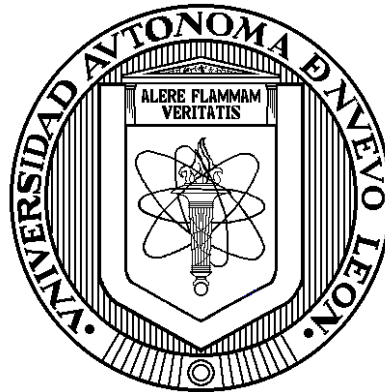


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN DE SALUD DEL  
TRANSFORMADOR MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES  
USANDO LA TRANSFORMADA HILBERT-HUANG**

**TESIS**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON  
ORIENTACIÓN EN POTENCIA**

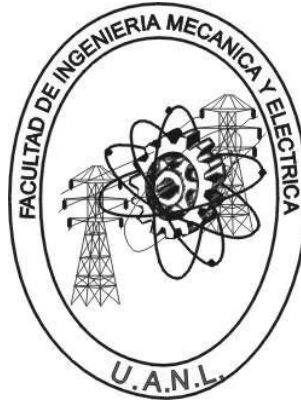
**PRESENTA:  
MIGUEL ÁNGEL JACOBO CAMBRAY**

**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L. AGOSTO DE 2011**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN DE SALUD DEL  
TRANSFORMADOR MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES  
USANDO LA TRANSFORMADA HILBERT-HUANG**

**TESIS**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON  
ORIENTACIÓN EN POTENCIA**

**PRESENTA:  
MIGUEL ÁNGEL JACOBO CAMBRAY**

**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L. AGOSTO DE 2011**

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Subdirección de Estudios de Postgrado

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN DE SALUD DEL TRANSFORMADOR MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES USANDO LA TRANSFORMADA HILBERT-HUANG**, realizada por el alumno Miguel Ángel Jacobo Cambray, matrícula 01537598, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.

El Comité de Tesis

---

Asesor  
Dr. Manuel Antonio Andrade Soto

---

Coasesor  
Dr. Ignacio Luis Ayala Ortiz

---

Coasesor  
Dr. Roberto Liñán García

---

Vo. Bo.  
Dr. Moisés Hinojosa Rivera  
División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza N. L., agosto de 2011

# Resumen

Publicación No.: \_\_\_\_\_

Miguel Ángel Jacobo Cambray M. C. en Ingeniería Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León

En esta tesis se evaluó la Transformada Hilbert-Huang (THH) como herramienta para analizar las vibraciones de un transformador eléctrico. La evaluación consistió en dos etapas.

En la primera, se evaluaron los diferentes algoritmos de la THH analizando la señal de vibración de un transformador. La programación de los algoritmos y los resultados obtenidos se compararon con los resultados del estado del arte. El resultado de esta etapa fue la identificación del algoritmo que presentaba el espectro más simple de analizar.

En la segunda etapa se propuso una forma de simplificar aún más dicho espectro. La propuesta consistió en: reducir el número de funciones en el espectro de Hilbert, reducir el tiempo de medición requerido para el análisis y extraer la información relevante del espectro. En esta etapa se determinó que: la vibración presente durante un ciclo del voltaje de excitación del transformador es suficiente para diagnosticarlo, las primeras dos funciones de modo intrínseco presentan los mayores cambios al aflojar el núcleo del transformador y que la frecuencia instantánea es el atributo que mejor refleja la condición de salud del transformador.

Finalmente, se demostró de forma estadística, mediante el análisis de varias mediciones independientes, que los cambios en la frecuencia instantánea son repetitivos y por ende no casualidad de una sola medición.



## **Abstract**

In this thesis, the Hilbert Huang Transform was used as a tool for the analysis of mechanical vibration in an electric transformer. The analysis was carried out in two steps.

In the first step, various algorithms were evaluated to analyze a transformer's vibration signal. Algorithms and its results were compared with those presented by literature. The final result of this step was the identification of the algorithm with the simples Hilbert spectrum.

In the second step, a method was proposed to even further simplify the spectrum. The goal of the proposed method is to reduce the number of functions in Hilbert spectrum, by reducing the time window to be analyzed, and extracting the relevant information from the spectrum. At this step, we concluded that vibration of just one exciting voltage cycle is sufficient to get a diagnostic of the transformer. The first two intrinsic mode functions suffered the biggest changes when the transformer core is loose. Instantaneous frequency was identified as the attribute which more precisely reflects the health of the transformer.

Finally, by analyzing several time independent vibration measurements, it was statistically demonstrated that instantaneous frequency changes were repetitive.

## Agradecimientos

Agradezco a:

- El Instituto de Investigaciones Eléctricas por el apoyo brindado para realizar mis estudios de posgrado. En especial al Dr. Edgar Robles quién apoyo mi decisión y al Dr. Roberto Liñán por su asesoría durante el desarrollo de la tesis.
- El CONACyT por su apoyo económico.
- Los profesores del DIE. En especial al Dr. Miguel Escalante por sus comentarios y por facilitar parte del equipo de medición utilizado para el desarrollo de este trabajo y al Dr. Ernesto Vázquez por su apoyo logístico y la revisión de este trabajo.
- El Dr. Manuel Andrade por su ayuda y recomendaciones durante el desarrollo del trabajo de investigación y por la minuciosa revisión que realizó de la tesis.
- El Dr. Ignacio Ayala, asesor principal de la tesis. Agradezco mucho el tiempo empleado para dar seguimiento a la investigación, su paciencia en cada una de las múltiples revisiones y por cuestionar de forma profunda y amable cada consideración y resultado de mi trabajo.
- El Dr. Diego Ledezma por facilitar el equipo de medición de vibraciones y un área de trabajo para desarrollar la experimentación.
- El Dr. Marco Garza, por permitirme asistir a su clase de propiedades magnéticas de los materiales. En la cual aprendí conceptos que me ayudaron mucho en este trabajo.

## Lista se símbolos

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$N_1$	Número de espiras del devanado primario	
$N_2$	Número de espiras del devanado secundario	
$V_1$	Voltaje del primario	V
$V_2$	Voltaje del secundario	V
<b>B</b>	Densidad de flujo magnético	T
AT	Devanado de alta tensión	
BT	Devanado de baja tensión	
$F_{ax}$	Fuerza axial en los devanados	N/m
$F_{rad}$	Fuerza radial en los devanados	N/m
$F$	Fuerza magnetizante	A vuelta
$i$	Corriente de carga a frecuencia fundamental	A
$a_w$	Aceleración de la vibración del devanado	m/s <sup>2</sup>
<b>H</b>	Intensidad de campo magnético	A/m
$L$	Longitud	m
$a_c$	Aceleración de la vibración del núcleo	m/s <sup>2</sup>
$\varepsilon_s$	Coefficiente se saturación de la magnetostricción	

$U_o$	Voltaje máximo	V
$A$	Área de la sección transversal	$m^2$
$B_s$	Densidad de flujo magnético de saturación	T
$\omega$	Frecuencia radial	$rad/s$
$t$	Tiempo	s
$\mathbf{a}$	Vector de las primeras ocho componentes armónicas de aceleración de la vibración del tanque	$m/s^2$
$\mathbf{c}$	Matriz de coeficientes geométricos del transformador	
$\mathbf{u}$	Vector de las primeras cuatro componentes armónicas del voltaje de excitación	V
$a$	Aceleración de la vibración del tanque a frecuencia fundamental	$m/s^2$
$u$	Voltaje de excitación a frecuencia fundamental	V
$b$	Aceleración de la vibración en el tanque estimada para una corriente de carga cero	$m/s^2$
$m$	Pendiente de la recta definida por el armónico fundamental de la vibración en el tanque y la corriente de carga al cuadrado	
$d(t)$	n-ésima función de modo intrínseco	
$m(t)$	Promedio punto a punto de la envolvente	

$r_n(t)$	Residuo de la n-ésima función de modo intrínseco	
$\omega(t)$	Frecuencia instantánea	Hz
$x_{low}(t)$	Envolvente inferior	
$x_{up}(t)$	Envolvente superior	
$x(t)$	Dato o serie de datos en el dominio del tiempo	
$X(t)$	Señal expresada en términos de amplitud, tiempo y frecuencia instantánea	
$y(t)$	Transformada de Hilbert de $x(t)$	
$z(t)$	Señal analítica	
$\theta(t)$	Función de fase de la señal analítica	

## Nomenclatura

<b>Siglas</b>	<b>Significado</b>
<b>MED</b>	Método Empírico de Descomposición
<b>THH</b>	Transformada Hilbert-Huang
<b>FMI</b>	Función de Modo Intrínseco
<b>FFT</b>	Transformada Rápida de Fourier
<b>CP</b>	Criterio de Paro
<b>VPC</b>	Valor Principal de Cauchy

## Contenido

Lista de tablas .....	xi
Lista de figuras .....	xii
1 Introducción .....	1
1.1 Descripción del problema .....	2
1.2 Objetivo.....	3
1.3 Alcance .....	3
1.4 Justificación .....	4
1.5 Organización de la tesis .....	5
2 Fundamentos teóricos y estado del arte .....	8
2.1 Fundamentos teóricos de las vibraciones del transformador .....	8
2.1.1 Vibraciones en los devanados .....	10
2.1.2 Vibraciones en el núcleo .....	11
2.2 Análisis del estado del arte.....	14
2.2.1 Desarrollo de modelos .....	14
2.2.2 Aflojamiento del devanado .....	16
2.2.3 Aflojamiento del núcleo.....	18
2.2.4 Sistemas de diagnóstico y monitoreo.....	18
2.2.5 Aplicación de la THH al diagnóstico de transformadores .....	19
3 Transformada Hilbert Huang .....	27
3.1.1 Función de Modo Intrínseco .....	28

3.1.2	Método Empírico de Descomposición.....	28
3.1.3	Transformada de Hilbert .....	30
3.2	El espectro de Hilbert.....	31
3.3	Ejemplo de la THH .....	31
3.4	Problemática de la THH.....	36
3.4.1	Efecto borde .....	36
3.4.2	Mezclado de modos .....	39
3.5	Teoremas y complementos de la THH.....	42
3.6	Espectro de Fourier versus espectro de Hilbert.....	43
4	Sistema de pruebas.....	48
4.1	Transformador bajo prueba.....	48
4.2	Instrumentación.....	49
4.3	Circuito de medición.....	50
4.4	Secuencia de pruebas .....	50
4.5	Mediciones.....	51
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ADAPTACIÓN DE LA THH.....	53
5.1	Análisis direccional.....	54
5.2	Análisis convencional con la THH .....	54
5.3	Simplificación del espectro de Hilbert.....	57
5.3.1	Selección de FMI significativas .....	57
5.3.2	Determinación del tiempo mínimo de análisis.....	58



5.3.3	Aplicación de la THH .....	59
5.3.4	Selección de información relevante .....	61
5.4	Espectro simplificado versus espectro convencional .....	66
5.5	Reproducibilidad de patrones.....	66
5.6	Extrapolación de la técnica a transformadores de potencia .....	77
6	Conclusiones y recomendaciones .....	79
6.1	Conclusiones .....	79
6.2	Aportaciones de la investigación .....	80
6.3	Recomendaciones para trabajos futuros.....	81
6.4	Recomendaciones para medir vibraciones en transformadores .....	82
Anexo 1.- Evaluación de los diferentes algoritmos de la THH.....		83
Anexo 2.- Evaluación de la combinación de <i>wavelets</i> y la THH.....		85

## Lista de tablas

Tabla 5.1 Comportamiento de la frecuencia de la FMI 1 en el espectro de Hilbert al cambiar la presión de apriete del núcleo.....	70
Tabla 5.2 Comparación del ángulo de fase de los centros de masa de la FMI 1 en el espectro de Hilbert al cambiar la presión de apriete del núcleo.....	70
Tabla 5.3 Comportamiento de la frecuencia de la FMI 2 en el espectro de Hilbert al cambiar la presión de apriete del núcleo.....	74
Tabla 5.4 Comparación del ángulo de fase de los centros de masa de la FMI 2 en el espectro de Hilbert al cambiar la presión de apriete del núcleo.....	74
Tabla 5.5 Porcentajes de diferencia en frecuencia y en ángulo de fase. ....	76
Tabla A2.1 FMI de cada wavelet y selección de FMI relevantes.....	87

## Lista de figuras

Figura 2.1	Esquema simplificado del transformador eléctrico. ....	8
Figura 2.2	Vibración en el tanque del transformador. ....	9
Figura 2.3	Fuerzas en los devanados concéntricos de un transformador. ....	11
Figura 2.4	Cambio de dimensiones del material ferromagnético debido a la magnetostricción. ....	12
Figura 2.5	Acero al silicio de grano orientado, (a) lámina con estructura cristalina y (b) curvas de magnetización. ....	13
Figura 2.6	Curva de histéresis del acero. ....	14
Figura 2.7	Espectros de Hilbert obtenidos por Xiong al analizar la vibración de un transformador, (a) transformador sano y (b) transformador con núcleo flojo. ....	20
Figura 2.8	Funciones de Modo Intrínseco, (a) transformador sano y (b) transformador con falla. ....	21
Figura 2.9	Espectro de Hilbert de la señal de vibración de un transformador, obtenido mediante: (a) método convencional y (b) la combinación de <i>wavelets</i> y la THH. ....	22
Figura 3.1	Señal de vibración del transformador. ....	32
Figura 3.2	Identificación de valores extremos de la señal, (a) parte inicial y (b) parte final. ....	32
Figura 3.3	Construcción de las envolventes y valor promedio punto a punto, (a) parte inicial de la señal y (b) parte final de la señal. ....	33
Figura 3.4	FMI y residuo obtenido con el MED de una señal de vibración. ....	33
Figura 3.5	(a) Señal original y señal reconstruida y (b) error entre la señal reconstruida y la original. ....	34
Figura 3.6	Espectro de Hilbert de las primeras cuatro FMI de la señal de vibración. ....	35

Figura 3.7 Frecuencia instantánea de las FMI. ....	36
Figura 3.8 Obtención de la envolvente sin corrección del efecto borde, (a) parte inicial de la señal y (b) parte final de la señal.....	37
Figura 3.9 Método de corrección del efecto borde, (a) valores máximos y (b) valores mínimos. ....	38
Figura 3.10 Espectro de Hilbert de una señal de vibración sin corrección del efecto borde. ....	39
Figura 3.11 FMI con problemas de mezclado de modos. ....	39
Figura 3.12 Espectro de Hilbert de una señal con problemas de mezclado de modos.....	40
Figura 3.13 (a) Señal con componente de alta frecuencia a ser analizada y (b) FMI obtenidas con el MED.....	41
Figura 3.14 Ilustración de la técnica desarrollada por Wu [58] para reducir el mezclado de modos, (a) señal a ser analizada y (b) FMI obtenidas con el método de Wu.....	42
Figura 3.15 Espectro de Fourier de la señal de vibración del transformador.....	44
Figura 4.1 Diagrama del sistema de pruebas. ....	49
Figura 4.2 Circuito de prueba en vacío del transformador.....	50
Figura 5.1 Vibración en función del nivel de apriete del núcleo. ....	54
Figura 5.2 FMI y frecuencia instantánea obtenida al analizar al vibración de un transformador con la THH, (a) transformador sano y (b) transformador con núcleo flojo. ....	55
Figura 5.3 Voltaje y vibración del transformador segmentada por ciclos del voltaje, en verde se muestra el promedio de las señales.....	59
Figura 5.4 FMI de los 47 ciclos de medición.....	60
Figura 5.5 Frecuencia instantánea de los 47 ciclos de la señal. ....	61

Figura 5.6	Espectro de Hilbert con la energía incluida.....	62
Figura 5.7	Espectro de Hilbert de los puntos con mayor energía. ....	63
Figura 5.8	Ejemplos del espectro de Hilbert de los tres niveles de apriete evaluados, (a) Apriete 1, (b) Apriete 2 y (c) Apriete 3.....	64
Figura 5.9	Espectro de Hilbert con voltaje de excitación, centros de masa y dispersión.....	65
Figura 5.10	Reproducibilidad del patrón de vibraciones, (a) mediciones en el apriete 1, (b) mediciones en el apriete 2 y (c) mediciones en el apriete 3.....	67
Figura 5.11	Espectro de Hilbert de la media de cada medición hecha en cada condición de apriete, (a) Apriete 1, (b) Apriete 2 y (c) Apriete 3. ....	68
Figura 5.12	Centros de masa de la FMI 1 de cada medición en el espectro de Hilbert. ....	71
Figura 5.13	Centro de masa de la FMI 1 en cada nivel de apriete, con su dispersión y curvas de tendencia. ....	72
Figura 5.14	Centros de masa y dispersión de la FMI 2 en el espectro de Hilbert.....	75
Figura 5.15	Centros de masa de la FMI 2 con su dispersión y curvas de tendencia.....	76
Figura A1.1	(a) THH, (b) THH con corrección de efecto borde y (c) THH normalizada.....	84
Figura A2.1	Diagrama de flujo de la combinación de <i>wavelets</i> y la THH.....	85
Figura A2.1	Descomposición en <i>wavelets</i> de la señal de vibración del transformador.....	86
Figura A2.3	Frecuencia instantánea de las FMI relevantes.....	88

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

El transformador de potencia es uno de los elementos más costosos, grandes e importantes en los sistemas eléctricos. Por transformar las características de la energía eléctrica sin tener elementos giratorios es considerado como una máquina estática y al no tener pérdidas por fricción es la máquina con mayor eficiencia. Por su costo y el tiempo requerido para su fabricación y reparación se han desarrollado diversas técnicas de diagnóstico fuera de línea y en línea.

Las técnicas de diagnóstico fuera de línea son precisas y permiten confirmar la presencia de una falla en el transformador. En general, con este tipo de técnicas se puede evaluar el sistema aislante mediante pruebas dieléctricas como resistencia de aislamiento; espectroscopía dieléctrica; capacitancia y tangente delta entre otras. La parte mecánica se evalúa con pruebas como resistencia óhmica y con análisis de respuesta a la frecuencia. El gran inconveniente de estas técnicas es la necesidad de sacar de operación el equipo bajo evaluación.

En contraparte, las técnicas de diagnóstico en línea se han desarrollado con el objetivo de evaluar la salud operativa del transformador sin tener que sacarlo de operación. Específicamente, para evaluar el sistema aislante se analizan los gases disueltos en el aceite [1], el contenido de humedad en el aceite [2] y la medición de descargas parciales [3]. Para evaluar el sistema de enfriamiento se utiliza termografía [4] y para evaluar la integridad mecánica comúnmente se utiliza el análisis de vibraciones [5]. Estas técnicas han permitido la identificación de fallas incipientes en

transformadores. Sin embargo no son cien por ciento confiables, por lo que se continúa haciendo investigación en cada una de ellas para mejorar su confiabilidad.

Este trabajo se enfoca en evaluar la Transformada Hilbert-Huang (THH) como herramienta para analizar las vibraciones del transformador. Se busca identificar atributos que estén asociados a la condición operativa del equipo bajo evaluación y comprobar de forma estadística el comportamiento de estos atributos.

### **1.1 Descripción del problema**

El análisis de vibraciones es una de las técnicas que actualmente se encuentran en desarrollo para su aplicación en la evaluación en línea de la condición mecánica de la parte viva de los transformadores. Las investigaciones en este campo están enfocadas al análisis tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia del espectro obtenido con la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Sin embargo, para interpretar de forma correcta los resultados de este análisis se requiere conocer los complejos fenómenos electromagnéticos que originan las vibraciones en el transformador y la geometría interna del equipo bajo evaluación. Por estos motivos, no se ha podido identificar un conjunto de propiedades en las vibraciones ó en su espectro de frecuencia que refleje el deterioro mecánico del transformador.

Otra alternativa para diagnosticar el transformador es usar modelos matemáticos para calcular su vibración. En esta técnica, una diferencia grande entre el valor medido y el valor calculado indica la presencia de una falla. El gran inconveniente de esta técnica es la necesidad de realizar múltiples pruebas, varias de ellas con el transformador dañado, para obtener los parámetros del modelo. En la práctica ningún usuario o comprador de transformadores dañaría la integridad de su equipo para obtener un modelo que permita identificar el mismo daño a futuro.

En los últimos años, se ha evaluado el uso de la THH para diagnosticar el transformador mediante el análisis de sus vibraciones. Con la aplicación de esta técnica se han encontrado diferencias entre transformadores sanos y dañados. Sin embargo, el espectro que se obtiene no es fácil de interpretar y por ende, tampoco es fácil puntualizar qué atributos indican deterioro del equipo analizado. Tampoco se ha demostrado de forma estadística que los cambios en el espectro de Hilbert, asociados a los cambios geométricos, son constantes. Es decir, que el cambio en el espectro de Hilbert sea proporcional al cambio en la geometría del transformador.

Se ha demostrado que el análisis de vibraciones permite detectar fallas incipientes. Sin embargo, no hay criterios claros y simples que permitan identificar el deterioro del transformador y los que existen requieren numerosas pruebas. Esto evidencia la necesidad de desarrollar una técnica no intrusiva que permita identificar la degradación del equipo bajo evaluación. La THH luce como una técnica prometedora, sin embargo se requiere simplificar el gráfico (espectro de Hilbert) con el cual se hace el diagnóstico e identificar qué atributos están asociados al deterioro del transformador.

## **1.2 Objetivo**

La investigación desarrollada en este trabajo de tesis tiene como objetivo simplificar el diagnóstico de transformadores mediante el uso de la THH y encontrar atributos en el espectro de Hilbert que permitan identificar la salud operativa del transformador.

## **1.3 Alcance**

Este trabajo evalúa la THH como herramienta de diagnóstico de la parte mecánica de los transformadores. Para hacer esta evaluación se consideran los pasos siguientes:

- Analizar el espectro de Hilbert de las vibraciones de un transformador en condición normal de operación y con daño mecánico en su parte viva.



- Simplificar el espectro de Hilbert para facilitar su interpretación.
- Identificar atributos en el espectro de Hilbert que reflejen la condición operativa del transformador.
- Demostrar de forma estadística que los cambios en el espectro de Hilbert, asociados a cambios geométricos del equipo bajo prueba, presentan una tendencia.

Como parte del trabajo se deben establecer las condiciones necesarias para aplicar la THH al análisis de vibración del transformador. También, se deben fundamentar las consideraciones tomadas para simplificar el espectro de Hilbert y la extracción de atributos asociados al deterioro del sistema mecánico del transformador.

De forma adicional, se busca que los atributos asociados al deterioro del transformador muestren la factibilidad de usar herramientas de reconocimiento de patrones para su identificación.

#### **1.4 Justificación**

El desarrollo de técnicas de diagnóstico en línea de transformadores y de otros equipos primarios en los sistemas de suministro eléctrico ha tenido gran auge por los beneficios técnicos y económicos.

Desde el punto de vista técnico, el diagnosticar un transformador en línea (sin sacarlo de operación) permite mantener el suministro eléctrico, aumenta la robustez y confiabilidad del sistema, aumenta los márgenes de maniobra y la regulación de voltaje, y se pueden disminuir pérdidas eléctricas. También, la detección de una falla incipiente permite tomar acciones que evitan daños mayores y por lo tanto se reduce el tiempo de reparación y de indisponibilidad del equipo en cuestión.

Desde el punto de vista económico, identificar una falla incipiente antes de que sea catastrófica, en un transformador de potencia trae grandes ahorros por conceptos de sustitución de equipos, reparación, indisponibilidad de equipo y por evitar pérdidas de transmisión. Se estima que, por la

falla de un transformador de unidad, una empresa de generación de energía tiene pérdidas aproximadas de 3.8 millones de dólares por el reemplazo del equipo y de 1.5 millones, también de dólares, por día por concepto de pérdidas de generación [6]. Otro motivo por el cual una empresa del sector eléctrico puede tener pérdidas económicas son las demandas por falla en el suministro eléctrico. Una compañía aseguradora especializada en ingeniería [7] reportó que en el año 2000 un área industrial demandó el pago de 86 millones de dólares por concepto de pérdidas originadas por falla del suministro eléctrico.

Adicional a lo anterior, el beneficio más grande de evitar una falla catastrófica es reducir el riesgo para el personal que trabaja en el sector eléctrico y la posible contaminación ambiental.

## **1.5 Organización de la tesis**

La tesis consta de seis capítulos y dos anexos donde se muestra información complementaria al cuerpo principal de la tesis.

En el Capítulo 2, se presenta la teoría básica que da origen a las vibraciones en los transformadores, tanto en el núcleo como en los devanados, y el estado del arte relacionado con el diagnóstico de transformadores mediante el análisis de sus vibraciones. El estado del arte se dividió se consideraron desarrollo de modelos matemáticos, investigaciones que abordan el aflojamiento de devanados y del núcleo, sistemas de diagnóstico y monitoreo, y lo más reciente, que es la aplicación de la THH al diagnóstico de transformadores.

En el Capítulo 3, se explica la Transformada Hilbert-Huang, detallando el método empírico de descomposición, la definición de función intrínseca y la frecuencia instantánea. Se especifican los teoremas que debe cumplir y algunas modificaciones que se le han aplicado para robustecerla. Finalmente, se ilustra la aplicación de la THH al analizar la señal de vibración de un transformador.

En el Capítulo 4, se presentan los detalles del sistema de pruebas, especificando los datos técnicos del transformador evaluado y de los equipos utilizados para realizar las mediciones. Se presentan un esquema del sistema utilizado para realizar mediciones de vibración y el circuito de prueba. También, se detalla la secuencia de pruebas y la información relevante de las mediciones.

En el Capítulo 5, se analizan las vibraciones del transformador en el dominio del tiempo, se aplica la THH a dos señales de vibración del transformador para comparar los resultados con lo reportado en el estado del arte y con las modificaciones planteadas en la tesis. Se propone simplificar el espectro de Hilbert mediante cuatro pasos: selección de Funciones de Modo Intrínseco (FMI) significativas, determinación de tiempo mínimo de análisis, aplicación de la THH y extracción de información relevante para identificar la condición física del transformador. Finalmente, se emplean métodos estadísticos para demostrar que los cambios en el espectro de Hilbert, asociados a la geometría del transformador, son repetitivos.

