunya. 1995.
- [38]E. Dilaveroglu and M. A. Wickert. “Biperiodogram frequency estimates; asymptotic and finite sample size”. University of Colorado. Colorado Springs. Colorado.
- [39]Probabilit’et Statistique II – Chapter 6. Limit distributions.pdf. <http://statwww.epfl.ch>
- [40]Conceptos de probabilidad Tema 1.pdf (internet).
- [41]Peyton Peebels. “Probabibility, random variables, and random signal principles”. McGraw-Hill. Japan. 1980.
- [42]Ross Sheldon. “Introduction to Probabibility and Statistics for engineers and scientists”. John Wiley & Sons. USA. 1987.
- [43]Swami A.; Mendel J.; Nikias C. “Higher-Order Spectral Analysis Toolbox : For Use with MatLab”. User's Guide Version 2. MathWorks. 1998.
- [44]NikiasChrysostomos L., Raghuv eer Mysore. “Bispectrum Estimation: A Digital Signal Processing Framework”. Proceedings of the IEEE.Vol. 75. No.7. 1987.
- [45]Oliver Marco. “Parametric Higher-Order Spectral Representation Based on Non-Linear Models”. PhD Thesis. University of Sheffield. 1994.
- [46]Brillinger David R., Rosenblatt Murray. “Computation and Interpretation of k-The Order Spectra”. From B. Harris: Spectral Analysis of Time Series. 1967.
- [47]SubbaRao T., Gabr M. “An introduction to Bispectral Analysis and Bilinear time Series Models”. Springer – Verlag. Berlin. 1984.
- [48]Toledo E., Pinhas I., Aravot D., Akselrod S. “Bispectrum and Bicoherence for the Investigation of Very High Frecuency Peaks in Heart Rate Variability”. Proceedings of the IEEE. Computers in Cardiology. No. 28. 2001.
- [49]Jhon G. Proakis, Dimitris G. Manolakis. “Tratamiento Digital de Señales”. (1998).
- [50]Ross P. J. “Taguchi Technique for Quality Engineering”. McGraw Hill. (1995)
- [51]SKF. “Manual SKF de mantenimiento de rodamientos”. <http://decmecanico.files.wordpress.com/2010/07/manual-de-rodamientos-skf.pdf>.
- [52]Alexander, Y. at el. “Recognition of Bearing Failures using Wavelets and Neural Networks”.

- [53] “Curso de análisis de vibraciones. Fases de deterioro en rodamientos”.
http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/rodamientos/deterioro_rodamientos.html
- [54] Cano, A. “Diseño de Aplicación Informática para docencia en Diagnóstico de Defectos en Rodamientos”. [Tesis Licenciatura]. Universidad Carlos III de Madrid. 2011.
- [55] Diagnóstico de Vibraciones en bajas frecuencias. Bajas frecuencias.
<http://www.logismarket.com.ar/ip/semapi-argentina-mantenimiento-predictivo-computarizado-notas-tecnicas-417923.pdf>
- [56] Humberto G. Pulido, Román de la Vara Salazar. Análisis y diseño de experimentos, Ed. McGraw-Hill Interamericana, 2ª. Ed., 2008.
- [57] Hoja de datos de Omnidirectional Back Electret Condenser Microphone Cartridge. Panasonic
http://www.panasonic.com/industrial/components/pdf/em06_wm61_a_b_dne.pdf
- [58] Hoja de datos de Unidirectional Back Electret Condenser Microphone Cartridge. Panasonic.
[http://www.panasonic.com/industrial/components/pdf/em10_wm55\(6\)a103_dne.pdf](http://www.panasonic.com/industrial/components/pdf/em10_wm55(6)a103_dne.pdf)
- [59] Hoja de datos de NI USB – 6009. DAQ Multifunción de Bajo Costo de 14 Bits, 48 kS/s. 8 Entradas Analógicas. National Instrument.
- [60] Categorías Generales. <http://whitmores.cl/Vibraciones/RodFallas1.htm>
- [61] Motion& Control NSK. http://www.nskeurope.es/cps/rde/xchg/eu_es/hs.xsl/fallo-de-la-jaula.html
- [62] Detectando fallas en rodamientos utilizando métodos de prueba eléctricos y mecánicos de vibración.
http://confiabilidad.net/assets/uploads/art/PDF/detectando_fallas_en_rodamientos_atp.pdf
- [63] Álvarez, Alex J. “Técnicas de diagnóstico de daños en rodamientos”. [Tesis Licenciatura]. Universidad de Magallanes Chile. 2005.
- [64] Analista de Vibración – Nivel I. Midiendo Vibración.
<http://www.tav.net/transductores/medida-vibraciones-sensores.pdf>
- [65] SKF, Catalogo general de vibraciones. Edición en español 1989.

Apéndice A

A.1 Tipos de rodamientos

Los rodamientos se clasifican principalmente según la dirección en que actúe la carga, esto es, radiales y axiales. Sin embargo, esto no limita a un rodamiento radial a ser utilizado para cargas axiales; todo dependerá de la magnitud de la carga y la aplicación. Existen algunos tipos de rodamientos que son capaces de soportar cargas axiales y radiales, se les denomina rodamientos para cargas combinadas [25], [51].

En general, los rodamientos de bolas se recomiendan para cargas de pequeñas a moderadas, mientras que los rodamientos de rodillos se recomiendan para grandes cargas [25], [51]. A continuación se describen brevemente los tipos de rodamientos comúnmente utilizados en máquinas rotatorias [62].

A.1.1. Rodamientos radiales

Los rodamientos rígidos de una hilera y de doble hilera de bolas mostrados en la figura A.1, son los más utilizados por soportar cargas radiales considerablemente grandes. Además, son adecuados para altas velocidades, requieren poca atención en servicio y son de bajo costo. Estos tipos de rodamientos comúnmente se fabrican con placas de protección o placas de obturación de bajo rozamiento los cuales impiden la entrada impurezas en los caminos de rodadura. No requieren ser lubricados y no deben ser calentados antes del montaje, ni se deben lavar por ningún motivo.

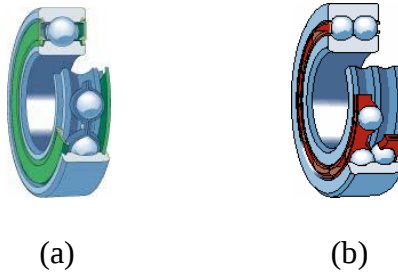


Figura A.1. Rodamientos rígidos, (a) de una hilera de bolas, (b) con dos hileras de bolas [28].

En esta clasificación, también se encuentran los rodamientos de bolas a rótula de la figura A.2. Estos tienen dos hileras de bolas con un camino de rodadura esférico común en el aro exterior. Esta característica confiere al rodamiento la propiedad de ser autoalineable. Esto permite desviaciones angulares del eje con relación al soporte. Son por tanto especialmente adecuados para aplicaciones en las cuales se pueden producir desalineaciones por errores de montaje o por flexión del eje.

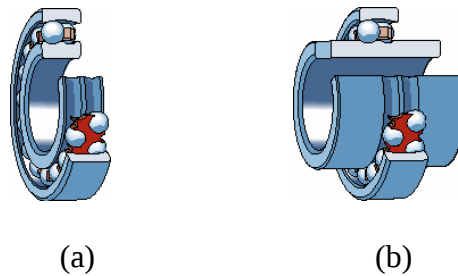


Figura A.2. Rodamiento de bolas a rótula, (a) autoalineable, (b) autoalineable con anillo interior extendido [28].

Los rodamientos de contacto angular mostrados en la figura A.3, se utilizan para soportar cargas combinadas, esto se debe a que tienen los caminos de rodadura de sus aros interior y exterior desplazados uno de otro en la dirección del eje del rodamiento.

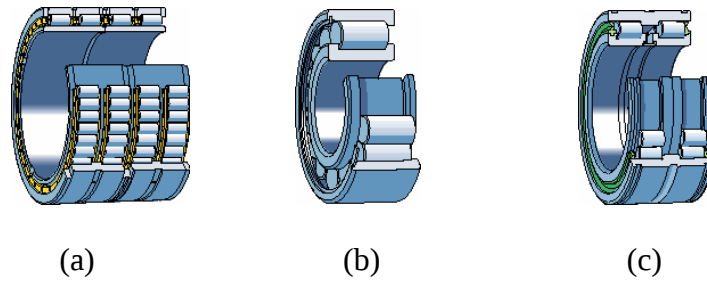


Figura A.3. Rodamientos de bolas de contacto angular, (a) con cuatro puntos de contacto, (b) de alta precisión, (c) de doble hilera-anillo interior de una pieza [28].

Para altas velocidades y grandes cargas radiales se utilizan los rodamientos de rodillos cilíndricos como los de la figura A.4. Estos encuentran su aplicación en máquinas-herramientas y trenes de laminación. Su capacidad de absorber las desalineaciones angulares del aro interior con respecto al exterior está limitada a algunos minutos angulares.

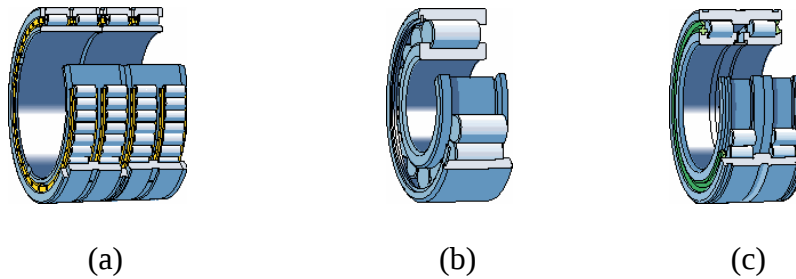


Figura A.4. Rodamientos de rodillos cilíndricos, (a) de cuatro hileras, (b) de llenado completo de una hilera, (c) de llenado completo de doble hilera [28].

Los rodamientos de aguja en la figura A.5 son rodamientos de rodillos cilíndricos cuyos rodillos se caracterizan por ser finos y largos en relación a su diámetro por lo que se les denomina “agujas”. A pesar de la sección transversal tan pequeña de estos rodamientos tienen una gran capacidad de carga radial y, por tanto, son particularmente adecuados para aquellas disposiciones en las que se tiene de un espacio radial limitado.

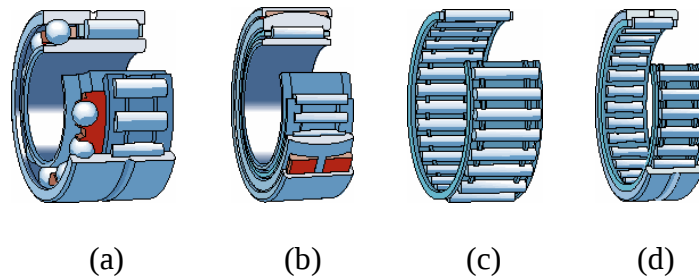


Figura A.5. Rodamientos de agujas, (a) de aguja combinado, (b) de aguja autoalineable, (c) ensamble de rodillos de aguja y su jaula, (d) de agujas con pestaña [28].

A.1.2. Rodamientos axiales

Existen dos tipos de rodamientos axiales, el de simple efecto y el de doble efecto. Ambos tipos no soportan cargas radiales. El rodamiento axial de bolas de simple efecto mostrado en la figura A.6(a) sólo permite fijar la flecha en un solo sentido, mientras que el rodamiento de bolas de doble efecto mostrado en la figura A.6 (b) permite fijar la flecha en ambos sentidos.

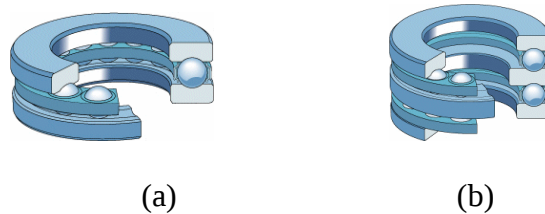


Figura A.6. Rodamientos axiales de bolas, (a) de simple efecto, (b) de doble efecto [28].

Los rodamientos axiales de rodillos cilíndricos como el de la figura A.7 son de simple efecto. Estos son adecuados para disposiciones que tengan que soportar grandes cargas axiales y en las que se requiera insensibilidad a las cargas de choque, rigidez y un espacio axial mínimo. Se emplean principalmente cuando la capacidad de carga de los rodamientos axiales de bolas es inadecuada.

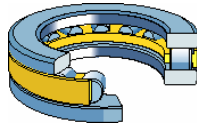


Figura A.7. Rodamiento axial de rodillos cilíndricos [28].

Los rodamientos axiales de agujas de la figura A.8 son de simple efecto. Estos soportan grandes cargas axiales, son insensibles a las cargas de choque y proporcionan disposiciones rígidas de rodamientos que requieren un espacio axial mínimo. Para un mismo diámetro interior los rodamientos de agujas requieren menor espacio axial comparado con un rodamiento de rodillos cilíndricos.



Figura A.8. Rodamiento axial de agujas [28].

En los rodamientos axiales de rodillos a rótula de la figura A.9 (a), la carga se transmite de un camino de rodadura al otro formando un ángulo con el eje del rodamiento mostrado en la figura A.9 (b). Por consiguiente, a diferencia de todos los demás rodamientos axiales; los de rodillos a rótula son adecuados para absorber cargas radiales y axiales simultáneamente. Otra característica de estos rodamientos es su propiedad de autoalineación lo cual los hace insensibles a las flexiones del eje y a los errores de alineación entre eje y alojamiento.

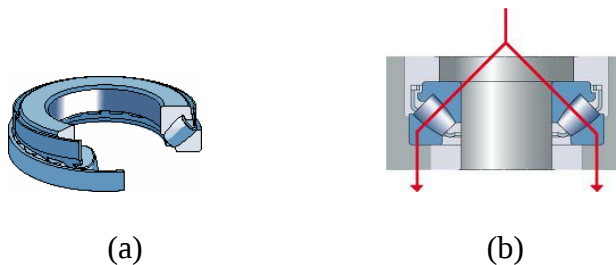


Figura A.9. (a) Rodamiento axial de rodillos a rótula, (b) ángulo formado por la transmisión de la carga [28].

A.1.3. Rodamientos tipo Y

Los rodamientos tipo Y, también llamados rodamientos insertables; son rodamientos rígidos de bolas los cuales están sellados en ambas caras. Además, cuando son montados en alojamientos tipo Y, son capaces de compensar errores iniciales de alineación pero no permiten desplazamiento axial y por tanto no son adecuados como apoyos libres. Los rodamientos deben estar próximos entre sí, o bien montar los soportes en armazones de chapa flexibles para evitar que los rodamientos queden sometidos a esfuerzos, por ejemplo, los que resultan por la dilatación térmica del eje. Sus características especiales permiten su aplicación en maquinaria agrícola, equipos de construcción, máquinas textiles, ventiladores, etc. Existen cuatro métodos para localizar los rodamientos Y sobre el eje los cuales pueden observarse en la figura A.10.

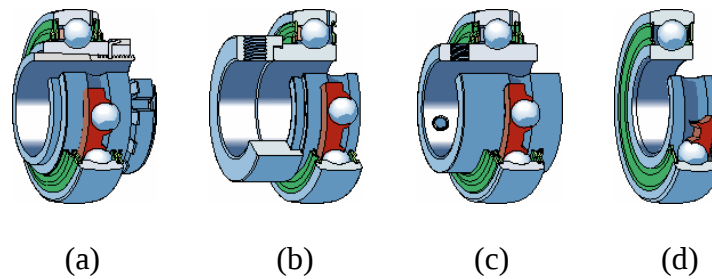


Figura A.10. Rodamiento tipo Y, (a) con manguito de fijación, (b) con anillo de fijación excéntrico con prisionero, (c) con prisioneros de fijación, (d) con anillo interior normal [28].

Apéndice B

B.1. Interpretación de los datos adquiridos

B.1.1. Dominio del tiempo (acelerómetros y micrófonos)

En la figura B.1 se muestran los resultados obtenidos para la señal vertical de vibración del generador *sin* falla graficada en amplitud vs. tiempo. Entretanto, en la figura B.2 se presentan los resultados de la señal vertical de vibración del generador *con* falla graficada en amplitud vs. tiempo.

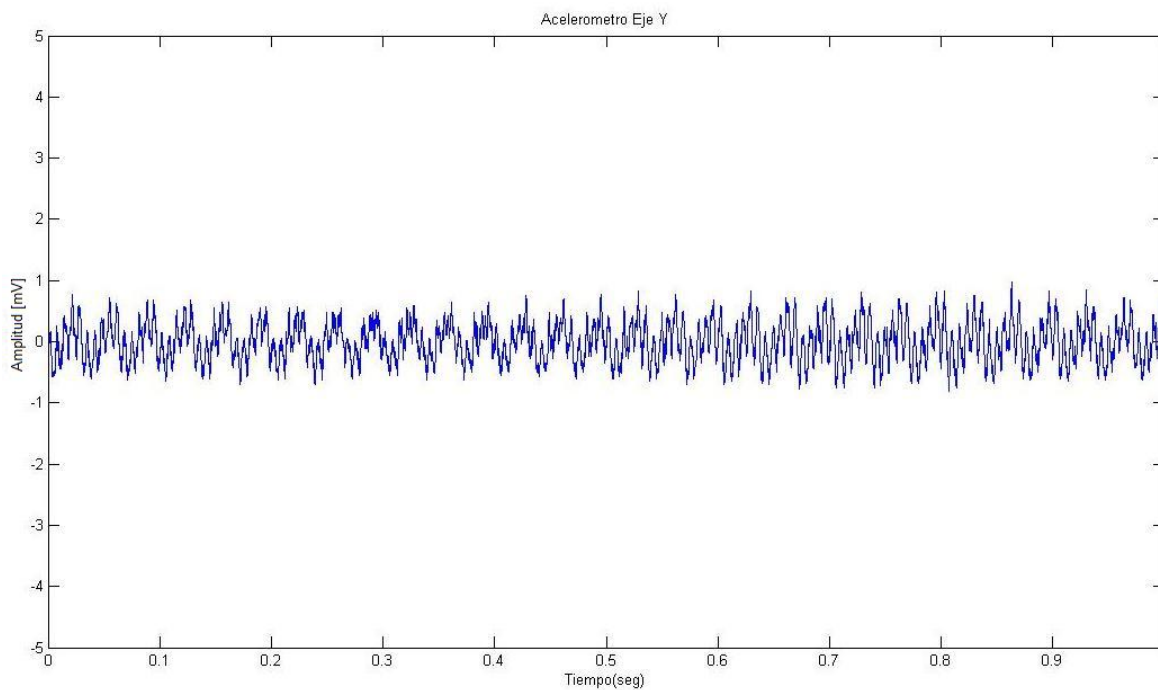


Figura B.1. Señal de vibración vertical del acelerómetro para la condición *sin* falla.

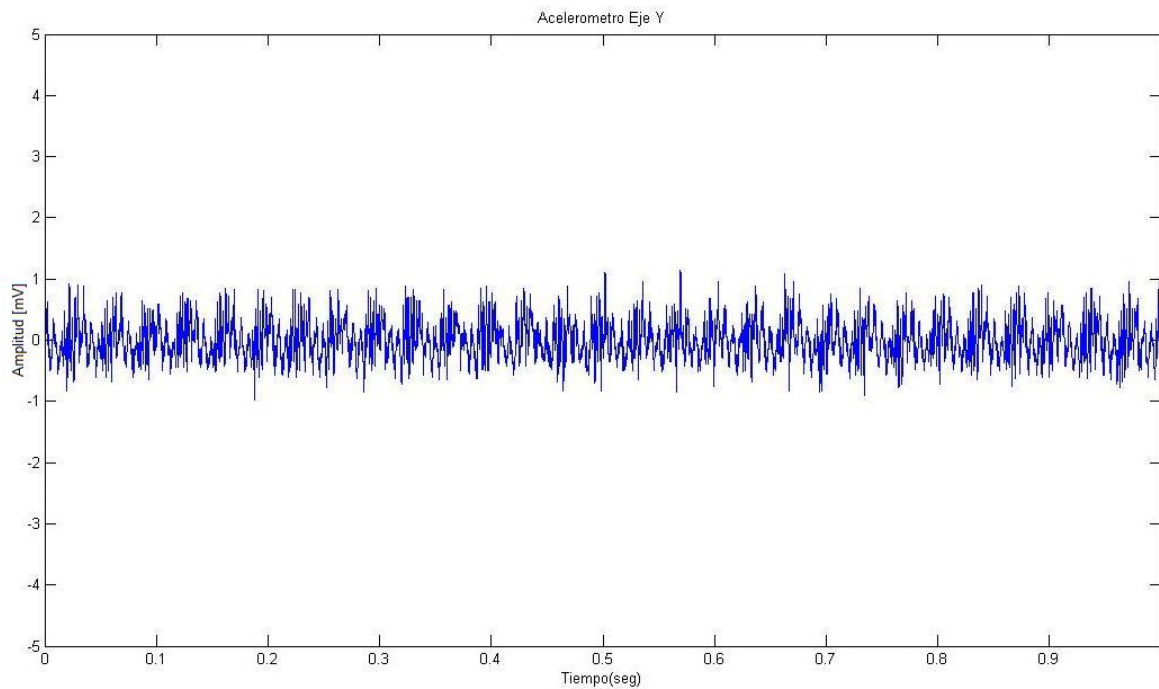


Figura B.2. Señal de vibración vertical del acelerómetro para la condición *con* falla.

En la figura B.3 se muestran los resultados obtenidos para la señal vertical acústica del generador *sin* falla del micrófono omnidireccional graficada en amplitud vs. tiempo. La figura B.4 presenta los resultados de la señal vertical acústica del generador *con* falla del micrófono omnidireccional graficada en amplitud vs. tiempo.

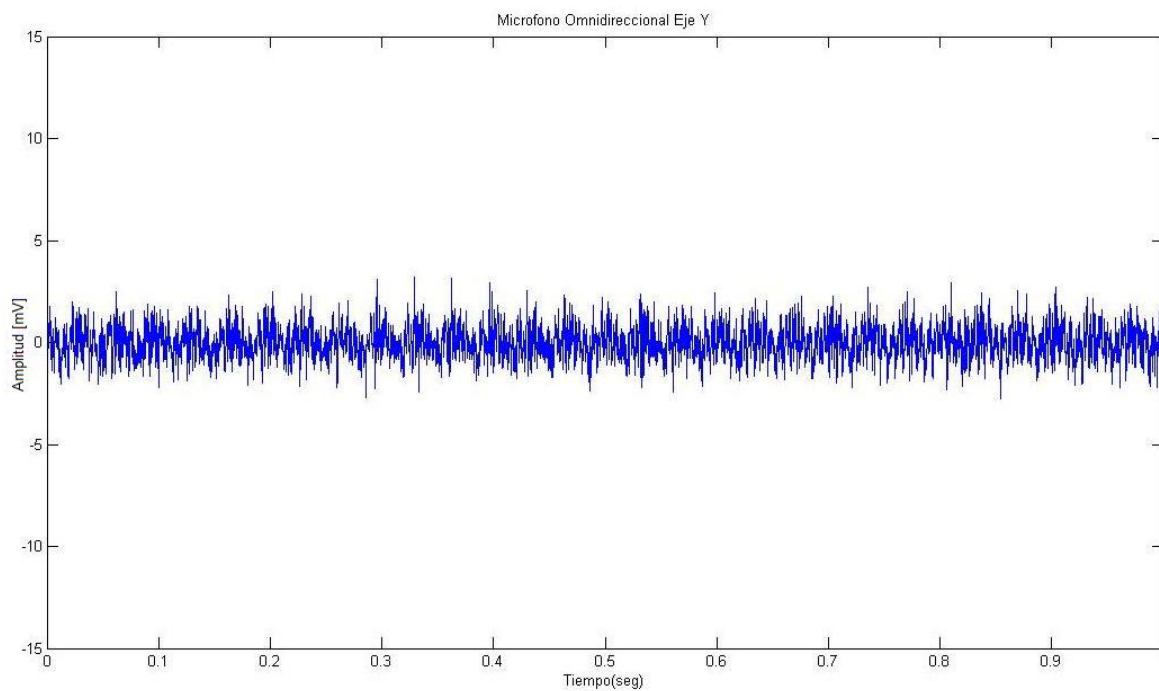


Figura B.3. Señal acústica vertical del micrófono omnidireccional para la condición *sin* falla.

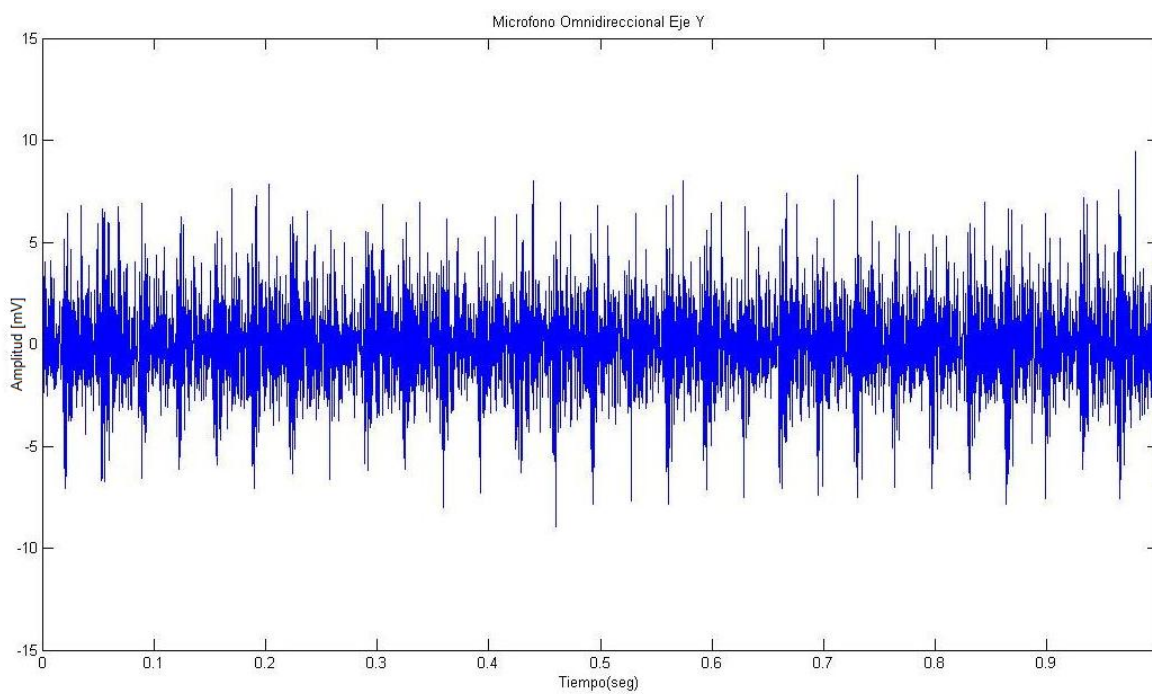


Figura B.4. Señal acústica vertical del micrófono omnidireccional para la condición *con* falla.

En la figura B.5 se muestran los resultados obtenidos para la señal horizontal acústica del generador *sin* falla del micrófono unidireccional graficada en amplitud vs. tiempo. La figura B.6 presenta los resultados de la señal horizontal acústica del generador *con* falla del micrófono unidireccional graficada en amplitud vs. tiempo.

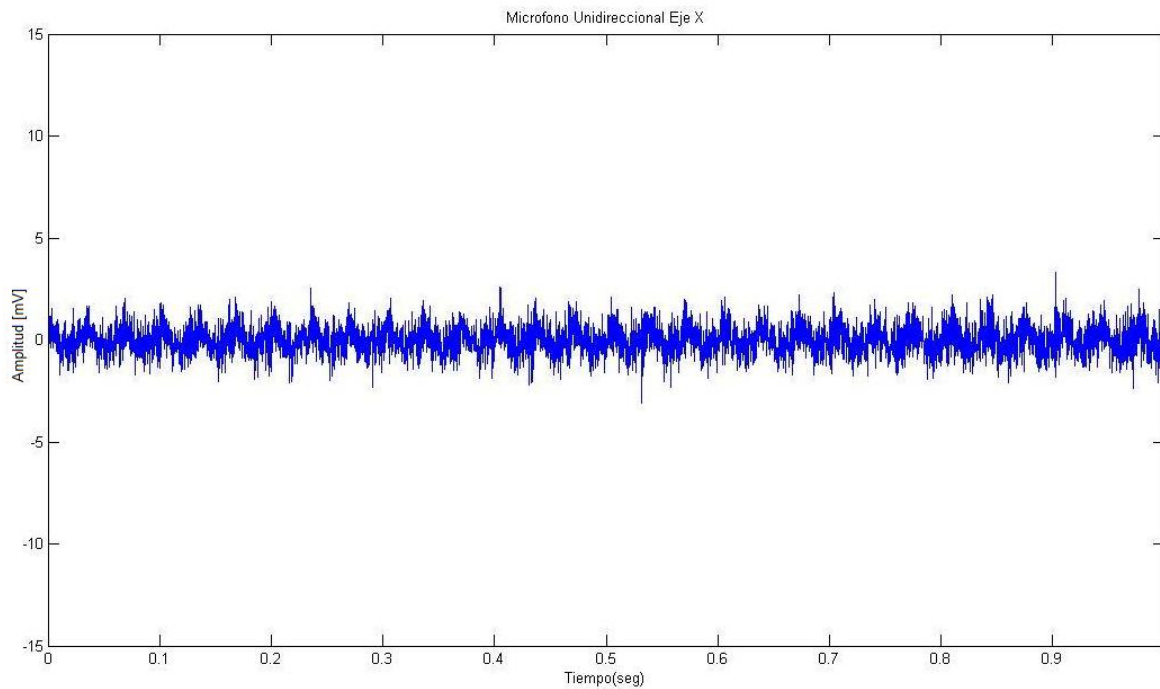


Figura B.5. Señal acústica horizontal del micrófono unidireccional para la condición *sin* falla.

