



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

DIRECCIÓN DE POSTGRADO

Facultad de Ingeniería – Programa de Magister en Ciencias de la Ingeniería con mención
en Ingeniería Mecánica

**COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DEMODULACIÓN PARA
REALIZAR ANÁLISIS DE ENVOLVENTE EN RODAMIENTOS DE
BAJA VELOCIDAD Y PROPUESTA DE UN MÉTODO DE
ESTIMACIÓN DE CARACTERÍSTICA DEL DAÑO**

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Mecánica

ÁLVARO RODRIGO CARRASCO DELGADO

CONCEPCIÓN – CHILE

noviembre - 2021

Profesor guía: CRISTIÁN MOLINA VICUÑA

Dpto. de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería

Universidad de Concepción



Se autoriza la reproducción parcial o total, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de Concepción - Chile

RESUMEN

Las máquinas de baja velocidad son aquellas cuya velocidad de rotación se encuentra entre 60 y 600 [cpm]. Usualmente, estas máquinas son críticas en la línea de producción y, a su vez, los rodamientos son un componente crítico para este tipo de máquinas, que por lo general están sometidas a altas cargas de trabajo [Kim 2008]. Actualmente, resulta difícil monitorear la condición de los rodamientos de baja velocidad a causa de la poca energía que se libera en los impactos que se producen cuando existe un daño. El análisis de envolvente es uno de los métodos más utilizados para diagnosticar estos casos, pero una dificultad de este método consiste en encontrar la banda frecuencial óptima que se va a demodular, ya que una correcta selección de la banda frecuencial es fundamental para obtener una alta relación señal ruido. Un problema adicional es estimar la severidad de las fallas en los rodamientos, pues aún no existe una estrategia o método para el pronóstico del daño en rodamientos que sea confiable para los ingenieros de mantenimiento.

El objetivo de este trabajo es comparar métodos de demodulación de la literatura como *FastKurtogram*, *Protrugram* e *ICS2*, con métodos de selección de banda frecuencial con frecuencia cíclica objetiva, utilizando indicadores como *RMS*, *kurtosis*, *skewness*, *Gini Index*, *Smoothness Index* y *Peak Ratio*. Esto con el fin de determinar la condición del rodamiento de baja velocidad. Además, se plantea un método que busca estimar la característica del daño en señales de rodamientos a partir de la deconvolución de la señal de vibración medida.

La metodología de trabajo consiste en realizar una comparación numérica a partir de señales simuladas provenientes de un modelo fenomenológico de señal vibratoria de rodamiento dañado. Además, se realiza una comparación experimental con señales de un rodamiento de baja velocidad (200 [cpm]) obtenidas de la base de datos de rodamientos de la Universidad Politécnica de Madrid. Por otro lado, se aplica un método de estimación de característica del daño por tren de impulsos a señales simuladas del modelo fenomenológico y a emisiones acústicas medidas en un rodamiento del mecanismo de cierre del domo de un telescopio tipo VLT.

De los métodos de demodulación, en base a los resultados numéricos, se concluye que los métodos de selección de banda frecuencial con frecuencia cíclica objetivo con los indicadores ICS2 y *Peak Ratio*, tienen un mejor rendimiento en la selección de banda de resonancia en comparación al *Protrugram* y *FastKurtogram* para señales de rodamiento dañado con transientes únicos de interferencia. En cuanto a los resultados experimentales el *Protrugram*, ICS2 y el *Peak Ratio* permitieron diagnosticar correctamente el daño en los elementos rodantes del rodamiento de baja velocidad proveniente de la base de datos de rodamientos de la Universidad Politécnica de Madrid.

El método de estimación de característica del daño por tren de impulsos permite obtener y diferenciar la forma del tren de impulsos de señales simuladas, pero se debe contar con una relación señal ruido de al menos -5 [dB]. El método permite procesar señales experimentales y puede ser una herramienta útil para estimación de característica del daño en señales con alto SNR como es el caso de las emisiones acústicas.

NOMENCLATURA

Símbolos griegos

α	: Frecuencias cíclicas
β	: Ángulo de contacto del elemento rodante
δ	: Desfase temporal
Δt	: Intervalo de tiempo
ε	: Nivel de error
σ	: Ruido blanco
τ	: Factor de traslación
φ	: Señal externa
ξ	: Coeficiente de amortiguación



Símbolos latinos

A	: Amplitud de la función moduladora
A_o	: Amplitud del transiente
A_k	: Amplitud del resto de frecuencias
B_d	: Diámetro del elemento rodante
BW	: Ancho de banda
c	: Coeficientes
\tilde{c}	: Transformada de Hilbert
e	: Exponencial
ES	: Espectro envolvente de la señal

f	: Frecuencia
f_c	: Frecuencia central
f_f	: Frecuencia de falla
f_r	: Frecuencia de rotación del eje
f_m	: Frecuencia de muestreo
$g(t)$: Señal temporal
$G(t)$: Transformada de Fourier
$h(t)$: Respuesta impulsional
i	: Paso banda del nivel
j	: $\sqrt{-1}$
k	: Niveles
k_{float}	: Niveles flotantes
k_{int}	: Niveles enteros
m	: Cantidad de armónicos
MS	: Media al cuadrado de la señal
n	: Número entero que cuenta los pasos de tiempo
N	: Número de datos
N_b	: Número de elementos rodantes
N_w	: Tamaño de la ventana
P_j	: Amplitud de <i>peaks</i> ubicados en las frecuencias de falla
P_d	: Diámetro medio del rodamiento
s	: Tamaño de la falla en términos del arco de la pista
S_f	: Transformada rápida de Fourier
SE	: Envolvente al cuadrado



SES	: Espectro envolvente al cuadrado
t	: Tiempo
t_o	: Periodo de falla
t_n	: Pasos de tiempo
w	: Función ventana
w_d	: Frecuencia natural amortiguada
w_n	: Frecuencia natural no amortiguada
x_i	: Valor i de la señal $x(t)$
\bar{x}	: Promedio de la señal $x(t)$
x_t	: Señal de tren de impulsos
x_{rt}	: Señal de solo transientes
x_f	: Señal de transientes y efecto de la rugosidad



Abreviaciones

BPFO	: Frecuencia de falla de la pista externa del rodamiento
BPFI	: Frecuencia de falla de la pista interna del rodamiento
BSF	: Frecuencia de falla del elemento rodante del rodamiento
<i>conv</i>	: Convolución
DFT	: Transformada discreta de Fourier
FFT	: Transformada rápida de Fourier
FK	: <i>FastKurtogram</i>
FTF	: Frecuencia de falla de la jaula del rodamiento
IFFT	: Transformada rápida inversa de Fourier
<i>Ind</i>	: Indicador

- Protru* : *Protrugram*
RPM : Revolución por minuto
SK : Kurtosis espectral
SNR : Relación señal ruido
STFT : Transformada corta de Fourier



ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Motivación	3
1.3 Trabajo propuesto.....	3
1.4 Hipótesis.....	4
1.5 Objetivo general	4
1.6 Objetivos específicos	5
1.7 Estructura del trabajo	6
CAPÍTULO 2.....	7
MARCO TEÓRICO	7
2.1 Rodamientos.....	7
2.2 Transformada de Fourier.....	9
2.3 Análisis de envolvente	10
CAPÍTULO 3.....	13
ANTECEDENTES TEÓRICOS DE DEMODULACIÓN DE BANDA FRECUENCIAL	13
3.1 Kurtosis espectral y FastKurtogram.....	13
3.2 Protrugram	16
3.3 Métodos de selección de banda por frecuencia cíclica objetivo	16
CAPÍTULO 4.....	21
MODELO FENOMENOLÓGICO DE SEÑAL VIBRATORIA DE RODAMIENTO DAÑADO	21
4.1 Generación de transientes	21
4.2 Distribución de transientes.....	22
4.3 Respuesta del sistema.....	22
4.4 Señales externas al rodamiento	24
4.5 Clasificación de señales	24
CAPÍTULO 5.....	26
RESULTADOS NUMÉRICOS	26
5.1 Comparación de indicadores en métodos con frecuencia cíclica objetivo.....	26

5.2	Comparación de métodos utilizados en la literatura con Peak Ratio	31
5.3	Resumen de resultados	32
CAPÍTULO 6	34
	RESULTADOS EXPERIMENTALES	34
6.1	Características de la base de datos utilizada	34
6.2	Procesamiento de las señales	36
6.3	Resumen de resultados	40
CAPÍTULO 7	41
	MÉTODO DE ESTIMACIÓN DE CARACTERÍSTICA DEL DAÑO DEL RODAMIENTO	41
7.1	Explicación del método.....	41
7.2	Formas de tren de impulsos	44
7.4	Resultados numéricos.....	46
7.5	Resultados experimentales	51
CAPÍTULO 8	55
	CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	55
8.1	Conclusiones	55
8.2	Perspectivas.....	57



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Componentes y medidas del rodamiento para el cálculo de frecuencia de fallas.	8
Figura 2.2. Metodología de análisis de envolvente. (a) Filtro utilizado. (b) Señal filtrada y envolvente. (c) Espectro de señal filtrada.	11
Figura 2.3. Señales en dominio tiempo y espectro frecuencia de fallas comunes en rodamiento. (Figura adaptada de [Randall 2011]).	12
Figura 3.1. Estructura del banco de filtros de 1/3 de árbol binario.	15
Figura 3.2. Zonas utilizadas (rojo claro) para el cálculo de indicadores en SES.	18
Figura 4.1. Esquema de generación de señales simuladas.	23
Figura 4.2. a) Ruido blanco. b) Ruido blanco con transiente de interferencia. c) $x(t)$ y ruido blanco. d) $x(t)$ y ruido blanco con transiente de interferencia.	25
Figura 5.1. Tendencias de indicadores con distintas cantidades de armónicos.	27
Figura 5.2. Tendencias de indicadores con distintos niveles de tolerancia.	28
Figura 5.3. Banda frecuencial seleccionada para diferentes indicadores.	29
Figura 5.4. a) Señal con SNR= -19 [dB] perteneciente al grupo señales analizados. Resultados obtenidos para b) <i>Peak Ratio</i> y c) <i>Gini Index</i> .	30
Figura 5.5. Banda frecuencial seleccionada por diferentes métodos.	31
Figura 5.6. a) Señal con SNR= -19 [dB] perteneciente al grupo señales analizados con transiente de interferencia. Resultados obtenidos para b) <i>Peak Ratio</i> y c) <i>Protrugram</i> .	33
Figura 6.1. Esquema del banco de ensayos.	35
Figura 6.2. a) Señal experimental posterior a filtro pasa alto de 10 [Hz]. b) Espectro FFT de la señal experimental.	35
Figura 6.3. Resultados a) <i>FastKurtogram</i> , b) <i>Protrugram</i> y sus respectivos SES.	37
Figura 6.4. Resultados a) ICS2, b) <i>Peak Ratio</i> y sus respectivos SES.	38
Figura 6.5. Zoom entre 0 y 10 [Hz] de los SES de los métodos a) <i>FastKurtogram</i> , b) <i>Protrugram</i> y c) ICS2/ <i>Peak Ratio</i> .	39
Figura 7.1. a) Esquema simplificado de generación de señal simulada. b) Deconvolución de señal $x(t)$.	42
Figura 7.2. a) Transientes aislados sin ajustar. b) Transientes ajustados.	43
Figura 7.3. Formas de pulsos del tren de impulsos. a) Rectangular. b) Triangular y c) Semiseno.	44
Figura 7.4. a) Señal tren de impulsos $xt(t)$. b) Respuesta al impulso $h(t)$. c) señal simulada $x(t)$.	45
Figura 7.5. Señales simuladas con impulsos rectangulares.	47
Figura 7.6. Señales recuperadas con deconvolución en impulsos rectangular.	47
Figura 7.7. Señales simuladas con impulsos triangular.	48
Figura 7.8. Señales recuperadas con deconvolución en impulsos triangular.	48
Figura 7.9. Señales simuladas con impulsos semiseno.	49

Figura 7.10. Señales recuperadas con deconvolución en impulsos semiseno.	49
Figura 7.11. Acercamiento en señales de tren de impulsos con distintas formas de pulsos.	50
Figura 7.12. a) Medición de emisiones acústicas. b) Espectro envolvente de la señal.	53
Figura 7.13. a) Respuesta al impulso obtenido. b) Tren de impulsos de las AE. acercamiento del impulso en torno a c) 3 [s] y d) 7 [s].	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. Características de la señal simulada.	26
Tabla 6.1. Frecuencias de falla y giro de rodamiento del del banco de ensayos.	34
Tabla 7.1. Frecuencias de falla y giro de rodamiento del mecanismo de cierre de domo.	52



Todas las Figuras y Tablas son de elaboración propia del autor.

CAPÍTULO 1

Introducción

En la industria existen máquinas consideradas de baja velocidad. De acuerdo con [Mo 2018] entran en esta categoría máquinas que operan con velocidades de rotación entre 60 y 600 [cpm]. Usualmente estas máquinas son críticas en la línea de producción y a su vez los rodamientos son un componente crítico para este tipo de máquinas, que por lo general están sometidas a altas cargas de trabajo [Kim 2008]. Ejemplos de estas máquinas son excavadoras, palas de la minería, rodillos de prensa y turbinas eólicas. Es por esto que es necesaria una herramienta que permita determinar la condición mecánica de rodamientos que funcionan a baja velocidad para prevenir una detención no programada.

1.1 Descripción del problema

Actualmente es difícil monitorear la condición de los rodamientos de baja velocidad. La causa de esto es por la poca energía que se libera en los impactos que se producen cuando existe un daño [Kim 2007].

La técnica más utilizada en el monitoreo de estos elementos es el análisis de vibraciones. Esta técnica presenta la dificultad de que la relación señal ruido de la señal medida en

máquinas de baja velocidad es baja, provocando que los transientes habituales en fallas de rodamientos sean enmascarados por otras vibraciones y/o ruido inherente de los equipos, teniendo como consecuencia el difícil diagnóstico del estado del rodamiento [Caesarendra 2017].

Diversos autores proponen diferentes metodologías de procesamiento de señal que están enfocadas en diagnosticar correctamente el estado del rodamiento. Algunas de ellas son el análisis de envolvente [Osorio 2020, Chatterton 2014], métodos basados en la Descomposición Empírica de Modos [Caesarendra 2013, Yang 2016] y la Transformada Wavelet [Yang 2015, Guo 2014].

De los métodos anteriormente mencionados, el análisis de envolvente es el más utilizado, pero una dificultad consiste en encontrar la banda frecuencial óptima que se va a demodular, ya que una correcta selección de la banda frecuencial es fundamental para obtener una alta relación señal ruido.

Algunas soluciones propuestas para obtener la banda frecuencial óptima son métodos basados en el parámetro estadístico *kurtosis*, como el *Kurtogram* y *Protrugram*. En [Eftekharnjad 2011] se utiliza el *kurtosis* espectral y *Kurtogram* en señales vibración y emisiones acústicas de un rodamiento defectuoso. Se demostró que los métodos son efectivos en disminuir significativamente el ruido de las señales tanto en vibraciones como en emisiones acústicas. En [Tafinine 2012] se muestra que el *Kurtogram* es un método apropiado para la detección automática de fallas en los rodamientos ya que permite obtener la banda frecuencial que contiene la falla sin necesidad de una localización manual.

Por otro lado, el Protrugram fue introducido por Barszcz en [Barszcz 2011] ya que en el caso de tener respuestas impulsivas de alta energía, estas provocan errores en la selección de banda para el *Kurtogram*. Otros enfoques propuestos son métodos con frecuencia cíclica objetiva, uno de los más utilizados es ICS2 introducido en [Raad 2008]. En [Smith 2017] se aplica el ICS2 y se muestra que la herramienta es más efectiva para la selección de banda de demodulación que el *FastKurtogram*.

Un problema adicional es estimar la severidad de las fallas en los rodamientos, aun no existe una estrategia o método para el pronóstico del daño en rodamientos que sea confiable para los ingenieros de mantenimiento [Zhang 2021].



1.2 Motivación

Las máquinas de baja velocidad están presentes en diversas industrias como minería, forestal, energía, etc. Dar una solución a este problema posibilita la toma de acciones de mantenimiento a tiempo, con el fin de evitar un mal funcionamiento o daño en las máquinas y así evitar pérdidas económicas y problemas de seguridad [Mba 2006].

1.3 Trabajo propuesto

Se implementan los métodos de demodulación de la literatura como *FastKurtogram*, *Protrugram* y ICS2. Además, se proponen indicadores como RMS, *kurtosis*, *skewness*,

Gini Index, *Smoothness Index* y *Peak ratio* para los métodos de selección de banda frecuencial con frecuencia cíclica objetiva. Finalmente, se realiza una comparación de los métodos implementados con resultados numéricos y experimental en señales de rodamientos de baja velocidad.

Se propone un método que permita estimar la característica del daño en señales de rodamientos a partir del tren de impulsos obtenida de la deconvolución de la señal con la respuesta al impulso del sistema.