En el Capítulo 6, se presentan las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de la investigación, se enumeran las aportaciones de la tesis y se dan recomendaciones para trabajos futuros en esta área de investigación y para la medición de vibraciones en transformadores de potencia.

## **Referencias**

- [1] K. F. Thang, R. K. Aggarwal, A. J. McGrail y D. G. Esp, “*Analysis of Power Transformer Dissolved Gas Data Using the Self-Organizing Map*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.18, No.4, pp. 1241-1248, Octubre 2003.
- [2] T. Leibfried, A. J. Kachler, W. S. Zaengel, V. Der Houhanessian, A. Küchler y B. Breitenbauch, “*Ageing and Moisture Analysis of Power Transformer Insulation Systems*”, International Council on Large Electric Systems (CIGRE) Session, Paris 2002.

- [3] M. D. Judd, L. Yang y I. B. B. Hunter, “*Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors and Signal Interpretation. Part 2: Field experience*”, Dielectrics and Electrical Insulation Society, DEIS IEEE, Electrical Insulation Magazine, Vol. 21, No. 2, pp. 5-13, Marzo/Abril 2005.
- [4] M. Wang, A. J. Vandermaar y K. D. Srivastava, “*Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service*”, Dielectrics and Electrical Insulation Society, DEIS IEEE, Electrical Insulation Magazine, Vol. 18, No. 6, pp. 12-25, Noviembre/Diciembre 2002.
- [5] M. Mizokami, M. Yabumoto y Y. Okazaki, “*Vibration Analysis of a 3-phase Model Transformer Core*”, Electrical Engineering in Japan, Vol. 119, Issue 1, pp: 1-8, Abril 1997.
- [6] Eaton, “*Bushing Gard Predicts Generator Step-up Transformer Failure*”, IA02713003E.
- [7] W. H. Bartley, “*Analysis of Transformer Failures*”, The International Association of Engineering Insurers, IMIA-WGP 33, Stockholm, International Association of Engineering Insurers 36<sup>th</sup> Annual Conference Stockholm 2003, Vol. 36.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos de las vibraciones en los transformadores eléctricos y se detalla el estado del arte del diagnóstico de transformadores basado en el análisis de vibraciones. Se explica por qué se generan vibraciones en los devanados y en el núcleo del transformador y por qué la frecuencia fundamental de esta vibración es dos veces la frecuencia de la señal de excitación. En el estado del arte, se reportan las principales investigaciones enfocadas a evaluar el transformador mediante el análisis de su vibración en estado estable.

#### 2.1 Fundamentos teóricos de las vibraciones del transformador

El transformador es uno de los dispositivos más sencillos, está formado por dos o más circuitos eléctricos acoplados por medio de un circuito magnético común [1], ver la Figura 2.1.

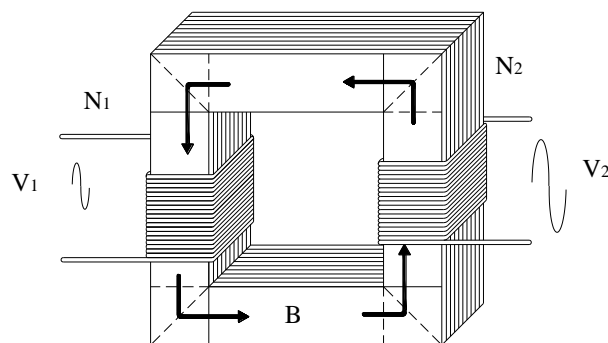


Figura 2.1 Esquema simplificado del transformador eléctrico.

A diferencia de las máquinas eléctricas rotatorias, como motores y generadores, los devanados de un transformador no giran y por lo tanto se considera como una máquina estática. Sin embargo, las fuerzas electromagnéticas presentes tanto en el núcleo como en los devanados durante su funcionamiento provocan vibración en estos elementos. Dichas vibraciones se transmiten por elementos estructurales y por el aceite hasta las paredes del tanque [2], tal como se muestra en la Figura 2.2.

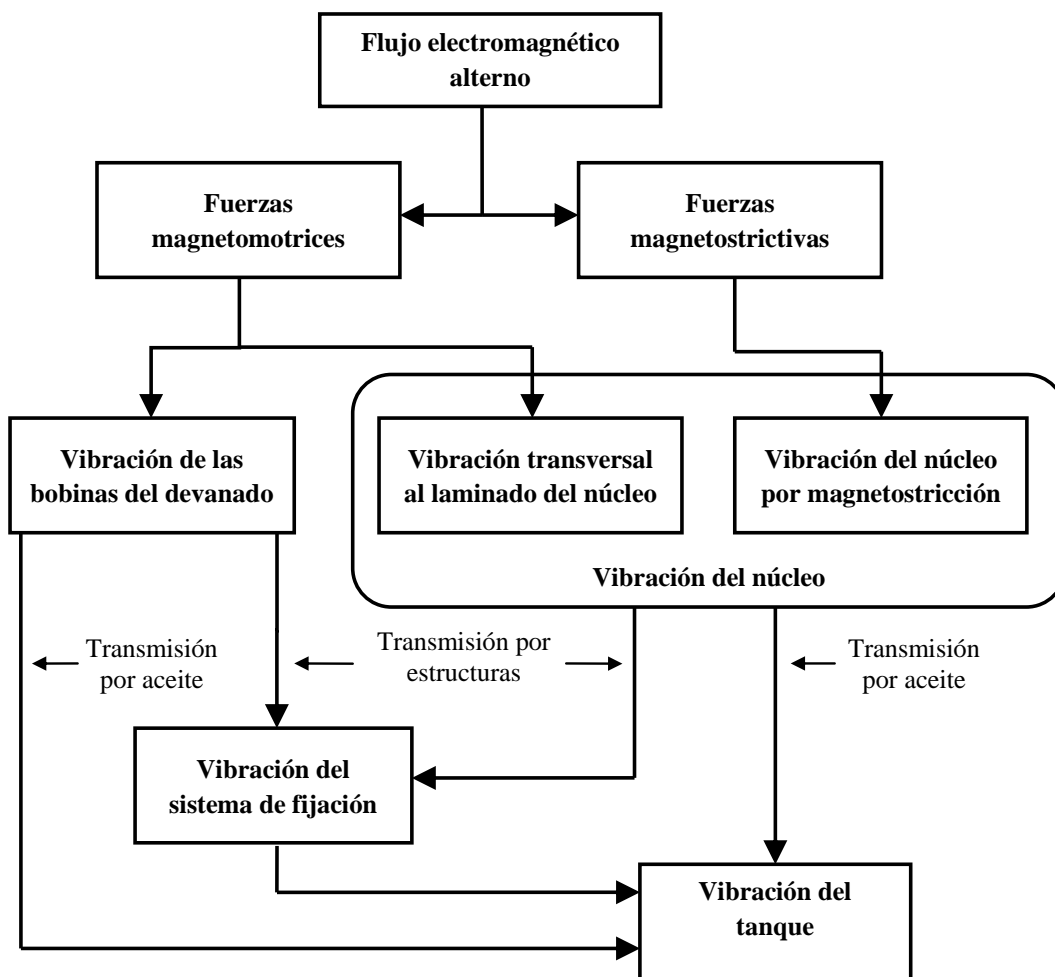


Figura 2.2 Vibración en el tanque del transformador.

Los transformadores de potencia cuentan con ventiladores, bombas de aceite y cambiadores de derivación, los cuales también generan vibración. Estos equipos, son auxiliares y pueden estar fuera de operación cuando el transformador se encuentra trabajando y por ende las vibraciones que generan no se consideran propias del transformador. Por estos motivos, el análisis de las vibraciones de transformadores se realiza cuando los ventiladores y las bombas se encuentran fuera de operación. Por otra parte, los cambiadores de derivación se consideran como elemento un crítico del transformador y es común analizar sus vibraciones para diagnosticar su condición de operación. Como la operación de un cambiador de derivaciones consiste en una serie de movimientos, caracterizados por su duración, las técnicas de análisis de vibración del cambiador de derivaciones analizan la duración y los retrasos de estos movimientos [3].

### ***2.1.1 Vibraciones en los devanados***

En los devanados, la corriente en las bobinas y el flujo de dispersión inducen fuerzas electromagnéticas sobre las espiras. Estas fuerzas son descritas por la ley de Lorentz y son proporcionales al cuadrado de la corriente [4].

$$F \propto i^2 \tag{2.1}$$

Como la aceleración es proporcional a la fuerza, entonces la aceleración de la vibración del devanado también es proporcional al cuadrado de la corriente.

$$a_w \propto i^2 \tag{2.2}$$

Dado que la vibración del devanado es proporcional al cuadrado de la corriente circulante por él, la frecuencia fundamental de esta vibración es de dos veces la frecuencia de la corriente.

Estas fuerzas tienen componente axial y radial. La componente axial trata de comprimir las bobinas, mientras que la componente radial, en el caso de transformadores de dos devanados en los cuales

las corrientes tienen sentidos opuestos, trata de cerrar el devanado interno y de abrir el devanado externo, ver Figura 2.3.

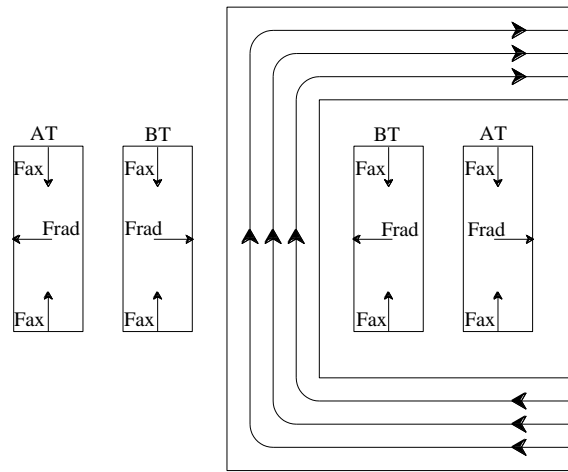


Figura 2.3 Fuerzas en los devanados concéntricos de un transformador.

### 2.1.2 Vibraciones en el núcleo

El acoplamiento entre las dos bobinas puede establecerse en aire, pero normalmente para aumentar el acoplamiento entre las bobinas se utiliza como núcleo un material ferromagnético con alta permeabilidad magnética, como acero al silicio. Por la alta permeabilidad magnética del acero, el flujo magnético se concentra casi por completo dentro del núcleo formando un lazo cerrado que entrelaza los devanados.

Los materiales ferromagnéticos, como el acero al silicio, cambian sus dimensiones al estar sometidos a un campo magnético alternante. A este fenómeno se le conoce como magnetostricción y es la causa de las vibraciones en el núcleo, ver Figura 2.4.



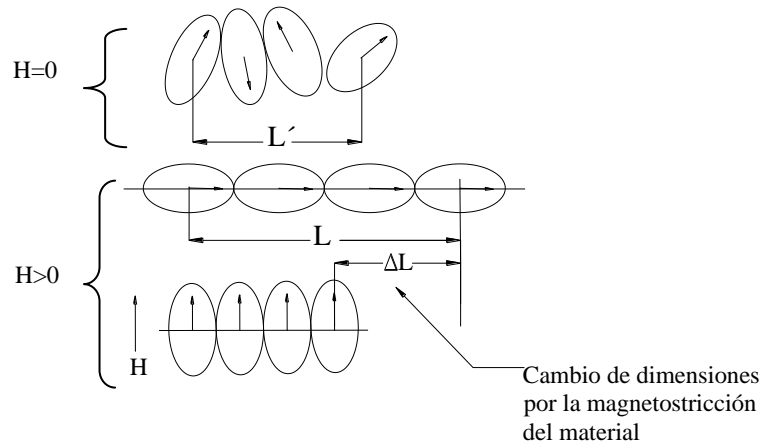


Figura 2.4 Cambio de dimensiones del material ferromagnético debido a la magnetostricción.

De acuerdo con [5], la aceleración de la vibración de un núcleo ( $a_c$ ), debida a la magnetostricción generada al excitar el transformador con un voltaje  $u = U_0 \text{sen} \omega t$ , está definida por:

$$a_c = -\frac{2\varepsilon_s L U_0^2}{(N_1 A B_s)^2} \cos 2\omega t \quad (2.3)$$

donde:

- $\varepsilon_s$  Coeficiente de saturación de magnetostricción
- $L$  Longitud de la lámina de acero al silicio
- $U_0$  Magnitud del voltaje de la fuente
- $N_1$  Número de vueltas del devanado primario
- $A$  Área de la sección transversal del núcleo
- $B_s$  Densidad de flujo magnético de saturación
- $\omega$  Frecuencia radial

La ecuación (2.3) muestra que la vibración del núcleo de un transformador es proporcional al cuadrado del voltaje con que se excita y la frecuencia fundamental de esta vibración es de dos veces la frecuencia del voltaje de excitación.

Usar núcleos de hierro en las máquinas eléctricas tiene como inconveniente la aparición de corrientes de eddy que circulan dentro del material, produciendo calentamiento. Para contrarrestar

este efecto no deseado en los transformadores, generalmente el núcleo se construye apilando láminas delgadas de acero al silicio con grano orientado. En un acero magnético de grano orientado, la dirección de fácil magnetización son las aristas de su red cubica cristalina, dirección 100 de la Figura 2.5 (a). Está también es la dirección de rolado de los aceros usados para laminar el núcleo de los transformadores. La diagonal de una cara de la red cristalina representa la dirección 110, en esta dirección es más difícil magnetizar el material. La diagonal del cubo de la red cristalina es la dirección 111, este es el eje que más difícilmente se magnetiza [6]. En la Figura 2.5 (b) se muestran las curvas de magnetización del acero en función de la dirección del campo aplicado, se observa que en la dirección 100 se requiere menor densidad de campo magnético para saturar el material.

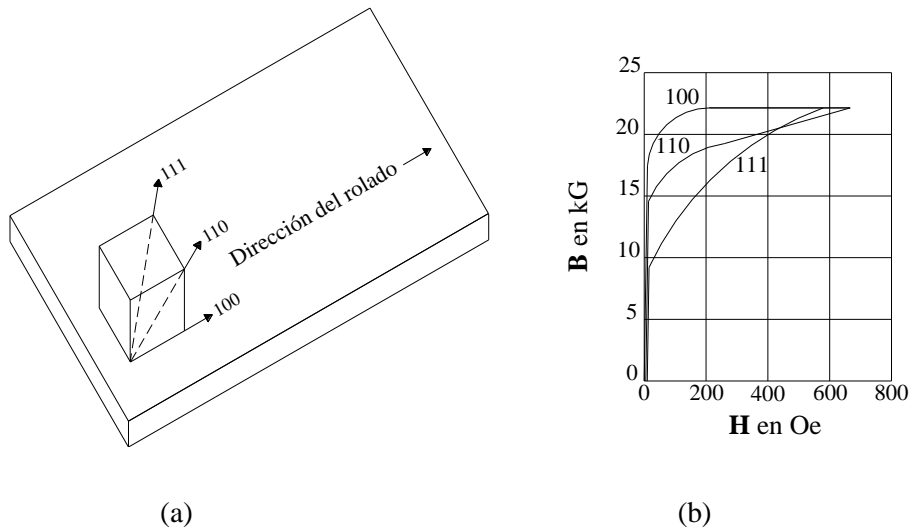


Figura 2.5 Acero al silicio de grano orientado, (a) lámina con estructura cristalina y (b) curvas de magnetización.

Los materiales ferromagnéticos tienen una permeabilidad magnética muy alta comparada con la del aire, pero su capacidad de magnetizarse describe un comportamiento de histéresis, tal como se muestra en la Figura 2.6. En general los núcleos son diseñados para trabajar en la rodilla o punto de inflexión de esta curva.

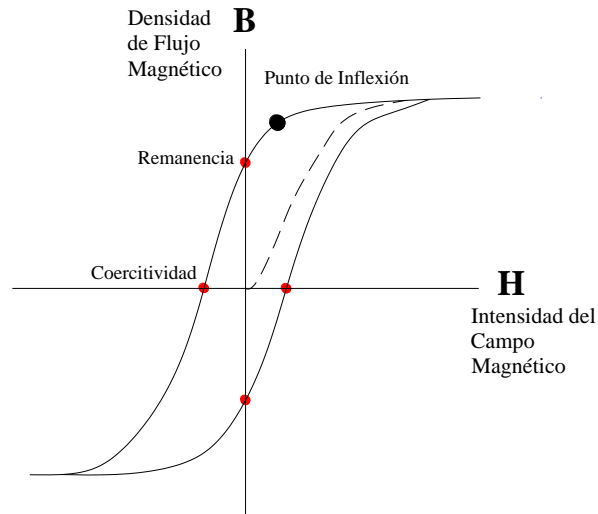


Figura 2.6 Curva de histéresis del acero.

## 2.2 Análisis del estado del arte

En esta sección se detalla el estado del arte del diagnóstico de transformadores basado en el análisis de vibraciones. Por la gran cantidad de investigación realizada en el tema, la información se divide en cinco secciones: modelos matemáticos, aflojamiento del devanado, aflojamiento del núcleo, sistemas de diagnóstico y monitoreo y aplicación de la THH al diagnóstico de transformadores.

En este análisis, únicamente se reportan las investigaciones enfocadas a evaluar el transformador mediante el análisis de su vibración en estado estable. Se excluyó toda investigación asociada a esfuerzos dinámicos de cortocircuito y al diagnóstico del cambiador de derivaciones.

### 2.2.1 Desarrollo de modelos

Una técnica ampliamente usada para diagnosticar la falla de un sistema es el desarrollo de modelos matemáticos [7], mediante los cuales se puede predecir una variable, ó de un conjunto de variables, de un sistema. Para identificar la falla del sistema, se determina el error entre el valor calculado con el modelo y el valor medido en el equipo bajo evaluación. Un error pequeño se considera normal,

mientras que un error grande entre estos dos valores indica la presencia de una falla. En esta sección se presentan los trabajos que desarrollaron modelos matemáticos para diagnosticar fallas en transformadores.

En 1984, Lavalle [8] publicó un modelo para estimar las primeras ocho componentes armónicas de vibración (**a**) de un transformador, definido como:

$$\mathbf{a} = \mathbf{c} \mathbf{u} \quad (2.4)$$

Como entrada al modelo, se requiere una matriz de coeficientes geométricos del transformador (**c**) y las primeras cuatro componentes armónicas del voltaje de excitación (**u**). Los coeficientes se obtienen caracterizando las vibraciones del transformador en varias condiciones de prueba, entre ellas la condición de falla. Este trabajo tiene gran relevancia por ser el primero que trata de diagnosticar el transformador sin sacarlo de operación y por tratar de usar un modelo matemático para predecir la vibración del transformador.

Entre 2001 y 2006, García presentó varios trabajos [9]–[12] que concluyeron con la obtención de un modelo matemático para predecir el armónico fundamental de las vibraciones en las paredes del transformador (*a*), definido por:

$$a = (\alpha + \beta\theta_{to})i^2 + (\gamma + \delta\theta_{to})u^2 \quad (2.5)$$

Las variables de entrada al modelo son el cuadro de la corriente,  $i^2$ , y el cuadrado del voltaje,  $u^2$ .

La parametrización del modelo se determina de forma experimental, considerando factores geométricos,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\delta$  y térmicos,  $\theta_{to}$ , del transformador. El modelo se evaluó provocando una falla en el devanado, en los resultados se observó reducción en la parte real e incremento en la parte imaginaria de las vibraciones.

En 2006, Ji [5] presentó una técnica para separar las vibraciones provenientes del devanado y del núcleo sin necesidad de realizar mediciones con el transformador en vacío. El método consiste en medir las vibraciones a varios niveles de carga y con esto determinar los parámetros del modelo siguiente:

$$a = b + mi^2 \quad (2.6)$$

Este modelo, considera que la relación entre la armónica fundamental de la vibración del tanque del transformador,  $a$ , y el cuadrado de la corriente de carga,  $i^2$ , es lineal,  $m$  es la pendiente de la recta definida por el armónico fundamental de la vibración medida en el tanque y la corriente de carga al cuadrado y  $b$  es la vibración estimada para una corriente de carga cero, y por ende, la vibración del núcleo. Los resultados, de Ji, mostraron que el modelo sólo es válido para el armónico fundamental de vibración, carga puramente resistiva y factor de potencia unitario.

El inconveniente de desarrollar modelos para diagnosticar fallas en transformadores es la gran cantidad de pruebas requeridas para determinar los parámetros el modelo. En especial, cuando se requiere evaluar el equipo en condición de falla, dado que esta condición pone en peligro la integridad del transformador que se está caracterizando.

### ***2.2.2 Aflojamiento del devanado***

Los trabajos de investigación asociados al aflojamiento de los devanados han seguido varios rumbos, entre los que se identifican: análisis de vibración basado en mediciones, modelado mediante elemento finito y variación en las propiedades de los materiales.

#### ***2.2.2.1 Análisis de vibración basado en mediciones***

En 1989, McKendree [13] evaluó las vibraciones de cuatro transformadores de distribución, dos sanos y dos con aflojamiento en las bobinas, concluyendo que las vibraciones se incrementan con la

carga cuando las bobinas están flojas y se reducen o permanecen constantes cuando las bobinas están bien apretadas. En 1995, Mechefske [14] describió cómo identificó una falla en un reactor mediante el análisis de vibración, presentó las vibraciones del tanque antes y después de un reapriete. En 2001, Sokolov [15] presentó sus experiencias en la identificación y detección de deformaciones en devanados de transformadores de potencia. En 2006, Bucci [16] evaluó los efectos de la modulación del voltaje en las vibraciones de un transformador de distribución, encontrando que un pequeño porcentaje en la amplitud de la modulación tiene una gran influencia en la magnetostricción y en los fenómenos de resonancia mecánica. En 2009, Li [17] determinó de forma analítica y validó de forma experimental que la presión de apriete afecta la frecuencia natural de vibración del devanado.

#### *2.2.2.2 Modelado mediante elemento finito*

En 2002, Nagata [18] estimó el modo natural de vibración del devanado de un transformador de potencia mediante el modelado en elemento finito de una bobina de 6 kVA. Su modelo considera el disco de apriete como una masa uniforme anisotrópica y los separadores son modelados como resortes. En 2008, Xie [19] realizó un modelado tridimensional en elemento finito considerando el módulo de elasticidad no lineal de los espaciadores para estimar la vibración a 100 Hz para diferentes niveles de presión en el devanado. En 2009, Kim [20] modeló un transformador en elemento finito y evaluó las vibraciones a 120 Hz en el tanque principal, en boquillas, en el relevador Buchholz, en el cambiador de derivaciones y en la válvula de sobrepresión.

#### *2.2.2.3 Variación en las propiedades de los materiales*

De 1999 a 2003, Krause presentó diversos trabajos [21]–[24] relacionando la fuerza de presión del devanado con el contenido de humedad en el papel y la temperatura de operación. En sus dos primeros trabajos encontró que la presión de apriete de los devanados es proporcional al incremento

de humedad en el papel. En [23] y [24] mostró que aún con muy pocos ciclos térmicos (10 ciclos de 24 horas subiendo a 100°C y bajando a 30°C) es detectable una reducción en la presión de apriete de los devanados.

### ***2.2.3 Aflojamiento del núcleo***

En el 2000, Rivera [25] presentó un sensor para medir vibraciones en el núcleo magnético de transformadores mediante el uso de fibra óptica y que se basa en el principio de interferometría. En 2007, Boczar [26] presentó un estudio realizado en un transformador de 20 kVA para detectar problemas en el núcleo del transformador. Presenta una tabla donde establece el valor de aceleración para una falla en el núcleo en frecuencias entre 1500 y 3000 Hz. En 2008, Hilgert [27] reportó dos modelos para calcular la vibración del núcleo magnético del transformador. Un modelo considera la curva de histéresis del núcleo y el efecto de la frecuencia en la magnetostricción, mientras que el otro modelo no considera estos efectos. Compara los resultados con mediciones en un transformador observando resultados mucho mejores con el modelo más complejo.

### ***2.2.4 Sistemas de diagnóstico y monitoreo***

En 1999, Golubev [28] presentó un sistema que mide las vibraciones, extrae los primeros siete armónicos, y determina índices de compresión del devanado y del núcleo. Las mediciones son realizadas en la parte superior e inferior en cada pierna del transformador. Para cada uno de los puntos medidos se determina el índice de compresión. Propone un sistema de alarma, verde, amarillo y rojo, para indicar la condición del transformador.

En 2004, Bartoletti [29] presentó un sistema que mide las vibraciones y las emisiones acústicas para diagnosticar transformadores de media potencia. El sistema cuenta con tres niveles de clasificación: transformadores nuevos, usados y anómalos. Para hacer la clasificación utiliza cuatro parámetros

medidos en cada una de las piernas del transformador: la amplitud a 50 Hz de la señal del sistema, el armónico principal (100 Hz) de vibración del transformador, la distorsión armónica total de las primeras veinte armónicas de vibración y la suma de las primeras cuatro armónicas de la vibración.

En 2009, Ibarzüengoytia [30] presentó un modelo para determinar la probabilidad de falla, tanto en el núcleo como en el devanado, basado en un algoritmo de redes bayesianas. Este modelo determina la probabilidad de falla analizando la vibración medida en el tanque del transformador.

### ***2.2.5 Aplicación de la THH al diagnóstico de transformadores***

En 2006, Xiong [31] usó la THH para analizar la señal de vibración de un transformador; en la Figura 2.7 se presentan los dos espectros de Hilbert que reporta. Encontró cambios en la frecuencia y en el contenido energético de cada función de modo intrínseco cuando el transformador está sano y cuando el núcleo del transformador ha sido aflojado. Sin embargo, no cuantifica el cambio ni demuestra estadísticamente que el cambio es consistente en varias mediciones. Concluyó que se puede utilizar esta herramienta, la THH, para identificar fallas en transformadores. Posteriormente, en 2009, el mismo investigador analizó las vibraciones del devanado modificando el método de interpolación utilizado para obtener la envolvente de la señal dentro del método empírico de descomposición [32]. Con esta técnica aminoró los problemas que tiene este método al encontrarse con grandes gradientes en la señal analizada.