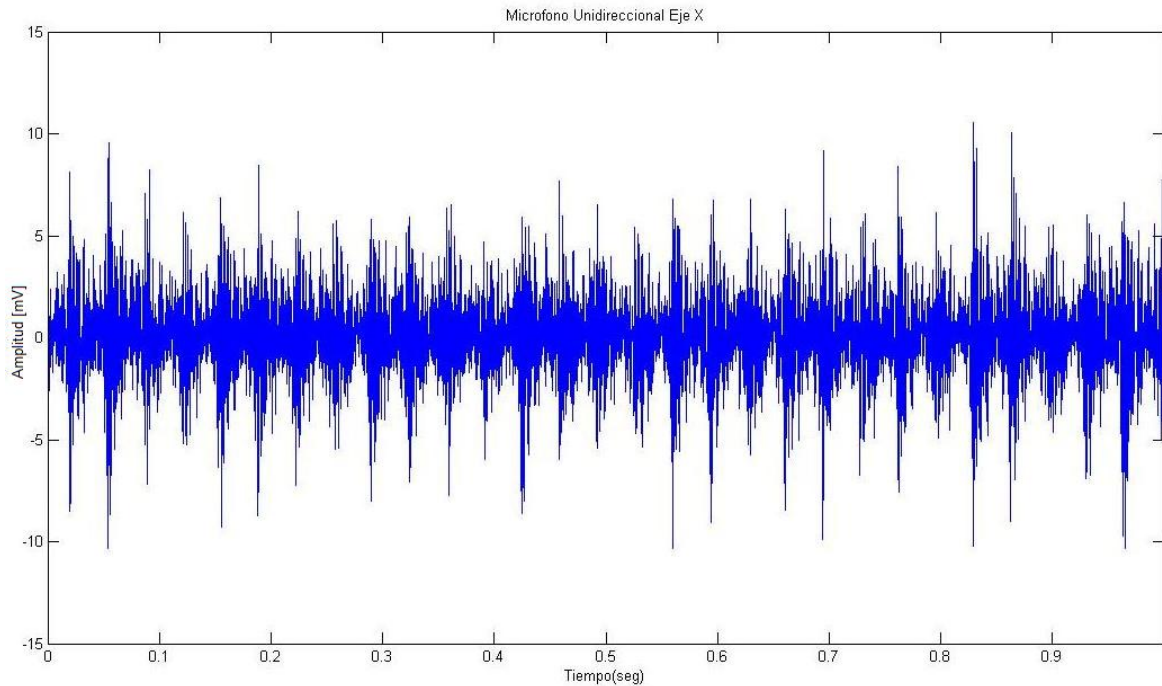


Figura B.6. Señal acústica horizontal del micrófono unidireccional para la condición *sin* falla.

En la figura B.7 se muestran los resultados obtenidos para la señal vertical acústica del generador *sin* falla del micrófono unidireccional graficada en amplitud vs. tiempo. La figura B.8 presenta los resultados de la señal vertical acústica del generador *con* falla del micrófono unidireccional graficada en amplitud vs. tiempo.

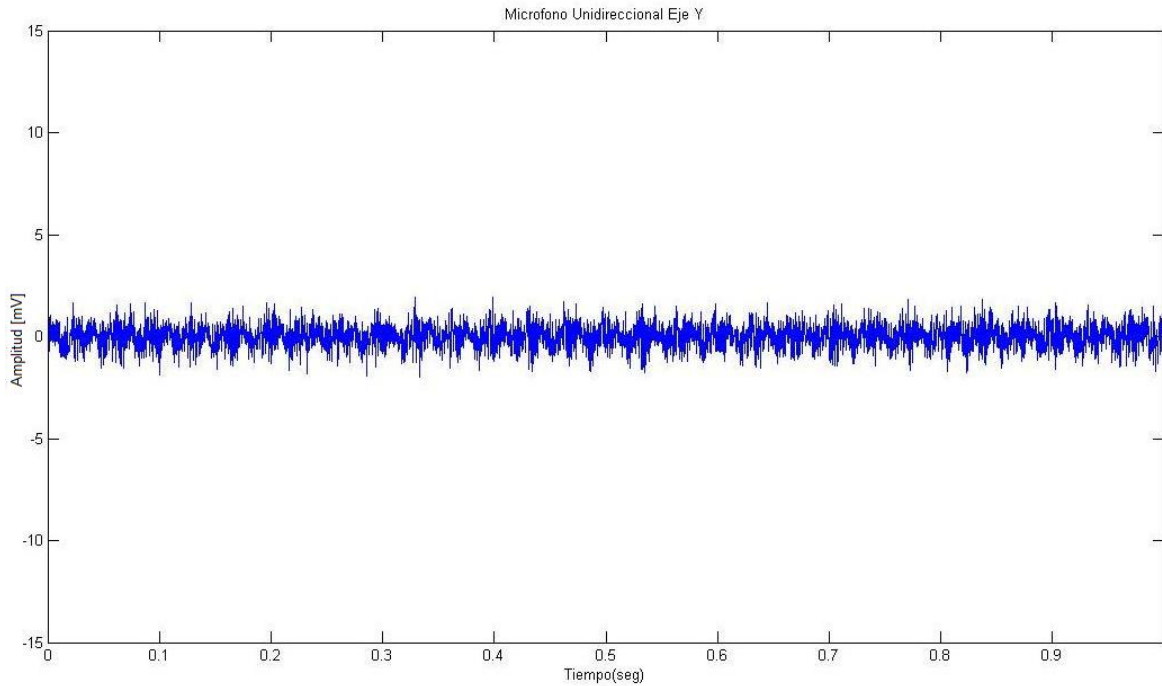


Figura B.7. Señal acústica vertical del micrófono unidireccional para la condición *sin* falla.

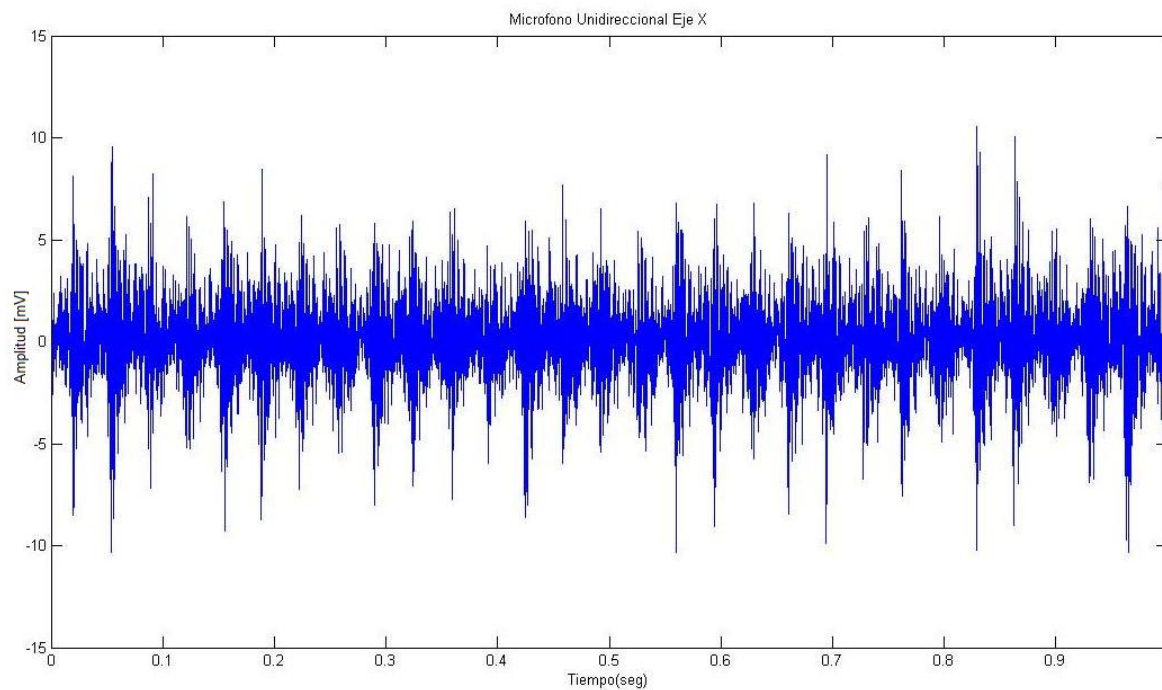


Figura B.8. Señal acústica vertical del micrófono unidireccional para la condición *con* falla.

Al comparar las gráficas de las figuras B.1 vs. B.2 en el eje vertical de los acelerómetros, las gráficas de las figuras B3 vs. B4, en el eje vertical de los micrófonos omnidireccionales,

las gráficas de las figuras B.5 vs. B.6 en el eje horizontal de los micrófono unidireccionales y las gráficas de las figuras B.7 vs. B.8 en el eje vertical de los micrófonos unidireccionales, se observa que la amplitud de las señales de vibración y acústicas son mayores cuando el rodamiento tiene una falla respecto a la condición sin daño. El análisis en el dominio del tiempo indica que existe un problema en el rodamiento. Sin embargo es difícil determinar el origen del problema ya que no se puede observar una secuencia clara de impactos (vibración de falla del rodamiento).

En el diagnóstico de máquinas el análisis de la señal en el dominio del tiempo no suele ser considerada debido a que no permiten revelar aspectos esenciales de la señal del rodamiento con detalle y sin ambigüedad, por lo que se procede a realizar otro tipo de estudio que consiste en el análisis de las señales en el dominio de la frecuencia y permite descubrir aspectos de la señal que serían muy difíciles o imposibles de observar a partir de su representación en el dominio del tiempo. Se prefieren las representaciones en el dominio de la frecuencia debido a que las componentes relevantes de la señal son fáciles de detectar a causa de que no quedan enmascaradas por señales de gran amplitud por lo que el análisis del contenido armónico de una señal es más sencillo.

B.1.2. Dominio de la frecuencia *PSD* (acelerómetros y micrófonos)

En la figura B.9 se muestran los resultados obtenidos para la señal vertical de vibración del generador *sin* falla graficada en amplitud vs. frecuencia. Entretanto, en la figura B.10 se presentan los resultados de la señal vertical de vibración del generador *con* falla graficada en amplitud vs. frecuencia.

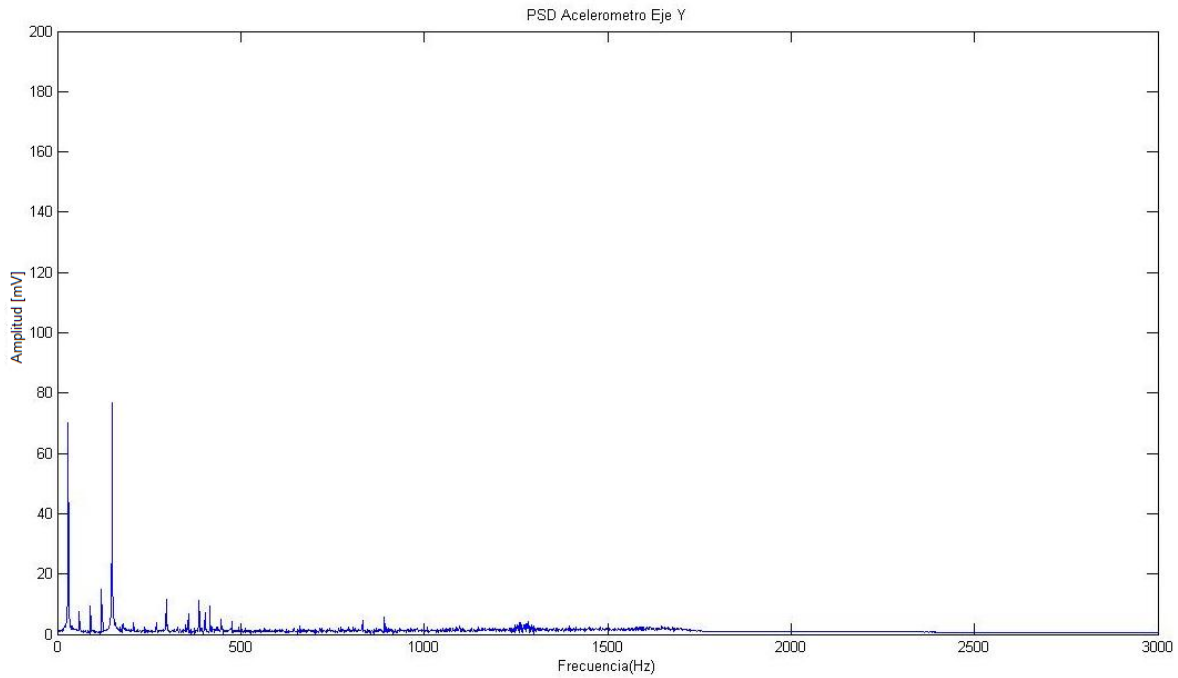


Figura B.9. Señal de vibración vertical del acelerómetro para la condición *sin* falla.

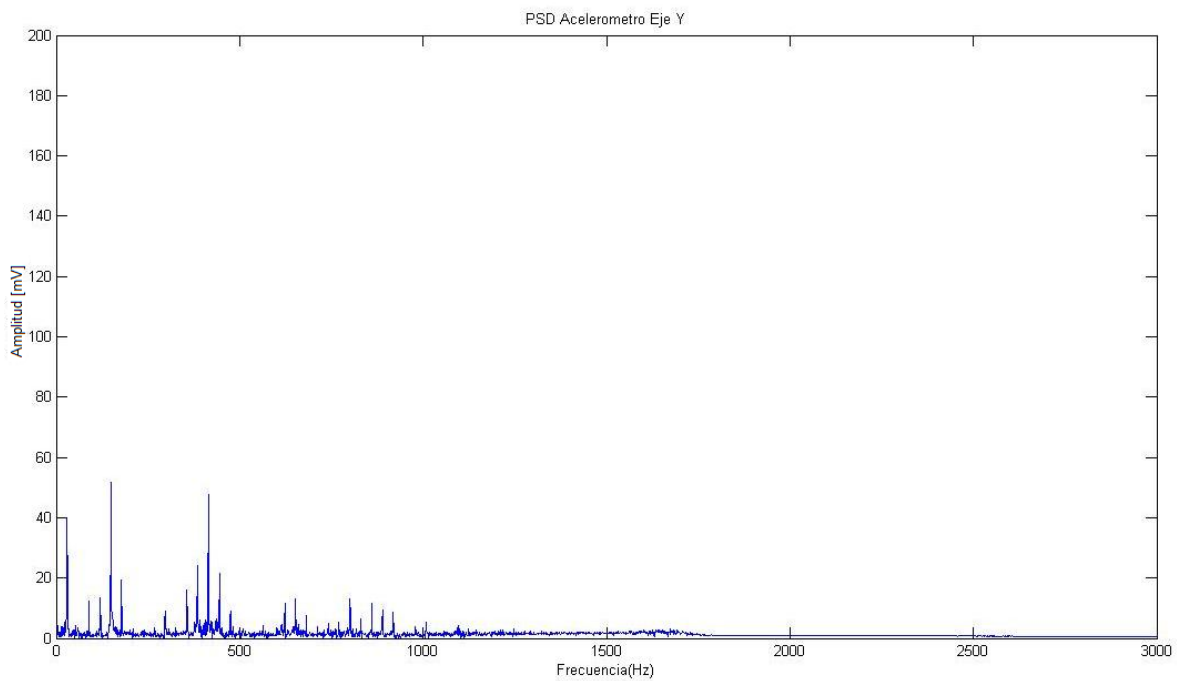


Figura B.10. Señal de vibración vertical del acelerómetro para la condición *con* falla.

En la figura B.11 se muestran los resultados obtenidos para la señal vertical acústica del generador *sin* falla graficada en amplitud vs. frecuencia del micrófono omnidireccional. La

figura B.12 presenta los resultados de la señal vertical acústica del generador *con* falla graficada en amplitud vs. frecuencia del micrófono omnidireccional.

En la figura B.13 se muestran los resultados obtenidos para la señal vertical acústica del generador *sin* falla graficada en amplitud vs. frecuencia del micrófono unidireccional. La figura B.14 presenta los resultados de la señal vertical acústica del generador *con* falla graficada en amplitud vs. frecuencia del micrófono unidireccional.

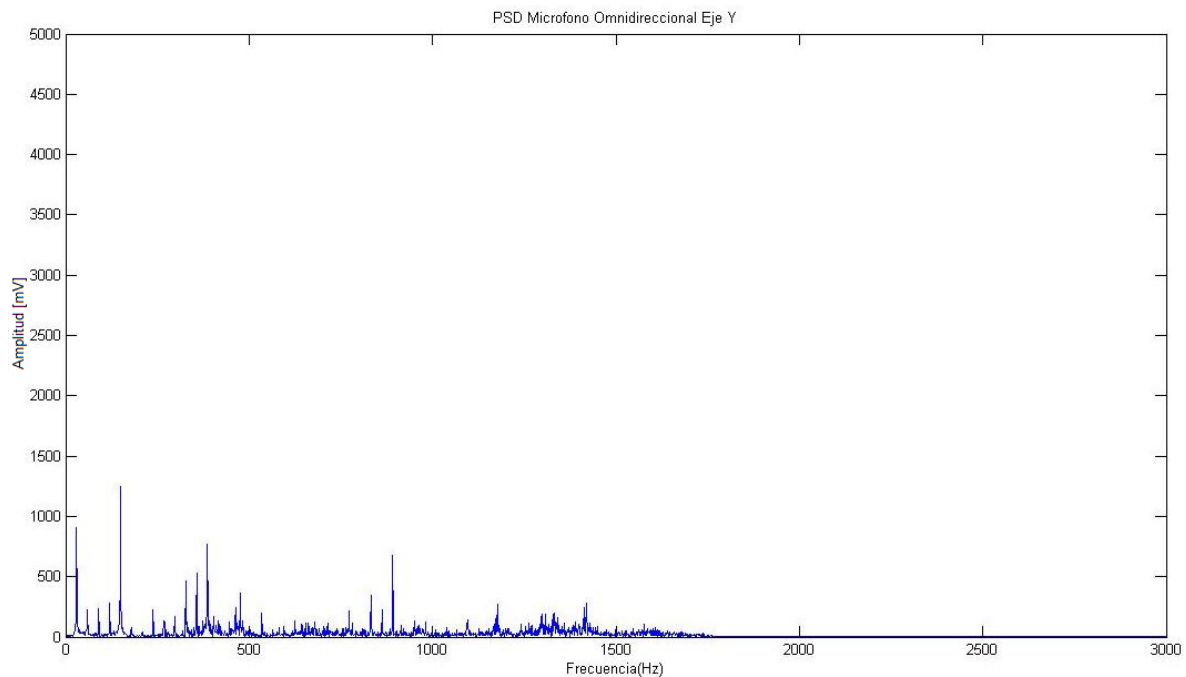


Figura B.11. Señal acústica vertical del micrófono omnidireccional para la condición *sin* falla.

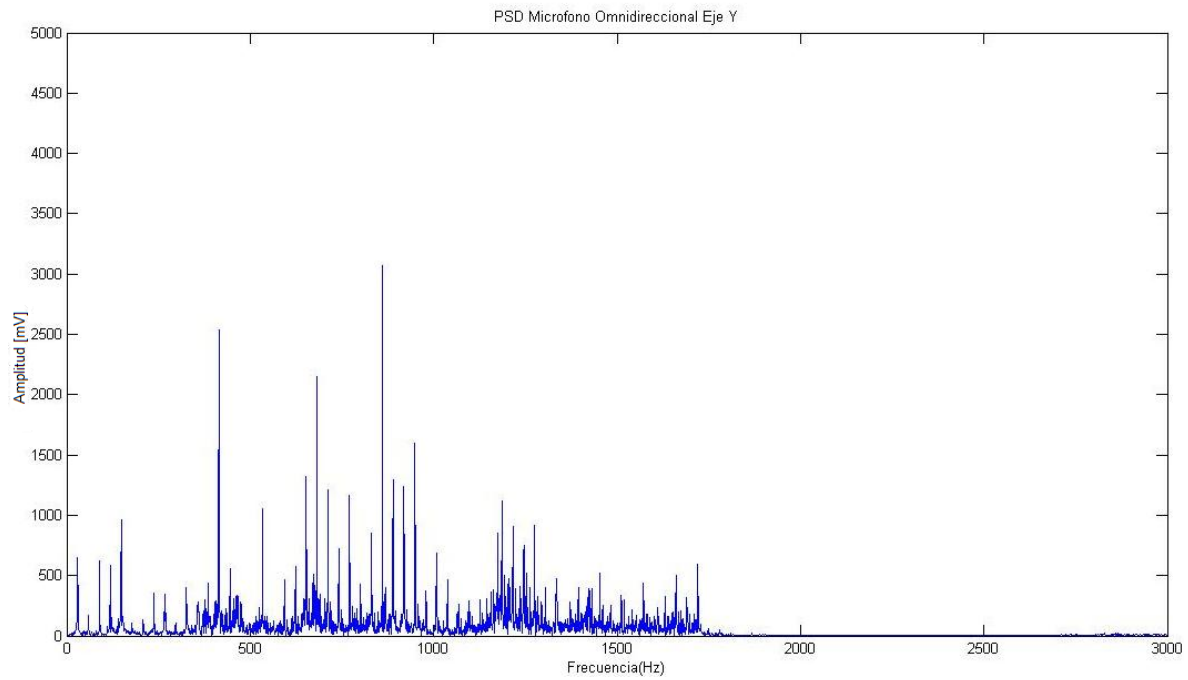


Figura B.12. Señal acústica vertical del micrófono omnidireccional para la condición *con* falla.

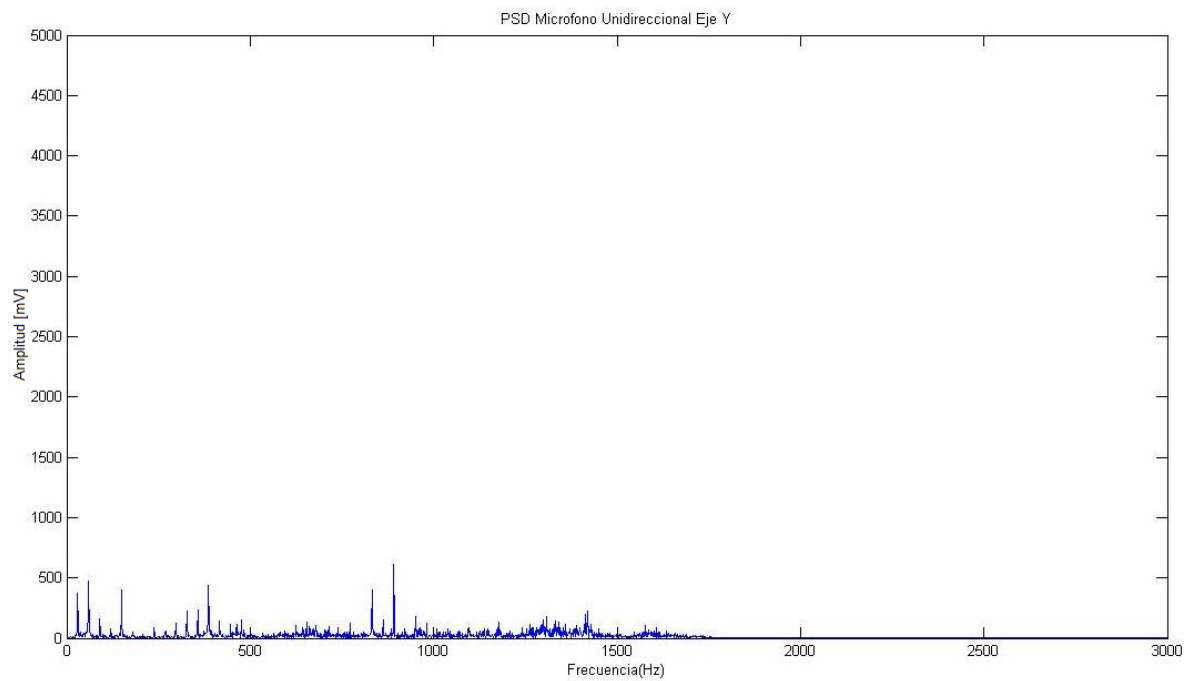


Figura B.13. Señal acústica vertical del micrófono unidireccional para la condición *sin* falla.

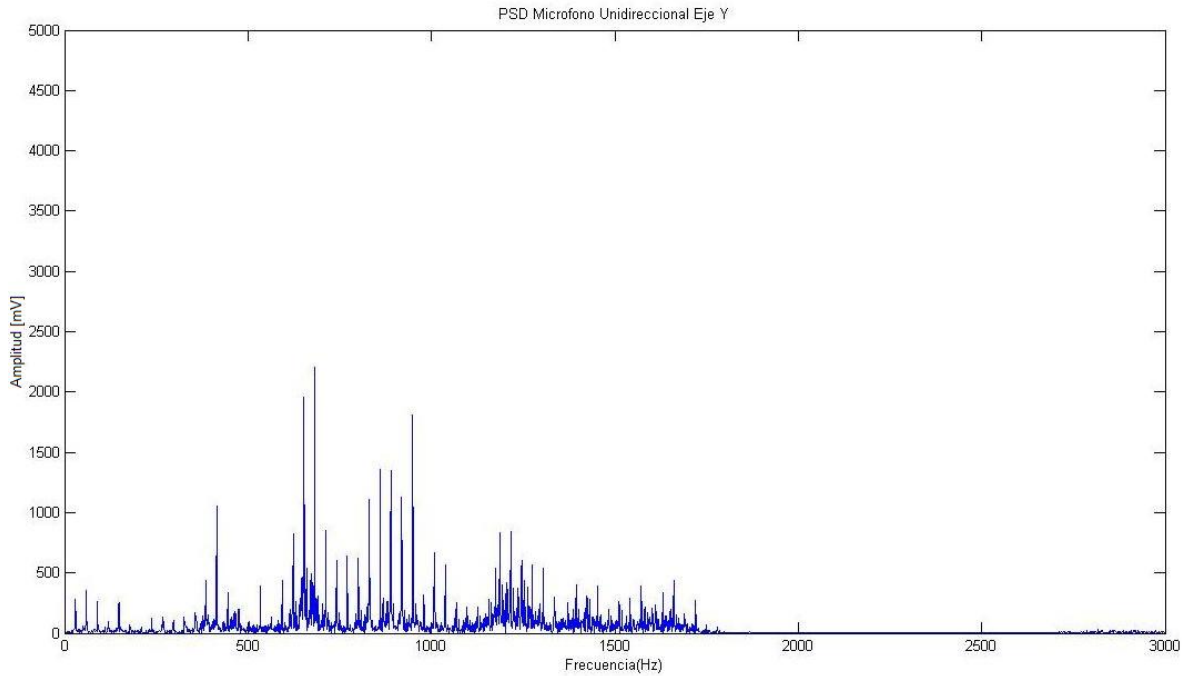


Figura B.14. Señal acústica vertical del micrófono unidireccional para la condición *con* falla.

De la figura B.9, en el eje vertical del acelerómetro se observa la amplitud respecto a la condición *sin* falla. La amplitud de la frecuencia en el eje horizontal para la condición *sin* falla en la frecuencia de 682 Hz (aproximadamente 23 veces la frecuencia de rotación de la flecha) es de 1.841 mV/Hz ; en la figura B.10 se observa la amplitud respecto a la condición *con* falla es de 15.52 mV/Hz .

Cuando la falla es grave aparecen bandas laterales alrededor de las frecuencias importantes de rotación de la máquina. En la figura B.10, se analizaron los picos de frecuencia de 29.5 Hz, 59.5 Hz, 89 Hz, y 118.5 Hz. Se observó que estas frecuencias están relacionadas con la frecuencia de rotación de la flecha ya que la relación de cada una de estas frecuencias es de 30 Hz (aproximadamente que es el valor teórico de rotación de la flecha).

De la figura B.11, en el eje vertical del micrófono omnidireccional, se observa la amplitud respecto a la condición *sin* falla. La amplitud de la frecuencia en el eje horizontal para la

condición *sin* falla en la frecuencia de 682 Hz es de 23.97 mV/Hz ; en la figura B.12, se observa la amplitud respecto a la condición *con* falla es de 4743 mV/Hz .

De la figura B.13, en el eje vertical del micrófono unidireccional se observa la amplitud respecto a la condición *sin* falla. La amplitud de la frecuencia en el eje horizontal para la condición *sin* falla en la frecuencia de 682 Hz es de 19.62 mV/Hz ; en la figura B.14, se observa la amplitud respecto a la condición *con* falla es de 4685 mV/Hz .

Cuando se presenta una falla aparecen bandas laterales alrededor de las frecuencias importantes de rotación de la máquina. En las figuras B.12 y B.14, se analizaron los picos de frecuencia de 29.5 Hz, 59.5 Hz, 89 Hz, y 118.5 Hz. Se observa que estas frecuencias tienen una separación aproximada de 30 Hz. (que es el valor teórico de frecuencia de rotación de la flecha).

Cabe señalar que cuando la falla es en la jaula las frecuencias de falla decaen sin llegar a formar bandas laterales alrededor de las frecuencias de falla. Esto impide poder realizar un diagnóstico para la falla en la jaula en una fase de deterioro en el rodamiento a través de la utilización de acelerómetros.

Cuando la falla se encuentra en la fase 4 (fase final del rodamiento), las frecuencias de falla disminuyen o desaparecen apareciendo muchas componentes a frecuencias aleatorias presentándose un aumento en el ruido de fondo [53], [54].

La *PSD*, es la principal técnica de procesamiento que se utiliza en el diagnóstico de máquinas debido a que permite detectar señales de alta y baja frecuencia, sin embargo, esta técnica tiene limitaciones como son la pérdida de fase de la señal. La fase de la señal, en el análisis de vibración es información clave ya que permite distinguir entre fallas a magnitud y frecuencia similares, lo que representa una desventaja en la detección y diagnóstico de

alguna avería presente en la máquina, por lo que se procede a realizar otro tipo de estudio el cual consiste en el análisis de los *HOSA* que proporciona información relevante que no se encuentra en la *PSD*.

El biespectro presenta la ventaja que al ser una representación en tres dimensiones es posible desplegar gráficamente las frecuencias ofreciendo la posibilidad de detectar acoplamientos entre frecuencias similares o muy cercanas en valor.

B.1.3. *BIS* (acelerómetros y micrófonos)

En la figura B.15 se muestran los resultados obtenidos para la señal vertical de vibración del generador *sin* falla graficada en amplitud del biespectro. Entretanto, en la figura B.16 se presentan los resultados de la señal vertical de vibración del generador *con* falla graficada en amplitud del biespectro.