1.4 Hipótesis

- 
- H1) A partir de las mediciones de vibraciones en rodamientos de baja velocidad es posible calcular indicadores más sensibles respecto a la selección de la banda frecuencial, que permita determinar la condición del rodamiento.
- H2) Distintas formas de impulsos provenientes del tren de impulsos se relacionan con diferentes características del daño en rodamientos.

1.5 Objetivo general

Este proyecto tiene como objetivo comparar métodos de demodulación de la literatura como *FastKurtogram*, *Protrugram* y *ICS2*, con métodos de selección de banda frecuencial con frecuencia cíclica objetiva utilizando indicadores como *RMS*, *kurtosis*, *skewness*, *Gini*

Index, *Smoothness Index* y *Peak ratio*, con el fin de poder determinar la condición de rodamientos que operan baja velocidad. Además, se pretende proponer un método que permita estimar la característica del daño en señales de rodamientos a partir de la deconvolución de la señal.

1.6 Objetivos específicos

- OE1) Implementar métodos de demodulación para el análisis envolvente de señales como *FastKurtogram*, *Protrugram*, *ICS2* y métodos de selección de banda frecuencial con frecuencia cíclica objetiva utilizando indicadores como RMS, *kurtosis*, *skewness*, *Gini Index*, *Smoothness Index* y *Peak ratio*.
- OE2) Desarrollar un modelo fenomenológico de una señal que simula la vibración proveniente de un rodamiento con una falla en la pista externa con distintos tipos y niveles ruido.
- OE3) Procesar señales simuladas con los métodos e indicadores implementados y comparar los resultados.
- OE4) Procesar señales experimentales obtenidas de una base de datos de rodamientos de baja velocidad con los métodos e indicadores implementados y diagnosticar la condición del rodamiento.
- OE5) Proponer un método que permite estimar la característica del daño a partir de las señales de tren de impulsos proveniente de la deconvolución de la señal de falla.

1.7 Estructura del trabajo

El trabajo se encuentra estructurado de la siguiente forma:

- Capítulo 2: Marco teórico de los rodamientos, transformada de Fourier y análisis de envolvente.
- Capítulo 3: Antecedentes teóricos donde se proporciona una revisión de los métodos y se proponen otros indicadores para realizar la demodulación.
- Capítulo 4: Modelo fenomenológico utilizado para la generación de señales simuladas.
- Capítulo 5: Comparación de indicadores y métodos de demodulación aplicados a señales simuladas.
- Capítulo 6: Comparación de indicadores y métodos de demodulación aplicados a señales experimentales obtenidas de una base de datos de rodamientos de baja velocidad.
- Capítulo 7: Se introduce un método que permite estimar la característica del daño en señales de rodamientos a partir de la deconvolución de la señal.
- Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones para el trabajo futuro.

CAPÍTULO 2

Marco teórico

En este capítulo se dará una breve descripción de los rodamientos, tipos de falla y procesamientos de señales.

2.1 Rodamientos

Los rodamientos son elementos mecánicos que reducen la fricción entre los elementos rotatorios de las máquinas, soportando las cargas del eje y permitiendo su rotación.

Las fallas en los rodamientos es uno de los motivos más frecuentes de avería en las máquinas [Randall 2011].

Un rodamiento está compuesto por la pista externa, pista interna, jaula y los elementos rodantes. La Figura 2.1 muestra los componentes principales de un rodamiento y las dimensiones que permiten calcular las frecuencias características de falla.

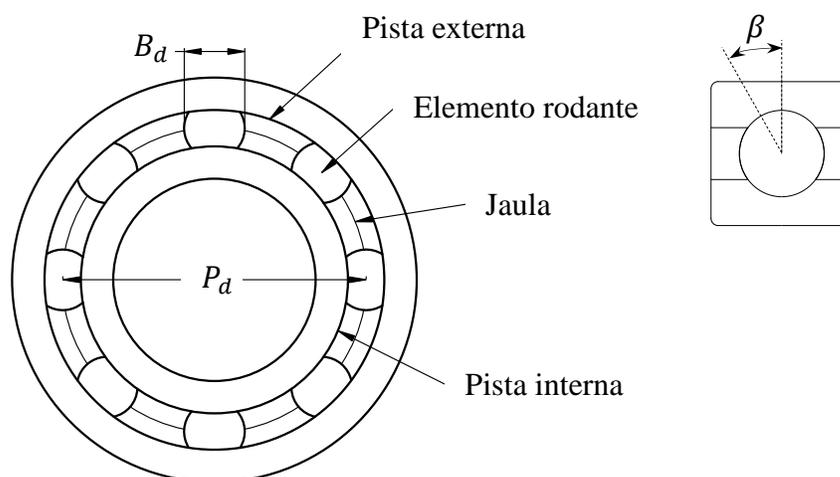


Figura 2.1. Componentes y medidas del rodamiento para el cálculo de frecuencia de fallas.

Donde B_d es el diámetro del elemento rodante, P_d es el diámetro medio del rodamiento y β es el ángulo de contacto del elemento rodante.

Las frecuencias de falla características del rodamiento son calculadas mediante las siguientes ecuaciones [Taylor 2004]:

BPFO (Ball Pass Frequency Outer Race): Frecuencia de falla de la pista externa del rodamiento.

$$BPFO = \frac{N_b}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos(\beta) \right) RPM \quad (2.1)$$

BPMI (Ball Pass Frequency Inner Race): Frecuencia de falla de la pista interna del rodamiento.

$$\text{BPFI} = \frac{N_b}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos(\beta) \right) \text{RPM} \quad (2.2)$$

BSF (Ball Spin Frequency): Frecuencia de falla del elemento rodante del rodamiento.

$$\text{BSF} = \frac{P_d}{2B_d} \left(1 - \frac{B_d^2}{P_d^2} \cos^2(\beta) \right) \text{RPM} \quad (2.3)$$

FTF (Fundamental Train Frequency): Frecuencia de falla de la jaula del rodamiento.

$$\text{FTF} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos(\beta) \right) \text{RPM} \quad (2.4)$$

Donde RPM son las revoluciones por minuto del eje y N_b el número de elementos rodantes.



2.2 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier permite representar una función periódica como una suma de sinusoidales de distintas frecuencias y amplitudes. Matemáticamente la transformada integral de Fourier es representada en la ecuación (2.5).

$$G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.5)$$

Como las señales se deben procesar digitalmente, se requiere que sean muestreadas de forma discreta. Entonces, la transformada de Fourier es representada en la ecuación (2.6).

$$G(f) = \sum_{-\infty}^{+\infty} g(t_n) e^{-j2\pi f t_n} \quad (2.6)$$

Donde $t_n = n\Delta t = n/f_m$, n es un número entero que cuenta los pasos de tiempo y f_m es la frecuencia de muestreo.

Como no es posible muestrear durante un tiempo infinito, la transformada discreta de Fourier permite que tanto las mediciones de tiempo y el espectro de frecuencia se muestreen de forma discreta y periódica. Matemáticamente la transformada discreta de Fourier (DFT) es representada en la ecuación (2.7).

$$G(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g(n) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (2.7)$$

Donde N es el número de puntos de señal temporal discretizada y k es un número entero que cuenta los pasos de frecuencia.

La transformada rápida de Fourier (FFT) es la más utilizada en el procesamiento de señales. Esta es simplemente un algoritmo más eficiente que calcula la DFT (ecuación (2.7)), ya que la DFT requiere N^2 operaciones mientras que la FFT requiere $N \log_2(N)$ [Randall 2011].

2.3 Análisis de envolvente

El análisis de envolvente es una técnica que permite revelar frecuencias de fallas (si es que existen) ocultas en la señal, ya que, si ocurre un impacto entre los elementos rodantes

y la pista del rodamiento, este excitará la zona resonante de los componentes. Por lo tanto, este método se beneficia de la información contenida en las zonas de resonancia.

La metodología más frecuente utilizada para este análisis está esquematizada en Figura 2.2 y se explica a continuación:

- 1) Se utiliza un filtro pasa banda o pasa alto que incluye la frecuencia a analizar (a priori zona resonante) en la señal. Figura 2.2(a).
- 2) Se crea una nueva señal denominada señal envolvente que es la que envuelve la señal filtrada (por ejemplo, con la transformada de Hilbert. Para más información sobre la transformada de Hilbert ver [Randall 2011]). Figura 2.2(b).
- 3) Finalmente, se aplica la transformada rápida de Fourier (FFT) a la nueva señal envolvente. Figura 2.2(c).

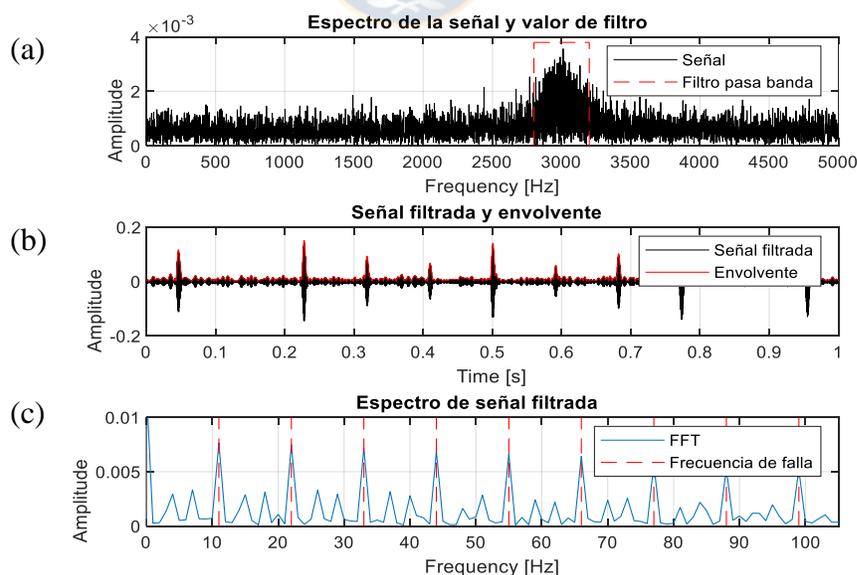


Figura 2.2. Metodología de análisis de envolvente. (a) Filtro utilizado. (b) Señal filtrada y envolvente. (c) Espectro de señal filtrada.

La Figura 2.3 muestra el espectro envolvente para las fallas más comunes en rodamientos.

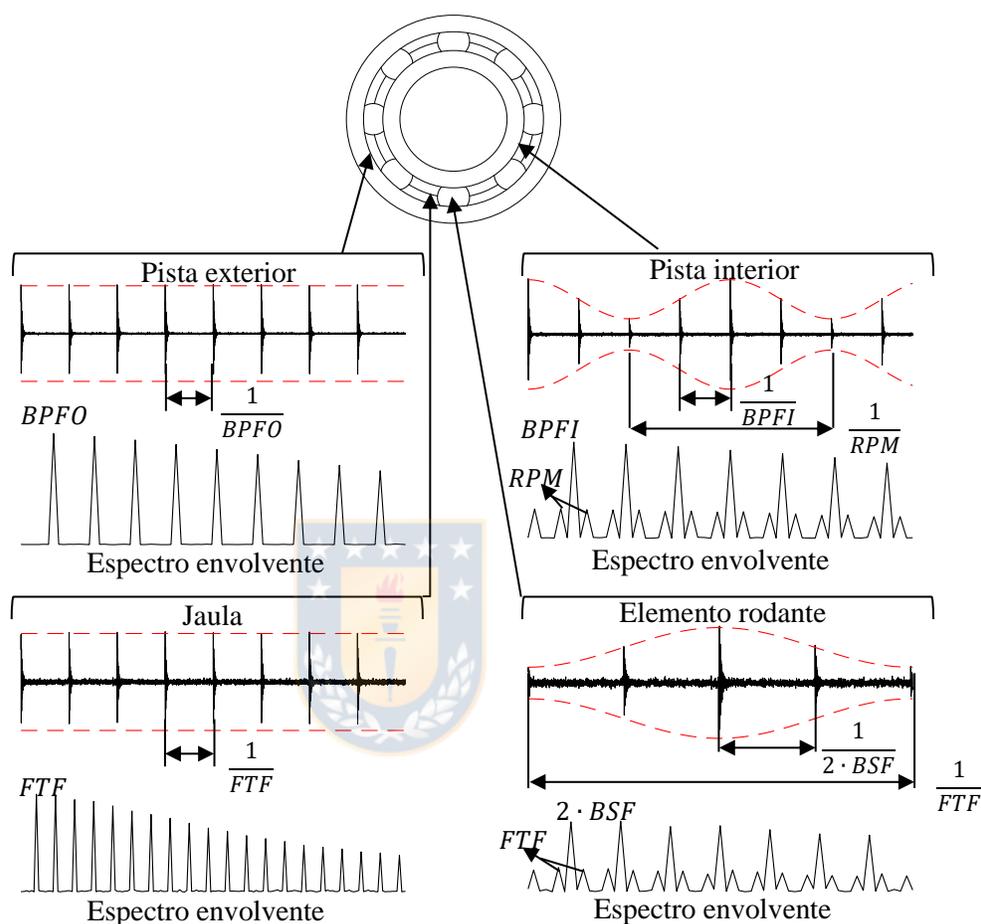


Figura 2.3. Señales en dominio tiempo y espectro frecuencia de fallas comunes en rodamiento. (Figura adaptada de [Randall 2011]).

La dificultad de aplicar este método es encontrar la banda frecuencial óptima que se va a demodular, ya que una correcta selección de la banda frecuencial es fundamental para obtener una alta relación señal ruido. En el siguiente capítulo se mostrará algunos métodos que tienen como objetivo seleccionar una banda frecuencial óptima de demodulación.

CAPÍTULO 3

Antecedentes teóricos de demodulación de banda frecuencial

En este capítulo se detallarán los métodos utilizados por algunos investigadores para la selección de la banda de demodulación y se propondrán algunos indicadores para la selección óptima de banda de demodulación.

3.1 Kurtosis espectral y *FastKurtogram*

El kurtosis espectral (SK) fue introducido por Dwyer en [Dwyer 1983]. El SK está basado en un parámetro estadístico que permite mostrar cómo varía frecuencialmente la impulsividad de una señal. Esto es potencialmente útil para determinar las bandas de frecuencias influenciadas por las señales de falla, que generalmente contienen frecuencias de resonancia. Es decir, se pueden obtener las bandas que se van a analizar sin recurrir a datos históricos.

Ottonello en [Ottonello 1994] modifica la definición donde usa el momento de cuarto orden normalizado de la amplitud obtenida de la transformada corta de Fourier (STFT).

La ecuación (3.2) muestra la metodología de SK. Matemáticamente la transformada corta de Fourier está definida como:

$$Sf(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-2\pi f t} dt \quad (3.1)$$

Donde $w(t)$ es la función ventana usada en STFT.

Matemáticamente SK está definida como:

$$SK(f) = \frac{\langle |Sf(t, f)|^4 \rangle}{\langle |Sf(t, f)|^2 \rangle^2} - 2, \quad f \neq 0 \quad (3.2)$$

Donde $\langle \cdot \rangle$ es un operador de cada punto en el tiempo.

Se debe notar que el comportamiento del STFT depende de la función ventana $w(t)$, que es previamente definida y que la variación del tamaño de la ventana (N_w) afectará en los valores de SK. Para mostrar estos resultados, es posible utilizar un gráfico de 3 dimensiones, las cuales son amplitud de *kurtosis*, frecuencia y N_w , a este gráfico se le denomina *Kurtogram*.

Dado que la exploración de todo el plano (f, N_w) es una tarea costosa computacionalmente, en [Antoni 2007] se propone un algoritmo basado en una serie de filtros con combinaciones específicas de frecuencias centrales y frecuencias de resolución. La estructura del banco de filtros propuesta es de 1/3 de árbol binario (Figura 3.1), ya que permite un muestreo más fino respecto a la razón entre la frecuencia y la frecuencia de resolución sin un excesivo costo computacional como es el caso de un árbol binario regular.