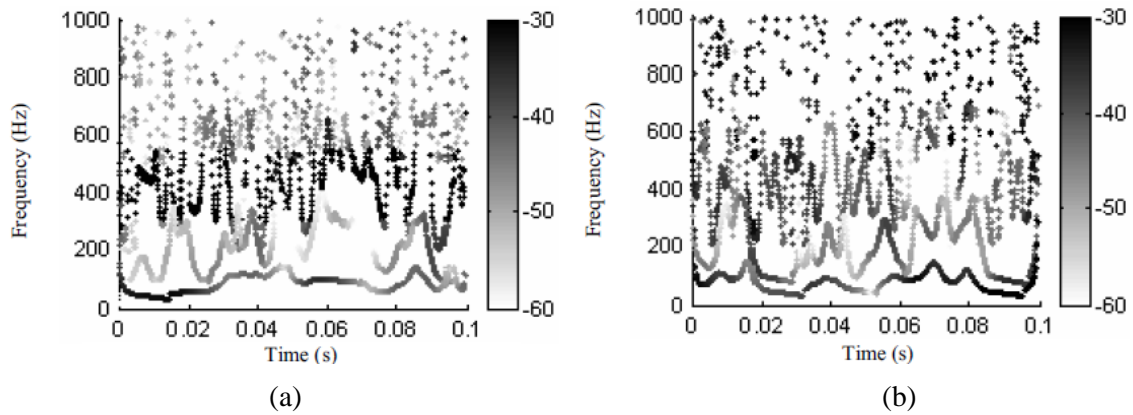


Figura 2.7 Espectros de Hilbert obtenidos por Xiong al analizar la vibración de un transformador, (a) transformador sano y (b) transformador con núcleo flojo.

En 2009, Z. Wu [33] analizó dos señales de vibración de un transformador utilizando la THH. Una señal era de un transformador sano y la otra de uno con una falla mecánica, ver Figura 2.8. Observó que cuando el transformador tiene una falla el número de funciones intrínsecas se incrementa, la amplitud cambia y la energía de la vibración se centra en las funciones intrínsecas con frecuencias más bajas.

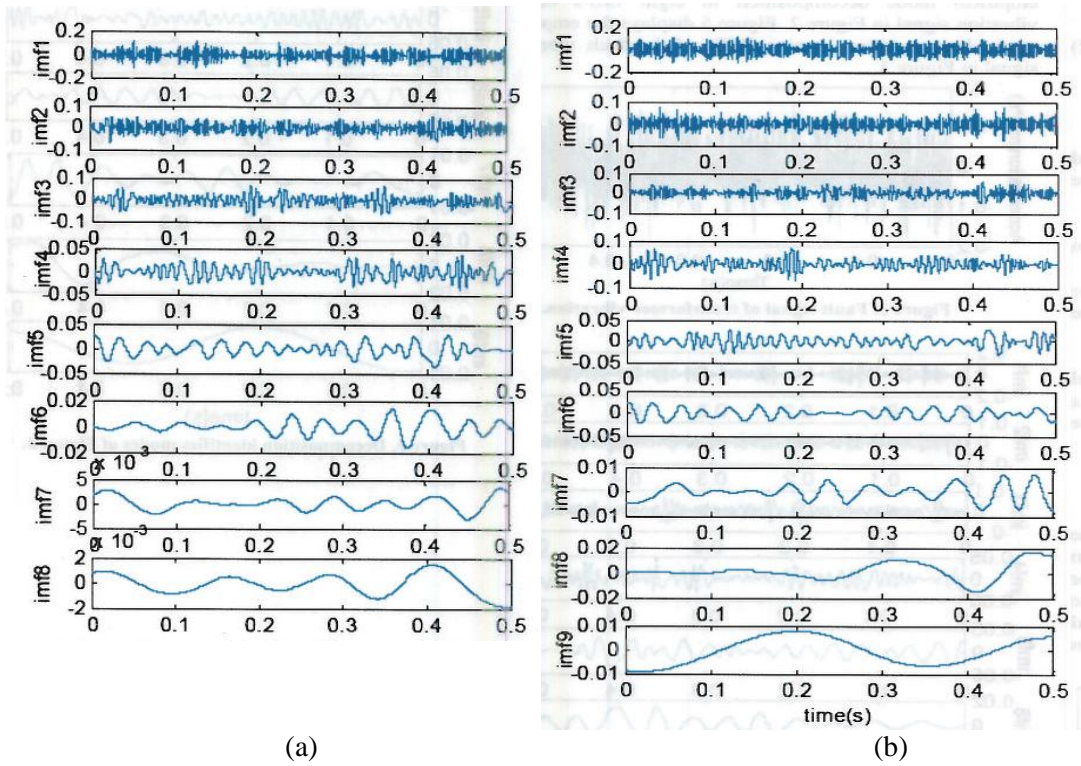


Figura 2.8 Funciones de Modo Intrínseco, (a) transformador sano y (b) transformador con falla.

También, en 2009, S. Wu [5] combinó la aplicación de *wavelets* y la THH para analizar la señal de vibración de un transformador. Con esta combinación se obtiene un espectro de Hilbert mejor definido, tal como se muestra en la Figura 2.9. Esto se logra gracias a que las *wavelets* concentran la energía en un ancho de banda. Sin embargo, en la Figura 2.9 también se observa que esta combinación cambia de forma drástica la frecuencia instantánea del espectro.

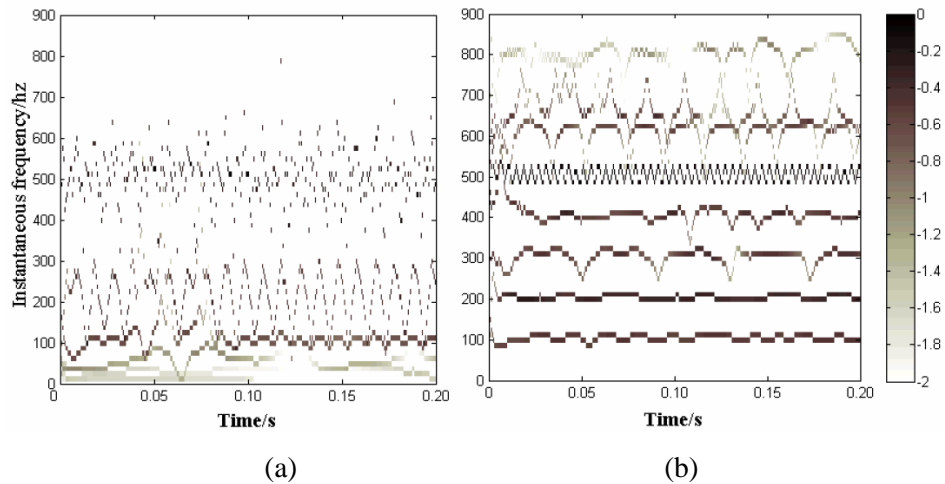


Figura 2.9 Espectro de Hilbert de la señal de vibración de un transformador, obtenido mediante: (a) método convencional y (b) la combinación de *wavelets* y la THH.

## Referencias

- [1] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr., y S. D. Umans, “*Máquinas Eléctricas*”, México, McGrawHill Interamericana, Sexta Edición, 2004, pp. 57, ISBN: 970-4052-X.
- [2] R. S. Masti, W. Desmet y W. Heylen, “*On the Influence of Core Laminations upon Power Transformer Noise*”, Proceedings of ISMA 2004, pp. 3851-3862.
- [3] E. Rivas, J. C Burgos y J. C. García-Prada, “Condition Assessment of Power OLTC by Vibration Analysis Using Wavelet Transform”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 24, No. 2, pp. 687-694, abril 2009.
- [4] B. García, J. C. Burgos y A. M. Alonso, “*Winding Deformation Detection in Power Transformers by Tank Vibration Monitoring*”, Electric Power Systems Research 74, pp. 129-138, 2005.
- [5] S. Ji, Y. Luo y Y. Li, “*Research on Extraction Technique of Transformer Core Fundamental Frequency Vibration based on OLCM*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 4, pp. 1981-1988, octubre 2006.

- [6] E. E. Staff del MIT, “*Circuitos Magnéticos y Transformadores*”, Editorial Reverté, S. A., 1965, No. de Reg. B. 95-65, Depósito Legal. M. 6.235 - 1965.
- [7] R. K. Mehra y J. Peschon, “*An Innovations Approach to Fault Detection and Diagnosis in Dynamic Systems*”, Automatica, Vol. 7, pp. 637-640, Pergaon Press, 1971. Great Britain.
- [8] J. C. Lavalle, “*Failure Detection in Transformers Using Vibrational Analysis*”, Massachusetts Institute of Technology, septiembre 1986, Thesis of Master of Science in Electrical Engineering.
- [9] B. García de Burgos, J. C Burgos, J. Sanz, A. Alonso, J. G. Germain y L. Fernández Beites, “*Measurement of Power Transformer Vibration: A Tool On Line Monitoring*”, pp. 179-184.
- [10] B. García, J. C. Burgos y A. Ramos, “*Experiences in Using Thermal and Vibration Models as a Diagnostic Method of Power Transformers*”, CIGRE Transformer Committee 2003, Merida Colloquium (Mexico), pp. 183-188, junio 2003.
- [11] B. García, J. C. Burgos y A. M. Alonso, “*Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding Deformations – Part I: Theoretical Foundation*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, pp. 157-163, enero 2006.
- [12] B. García, J. C. Burgos y A. M. Alonso, “*Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding Deformations – Part II: Experimental Verification*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, pp. 164-169, enero 2006.
- [13] F. S. McKendree, “*Diagnosis of Transformer Coil Looseness by Vibration Measurements*”, Inter-Noise, Vol. 2, pp. 1141-1146, diciembre 1989.
- [14] C. K. Mechefske, “*Correlating Power Transformer Tank Vibration Characteristic to Winding Looseness*”, Condition Monitoring of Transformers, Vol. 37, No.8, pp. 599-604, agosto 1995.
- [15] V. Sokolov y B. Vanin, “*Experience with Detection and Identification of Winding Buckling in Power Transformers*”, ZTZ-Service Company, Proceedings of the 2001 International Conference of Doble Clients–Sec 8-3.

- [16] G. Bucci, E. Fiorucci, A. Ometto y E. Rotondale, “*Effects of voltage amplitude modulations on mechanical vibrations in low voltage Transformers*”, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (IEEE Cat. No. 06EX1320C), S15-21-5, 2006.
- [17] H. Li, Y. Li y X. Yu, “*Axial vibrations modal analysis and computation of power Transformer windings under different levels of pre-compression*”, 2009 International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, ASEMD 2009, pp. 229-232.
- [18] T. Nagata, K. Hirai, S. Iwasaki y Y. Ebisawa, “*Estimation on On-load Vibration of Transformer Windings*”, Power Engineering Society Winter Meeting, 2002, IEEE, Vol. 2, pp. 1378-1382, agosto 2002.
- [19] P. Xie, Z. Zhu., M. Macalpine, Z. Jin y Z. Rao, “*Estimation of the clamping pressures of Transformer windings from vibration measurements*”, Transactions Hong Kong Institution of Engineers, Vol. 15, No. 1, pp. 30-35, marzo 2008.
- [20] Y. Kim, J. Shim, W. Park, S. Kim, D. S. Hyun y D. Lee, “*Structure-vibration analysis of a power Transformer (154kV/60MVA/single phase)*”, Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 38, pp. 106-110, febrero 2009.
- [21] Ch. Krause y W. Goetz, “*The change of the Clamping Pressure in Transformer Windings due to Variation of the Moisture Content.- Tests with Pressboard Spacer Stacks*”, CIGRE SC 12 Transformers/Workshop on Short Circuit Performance of Transformers, Budapest Colloquium, 1999.
- [22] T. Prevost, D. J. Woodcock y Ch. Krause, “*The Effects on Winding Clamping Pressure due to Changes in Moisture, Temperature and Insulation Age*”, DOBLE, 67PAIC00, Transformers, pp. 4.1-4.12.
- [23] Ch. Krause, W. Goetz y B. Heinrich, “*The Impact of Drying and Oil Impregnation Conditions and of Temperature Cycles on the Clamping Force of Power Transformer*

- Windings*”, Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA, USA, pp. 350-353, abril 2002.
- [24] C. Krause, “*The variation of the Clamping Pressure of Power Transformers due to Operation Temperature Cycles and the Loss of Pressure with Time*”, CIGRE Study Committee A2 Transformers Colloquium, pp. 119-121, Merida, Mexico 2003.
- [25] H. L. Rivera, S. J. A. Garcia y F. J. Sanz, “*Characterization of Temperature and Vibrations in a Medium-Power Transformer using an Optical-Fiber Interferometer*”, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Vol. 4074, pp. 290-297, 2000.
- [26] T. Boczar, S. Borucki, A. Cichon y M. Lorenc, “*The Analysis of Mechanical Vibrations and Acoustic Pressure Level of a Transformer Model*”, Optical and Acoustical Methods in Science and Technology, Vol. 114, 2008.
- [27] T. Hilgert, L. Vandavelde y J. Melkebeek, “*Comparison of magnetostriction models for use in calculations of vibrations in magnetic cores*”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.44, No. 6, pp. 874-877, junio 2008.
- [28] A. Golubev, A. Romashkov, V. Tsvetkov, V. Sokolov, V. Majakov, O. H. Capezio, B. Rojas y V. Rusov, “*On Line Vibro-Acoustic Alternative to the Frequency Response Analysis and On Line Partial Discharge Measurements on Large Power Transformers*”, TechCon 99, pp. 155-171.
- [29] C. Bartoletti, M. Desiderio, D. Di Carlo, G. Fazio, F. Muzi, G. Sacerdoti y F. Salvatori, “*Vibro-Acoustic Techniques to Diagnose Power Transformers*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, pp. 221-29, enero 2004.
- [30] P. H. Ibarguengoytia, R. Liñan y E. Betancourt, “*Transformer Diagnosis Using Vibration Models*”, Mexican International Conference on Artificial Intelligent (MICAI) 2009: Advances in Artificial Intelligence, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 5845/2009, pp. 87-98, 2009.

- [31] W. Xiong y R. Ji, “*Nonlinear Time Series Analysis of Transformer’s Core Vibration*”, Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), IEEE, Vol.2, pp. 5493-5496, junio 2006.
- [32] W. Xiong y H. Pan, “*Transformer winding vibration enveloping for empirical mode decomposition based on non-uniform B-spline fitting*”, 2nd International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling, KAM 2009, Vol. 1, pp. 220-223.
- [33] Z. Wu y Y. Zhu, “*Features of vibration signal of power Transformer using local wave method*”, Proceedings of the 2009 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Vol. 1, pp. 388-393.
- [34] S. Wu, W. Huang, F. Kong, Q. Wu, F. Zhou, R. Zhang y Z. Wang, “*Extracting Power Transformer Vibration Features by a Time-Scale-Frequency analysis Method*”, 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '09, pp. 2577-2581.

## **CAPÍTULO 3**

### **TRANSFORMADA HILBERT HUANG**

En 1998, N. E Huang [1] presentó una metodología que combina el Método Empírico de Descomposición (MED) con la transformada de Hilbert para analizar señales no periódicas y no lineales. Básicamente, el método consiste en descomponer la señal original en varias FMI, más un residuo. A cada una de estas FMI se le aplica la transformada de Hilbert y se obtiene el espectro de Hilbert. En investigaciones posteriores [2]–[4], a esta metodología se le llamó Transformada Hilbert Huang (THH). Dicha técnica ha sido utilizada ampliamente para analizar señales sísmicas [5], voz [6], oscilaciones en sistemas eléctricos de potencia [7]–[10], para diagnosticar fallas en rodamientos [11]–[14] y, como ya se mencionó, para evaluar la condición de salud de transformadores.

En las secciones siguientes se define la función intrínseca, se detalla el método empírico de descomposición y se presenta la transformada Hilbert. Finalmente, se ilustra la aplicación de la THH analizando la señal de vibración de un transformador.



### 3.1.1 *Función de Modo Intrínseco*

Huang [1] presenta la siguiente definición de FMI:

*“Una función de modo intrínseco es una función que satisface las siguientes dos condiciones: (1) en un conjunto completo de datos, el número de valores extremos y de cruces por cero son iguales o cuando mucho difieren por uno; y (2) en cualquier punto, el valor medio de la envolvente definida por los máximos locales y la envolvente definida por los mínimos es cero.”*

El nombre de “*función de modo intrínseco*” se debe a que cada función representa un modo de oscilación contenido en los datos. En consecuencia, idóneamente, una señal tendrá tantas FMI como modos de oscilación tenga. Para extraer las FMI de una señal se utiliza el método empírico de descomposición.

### 3.1.2 *Método Empírico de Descomposición*

El método empírico de descomposición es una técnica intuitiva, directa y adaptiva que se utiliza para analizar series de datos no lineales y no estacionarios. Esta descomposición asume que cualquier serie de datos está compuesta de diferentes modos de oscilaciones simples, es decir FMI. Esto es muy parecido a la descomposición de armónicos de Fourier. Sin embargo, la diferencia radica en que una FMI puede tener amplitud variable y su frecuencia puede estar en función del tiempo [2]. Para extraer las FMI de una señal se sigue un proceso iterativo, el cual consistente en los siguientes seis pasos:

1. Identificar los valores máximos y mínimos de la señal  $x_k(t)$ .
2. Construir la envolvente superior  $x_{up,k}(t)$  e inferior  $x_{low,k}(t)$  mediante ajuste de curvas cúbico, utilizando, respectivamente, como base los valores máximos y mínimos de la señal.

3. Calcular el promedio punto a punto de las envolventes.

$$m_k(t) = (x_{up,k}(t) + x_{low,k}(t)) / 2 \quad (3.1)$$

4. Restar a los datos originales el promedio de las envolventes

$$d_k(t) = x_k(t) - m_k(t) \quad (3.2)$$

5. Verificar el cumplimiento del criterio de paro

$$SC = \frac{\sum_{t=0}^T |d_{k-1}(t) - d_k(t)|^2}{\sum_{t=0}^T d_{k-1}^2(t)} \leq 0.3 \quad (3.3)$$

- Si el criterio de paro se cumple, entonces  $d_k(t)$  cumple con las dos condiciones que definen una FMI. Se toma  $d_k(t)$  como una FMI y se sustituye  $x_{k+1}(t)$  por el residuo  $r_k(t)$  calculado como:

$$r_k(t) = x_k(t) - d_k(t) \quad (3.4)$$

- Si el criterio de paro no se cumple, entonces  $d_k(t)$  no cumple con las condiciones que define una FMI. Se reemplaza  $x_k(t)$  por  $d_k(t)$ .

6. Repetir los pasos del 1 al 5 hasta que se cumpla con el criterio de paro. Cuando el residuo es una función monótona o tiene un solo valor extremo se detiene el algoritmo, el último residuo es la tendencia global de la señal analizada. Con las FMI y el residuo se puede reconstruir la señal como:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n d_i(t) + r_n(t) \quad (3.5)$$

Para completar la THH, se le debe aplicar la transformada de Hilbert a cada una de las FMI.

### 3.1.3 Transformada de Hilbert

La transformada de Hilbert definida por:

$$y(t) = H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \text{VPC} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3.6)$$

donde VPC es el valor principal de Cauchy.

Es la parte imaginaria de la señal de valor real  $x(t)$ . Así, al tener la parte real e imaginaria, se puede definir la señal analítica [15]:

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (3.7)$$

donde  $a(t)$  es la amplitud instantánea definida como

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (3.8)$$

y  $\theta(t)$  es la función de fase definida como

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right) \quad (3.9)$$

Derivando  $\theta(t)$  con respecto al tiempo, se obtiene la frecuencia instantánea  $w(t)$ ,

$$w(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (3.10)$$

### 3.2 El espectro de Hilbert

Después de que una señal en el dominio del tiempo ha sido descompuesta en sus FMI y se ha obtenido la frecuencia instantánea  $w(t)$ , la serie puede ser expresada como:

$$X(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i \int w_j(t) dt} \right\} \quad (3.11)$$

Esta expresión está en términos del tiempo,  $t$ , de la frecuencia instantánea,  $w(t)$ , y de la amplitud,  $a(t)$ . Por lo tanto, a partir de ella se puede construir una representación tridimensional. Esto comúnmente se hace trazando un contorno con colores asociados a la amplitud en el plano tiempo-frecuencia. A esta representación se le conoce como espectro de amplitud de Hilbert o simplemente espectro de Hilbert [41].

### 3.3 Ejemplo de la THH

En esta sección se ilustra de forma gráfica cada uno de los pasos de la aplicación de la THH. Para esto se utilizará la primera señal de vibración medida en el transformador que se utilizó en el desarrollo de la investigación, ver la Figura 3.1. Esta gráfica, corresponde a la vibración presente en dirección en que se aprieta el núcleo, con el transformador operando a voltaje nominal y a una temperatura de 20 °C. Se observa que la vibración, prácticamente, es constante.

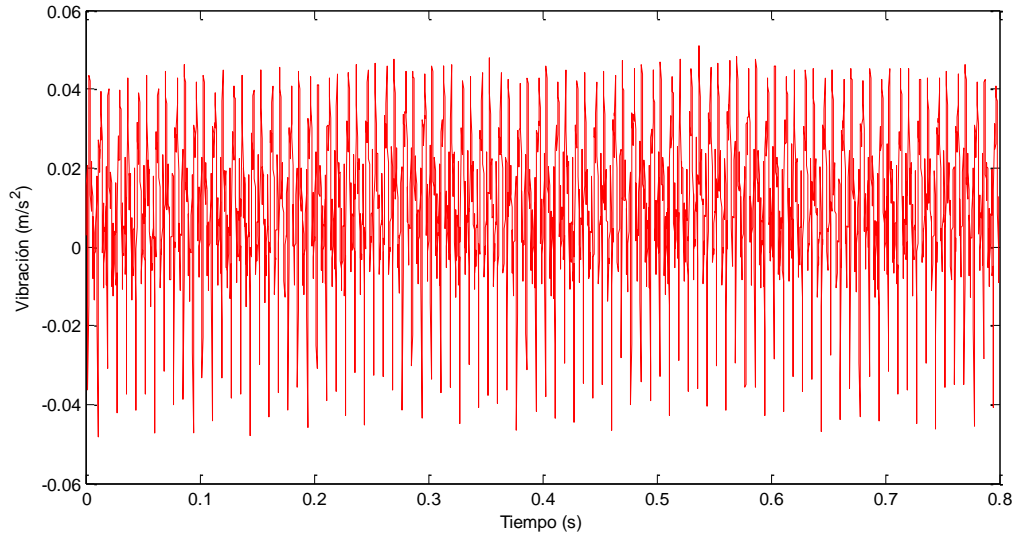


Figura 3.1 Señal de vibración del transformador.

El primer paso del MED es la identificación de los valores máximos y mínimos, esto se ilustra en la Figura 3.2. Para mayor claridad, sólo se muestran la parte inicial y final de la señal.

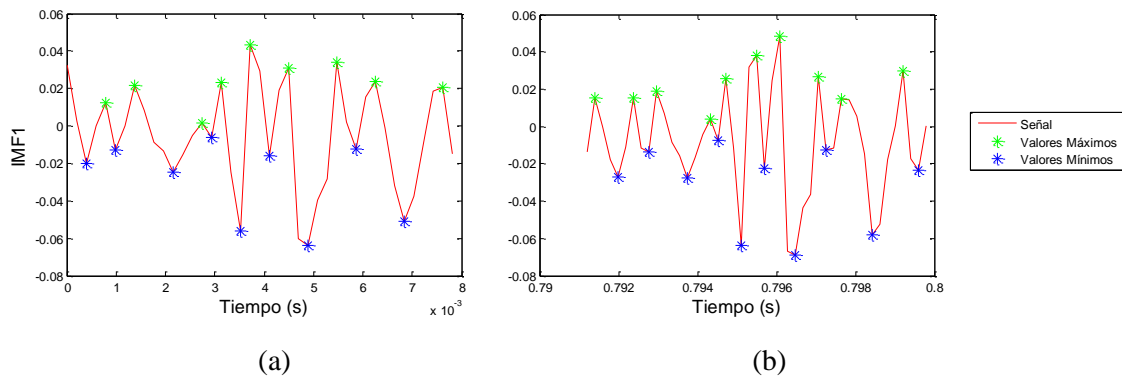


Figura 3.2 Identificación de valores extremos de la señal, (a) parte inicial y (b) parte final.

El segundo paso del MED es la construcción de envolventes, esto se ilustra en la Figura 3.3. En esta figura, también se ilustra el tercer paso del MED, que es el promedio punto a punto de las envolventes.

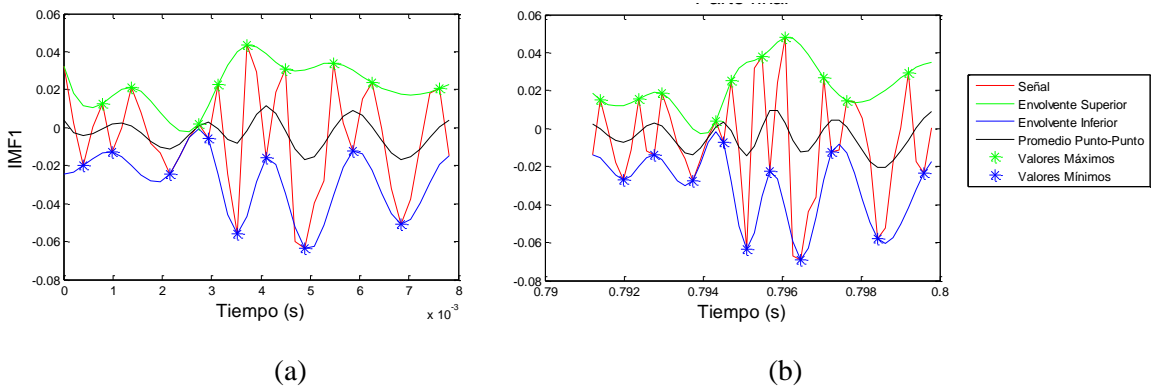


Figura 3.3 Construcción de las envolventes y valor promedio punto a punto, (a) parte inicial de la señal y (b) parte final de la señal.

