

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS DE VIBRACIONES DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres

Gavidia Ferrer, Aris L.

Velásquez Amaya, Angel L.

Para optar al Título de

Ingeniero Mecánico

Caracas, 2007.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS DE VIBRACIONES DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Carmen R. Hernández Y.

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Rómulo Cortéz.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Bachilleres
Gavidia Ferrer, Aris L.
Velásquez Amaya, Angel L.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2007

Caracas, junio 2007

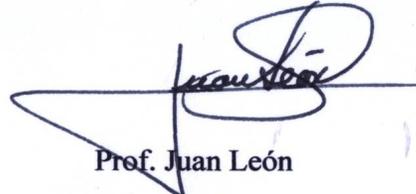
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Aris L. Gavidia F. y Angel L. Velásquez A., titulado:

“Análisis de vibraciones de transformadores de potencia de una Central Hidroeléctrica”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.



Prof. Jorge Cruz
Jurado



Prof. Juan León
Jurado



Prof.ª Carmen Rosa Hernández
Tutor Académico



Ing. Rómulo Cortez.
Tutor Industrial



Dedicado a nuestro Hijo

Angel Abraham Velásquez Gavidia

**Eres la luz de nuestras vidas y nuestra razón para ser
mejores personas todos los días.**

Te amamos

Mamá y Papá

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar le agradecemos a la Universidad Central de Venezuela por ser nuestra segunda casa durante nuestra preparación como profesionales de esta hermosa patria.

A la Prof. Carmen R. Hernández por su apoyo y su guía durante toda la realización de este trabajo. Profesora sin usted no hubiera sido posible realizar el trabajo.

Al Ing. Rómulo Cortéz, por la oportunidad de realizar este trabajo bajo su tutela en el Centro de Investigaciones Aplicadas de la C.V.G Electrificación del Canorí. A todas las personas del Centro de Investigaciones Aplicadas que contribuyeron en la realización del trabajo, especialmente al Ing. Rodrigo Rey, por su ayuda incondicional. La experiencia práctica adquirida durante la ejecución de las pruebas es única.

A los profesores Freddy Pérez y José Luis Perera, máximos colaboradores en la realización y culminación de este trabajo. Mas que *profesores* son *maestros*, cuyo ejemplo debe ser seguido por todo aquel que se considere *UCVista*.

A el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) de la UCV por el apoyo financiero otorgado a la investigación registrada con el número 081554302004, bajo la modalidad de proyecto individual.

A nuestras madres Aris Ferrer de Gavidia y Olga Amaya de Velásquez.

Aris eres una madre especial, con tu apoyo y la fortaleza que me diste estoy logrando esta meta, siempre serás mi mejor amiga, gracias mami.

Olga tu ejemplo y apoyo sirvió de base para alcanzar mis metas, siempre serás especial, gracias mamá.

A nuestros padres Igor Gavidia y Luís Velásquez.

Igor, eres el mejor padre que una hija pueda desear, mi apoyo, mi gran amigo, mi gran ejemplo, te quiero mucho papi.

Luís, quisiste siempre lo mejor para nosotros, el apoyo como padre siempre estuvo en esos momentos adversos, gracias por todos los esfuerzos, tu insistencia y gran dedicación.

A nuestros hermanos Livia Gavidia, Liliana Gavidia, Olga Velásquez y Freddy Velásquez

Queridas Livia y Liliana espero que el que yo esté cumpliendo esta meta las motive a ustedes a alcanzar también la suyas. Livia, sigue cantando en la coral y presenta al mundo tus dotes de artista. Liliana, mi pequeña Liliana, puedes ser lo que quieras en la vida, pero recuerda práctica algún deporte en la universidad porque tienes enormes cualidades que explotar. Las quiero mucho.

Querida hermana Olga: la meta que alcanzo hoy requirió de esfuerzo, sacrificio y mucha comprensión, espero que te llenes de motivación así como yo lo sigo haciendo, recuerda el conocimiento es lo único que no nos pueden quitar y la esperanza es lo último que se pierde. Dios te bendiga.

Hermano, gracias a tu empeño supe lo que era una universidad. Gracias por tu confianza.

A mi tía negra, eres especial y gracias por estar siempre pendiente de Abraham, de Angel y de mi. Que suerte es tenerte como parte de mi familia (Aris).

A nuestras amistades de la Facultad de Ingeniería: Adriana, Héctor, Joan, Luzón, Aurimar, Víctor, sin ustedes muchas asignaturas hubiesen sido más fáciles.