Una explicación simplificada para generar el 1/3 de árbol binario es utilizar el intervalo frecuencial $[i \cdot 2^{-k-1}; (i+1) \cdot 2^{-k-1}]$, donde $k = k_{int} \cup k_{float}$ corresponde a los niveles, mientras que $k_{int} = 0, 1, 2, \dots, K-1$ y $k_{float} = \log_2(3 \cdot 2^0), \log_2(3 \cdot 2^1), \log_2(3 \cdot 2^2), \dots, \log_2(3 \cdot 2^{K-2})$ con $K \geq 2$, por otro lado $i = 0, 1, \dots, 2^k - 1$ corresponden a los paso bandas en el nivel, de esta forma se obtiene las bandas frecuenciales de los coeficientes $c_k^i(n)$. Finalmente, los valores de *FastKurtogram* están definido por:

$$FK(k, i) = \frac{\langle |c_k^i(n)|^4 \rangle}{\langle |c_k^i(n)|^2 \rangle^2} - 2 \quad (3.3)$$

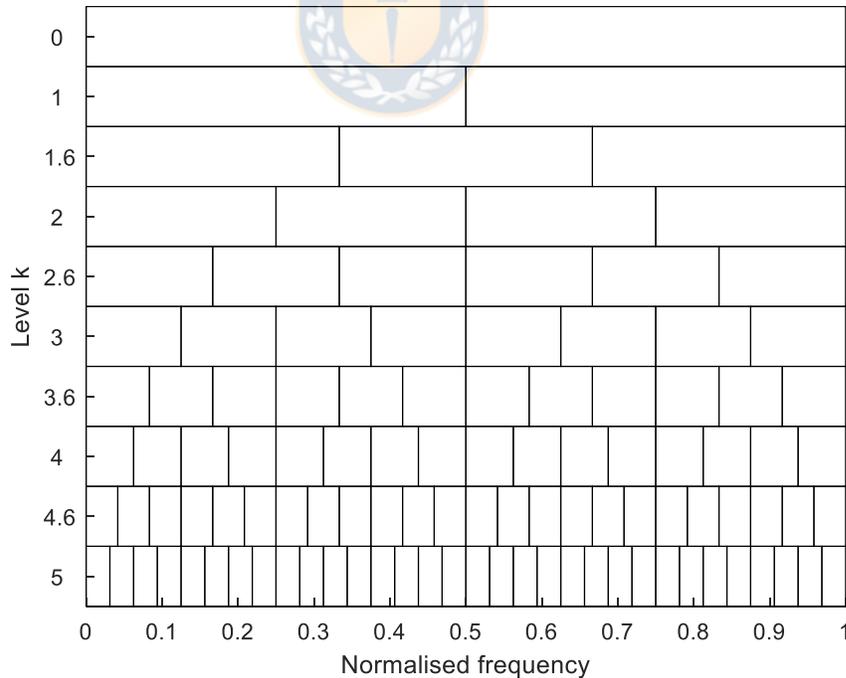


Figura 3.1. Estructura del banco de filtros de 1/3 de árbol binario.

3.2 *Protrugram*

El *Protrugram* es un método basado en el parámetro *kurtosis* introducido en [Barszcz 2011]. A diferencia del *Kurtogram*, en este método se establece una frecuencia de paso banda BW y un paso frecuencial. De esta forma se exploran las bandas frecuenciales de la señal obteniéndose los coeficientes c_i . La mayor diferencia con el *FastKurtogram* es que el *Protrugram* calcula el *kurtosis* de las amplitudes en espectro envolvente de la señal en lugar del dominio tiempo. Finalmente, los valores de *Protrugram* están definido por:

$$Protru(i) = \frac{\langle |ES_i(n)|^4 \rangle}{\langle |ES_i(n)|^2 \rangle^2} - 2 \quad (3.4)$$

Donde ES_i corresponde al espectro envolvente del coeficiente c_i proveniente del filtrado.



3.3 Métodos de selección de banda por frecuencia cíclica objetivo

Estos métodos, a diferencia de *FastKurtogram* y *Protrugram*, requieren de conocer a priori la frecuencia cíclica objetivo, es decir, conocer las frecuencias fundamentales de falla del rodamiento. Este enfoque dirigido presenta la ventaja respecto los métodos anteriores que es menos sensible respecto a frecuencias de interferencia que puedan provocar una mala selección de banda óptima para la demodulación.

Una implementación para este método se muestra a continuación:

- 1) Al igual que en el *FastKurtograma*, la señal es filtrada repetidamente por diferentes bandas y centros frecuenciales. Para realizar esto, se utiliza el árbol 1/3-binario descrito por [Antoni 2007].
- 2) A cada una de las señales filtradas c_i se le calcula el espectro envolvente al cuadrado (*SES*), que se muestra a continuación.

$$SE_c(n) = c_i^2(n) + \tilde{c}_i^2(n) \quad (3.5)$$

$$SES_c(n) = |DFT\{SE_c(n)\}| \quad (3.6)$$

Donde \tilde{c} es la transformada de Hilbert, *DFT* es la transformada discreta de Fourier.

- 3) Finalmente se calcula el indicador sobre las frecuencias cíclicas de interés, es decir, las frecuencias fundamentales del rodamiento, esto se define como:

$$V.Ind(n) = \sum_{m=1}^M ind(SES_c(f)|_{f=m\alpha}) \quad (3.7)$$

Donde *ind* corresponde al indicador que se va a utilizar, α es la frecuencia cíclica y m corresponde al armónico de la frecuencia cíclica. Se debe tener en cuenta que se debe incluir un nivel de tolerancia (ε) a la frecuencia cíclica α , ya que la frecuencia fundamental de los rodamientos teórica no es exactamente la misma que en la práctica. En la Figura 3.2 se muestra con rojo claro la zona en la que se aplica los indicadores.

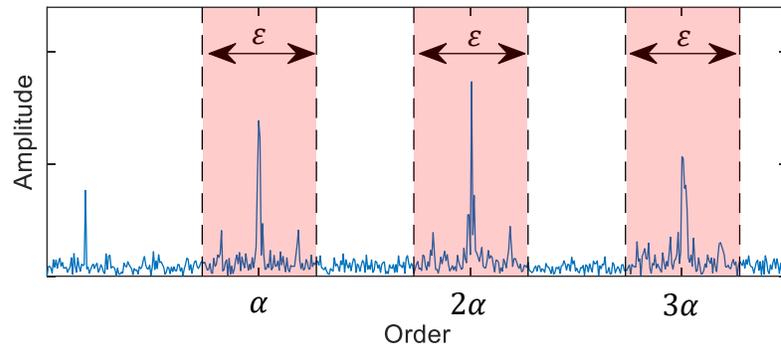


Figura 3.2. Zonas utilizadas (rojo claro) para el cálculo de indicadores en SES.

3.3.1 ICS2

El ICS2 es un indicador introducido en [Raad 2008], es uno de los indicadores más utilizados en la literatura en los métodos de selección de banda por frecuencia cíclica objetivo. De acuerdo con [Smith 2017] ICS2 se puede definir como en la ecuación (3.8).

$$ICS2(n) = \frac{\sum_{m=1}^M (SES_c(f)|_{f=m\alpha})^2}{(2 \cdot MS_c)^2} \quad (3.8)$$

Donde MS_c es la media al cuadrado de la señal.

3.3.2 Otros indicadores

Para este estudio se analizarán algunos indicadores comunes en procesamiento de señales como RMS, *kurtosis* y *skewness*. Las ecuaciones de estos indicadores son las siguientes.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (3.9)$$

$$Kurtosis = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (3.10)$$

$$Skewness = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{\left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right)^3} \quad (3.11)$$

Otros indicadores de impulsividad a evaluar son *Gini Index* y *Smoothness Index*. De acuerdo con [Hou 2021], estos indicadores tienen un buen desempeño distinguiendo impulsividad y transientes repetitivos. Las ecuaciones utilizadas son las siguientes.

$$Gini\ Index = 1 - 2 \sum_{n=1}^N \frac{SES_{order}(n)}{SES(n)} \left(\frac{N - n + 1/2}{N} \right) \quad (3.12)$$

$$Smoothness\ Index = \frac{\sqrt[N]{\prod_{n=1}^N SES(n)}}{\sum_{n=1}^N SES(n)/N} \quad (3.13)$$

Donde SES_{order} es el espectro envolvente cuadrado con las amplitudes ordenadas de menor a mayor.

Finalmente, el indicador *Peak Ratio*, que es explicado en [Shiroishi 1997], es un indicador en el dominio de las frecuencias útil para la detección de defectos. La ecuación de este indicador es la siguiente.

$$Peak Ratio = \frac{N \cdot \sum_{j=1}^n P_j}{\sum_{k=1}^N A_k} \quad (3.14)$$

Donde P_j es la amplitud del *peak* ubicado en el armónico de falla y A_k es la amplitud del resto de las frecuencias.

Los métodos e indicadores mostrados en este capítulo serán comparados procesando señales simuladas y experimentales en los capítulos posteriores.



CAPÍTULO 4

Modelo fenomenológico de señal vibratoria de rodamiento dañado

En este capítulo se construyen señales simuladas de rodamientos de baja velocidad con falla para probar la viabilidad de los métodos vistos en el capítulo anterior.

4.1 Generación de transientes

Cuando un elemento rodante entra en contacto con un defecto localizado la respuesta del sistema es un transiente con la frecuencia natural del sistema. La duración del transiente depende del coeficiente de amortiguamiento del sistema.

El transiente es generado con la ecuación (4.1) .

$$h(t) = e^{-\xi w_n t} \cdot \sin(w_d t) \quad (4.1)$$

Donde ξ es el coeficiente de amortiguamiento, w_n es la frecuencia natural no amortiguada, w_d es la frecuencia natural amortiguada del sistema y t es el tiempo.

4.2 Distribución de transientes

Para el caso de velocidad constante los transientes son generados por impactos periódicos, pero debido a pequeños deslizamientos de los elementos, se debe considerar un desfase temporal entre impactos. Además, para evitar una condicional de ocurrencia se debe tener en cuenta la ubicación temporal del impacto anterior y así poder considerar un desfase acumulado.

La señal de tren de impulsos encargada de la ubicación temporal está dada por la ecuación (4.2).

$$x_t(t) = \begin{cases} 1, & t_i = (t_o + \delta(i)) + t_{i-1} \\ 0, & \text{otro caso} \end{cases} \quad (4.2)$$

Donde i es el número del transiente, t_o es el periodo de la falla y $\delta(i)$ es un desfase temporal aleatorio dentro de un rango acotado predefinido que varía para cada transiente.

4.3 Respuesta del sistema

La respuesta del sistema está definida con la ecuación (4.3), pero esta respuesta solo considera que hay transientes en la señal.

$$x_{rt}(t) = conv(x_t(t), h(t)) \quad (4.3)$$

Para generalizar el modelo se incluye la respuesta del sistema a rugosidades existentes entre elementos rodantes y pistas del rodamiento. Además, se considera la posible

existencia de una modulación de la señal para tomar en cuenta los efectos de variaciones de carga en los impactos (generalmente la señal moduladora es la asociada al giro del eje), esto se representa en la ecuación (4.4).

$$x_f(t) = A(t)(conv(\sigma(t), h(t)) + x_{rt}(t)) \quad (4.4)$$

Donde $A(t) = A_o \cos(2\pi f_r t)$, A_o es la amplitud del transiente, f_r es la frecuencia de rotación del eje y σ es ruido blanco.

Finalmente, el modelo permite agregar señales generadas por otros componentes. La ecuación (4.5) define la señal final.

$$x(t) = x_f(t) + \varphi(t) \quad (4.5)$$

Donde $\varphi(t)$ es una señal externa al rodamiento.

Un esquema de la generación de las señales simuladas es mostrado en la Figura 4.1.

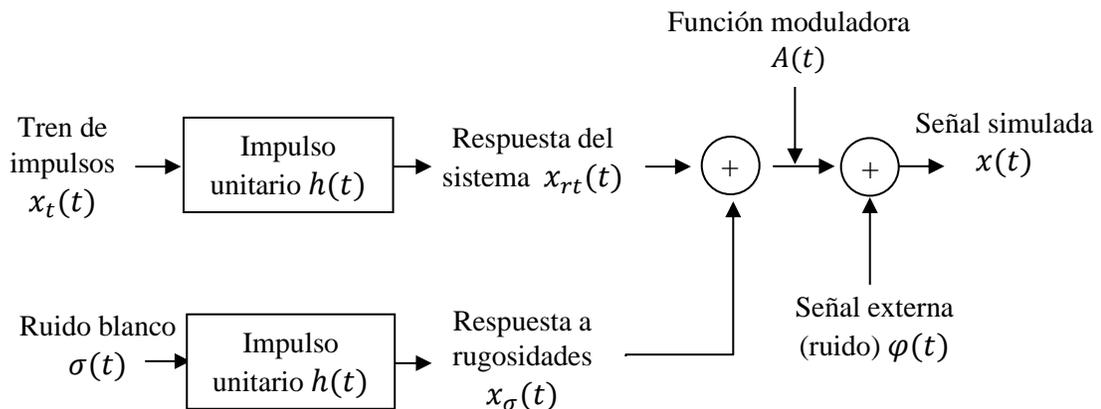


Figura 4.1. Esquema de generación de señales simuladas.

4.4 Señales externas al rodamiento

Para esta Tesis existirán 2 alternativas de señales externas ($\varphi(t)$) al rodamiento.

- 1) Ruido blanco con distintas amplitudes que enmascaran los transientes de la señal simulada. Esta señal externa se basa en que los entornos de trabajo de los rodamientos existen fuertes ruidos ambientales, donde se asume que son ruidos estacionarios de media cero.
- 2) Un único transiente de interferencia obtenido con la convolución de un impulso con una función respuesta $h(t)$ con una frecuencia natural amortiguada distinta a los transientes de la señal de falla. El fin de esta señal externa es simular que ocurre un impacto independiente al daño del rodamiento.



4.5 Clasificación de señales

Para la clasificación de las señales se calcula la relación señal ruido (SNR) de las señales simuladas.

La relación señal ruido (SNR) se define según la ecuación (4.6).

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{RMS}(x_f(t))}{\text{RMS}(\varphi_{\text{ruido}}(t))} \right) \quad (4.6)$$

Con el fin de ejemplificar, la Figura 4.2 muestra a) solo ruido blanco, b) ruido blanco más un transiente de interferencia, c) señal $x(t)$ con $\text{SNR} = -14$ [dB] generada con la señal de

falla y ruido blanco como señal externa y d) señal $x(t)$ con SNR= -14 [dB] generada con la señal de falla, ruido blanco con un transiente de interferencia como señales externas.

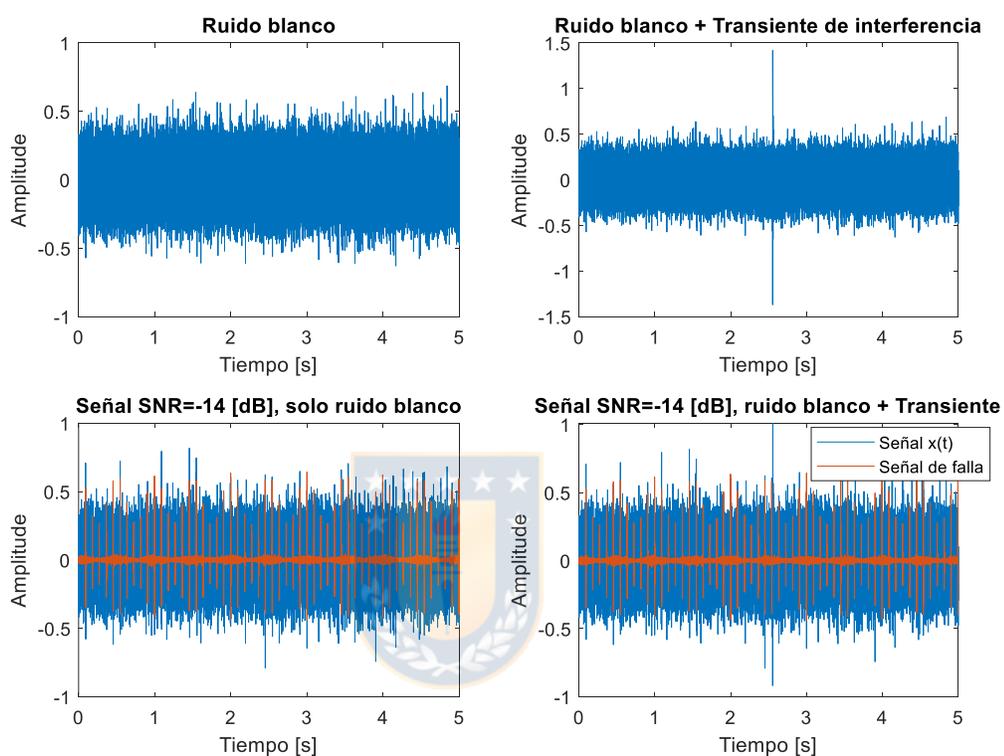


Figura 4.2. a) Ruido blanco. b) Ruido blanco con transiente de interferencia. c) $x(t)$ y ruido blanco. d) $x(t)$ y ruido blanco con transiente de interferencia.

CAPÍTULO 5

Resultados numéricos

En este capítulo, se evaluarán los métodos descritos en el capítulo 3 con las señales simuladas del capítulo 4.

5.1 Comparación de indicadores en métodos con frecuencia cíclica objetivo

Para evaluar los indicadores propuestos se generan señales simuladas con las características de la Tabla 5.1 y distintos niveles de SNR, desde -25 [dB] hasta -10 [dB], el propósito de este análisis es simular el crecimiento de un daño en el rodamiento, donde el indicador más apropiado es el que indica de forma más incipiente el daño. Para esto, se analizará de 3 formas, 1) Variando la cantidad de armónicos considerados por cada indicador, 2) Variando el nivel de error con respecto a la selección de la frecuencia cíclica de interés y 3) Banda frecuencial seleccionada por los indicadores.

Tabla 5.1. Características de la señal simulada.