Al concluir el algoritmo del MED se obtienen las FMI de la señal y el residuo, esto se muestra en la Figura 3.4. Para esta señal, en particular, se obtuvieron siete FMI. En las gráficas de esta figura, se observa que cada FMI tiene amplitud y frecuencia variable.

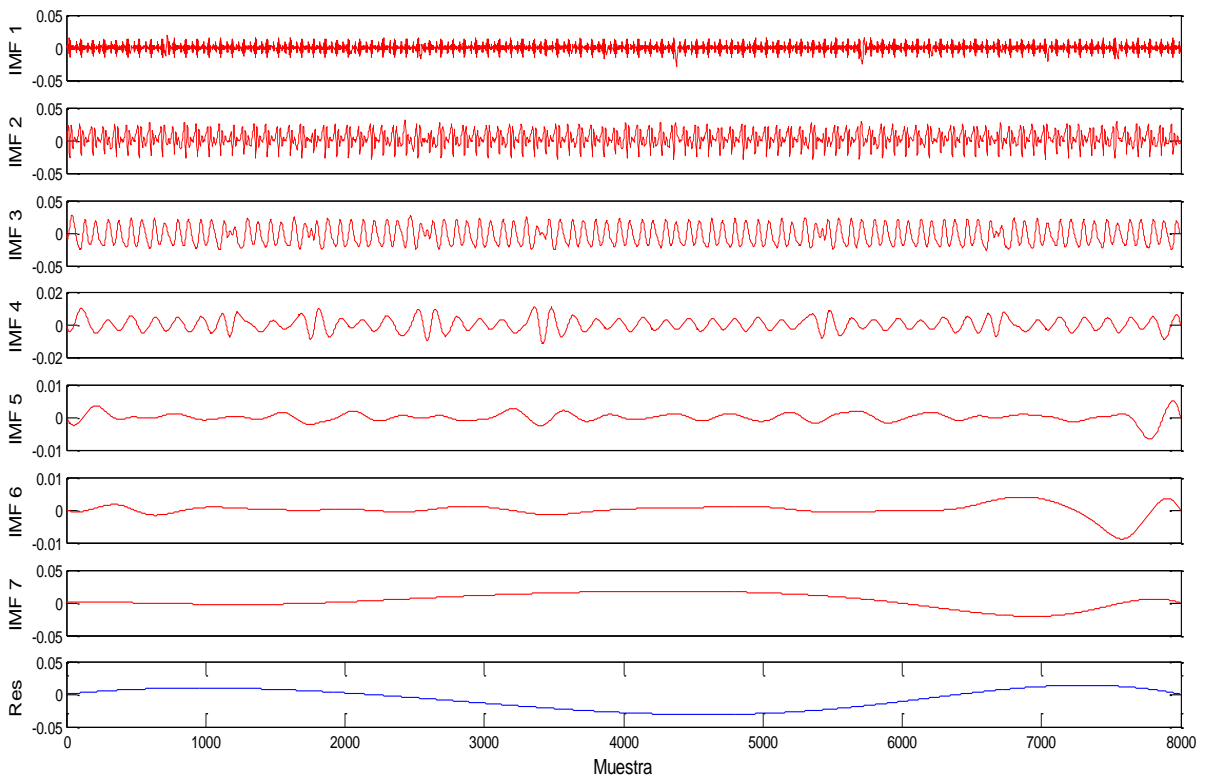


Figura 3.4 FMI y residuo obtenido con el MED de una señal de vibración.

En la Figura 3.5 (a) se grafican la señal original y la reconstruida sumando los FMI obtenidas con el MED y el residuo y en la parte (b) se muestra el error entre esta recomposición y la señal original. En las gráficas de esta figura se observa que la señal reconstruida y la original, prácticamente, son iguales.

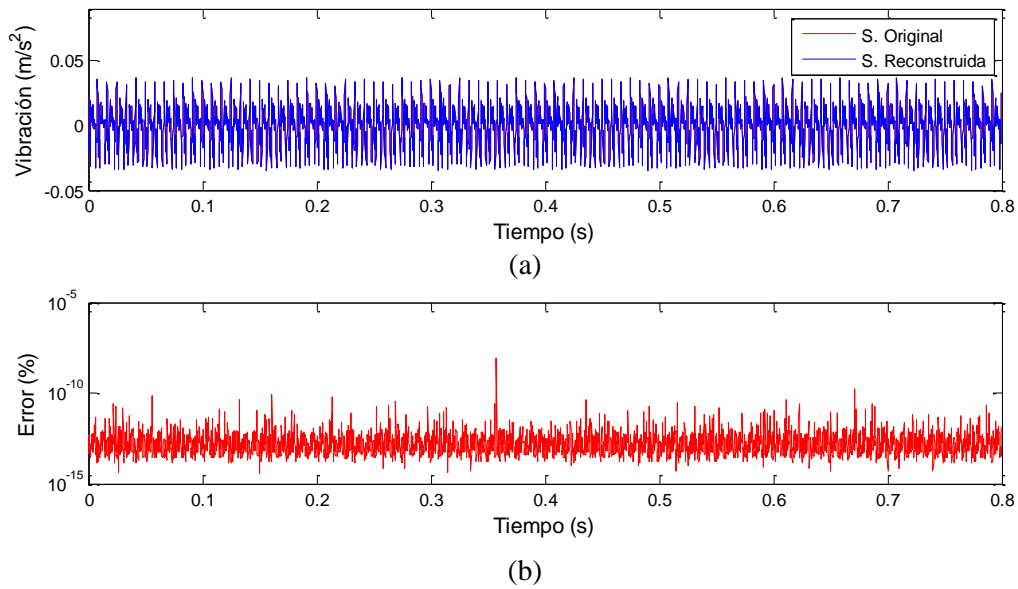


Figura 3.5 (a) Señal original y señal reconstruida y (b) error entre la señal reconstruida y la original.

Al aplicar la transformada de Hilbert a las FMI se obtiene el espectro de Hilbert mostrado en la Figura 3.6. Para observar el comportamiento en frecuencia de forma clara, en la Figura 3.6, sólo se grafica el espectro de las primeras cuatro FMI.

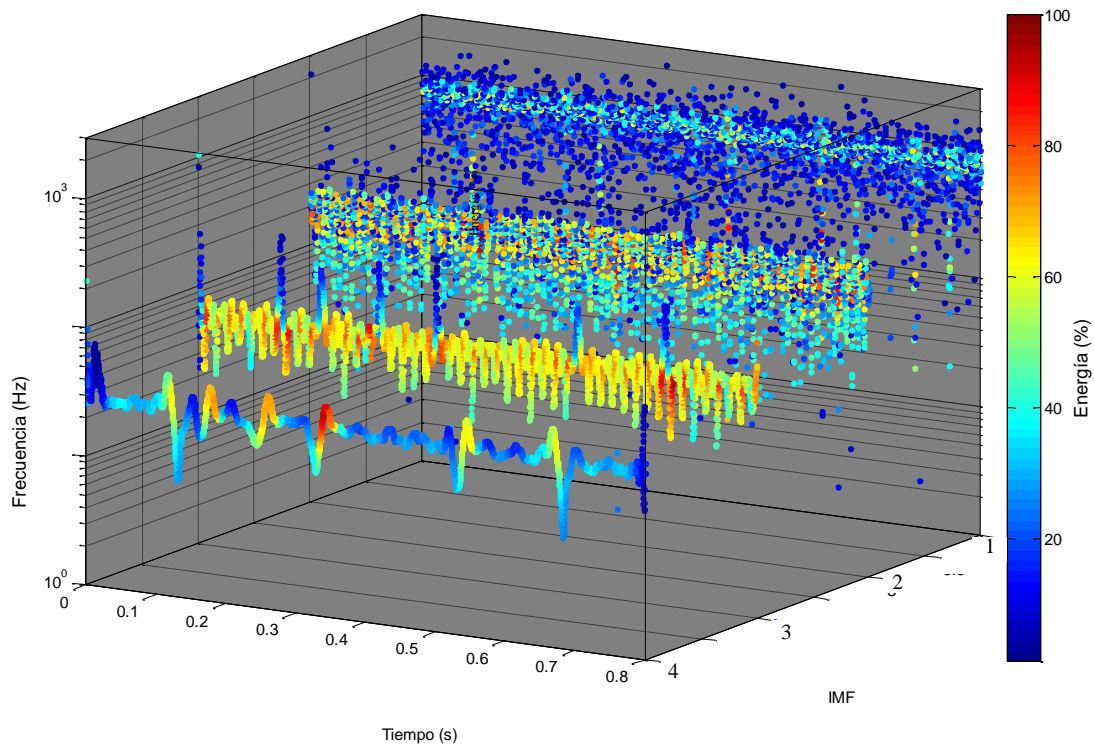


Figura 3.6 Espectro de Hilbert de las primeras cuatro FMI de la señal de vibración.

Para poder observar el comportamiento en frecuencia de forma clara, se utilizaron gráficas de la frecuencia instantánea, como la mostrada de la Figura 3.7. En este tipo de gráfica el eje de las ordenadas se presenta en escala logarítmica y a cada FMI se le asignó un color de forma arbitraria.



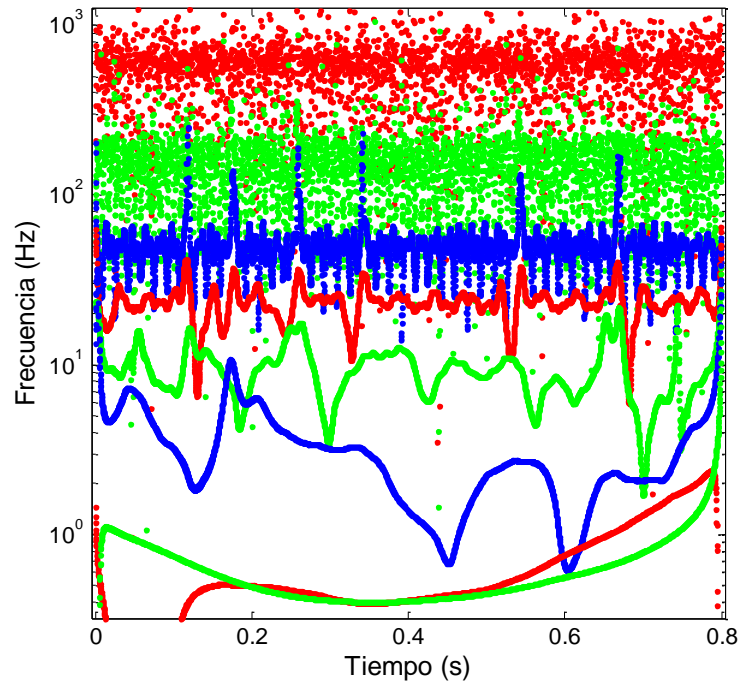


Figura 3.7 Frecuencia instantánea de las FMI.

### 3.4 Problemática de la THH

El MED es capaz de analizar señales no lineales y no periódicas. Sin embargo, cuando se analizan señales muy complicadas presenta dos problemas conocidos como efecto borde y mezclado de modos. Las gráficas de la Figura 3.2 a la Figura 3.6, ya cuentan con la corrección de estos efectos. Sin embargo, debido a que las técnicas de corrección de estos efectos cambian el espectro de Hilbert, es importante especificar las técnicas empleadas en este trabajo.

#### 3.4.1 Efecto borde

En el algoritmo del MED, primero se identifican los valores máximos y luego se crean la envolvente superior realizando un ajuste cúbico de curvas en dichos valores. Como el primer valor máximo no es el primer valor de la serie de datos (observar Figura 3.2), el ajuste de curvas se tiene

que extrapolar hasta el valor inicial. Dado que la extrapolación es cúbica, los valores extrapolados se alejan del comportamiento que tiene la señal. Ocurre lo mismo con la envolvente inferior y en la parte final de la serie de datos, tal como se ve en la Figura 3.8.

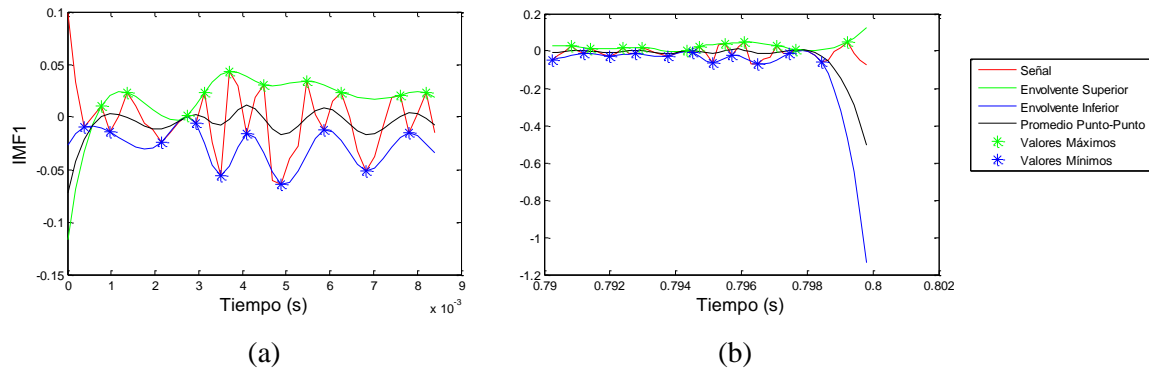


Figura 3.8 Obtención de la envolvente sin corrección del efecto borde, (a) parte inicial de la señal y (b) parte final de la señal.

Para reducir el efecto borde se han aplicado diversas técnicas para predecir el valor inicial y final de los datos, entre las que se encuentran proyecciones lineales [16], inserción de valores [17], la aplicación del código predictivo lineal [16] y redes neuronales [18]. Sin embargo, hasta ahora no se ha encontrado una forma que corrija completamente el problema.

En este trabajo se utilizó la técnica que se presenta en [16], la cual consiste en proyectar de forma lineal los dos valores extremos (máximos o mínimos) más cercanos a la terminación (borde) de la señal para predecir el valor de la función en dicha terminación, la Figura 3.9 ilustra esta técnica. El extremo o borde de la parte inicial se corrige de forma simétrica a lo mostrado en esta figura.

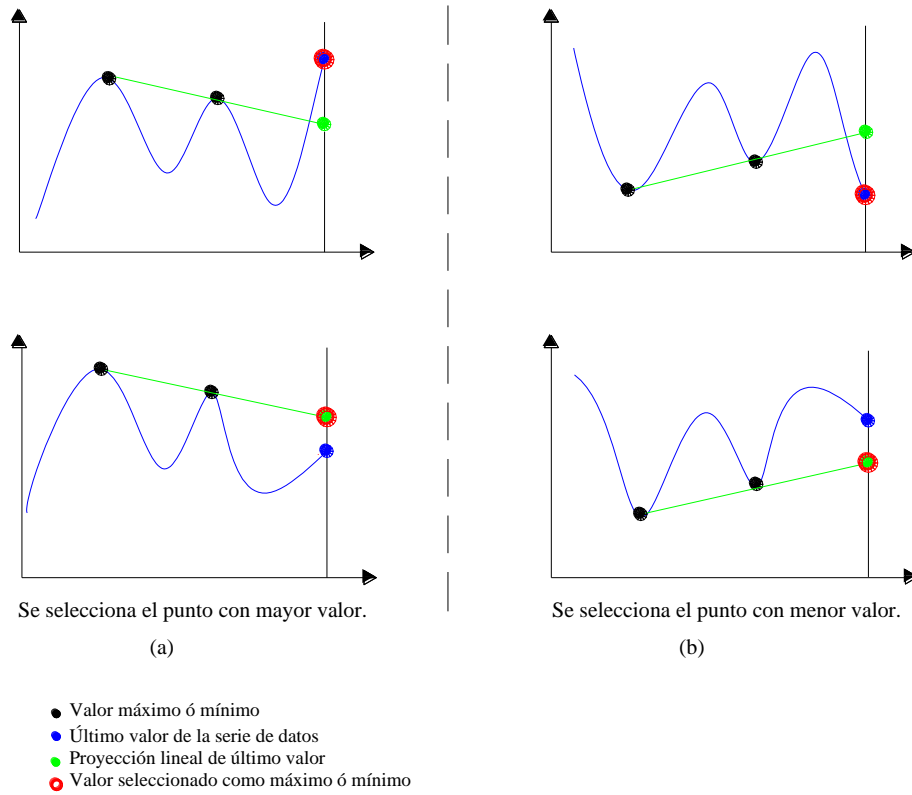


Figura 3.9 Método de corrección del efecto borde, (a) valores máximos y (b) valores mínimos.

La no corrección del efecto borde dispara los extremos de las FMI y también altera el espectro de Hilbert como se puede ver en la Figura 3.10. Obsérvese que, en los extremos, la frecuencia tiende a cambiar mucho y que en algunas FMI también se observa una aparente duplicidad de frecuencia.

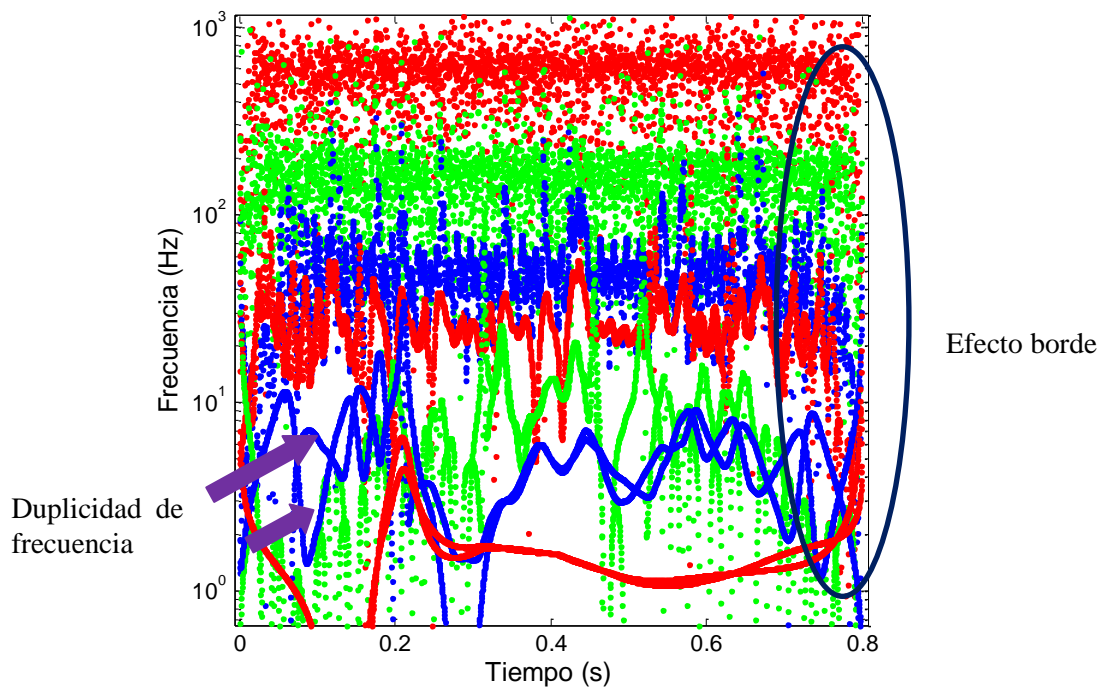


Figura 3.10 Espectro de Hilbert de una señal de vibración sin corrección del efecto borde.

### 3.4.2 Mezclado de modos

El problema de mezclado de modos se ilustra en la Figura 3.11. En trabajos de investigación que utilizan el MED se han encontrado dos causas que originan este problema.

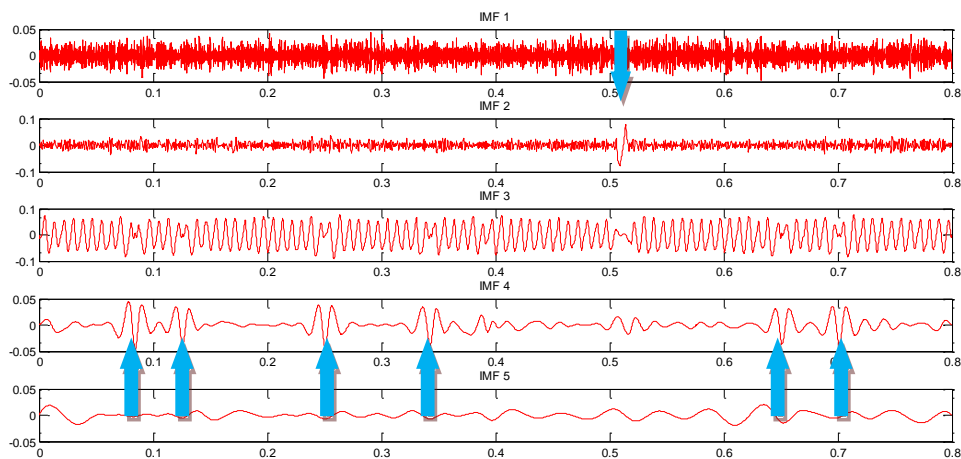


Figura 3.11 FMI con problemas de mezclado de modos.

La primer causa del mezclado de modos es que el MED es un proceso iterativo, entonces el error de la extrapolación en el ajuste de curvas de la envolvente tiende a propagarse hacia el centro de la señal en cada iteración. Esta causa se aminora al corregir el efecto borde. En la Figura 3.12 se presenta el espectro de Hilbert de una señal con problemas de mezclado de modos. Obsérvese que el mezclado de modos de las FMI también se presenta en el espectro.

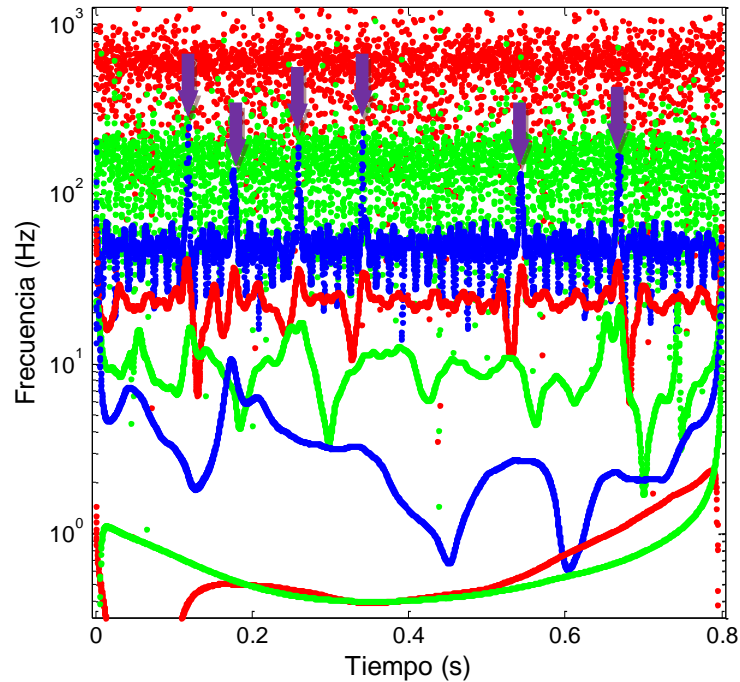


Figura 3.12 Espectro de Hilbert de una señal con problemas de mezclado de modos.

La segunda causa se presenta cuando se tiene un modo de oscilación de alta frecuencia o con gradiente grande. Este problema fue identificado por Wu [19], quién propuso una metodología para eliminarlo, la cual consiste en los cuatro pasos siguientes:

1. Agregar ruido blanco Gaussiano a la señal original.
2. Extraer las FMI.
3. Repetir varias veces las dos operaciones anteriores.
4. Promediar las FMI.

Wu mostró que de esta forma se logra una excelente separación de las señales. En la Figura 3.13 (a) se muestra la señal a ser analizada formada por la señal original más una señal de alta frecuencia, en el inciso (b) se presentan las FMI obtenidas. Se observa que el MED no puede obtener los dos modos oscilatorios de la señal.

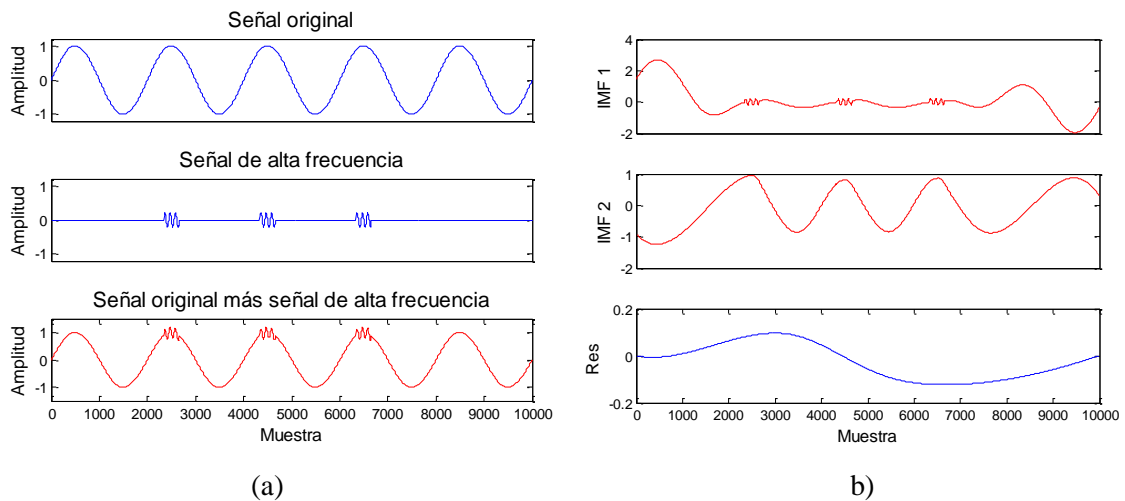


Figura 3.13 (a) Señal con componente de alta frecuencia a ser analizada y (b) FMI obtenidas con el MED.

En la Figura 3.14 se ilustra la técnica desarrollada por Wu para reducir el mezclado de modos. En la Figura 3.14 (a) se observa la señal a ser analizada más el ruido blanco agregado, mientras que en la Figura 3.14 (b) se presentan las FMI obtenidas. En esta figura, se observa que las FMI 4 y 5 forman el modo oscilatorio de alta frecuencia, mientras que la FMI 6 corresponde al modo oscilatorio de la señal original.