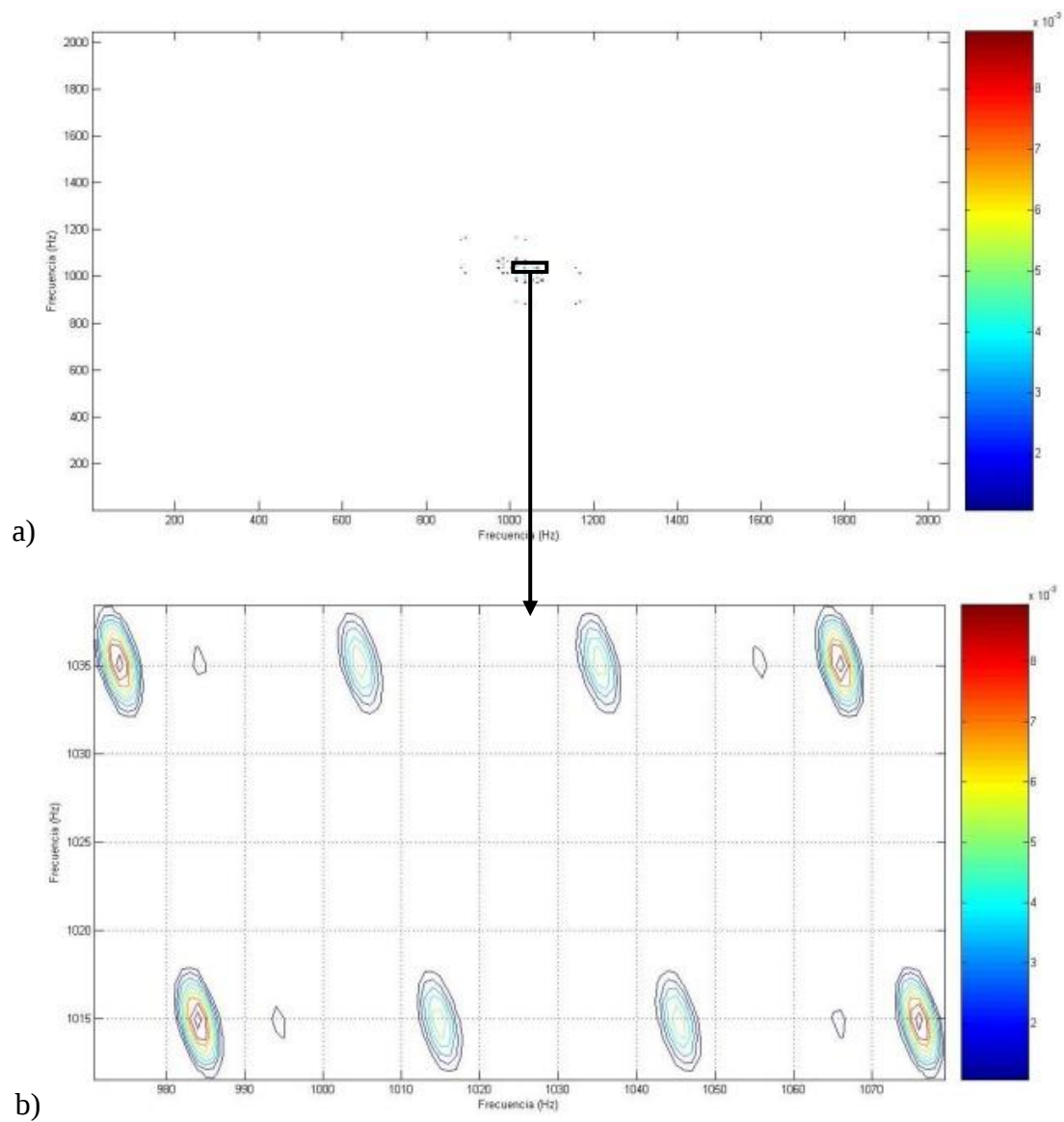


Figura B.15. Amplitud del biespectro de la señal de vibración vertical del acelerómetro para la condición *sin* falla; a) Vista superior, b) Zoom.

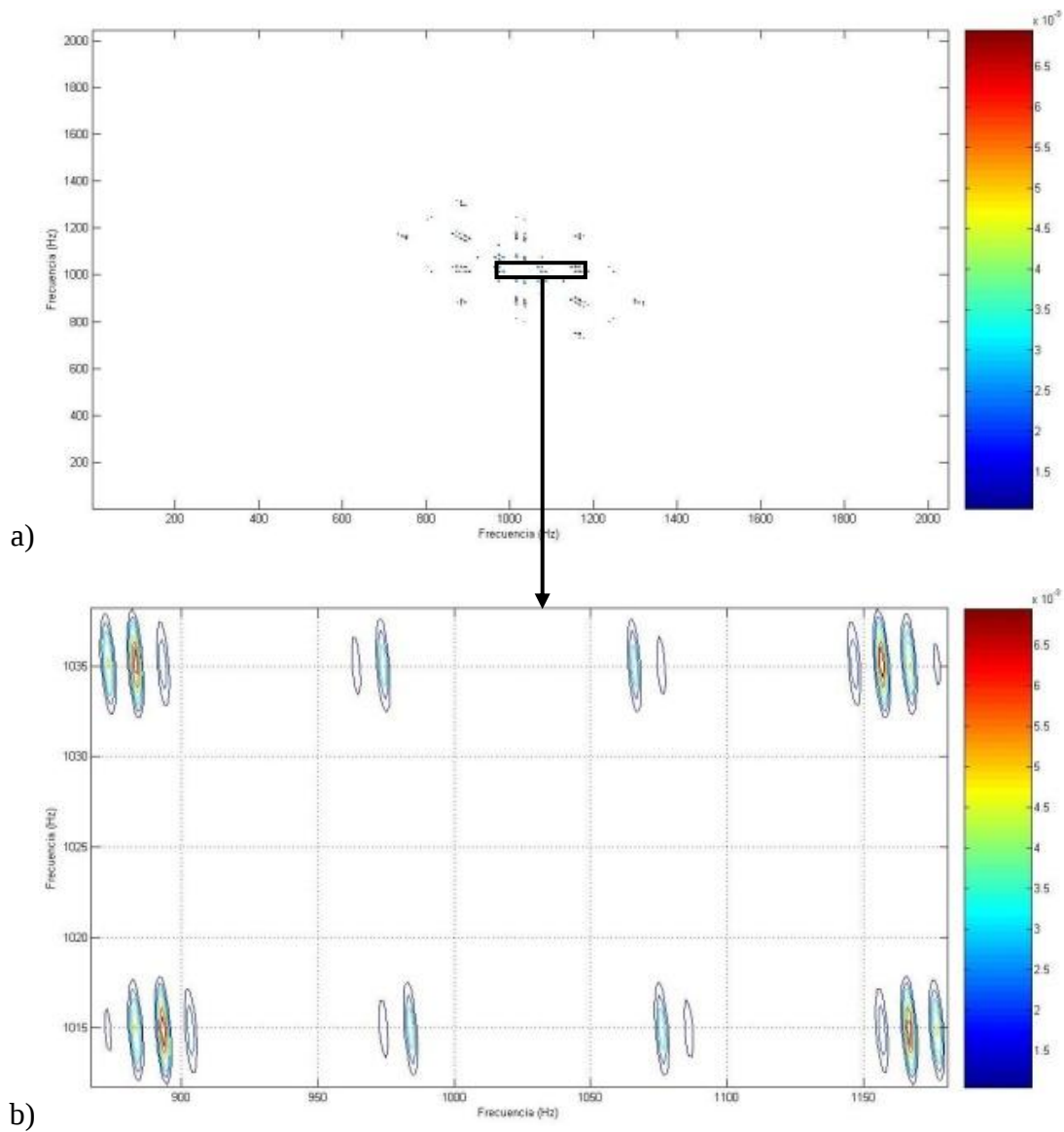


Figura B.16. Amplitud del bispectro de la señal de vibración vertical del acelerómetro para la condición *con falla*; a) Vista superior, b) Zoom.

En la figura B.17 se muestran los resultados obtenidos para la señal vertical acústica del generador *sin falla* graficada en amplitud del bispectro del micrófono omnidireccional. La figura B.18 presenta los resultados de la señal vertical acústica del generador *con falla* graficada en amplitud del bispectro del micrófono omnidireccional.

En la figura B.19 se muestran los resultados obtenidos para la señal vertical acústica del generador *sin falla* graficada en amplitud del bispectro del micrófono unidireccional. La

figura B.20 presenta los resultados de la señal vertical acústica del generador *con* falla graficada en amplitud del biespectro del micrófono unidireccional.

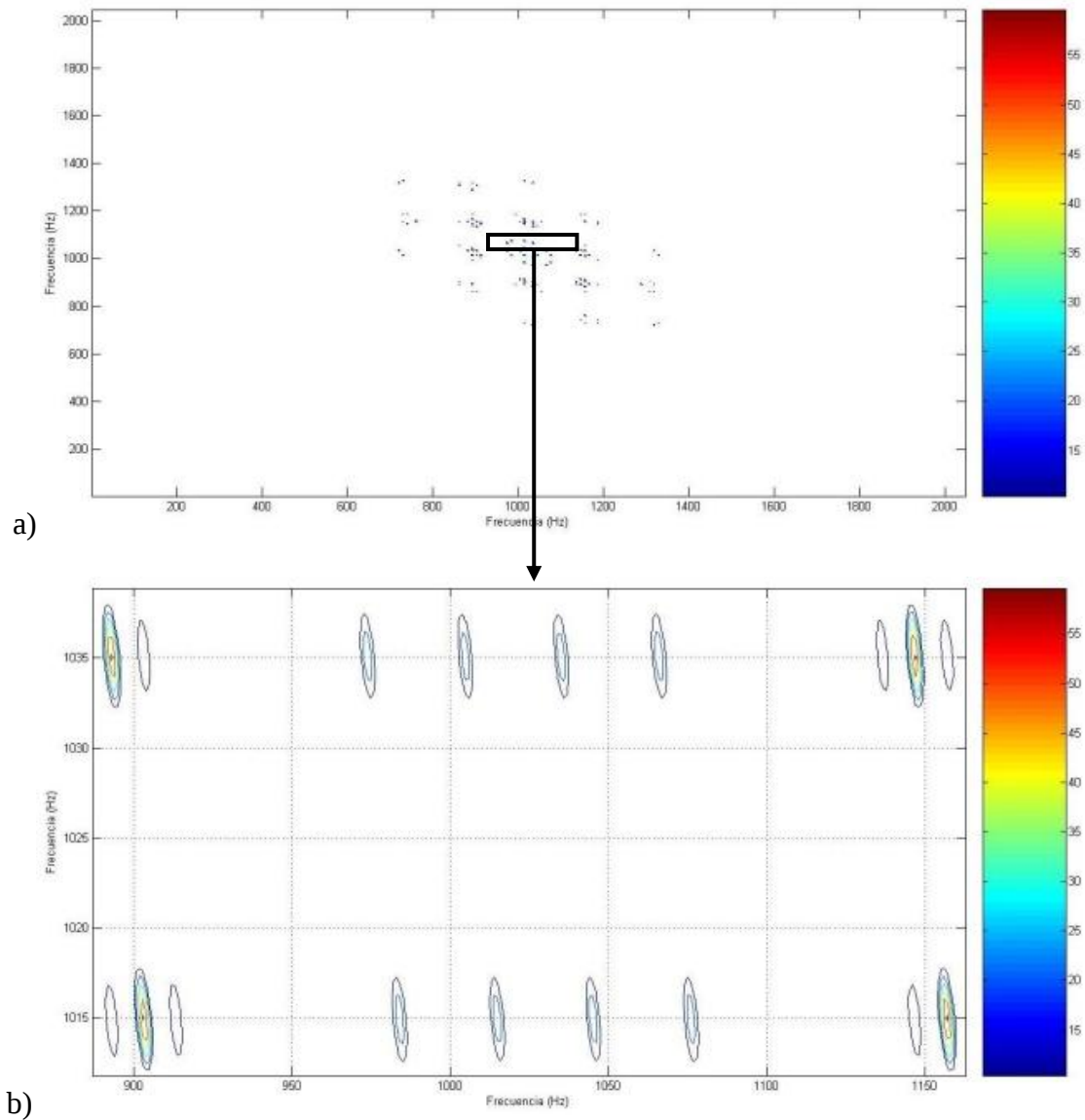


Figura B.17. Amplitud del biespectro de la señal acústica vertical del micrófono omnidireccional para la condición *sin* falla; a) Vista superior, b) Zoom.

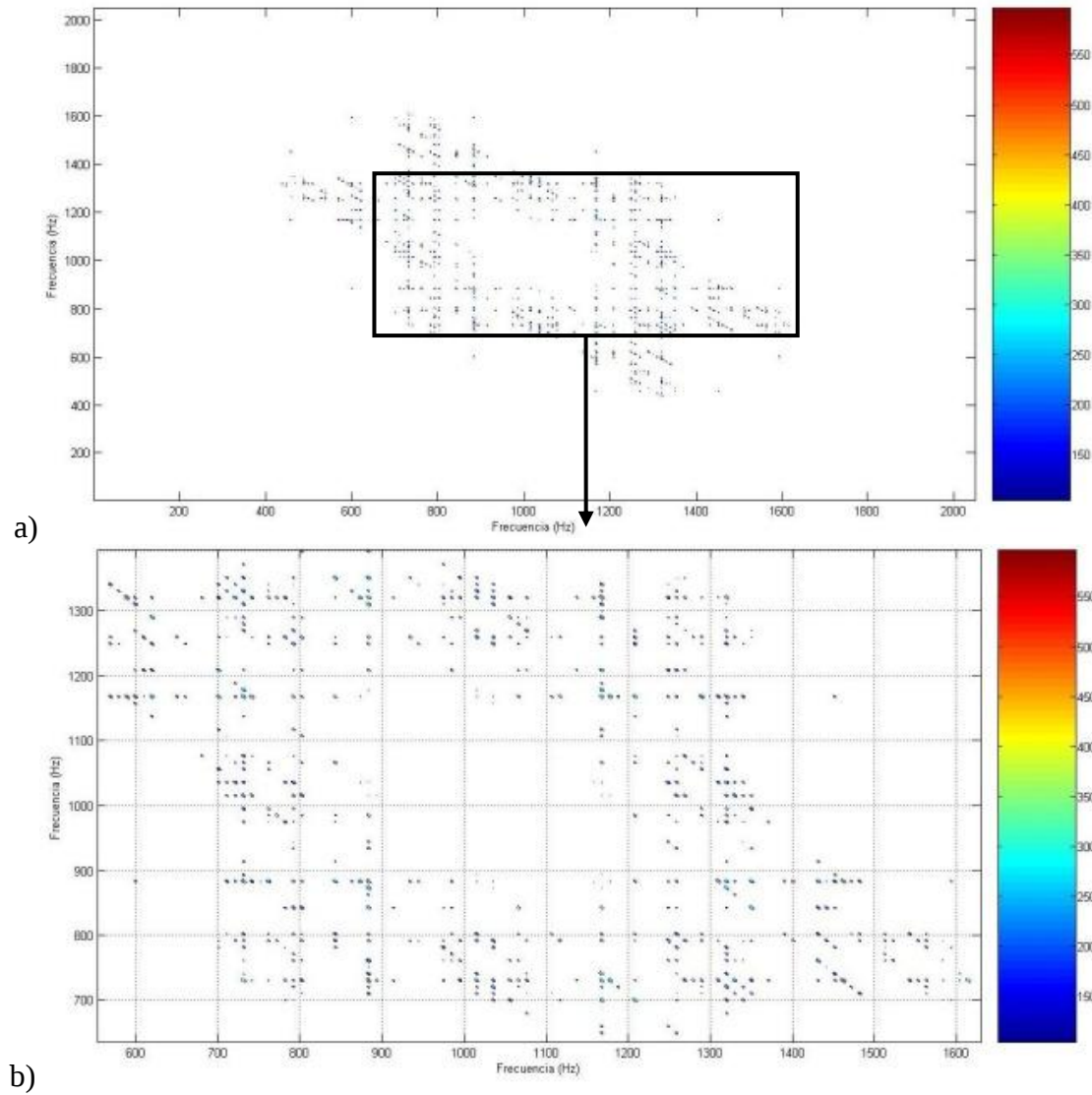


Figura B.18. Amplitud del bispectro de la señal acústica vertical del micrófono omnidireccional para la condición *con* falla; a) Vista superior, b) Zoom.

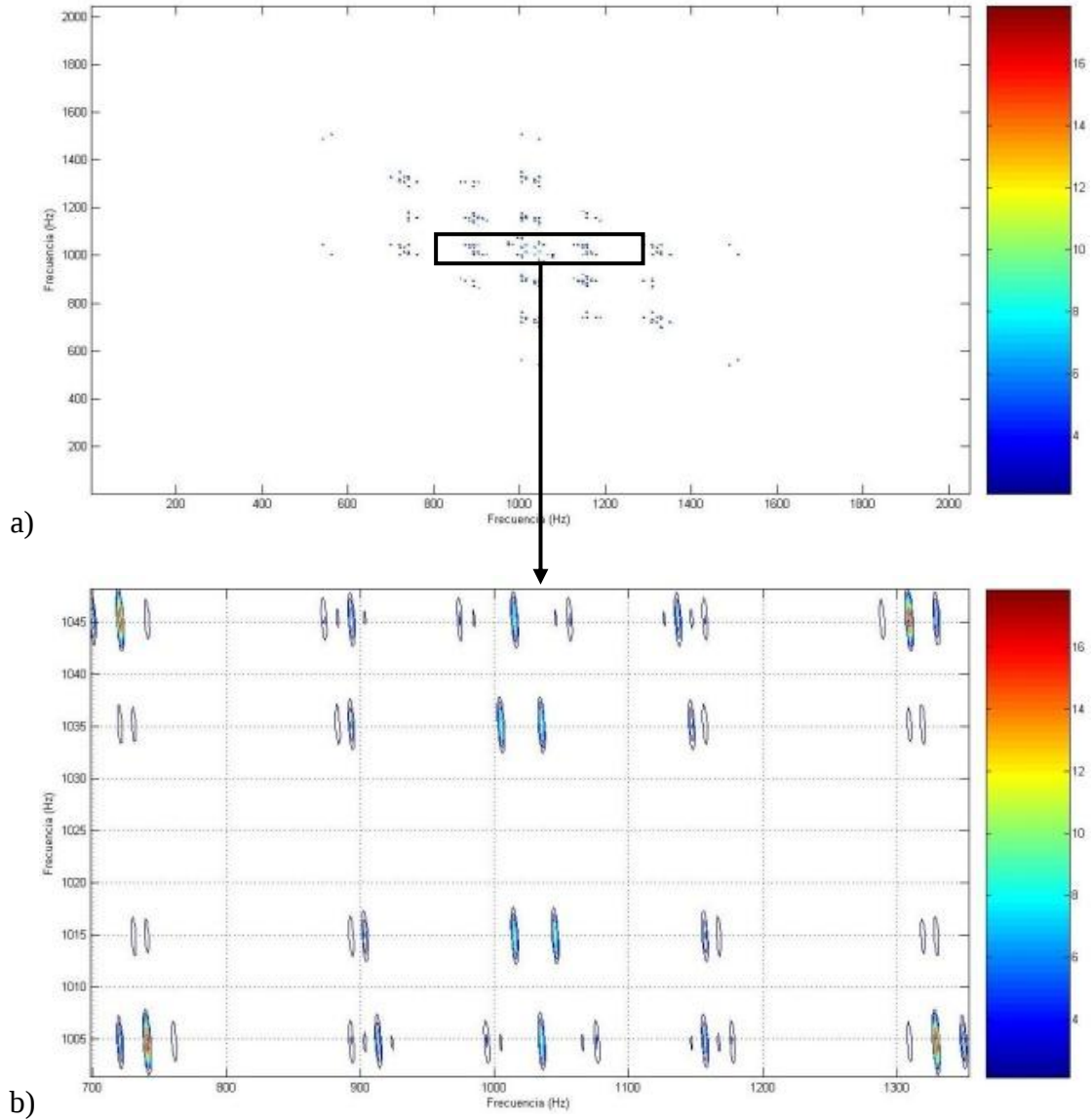


Figura B.19. Amplitud del bispectro de la señal acústica vertical del micrófono unidireccional para la condición *sin falla*; a) Vista superior, b) Zoom.

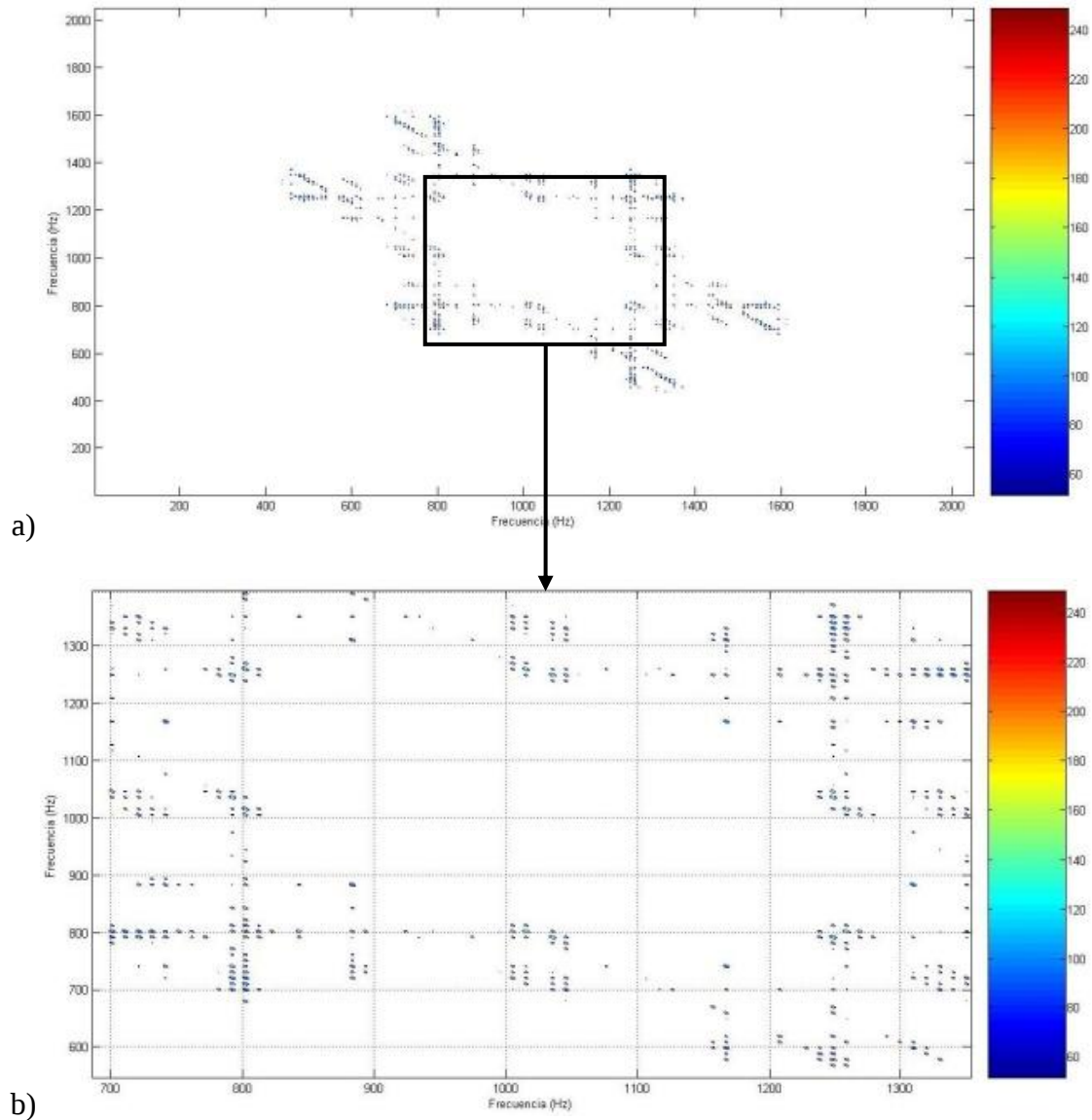


Figura B.20. Amplitud del biespectro de la señal acústica vertical del micrófono unidireccional para la condición *con falla*; a) Vista superior, b) Zoom.

De la figura B.15 se observa que los patrones de los biespectros para la condición *sin falla* y la condición *con falla* (figura B.16) del rodamiento en el *eje vertical* del acelerómetro son similares. En ambos casos aparecen las frecuencias relacionadas con el giro de la flecha del generador (aproximadamente 30 Hz). Esto indica que existe una frecuencia dominante, característica propia del banco de pruebas, el valor de esta es de poca amplitud que representa una escasa aportación para la detección de fallas.

Como se mencionó en la sección del *PSD*, en una falla en fase 4 en la jaula del rodamiento las frecuencias de falla disminuyen o desaparecen apareciendo muchas componentes a frecuencias aleatorias presentándose un aumento en el ruido de fondo lo que impide que una falla de este tipo pueda llegar a ser detectada a través de la metodología tradicional que utiliza acelerómetros, por lo que se requiere de la utilización de otro tipo de transductor como son micrófonos (omnidireccionales, unidireccionales).

Se observa que los patrones de las magnitudes del biespectro de las señales acústicas de los micrófonos omnidireccionales y unidireccionales para la condición *sin* falla y *con* falla del rodamiento en el *eje horizontal* son totalmente diferentes. En el caso de la condición *sin* falla aparecen picos relacionados con las frecuencias de operación de la máquina, y en las condiciones *con* falla se originan frecuencias de acoplamientos relacionadas con la frecuencia de falla a analizar.

Los biespectros de la figura B.17 (micrófono omnidireccional) y los biespectros de la figura B.19 (micrófono unidireccional) se obtuvieron de la señal acústica *vertical* para condiciones *sin* falla. Al analizar los picos separados por las frecuencias, para los micrófonos omnidireccionales se encontraron picos separados aproximadamente por 30 Hz que es la frecuencia de rotación de la flecha y para los micrófonos unidireccionales se encontraron picos separados por 30 Hz que es la frecuencia de rotación de la flecha.

Los biespectros de las figuras B.18 (micrófono omnidireccional) y B.20 (micrófono unidireccional) se obtuvieron de la señal acústica *vertical* para condiciones *con* falla. Al analizar los picos separados por las frecuencias de vibración, para los micrófonos omnidireccionales se encontraron picos separados por 11 Hz que es la frecuencia de vibración teórica en la jaula y para los micrófonos unidireccionales se encontraron picos separados por 11 Hz que es la frecuencia de vibración de teórica en la jaula.

Apéndice C

C.1. Introducción

Se presentan los resultados sobre el sistema de captura y despliegue de acelerómetros y micrófonos que se desarrolló para el diagnóstico de fallas en rodamientos haciendo uso de la computadora personal (PC) para hacer un sistema flexible y de fácil implementación. El sistema tiene la capacidad de grabar los sonidos y las vibraciones del generador síncrono. Las señales de vibración son sensadas por acelerómetros que miden la vibración en el eje horizontal y vertical. El sensado de las señales acústicas se realiza a través de 4 micrófonos electreto (dos micrófonos unidireccionales y dos micrófonos omnidireccionales) que miden el sonido en el eje horizontal y vertical, las señales se acoplan y se digitaliza la información a través de la tarjeta para adquisición de datos *NI USB – 6009*. El diagrama de la figura C.1 muestra el diagrama de bloques de la captura (figura C.1 (a)) y procesamiento de la señal (figura C.1 (b)).

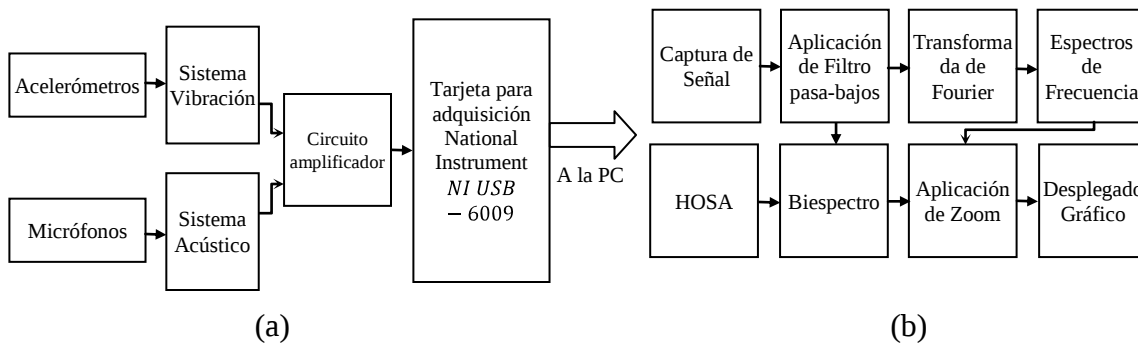


Figura C.1. (a) Implementación de captura, (b) Procesamiento de la Señal.

Se utilizaron 4 micrófonos en esta investigación debido a que la tarjeta para adquisición de datos que se utilizó cuenta únicamente con 8 entradas y dos de ellas se utilizaron para los acelerómetros.

Debido al costo de las tarjetas para adquisición de datos que son elevados y a que el análisis de vibración se efectúa normalmente en el eje horizontal y vertical de la máquina, se decidió utilizar estas dos salidas en el acelerómetro triaxial. Esto permite probar dos tipos distintos de micrófono electreto que son unidireccionales y omnidireccionales colocados en los ejes horizontal y vertical.

La captura de las señales de los acelerómetros y los micrófonos se realizó a una frecuencia de muestreo de 6000 muestras por segundo debido a las limitaciones de velocidad de muestreo de la tarjeta para adquisición de datos. La información obtenida se grabó en un archivo de datos en formato de hoja electrónica para posteriormente poder transferir dicha información y ser utilizada en la PC. Se realizó la captura de información con 6000 muestras equivalente a 1 segundo de longitud total con una velocidad de muestreo de 6000 muestras/segundo.

Se desarrolló una interfaz gráfica para poder realizar la correlación visual entre los eventos de vibración y acústicos del sistema motor-generator para realizar el despliegue gráfico de las señales de los acelerómetros y los micrófonos en la pantalla de la PC, y para reproducir las señales cuando sean requeridas por el especialista.

Se utilizó LabView (*DAQmx*) en el proceso de captura de la señal en la tarjeta para adquisición de datos y MatLab en el procesamiento de la señal por ser una herramienta técnica apropiada para el cálculo, análisis y simulaciones matemáticas que utiliza un lenguaje técnico de programación; se realizó un análisis de frecuencia para detectar picos de interferencia (para verificar si hay ruido) dentro del ancho de banda de la señal y aplicar métodos de filtrado. Para eliminar el ruido de las señales obtenidas se programaron filtros pasa-bajos elípticos de orden 4 y se habilitó la opción de obtener la señal filtrada y sin filtrar en la interfaz gráfica.

Se calcularon los espectros de frecuencia de las señales vibración para verificar el patrón de frecuencia relacionado al método tradicional de análisis de vibración que se basa en la utilización de acelerómetros en las máquinas. Se calcularon los espectros de frecuencia de las señales acústica de cada señal de los micrófonos para ver si existe alguna relación con respecto a una condición normal de vibración para diferentes fallas en la máquina se busca el sitio donde mejor se escuche cada sonido de la máquina, ya que la información obtenida se relaciona directamente con la posición del punto donde se realiza la captura. El dispositivo desarrollado debe ser un auxiliar al especialista en el entendimiento de alguna falla en el generador síncrono, así, la elección del sitio de captura debe ser determinada por razones prácticas.