Frecuencia de muestreo (f_m)	Frecuencia de falla (f_f)	Frecuencia natural amortiguada (w_d)	Frecuencia de rotación del eje (f_r)
10000 [Hz]	11 [Hz]	3000 [Hz]	2 [Hz]
Frecuencia natural no amortiguada (w_n)	Coefficiente de amortiguamiento (ξ)	Amplitud del transiente (A_0)	
3110 [Hz]	0.25	0.5 [g]	

En la Figura 5.1 se muestra las tendencias de los indicadores con distintas cantidades de armónicos. Se observa que los indicadores propuestos no son sensibles a la cantidad de armónicos considerados, dado que en todos los indicadores se comienzan a distinguir cambios debido a la falla en torno a los -20 [dB] en lugar de solo ruido.

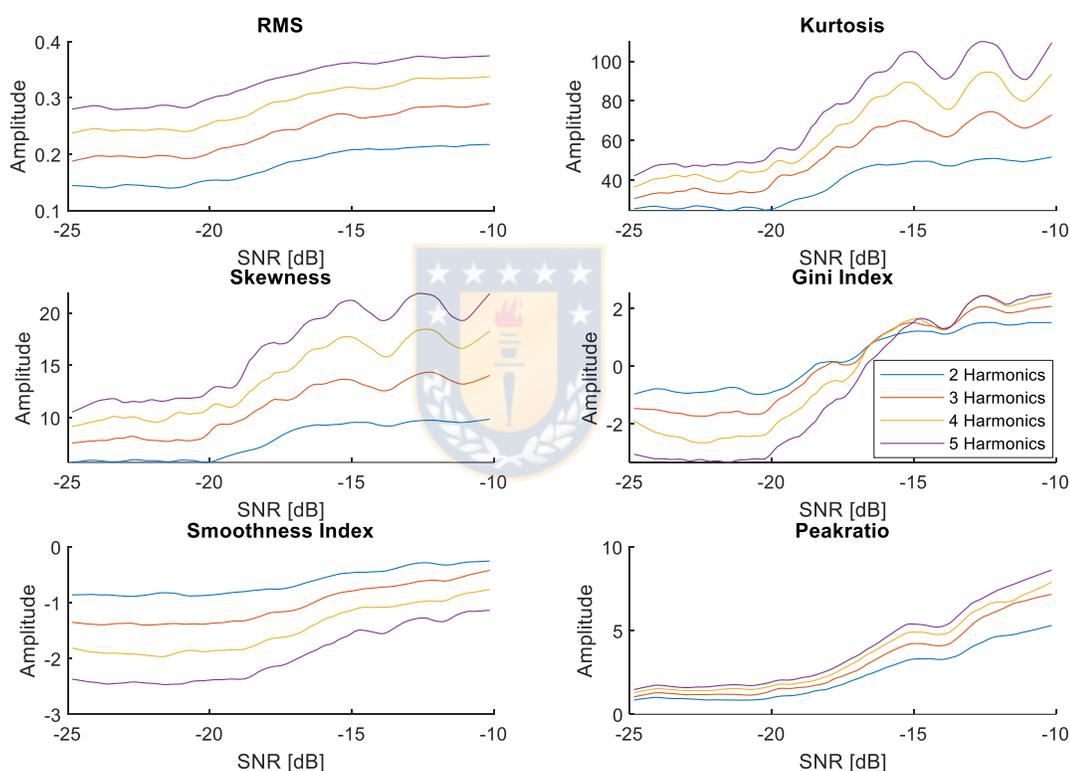


Figura 5.1. Tendencias de indicadores con distintas cantidades de armónicos.

En la Figura 5.2 se muestra las tendencias de los indicadores con distintos niveles de tolerancia con respecto a la selección de la frecuencia cíclica de interés. Se observa que en algunos indicadores se obtiene una mayor pendiente, pero el comienzo de los cambios

debido a la falla se mantiene en torno a los -20 [dB], por lo que no existe una diferencia significativa respecto a la detección incipiente con los niveles de tolerancia considerados.

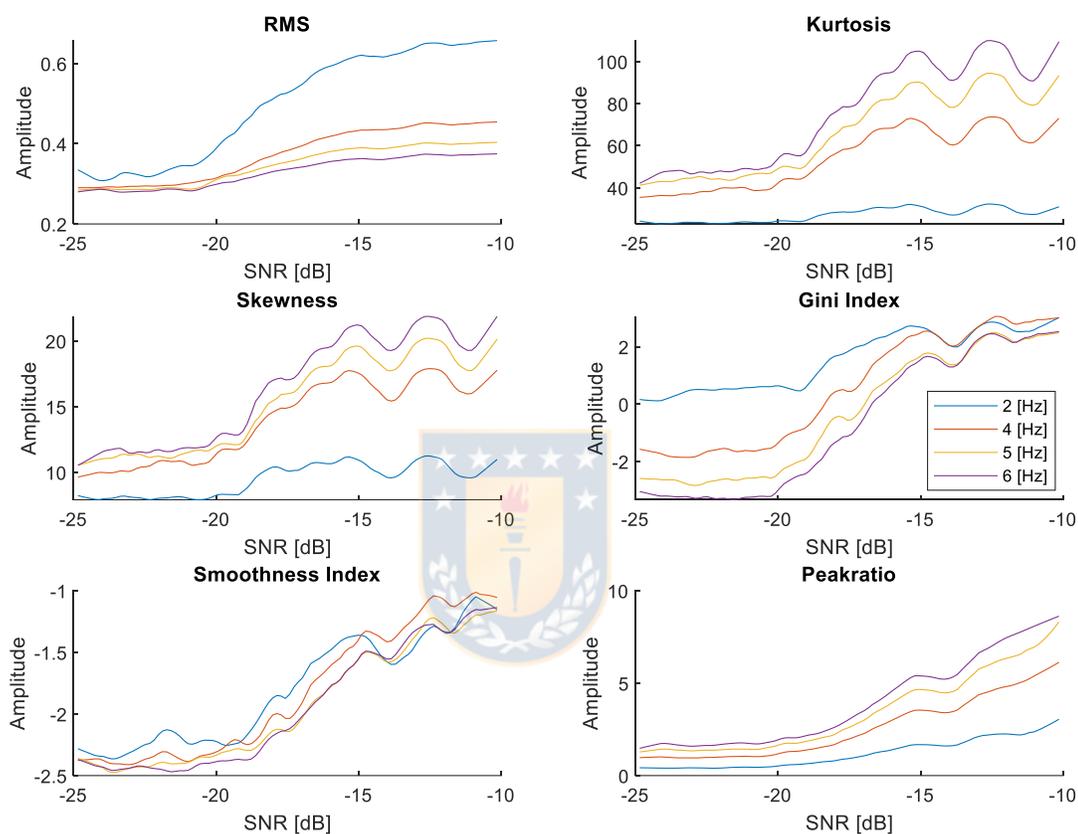


Figura 5.2. Tendencias de indicadores con distintos niveles de tolerancia.

En la Figura 5.3 se muestra la banda frecuencial seleccionada por los indicadores considerando 4 armónicos y 5 [Hz] de tolerancia respecto a la frecuencia cíclica de interés. Se observa que todos los indicadores a partir de los -20 [dB] se centran en torno a los 3000 [Hz] (frecuencia de resonancia), pero los indicadores RMS y *Peak Ratio* seleccionan un

ancho de banda menor que permite obtener espectros envolventes con menor ruido respecto a los demás indicadores.

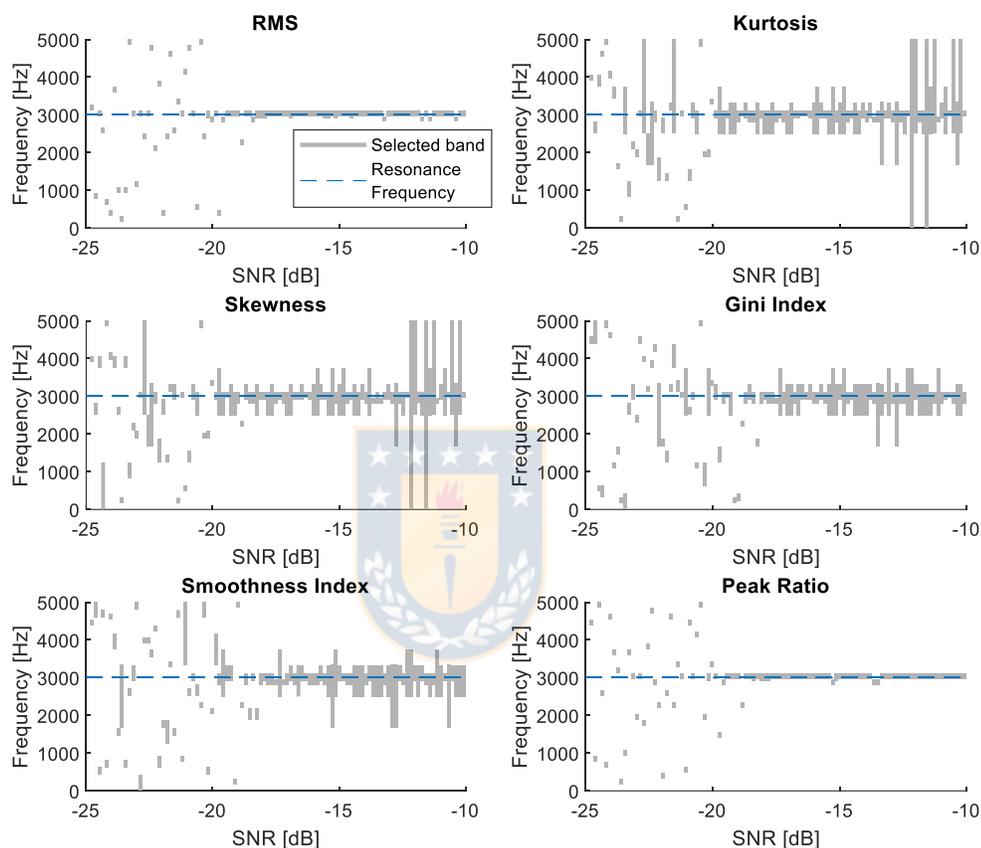


Figura 5.3. Banda frecuencial seleccionada para diferentes indicadores.

Con el fin de ejemplificar, en la Figura 5.4 a) se muestra una señal con SNR= -19 [dB] perteneciente al análisis de la Figura 5.3. En b) se muestra la banda frecuencial seleccionada y el SES para el indicador *Peak Ratio*, mientras que en c) se muestra el indicador *Gini Index*.

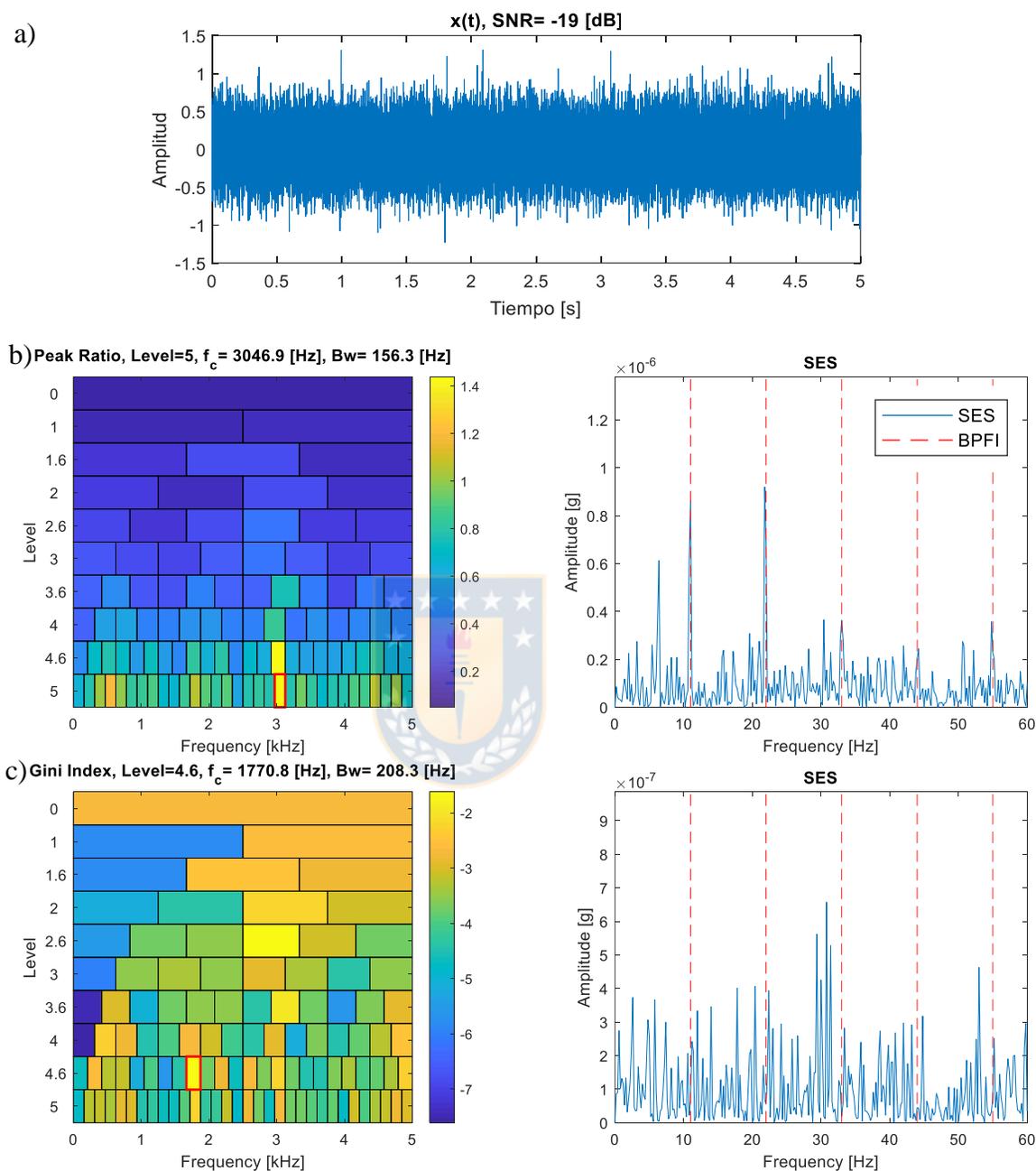


Figura 5.4. a) Señal con SNR= -19 [dB] perteneciente al grupo señales analizadas. Resultados obtenidos para b) *Peak Ratio* y c) *Gini Index*.

5.2 Comparación de métodos utilizados en la literatura con *Peak Ratio*

Se realiza una comparación de algunos métodos utilizados en la literatura como *FastKurtogram*, *Protrugram* y *ICS2* con el indicador *Peak Ratio* implementado con la metodología del capítulo 3.3. Para evaluar los indicadores propuestos se generan señales simuladas con las características de la Tabla 5.1 y distintos niveles de SNR, desde -25 [dB] hasta -10 [dB]. Además, se incluye un único transiente de interferencia con una amplitud de 1.5 [g] y con una frecuencia natural de 4100 [Hz]. El propósito de este análisis es simular el crecimiento del daño en el rodamiento y que ocurran impactos independientes al daño del rodamiento.

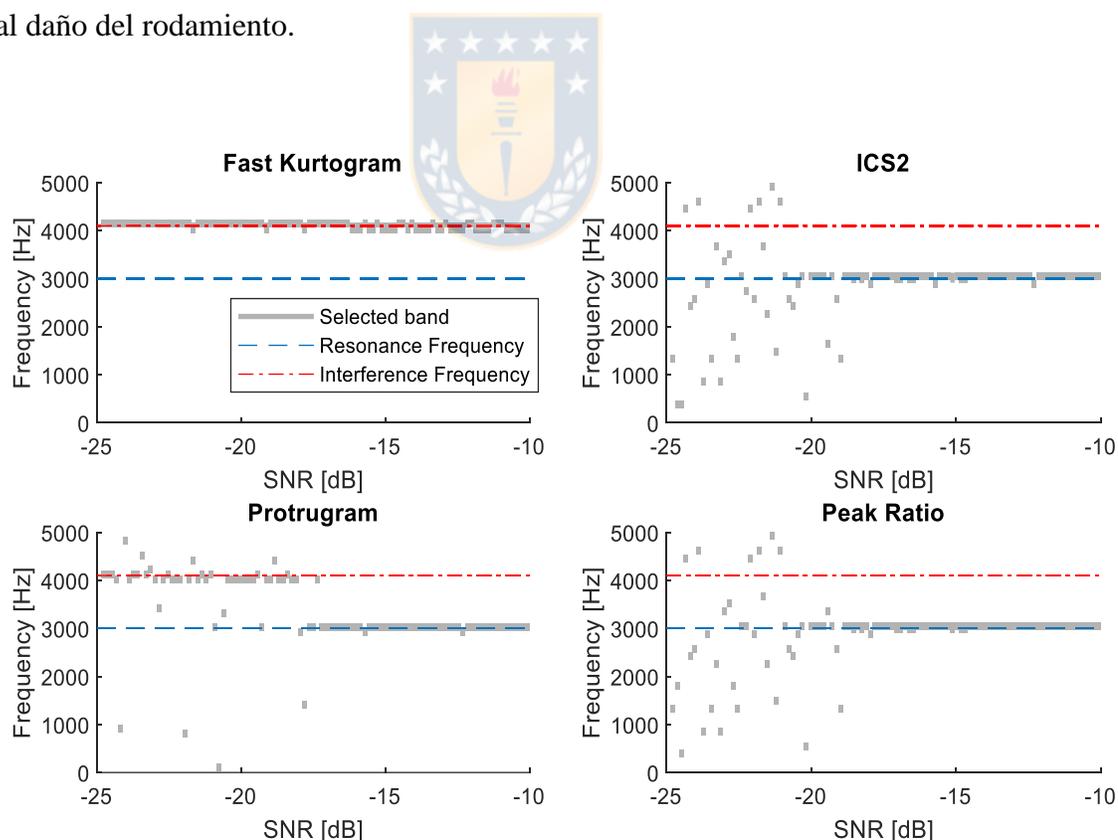


Figura 5.5. Banda frecuencial seleccionada por diferentes métodos.