Existen otras técnicas para reducir el mezclado de modos, entre éstas se encuentra el segmentado de la serie de datos [20] y el cambiar la técnica de ajuste de la curva en la construcción de las envolventes [21]. Sin embargo, por la sencillez de técnica de Wu, en el desarrollo de esta tesis se

evaluó su metodología. Se utilizó una razón señal-ruido de veinte, y cincuenta iteraciones para promediar el valor final, con estos valores de obtuvieron las gráficas mostradas en la Figura 3.14.

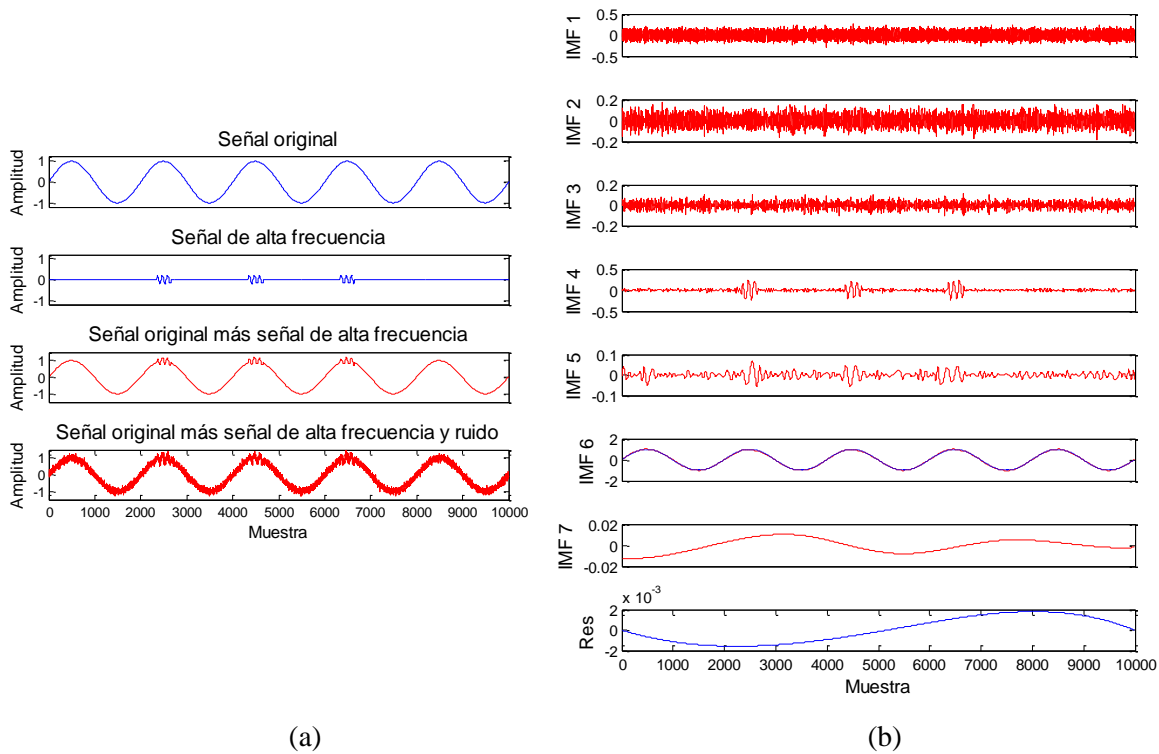


Figura 3.14 Ilustración de la técnica desarrollada por Wu [58] para reducir el mezclado de modos, (a) señal a ser analizada y (b) FMI obtenidas con el método de Wu.

### 3.5 Teoremas y complementos de la THH

Este trabajo no profundiza más en la THH. Pero el necesario mencionar que esta transformada debe cumplir con los teoremas de Nuttall [22] y de Bedrossian [23]. De igual forma, es importante mencionar que existen métodos complementarios a esta transformada, como la THH normalizada [1] y el método de cuadratura [1]. Para el análisis de señales no estacionarias, además de la THH, también es frecuente utilizar la transformada Teager-Huang [13] y la distribución Wigner-Ville [24].

En el desarrollo de esta investigación, se evaluó el utilizar la THH sin corrección del efecto borde, la THH con corrección del efecto borde y la THH normalizada (ver Anexo 1) y la combinación de *wavelets* y la THH (ver Anexo 2) para el análisis de la vibración del transformador. De la evaluación se concluyó, que la THH implementada con la corrección de efecto borde proporciona el espectro de Hilbert más sencillo y por ende más fácil de analizar. Por esta razón, se seleccionó esta técnica para profundizar en su análisis.

### 3.6 Espectro de Fourier versus espectro de Hilbert

Tradicionalmente, se utiliza la FFT para realizar el análisis de vibraciones y ahora con la THH se tiene otra opción para realizar dicho análisis. Definir cuál es mejor es muy difícil y la respuesta está en función de la aplicación. En esta sección, se discuten las características, ventajas y desventajas de ambas.

La FFT está definida como:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t)] \quad (3.12)$$

donde  $\omega_0$  es la frecuencia fundamental de la señal,  $a_0$ ,  $a_k$  y  $b_k$  son los coeficientes de Fourier, es un algoritmo eficiente para convertir datos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, asume que los datos son lineales y estacionarios y ajusta la señal a armónicos múltiples de la fundamental en una base infinita, mediante la cual se puede representar una señal en el dominio de la frecuencia [25]. Analizando la señal de vibración del transformador mediante la FFT, se obtiene el espectro mostrado en la Figura 3.15.



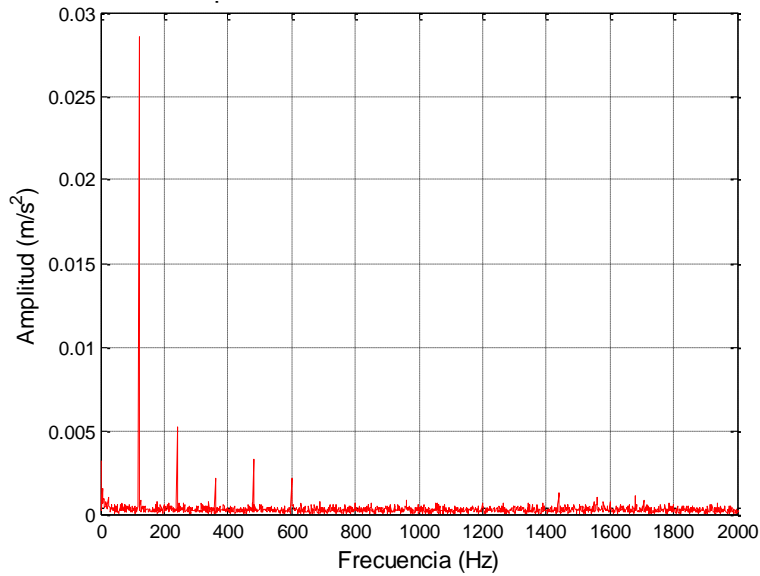


Figura 3.15 Espectro de Fourier de la señal de vibración del transformador.

Por otro lado, la THH no asume linealidad ni estacionalidad en los datos. Mediante un método adaptivo, el MED, se ajusta a la señal y extrae las FMI formando una base no estrictamente ortogonal que puede ser infinita y separable [26]. En su algoritmo, se extraen de la componente de la mayor frecuencia a la componente de menor frecuencia.

En la FFT, entre más ciclos se analicen, el ruido y frecuencias transitorias tendrán menor afectación en el contenido espectral. Mientras que en el MED, entre más ciclos se analicen, la señal es más compleja y el método es más propenso a incrementar el número de FMI y el mezclado de modos. La FFT es usada muy frecuentemente, debido a que requiere un número de operaciones bajo ( $n \log n$ ). Por otro lado, en la THH, el número de operaciones para realizar el proceso del MED, más la transformada de Hilbert, más la derivada de la fase de cada FMI, es mucho más grande que las operaciones requeridas por la FFT. Sin embargo, la ventaja de la THH se basa en que proporciona mayor información, la frecuencia instantánea y la energía, y que su representación tiene mayor significado físico en relación al fenómeno que se está analizando.

## Referencias

- [1] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N. Yen, C. C. Tung y H. H. Liu, “*The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis*”, Proc. R. Soc. Lond. A., pp. 903-995, 1998.
- [2] N. E. Huang y S. S. P. Shen, “*The Hilbert-Huang Transform and Its Applications. Chapter 1.- Introduction to the Hilbert-Huang Transform and its Related Mathematical Problems*”, *Interdisciplinary Mathematical Sciences*, ISBN: 978-981-256-376-7.
- [3] D. Donnelly, “*The Fast Fourier and Hilbert-Huang Transforms: A Comparison*”, *International Journal of Computers, Communications & Control*, Vol. 1, No.4, pp. 45-52, 2006.
- [4] Z. K. Peng, P. W. Tse y F. L. Chu, “*An improved Hilbert-Huang Transform and its Application in Vibration Signal Analysis*”, *Journal of Sound and Vibration* 286, pp. 187-205, 2005.
- [5] B. M. Battista, C. Knapp, T. McGee y V. Goebel, “*Application of the Empirical Mode Decomposition and Hilbert–Huang Transform to Seismic Reflection Data*”, *Geophysics*, Vol. 72, No.2, pp. H29-H37, marzo/abril 2007.
- [6] G. Schlotthauer, M. E. Torres y H. L. Rufiner, “*Voice Fundamental Frequency Extraction Algorithm Based on Ensemble Empirical Mode Decomposition and Entropies*”, Proc. of the World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, septiembre 2009.
- [7] D. S. Laila, A. R. Messina y B. C. Pal, “*A Refined Hilbert-Huang Transform With Applications to Interarea Oscillation Monitoring*”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 24, No. 2, mayo 2009.
- [8] Z. Li, “*Hilbert-Huang Transform Based Application in Power System Fault Detection*”, *IEEE International Workshop on Intelligent System and Applications*, pp. 1-4, mayo 2009.

- [9] M. A. Andrade, A. R. Messina, C. A. Rivera y D. Olguin, “*Identification of Instantaneous Attributes of Torsional Shaft Signals Using the Hilbert Transform*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No.3, agosto 2004
- [10] M. A. Andrade y A. R. Messina, “*Application of Hilbert Techniques to the Study of Subsynchronous Oscillations*”, International Conference on Power Systems Transients (IPST’05) in Montreal, Canada, junio 2005.
- [11] Y. Lei, Z. He y Y. Zi, “*Application of the EEMD Method to Rotor Fault Diagnosis of Rotating Machinery*”, Mechanical Systems and Signal Processing 23, pp. 1327-1338, 2009.
- [12] J. Zhang, R. Yan y R. X. Gao, “*Ensemble Empirical Decomposition for Machine Diagnosis*”, Key Engineering Materials, Vol. 413-414, pp.167-174, 2009.
- [13] H. Li, H. Zheng y L. Tang, “*Gear Fault Detection Based on Teager-Huang Transform*”, Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Rotating Machinery, Article ID 502064, 2010.
- [14] X. Fan y M. J. Zuo, “*Machine Fault Feature Extraction Based on Intrinsic Mode Functions*”, Measurement Science and Technology, Vol. 19, No. 4, 2008.
- [15] D. Gabor, “*Theory of communication. Part 1: The Analysis of Information*”, Journal of the Institution of Electrical Engineers.- Part III: Radio and Communication Engineering, Vol. 93, No. 26, pp. 429-457, noviembre 1946.
- [16] Desconocido, en línea: [rcada.ncu.edu.tw/2a2%20End%20Effects%20of%20EMD.ppt](http://rcada.ncu.edu.tw/2a2%20End%20Effects%20of%20EMD.ppt), “*End Effects of EMD*”.
- [17] Q. Wi y S. D. Riemenschneider, “*Boundary Extension and Stop Criteria for Empirical Mode Decomposition, Advances in Adaptive Data Analysis*”, World Scientific Publishing Company, Vol. 2, pp. 157-169, 2010.
- [18] D. Yongjun, W. Wei, Q. Chengchun, W. Zhong y D. Dejun, “*Boundary-Processing-Technique in EMD Method and Hilbert Transform*”, Chinese Science Bulletin, Vol. 46, No.1, enero 2001.

- [19] Z. Wu y N. E. Huang, “*Ensemble Empirical Mode Decomposition; A noise Assisted Data Analysis Method*”, World Scientific Publishing Company, *Advances in Adaptive Data Analysis*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-41, 2009.
- [20] M. Zhang, K. Zhu y C. Li, “*Segmented Second Algorithm of Empirical Mode Decomposition*”, *Journal of Shanghai University (English Edition)*, Vol. 12, No. 5, pp. 444-449, 2008.
- [21] Y. P. Huang, X. Y. Li y R. B. Zhang, “*A Research on Local Mean in Empirical Mode Decomposition*”, *Lecture Notes in Computer Science, ICCS 2007, Part III, LNCS 4489*, pp. 125-128.
- [22] A. H. Nuttall y E. Bedrosian, “*On the Quadrature Approximation to the Hilbert Transform on Modulated Signals*”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 54, No.10, pp.1458-1459, octubre 1966.
- [23] E. Bedrosian, “*A Product Theorem for Hilbert Transforms*”, *Proceedings of the IEEE*, The RAND Corporation, United States Air Force Project RAND, Santa Monica, California, pp. 1-15, diciembre 1962.
- [24] W. Martin y P. Flandrin, “*Wigner-Ville Spectral Analysis of Nonstationary Processes*”, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vol. ASSP-33, No. 6, diciembre 1985.
- [25] D. Donnelly, “*The Fast Fourier and Hilbert-Huang Transforms: A comparison*”, *International Journal of Computers, Communications & Control*, Vol. 1, No. 4, pp. 45-52, 2006.
- [26] G. González, “*Series de Fourier, Transformadas de Fourier y Aplicaciones*”, *Divulgaciones Matemáticas*, Vol. 5, No. 1/2, pp. 43-60, 1997.

## **CAPÍTULO 4**

### **SISTEMA DE PRUEBAS**

En este capítulo se describe el sistema implementado para medir vibraciones en un transformador, especificando las características técnicas del transformador y la instrumentación utilizada. Se presentan un esquema del sistema utilizado para realizar mediciones de vibración y el circuito de prueba. También, se detalla la secuencia de pruebas y la información relevante de las mediciones.

#### **4.1 Transformador bajo prueba**

La investigación de este trabajo de tesis surgió en la búsqueda de una metodología que permita realizar el diagnóstico de la integridad física de transformadores de potencia sin la necesidad de sacarlos de operación. Sin embargo, conseguir un transformador de potencia, energizarlo y provocarle daños físicos a su núcleo y devanado es muy costoso. También se requiere infraestructura para manejar alto voltaje, grandes corrientes, grandes dimensiones y mucho peso.

Por estos motivos, se decidió realizar un sistema de pruebas a escala reducida. Por lo tanto, se buscó un transformador de control que tuviera un sistema de apriete que permitiera variar la presión del núcleo como en un transformador de grandes dimensiones. En especial del núcleo, porque otras investigaciones [1]-[3] han mostrado que la vibración del núcleo es varias veces más grande que las

vibraciones del devanado. Para realizar las mediciones de vibración se empleó un transformador de control de 0.3 kVA, 50/60 Hz, con aislamiento clase 105 °C, tipo SZO y tensión 440/127 V.

## 4.2 Instrumentación

Para realizar las mediciones se utilizó el equipo portátil de medición de vibración Brüel & Kjaer 3560-B-04, que cuenta con capacidad de adquirir hasta cinco señales simultáneas a una frecuencia máxima de muestreo de 25.6 kilo-muestras por segundo. Como sensor de medición se utilizó un acelerómetro piezoeléctrico triaxial, Brüel & Kjaer 4524, con rango de medición 0.25-3000 Hz, sensibilidad 100 mV/g y un intervalo de temperatura de operación de -54 a 100 °C. Este acelerómetro, mide las vibraciones en tres direcciones de forma independiente. Como señal de referencia se registró el voltaje de excitación del núcleo, para lo cual se utilizó una punta diferencial de alto voltaje Tektronix P5200. En la Figura 4.1 se muestra el diagrama del sistema de pruebas utilizado para realizar las mediciones de vibración.

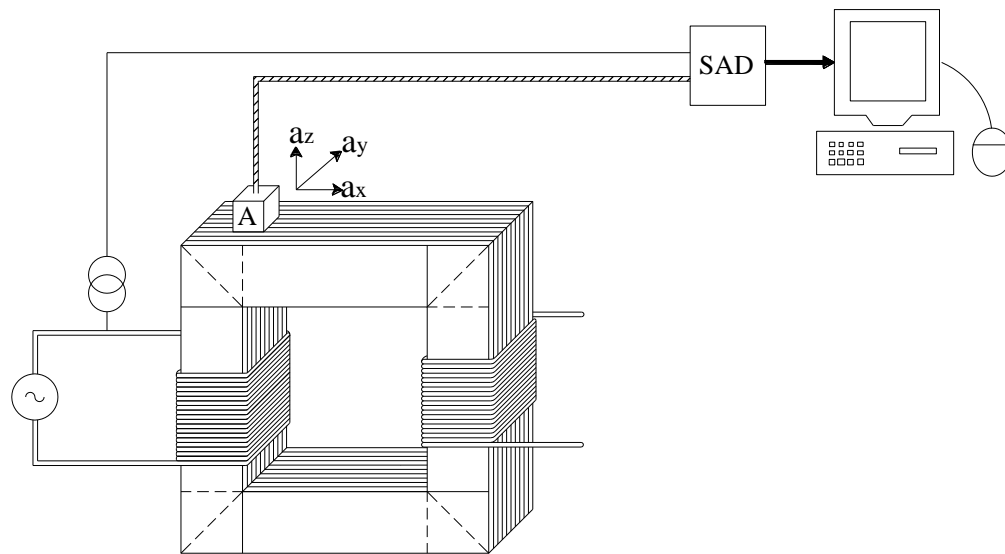


Figura 4.1 Diagrama del sistema de pruebas.

### 4.3 Circuito de medición

Para medir las vibraciones del núcleo se requiere energizar el transformador en vacío, tal como se muestra en el circuito de la Figura 4.2. En esta condición, cuando un transformador no tiene carga la corriente circulante por sus devanados es mínima y por lo tanto las vibraciones del devanado son despreciables. Por ende, se puede considerar que las únicas vibraciones presentes están en el núcleo y se deben a la magnetostricción del material.

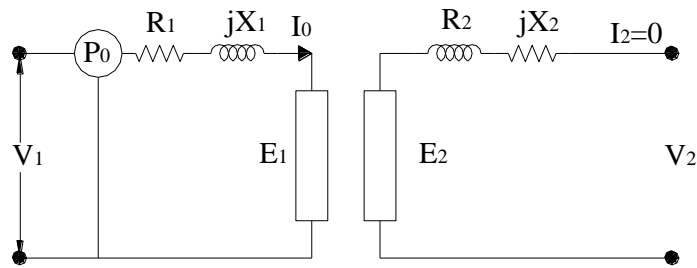


Figura 4.2 Circuito de prueba en vacío del transformador.

Los transformadores se diseñan para que en condiciones nominales de voltaje su núcleo opere en la rodilla de la curva de saturación. Considerando esto, y que la fluctuación de voltaje en los sistemas eléctricos normalmente es menor al cinco por ciento, se decidió realizar las pruebas al voltaje nominal del transformador, en este caso 127 V.

### 4.4 Secuencia de pruebas

Para cumplir con el objetivo de la tesis, se diseñó la siguiente secuencia de pruebas:

1. Medir vibraciones en las condiciones normales del transformador;
2. Aflojar parcialmente el núcleo y medir sus vibraciones;
3. Aflojar completamente el núcleo y medir sus vibraciones.

Después de esto, se reapretó el núcleo y se repitió la secuencia seis veces. La repetición de la secuencia se realizó para demostrar que el patrón de vibración del transformador es el mismo,

siempre y cuando tenga las mismas condiciones de apriete. De esta forma se tienen siete mediciones tomadas en la misma condición, e independientes cada una de ellas por ser tomadas en tiempos diferentes y después de haber sometido el transformador a cambios físicos. Combinando las mediciones con las condiciones, se tiene en total veintiún mediciones.

De aquí en adelante, para referirse a la condición normal del transformador se usa el término “Apriete 1” (A1). En esta condición, se tiene el máximo apriete y por ende las condiciones geométricas del núcleo son prácticamente nulas. Para referirse a la condición en la cual el núcleo del transformador se aflojó parcialmente se usa el término “Apriete 2” (A2), en esta condición las láminas del núcleo no alcanzan a tener libre movimiento. Finalmente, para referirse a la condición de núcleo completamente flojo se usa “Apriete 3” (A3). En esta condición, las láminas del núcleo tienen mayor movimiento y las diferencias geométricas entre mediciones son mayores.

#### **4.5 Mediciones**

En cada medición, se registraron 800 ms con registros simultáneos de la vibración en las tres direcciones y del voltaje de excitación. A fin de analizar las vibraciones sin tener que considerar el efecto de la temperatura, durante las mediciones la temperatura del transformador se mantuvo constante en 20 °C. Para reducir el efecto del ruido externo, cada punto de medición registrado fue el promedio de 10 mediciones. También, se filtraron las mediciones menores a 7 Hz. La frecuencia de muestreo fue de 5000 muestras por segundo. De acuerdo con el teorema de Nyquist, esto permite encontrar armónicos de hasta 2500 Hz.



## Referencias

- [1] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr., y S. D. Umans, “*Máquinas Eléctricas*”, México, McGrawHill Interamericana, Sexta Edición, 2004, pp. 57, ISBN: 970-4052-X.
- [2] E. E. Staff del MIT, “*Circuitos Magnéticos y Transformadores*”, Editorial Reverté, S. A., 1965, No. de Reg. B. 95-65, Depósito Legal. M. 6.235-1965.
- [3] C. Bartoletti, M. Desiderio, D. Di Carlo, G. Fazio, F. Muzi, G. Sacerdoti y F. Salvatori, “*Vibro-Acoustic Techniques to Diagnose Power Transformers*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, pp. 221-29, enero 2004.

## **CAPÍTULO 5**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ADAPTACIÓN DE LA THH**

En este capítulo, primero, se presentan los espectros de Hilbert que se obtienen al aplicar el método convencional de la THH a dos señales de vibración del transformador evaluado. Las señales analizadas son la primera medición con el transformador sano y la primera medición con el máximo aflojamiento del núcleo. Los resultados obtenidos inicialmente se comparan con lo reportado en el estado del arte. Al final del capítulo se comparan con los resultados obtenidos al simplificar el espectro de Hilbert.

Se propone un procedimiento para simplificar el espectro y para extraer la información relevante de él. Se muestran los resultados obtenidos al aplicar paso a paso la propuesta y se comparan los resultados con el espectro obtenido al inicio del capítulo. Finalmente, se comprueba de forma estadística que el comportamiento del espectro de Hilbert, al cambiar la presión de apriete, presenta una tendencia. Se especifica qué atributo refleja mejor la condición de salud del transformador y se cuantifica su cambio.

## 5.1 Análisis direccional

Se realizó un análisis para determinar la dirección en la cual se tiene la mayor vibración en el transformador. Este análisis mostró que las vibraciones en las tres direcciones ( $a_x$ ,  $a_y$  y  $a_z$ ) prácticamente tienen la misma magnitud pico a pico, ver la Figura 5.1. Por tal motivo se decidió analizar las vibraciones presentes en la misma dirección que se aprieta el núcleo. En este caso y de acuerdo con la colocación del acelerómetro, el eje  $Y$ .

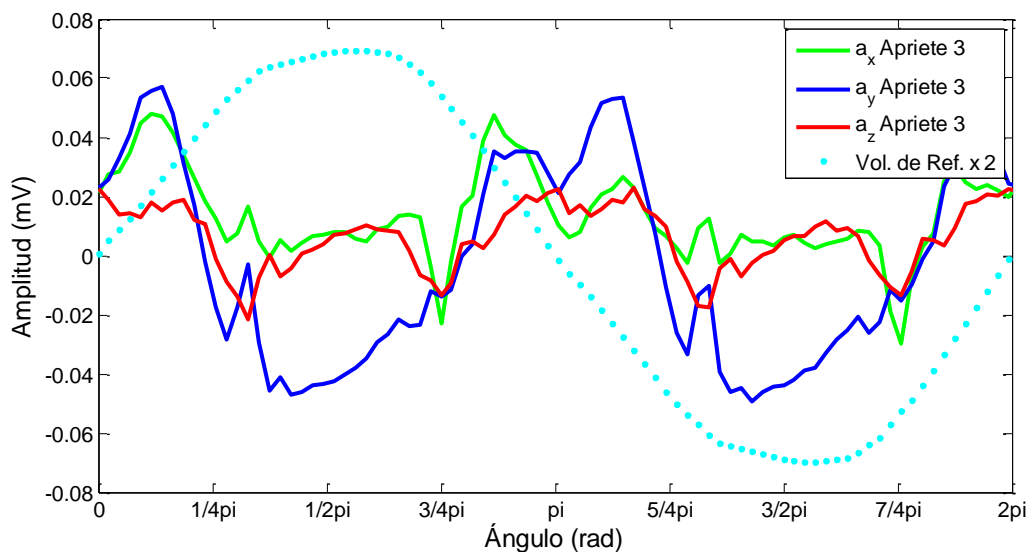


Figura 5.1 Vibración en función del nivel de apriete del núcleo.

## 5.2 Análisis convencional con la THH

Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos al aplicar de forma convencional la THH con los resultados presentados en el estado del arte y con los resultados que se obtendrán al simplificar el espectro de Hilbert, se analizaron dos señales de vibración. Las señales analizadas son la primera medición del Apriete 1 y la primera medición del Apriete 3. En cada caso se analizaron los 800 ms registrados durante la medición. En la Figura 5.2 se presentan las FMI y la frecuencia instantánea de estas dos mediciones.