Joan, esperamos que estimules a cumplir la meta que hoy estamos alcanzando y deseamos que es día sea pronto, muy pronto. Eres una bella persona y un excelente amigo. Para ti y María les deseamos lo mejor del mundo.

A nuestros suegros, quienes con su ejemplo, dedicación y amor nos guiaron en los momentos más difíciles de nuestras vidas, los queremos mucho.

A mi gran familia, El Cuerpo de Bomberos Voluntarios de la Universidad Central de Venezuela, donde viví alrededor de 4 años y de verdad no se lo recomiendo a nadie. A ustedes mis grandes amigos, los integrantes de “*La Promoción 00-00*”, que éste sea la continuidad para que nuestra promoción siga dando ejemplo de nuestro lema **“DISCIPLINA ESTUDIO ABNEGACION”** (Angel).

A mi esposo, gracias por estar siempre allí y ser mi gran apoyo, eres mi mejor amigo, mi compañero. Gracias amor, por embarcarte en esta aventura de hacer una vida juntos. Te amo.

A mi esposa, la cual desconoce este agradecimiento, siempre serás el apoyo incondicional, gracias por estar siempre como amiga y como esposa. Te ama un montón, tu esposo Angel.

A nuestros grupos de estudio.

A todos aquellos amigos que de una u otra forma estuvieron pendientes y nos tendieron una mano amiga cuando fue necesario.

Gavidia F., Aris L.
Velásquez A., Angel L.

ANÁLISIS DE VIBRACIONES DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

Tutor Académico: Prof. Carmen Hernández. Tutor Industrial: Ing. Rómulo Cortéz. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2007, 101p.

Palabras Claves: Vibraciones, Transformadores.

Resumen.

Con la finalidad de incluir en la rutina diaria de mantenimiento del transformador la técnica de análisis de vibraciones, la empresa C.V.G. Electrificación del Caroní a través del Centro de Investigaciones Aplicadas, realizó pruebas en el área de medición de vibraciones en transformadores.

Durante las pruebas de medición de vibraciones se consideraron dos grandes etapas: *Recolección de la data de vibraciones*, para esta etapa, se diseñó un protocolo de pruebas donde se especifica la ubicación de los sensores, los tiempos estimados para la adquisición de datos, instalación y desinstalación de la instrumentación, entre otros requisitos. En las pruebas se emplearon dos (2) sensores tipo acelerómetros, cuya sensibilidad se encuentran en aproximadamente 10 mV/g (donde mV es la unidad de mili voltios y el valor g corresponde a la fuerza de gravedad utilizada por el fabricante del equipo, 9,81), los cuales se fueron rotando por cada cara considerada. Las señales que se obtuvieron de estos sensores se acondicionaron mediante un equipo, el cual amplifica la señal obtenida por el acelerómetro a 100 mV/g y ésta señal es registrada por un equipo, el cual almacena los datos registrados en una memoria permitiendo luego ser descargados para su posterior análisis. Terminada esta etapa, se inicio a la etapa de *procesamiento de las señales obtenidas*. Para cada transformador se obtuvieron diez (10) señales de vibraciones, cada señal cuenta con un total aproximado de ciento veinte mil puntos (120.000) en promedio, a los cuales, para mayor comprensión de los resultados, se les aplicó la Transformada Rápida de Fourier (FFT) mediante el diseño de un programa computacional. Empleando otros programas computacionales y partiendo de los registros de vibración, se construyeron gráficas que permitieron comparar las señales registradas por cada sensor y adicionalmente, se observó que, para los transformadores estudiados, las frecuencias predominantes son 120Hz, 240Hz, 360Hz, 480Hz.