C.2. Interfaz gráfica

Se desarrolló una interfaz gráfica *GUI* (Graphical User Interfaces) que cuenta con una figura en la pantalla de inicio que muestra el sistema motor-generador para representar el interés de esta investigación. El *GUI* cuenta con dos secciones: la “*Opción señal*”, y la de “*Seleccione opción*”. A partir del diseño de estas secciones se puede interactuar con las funciones de procesamiento (toolbox) de MatLab para el despliegue y medición de las múltiples señales que permitan al especialista visualizar mejor las señales de vibración de un generador síncrono. La “*Opción señal*” debe emplearse primero, esta sirve para seleccionar si se desea mostrar las señales *sin* falla, *con* falla, las señales filtradas, señales sin filtrar o en algunos casos el despliegue de ambas señales filtradas y sin filtrar. Esta sección se desarrolla a través de la función *pushbutton* (los botones generan una acción cuando se presionan) que sirve para mantener la opción de la señal seleccionada hasta que cambia a otra opción del *pushbutton*.

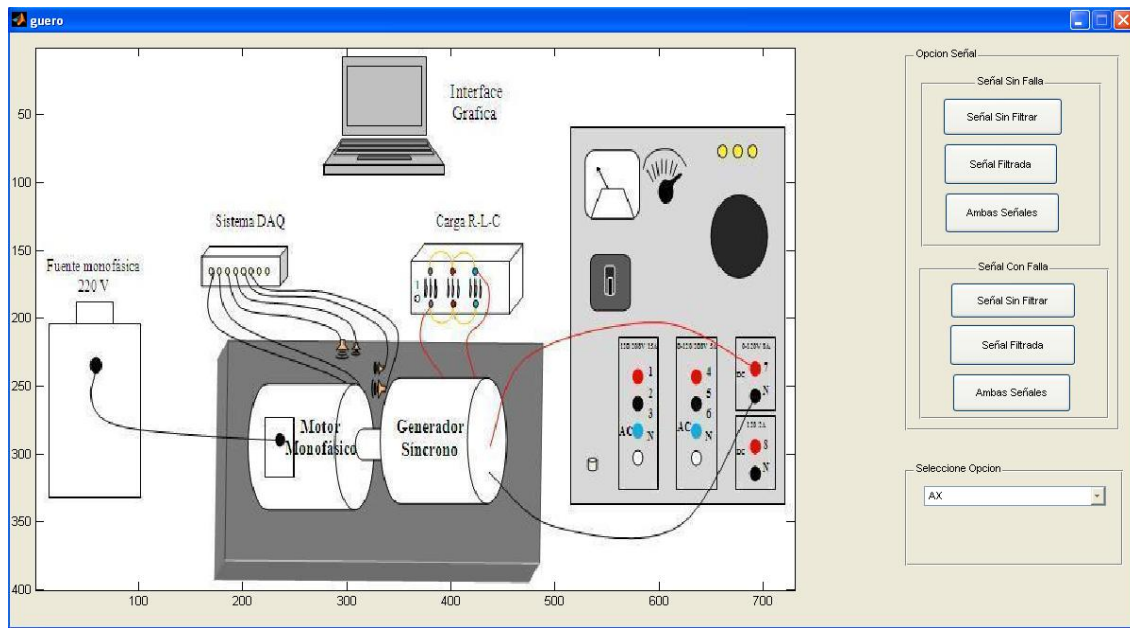


Figura C.2. Pantalla de la interfaz gráfica.

Después de haber hecho una elección de “*Opción señal*”, se seleccionan algunas de las opciones que nos marca el recuadro de “*Seleccione opción*” pudiendo escoger en una amplia gama de alternativas con respecto a la señal que se desea desplegar y que podemos ir variando mientras la función de *pushbutton* se mantiene.

De la sección de la pantalla principal, una opción de un menú automático (*popup*), aparece, según se indica en el diagrama de bloques de la figura C.3, mientras que en la tabla C.1 se muestran las funciones de MatLab empleadas por cada opción. Si no se selecciona ninguno como valor predefinido el programa muestra la gráfica del acelerómetro en el eje horizontal.

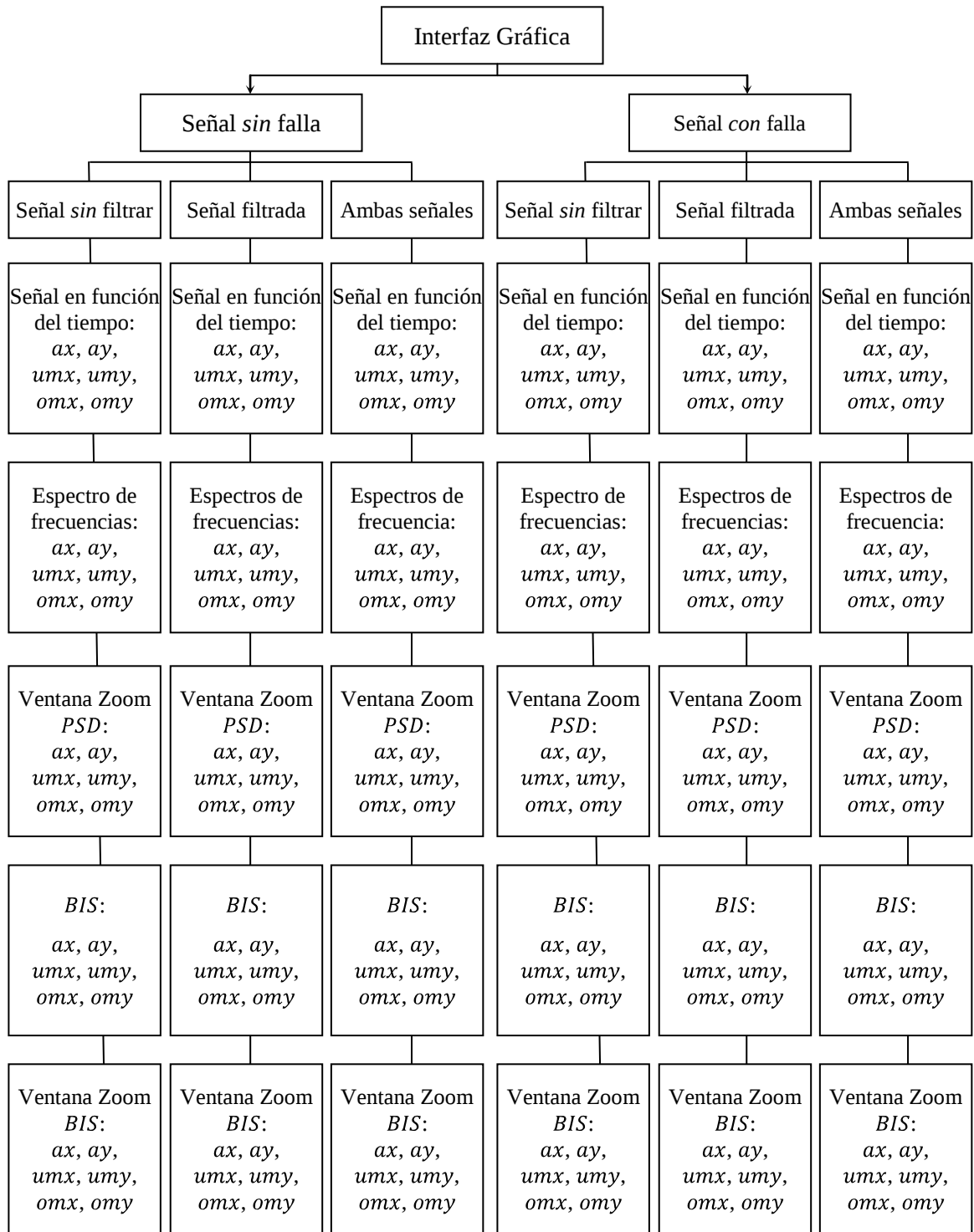


Figura C.3. Organización a bloques del Software.

Tabla C.1. Opciones de la Interfaz gráfica y funciones de MatLab utilizadas

Opción	Funciones de MatLab empleadas
1. <i>ax</i> 2. <i>ay</i> 3. <i>umx</i> 4. <i>umy</i> 5. <i>omx</i> 6. <i>omy</i>	<code>load ('function.CSV') ;</code> <code>mag_ax1=ax1-mean(ax1) ;</code> <code>[b1,a1]=ellip(4,0.5,20,0.56) ;</code> <code>mag_fax1=filter(b1,a1,mag_ax1) ;</code> filtro pasa bajas
7. <i>PSD ax</i> 8. <i>PSD ay</i> 9. <i>PSD umx</i> 10. <i>PSD umy</i> 11. <i>PSD omx</i> 12. <i>PSDomy</i>	<code>fft_ax1=abs(fft(mag_ax1)) ;</code> <code>fft_ax1=fft_ax1(1:muestras/2) ;</code> <code>fft_ax1(1) =0;</code> <code>frecuencia_ax1=(0:length(fft_ax1) -1) *fm/muestras;</code>
13. Ventana Zoom <i>PSD ax</i> 14. Ventana Zoom <i>PSD ay</i> 15. Ventana Zoom <i>PSD umx</i> 16. Ventana Zoom <i>PSD umy</i> 17. Ventana Zoom <i>PSD omx</i> 18. Ventana Zoom <i>PSD omy</i>	<code>holdon;</code> <code>x1y1=[];</code> <code>n1=0;</code> <code>for i=1:2</code> <code>[x1i(i),y1i(i),but]=ginput(1) ;</code> <code>plot(x1i(i),y1i(i),'r*') ;</code> <code>n1=n1+1;</code> <code>x1y1(:,n1) =[x1i(i) ;y1i(i)];</code> <code>end</code> <code>line([x1i(1) x1i(2) x1i(2) x1i(1) x1i(1)],</code> <code>[y1i(1) y1i(1) y1i(2) y1i(2) y1i(1)]) ;</code> <code>if y1i(1) >y1i(2) ;</code> <code>axis([x1i y1i(2) y1i(1)]) ;</code> <code>else y1i(1) <y1i(2) ;</code> <code>axis([x1i y1i(1) y1i(2)]) ;</code> <code>end</code> <code>tiemponuevo1=find(tiempo1>=x1i(1)</code> <code>&tiempo1<=x1i(2)) ;</code> <code>ynuevo1=fft_ax1(tiemponuevo1) ;</code>
19. <i>BIS ax</i> 20. <i>BIS ay</i> 21. <i>BIS umx</i> 22. <i>BIS umy</i> 23. <i>BIS omx</i> 24. <i>BIS omy</i>	<code>BISPECD_ax1=(bispecd(mag_ax1)) ;</code> <code>mesh(abs(BISPECD_ax1)) ;</code> <code>colorbar</code>
25. Ventana Zoom <i>BIS ax</i> 26. Ventana Zoom <i>BIS ay</i> 27. Ventana Zoom <i>BIS umx</i> 28. Ventana Zoom <i>BIS umy</i> 29. Ventana Zoom <i>BIS omx</i> 30. Ventana Zoom <i>BIS omy</i>	<code>BISPECD_ax1=(bispecd(mag_ax1)) ;</code> <code>contour(abs(BISPECD_ax1)) ;</code> <code>colorbar</code> <code>hold on;</code> <code>x1y1=[];</code> <code>n1=0;</code>

	<pre> for i=1:2 [x1i(i),y1i(i),but]=ginput(1) ; plot(x1i(i),y1i(i),'r*') ; n1=n1+1; x1y1(:,n1) =[x1i(i) ;y1i(i)] ; end line([x1i(1) x1i(2) x1i(2) x1i(1) x1i(1)], [y1i(1) y1i(1) y1i(2) y1i(2) y1i(1)]) ; hold on; if y1i(1) >y1i(2) ; axis([x1i y1i(2) y1i(1)]) ; else y1i(1) <y1i(2) ; axis([x1i y1i(1) y1i(2)]) ; end tiemponuevo1=find(tiempo1>=x1i(1) &tiempo1<=x1i(2)) ; ynuevo1=BISPECD_ax1(tiemponuevo1) ; </pre>
--	---

C.2.1 Despliegue gráfico, acelerómetros y micrófonos

Se obtienen las gráficas de las señales de los acelerómetros y micrófonos, *sin* falla y *con* falla se muestran en función del tiempo antes del pre-procesamiento, señales filtradas y el despliegue superpuesto de las señales sin procesar así como de las señales procesadas para poder apreciar gráficamente la disminución de ruido de la señal (figura C.4).

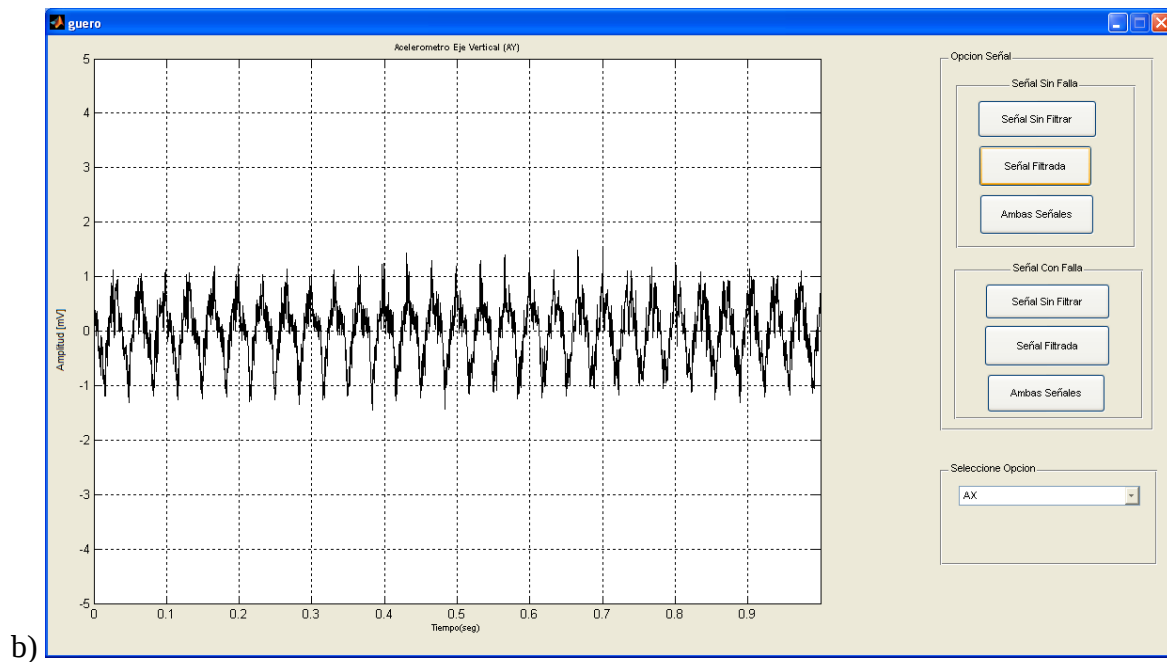
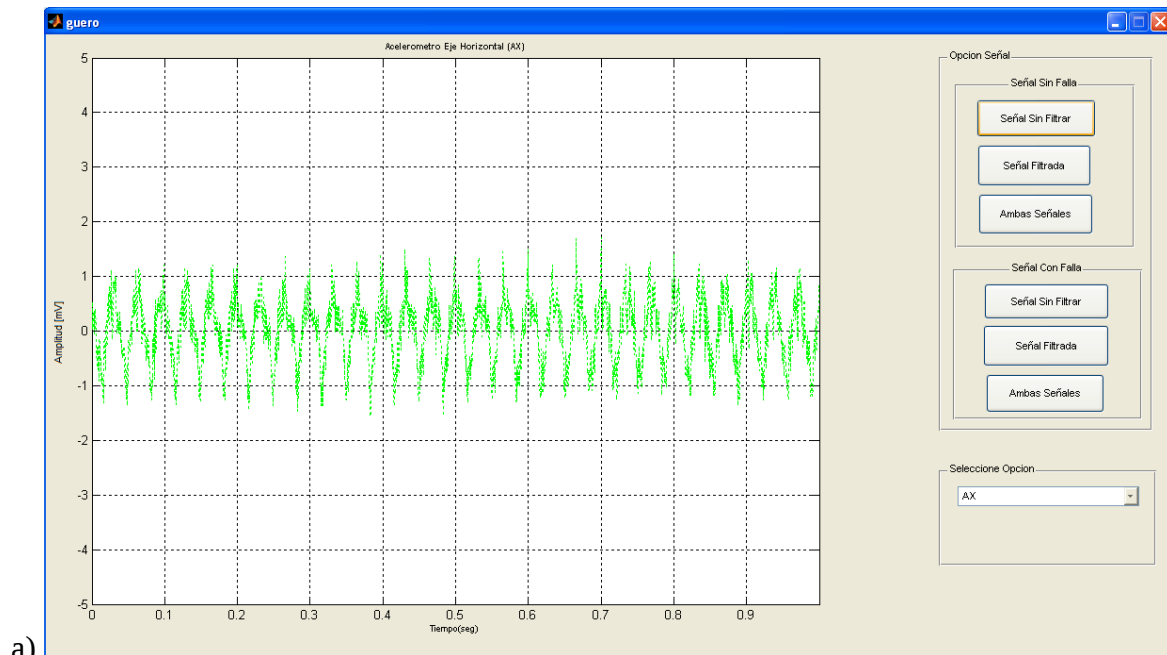


Figura C.4. Gráfica en función del tiempo de acelerómetro en el eje horizontal. *Sin falla.* (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada, (c) Ambas señales. *Con falla.* (d) Señal sin filtrar, (e) Señal filtrada, (f) Ambas señales.

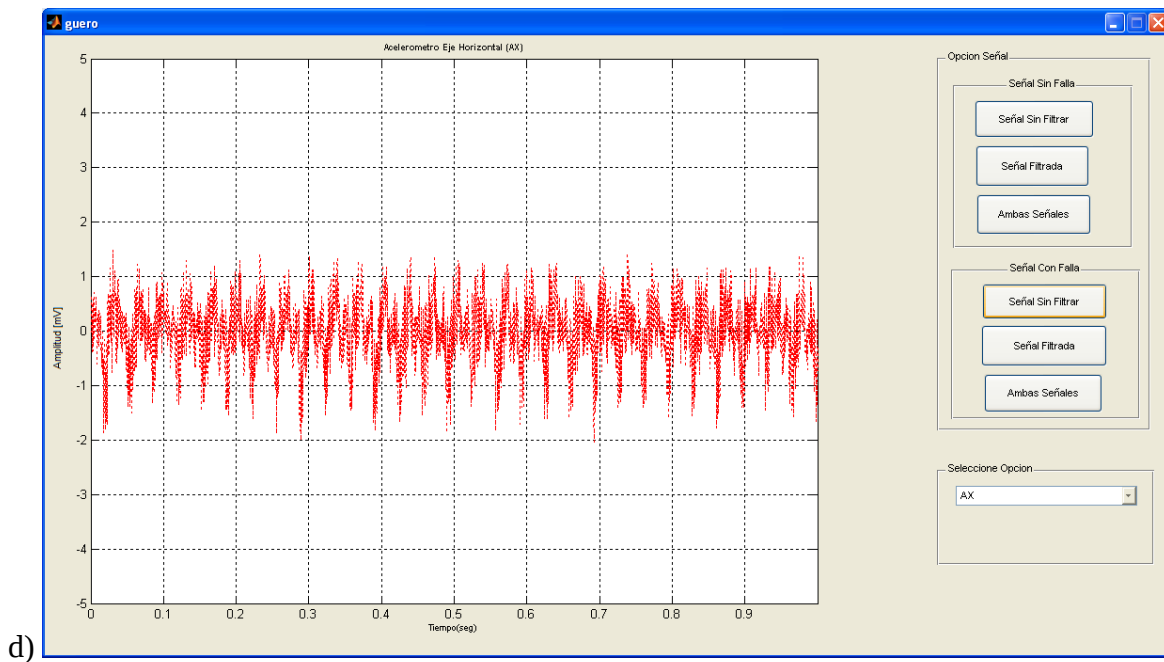
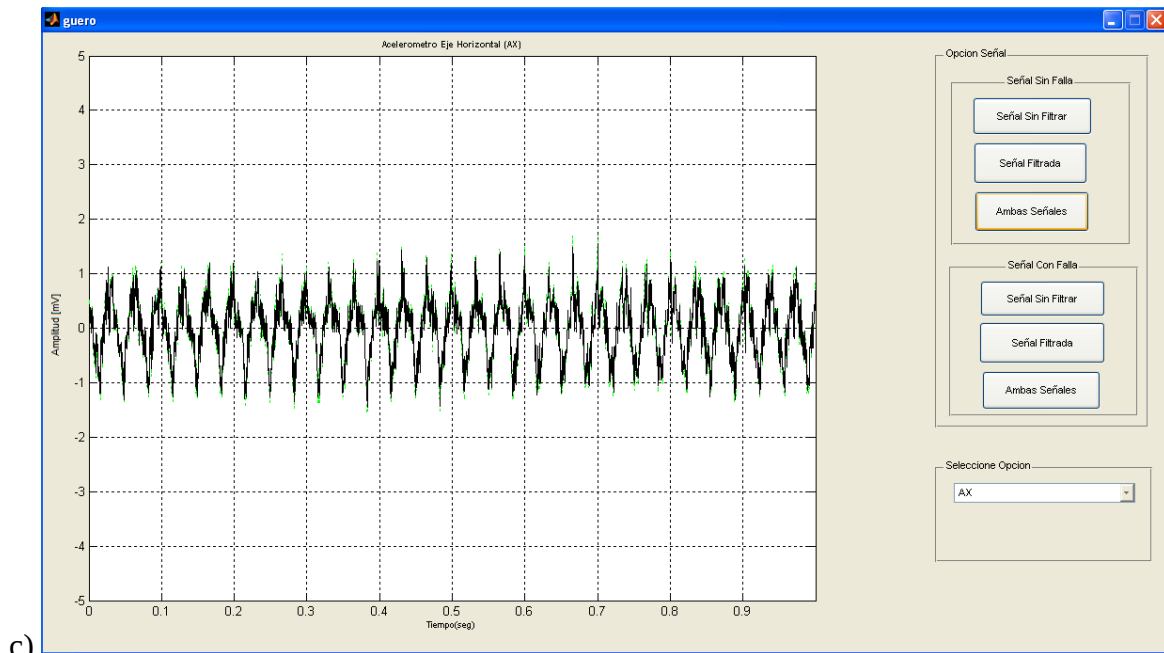


Figura C.4. continuación, Gráfica en función del tiempo de acelerómetro en el eje horizontal. *Sin falla.* (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada, (c) Ambas señales. *Con falla.* (d) Señal sin filtrar, (e) Señal filtrada, (f) Ambas señales.

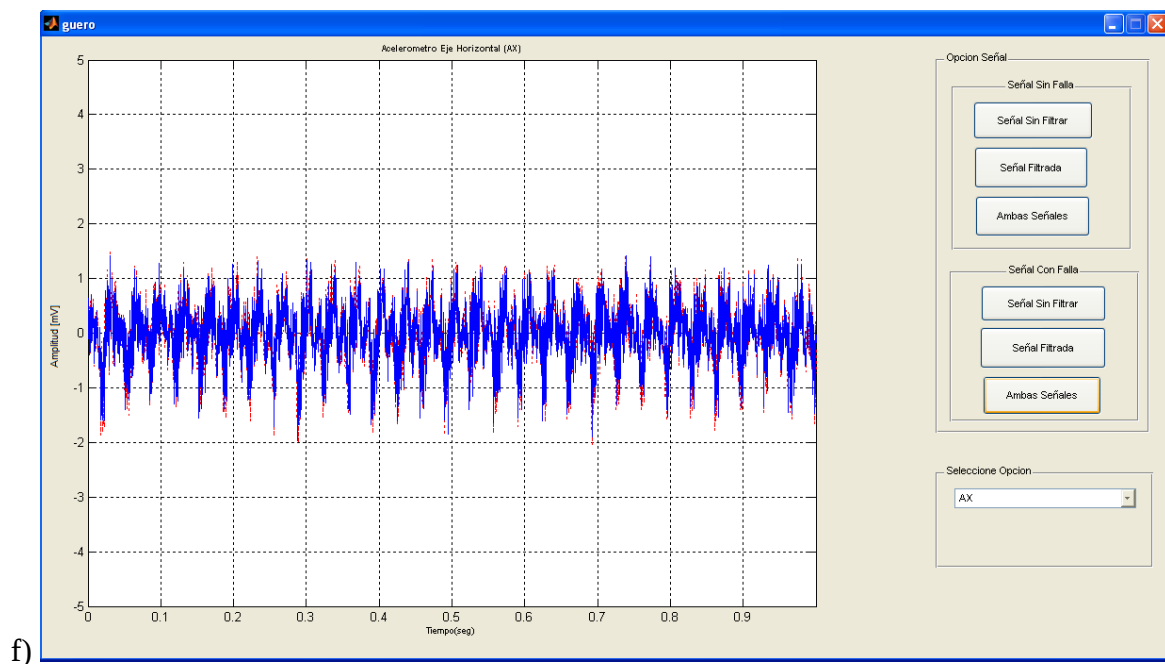
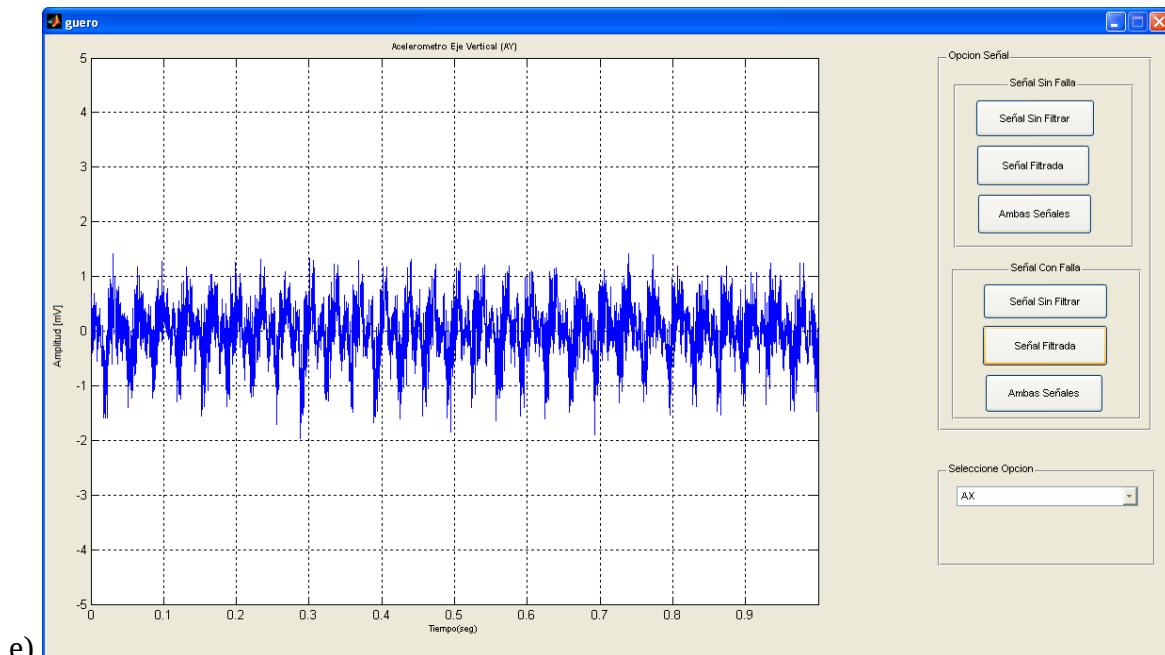


Figura C.4. continuación, Gráfica en función del tiempo de acelerómetro en el eje horizontal. *Sin* falla. (a) Señal sin filtrar, (b) Señal filtrada, (c) Ambas señales. *Con* falla. (d) Señal sin filtrar, (e) Señal filtrada, (f) Ambas señales.

C.2.2. Espectro de frecuencias de las señales seleccionadas

Se hace el análisis del espectro de frecuencias para examinar si hay alguna frecuencia de contaminación que debamos tomar en cuenta en la investigación para cada eje analizado

(figura C.5). Las frecuencias de la señal *sin* falla se encuentran contenidas en los valores esperados para el caso de un generador síncrono de las características en estudio.