De los resultados de la Figura 5.5 se observa que el *FastKurtogram* se ve influenciado por los transientes de interferencia (línea roja) en todos los niveles de ruido, mientras que el *Protrugram* solo lo está hasta los -18 [dB], a partir de ese punto selecciona correctamente la zona resonante de la señal. Por otro lado, como era esperado, los métodos de selección de banda por frecuencia cíclica objetivo (ICS2 y *Peak Ratio*) no son influenciados por el transiente de interferencia y tienen un rendimiento similar entre sí respecto a la selección de banda, es decir, seleccionan correctamente la banda frecuencial a partir de los -20 [dB]. En la Figura 5.6 se muestra los resultados obtenidos para la señal de -19 [dB] perteneciente al grupo señales analizadas por b) *Peak Ratio* y c) *Protrugram*, donde se observa el efecto del transiente de interferencia.



5.3 Resumen de resultados

De la comparación de resultados numéricos se obtiene que:

- La cantidad de armónicos y niveles de tolerancia mostrados en este trabajo no existe una diferencia considerable respecto a estas variables en los métodos de selección de banda con frecuencia cíclica objetivo.
- En la comparación de indicadores propuestos, el RMS y *Peak Ratio* son los que permiten obtener selección de banda frecuencial más adecuados respecto a tener espectros envolvente más claros con la información de falla de la señal.
- En la comparación con los métodos de la literatura, para las señales con transientes únicos de interferencia, el ICS2 y *Peak Ratio* tienen un mejor rendimiento en la

selección de banda frecuencial de resonancia en comparación al *Protrugram* y *FastKurtogram*.

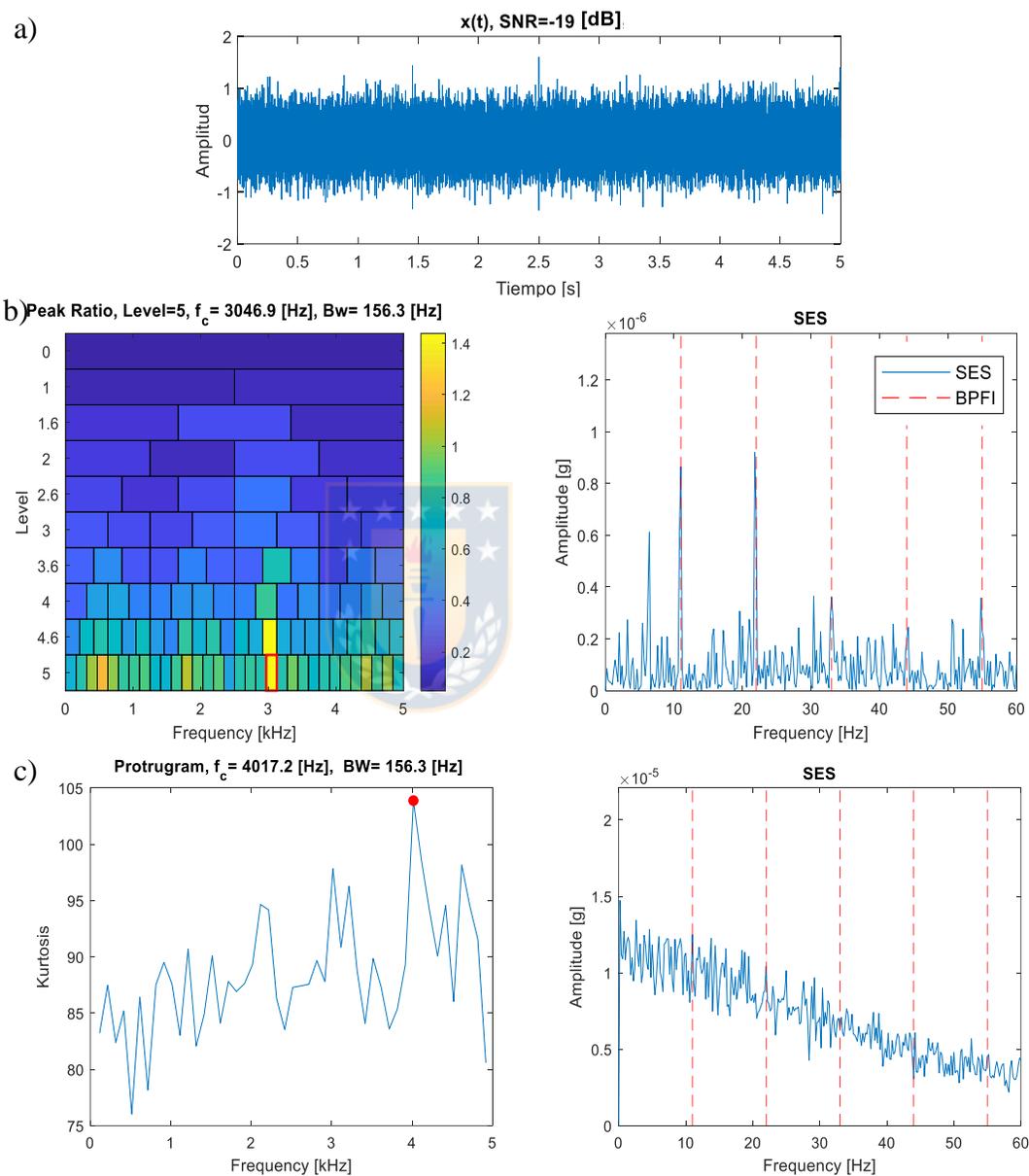


Figura 5.6. a) Señal con SNR= -19 [dB] perteneciente al grupo señales analizados con transiente de interferencia. Resultados obtenidos para b) *Peak Ratio* y c) *Protrugram*.

CAPÍTULO 6

Resultados experimentales

En este capítulo se realiza una comparación de señales experimentales de vibración obtenidas de la base de datos de rodamientos de la Universidad Politécnica de Madrid [Soto-Ocampo 2020] con el fin de lograr detectar la falla que fue inducida en el banco de ensayos.



6.1 Características de la base de datos utilizada

El banco de ensayo cuenta con dos soportes con rodamientos de rodillos esféricos de doble hilera FAG 22205E1KC3. Se indujeron fallas en los elementos rodantes del rodamiento de prueba. El banco está sometido a una carga normal de 1.4 [kN]. La velocidad de rotación es de 200 [cpm] y los datos del acelerómetro son recopilados a 40 [kHz]. Un esquema del banco de ensayos es mostrado en la Figura 6.1.

Los detalles de las frecuencias de falla del rodamiento son mostrados en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Frecuencias de falla y giro de rodamiento del del banco de ensayos.

f_{giro}	f_{BPFO}	f_{BPFI}	$f_{2\cdot BSF}$	f_{FTF}
3,33 [Hz]	20,61 [Hz]	29,38 [Hz]	18,01 [Hz]	1,37 [Hz]

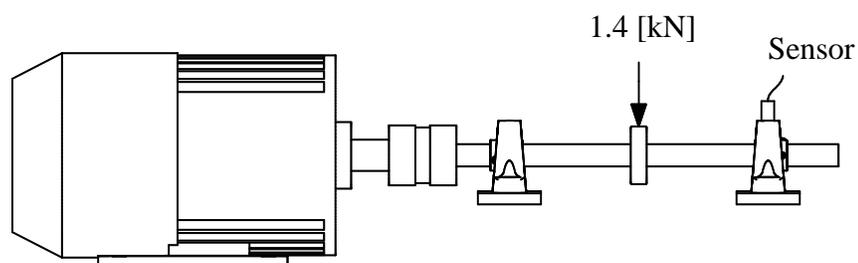


Figura 6.1. Esquema del banco de ensayos.

En la Figura 6.2 a) se muestra la señal experimental a analizar proveniente del banco de ensayos posterior a la aplicación de un filtro pasa alto de 10 [Hz], ya que la señal en bruto presentaba un ruido de gran amplitud en las bajas frecuencias y b) es el espectro FFT de la señal, donde no se observan las frecuencias de falla del rodamiento.

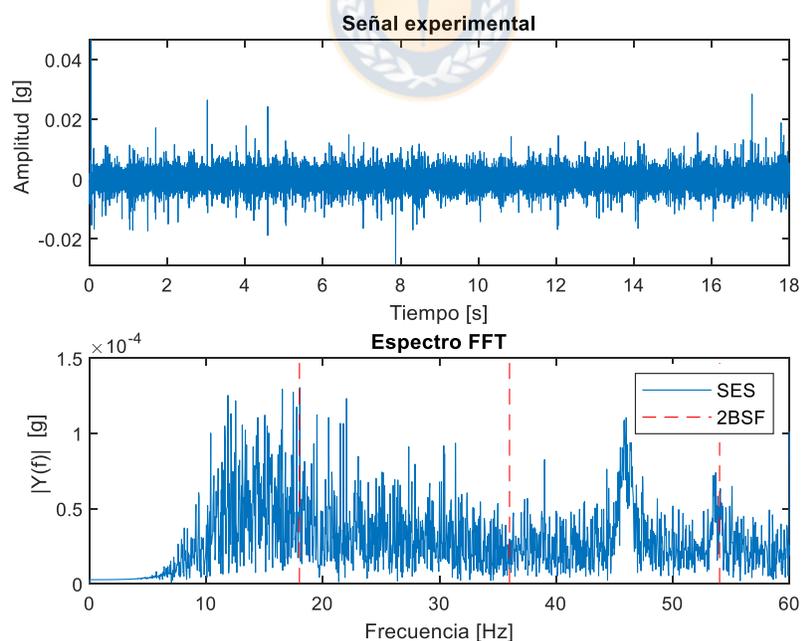


Figura 6.2. a) Señal experimental posterior a filtro pasa alto de 10 [Hz]. b) Espectro FFT de la señal experimental.

6.2 Procesamiento de las señales

En cuanto a las características de los procesamientos, el *FastKurtogram*, ICS2 y *Peak Ratio* se estableció como nivel máximo del árbol 1/3-binario en $K = 5$, para el *Protrugram* se estableció un $BW = 625$ [Hz] y un paso frecuencial de 100 [Hz]. Además, para los métodos de selección de banda por frecuencia cíclica objetivo se fijó el valor de la frecuencia $2BSF$, es decir, $\alpha = 18,01$ [Hz].

La Figura 6.3 muestra los resultados de los métodos que no requieren información de las frecuencias del rodamiento, es decir, a) *FastKurtogram* y b) *Protrugram*. De estos resultados se observa que el SES de la banda frecuencial seleccionada por el *Protrugram* ($f_c = 1668$ [Hz]) son visibles armónicos a $2BSF$ que corresponden a la falla inducida en el rodamiento, por otro lado, el *FastKurtogram* selecciona una banda frecuencial donde no se observan armónicos asociados a falla en el rodamiento.

La Figura 6.4 muestra los métodos con frecuencia cíclica objetivo, es decir, ICS2 y *Peak Ratio*. De estos resultados se observa que la banda frecuencial seleccionada por ambos métodos es la misma ($f_c = 1562$ [Hz]) y cercana a la obtenida por el *Protrugram* ($f_c = 1668$ [Hz]). Respecto al SES, se observan los armónicos a $2BSF$ correspondiente con la falla inducida en el rodamiento.

Adicionalmente, la Figura 6.5 muestra un acercamiento entre los 0 y 10 [Hz] de los espectros de envolvente al cuadrado (SES) de los métodos mostrados, en el caso de *Protrugram* y ICS2/*Peak Ratio*, en ellos se observan armónicos correspondientes a FTF, síntoma que también se asocia a la falla introducida en los elementos rodantes.

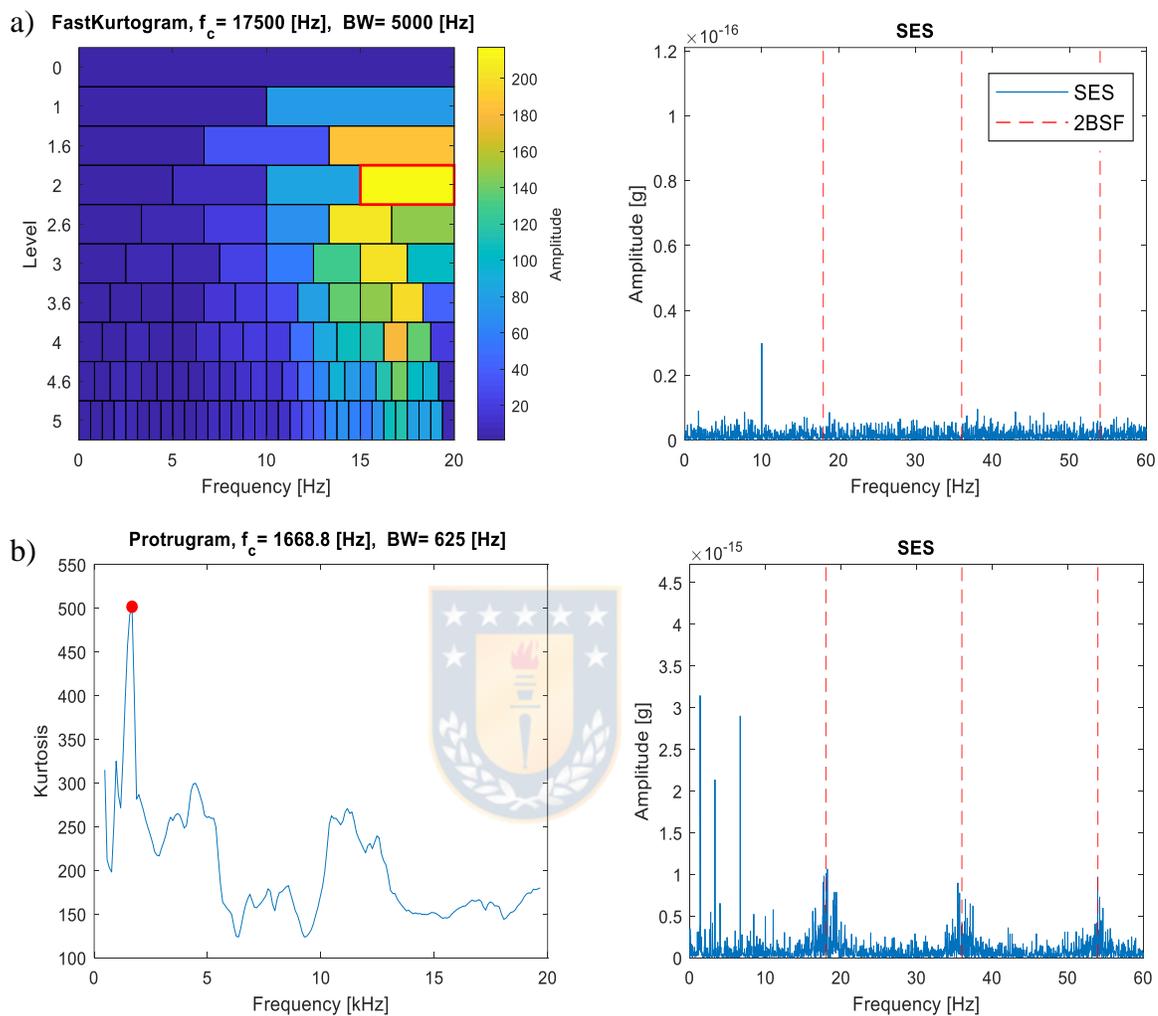


Figura 6.3. Resultados a) *FastKurtogram*, b) *Protrugram* y sus respectivos SES.