Finalmente, se comparó los datos de vibración de cada equipo con los valores de vibraciones de referencia para los transformadores determinados por el Electric Power Research Institute (EPRI) y se determinó que los transformadores 1, 4 y 5 presentan valores aceptables de vibración y los transformadores 2 y 3 presenta valores de vibración no aceptables, según los valores de referencia. También, siguiendo el criterio del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), se determinó que la mayoría de los transformadores evaluados no presentan deformaciones mecánicas en la estructura del núcleo y/o del devanado; sólo en el caso del transformador 3 este criterio no es concluyente. Sin embargo estos diagnósticos son sólo probables ya que es recomendable realizar más mediciones en estos equipos.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
<i>1.1. Objetivo general</i>	5
<i>1.2. Objetivos específicos</i>	5
<i>1.3. Motivación</i>	6
<i>1.4. Alcance</i>	7
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1. Vibraciones	8
2.1.1. Movimiento armónico	8
2.1.2. Movimiento periódico	10
2.1.3. Vibraciones libres	11
2.1.3.1. Vibraciones libres con amortiguamiento viscoso	13
2.1.4. Vibraciones excitadas armónicamente	17
2.1.5. Transformada de Fourier	18
2.1.6. Técnicas de análisis de vibración	19
2.1.7. Instrumentos para la medición de vibraciones	20
2.1.8. Medición de las vibraciones	21
2.1.8.1. Selección de la medida de vibración	21
2.1.8.2. Selección del transductor de la señal de vibración	22
2.2. Transformadores	23
2.2.1. Aplicación de los transformadores	25
2.2.2. Núcleo del transformador	27
2.2.3. Devanado del transformador	29
2.2.4. Tanque o cuba del transformador	31
2.2.5. Aislamiento para transformadores	32
2.2.6. Métodos de enfriamiento para transformadores	32
2.2.7. Aceite dieléctrico	33
2.3. Vibraciones en transformadores	34
2.3.1. Transmisión de las vibraciones del núcleo y del devanado al tanque del transformador	35
2.4. Antecedentes	37
CAPITULO III: METODOLOGÍA	43
3.1. Transformadores de potencia incluidos en el estudio	43
3.2. Instrumentación	47
3.3. Descripción del procedimiento	50
3.3.1. Adquisición de los datos de vibración	51
3.3.2. Procesamiento de los datos obtenidos	54
3.4. Protocolo de pruebas para la medición del nivel de vibración de los transformadores de potencia seleccionados para ésta investigación	55

3.5. Registros de vibración obtenidos para la investigación	59
3.5.1. Registros de vibración del transformador 1	59
3.5.2. Registros de vibración del transformador 2	60
3.5.3. Registros de vibración del transformador 3	61
3.5.4. Registros de vibración del transformador 4	61
3.5.5. Registros de vibración del transformador 5	62
3.6. Resultados y análisis de resultados	63
4.6.1. Resultados del transformador 1	66
4.6.2. Resultados del transformador 2	76
4.6.3. Resultados del transformador 3	79
4.6.4. Resultados del transformador 4	82
4.6.5. Resultados del transformador 5	91
CONCLUSIONES	95
RECOMENDACIONES	97
BIBLIOGRAFÍA	99

ÍNDICE DE APÉNDICES

APÉNDICE A: TRANSFORMADOR 1. Señal en el tiempo, espectros de frecuencias, tendencia de medición, comparación por caras con valores de referencia	A-1
APÉNDICE B: TRANSFORMADOR 2. Señal en el tiempo, espectros de frecuencias, tendencia de medición, comparación por caras con valores de referencia	A-23
APÉNDICE C: TRANSFORMADOR 3. Señal en el tiempo, espectros de frecuencias, tendencia de medición, comparación por caras con valores de referencia	A-31
APÉNDICE D: TRANSFORMADOR 4. Señal en el tiempo, espectros de frecuencias, tendencia de medición, comparación por caras con valores de referencia	A-39
APÉNDICE E: TRANSFORMADOR 5. Señal en el tiempo, espectros de frecuencias, tendencia de medición, comparación por caras con valores de referencia	A-61
APÉNDICE F: Comparación entre los niveles de vibración promedios registrados para el transformador 1 y el transformador 2	A-69
APÉNDICE G: Comparación entre los niveles de vibración promedios registrados para el transformador 2 y el transformador 5	A-73

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: Representación gráfica del movimiento armónico	9
FIGURA 2: Representación gráfica del movimiento periódico	10
FIGURA 3: Representación gráfica del sistema masa-resorte. Vibraciones libres	11
FIGURA 4: Representación gráfica del sistema masa-resorte. Vibraciones libres con amortiguamiento viscoso	13
FIGURA 5: Movimientos sobre amortiguado, críticamente amortiguado y sub amortiguado.	16
FIGURA 6: Esquema de acelerómetro piezoeléctrico	20
FIGURA 7: Acelerómetro piezoeléctrico marca Isotron	21
FIGURA 8: Esquema general del transformador ideal	23
FIGURA 9: Núcleo del transformador tipo núcleo	27
FIGURA 10: Núcleo del transformador tipo acorazado	27
FIGURA 11.1: Valores de vibración aceptables para los transformadores determinados por el Electric Power Research Institute (EPRI)	39
FIGURA 11.2: Valores de vibración aceptables para los transformadores determinados por el Electric Power Research Institute (EPRI)	40
FIGURA 12: Identificación de las caras y localización de los sensores en el transformador	57
FIGURA 13: Esquema general del circuito de medición	58