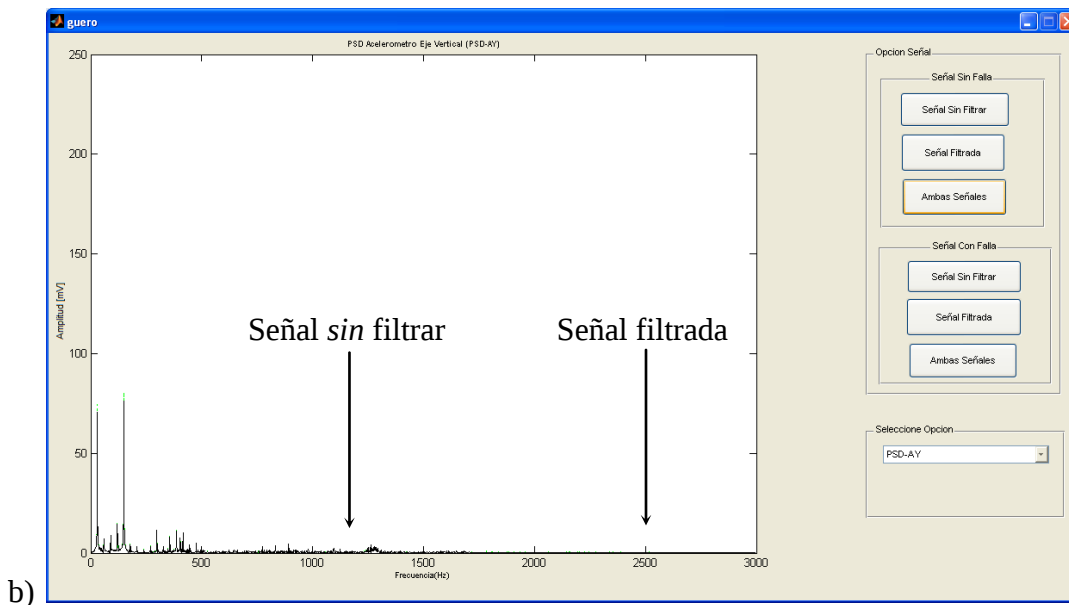
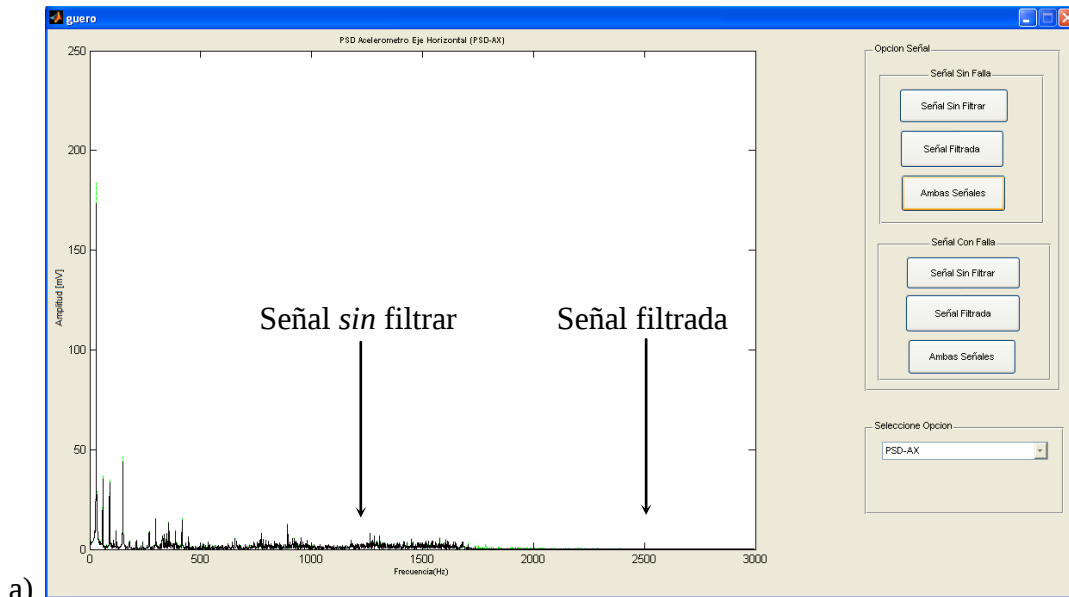


Figura C.5. Gráfica en función de la frecuencia. *Sin* falla. (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con* falla. (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

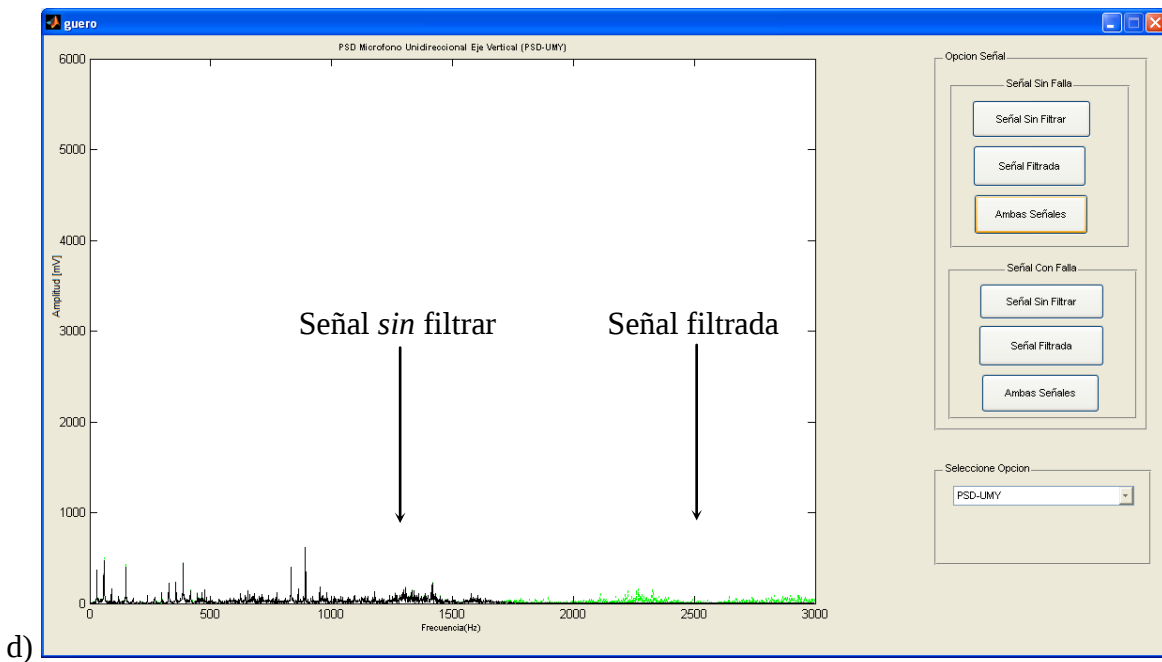
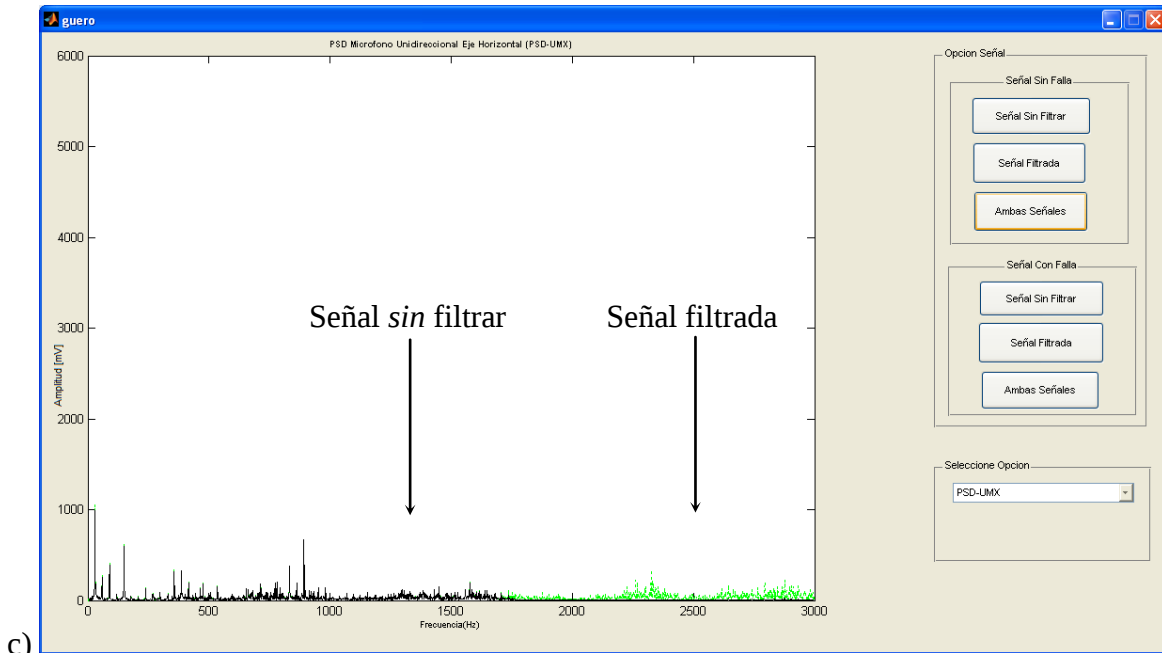


Figura C.5. continuación , Gráfica en función de la frecuencia. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con falla.* (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

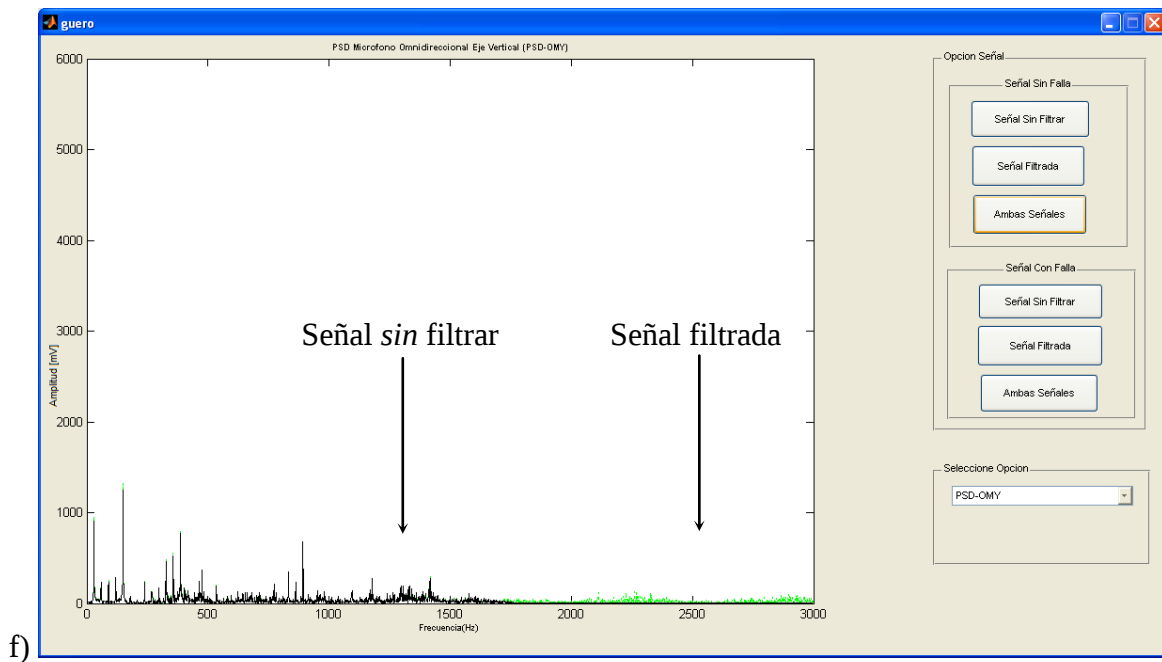
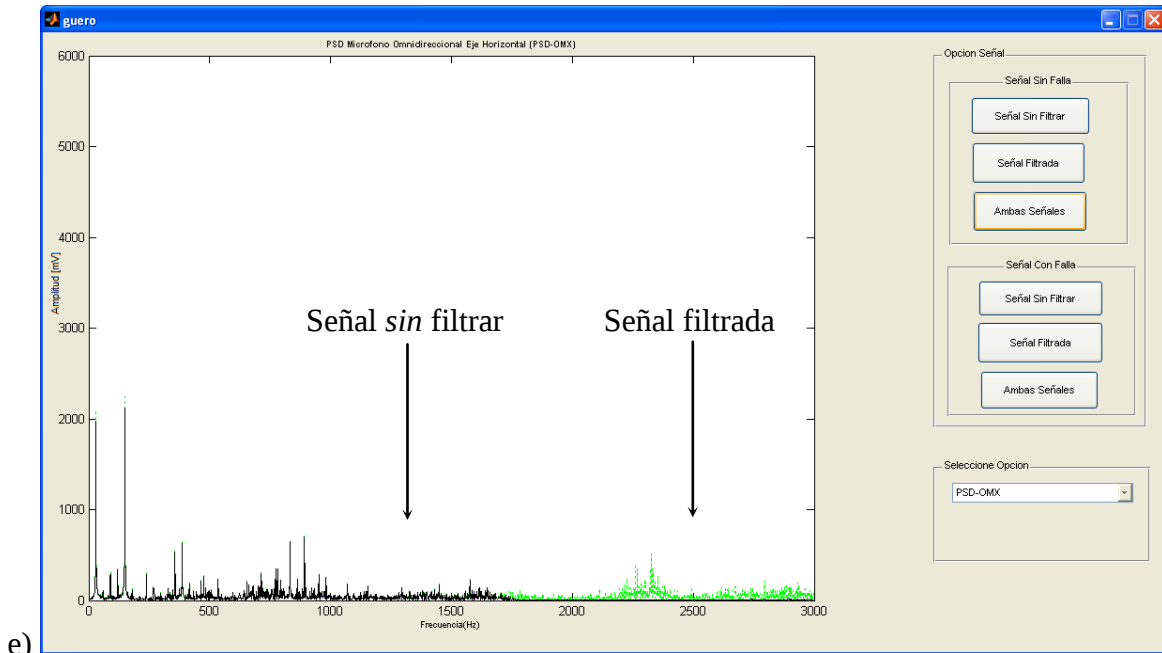


Figura C.5. continuación , Gráfica en función de la frecuencia. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con falla.* (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

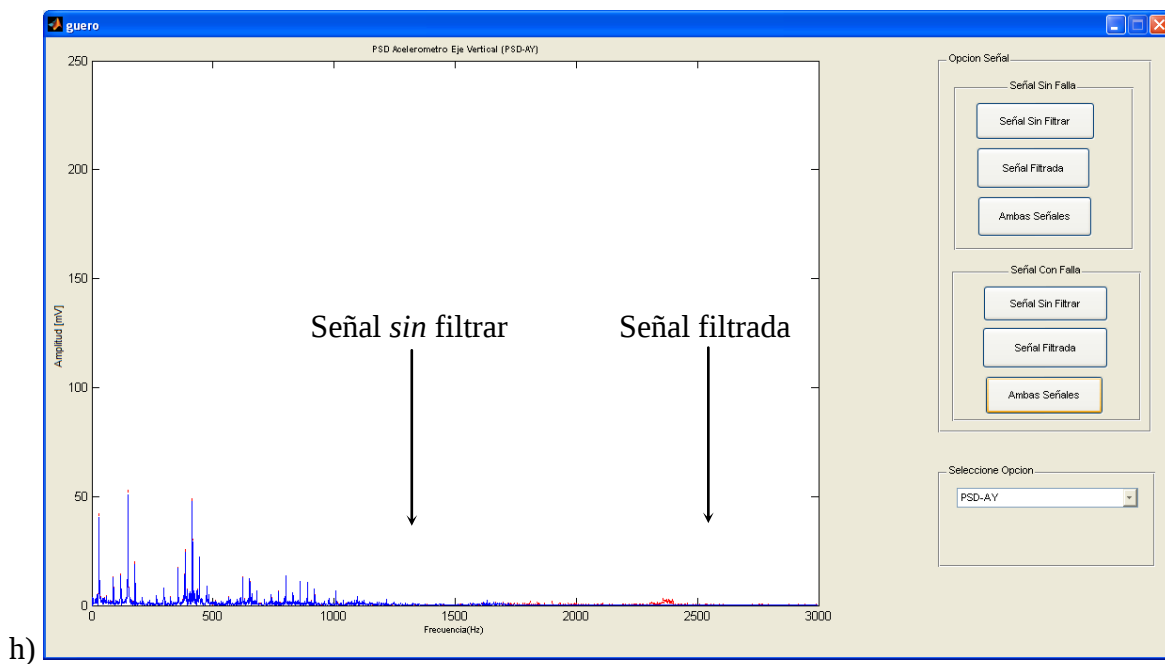
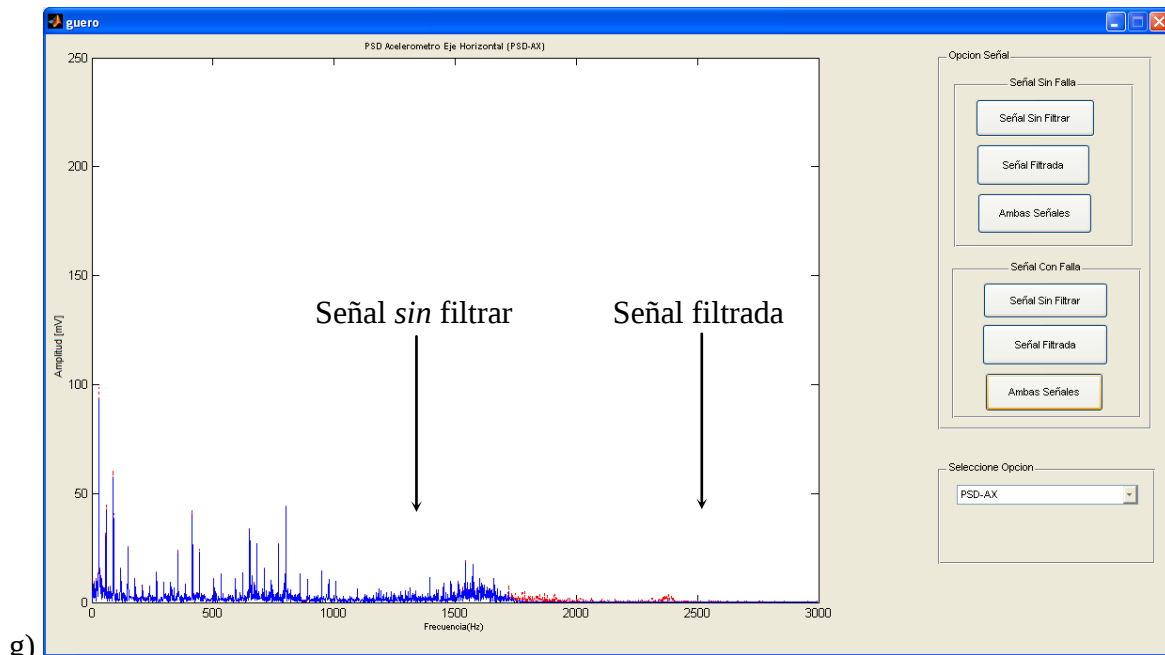


Figura C.5. continuación , Gráfica en función de la frecuencia. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con falla.* (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

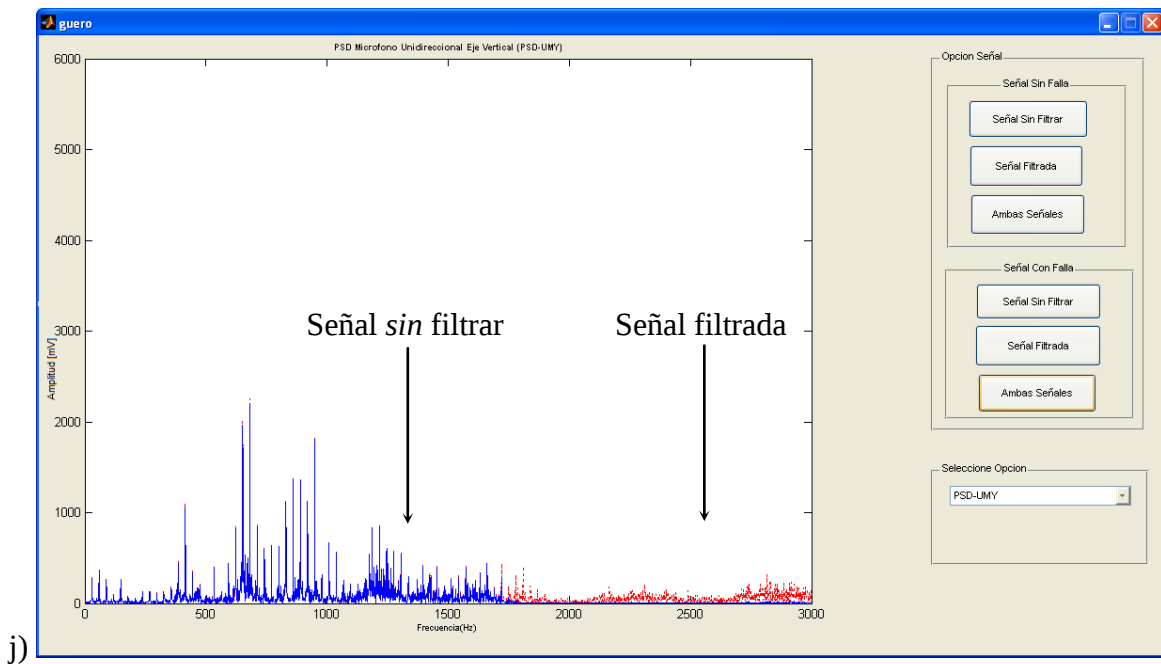
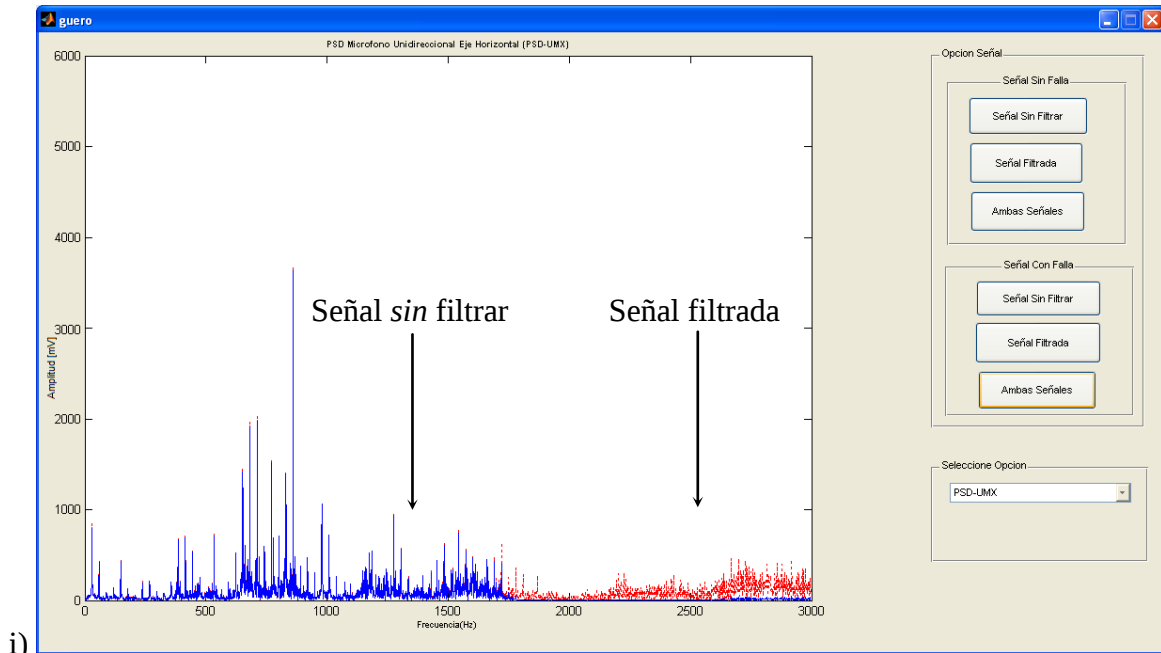


Figura C.5. continuación , Gráfica en función de la frecuencia. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

Con falla. (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

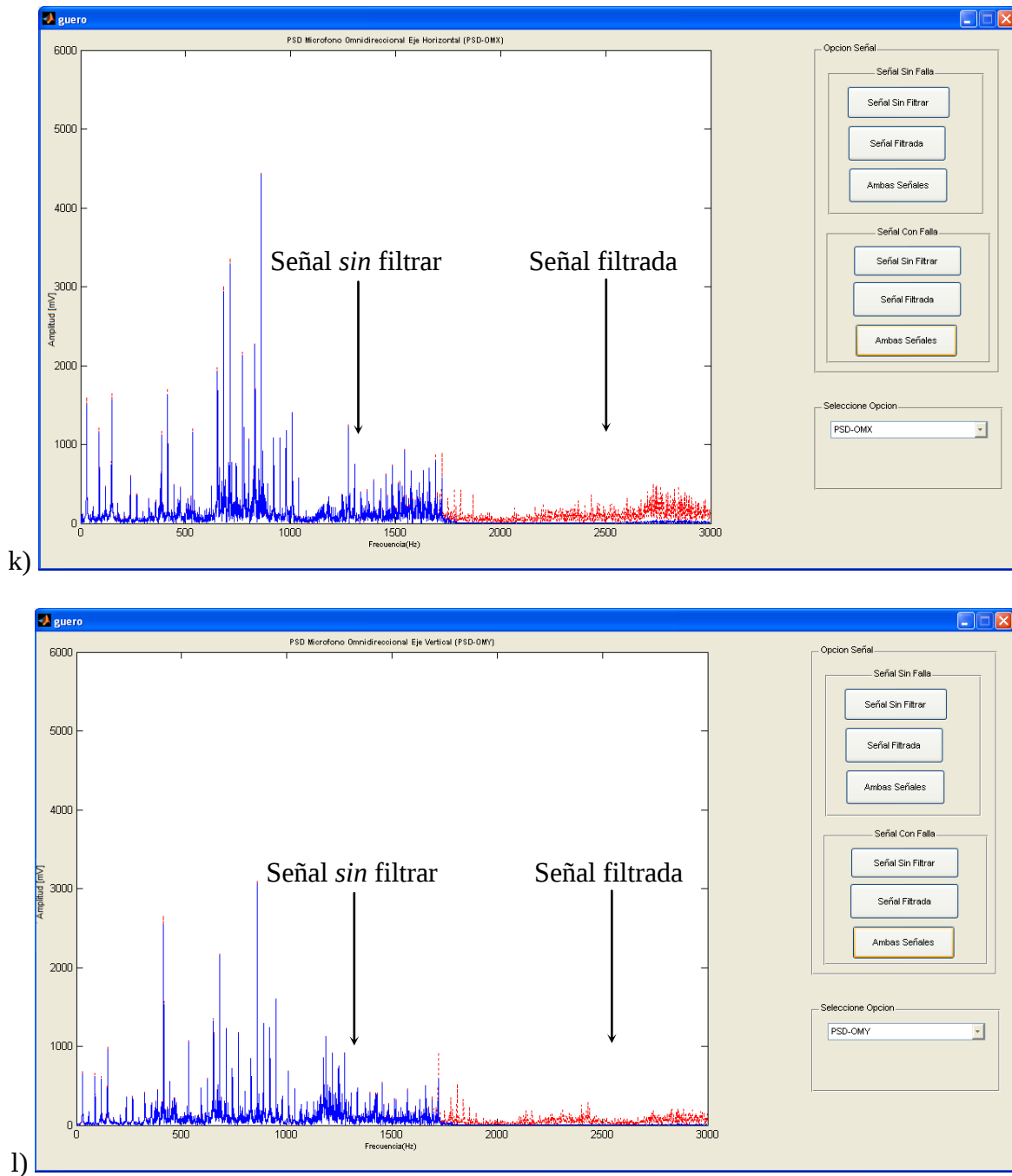
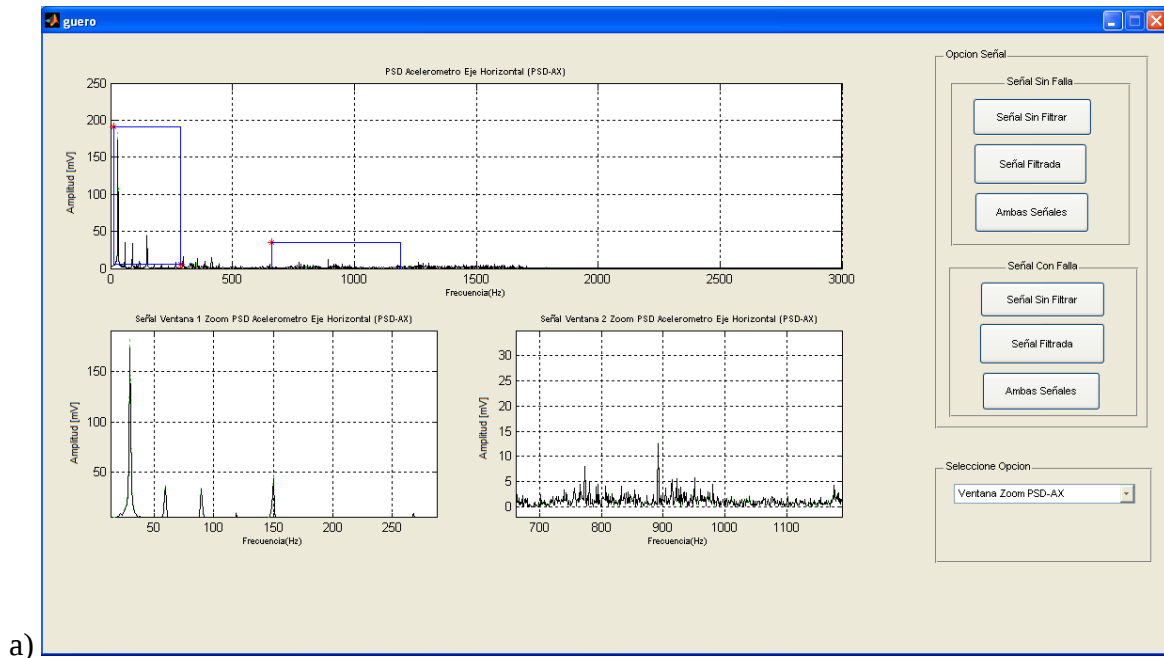


Figura C.5. continuación , Gráfica en función de la frecuencia. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con falla.* (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

C.2.2.1. Uso de Zoom

Se representa una ventana en el análisis de la señal para poder observar con detalle alguna parte de interés de esta, se emplea una ventana rectangular pudiendo hacer análisis con respecto a restricciones en el eje de frecuencias y la magnitud en forma simultánea, aplicando un zoom, es decir podemos observar la frecuencia de la señal que nos interese así como la amplitud seleccionada (figura C.6).



a)

Figura C.6. Ventanas con zoom. Sin falla. (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). Con falla. (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