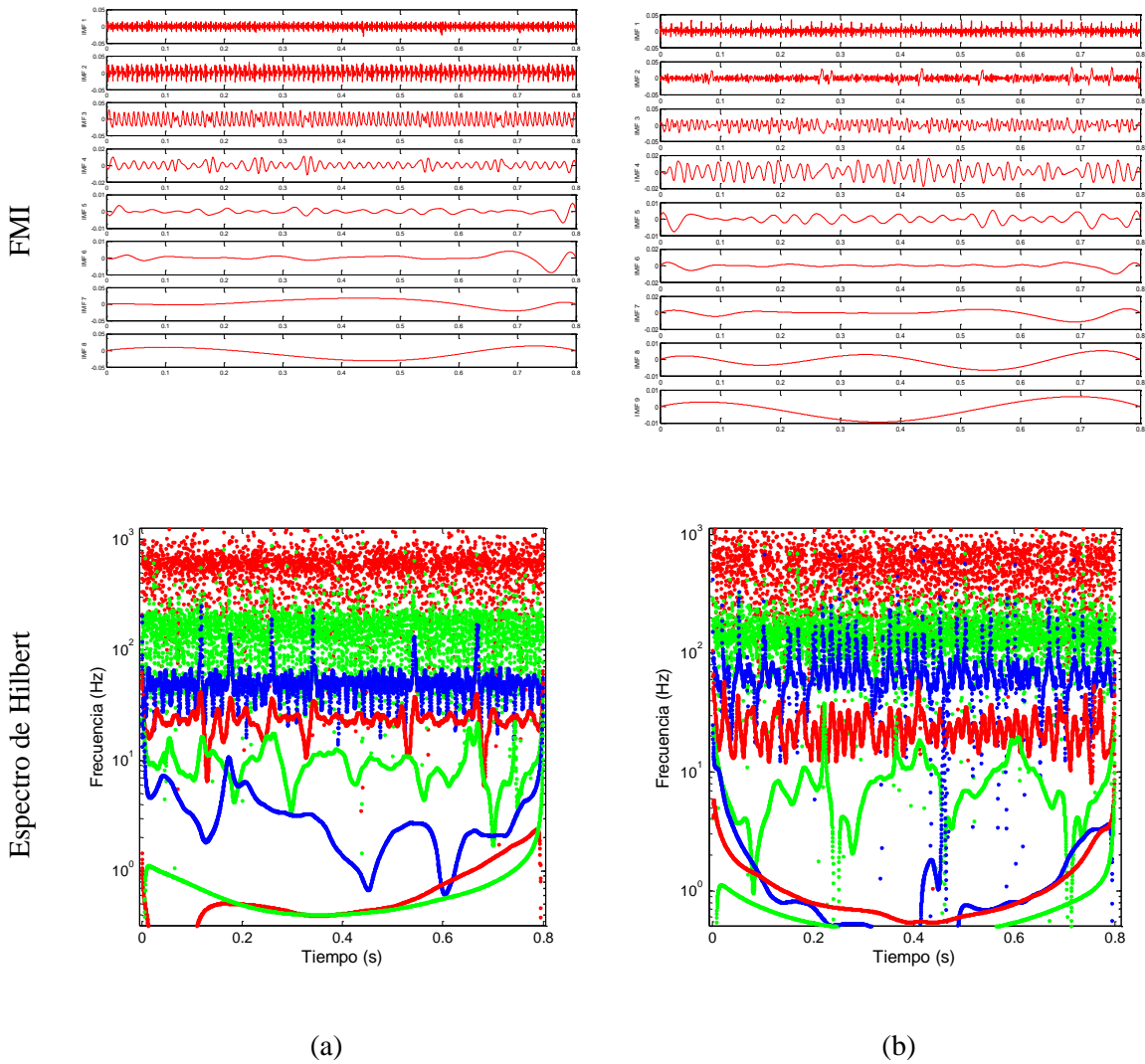


Figura 5.2 FMI y frecuencia instantánea obtenida al analizar al vibración de un transformador con la THH, (a) transformador sano y (b) transformador con núcleo flojo.

Comparando estos espectros con los trabajos del estado del arte se tienen las observaciones siguientes:

Con referencia al trabajo de Z. Wu [1], los resultados son muy parecidos. La señal del transformador con el núcleo flojo tiene más FMI que en la señal sin falla. El incremento de FMI se presenta por la presencia de nuevos modos oscilatorios debidos a la falla en el núcleo, esto origina una señal de vibración más compleja y por lo tanto la aparición de nuevas FMI.

Con respecto al trabajo de Xiong [2], los resultados son similares. Los espectros obtenidos en esta investigación, parte baja de la Figura 5.2, presentan diferencia entre ellos asociadas a los cambios en el núcleo. Los espectros obtenidos en esta investigación lucen con más puntos y con mayor dispersión en frecuencia comparados con los de Xiong. Esta condición se presenta porque la cantidad de puntos analizados es mayor.

Para comparar los resultados obtenidos con el trabajo de S. Wu [3] en el Anexo 2 se presentan los resultados obtenidos al combinar el uso de *wavelets* con la THH. En este caso, aunque se siguió el mismo procedimiento no se logró tener un espectro que separará claramente las frecuencias del espectro de Hilbert.

Analizando las gráficas de la Figura 5.2 se obtienen las observaciones siguientes:

En general, al aumentar el nivel de aflojamiento del núcleo aumentaba el número de FMI. Algunas mediciones con el mismo nivel de apriete también incrementaron sus FMI. El número de FMI depende de la complejidad de la señal analizada y en muchos casos de los valores iniciales y finales de la señal.

El ancho de banda de la frecuencia de cada FMI en el espectro de Hilbert se incrementa o se distorsiona al aflojar el núcleo. Por lo tanto, este atributo puede asociarse a la condición de salud del transformador. Sin embargo es difícil utilizarlo como indicador porque el cambio no se presentó igual en todos los casos.

Por ser una señal muy compleja y con muchos puntos medidos (4096) se dificulta su análisis visual y computacional. Utilizar menos puntos facilitaría el análisis.

En conclusión, podemos decir que existen cambios en el espectro de Hilbert asociados a la condición de salud del transformador. Sin embargo, el análisis de estos espectros es complicado y también es difícil cuantificar la razón de cambio.

### 5.3 Simplificación del espectro de Hilbert

En esta sección se presentan las consideraciones tomadas para simplificar el espectro de Hilbert que se obtiene al aplicar la THH al análisis de vibraciones de transformadores. Se explica cada consideración y se ilustra gráficamente. El objetivo es obtener un espectro más simple y que refleje la condición de salud del transformador. También se busca que el espectro pueda ser identificado por una herramienta de reconocimiento de patrones. Para simplificar el espectro de Hilbert se emplearon los cuatro pasos siguientes:

1. Selección de FMI significativas,
2. Determinación del tiempo mínimo de análisis,
3. Aplicación de la THH,
4. Selección de información relevante.

#### 5.3.1 Selección de FMI significativas

Analizar el comportamiento del espectro de Hilbert de la vibración de un transformador es muy difícil debido a que se tienen entre siete y ocho FMI por cada serie de datos. Por lo tanto, el primer paso que se realizó para simplificar el diagnóstico fue reducir el número de FMI. Para conseguir el objetivo se evaluaron tres opciones que se han utilizado en otros trabajos:

1. Considerar que la FMI de mayor frecuencia está asociada al ruido de la señal e ignorarla [4]-[6].
2. Identificar cuales FMI carecen de sentido físico por ser de muy baja frecuencia y sumarlas al error [4].
3. Identificar cuales FMI guardaran la mayor correlación con respecto a la señal original y tomarlas como representativas del sistema [4] y [5].

Después de evaluar estas opciones, en este trabajo se decidió tomar las tres FMI con mayor correlación con la señal original como significativas. En todos los casos analizados, las primeras tres FMI presentaron la mayor correlación.

### ***5.3.2 Determinación del tiempo mínimo de análisis***

Considerando (2.3), que define la vibración en el núcleo, y que el voltaje de excitación es cíclico, se concluye que la vibración también es cíclica. Para demostrar esto, las mediciones de voltaje y de vibración se dividieron tomando ventanas de un ciclo del voltaje de excitación. Cada ventana se sincronizó con el inicio del semiciclo positivo del voltaje. De esta forma, de los 800 *ms* de medición se obtuvieron 47 ciclos completos de voltaje. En la Figura 5.3 se muestran los 47 ciclos de voltaje y de vibración, así como su promedio, de la primera medición en condición sana del transformador. En esta figura se puede observar que existe una variación muy pequeña en el voltaje de excitación y en consecuencia la vibración también varía muy poco. A juzgar por la gráfica, el tiempo mínimo para la aplicación de la THH se pudo reducir a medio ciclo. Sin embargo, en este trabajo se decidió utilizar ciclos completos del voltaje de excitación.

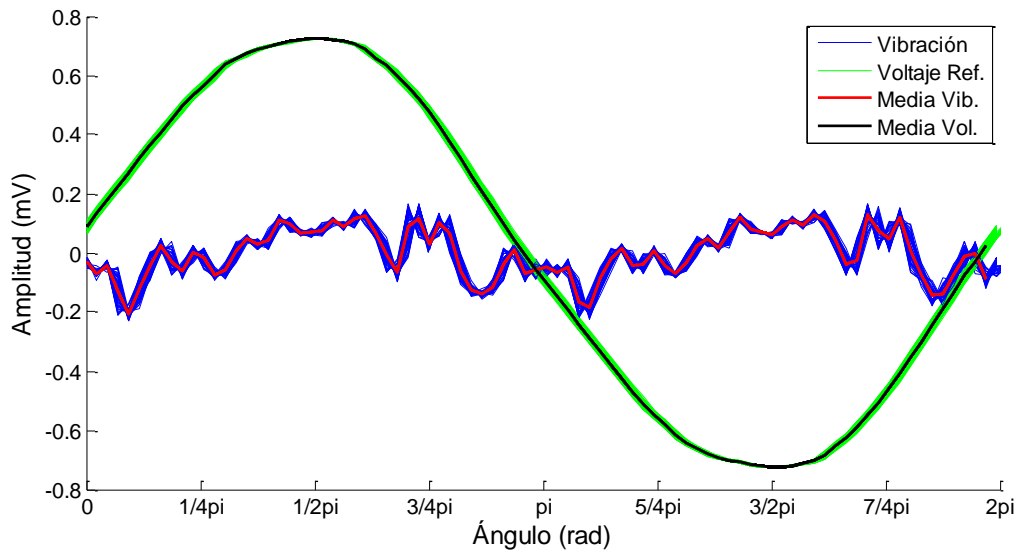


Figura 5.3 Voltaje y vibración del transformador segmentada por ciclos del voltaje, en verde se muestra el promedio de las señales.

### 5.3.3 Aplicación de la THH

Al aplicar el MED a los 47 ciclos que abarcan las mediciones realizadas y a su media, se obtienen las FMI mostradas en la Figura 5.4. En esta figura se observa que sólo algunas FMI difieren en los extremos del comportamiento general. Estas diferencias se deben al efecto borde, aunque ya ha sido corregido. Recordemos que al ser el MED un proceso iterativo los errores se van sumando.



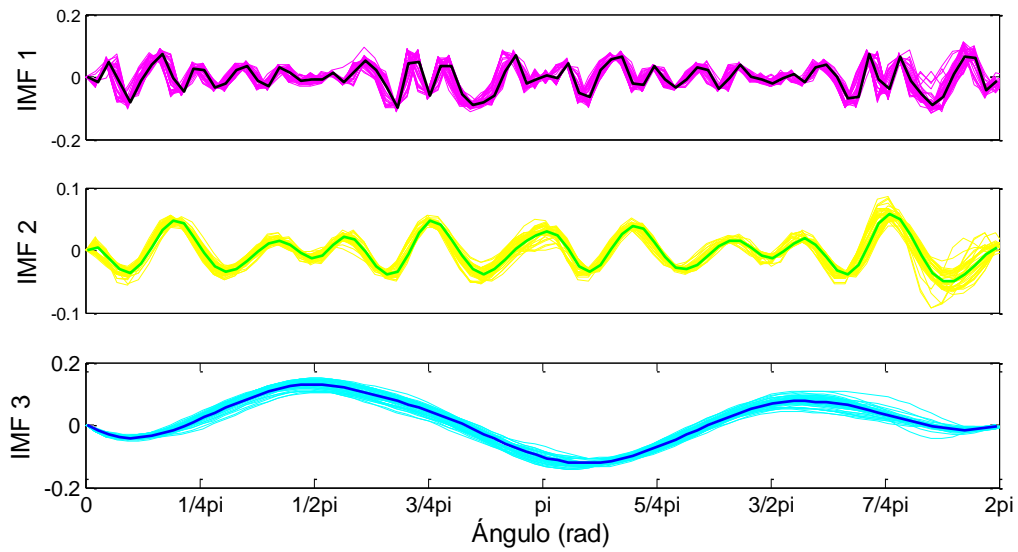


Figura 5.4 FMI de los 47 ciclos de medición.

La frecuencia instantánea de estas FMI se muestra en la Figura 5.5, donde se observa que la frecuencia instantánea presenta un comportamiento similar en todos los ciclos. Solamente en los extremos de la tercera FMI el comportamiento se vuelve disperso. En esta figura, también, se incluye la frecuencia instantánea del promedio de los 47 ciclos.

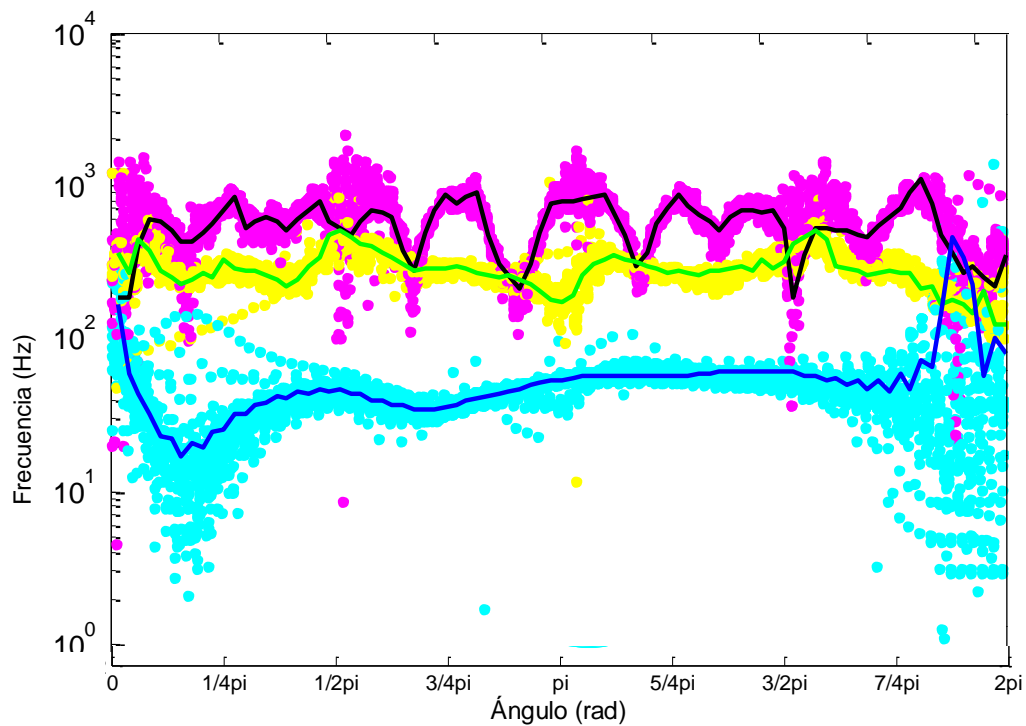


Figura 5.5 Frecuencia instantánea de los 47 ciclos de la señal.

Con los resultados mostrados de la Figura 5.3 a la Figura 5.5, queda demostrado que el comportamiento de la vibración de un transformador es cíclico; que las FMI obtenidas de cada uno de estos ciclos son muy similares y que la frecuencia instantánea también cuenta con un comportamiento similar en cada ciclo. Analizando el comportamiento del promedio de la señal y los resultados derivados de su análisis, se concluye que esta información es representativa de todas las mediciones.

#### 5.3.4 Selección de información relevante

En la Figura 5.6 se muestra el espectro de Hilbert de una medición registrada con el transformador sano. Para facilitar su observación, esta figura se presenta de forma tridimensional y a cada FMI se le asignó un marcador diferente. La energía se normalizó entre el máximo y el mínimo de cada

FMI. De esta forma es posible determinar los puntos con mayor probabilidad de repetirse dentro de cada FMI.

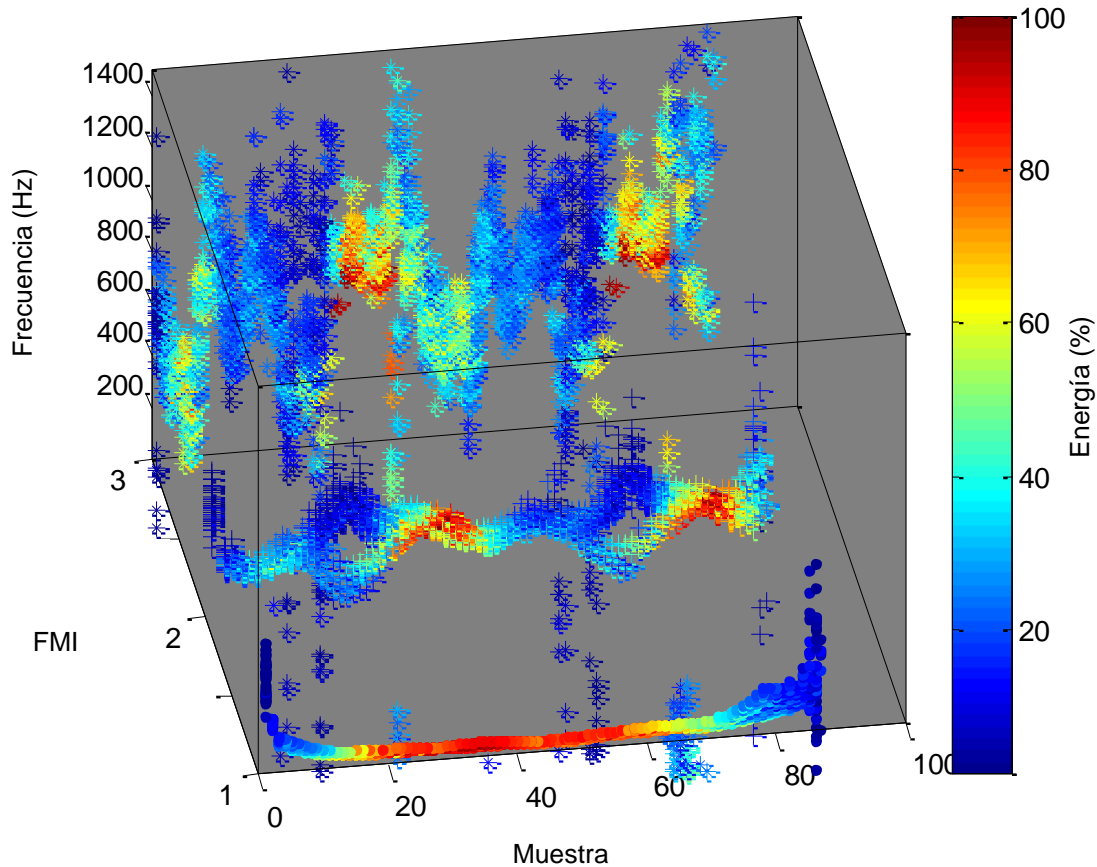


Figura 5.6 Espectro de Hilbert con la energía incluida.

Para analizar la gráfica anterior, se tiene que considerar a Huang [4] y a Gabor [7]. Huang expresó que la energía en el espectro de Hilbert indica la probabilidad de que dicho valor se repita. Al observar el espectro obtenido (Figura 5.6), se nota que las zonas con mayor energía tienen la menor dispersión. Esto confirma la observación de Huang. Por su parte, Gabor demostró que el promedio de la frecuencia instantánea es igual a la frecuencia promedio. Entonces, considerando que los puntos con mayor energía son también los que más se repiten, el promedio de la frecuencia de toda la señal estará muy cerca de la frecuencia de estos valores.

Teniendo estas consideraciones en cuenta, se puede concluir que los puntos con mayor energía son representativos de la señal. Seleccionando de la Figura 5.6 los puntos que tienen energía por arriba del ochenta por ciento del valor máximo de cada FMI, se obtiene el espectro mostrado en la Figura 5.7.

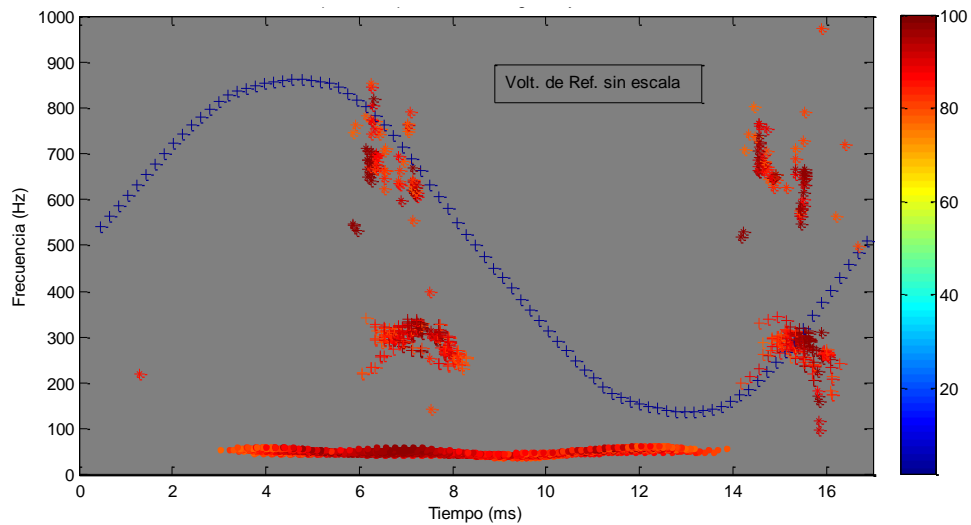


Figura 5.7 Espectro de Hilbert de los puntos con mayor energía.

Siguiendo la misma metodología, se analizaron las siete mediciones realizadas en cada uno de los tres niveles de apriete. En la Figura 5.8 se muestran una gráfica representativa de cada nivel de apriete.

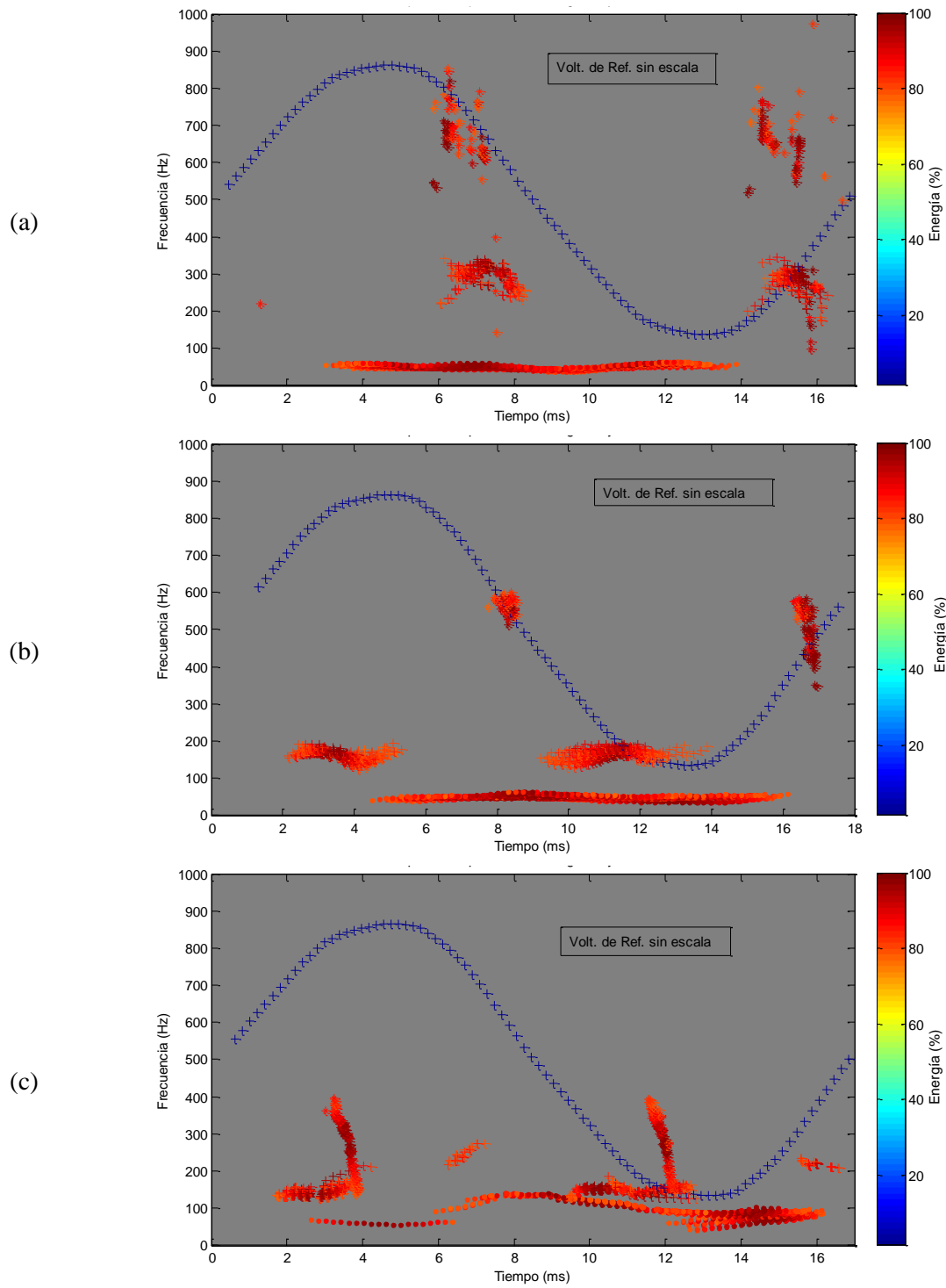


Figura 5.8 Ejemplos del espectro de Hilbert de los tres niveles de apriete evaluados, (a) Apriete 1, (b) Apriete 2 y (c) Apriete 3.