ÍNDICE DE FOTOS

FOTO 1: Transformador 1	44
FOTO 2: Transformador 2	45
FOTO 3: Transformador 3	45
FOTO 4: Transformador 4	46
FOTO 5: Transformador 5	46
FOTO 6: Sensor tipo acelerómetro piezoeléctrico	47
FOTO 7: Acondicionador de señal	48
FOTO 8: Registrador de la señal de vibración	48
FOTO 9: Cable coaxial	49
FOTO 10: Fuente de alimentación	49
FOTO 11: Registrador de señal de vibración	50
FOTO 12: Instalación de los sensores	52
FOTO 13: Instalación de los equipos acondicionadores y el equipo registrados	52
FOTO 14: Registro de las vibraciones del transformador 1	53
FOTO 15: Registro de las vibraciones del transformador 3	53
FOTO 16: Desinstalación de los sensores	53

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: Señales en el tiempo y espectros de frecuencia. Cara frontal. Transformador 1 Fase A	66
GRÁFICO 2: Comparación de los valores de amplitud promedios del transformador 1 Fase A versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI)	69
GRÁFICO 3: Comparación de los valores de amplitud promedios del transformador 1 Fase B versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI)	72
GRÁFICO 4: Comparación de los valores de amplitud promedios del transformador 1 Fase C versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI)	75
GRÁFICO 5: Comparación de los valores de amplitud promedios del transformador 2 versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI)	78
GRÁFICO 6: Comparación de los valores de amplitud promedios del transformador 3 versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI)	81
GRÁFICO 7: Comparación de los valores de amplitud promedios del transformador 4 Fase A versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI)	84
GRÁFICO 8: Comparación de los valores de amplitud promedios del transformador 4 Fase B versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI)	87
GRÁFICO 9: Comparación de los valores de amplitud promedios del transformador 4 Fase C versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI)	90
GRÁFICO 10: Comparación de los valores de amplitud promedios del transformador 5 versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI)	93

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: Especificaciones del fabricante de los acelerómetros piezoeléctricos empleados durante las pruebas	47
TABLA 2: Registro de vibración del transformador 1. Fase A	59
TABLA 3: Registro de vibración del transformador 1. Fase B	60
TABLA 4: Registro de vibración del transformador 1. Fase C	60
TABLA 5: Registro de vibración del transformador 2	60
TABLA 6: Registro de vibración del transformador 3	61
TABLA 7: Registro de vibración del transformador 4 Fase A	61
TABLA 8: Registro de vibración del transformador 4 Fase B	62
TABLA 9: Registro de vibración del transformador 4 Fase C	62
TABLA 10: Registro de vibración del transformador 5	62
TABLA 11: Valores máximos de amplitud de vibración para transformadores. Electric Power Research Institute (EPRI)	64
TABLA 12: Valores de amplitud de vibración Sensor 1. Transformador 1 Fase A	67
TABLA 13: Valores de amplitud de vibración Sensor 2. Transformador 1 Fase A	67
TABLA 14: Valores de amplitud de vibración Sensor 1. Transformador 1 Fase B	70
TABLA 15: Valores de amplitud de vibración Sensor 2. Transformador 1 Fase B	70
TABLA 16: Valores de amplitud de vibración Sensor 1. Transformador 1 Fase C	73
TABLA 17: Valores de amplitud de vibración Sensor 2. Transformador 1 Fase C	73
TABLA 18: Valores de amplitud de vibración Sensor 1. Transformador 2	76
TABLA 19: Valores de amplitud de vibración Sensor 2. Transformador 2	76
TABLA 20: Valores de amplitud de vibración Sensor 1. Transformador 3	79
TABLA 21: Valores de amplitud de vibración Sensor 2. Transformador 3	79
TABLA 22: Valores de amplitud de vibración Sensor 1. Transformador 4 Fase A	82
TABLA 23: Valores de amplitud de vibración Sensor 2. Transformador 4 Fase A	82
TABLA 24: Valores de amplitud de vibración Sensor 1. Transformador 4 Fase B	85