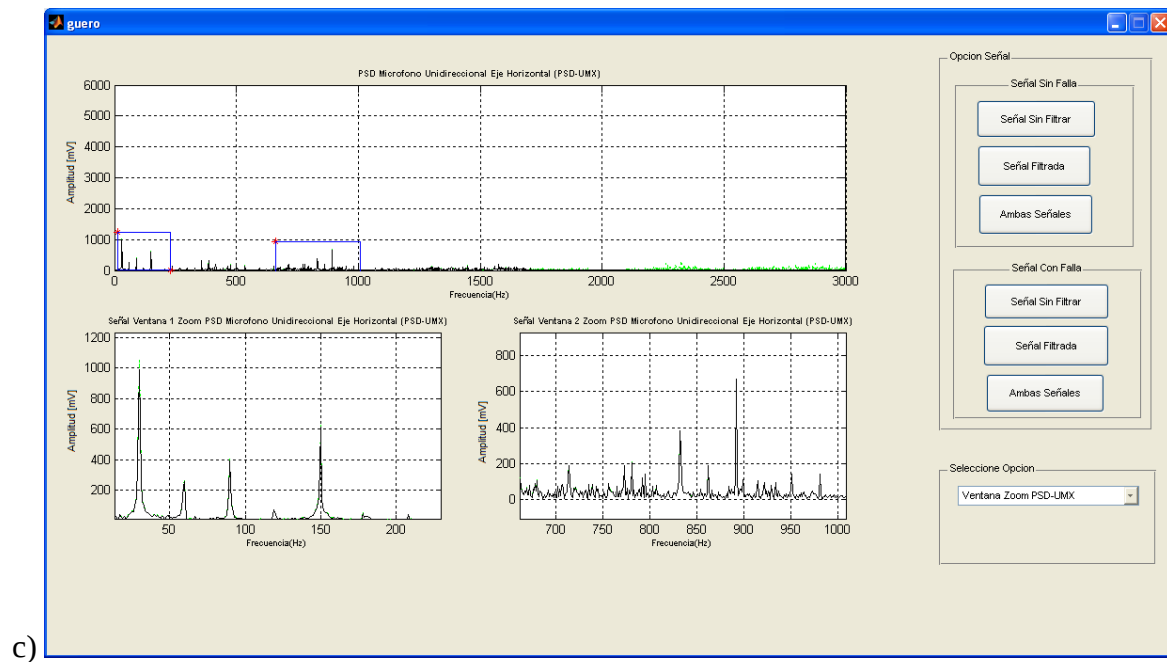
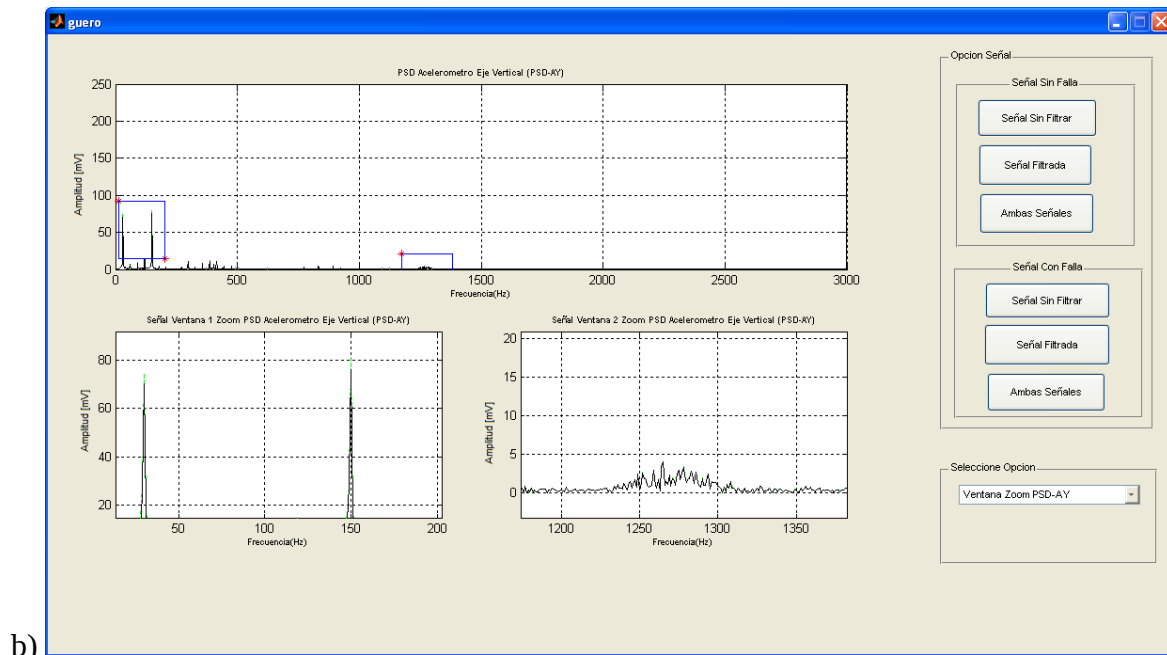


Figura C.6. continuación, Ventanas con zoom. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con falla.* (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

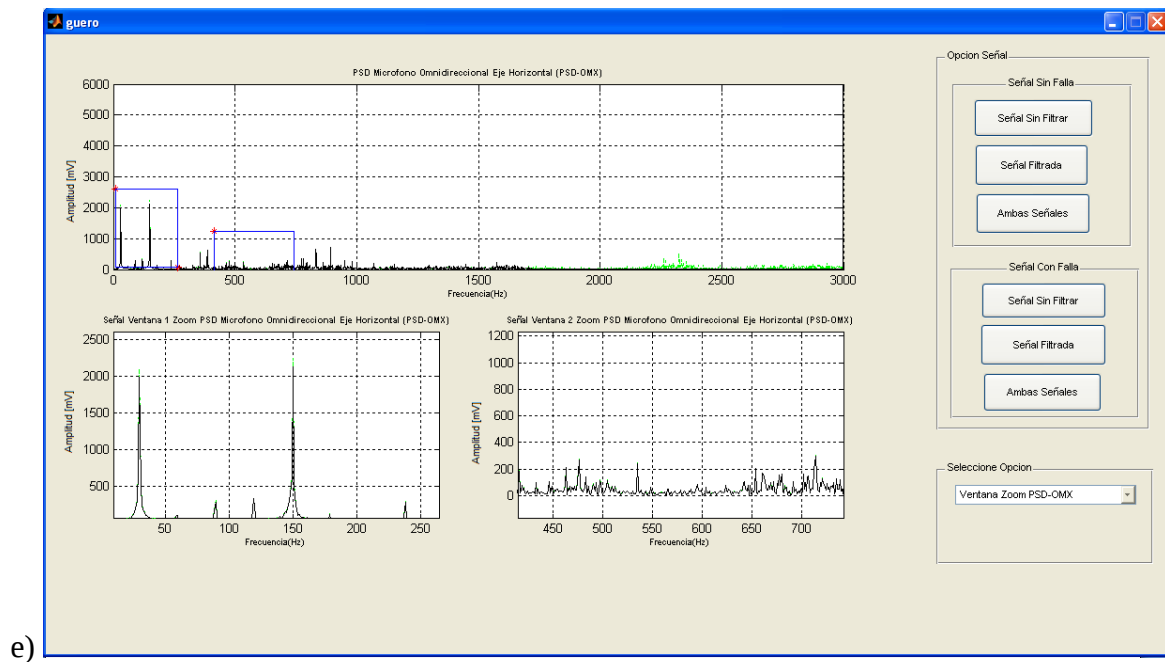
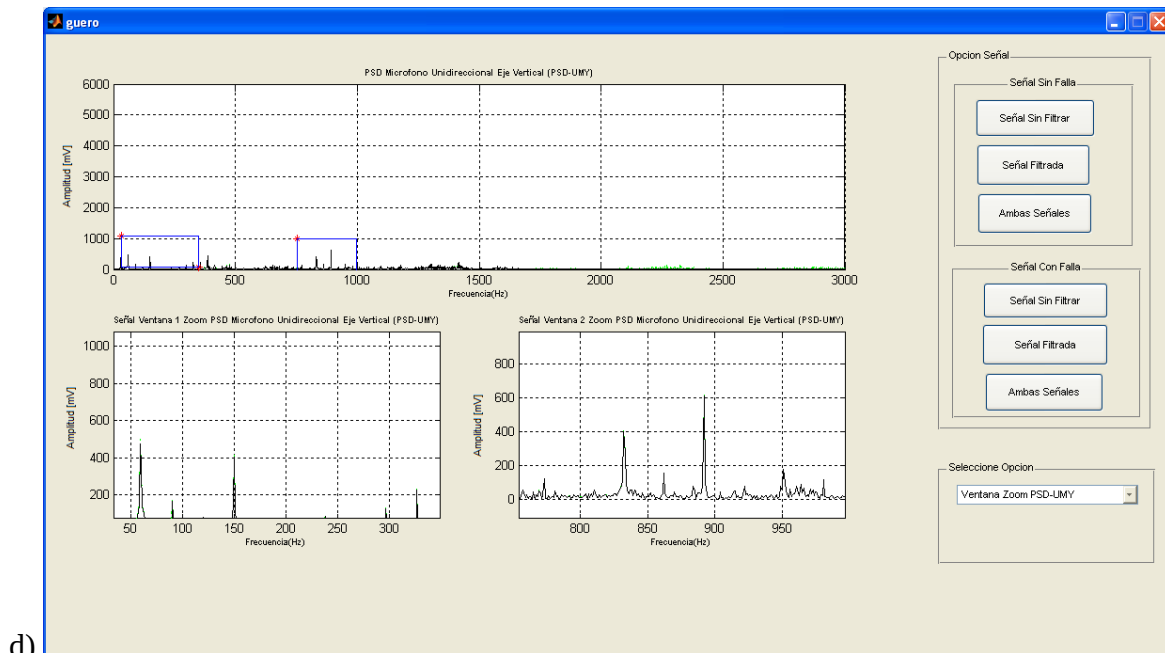


Figura C.6. continuación, Ventanas con zoom. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con falla.* (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

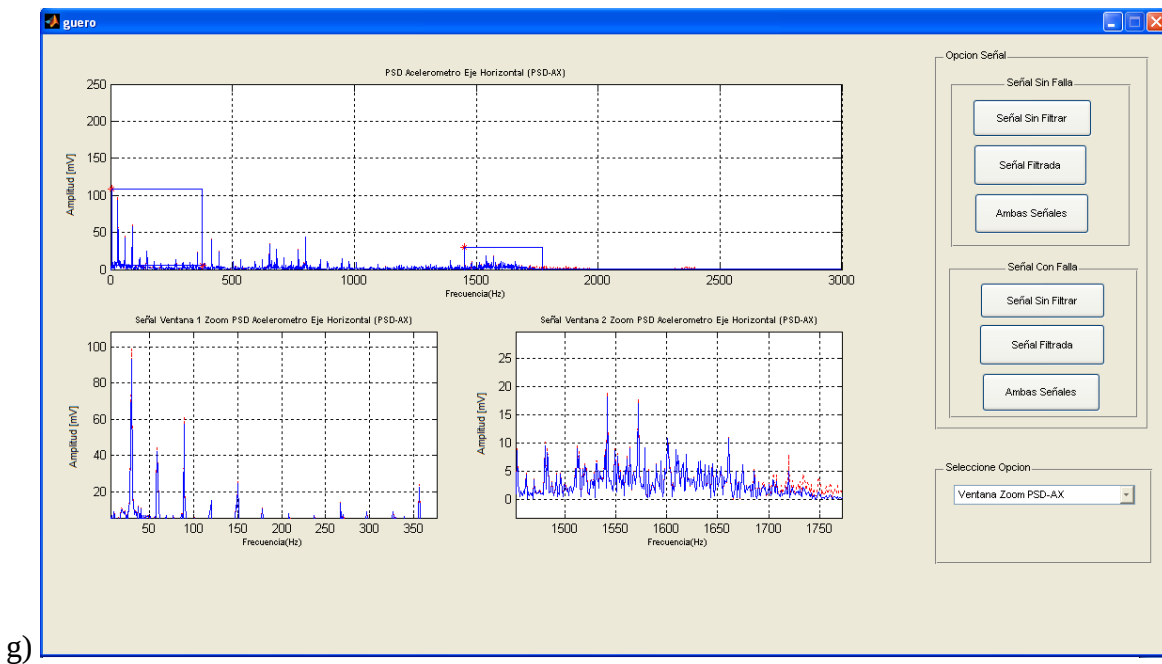
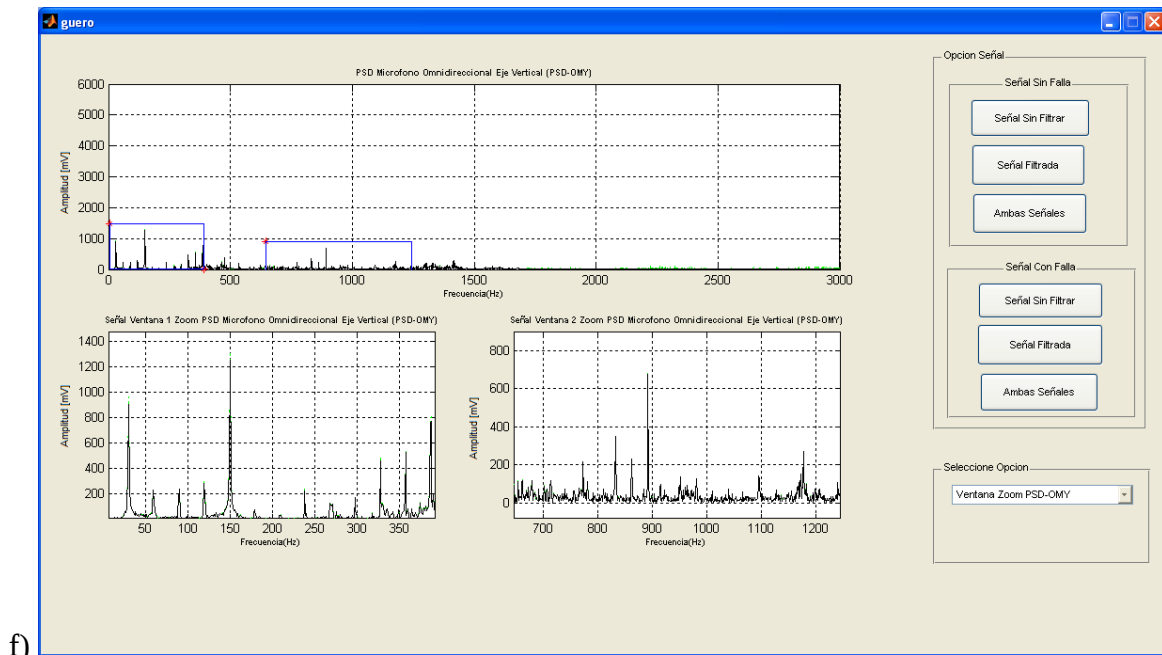


Figura C.6. continuación, Ventanas con zoom. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con falla.* (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

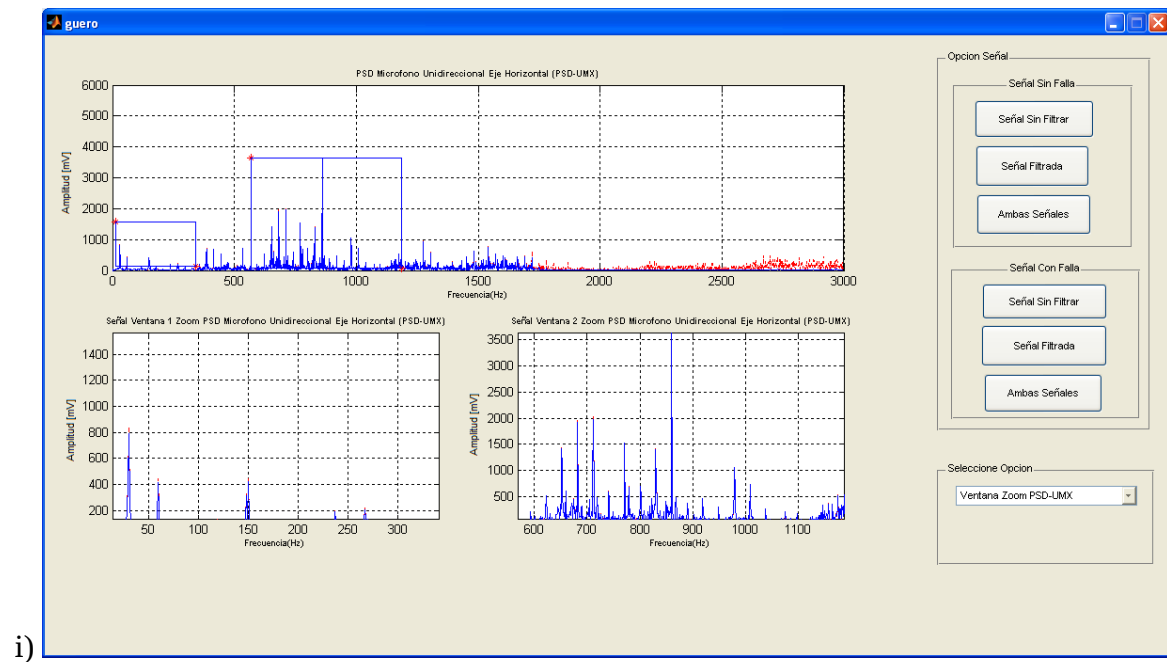
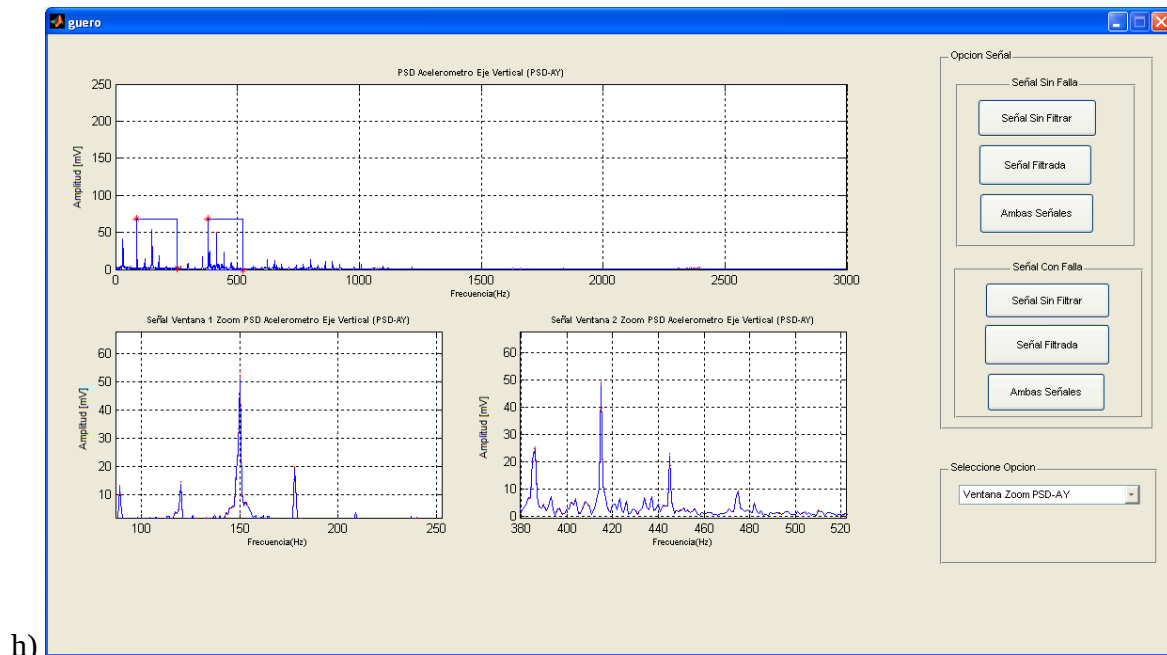


Figura C.6. continuación, Ventanas con zoom. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con falla.* (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

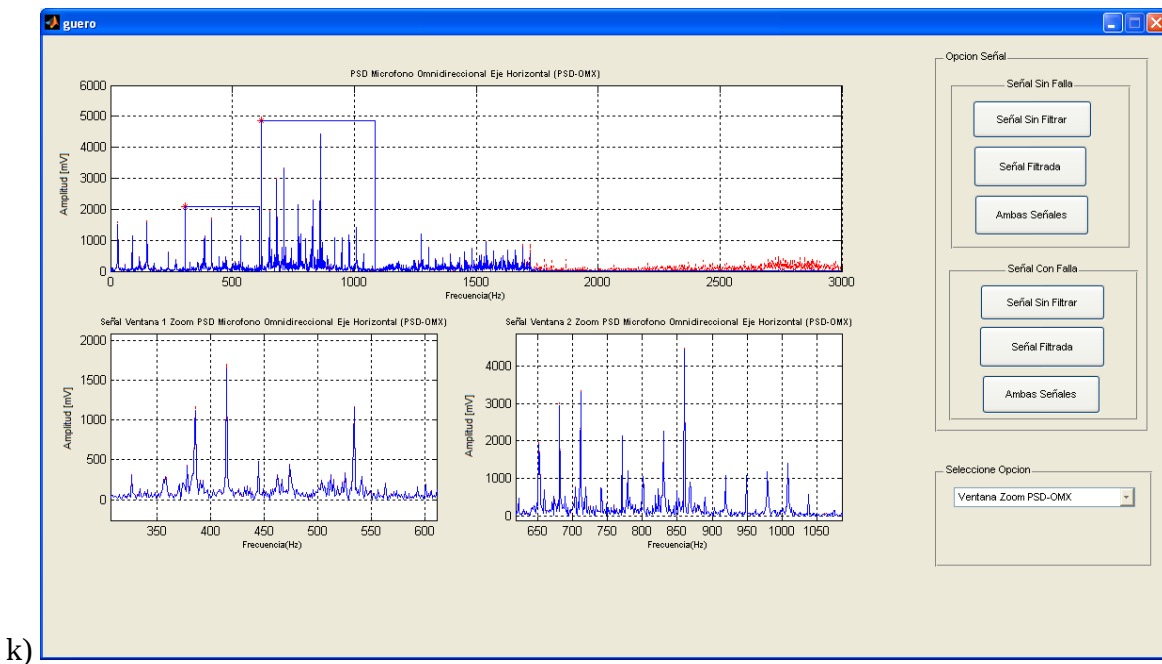
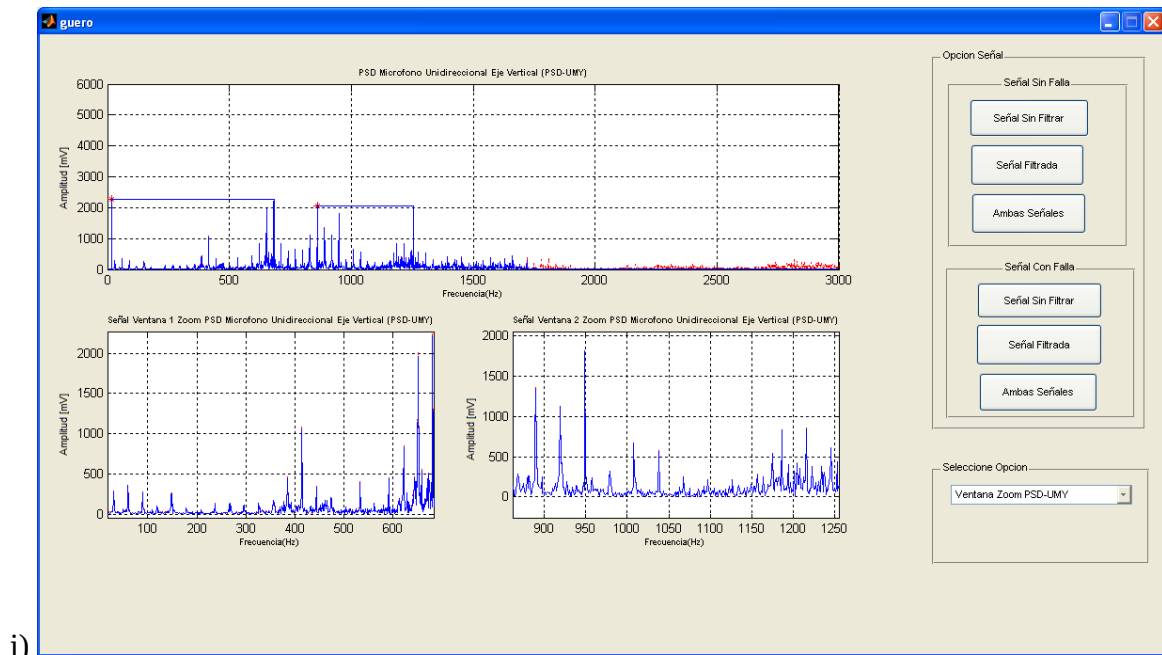
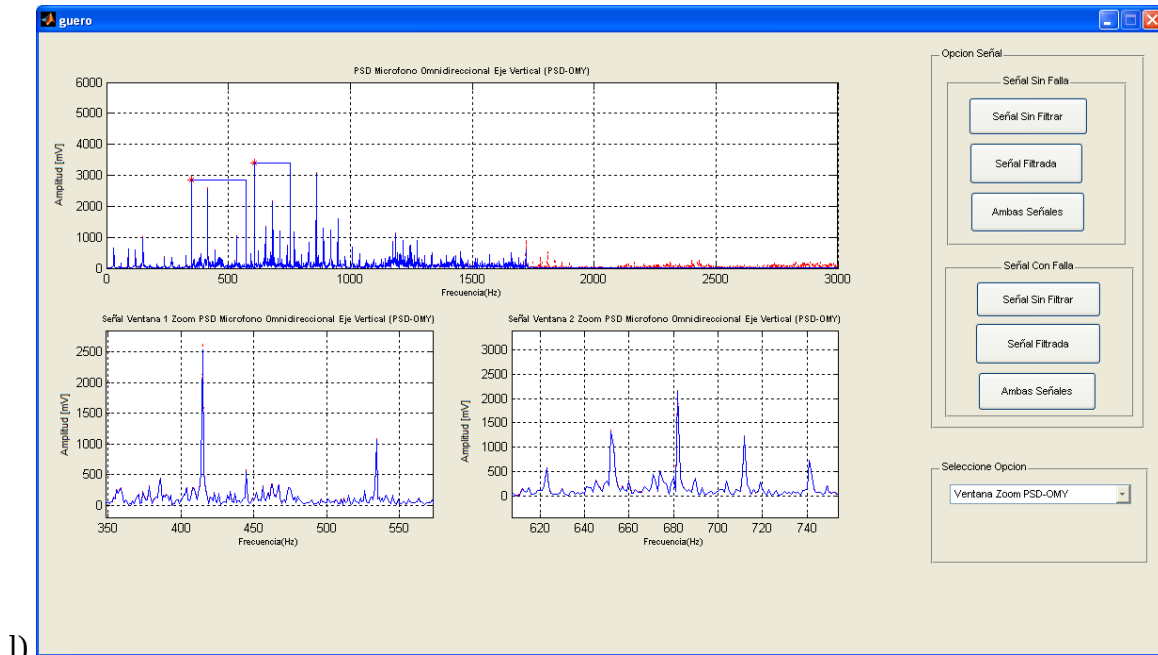


Figura C.6. continuación, Ventanas con zoom. *Sin* falla. (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con* falla. (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).



l)

Figura C.6. continuación, Ventanas con zoom. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con falla.* (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

C.2.3. Biespectros de las señales seleccionadas

Se hace el análisis del biespectro para examinar si hay alguna frecuencia de contaminación que debamos tomar en cuenta en la investigación para cada eje analizado (figura C.7). Las frecuencias de la señal *sin* falla se encuentran contenidas en los valores esperados para el caso de un generador síncrono de las características en estudio.

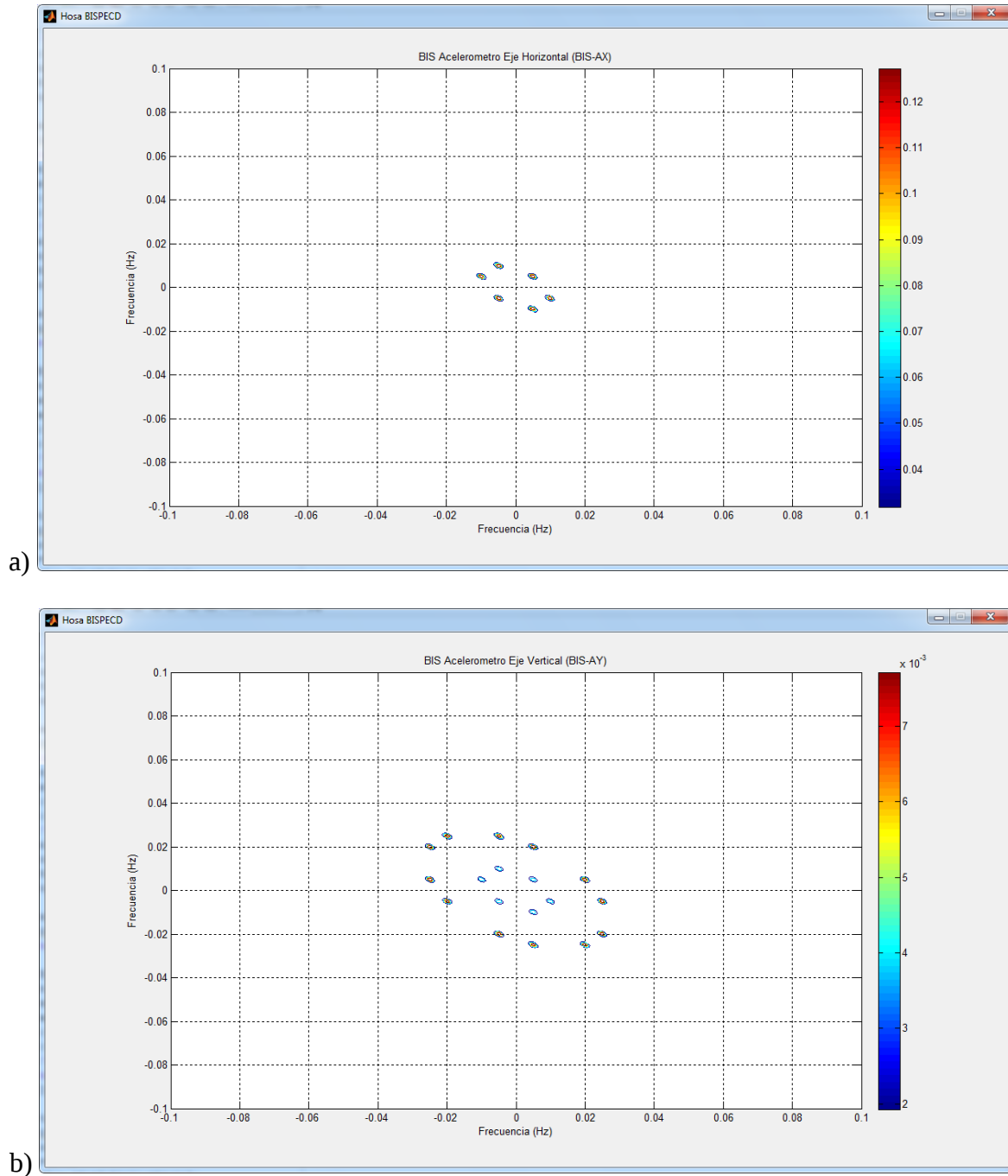


Figura C.7. Gráfica en amplitud del biespectro. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con falla.* (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