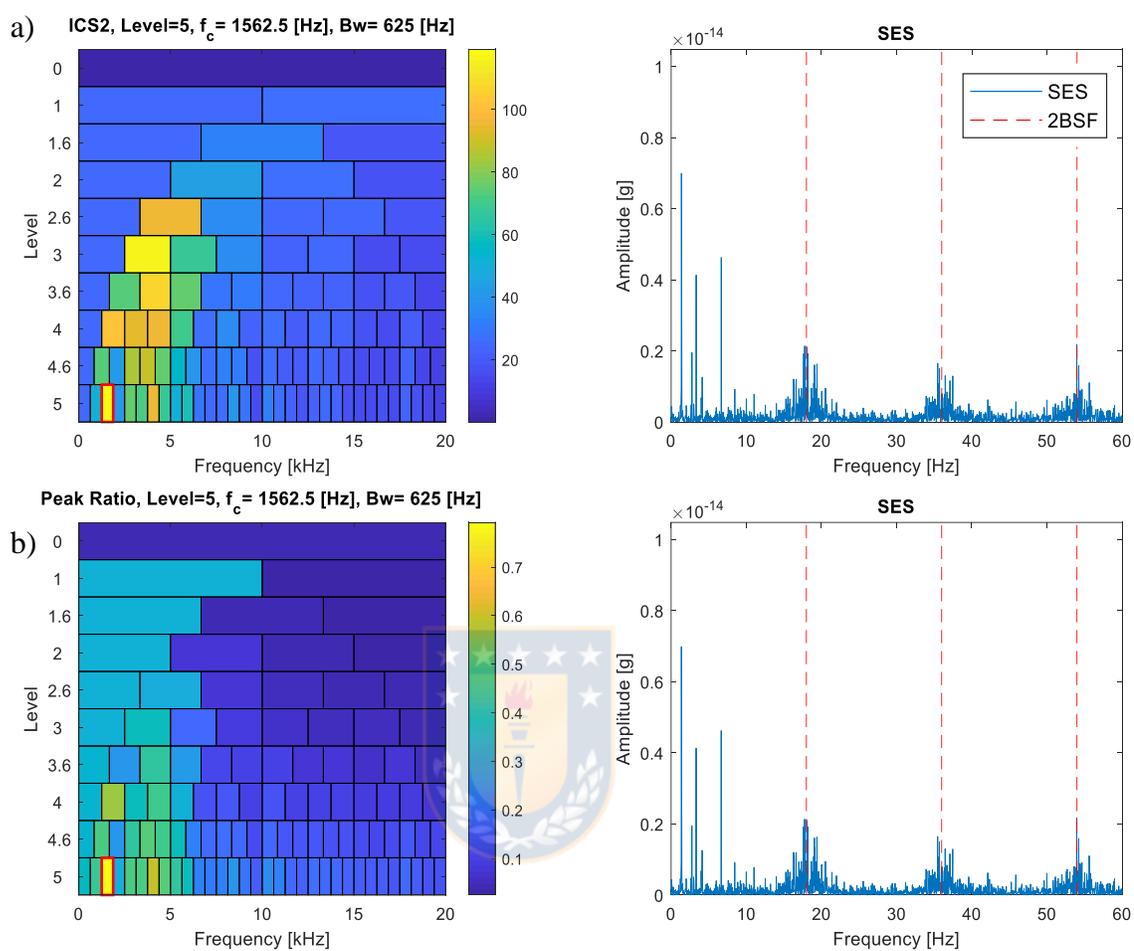


Figura 6.4. Resultados a) ICS2, b) *Peak Ratio* y sus respectivos SES.

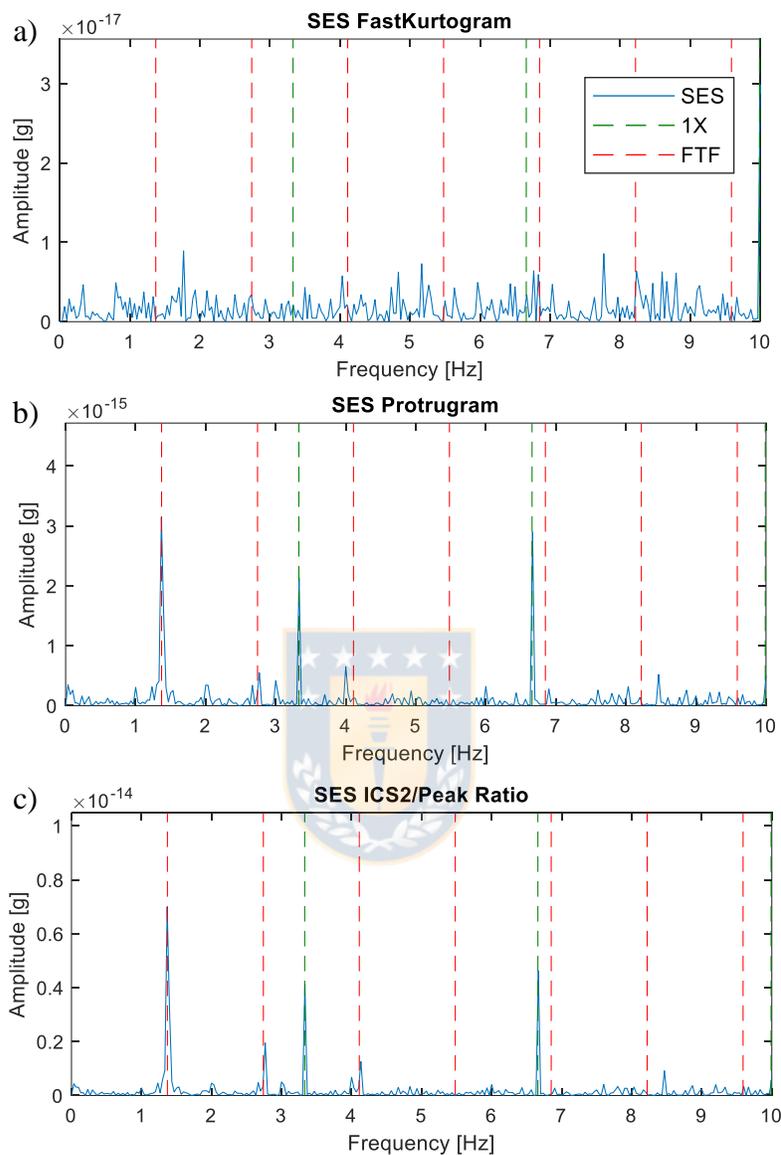


Figura 6.5. Zoom entre 0 y 10 [Hz] de los SES de los métodos a) *FastKurtogram*, b) *Protrugram* y c) *ICS2/Peak Ratio*.

Notar que en las Figuras 6.3 – 6.5 el orden de magnitud de los espectros es en torno a 10^{-15} [g], esto se debe a que se aplica el espectro envolvente al cuadrado (SES) en las señales filtradas y dado que el fin de estos métodos no es evaluar la severidad, sino que

solo detectar si existe una falla en la señal de rodamiento, por lo tanto, la amplitud de los espectros mostrados no es un inconveniente.

6.3 Resumen de resultados

De los resultados experimentales provenientes de una base de datos de rodamientos dañados en los elementos rodantes se obtiene que:

- El *Protrugram*, *ICS2* y *Peak Ratio*, seleccionan una banda frecuencial en torno a 1600 [Hz] donde se observan armónicos a 2BSF y FTF, síntomas que se asocian a la falla introducida en los elementos rodantes del rodamiento.
- El *FastKurtogram* selecciona una banda frecuencial (5000 [Hz]) donde no se observan armónicos asociados a falla en el rodamiento.

CAPÍTULO 7

Método de estimación de característica del daño del rodamiento

En este capítulo se presenta un método cuyo objetivo es permitir estimar la característica de la falla en señales de rodamientos a partir de la deconvolución de la señal medida. Para ejemplificar el método se aplicará a señales simuladas provenientes del modelo del capítulo 4 y mediciones experimentales de emisiones acústicas de un rodamiento del mecanismo de cierre del domo de un telescopio tipo VLT.



7.1 Explicación del método

Este método se basa en la idea de obtener la forma del tren de impulsos que proviene de la señal de falla del rodamiento. Como se menciona en el capítulo 4 es posible obtener una señal simulada de falla de rodamiento a partir del modelo fenomenológico de una convolución entre una respuesta al impulso $h(t)$ y una señal de tren de impulsos $x_t(t)$, que es la encargada de la ubicación y forma de los transientes, esta última es la señal que interesa obtener para determinar la característica del daño del rodamiento. La Figura 7.1 (a) es un esquema simplificado del modelo fenomenológico utilizado.

Un método para obtener la forma del tren de impulsos es realizar una deconvolución entre la señal de falla $x(t)$ y la respuesta al impulso $h(t)$, de estas señales es posible obtener el

tren de impulsos $x_t(t)$. En la Figura 7.1 (b) se muestra un esquema de la obtención de la señal estimada de tren de impulsos $x'_t(t)$. Se debe notar que para realizar esta deconvolución se necesita conocer el impulso unitario $h(t)$. Como en la práctica no es posible conocer el $h(t)$ real, para este trabajo se utiliza una estimación $h'(t)$ obtenida a partir de un promedio de los transientes que se observan en la señal. La metodología para realizar esta premediación es aislar los transientes observados en la señal y manualmente ajustar la posición de los transientes para disminuir una posible contrafase en el momento de promediar. Esto se muestra con mayor claridad en la Figura 7.2.

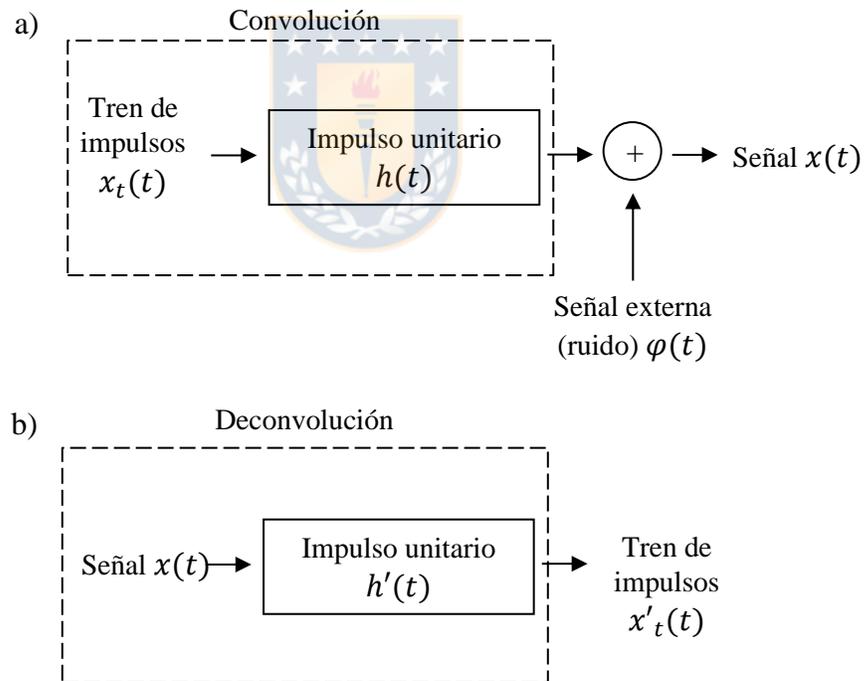


Figura 7.1. a) Esquema simplificado de generación de señal simulada. b) Deconvolución de señal $x(t)$.

Finalmente se obtiene una señal $x'_t(t)$ a partir de la deconvolución mostrada en la ecuación (7.1) [Zazula 1993], que es una estimación de a la señal original $x_t(t)$, pero que adicionalmente contiene ruido.

$$x'_t(t) = \text{IFFT} \left(\frac{\text{FFT}(x(t))}{\text{FFT}(h'(t))} \right) \quad (7.1)$$

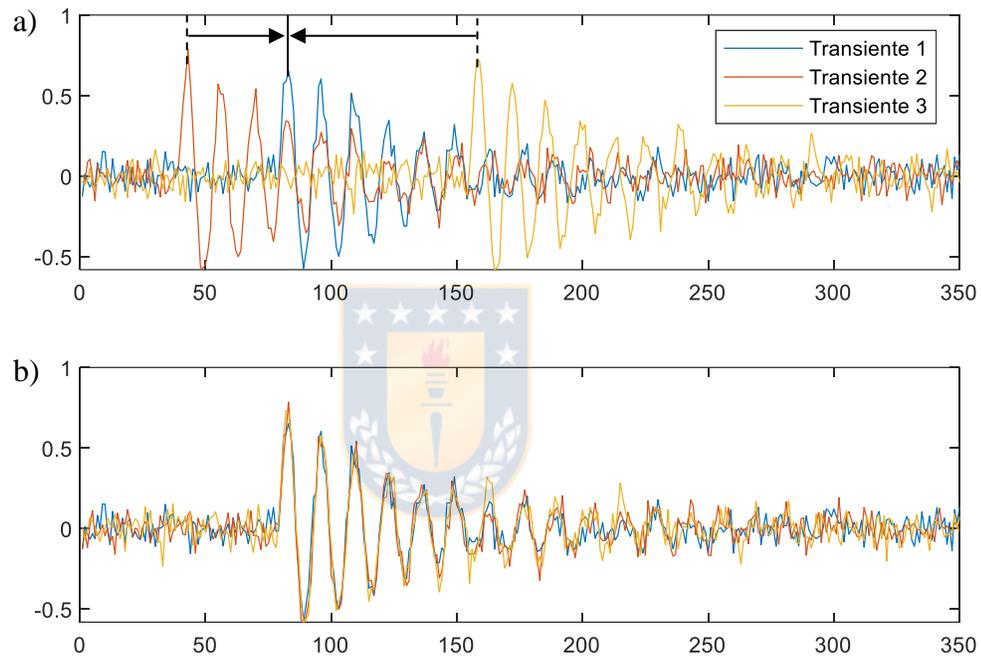


Figura 7.2. a) Transientes aislados sin ajustar. b) Transientes ajustados.

La hipótesis de este método es que distintas formas de tren de impulsos se relacionan con diferentes características del daño en rodamientos. La principal razón de plantear esta hipótesis es que, en un rodamiento con daño por desgaste abrasivo, la forma de los transientes generados será diferente a un daño por fatiga superficial o paso de corriente.

7.2 Formas de tren de impulsos

Debido a su corta duración, se suele considerar que los pulsos solo son considerados como deltas de Dirac, pero en [Tandon 1997] se indica que los pulsos pueden representar la severidad, la extensión y la antigüedad del daño.

Algunas formas de pulsos son mostradas en la Figura 7.3. Estas formas serán las utilizadas para las señales en los resultados numéricos.

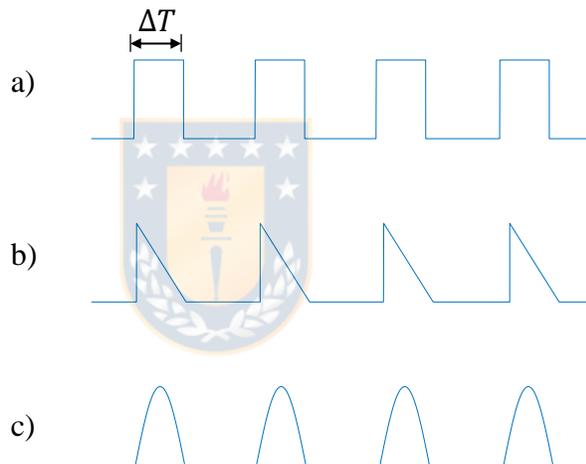


Figura 7.3. Formas de pulsos del tren de impulsos. a) Rectangular. b) Triangular. c) Semiseno.

En la Figura 7.4 se muestra una señal de tren de impulsos $x_t(t)$ con forma de pulso rectangular, la respuesta al impulso $h(t)$ y la señal simulada $x(t)$ con las características mostradas en la Tabla 5.1 y con 50 puntos para generar la forma rectangular.

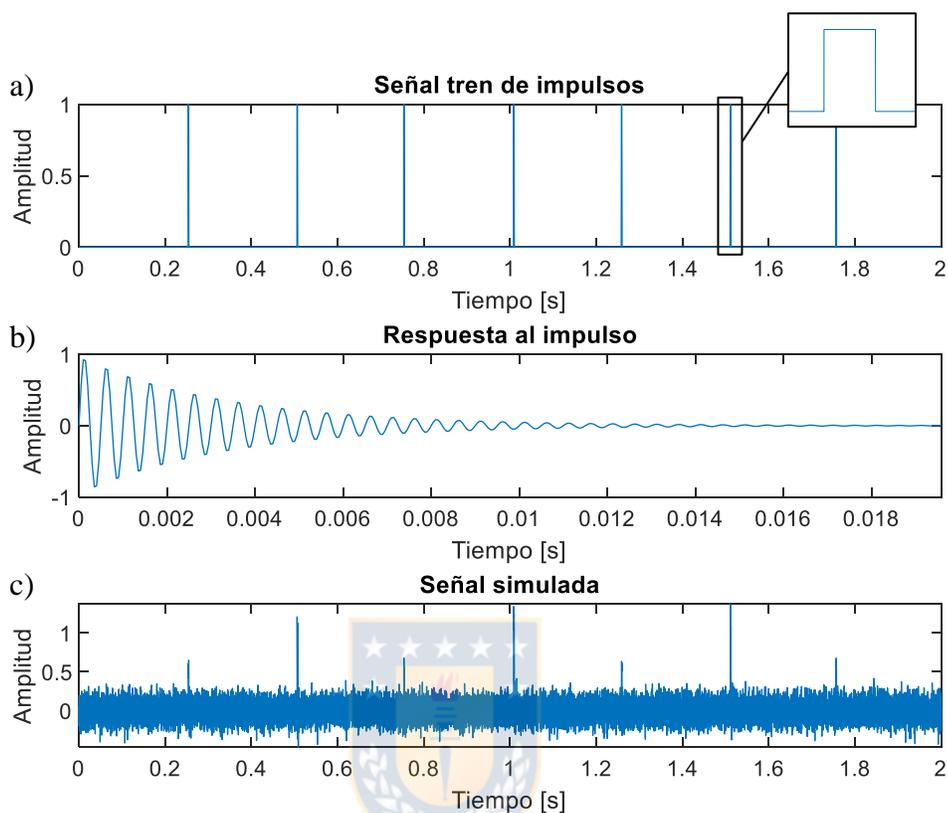


Figura 7.4. a) Señal tren de impulsos $x_t(t)$. b) Respuesta al impulso $h(t)$. c) señal simulada $x(t)$.