En este análisis se observó que la tercera FMI no presenta grandes cambios y por lo tanto no proporciona mucha información para diagnosticar el equipo bajo prueba. Por este motivo se decidió eliminarlo del análisis. Agregando el voltaje de excitación, el centro de masa de los valores con mayor energía y la dispersión, el espectro del Hilbert correspondiente se muestra en la Figura 5.9. La dispersión se calculó para cada eje como  $2\sigma$  ( $\sigma$  es la desviación estándar), de esta forma se garantiza que al menos el 95 por ciento de los valores quedan dentro del intervalo de dispersión [8]. El centro de masa y la dispersión se utilizarán más adelante como valores representativos para determinar la reproducibilidad de los resultados y para especificar los cambios en frecuencia asociados a la condición de salud del transformador.

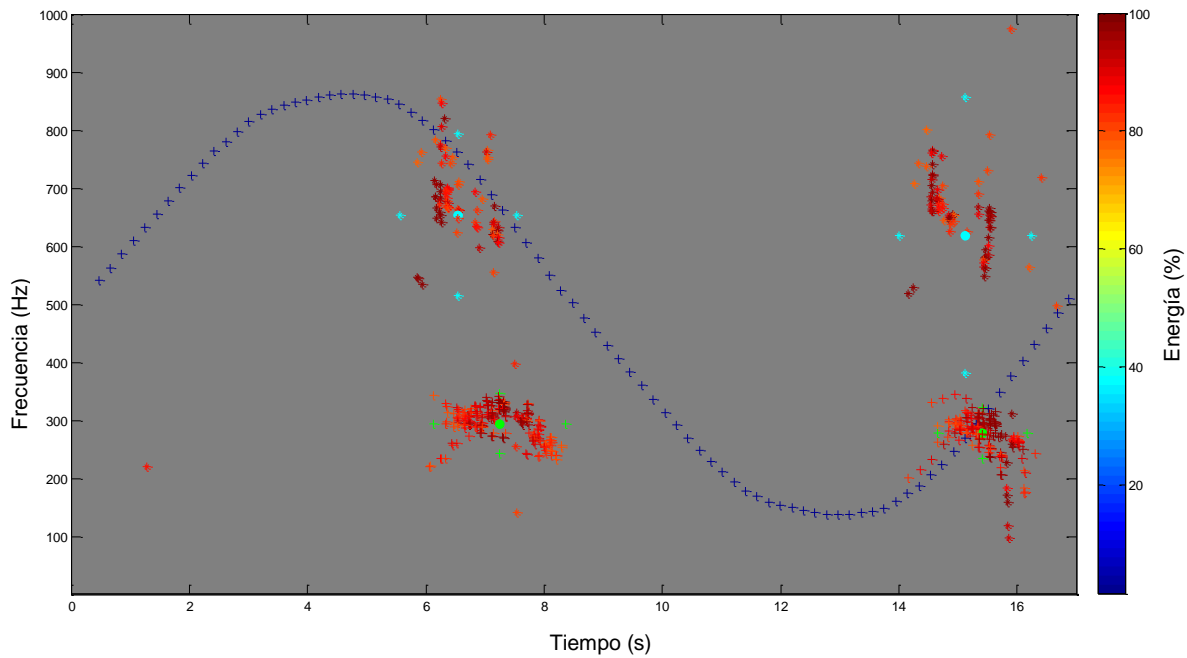


Figura 5.9 Espectro de Hilbert con voltaje de excitación, centros de masa y dispersión.

#### **5.4 Espectro simplificado versus espectro convencional**

Al comparar la Figura 5.8 y la Figura 5.2 es evidente que se ha logrado simplificar mucho el espectro de Hilbert. Las ventajas de la nueva forma de analizar las vibraciones del transformador con la THH son:

- Reducción de la ventana de tiempo de análisis de 800 a 16.6 ms. Esto es una reducción del 98 %.
- Eliminación de cinco o seis FMI que no tienen significado físico o que su variación en función del cambio en la presión de apriete del núcleo es nula.
- Mejor definición frecuencial del espectro de Hilbert.
- Reducción en el número de puntos en el espectro de Hilbert. En cada FMI de la Figura 5.2 hay 4,096 puntos, lo cual resulta en 32,768 puntos para ocho FMI. En cambio, la Figura 5.8 se tienen dos FMI con un máximo de 86 puntos cada una, es decir, 172 puntos. Esto es una reducción de 99.5 %.

#### **5.5 Reproducibilidad de patrones**

Para verificar la reproducibilidad del patrón obtenido en la sección anterior, se utilizaron las otras seis mediciones de vibración realizadas en cada nivel de apriete. En la Figura 5.10 se muestran los 47 ciclos de cada medición en cada nivel de apriete del núcleo. Se utilizan colores diferentes para apreciar diferencias entre cada medición. En estas gráficas se observa claramente que el patrón de vibraciones se repite a pesar de la independencia temporal de las mediciones.

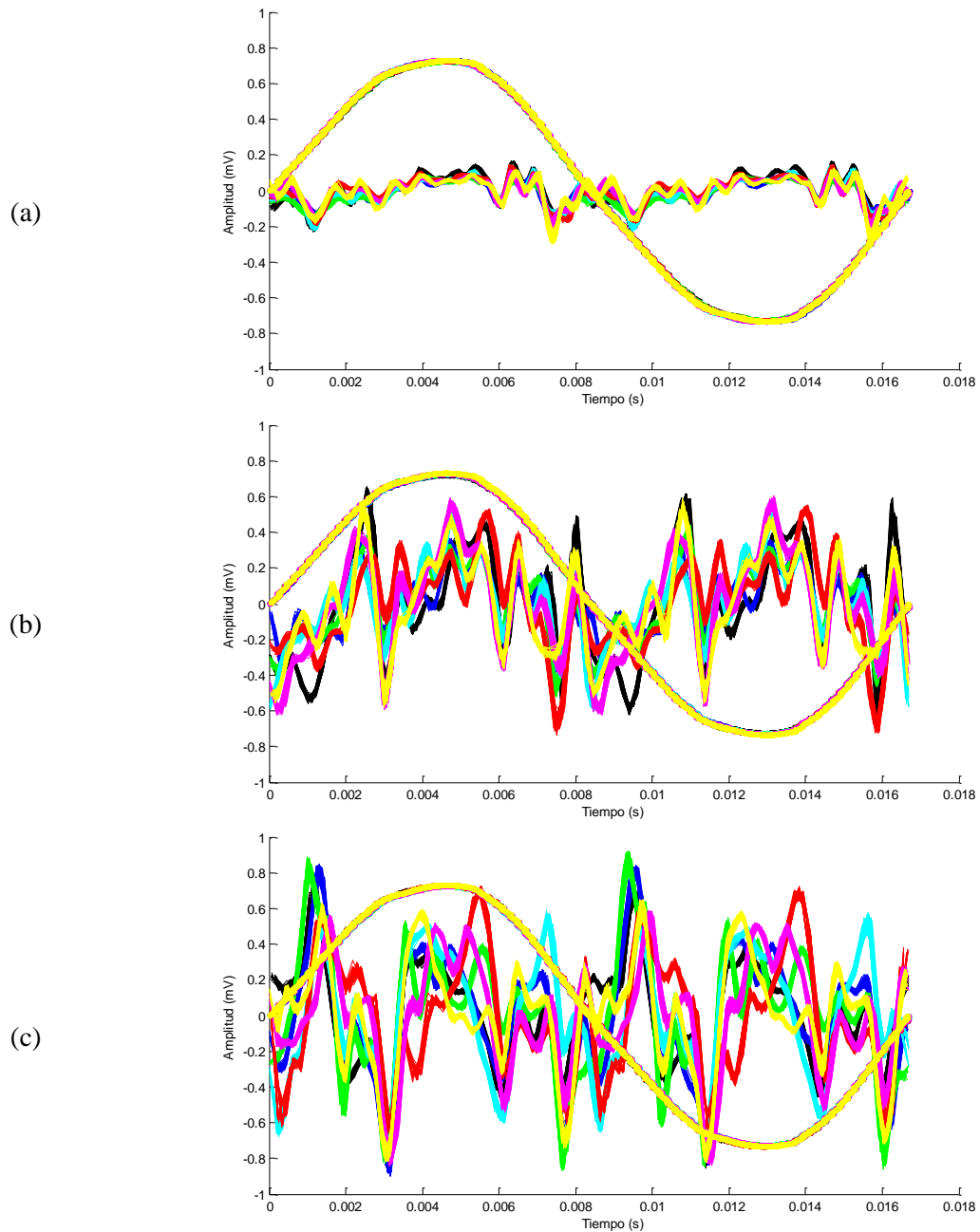


Figura 5.10 Reproducibilidad del patrón de vibraciones, (a) mediciones en el apriete 1, (b) mediciones en el apriete 2 y (c) mediciones en el apriete 3.

A la media de cada una de las siete mediciones en cada nivel de apriete, presentadas en la Figura 5.10, se le aplicó la THH. Los espectros obtenidos se presentan en la Figura 5.11.



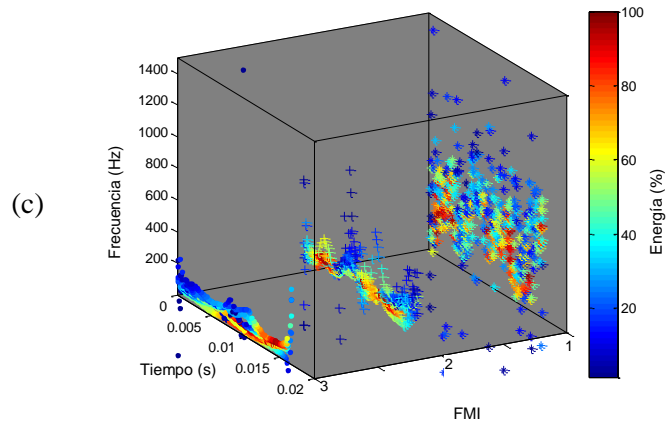
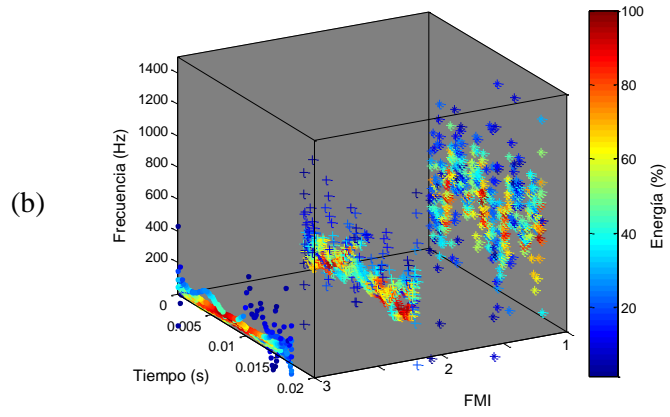
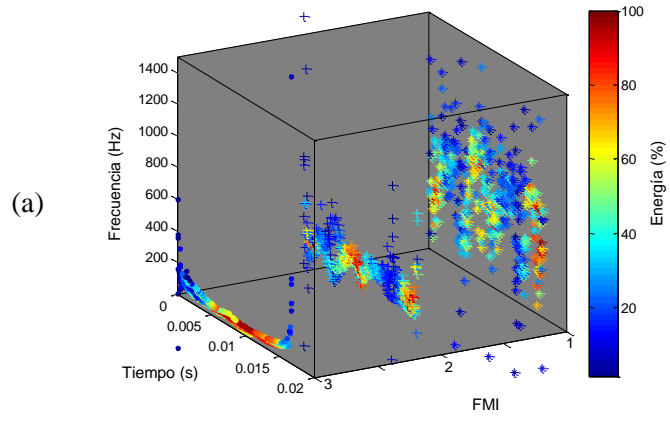


Figura 5.11 Espectro de Hilbert de la media de cada medición hecha en cada condición de apriete, (a) Apriete 1, (b) Apriete 2 y (c) Apriete 3.

En la Tabla 5.1 se presenta la frecuencia de los centros de masa del espectro de Hilbert correspondiente a la FMI 1 de cada medición realizada. Analizando la información de esta tabla, se observa que al aflojar el núcleo, la frecuencia de la FMI 1 tiende a disminuir. Los promedios de la diferencia entre las frecuencias de los centros de masa, del apriete 1 y 2 es de 200 y 183 Hz, esto es 33 y 31% respectivamente. Mientras que, los promedios de la diferencia del apriete 1 y 3 es de 224 y 221 Hz, es decir 37% en ambos casos. También, se observa que la segunda medición presenta un comportamiento diferente, probablemente por errores de medición.

En la Tabla 5.2 se presenta el ángulo de fase de los centros de masa del espectro de Hilbert correspondientes a la FMI 1 de cada medición realizada. Analizando la información de esta tabla, se observa que al aflojar el núcleo, el ángulo de fase de los centros de masa de la FMI 1 tiende a disminuir. Los promedios de la diferencia entre los ángulo de fase del apriete 1 y 2 es de 38.23 y 11.28 grados eléctricos, esto es 21 y 7% respectivamente. Mientras que, los promedios de la diferencia del apriete 1 y 3 es de 45.79 y 54.65 grados eléctricos, es decir 25 y 30% respectivamente. También, se observa que en algunas mediciones el ángulo de fase del centro de masa se incrementa, esto es contrario a la tendencia general.

Tabla 5.1 Comportamiento de la frecuencia de la FMI 1 en el espectro de Hilbert al cambiar la presión de apriete del núcleo.

Medición	Frecuencia 1 (F1) (Hz)			Diferencia (Hz)		Frecuencia 2 (F2) (Hz)			Diferencia (Hz)	
	Apriete 1 (A1)	Apriete 2 (A2)	Apriete 3 (A3)			Apriete 1 (A1)	Apriete 2 (A2)	Apriete 3 (A3)		
	F1A1	F1A2	F1A3	F1A1-F1A2	F1A1-F1A3	F2A2	F2A1	F2A3	F2A1-F2A2	F2A1-F2A3
1	564.12	271.51	419.72	292.61	144.40	540.09	369.68	379.43	170.42	160.66
2	409.94	491.28	351.44	-81.34	58.50	422.20	475.94	396.43	-53.73	25.77
3	654.41	216.25	504.94	438.15	149.46	619.21	337.21	467.26	282.00	151.95
4	593.82	565.84	243.37	27.98	350.46	557.95	515.29	164.22	42.66	393.73
5	641.66	465.78	473.12	175.88	168.54	648.02	387.89	520.04	260.14	127.99
6	670.91	418.88	402.17	252.03	268.74	650.36	397.31	383.71	253.05	266.65
7	717.42	419.77	283.90	297.65	433.52	709.13	376.98	288.62	332.16	420.52
Promedio:	607.47	407.04	382.67	<b>200.42</b>	<b>224.80</b>	592.43	408.61	371.39	<b>183.81</b>	<b>221.04</b>

Tabla 5.2 Comparación del ángulo de fase de los centros de masa de la FMI 1 en el espectro de Hilbert al cambiar la presión de apriete del núcleo.

Medición	Ángulo de fase 1 (T1) (grados eléctricos)			Diferencia (grados eléctricos)		Ángulo de fase 2 (T2) (grados eléctricos)			Diferencia (grados eléctricos)	
	Apriete 1 (A1)	Apriete 2 (A2)	Apriete 3 (A3)			Apriete 1 (A1)	Apriete 2 (A2)	Apriete 3 (A1)		
	T1A1	T1A2	T1A3	T1A1-T1A2	T1A1-T1A3	T2A2	T2A1	T2A3	T2A1-T2A2	T2A1-T2A3
1	142.13	47.09	60.26	95.04	81.86	325.51	315.36	239.76	10.15	85.75
2	138.89	69.98	68.69	68.90	70.20	320.98	262.44	246.89	58.54	74.09
3	141.48	58.75	66.74	82.73	74.74	326.38	333.50	256.82	-7.13	69.55
4	114.05	176.26	95.04	-62.21	19.01	298.73	325.51	276.70	-26.78	22.03
5	119.88	160.06	176.90	-40.18	-57.02	322.92	349.92	339.98	-27.00	-17.06
6	133.06	65.88	86.62	67.18	46.44	314.71	272.59	250.78	42.12	63.94
7	161.14	104.76	76.46	56.38	84.67	340.63	307.80	256.82	32.83	83.81
Promedio:	135.86	97.63	90.07	<b>38.23</b>	<b>45.79</b>	321.41	309.53	266.76	<b>11.88</b>	<b>54.65</b>

En la Figura 5.12 se presentan los centros de masa, en el ángulo de fase y la frecuencia, de la FMI 1 de cada medición en el espectro de Hilbert. Se observa que los centros de masa tienden a agruparse, esto es indicativo de que el patrón de vibraciones es repetitivo cuando el transformador está en las mismas condiciones.

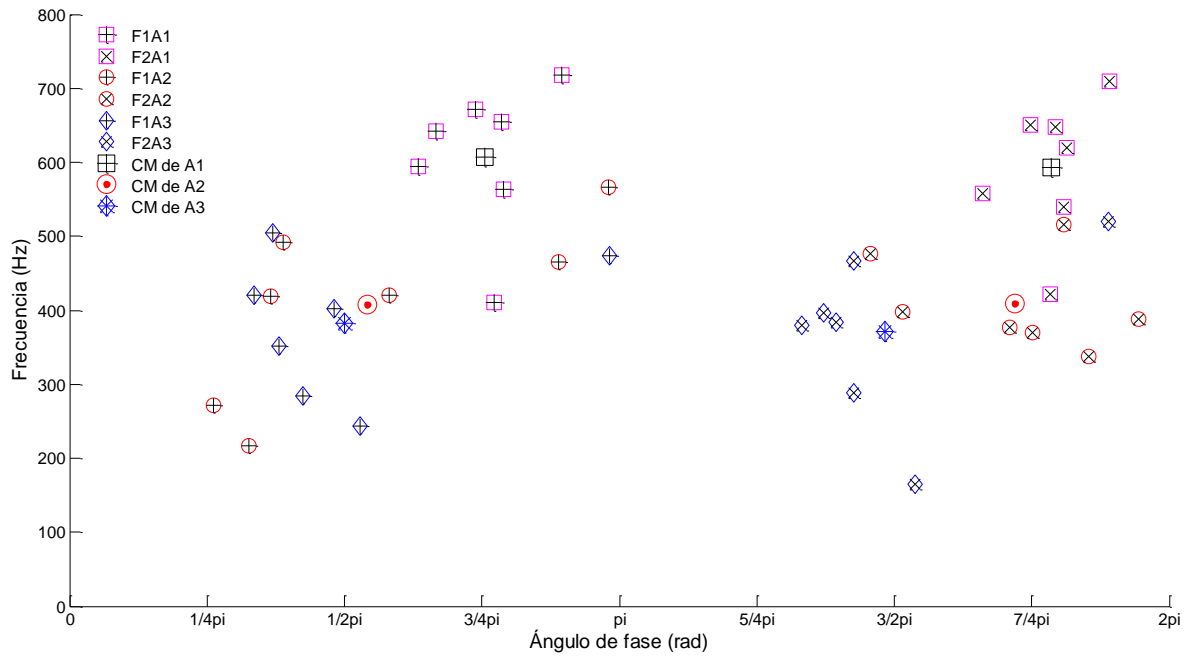


Figura 5.12 Centros de masa de la FMI 1 de cada medición en el espectro de Hilbert.

En la Figura 5.13 se muestra el centro de masa de la FMI 1 en cada nivel de apriete, con su dispersión y curvas de tendencia. Se observa que al aflojar el núcleo la frecuencia instantánea se reduce y se desplaza a un menor ángulo de fase.

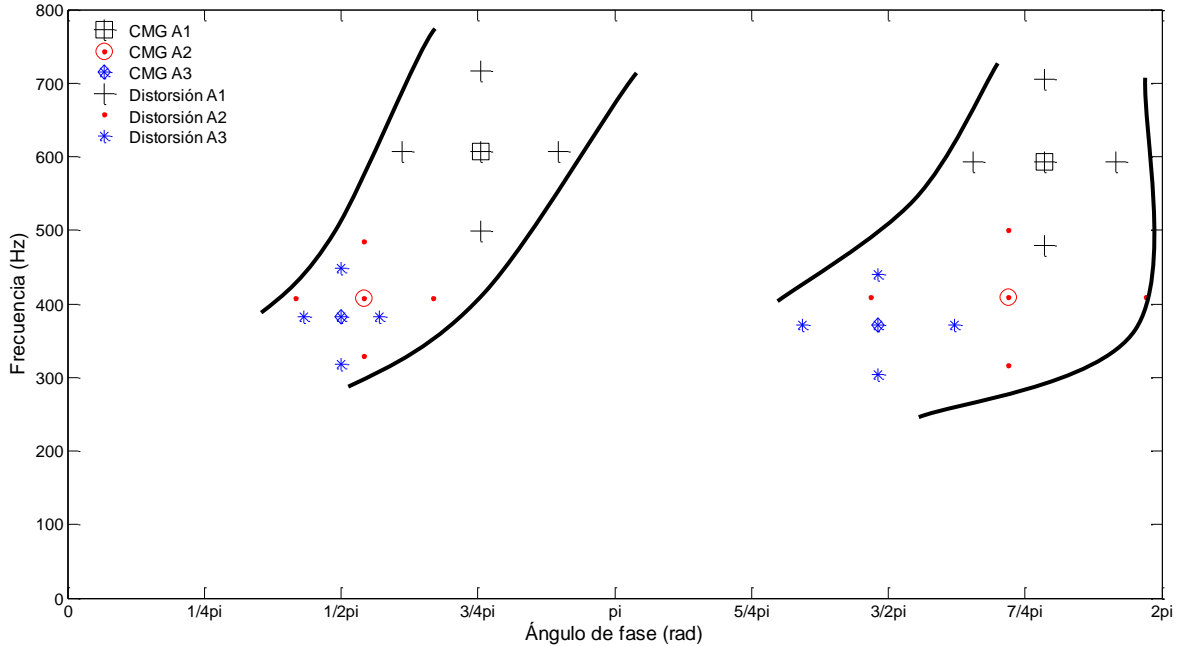


Figura 5.13 Centro de masa de la FMI 1 en cada nivel de apriete, con su dispersión y curvas de tendencia.

En la Tabla 5.3 se presenta la frecuencia de los centros de masa del espectro de Hilbert correspondientes a la FMI 2 de cada medición realizada. Analizando la información de esta tabla, se observa que al aflojar el núcleo, la frecuencia de la FMI 2 tiende a disminuir. Los promedios de la diferencia, entre las frecuencias de los centros de masa, del apriete 1 y 2 es de 98 y 73 Hz, esto es 38 y 30% respectivamente. Mientras que, los promedios de la diferencia del apriete 1 y 3 es de 118 y 102 Hz, es decir 45 y 41% respectivamente. Al igual que en la Tabla 5.1, la segunda medición presenta un comportamiento diferente.

En la Tabla 5.4 se presenta el ángulo de fase de los centros de masa del espectro de Hilbert correspondientes a la FMI 2 de cada medición realizada. Analizando la información de esta tabla, se observa que al aflojar el núcleo, el ángulo de fase de los centros de masa de la FMI 2 tiende a disminuir. Los promedios de la diferencia entre el ángulo de fase del apriete 1 y 2 es de 98.54 y 73.77 grados eléctricos, esto es 26 y 6% respectivamente. Mientras que, los promedios de la

diferencia del apriete 1 y 3 es de 118.01 y 102.23 grados eléctricos, es decir 24 y 30% respectivamente. Al igual que en la Tabla 5.2, se observa que en algunas mediciones, el ángulo de fase del centro de masa se incrementa, esto es contrario a la tendencia general.

Tabla 5.3 Comportamiento de la frecuencia de la FMI 2 en el espectro de Hilbert al cambiar la presión de apriete del núcleo.

Medición	Frecuencia 1 (F1) (Hz)			Diferencia (Hz)		Frecuencia 2 (F2) (Hz)			Diferencia (Hz)	
	Apriete 1 (A1)	Apriete 2 (A2)	Apriete 3 (A3)			Apriete 1 (A1)	Apriete 2 (A2)	Apriete 3 (A3)		
	F1A1	F1A2	F1A3	F1A1-F1A2	F1A1-F1A3	F2A2	F2A1	F2A3	F2A1-F2A2	F2A1-F2A3
1	255.85	96.00	139.95	159.84	115.90	223.44	Sin Valor	156.54	Sin valor	66.89
2	242.92	233.19	132.87	9.73	110.04	244.81	277.20	146.28	-53.77 <sup>4</sup>	98.53
3	294.73	125.42	151.83	169.32	142.91	277.78	201.65	177.28	43.16	100.50
4	244.83	163.82	150.67	81.01	94.16	229.17	166.40	95.93	111.38	133.24
5	256.26	187.51	132.35	68.75	123.92	235.24	152.86	137.53	76.30	97.71
6	267.83	142.84	135.46	124.99	132.37	246.48	162.49	149.22	72.74	97.27
7	263.73	187.62	156.94	76.11	106.79	278.36	187.23	156.90	59.26	121.47
Promedio:	260.88	162.34	142.87	<b>98.54</b>	<b>118.01</b>	247.90	174.13	145.67	<b>73.77</b>	<b>102.23</b>

Tabla 5.4 Comparación del ángulo de fase de los centros de masa de la FMI 2 en el espectro de Hilbert al cambiar la presión de apriete del núcleo.