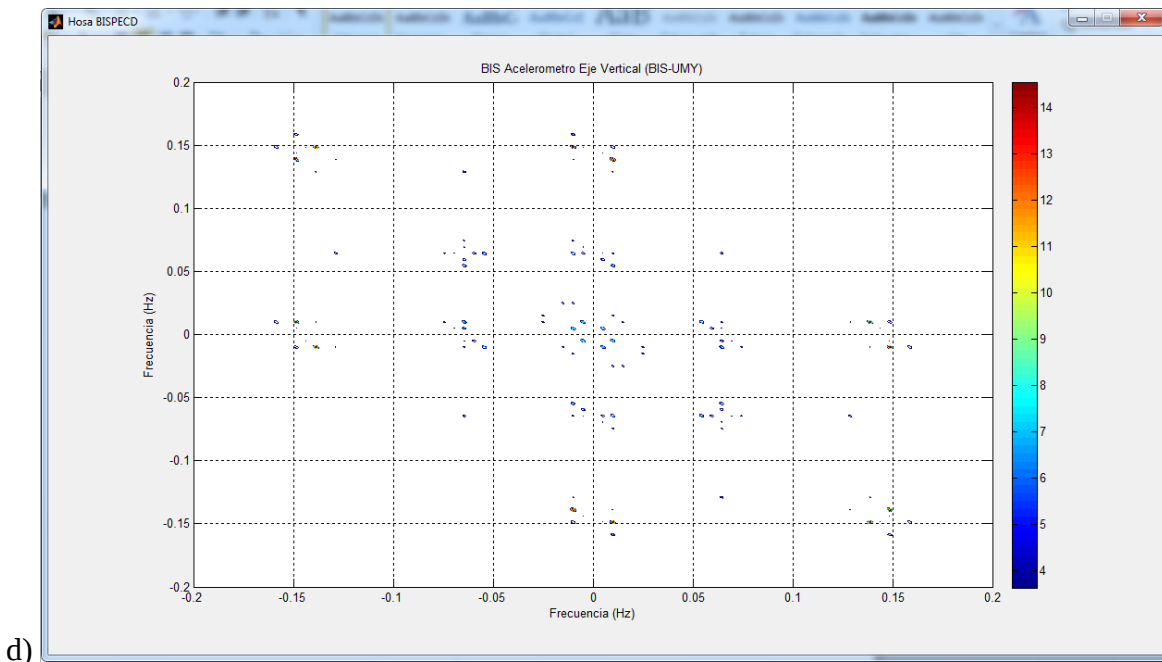
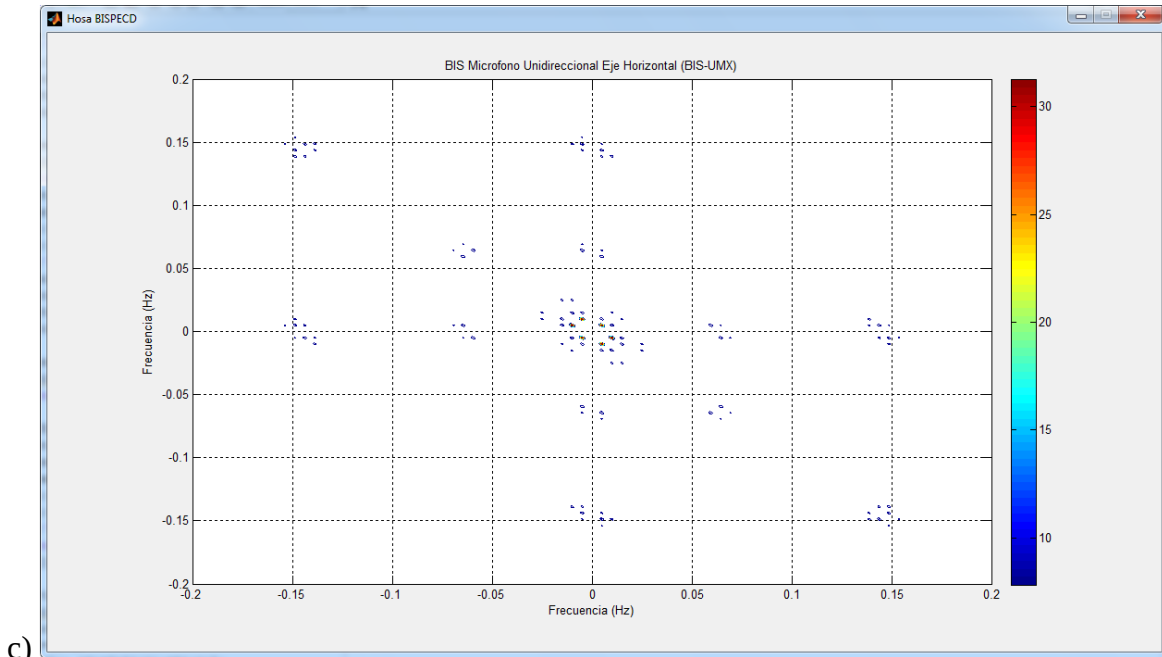


Figura C.7. continuación, Gráfica en amplitud del biespectro. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con falla.* (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

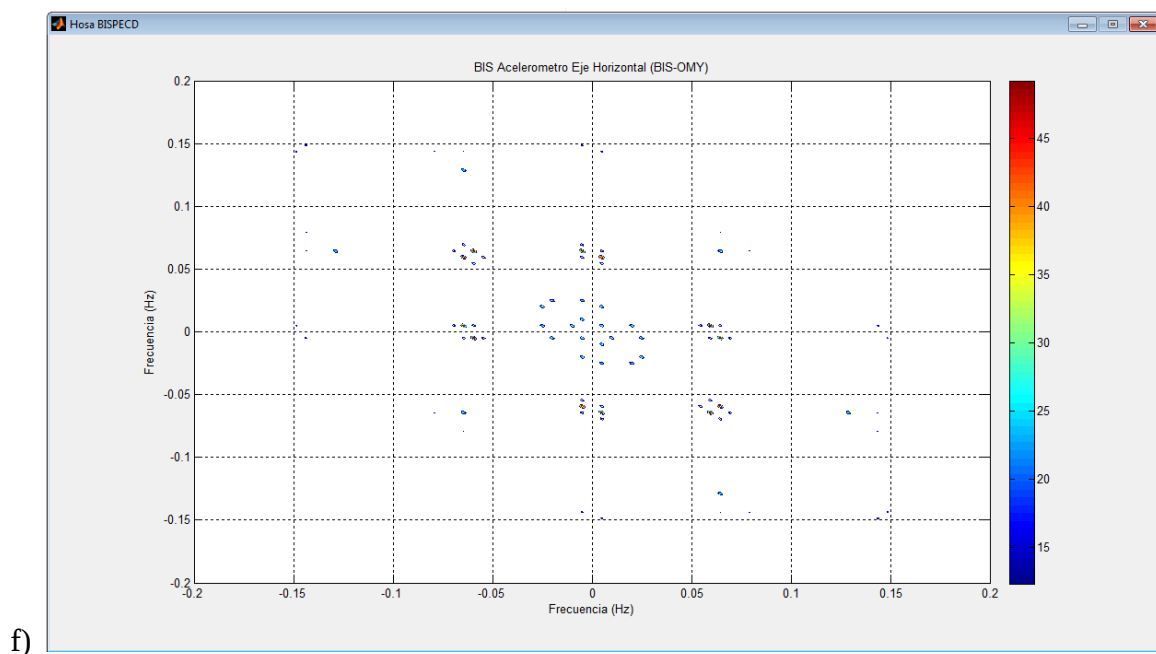
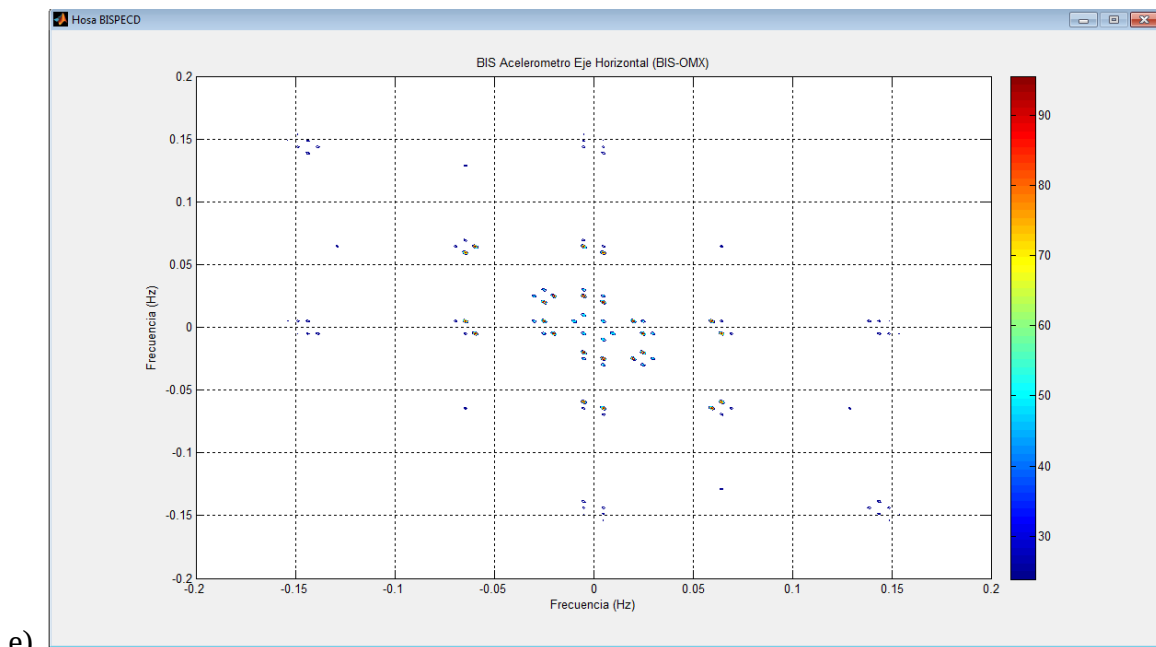


Figura C.7. continuación, Gráfica en amplitud del biespectro. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).
Con falla. (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

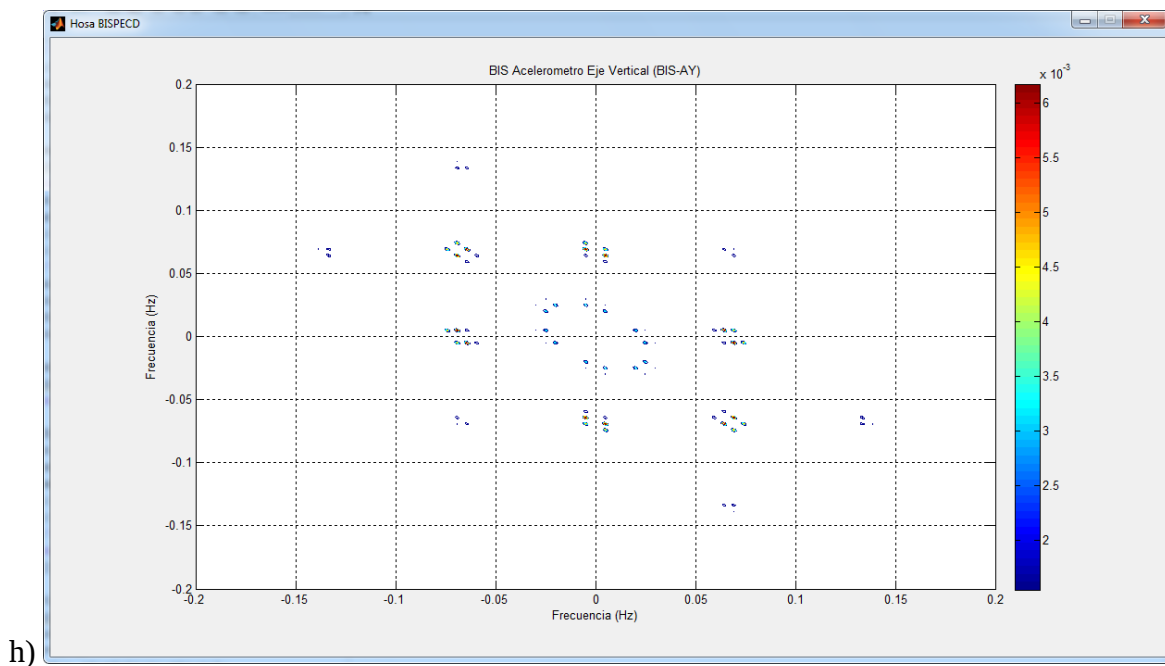
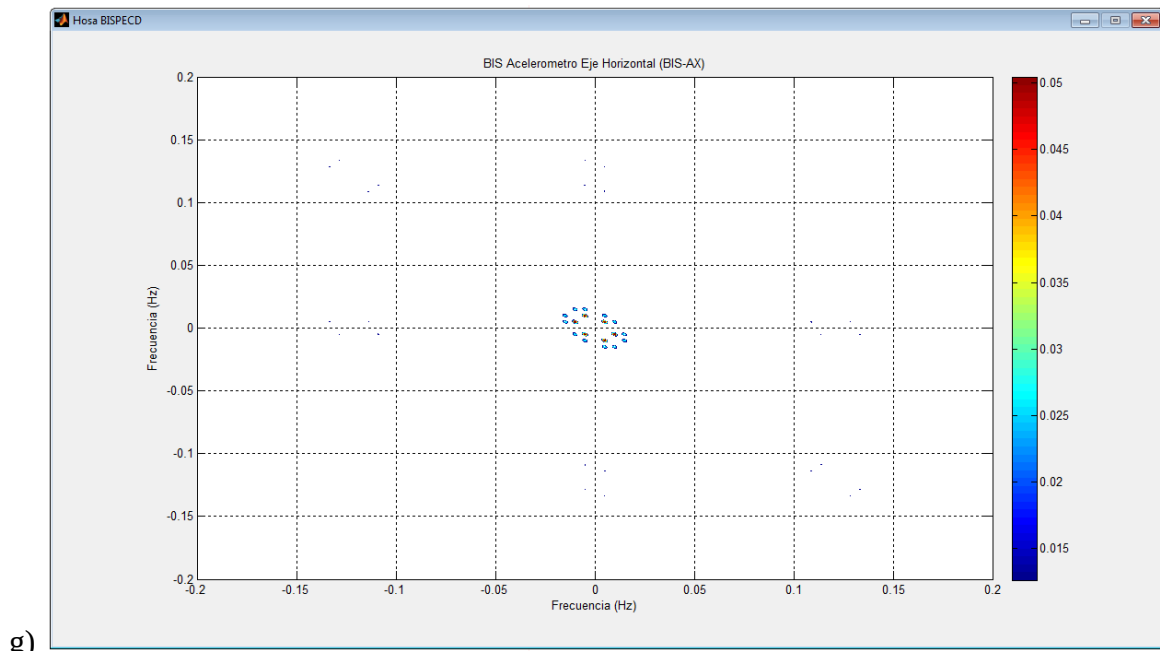


Figura C.7. continuación, Gráfica en amplitud del bispectro. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con falla.* (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

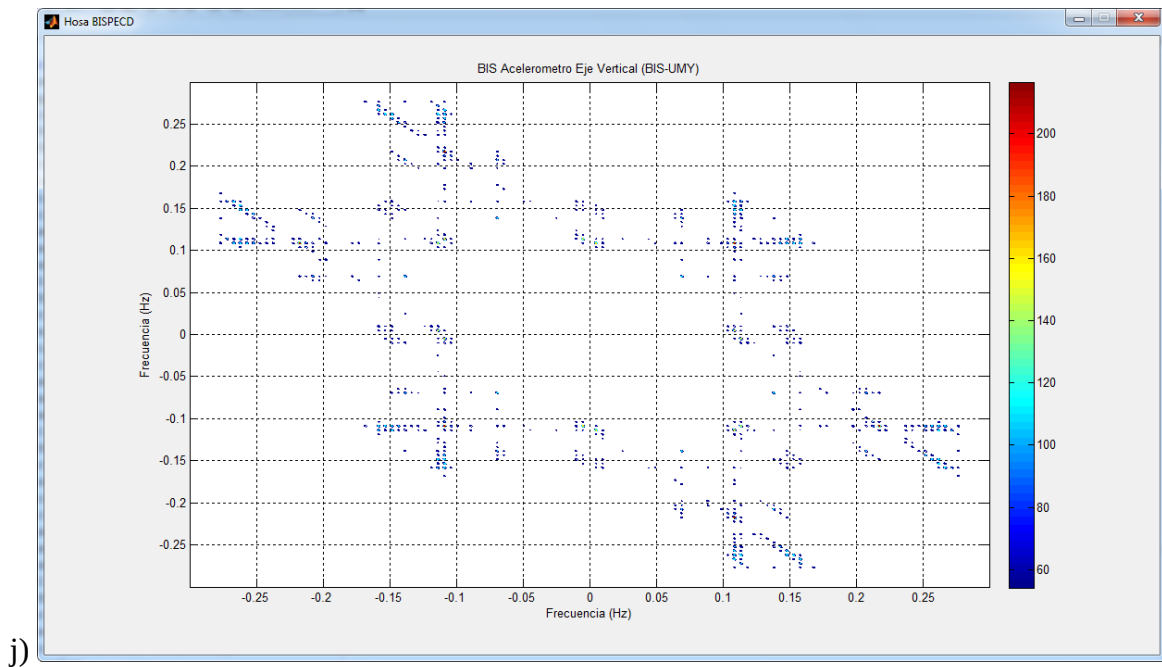
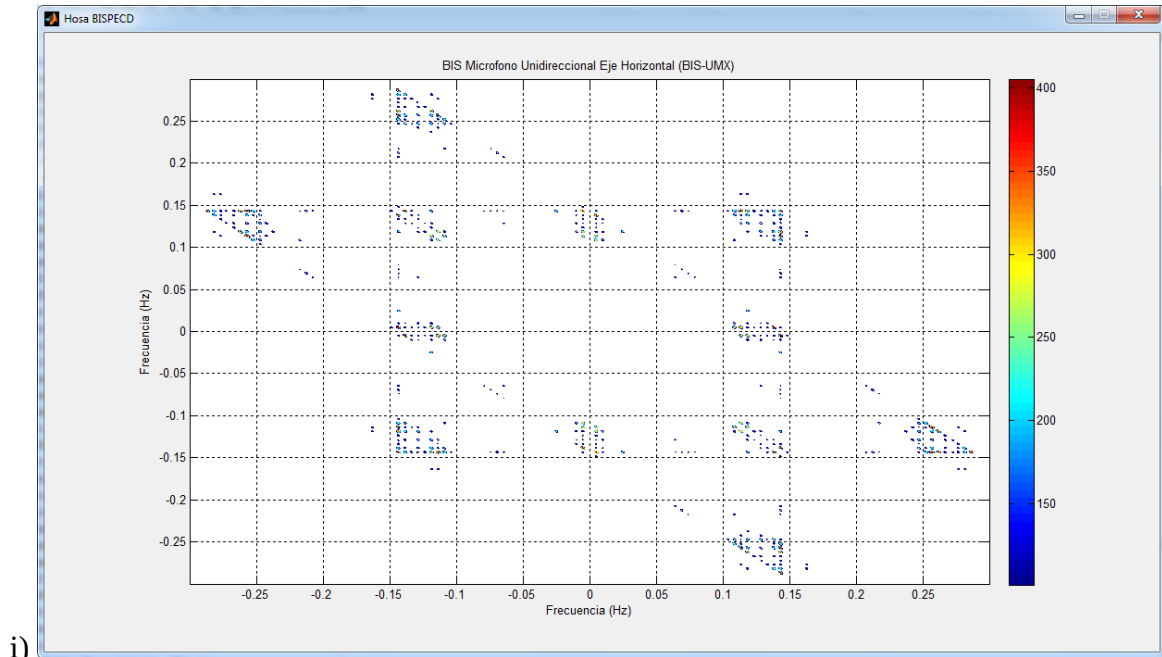


Figura C.7. continuación, Gráfica en amplitud del biespectro. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).
Con falla. (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

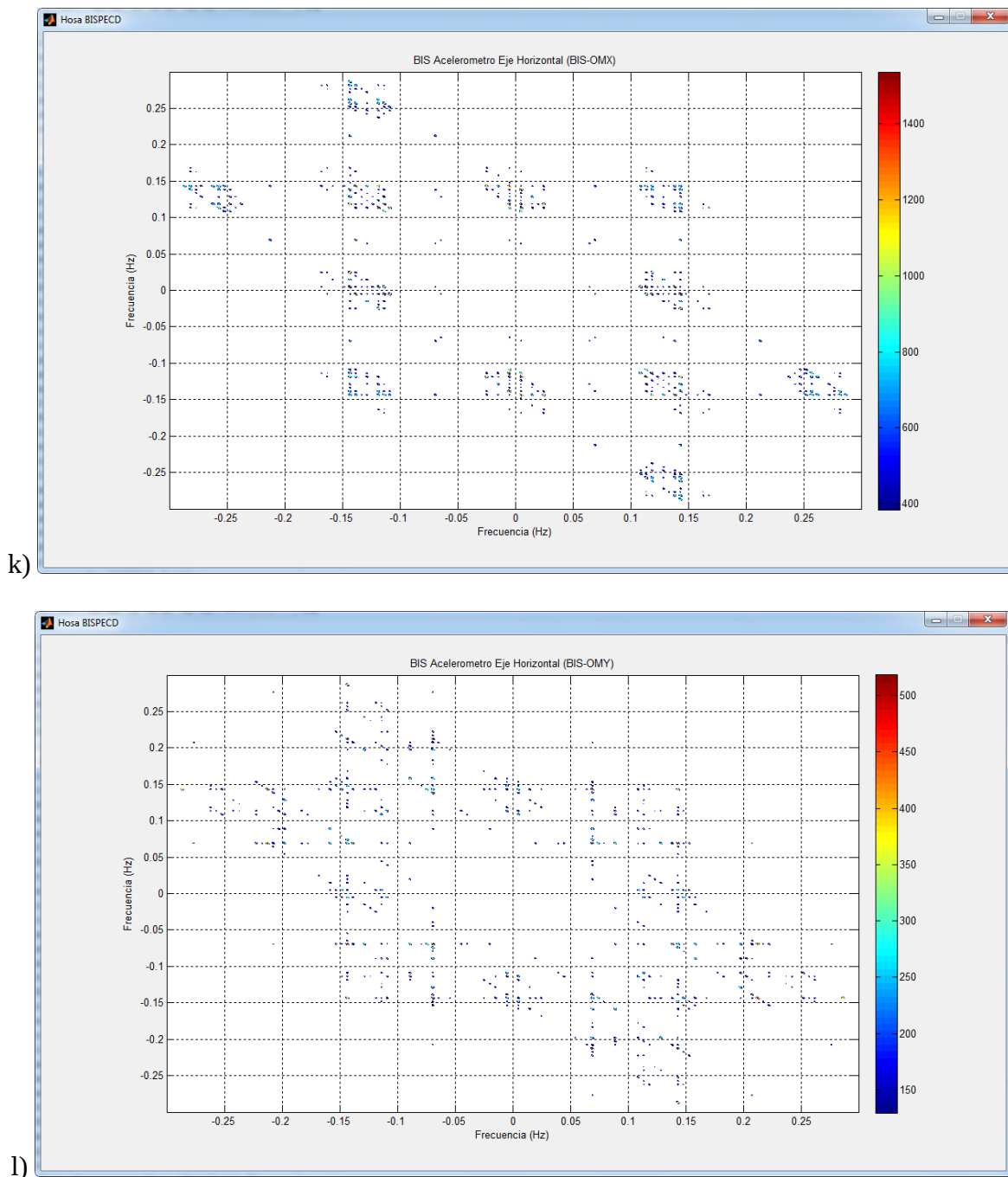


Figura C.7. continuación, Gráfica en amplitud del biespectro. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con falla.* (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

C.2.3.1. Uso de Zoom

Se representa una ventana en el análisis de la señal para poder observar con detalle alguna parte de interés de esta, se emplea una ventana rectangular pudiendo hacer análisis con respecto a restricciones en el eje de frecuencias y la amplitud en forma simultánea, aplicando un zoom, es decir puede observarse la frecuencia de la señal de interés así como la amplitud seleccionada (figura C.8).

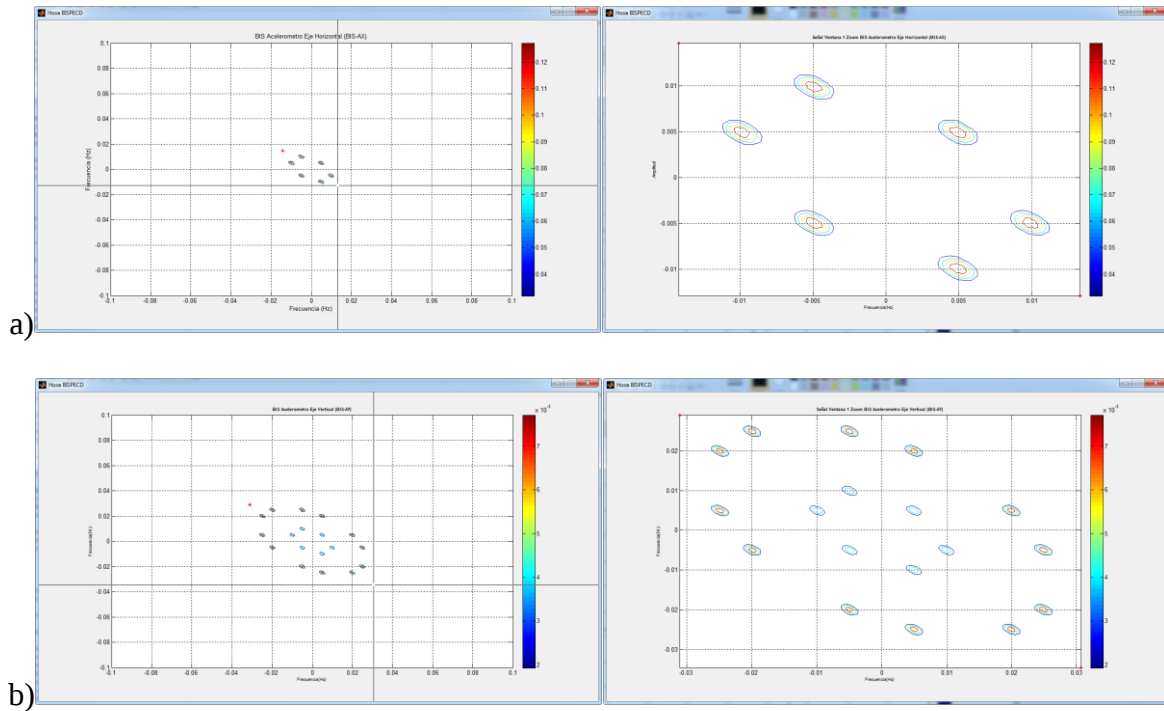


Figura C.8. Ventanas con zoom. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con falla.* (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

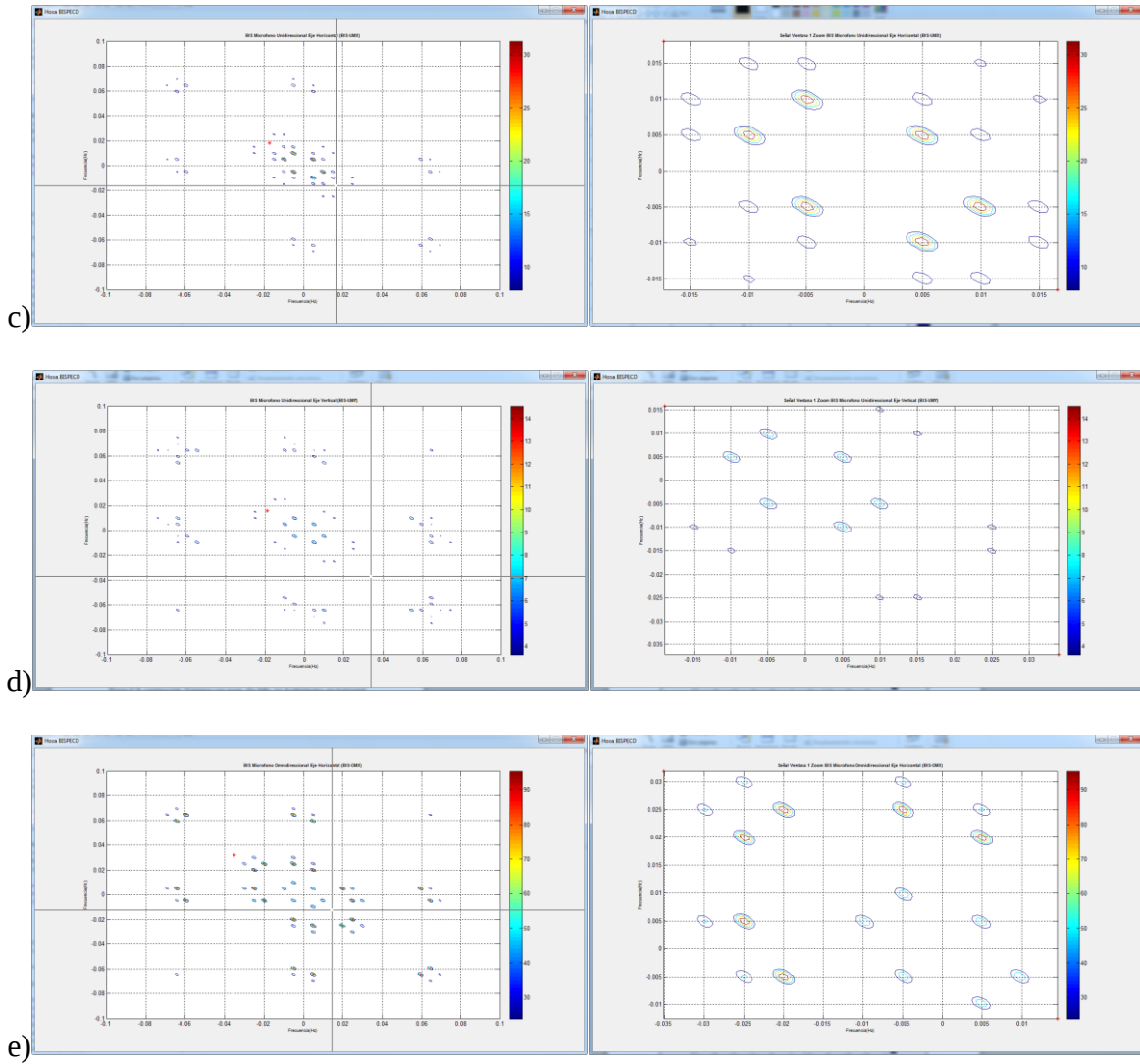


Figura C.8. continuación, Ventanas con zoom. *Sin* falla. (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con* falla. (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