Por otro lado, con la información de los pulsos se puede estimar el tamaño de la falla en términos del arco de la pista externa o interna, la ecuación es:

$$s = \Delta T \cdot N \quad (7.2)$$

Donde ΔT es el intervalo de tiempo obtenido del ancho del pulso y N es la frecuencia de rotación que dependerá si el daño se encuentra en la pista interna o externa, las ecuaciones para los casos son las siguientes:

$$N = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos(\beta) \right) RPM, & \text{Pista externa} \\ \frac{1}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos(\beta) \right) RPM, & \text{Pista interna} \end{cases} \quad (7.3)$$

7.4 Resultados numéricos

Para los resultados a partir de señales simuladas se realiza un análisis sobre la sensibilidad del método respecto al nivel de SNR. Para esto, se generan 3 señales con las características de la Tabla 5.1, pero con diferentes formas de pulsos (rectangular, triangular y semiseno) y SNR: 0 [dB], -5 [dB], -10 [dB].

La Figura 7.5, Figura 7.7 y Figura 7.9 muestra las señales con forma de impulsos rectangular, triangular y semiseno respectivamente.

La Figura 7.6, Figura 7.8, y Figura 7.10 muestra una comparación de las señales respuestas al impulso de la señal simulada y las obtenidas a partir del promedio de transientes de la señal. Además, se muestra la señal de tren de impulsos obtenido por la deconvolución para impulsos rectangular, triangular y semiseno.

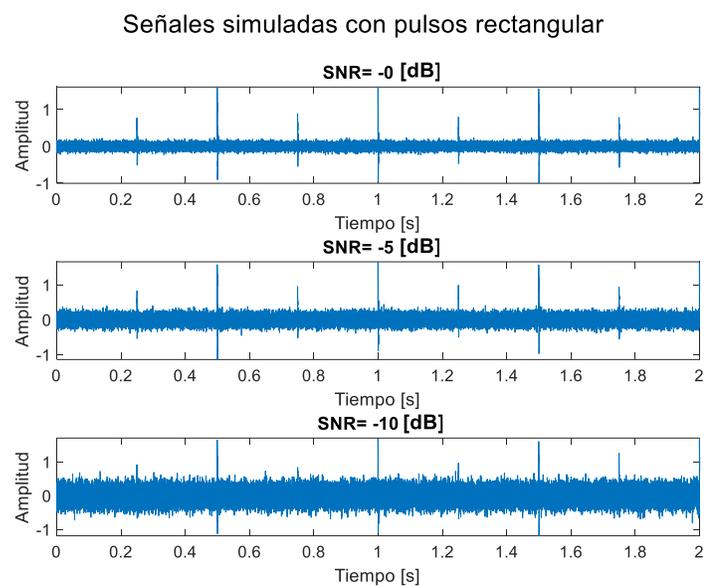


Figura 7.5. Señales simuladas con impulsos rectangulares.

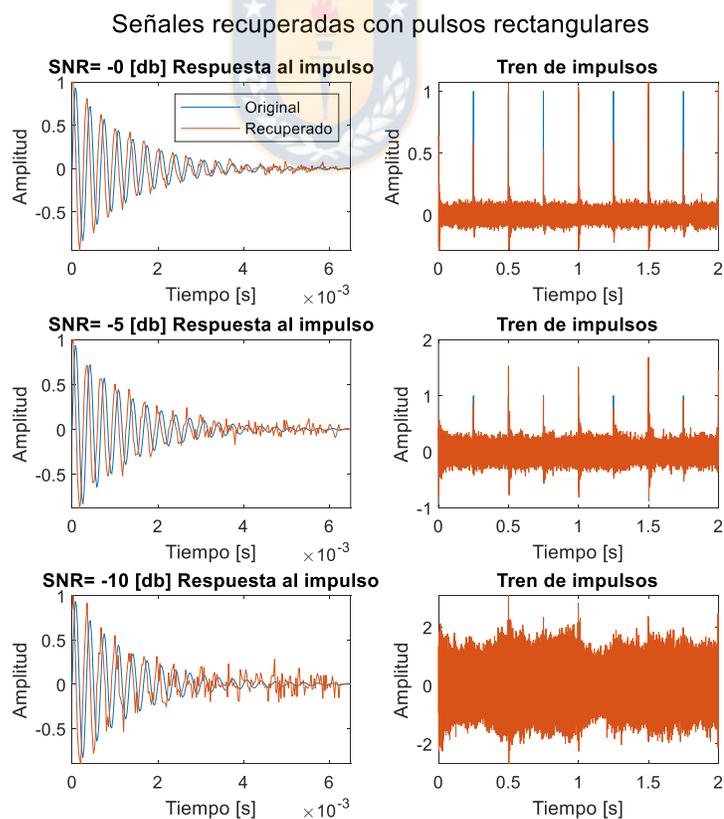


Figura 7.6. Señales recuperadas con deconvolución en impulsos rectangular.

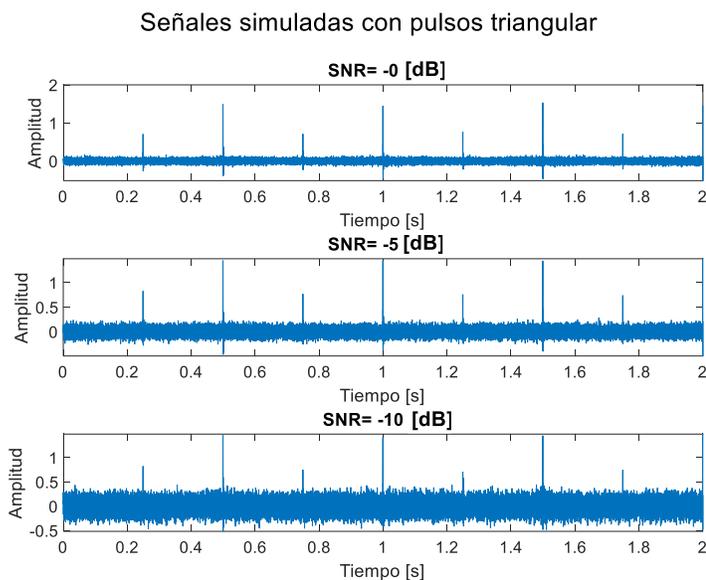


Figura 7.7. Señales simuladas con impulsos triangulares.

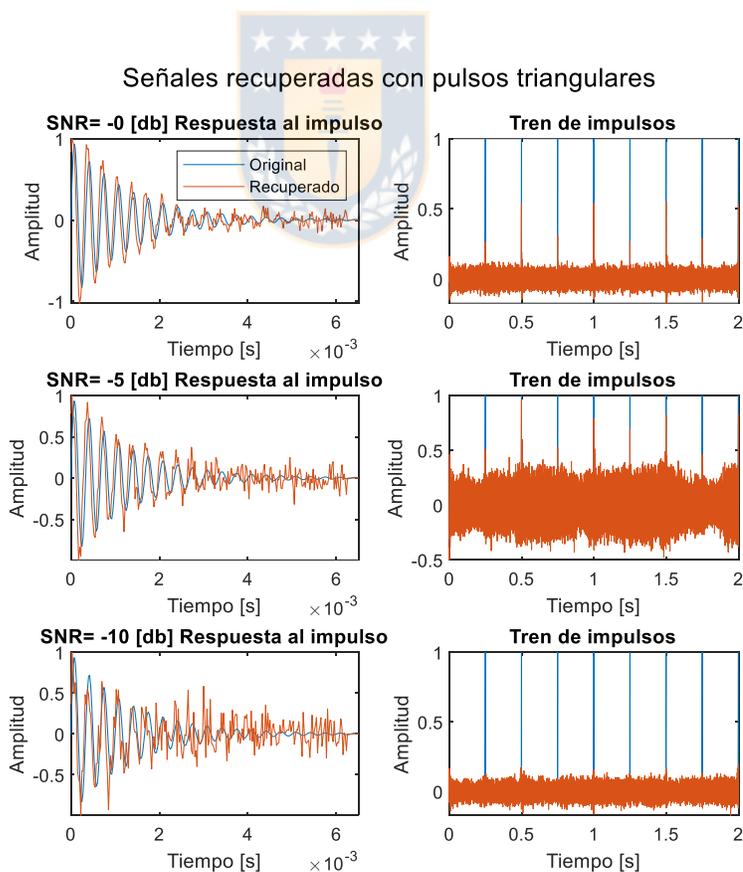


Figura 7.8. Señales recuperadas con deconvolución en impulsos triangulares.

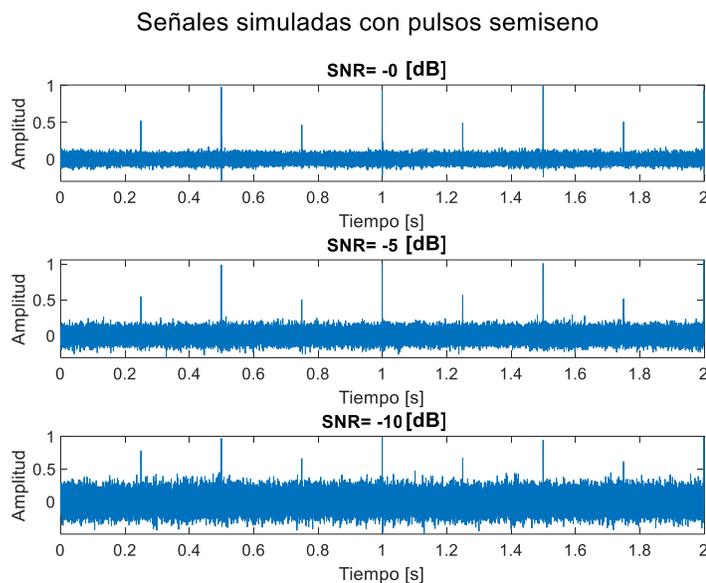


Figura 7.9. Señales simuladas con impulsos semiseno.

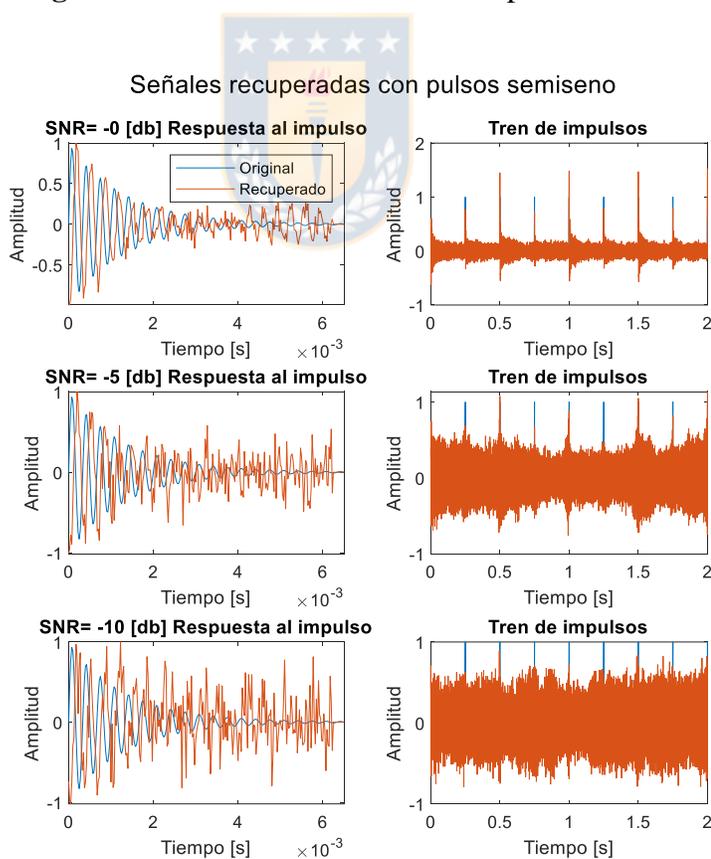


Figura 7.10. Señales recuperadas con deconvolución en impulsos semiseno.

Zoom de pulsos en resultados numéricos

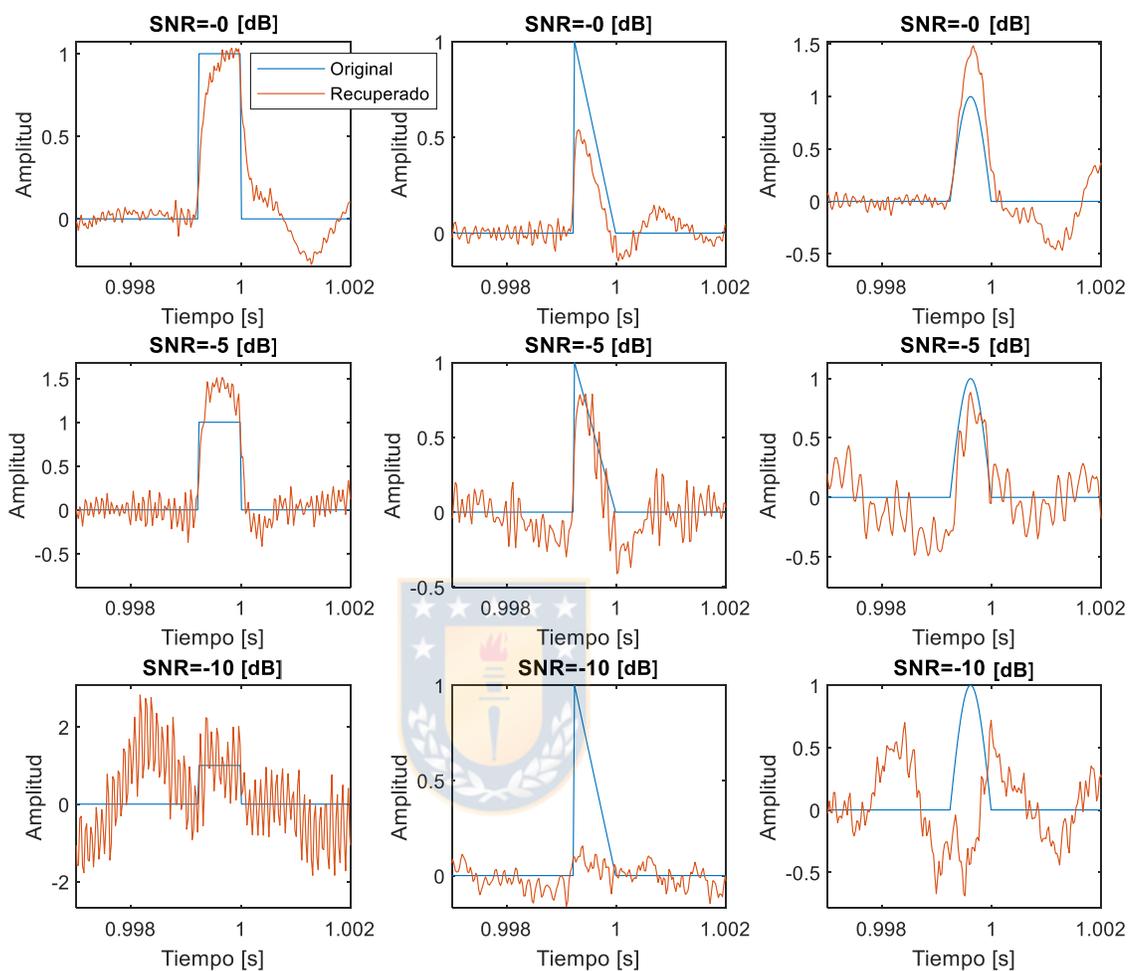


Figura 7.11. Acercamiento en señales de tren de impulsos con distintas formas de pulsos.

La Figura 7.11 es un acercamiento de las señales de tren de impulsos con distintas formas de impulsos. De esta figura se observa que es posible obtener y diferenciar la forma del tren de impulsos de señales simuladas, pero uno de los requisitos para obtener una clara señal de tren de impulsos es que se debe tener una alta relación señal ruido, ya que en las señales simuladas de SNR -10 [dB] aún es posible observar los transientes, pero no es

posible diferenciar la forma de los impulsos en la señal de tren de impulsos. Por otro lado, las señales respuesta al impulso que fueron obtenidas a partir de las mismas señales simuladas, son cercanas a las originales que fueron las utilizadas para generar la señal, excepto en el caso SNR -10 [dB] con forma de impulso semiseno, donde la respuesta al impulso se ve afectada por ruido.