Medición	Ángulo de fase 1 (T1) (grados eléctricos)			Diferencia (grados eléctricos)		Ángulo de fase 2 (T2) (grados eléctricos)			Diferencia (grados eléctricos)	
	Apriete 1 (A1)	Apriete 2 (A2)	Apriete 3 (A3)			Apriete 1 (A1)	Apriete 2 (A2)	Apriete 3 (A3)		
	T1A1	T1A2	T1A3	T1A1-T1A2	T1A1-T1A3	T2A2	T2A1	T2A3	T2A1-T2A2	T2A1-T2A3
1	93.74	76.03	75.17	17.71	18.58	330.05	Sin Valor	246.89	Sin Valor	83.16
2	122.04	90.94	80.35	31.10	41.69	322.27	336.31	227.23	-14.04	95.04
3	156.38	65.23	152.50	91.15	3.89	333.07	343.66	228.74	-10.58	104.33
4	132.84	77.54	120.10	55.30	12.74	257.90	240.41	331.34	17.50	-73.44
5	142.34	148.82	66.96	-6.48	75.38	314.06	337.39	249.26	-23.33	64.80
6	157.68	93.10	81.22	64.58	76.46	297.43	263.52	256.82	33.91	40.61
7	147.10	68.26	68.69	78.84	78.41	312.55	276.05	245.81	36.50	66.74
Promedio:	136.08	88.56	92.23	<b>47.52</b>	<b>43.85</b>	309.74	299.59	255.10	<b>10.15</b>	<b>54.65</b>

En la Figura 5.14 se presentan los centros de masa, en el ángulo de fase y la frecuencia, de la FMI 2 de cada medición en el espectro de Hilbert. Se observa que los centros de masa tienden a agruparse, esto es indicativo de que el patrón de vibraciones es repetitivo cuando el transformador está en las mismas condiciones.

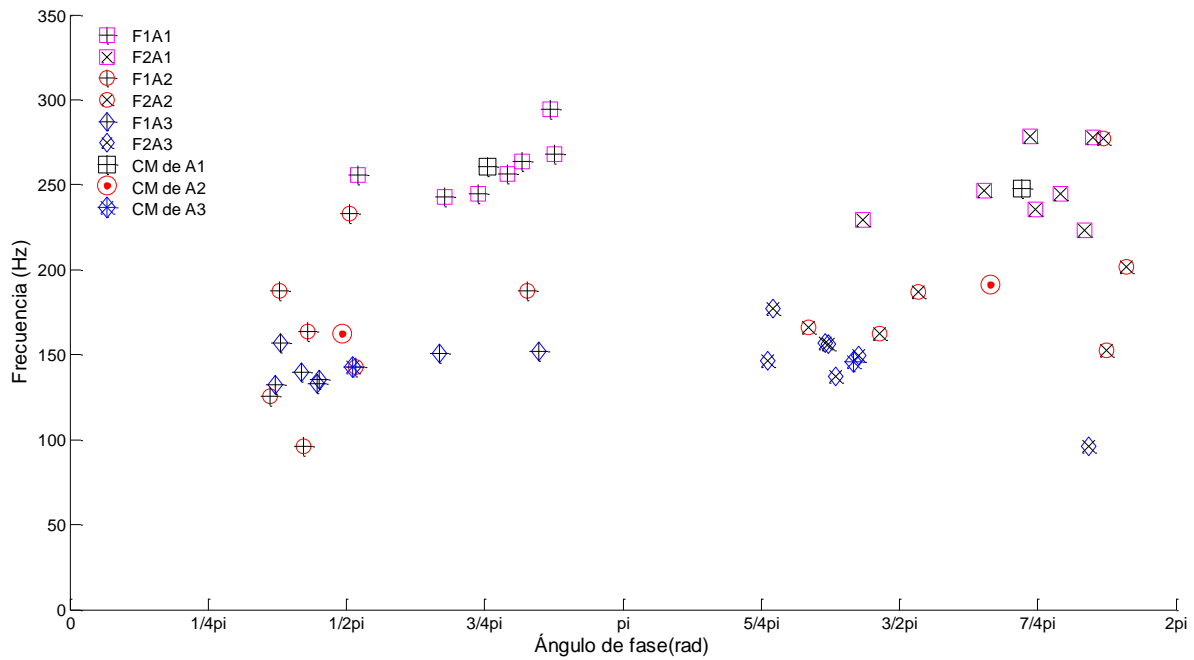


Figura 5.14 Centros de masa y dispersión de la FMI 2 en el espectro de Hilbert.

En la Figura 5.15 se muestra el centro de masa de la FMI 2 en cada nivel de apriete, con su dispersión y curvas de tendencia. Se observa que al aflojar el núcleo la frecuencia instantánea se reduce y se desplaza a un menor ángulo de fase.



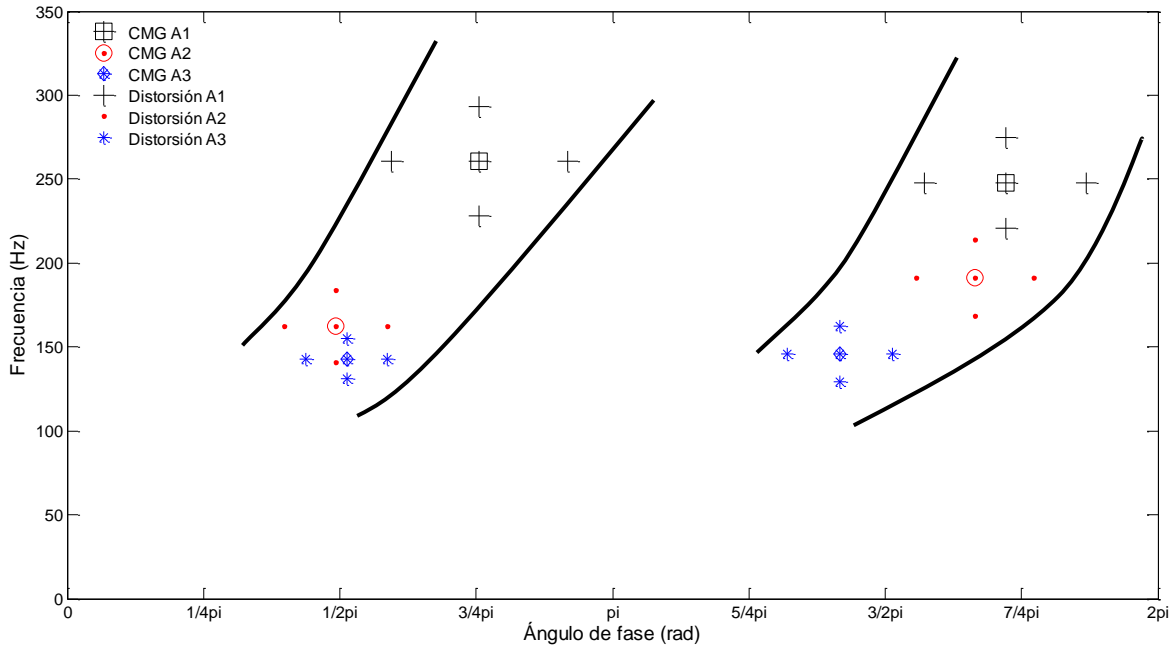


Figura 5.15 Centros de masa de la FMI 2 con su dispersión y curvas de tendencia.

En la Tabla 5.5 se presentan los porcentajes de diferencia en frecuencia y en ángulo de fase de las FMI 1 y 2. Se observa que en ambas FMI, los cambios en frecuencia presentan un comportamiento regular y son mayores a los cambios en ángulo de fase, que además cuentan con un comportamiento irregular.

Tabla 5.5 Porcentajes de diferencia en frecuencia y en ángulo de fase.

	Diferencia en frecuencia (%)		Diferencia en ángulo de fase (%)	
	FMI 1, F1	FMI 2, F2	FMI 1, T1	FMI 2, T2
A1-A2	33	38	21	26
	31	30	7	6
A1-A3	37	45	25	25
	37	41	30	30

## 5.6 Extrapolación de la técnica a transformadores de potencia

El algoritmo propuesto en esta tesis se probó con las mediciones de vibración realizadas en un transformador de control, el cual tiene grandes diferencias geométricas con respecto a un transformador de potencia. Sin embargo, el comportamiento de la vibración, en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, del transformador evaluado presenta mucha similitud con los resultados publicados por Ji [9], por García [10] y por Bartoleti [11]. También, el espectro de Hilbert obtenido presenta un comportamiento similar a los resultados obtenidos en por S. Wu [3], Z. Wu [1] y Xiong [2]. Estas similitudes, nos lleva a concluir que es factible aplicar el algoritmo propuesto a transformadores de potencia.

## Referencias

- [1] Z. Wu y Y. Zhu, “*Features of vibration signal of power Transformer using local wave method*”, Proceedings of the 2009 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Vol. 1, pp. 388-393.
- [2] W. Xiong y R. Ji, “*Nonlinear Time Series Analysis of Transformer’s Core Vibration*”, Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), IEEE, Vol.2, pp. 5493-5496, junio 2006.
- [3] S. Wu, W. Huang, F. Kong, Q. Wu, F. Zhou, R. Zhang y Z. Wang, “*Extracting Power Transformer Vibration Features by a Time-Scale-Frequency analysis Method*”, 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '09, pp. 2577-2581.
- [4] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N. Yen, C. C. Tung y H. H. Liu, “*The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis*”, Proc. R. Soc. Lond. A., pp. 903-995, 1998.

- [5] Z. K. Peng, P. T. Tse y F. L. Chu, “*An improved Hilbert-Huang Transform and its Application in Vibration Signal Analysis*”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 286, pp. 187-205, agosto 2005.
- [6] N. E. Huang y Z. Wu, “*An adaptive Data Analysis Method for Nonlinear and Nonstationary Time Series: The Empirical Mode Decomposition and Hilbert Spectral Analysis*”.
- [7] D. Gabor, “*Theory of communication. Part I: The Analysis of Information*”, Journal of the Institution of Electrical Engineers. Part III: Radio and Communication Engineering, Vol. 93, pp. 429-441, noviembre 1946.
- [8] En línea: <http://www.shodor.org/unchem/math/stats/index.html>, *Arithmetic Mean, Error, Percent Error, and Percent Deviation*.
- [9] S. Ji, Y. Luo y Y. Li, “*Research on Extraction Technique of Transformer Core Fundamental Frequency Vibration based on OLCM*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 4, pp. 1981-1988, octubre 2006.
- [10] B. García, J. C. Burgos y A. M. Alonso, “*Winding Deformation Detection in Power Transformers by Tank Vibration Monitoring*”, Electric Power Systems Research 74, pp. 129-138, 2005.
- [11] C. Bartoletti, M. Desiderio, D. Di Carlo, G. Fazio, F. Muzi, G. Sacerdoti y F. Salvatori, “*Vibro-Acoustic Techniques to Diagnose Power Transformers*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, pp. 221-29, enero 2004.

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de la tesis. Se especifican las aportaciones de la investigación y se dan recomendaciones para trabajos futuros en esta área de investigación y recomendaciones para realizar mediciones de vibraciones en transformadores.

#### **6.1 Conclusiones**

Al corregir el efecto borde en el MED, se reduce la dispersión de la frecuencia instantánea en los extremos del espectro y se evita la duplicidad de frecuencia para una misma FMI. Esto cambia de forma drástica el espectro de Hilbert. Con esta corrección, también se aminora el mezclado de modos. En función de la naturaleza de la señal, algunas técnicas de corrección del efecto borde presentan mejores resultados que otras.

La vibración del transformador no es lineal, porque está en función de factores senoidales y cuadráticos, y es estacionaria, porque presenta un período de repetición. Al ser estacionaria, el promedio de la vibración, determinado en intervalos de un período de la señal de excitación del

transformador, es representativo de toda la señal promediada. El promedio, también actúa como filtro mediante el cual se elimina ruido y frecuencias asociadas a dicho ruido

El espectro de Hilbert obtenido al aplicar la THH al promedio de la vibración es representativo de todo el intervalo de medición. El espectro que se obtiene al analizar la vibración presente en el transformador durante sólo un ciclo de su señal de excitación es suficiente para realizar su diagnóstico.

Las primeras tres FMI tienen más correlación con la señal original y son las que contienen información útil para realizar el diagnóstico de transformadores al analizar el espectro de Hilbert. En el espectro de Hilbert, los puntos con mayor energía son los que más se repiten y, por lo tanto, son representativos del sistema. Al reducirse la presión de apriete del núcleo del transformador las frecuencias en el espectro de Hilbert tienden a reducirse. Los cambios en la frecuencia del espectro de Hilbert son el principal indicador de la salud del transformador.

Finalizando, la THH demostró ser una herramienta que permite identificar cambios en la condición de salud de transformadores mediante el análisis de sus vibraciones. Sin embargo, para realizar el diagnóstico se requiere conocer la vibración cuando el equipo está sano. Aún con este inconveniente, esta técnica presenta ventajas con respecto al desarrollo de modelos matemáticos los cuales requieren de múltiples mediciones para parametrizar sus ecuaciones.

## **6.2 Aportaciones de la investigación**

Se demostró que el promedio de la señal de vibración, en ventanas de un ciclo de la señal de excitación, funciona como filtro para eliminar ruido y frecuencias que aparecen de forma aleatoria en las mediciones.

Se simplificó el espectro de Hilbert extrayendo únicamente las FMI que tienen significado físico y que son sensibles a cambios en la geometría del transformador. Esta simplificación hace factible el

uso de herramientas de reconocimiento de patrones para realizar el diagnóstico del transformador sin la necesidad de un experto para la interpretación de resultados.

Se demostró que utilizando la THH es posible encontrar atributos en el espectro de Hilbert asociados a la condición de salud del transformador. La reducción de la frecuencia instantánea, de las FMI que tienen mayor correlación con la señal original se puede considerar como el principal indicador del aflojamiento del núcleo.

### **6.3 Recomendaciones para trabajos futuros**

Para los trabajos que a futuro se realicen en esta área de investigación se tienen las recomendaciones siguientes:

- Aplicar la propuesta desarrollada en este trabajo en el análisis de vibración de transformadores de potencia.
- Evaluar la utilización de medio ciclo de la señal de excitación del transformador como base para la aplicación de la THH y el diagnóstico del transformador.
- Analizar por qué en el espectro de Hilbert, las zonas de concentración de energía se desplazan en el tiempo, es decir, por qué los centros de masa se recorrieron en el eje del tiempo, buscando un significado físico para este corrimiento.
- Desarrollar una interfaz gráfica de usuario para facilitar el uso de la herramienta desarrollada.
- Desarrollar una base datos de mediciones de vibración de transformadores de potencia sanos y con deterioro mecánico para buscar un conjunto de atributos que caractericen a una familia.
- Evaluar el efecto de la temperatura en las vibraciones del transformador. Para estudiar este fenómeno se debe considerar el cambio en la magnetostricción del material del núcleo y la

transmisión de las vibraciones en el aceite y en los elementos estructurales del transformador.

#### **6.4 Recomendaciones para medir vibraciones en transformadores**

En la medición de vibración en transformadores, especialmente en transformadores de potencia, se tienen las recomendaciones siguientes:

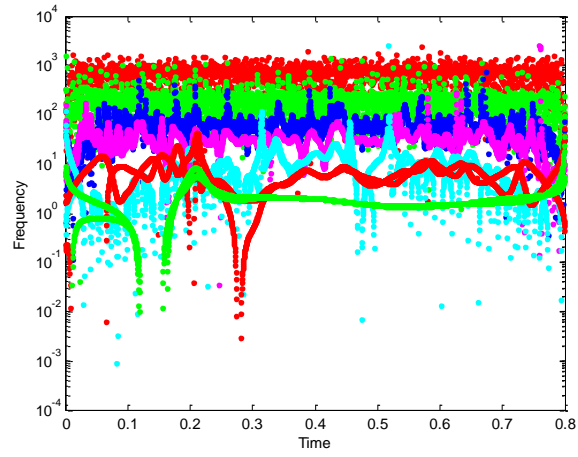
- Tomar mediciones simultáneas de las vibraciones y de la señal de excitación. Si es posible también registrar la temperatura a la cual se hacen las mediciones.
- Realizar las mediciones cuando el transformador tenga estabilidad térmica.
- Sincronizar el inicio del registro de las mediciones con el inicio del semiciclo positivo de la señal de referencia.
- Especificar el punto en que se midió y la temperatura del transformador que se está midiendo.
- Mediciones posteriores deben ser realizadas en el mismo punto, ya que el patrón de vibraciones cambia drásticamente en diferentes zonas del transformador.

## **Anexo 1.- Evaluación de los diferentes algoritmos de la THH**

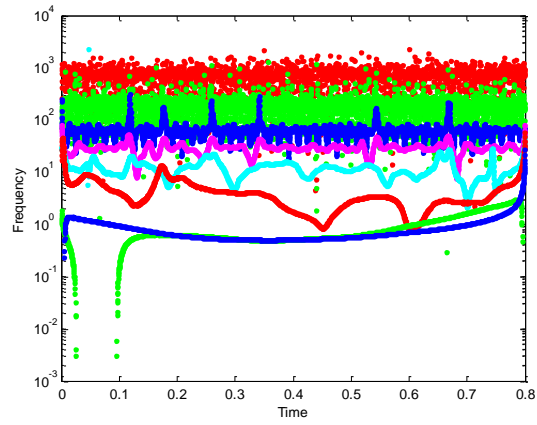
Para seleccionar el algoritmo a utilizar, se evaluaron el algoritmo original de la THH, el algoritmo de la THH con corrección del efecto borde y el algoritmo de la THH normalizada analizando la primera medición registrada en el Apriete 1, los resultados se muestran en la Figura A1.1.

El algoritmo de la THH, Figura A1.1 (a), presenta gran distorsión en los bordes de la señal, mezcla mucho los modos y también presenta doble frecuencia aparente en algunas FMI. El algoritmo de la THH con corrección de efecto borde, Figura A1.1 (b), presenta mejor definición frecuencial y un poco de mezclado de modos. El algoritmo de la THH normalizada, Figura A1.1 (c), presenta discontinuidades en varias FMI y mezclado de modos, las frecuencias que se presentan con este algoritmo son un orden de magnitud menor. Con base en estos resultados, se seleccionó el algoritmo de la THH con corrección del efecto borde como herramienta de análisis de este trabajo.

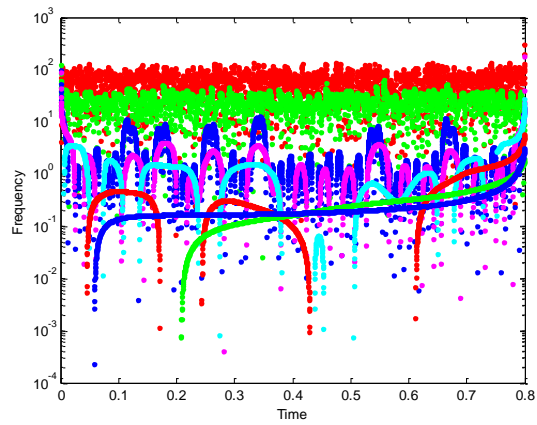




(a)



(b)



(c)

Figura A1.1 (a) THH, (b) THH con corrección de efecto borde y (c) THH normalizada.

## Anexo 2.- Evaluación de la combinación de *wavelets* y la THH

Para evaluar la combinación de *wavelets* y la THH se utilizó el algoritmo que se presenta en la Figura A2.1.

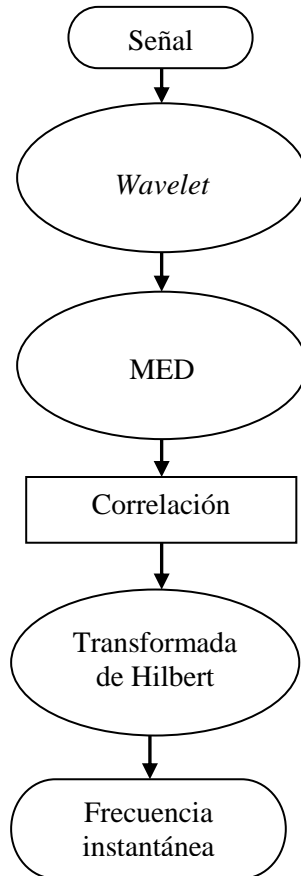


Figura A2.1 Diagrama de flujo de la combinación de *wavelets* y la THH.

Al aplicar la descomposición con wavelets a la señal, se obtiene la Figura A2.2.

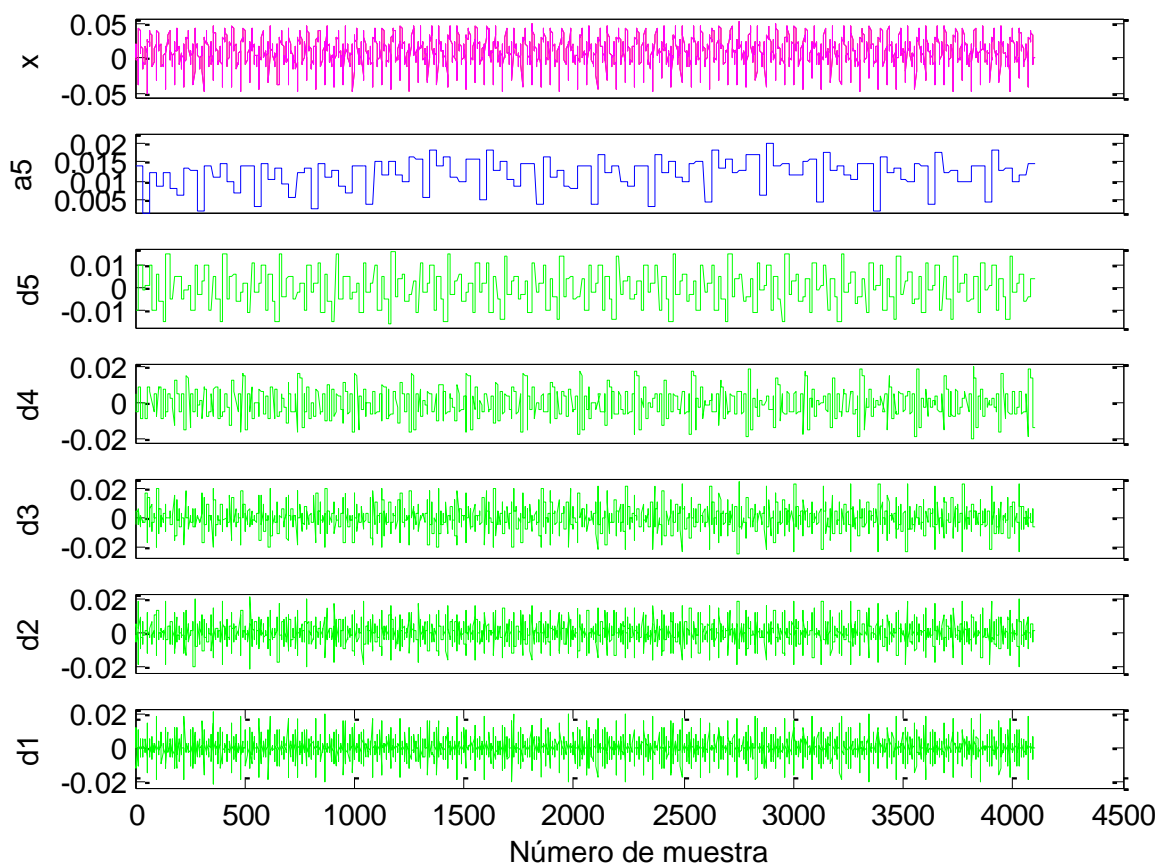


Figura A2.2 Descomposición en *wavelets* de la señal de vibración del transformador.

Al aplicar el MED se obtuvieron 56 FMI y mediante correlación solo se seleccionaron 6 como representativas de la señal original, ver Tabla A2.1.

Tabla A2.1 FMI de cada wavelet y selección de FMI relevantes.

<b>Función</b>	<b>FMI</b>	<b>IMF Relevantes</b>
a5	6	
d5	7-17	7
d4	18-27	18, 19
d3	28-37	28, 29
d2	38-47	38
d1	47-56	
Total:	56	Criterio: $\text{corr} \geq 0.23$

La Figura A2.3 muestra la frecuencia instantánea de las seis FMI seleccionadas como relevantes. Se observa que el ancho de banda de la frecuencia instantánea de varias FMI es muy amplio comparado con lo reportado por S. Wu. Los puntos que se observan en frecuencias negativas, son normales en el espectro de Hilbert, se presentan en cada valor extremo de la FMI.

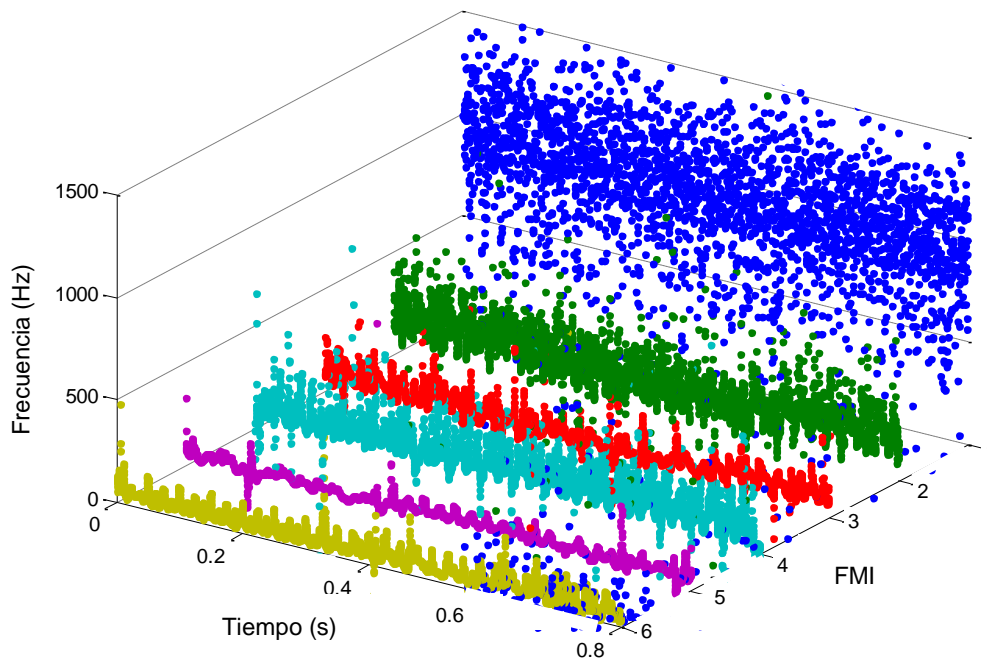


Figura A2.3 Frecuencia instantánea de las FMI relevantes.