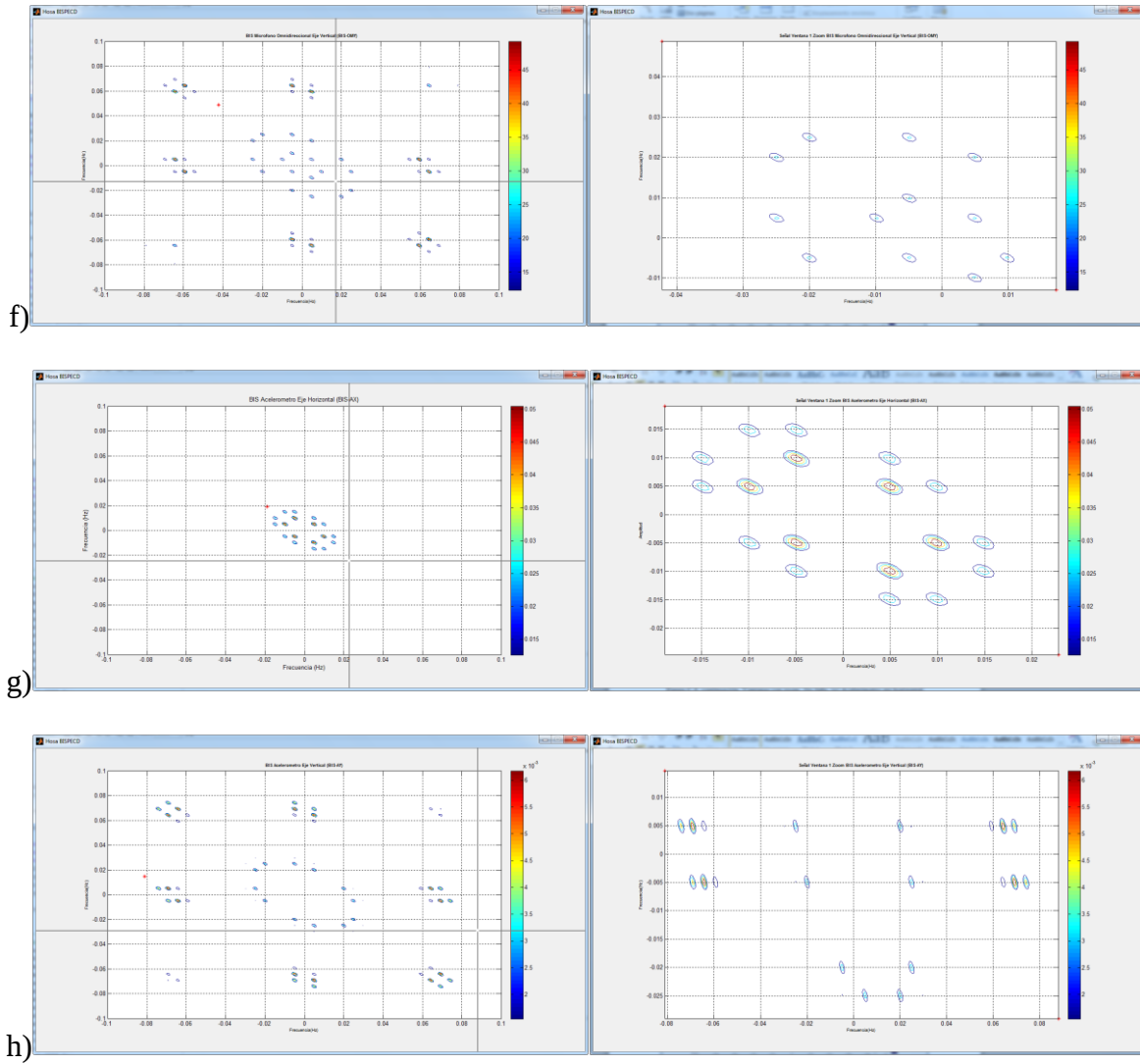


Figura C.8. continuación, Ventanas con zoom. Sin falla. (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). Con falla. (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

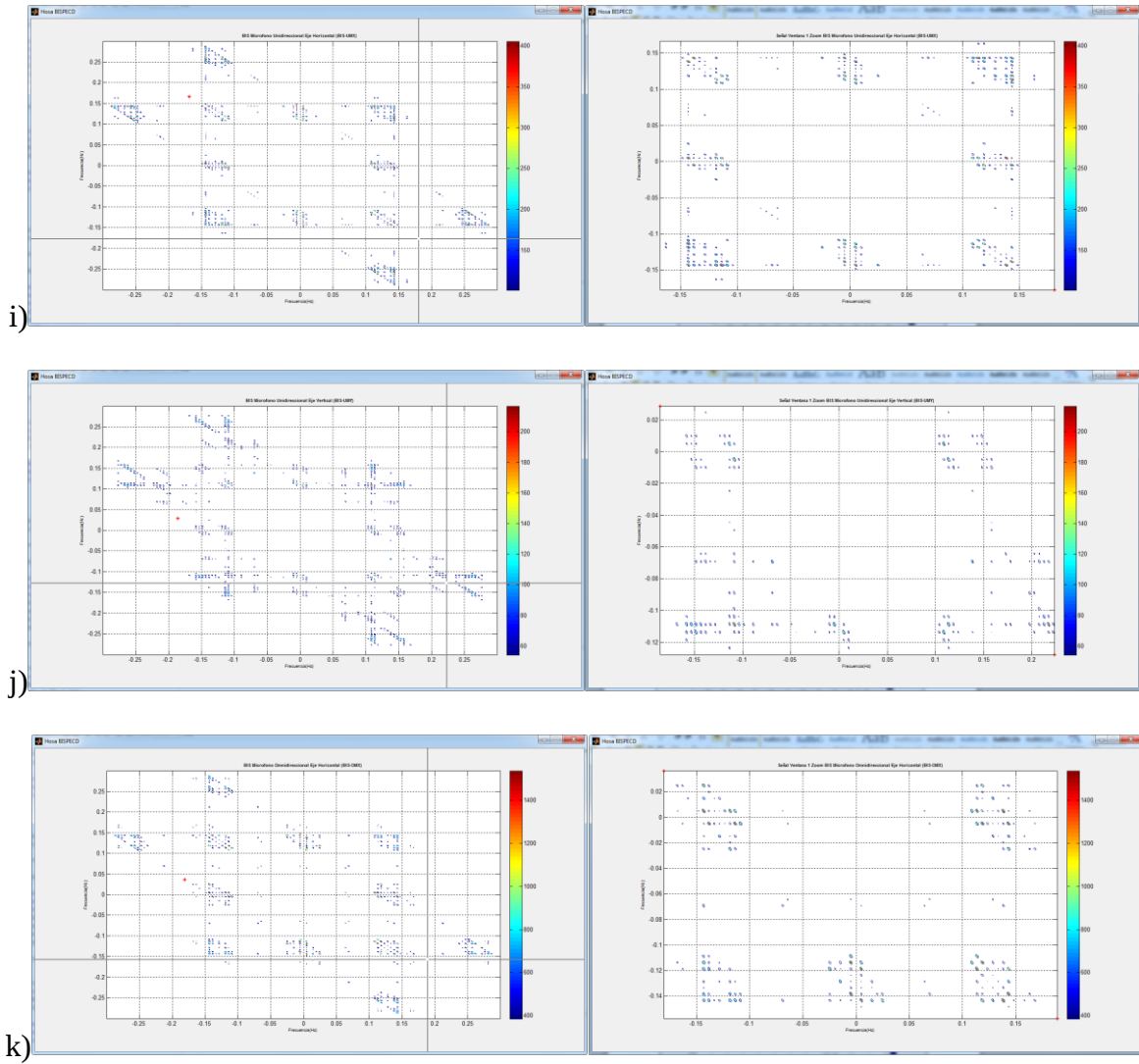


Figura C.8. continuación, Ventanas con zoom. Sin falla. (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). Con falla. (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

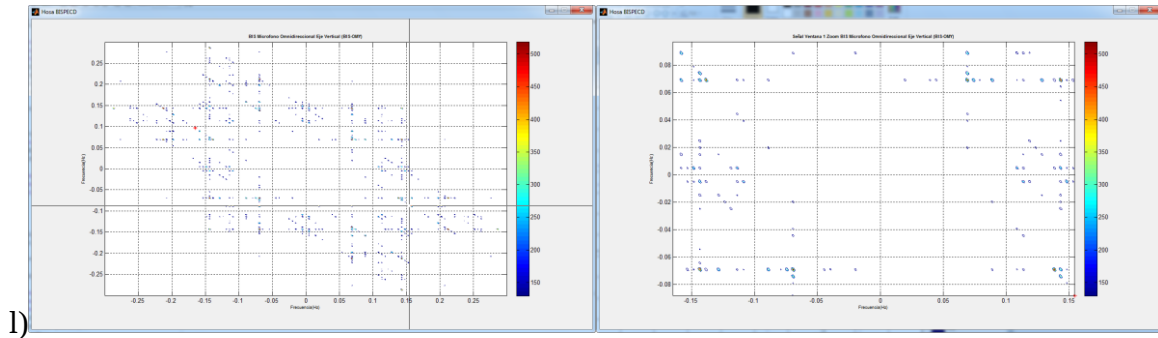


Figura C.8. continuación, Ventanas con zoom. *Sin falla.* (a) Acelerómetro eje horizontal (ax), (b) Acelerómetro eje vertical (ay), (c) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (d) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (e) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (f) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy). *Con falla.* (g) Acelerómetro eje horizontal (ax), (h) Acelerómetro eje vertical (ay), (i) Micrófono unidireccional eje horizontal (umx), (j) Micrófono unidireccional eje vertical (umy), (k) Micrófono omnidireccional eje horizontal (omx), (l) Micrófono omnidireccional eje vertical (omy).

Apéndice D

D.1. Diseño de experimentos

El diseño de experimentos (DDE) hace uso de técnicas y herramientas estadísticas con la finalidad de analizar o mejorar el desempeño de un conjunto de experimentos o un experimento en particular. Tiene como finalidad última establecer conclusiones válidas y *robustas* acerca del proceso o sistema analizado. Puede ser empleado ya sea para establecer el grado de influencia de las variables de control o de ruido sobre una variable de respuesta observable, como para establecer valores de dichas variables y mejorar u optimizar un proceso, producto o sistema hacia un valor o características establecidas como deseables. Permite asimismo encontrar sin lugar a dudas aquellas variables que más aportan a la variabilidad de un proceso o experimento y, con ello, generar estrategias de acción, conclusiones y niveles de operación confiables y, como ya se indicó anteriormente, robustas, esto es, que sean prácticamente insensibles a la variación o ruido externo.

Tradicionalmente existen dos enfoques ligeramente distintos de la aplicación del diseño de experimentos, el que se le conoce como la metodología tradicional, y que se halla basado en la utilización de arreglos factoriales, completos o fraccionados; y la metodología Taguchi de diseño de experimentos. En este trabajo se empleó esta última para diseñar los experimentos. Debido a las características del equipo experimental construido, se seleccionaron arreglos ortogonales L_8 como los más adecuados ya que permiten no sólo probar significancia estadística de efectos principales sino también interacciones de interés. La metodología para determinar la tabla de análisis de varianza *ANOVA* se halla reportada a detalle en [50]. Los resultados del experimento y sus correspondientes análisis de varianza se muestran en las tablas D.1 a D.12.

D.2. Acelerómetros y Micrófonos

Tabla D.1. Diseño de *ANOVA* acelerómetro eje *x* condición *sin* falla

Prueba	Factores							Acelerómetro			Ti	SS_{e_2}
	L	R	RL	C	e	RC	e	$Sin\ falla$				
								$Eje\ x$				
1	1	1	1	1	1	1	1	-4.58	-4.05	-3.38	-12.02	0.72
2	1	1	1	2	2	2	2	-3.89	-5.17	-4.04	-13.10	0.98
3	1	2	2	1	1	2	2	-3.65	-4.52	-3.41	-11.57	0.68
4	1	2	2	2	2	1	1	-2.98	-3.52	-3.95	-10.45	0.47
5	2	1	2	1	2	1	2	-3.71	-4.40	-3.16	-11.26	0.77
6	2	1	2	2	1	2	1	-3.98	-3.30	-3.89	-11.17	0.27
7	2	2	1	1	2	2	1	-3.96	-3.24	-3.85	-11.05	0.30
8	2	2	1	2	1	1	2	-3.27	-4.86	-4.44	-12.56	1.36
										$T..$	-93.19	5.56

Factor	<i>SS</i>	<i>g. l.</i>	<i>MS</i>	<i>F_{exp}</i>	Se probarán contra $F_{0.05,1,18} = 4.41$
<i>L</i>	0.05	1	0.05	0.15	
<i>R</i>	0.15	1	0.15	0.44	
<i>RL</i>	0.76	1	0.76	2.20	
<i>C</i>	0.08	1	0.08	0.23	
<i>RC</i>	0.01	1	0.01	0.04	
<i>e₁</i>	0.69	2	0.35	--	
<i>e₂</i>	5.56	16	0.35	--	
Total	7.31	23			
<i>E</i>	6.25	18	0.35		

MS_{e_1} 0.35 **1.00**

MS_{e_2} 0.35

El error primario $e_1 < e_2$, el error secundario. Se prueba entonces contra *e*.

Tabla D.2. Diseño de *ANOVA* acelerómetro eje y condición *sin falla*

Prueba	Factores							Acelerómetro			Ti	SS_{e_2}
	L	R	RL	C	e	RC	e	$Sin\ falla$				
								Eje y				
1	1	1	1	1	1	1	1	-6.51	-6.79	-6.58	-19.88	0.04
2	1	1	1	2	2	2	2	-6.29	-6.53	-6.15	-18.97	0.07
3	1	2	2	1	1	2	2	-5.76	--6.42	-6.24	-18.52	0.26
4	1	2	2	2	2	1	1	-6.31	-5.67	-6.43	-18.42	0.33
5	2	1	2	1	2	1	2	-5.83	-6.46	-6.29	-18.57	0.21
6	2	1	2	2	1	2	1	-6.46	-5.55	-5.90	-17.92	0.42
7	2	2	1	1	2	2	1	-5.89	-6.29	-6.28	-18.46	0.11
8	2	2	1	2	1	1	2	-6.07	-6.72	-6.80	-19.59	0.31
										$T..$	-150.32	1.76

Factor	SS	$g.l.$	MS	F_{exp}	Se probarán contra $F_{0.05,1,18} = 4.41$
L	0.06	1	0.06	0.62	
R	0.00	1	0.00	0.05	
RL	0.50	1	0.50	4.79	
C	0.01	1	0.01	0.12	
RC	0.28	1	0.28	2.67	
e_1	0.13	2	0.07	--	
e_2	1.76	16	0.11	--	
Total	2.75	23			
E	1.89	18	0.10		

MS_{e_1} 0.07 **0.60**

MS_{e_2} 0.11

El error primario $e_1 < e_2$, el error secundario. Se prueba entonces contra e .

Tabla D.3. Diseño de *ANOVA* micrófono unidireccional eje *x* condición *sin* falla

Prueba	Factores							Micrófono unidireccional			Ti	SS_{e_2}
	L	R	RL	C	e	RC	e	$Sin\ falla$				
								Eje x				
1	1	1	1	1	1	1	1	-22.92	-18.96	-19.57	-61.45	9.09
2	1	1	1	2	2	2	2	-27.55	-25.38	-27.40	-80.33	2.95
3	1	2	2	1	1	2	2	-25.84	-21.55	-21.04	-68.43	13.89
4	1	2	2	2	2	1	1	-22.15	-25.35	-23.89	-71.40	5.11
5	2	1	2	1	2	1	2	-25.89	-26.35	-18.75	-70.99	36.34
6	2	1	2	2	1	2	1	-22.69	-26.85	-27.84	-77.37	14.96
7	2	2	1	1	2	2	1	-28.11	-20.85	-24.75	-73.72	26.37
8	2	2	1	2	1	1	2	-27.20	-27.86	-23.37	-78.44	11.76
										$T..$	-582.12	120.48

Factor	SS	$g. l.$	MS	F_{exp}	
L	14.92	1	14.92	2.01	
R	0.14	1	0.14	0.02	
RL	1.38	1	1.38	0.19	
C	45.26	1	45.26	6.09	
RC	12.86	1	12.86	1.73	Se probarán contra $F_{0.05,1,18} = 4.41$
e_1	13.26	2	6.63	--	
e_2	120.48	16	7.53	--	
Total	208.30	23			
e	133.74	18	7.43		

MS_{e_1} 6.63 **0.88**

MS_{e_2} 7.53

El error primario $e_1 < e_2$, el error secundario. Se prueba entonces contra e .

Tabla D.4. Diseño de *ANOVA* micrófono unidireccional eje *y* condición *sin falla*

Prueba	Factores							Micrófono unidireccional			Ti	SS_{e_2}
	L	R	RL	C	e	RC	e	$Sin\ falla$				
								Eje y				
1	1	1	1	1	1	1	1	-17.68	-16.58	-19.21	-53.47	3.48
2	1	1	1	2	2	2	2	-18.96	-19.16	-20.21	-58.32	0.90
3	1	2	2	1	1	2	2	-20.18	-18.72	-16.38	-55.28	7.33
4	1	2	2	2	2	1	1	-17.46	-18.71	-19.83	-56.01	2.80
5	2	1	2	1	2	1	2	-20.64	-19.85	-16.63	-57.11	9.02
6	2	1	2	2	1	2	1	-17.74	-19.35	-19.71	-56.80	2.20
7	2	2	1	1	2	2	1	-20.85	-16.33	-19.18	-56.36	10.45
8	2	2	1	2	1	1	2	-16.80	-17.95	-17.06	-51.81	0.73
										$T..$	-445.16	36.91

Factor	SS	$g.l.$	MS	F_{exp}	
L	0.04	1	0.04	0.02	
R	1.62	1	1.62	0.70	
RL	1.14	1	1.14	0.50	
C	0.02	1	0.02	0.01	
RC	2.91	1	2.91	1.26	Se probarán contra $F_{0.05,1,18} = 4.41$
e_1	4.54	2	2.27	--	
e_2	36.91	16	2.31	--	
Total	47.18	23			
e	41.45	18	2.30		

MS_{e_1} 2.27 **0.98**

MS_{e_2} 2.31

El error primario $e_1 < e_2$, el error secundario. Se prueba entonces contra e .

Tabla D.5. Diseño de *ANOVA* micrófono omnidireccional eje *x* condición *sin* falla

Prueba	Factores							Micrófono omnidireccional			Ti	SS_{e_2}
	L	R	RL	C	e	RC	e	$Sin\ falla$				
								Eje x				
1	1	1	1	1	1	1	1	-13.30	-9.01	-9.09	-31.40	12.04
2	1	1	1	2	2	2	2	-12.75	-3.89	-10.27	-26.92	41.80
3	1	2	2	1	1	2	2	-9.64	-8.95	-2.52	-21.11	30.83
4	1	2	2	2	2	1	1	-1.75	-7.52	-7.65	-16.93	22.70
5	2	1	2	1	2	1	2	-6.61	-12.41	-1.67	-20.69	57.81
6	2	1	2	2	1	2	1	-4.10	-5.42	-13.34	-22.87	49.93
7	2	2	1	1	2	2	1	-16.46	-0.35	-14.10	-30.92	151.36
8	2	2	1	2	1	1	2	-6.14	-11.43	-15.81	-33.38	46.93
										$T..$	-204.22	413.40

Factor	SS	$g.l.$	MS	F_{exp}	Se probarán contra $F_{0.05,1,18} = 4.41$
L	5.51	1	5.51	0.24	
R	0.01	1	0.01	0.00	
RL	70.09	1	70.09	3.00	
C	0.68	1	0.68	0.03	
RC	0.01	1	0.01	0.00	
e_1	7.37	2	3.68	--	
e_2	413.40	16	25.84	--	
Total	497.06	23			
e	420.76	18	23.38		

MS_{e_1} 3.68 **0.14**

MS_{e_2} 25.84

El error primario $e_1 < e_2$, el error secundario. Se prueba entonces contra e .

Tabla D.6. Diseño de *ANOVA* micrófono omnidireccional eje y condición *sin falla*

Prueba	Factores							Micrófono omnidireccional			Ti	SS _{e₂}
	L	R	RL	C	e	RC	e	Sin falla				
								Eje y				
1	1	1	1	1	1	1	1	-4.55	-2.03	2.09	-4.48	22.43
2	1	1	1	2	2	2	2	-4.41	-3.37	-3.20	-10.98	0.85
3	1	2	2	1	1	2	2	-3.04	-4.57	-0.69	-8.29	7.64
4	1	2	2	2	2	1	1	-2.09	-2.06	-7.15	-11.30	17.18
5	2	1	2	1	2	1	2	-1.52	-8.74	-0.01	-10.27	43.49
6	2	1	2	2	1	2	1	-1.43	-1.44	-5.03	-7.91	8.60
7	2	2	1	1	2	2	1	-7.71	-1.50	-3.96	-13.17	19.56
8	2	2	1	2	1	1	2	2.19	-4.22	-2.87	-4.90	22.85
										T..	-71.30	142.60

Factor	SS	$g. l.$	MS	F_{exp}	Se probarán contra $F_{0.05,1,18} = 4.41$
L	0.06	1	0.06	0.01	
R	0.68	1	0.68	0.08	
RL	0.75	1	0.75	0.08	
C	0.05	1	0.05	0.01	
RC	3.68	1	3.68	0.41	
e_1	17.11	2	8.56	--	
e_2	142.60	16	8.91	--	
Total	164.93	23			
e	159.72	18	8.87		

MS_{e_1} 8.56 **0.96**

MS_{e_2} 8.91

El error primario $e_1 < e_2$, el error secundario. Se prueba entonces contra e .

Tabla D.7. Diseño de *ANOVA* acelerómetro eje *x* condición *con* falla

Prueba	Factores							Acelerómetro			Ti	SS_{e_2}
	L	R	RL	C	e	RC	e	$Con\ falla$				
								$Eje\ x$				
1	1	1	1	1	1	1	1	36.56	36.47	34.14	107.16	3.77
2	1	1	1	2	2	2	2	38.45	38.17	37.98	114.59	0.11
3	1	2	2	1	1	2	2	36.81	35.45	36.17	108.43	0.91
4	1	2	2	2	2	1	1	38.08	38.08	37.71	113.88	0.09
5	2	1	2	1	2	1	2	37.55	38.27	37.86	113.68	0.26
6	2	1	2	2	1	2	1	37.65	37.42	38.16	113.24	0.29
7	2	2	1	1	2	2	1	37.39	38.05	38.12	113.56	0.32
8	2	2	1	2	1	1	2	33.69	32.50	33.41	99.60	0.78
										$T..$	884.14	6.53

Factor	<i>SS</i>	<i>g. l.</i>	<i>MS</i>	<i>F_{exp}</i>	Se probarán contra $F_{0.05,1,2} = 18.51$
<i>L</i>	0.66	1	0.66	0.04	
<i>R</i>	7.26	1	7.26	0.40	
<i>RL</i>	8.53	1	8.53	0.47	
<i>C</i>	0.09	1	0.09	0.01	
<i>RC</i>	10.00	1	10.00	0.55	
<i>e₁</i>	36.55	2	18.28	1.00	
<i>e₂</i>	6.53	16	0.41	0.02	
Total	69.63	23			

MS_{e₁} 18.28 **44.79**

MS_{e₂} 0.41

El error primario $e_1 > e_2$, el error secundario. Se prueba entonces contra e_1 .

Tabla D.8. Diseño de *ANOVA* acelerómetro eje y condición *con falla*

Prueba	Factores							Acelerómetro			Ti	SS_{e_2}
	L	R	RL	C	e	RC	e	Con falla				
								Eje y				
1	1	1	1	1	1	1	1	34.18	34.79	33.59	102.56	0.71
2	1	1	1	2	2	2	2	35.16	35.13	34.91	105.20	0.04
3	1	2	2	1	1	2	2	36.81	35.45	36.17	108.43	0.91
4	1	2	2	2	2	1	1	35.80	35.23	35.46	106.48	0.17
5	2	1	2	1	2	1	2	35.01	35.60	35.91	106.52	0.43
6	2	1	2	2	1	2	1	35.97	35.40	35.46	106.82	0.19
7	2	2	1	1	2	2	1	35.53	35.72	35.55	106.80	0.02
8	2	2	1	2	1	1	2	31.31	31.89	31.69	94.91	0.16
										$T..$	837.73	2.64

Factor	SS	$g.l.$	MS	F_{exp}	Se probarán contra $F_{0.05,1,2} = 18.51$
L	2.42	1	2.42	0.56	
R	0.84	1	0.84	0.19	
RL	14.69	1	14.69	3.38	
C	4.94	1	4.94	1.14	
RC	11.74	1	11.74	2.70	
e_1	8.70	2	4.35	1.00	
e_2	2.64	16	0.16	0.04	
Total	45.97	23			

MS_{e_1} 4.35 **26.38**

MS_{e_2} 0.16

El error primario $e_1 > e_2$, el error secundario. Se prueba entonces contra e_1 .

Tabla D.9. Diseño de *ANOVA* micrófono unidireccional eje *x* condición *con* falla

Prueba	Factores							Micrófono unidireccional			Ti	SS_{e_2}
	L	R	RL	C	e	RC	e	Con falla				
								Eje x				
1	1	1	1	1	1	1	1	-19.15	-17.52	-16.00	-52.67	4.96
2	1	1	1	2	2	2	2	-20.24	-14.91	-11.73	-46.88	36.94
3	1	2	2	1	1	2	2	-12.27	-16.04	-12.57	-40.88	8.80
4	1	2	2	2	2	1	1	-15.05	-13.51	-15.56	-44.12	2.29
5	2	1	2	1	2	1	2	-8.62	-9.33	-13.14	-31.09	11.85
6	2	1	2	2	1	2	1	-10.66	-11.26	-7.05	-28.96	10.38
7	2	2	1	1	2	2	1	-9.69	-9.12	-8.67	-27.47	0.53
8	2	2	1	2	1	1	2	-10.26	-16.73	-15.31	-42.30	23.11
										$T..$	-314.39	98.86

Factor	SS	$g.l.$	MS	F_{exp}	Se probarán contra $F_{0.05,1,18} = 4.41$
L	124.77	1	124.77	20.20	
R	0.97	1	0.97	0.16	
RL	24.53	1	24.53	3.97	
C	4.29	1	4.29	0.69	
RC	28.14	1	28.14	4.56	
e_1	12.31	2	6.16	--	
e_2	98.86	16	6.18	--	
Total	293.87	23			
e	111.17	18	6.18		

MS_{e_1} 6.16 **0.99**

MS_{e_2} 6.18

El error primario $e_1 < e_2$, el error secundario. Se prueba entonces contra e .

Tabla D.10. Diseño de *ANOVA* micrófono unidireccional eje y condición *con falla*

Prueba	Factores							Micrófono unidireccional			Ti	SS_{e_2}
	L	R	RL	C	e	RC	e	Con falla				
								Eje y				
1	1	1	1	1	1	1	1	-6.67	-3.68	-3.73	-14.08	5.85
2	1	1	1	2	2	2	2	-9.01	-5.41	-7.43	-21.85	6.48
3	1	2	2	1	1	2	2	-10.91	-9.09	-11.64	-31.63	3.46
4	1	2	2	2	2	1	1	-9.92	-13.30	-14.45	-37.68	11.09
5	2	1	2	1	2	1	2	-11.19	-7.74	-9.52	-28.45	5.94
6	2	1	2	2	1	2	1	-12.87	-11.84	-10.91	-35.62	1.94
7	2	2	1	1	2	2	1	-14.17	-7.25	-9.90	-31.33	24.37
8	2	2	1	2	1	1	2	-12.44	-14.09	-12.66	-39.20	1.61
										$T..$	-239.84	60.74

Factor	SS	$g. l.$	MS	F_{exp}	
L	35.92	1	35.92	10.59	
R	66.15	1	66.15	19.51	
RL	30.21	1	30.21	8.91	
C	34.69	1	34.69	10.23	
RC	0.04	1	0.04	0.01	Se probarán contra $F_{0.05,1,18} = 4.41$
e_1	0.31	2	0.15	--	
e_2	60.74	16	3.80	--	
Total	228.06	23			
e	61.04	18	3.39		

MS_{e_1} 0.15 **0.04**

MS_{e_2} 3.80

El error primario $e_1 < e_2$, el error secundario. Se prueba entonces contra e .

Tabla D.11. Diseño de *ANOVA* micrófono omnidireccional eje *x* condición *con* falla

Prueba	Factores							Micrófono omnidireccional			Ti	SS_{e_2}
	L	R	RL	C	e	RC	e	Con falla				
								Eje x				
1	1	1	1	1	1	1	1	-6.04	5.07	6.29	5.31	92.39
2	1	1	1	2	2	2	2	-1.36	-7.44	-4.50	-13.30	18.50
3	1	2	2	1	1	2	2	-6.56	-11.96	-2.64	-21.17	43.81
4	1	2	2	2	2	1	1	-12.92	-3.79	-12.15	-28.86	51.30
5	2	1	2	1	2	1	2	0.04	3.09	-9.67	-6.55	88.89
6	2	1	2	2	1	2	1	-7.55	-3.14	6.75	-3.93	107.27
7	2	2	1	1	2	2	1	-2.92	-3.30	13.21	6.98	177.64
8	2	2	1	2	1	1	2	-7.37	-6.36	-3.07	-16.80	10.09
										$T..$	-78.31	589.89

Factor	SS	$g. l.$	MS	F_{exp}	Se probarán contra $F_{0.05,1,18} = 4.41$
L	59.28	1	59.28	1.64	
R	71.34	1	71.34	1.98	
RL	76.00	1	76.00	2.11	
C	93.95	1	93.95	2.61	
RC	9.98	1	9.98	0.28	
e_1	59.10	2	29.55	--	
e_2	589.89	16	36.87	--	
Total	959.54	23			
e	648.99	18	36.06		

MS_{e_1} 29.55 **0.80**

MS_{e_2} 36.87

El error primario $e_1 < e_2$, el error secundario. Se prueba entonces contra e .

Tabla D.12. Diseño de ANOVA micrófono omnidireccional eje y condición con falla

Prueba	Factores							Micrófono omnidireccional			Ti	SS_{e_2}
	L	R	RL	C	e	RC	e	Con falla				
								Eje y				
1	1	1	1	1	1	1	1	1.91	5.68	4.07	11.66	7.17
2	1	1	1	2	2	2	2	-2.22	2.34	-1.20	-1.08	11.46
3	1	2	2	1	1	2	2	-1.42	-0.94	-1.47	-3.83	0.17
4	1	2	2	2	2	1	1	-0.34	-5.63	-7.07	-13.04	25.14
5	2	1	2	1	2	1	2	-5.00	4.28	-1.53	-2.24	43.94
6	2	1	2	2	1	2	1	-2.27	-7.02	-0.98	-10.26	20.23
7	2	2	1	1	2	2	1	-6.60	3.76	0.46	-2.38	56.01
8	2	2	1	2	1	1	2	-0.35	-1.59	2.25	0.30	7.66
										$T..$	-20.88	171.78

Factor	SS	$g.l.$	MS	F_{exp}	Se probarán contra $F_{0.05,1,18} = 4.41$
L	2.86	1	2.86	0.28	
R	12.08	1	12.08	1.17	
RL	59.79	1	59.79	5.80	
C	31.02	1	31.02	3.01	
RC	8.45	1	8.45	0.82	
e_1	13.65	2	6.82	--	
e_2	171.78	16	10.74	--	
Total	299.64	23			
e	185.43	18	10.30		

MS_{e_1} 6.82 **0.64**

MS_{e_2} 10.74

El error primario $e_1 < e_2$, el error secundario. Se prueba entonces contra e .