Finalmente, la principal limitante del método se encuentra en el proceso de deconvolución de las señales, ya que no se ha encontrado un método que permita separar el ruido de la señal $x'_t(t)$ sin perder la información de los pulsos.

7.5 Resultados experimentales



Para los resultados experimentales el método fue aplicado a emisiones acústicas medidas en un rodamiento del mecanismo de rotación del domo en un telescopio tipo VLT, ya que estas señales presentan un alto SNR. No fue posible utilizar las señales de la base de datos de rodamientos de la Universidad Politécnica de Madrid, debido al nivel de ruido de las señales.

7.5.1 Mecanismo de cierre de domo en un telescopio tipo VLT

El domo en un telescopio tipo VLT tiene como función la protección de los espejos y debe abrirse cuando se desea utilizar el telescopio. El mecanismo que realiza el cierre del domo

opera en torno a 0,19 [Hz]. Para este caso de estudio se miden las emisiones acústicas (AE) en el alojamiento del rodamiento.

El rodamiento estudiado es un SKF 23030. La Tabla 6.1 muestra las frecuencias de falla asociadas a este rodamiento y la frecuencia de giro del eje.

La Figura 7.12 a) muestra la medición de emisiones acústicas y b) es el espectro envolvente de la señal. En la señal en dominio tiempo se observan transientes periódicos asociados a falla en el rodamiento, mientras que en el espectro se muestran frecuencias en torno a 2,25 [Hz] y armónicos coincidentes al BPFO del rodamiento. Si bien no es el valor exacto que muestra la Tabla 7.1, dicha diferencia se explica al considerar que las frecuencias de falla calculadas son aproximaciones que no consideran factores como pequeños deslizamientos de los elementos rodantes. Es por esto que se considerará el valor 2,25 [Hz] como la frecuencia del BPFO del rodamiento en este estudio.

Tabla 7.1. Frecuencias de falla y giro de rodamiento del mecanismo de cierre de domo.

f_{giro}	f_{BPFO}	f_{BPFI}	$f_{2 \cdot BSF}$	f_{FTF}
0,19 [Hz]	2,34 [Hz]	2,84 [Hz]	1,95 [Hz]	0,08 [Hz]

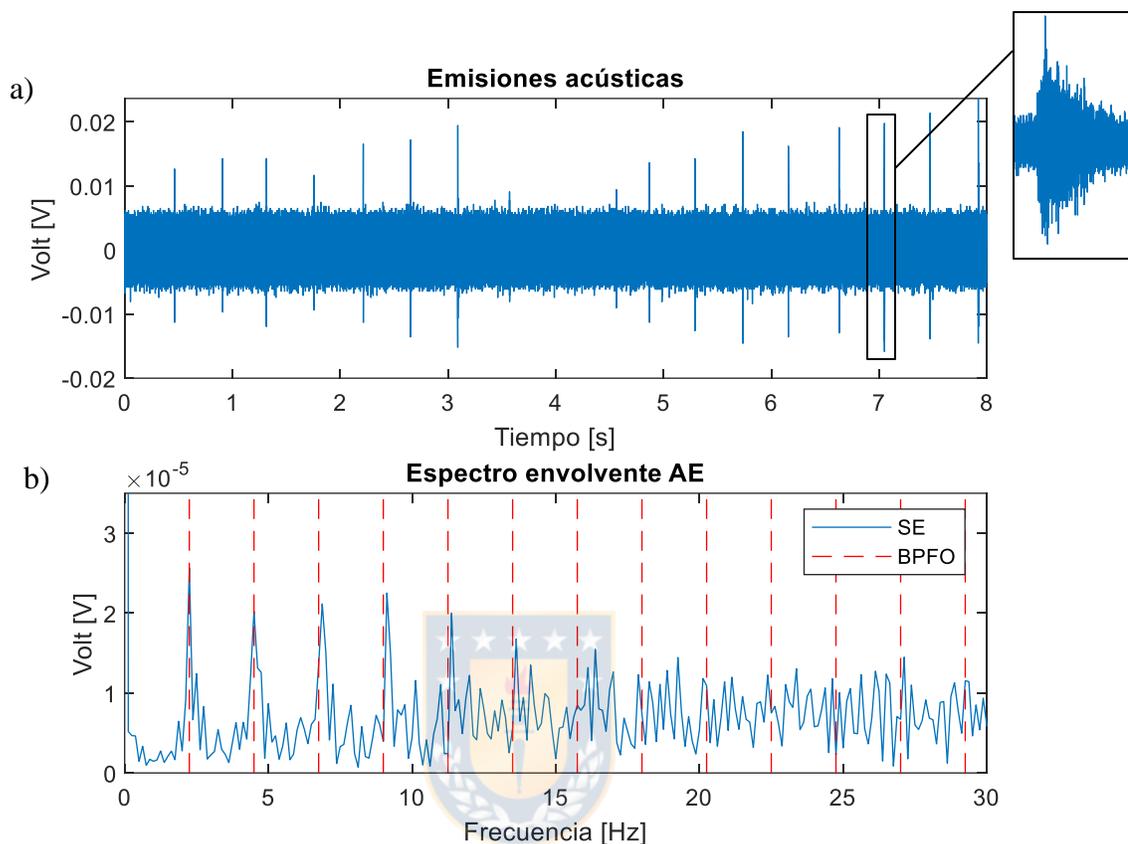


Figura 7.12. a) Medición de emisiones acústicas. b) Espectro envolvente de la señal.

7.5.2 Aplicación del método de estimación de característica del daño

Para el estudio del rodamiento del mecanismo de cierre de domo, no fue posible tener acceso al rodamiento dañado, por lo que el análisis mostrado solo tendrá como objetivo mostrar que el método puede procesar señales experimentales, pero no será posible realizar un diagnóstico de la característica del daño que se pueda confirmar en la práctica, quedando esta inquietud planteada para posibles trabajos futuros.

La Figura 7.13 a) muestra la respuesta al impulso obtenido del promedio de transientes observados en la señal en bruto, b) es el tren de impulsos obtenido de la deconvolución, c) y d) son un acercamiento de los impulsos obtenidos en torno a 3 [s] y 7 [s] respectivamente.

Se observa que la forma de los impulsos es cercana a un delta de Dirac, presumiblemente la severidad del daño es leve y es un caso de detección incipiente de falla.

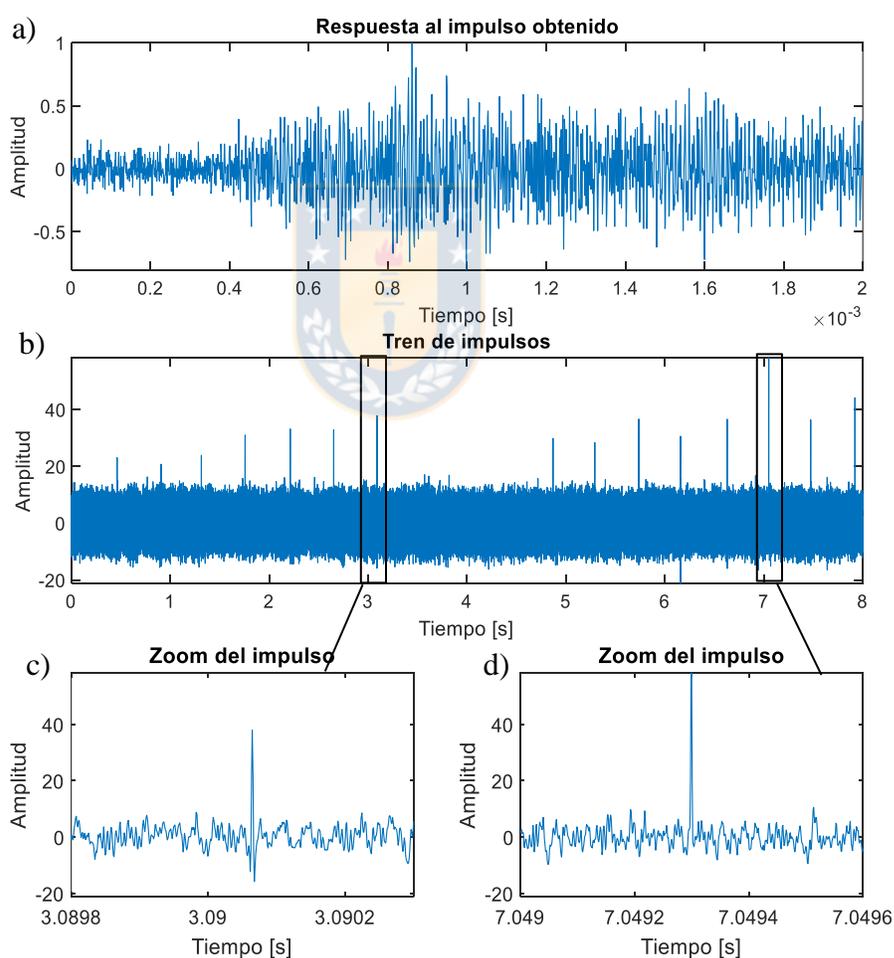


Figura 7.13. a) Respuesta al impulso obtenido. b) Tren de impulsos de las AE. acercamiento del impulso en torno a c) 3 [s] y d) 7 [s].

CAPÍTULO 8

Conclusiones y perspectivas

8.1 Conclusiones

En este trabajo se realizó un estudio de los métodos de demodulación *FastKurtogram*, *Protrugram* y *ICS2*, con el fin de realizar una comparación numérica y experimental con métodos de selección de banda frecuencial con frecuencia cíclica objetivo utilizando distintos indicadores como *RMS*, *kurtosis*, *skewness*, *Gini Index*, *Smoothness Index* y *Peak ratio*.

De la comparación de resultados numéricos se concluye que:

- De la cantidad de armónicos y niveles de tolerancia mostrados en este trabajo, es decir, desde 2 hasta 5 armónicos y de 2 hasta 6 [Hz] de error, no existe una diferencia considerable respecto a estas variables en los métodos de selección de banda con frecuencia cíclica objetivo.
- De la comparación de indicadores propuestos, el *RMS* y *Peak Ratio* son los que permiten obtener selección de banda frecuencial más adecuados respecto a tener espectros envolvente más claros con la información de falla de la señal.
- En cuanto a la comparación con los métodos de la literatura, para las señales con transientes únicos de interferencia, el *ICS2* y *Peak Ratio* tienen un mejor

rendimiento en la selección de banda frecuencial de resonancia en comparación al *Protrugram* y *FastKurtogram*.

De la comparación de resultados experimentales se concluye que:

- El *Protrugram*, ICS2 y el *Peak Ratio* permitieron diagnosticar correctamente el daño en los elementos rodantes del rodamiento de baja velocidad proveniente de la base de datos de rodamientos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Adicionalmente se introdujo un método de estimación de característica del daño por tren de impulsos a partir de la deconvolución de señales, respecto al método es posible concluir:

- Es posible obtener y diferenciar la forma del tren de impulsos de señales simuladas, pero se debe contar con una relación señal ruido de al menos -5 [dB].
- El método puede procesar señales experimentales y puede ser una herramienta adecuada para estimación de característica del daño en señales con alto SNR como es el caso de las emisiones acústicas.
- La principal limitante del método se encuentra en el proceso de deconvolución de las señales, ya que el método no permite separar el ruido de la señal $x'_t(t)$ sin perder la información de los pulsos.

8.2 Perspectivas

Las perspectivas y trabajo futuro para realizar en este trabajo de investigación son las siguientes:

- Analizar el efecto que tiene el lubricante en rodamientos de baja velocidad.
- Realizar mediciones de vibraciones y emisiones acústicas en laboratorio con distintos tipos y tamaños de falla en las pistas del rodamiento con el fin de validar el método de estimación de característica del daño por tren de impulsos.



BIBLIOGRAFÍA

- Antoni, J. (2007).
Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults.
Mechanical Systems and Signal Processing.
- Barszcz, T., & Jabłoński, A. (2011).
A novel method for the optimal band selection for vibration signal demodulation and comparison with the Kurtogram.
Mechanical Systems and Signal Processing.
- Caesarendra W., P. B. Kosasih, A. K. Tieu, C. A. S. Moodie, and B.-K. Choi, (2013).
Condition monitoring of naturally damaged slow speed slewing bearing based on ensemble empirical mode decomposition.
J Mech Sci Technol.
- Caesarendra, Wahyu & Tjahjowidodo, Tegoeh. (2017).
A Review of Feature Extraction Methods in Vibration-Based Condition Monitoring and Its Application for Degradation Trend Estimation of Low-Speed Slew Bearing.
Machines.
- Chatterton, Steven & Borghesani, P. & Pennacchi, Paolo & Vania, A.. (2014).
Optimal Frequency Band Selection for the Square Envelope Spectrum in the Diagnostics of Rolling Element Bearings.
Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference.
- Dwyer, R. (1983).
Detection of non-Gaussian signals by frequency domain Kurtosis estimation.
ICASSP '83. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing.
- Eftekharijad, B., Carrasco, M. R., Charnley, B., & Mba, D. (2011).
The application of spectral kurtosis on Acoustic Emission and vibrations from a defective bearing.
Mechanical Systems and Signal Processing.
- Guo G. T., Duan. Z. S., Shi L. C., Zhao L. (2014)
Fault diagnosis method of small excavator rotary bearing.
Coal Mine Machinery.

- Hou, B., Wang, D., Yan, T., & Peng, Z. (2021).
A Comparison of Machine Health Indicators Based on the Impulsiveness of Vibration Signals.
Acoustics Australia.
- Kim, Eric Y., Tan, Andy C.C., Yang, Bo-Suk, & Kosse, Vladis (2007)
Experimental study on condition monitoring of low speed bearings: time domain analysis.
Albermani, Faris (Ed.).
Fifth Australasian Congress on Applied Mechanics (ACAM 2007).
- Kim, A C C Tan & V Kosse (2008)
Condition monitoring of low-speed bearings — a review.
Australian Journal of Mechanical Engineering.
- Mba, David. (2006).
Development of Acoustic Emission Technology for Condition Monitoring and Diagnosis of Rotating Machines: Bearings, Pumps, Gearboxes, Engines, and Rotating Structures.
The Shock and Vibration digest.
- Mo (2018).
Vibration and Acoustics Emission Based Methods in Low-Speed Bearing Condition Monitoring.
Prognostics and System Health Management Conference.
- Osorio Santander, E. J., Silva Neto, S. F., Vaz, L. A., & Monteiro, U. A. (2020).
Using spectral kurtosis for selection of the frequency bandwidth containing the fault signature in rolling bearings.
Marine Systems & Ocean Technology.
- Ottonello, C., & Pagnan, S. (1994).
Modified frequency domain kurtosis for signal processing.
Electronics Letters.
- Raad, A., Antoni, J., & Sidahmed, M. (2008).
Indicators of cyclostationarity: Theory and application to gear fault monitoring.
Mechanical Systems and Signal Processing.
- Randall (2011).
Vibration-based Condition Monitoring.
John Wiley & Sons, Ltd.

- Shiroishi, J., Li, Y., Liang, S., Kurfess, T., & Danyluk, S. (1997).
Bearing condition diagnostics via vibration and acoustic emission measurements.
Mechanical Systems and Signal Processing.
- Smith, W., Randall, A., Chasteigner du Mée, X., Peng, P. (2017),
Use of cyclostationary properties to diagnose planet bearing faults in variable speed conditions.
10th DST group international conference on health and usage monitoring systems.
- Soto-Ocampo C., Mera J., Cano-Moreno J. & Garcia-Bernardo J. (2020).
Bearing Database (Version V1) [Data set].
Zenodo.
- Tafinine, F., & Mokrani, K. (2012).
Real time automatic detection of bearing fault in induction machine using kurtogram analysis.
The Journal of the Acoustical Society of America.
- Tandon N., Choudhury A. (1997)
An analytical model for the prediction of the vibration response of rolling element bearings due to a localized defect.
Journal of Sound and Vibration.
- Taylor, J.I. & Kirkland, D.W. (2004).
The bearing analysis handbook: A practical guide for solving vibration problems in bearings.
Vib Consult.
- Yang J., Chen J., Xu X. T., Hong R. J. (2015).
Slewing bearing analysis on fault diagnosis based on wavelet and energy fault mode and its application.
Journal of Nanjing Tech University.
- Yang J., Chen J., Hong R. J., Wang H., Yang F. (2016).
Research of slew bearing signal de-noising based on multi-scale principal component analysis and EEMD.
Journal of Central South University.
- Zazula, D., & Gyergyek, L. (1993).
Direct frequency-domain deconvolution when the signals have no spectral inverse.
IEEE Transactions on Signal Processing.

Zhang, Hengcheng & Borghesani, P. & Smith, Wade & Randall, R.B. & Shahriar, Md. Rifat & Peng, Zhongxiao. (2021).

Tracking the natural evolution of bearing spall size using cyclic natural frequency perturbations in vibration signals.

Mechanical Systems and Signal Processing.