TABLA 25: Valores de amplitud de vibración Sensor 2. Transformador 4	85
Fase B	
TABLA 26: Valores de amplitud de vibración Sensor 1. Transformador 4	88
Fase C	
TABLA 27: Valores de amplitud de vibración Sensor 2. Transformador 4	88
Fase C	
TABLA 28: Valores de amplitud de vibración Sensor 1. Transformador 5	91
TABLA 29: Valores de amplitud de vibración Sensor 2. Transformador 5	91
TABLA 30: Diagnóstico de los transformadores evaluados	94

INTRODUCCIÓN

La mecánica de las vibraciones estudia los movimientos oscilatorios de los cuerpos o sistemas y de las fuerzas asociadas con ella. Este estudio se ha convertido en algo esencial para la Ingeniería Mecánica ya que el buen funcionamiento de las máquinas está relacionado en muchos casos con su comportamiento vibratorio.

Una de las maneras de conocer el estado de una máquina es realizando la medición de vibraciones, la cual nos permita observar, analizar y diagnosticar, el nivel de vibración registrado, con el fin de determinar las medidas necesarias para corregir las causas, de ser necesario. De manera que, al estudiar los datos obtenidos, el interés principal deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de la vibración, la comparación con valores estándar, la determinación posible de las causas y sus posibles correcciones.

Una de las herramientas fundamentales con que se cuenta en la actualidad para mantenimiento de cualquier equipo, es el análisis de vibraciones, ya que las mayorías de las fallas de cualquier maquinaria están precedidas por un cambio de las vibraciones de las mismas. En equipos rotativos el análisis de vibraciones es una práctica común, pero en equipos no rotativos es un área que se encuentra en pleno desarrollo.

Los transformadores de potencia son equipos eléctricos a los cuales se les suministra un bloque de energía eléctrica a un nivel de tensión y entregan aproximadamente, el mismo bloque de energía eléctrica a otro nivel de tensión. Son equipos de gran importancia y de una alta eficiencia que requieren de una constante inspección y seguimiento, ya que prevenir una condición no adecuada de operación es sinónimo de programación de eventos permitiendo decidir el momento adecuado para actuar.

El mantenimiento preventivo y correctivo de los transformadores de potencia considera actividades orientadas al desempeño eléctrico del equipo, sin embargo, en

países como Canadá, Estados Unidos, Rusia, entre otros, se incluye el análisis de vibraciones; generalmente estas vibraciones son consecuencias de la magnetostricción y la presencia de fuerzas electrodinámicas.

La magnetostricción es un fenómeno que ocurre a nivel microscópico, éste provoca que los materiales ferromagnéticos cambien de forma al magnetizarse. Para que el campo magnético fluya a través de un material, debe existir un equilibrio entre las fuerzas magnéticas y las fuerzas eléctricas que interactúan en él, al perturbarse este equilibrio se produce una variación de las dimensiones físicas del material, causando deformaciones mecánicas y/o magnéticas. Este fenómeno genera vibraciones en máquinas eléctricas como motores y transformadores de potencia.

Las fuerzas electrodinámicas, provenientes de la magnetostricción del núcleo, producen vibraciones en el devanado del transformador de potencia; dichas fuerzas presentan componentes radiales, que genera compresión interna y expansión externa del devanado, y componentes axiales, que causa compresión vertical del mismo.

El análisis de vibración durante el mantenimiento permite ampliar el diagnóstico, ya que la variación de la condición de vibración de estos equipos está vinculada con el cambio de ciertos parámetros físicos y mecánicos del transformador. Debido a lo antes expuesto, el análisis de la condición de vibración en transformadores de potencia se emplea para diagnosticar condiciones no adecuadas sin tener que retirar de operación al equipo.

En este orden de ideas la empresa C. V. G. Electrificación del Caroní (C.V.G-EDELCA) a través del Centro de Investigaciones Aplicadas (CIAP) propone incorporar la técnica de análisis de vibraciones para el diagnóstico mecánico de los transformadores de potencia. Este trabajo se realiza el análisis de vibraciones a cinco (5) transformadores de potencia seleccionados por la empresa, cuatro transformadores ubicados en la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar” y un transformador ubicado en la Central Hidroeléctrica “Antonio José de Sucre”.

Para los equipos de transformación, seleccionados por la empresa C. V. G. Electrificación del Caroní (C.V.G-EDELCA), a ser incluidos en este estudio no se

cuenta con un historial de vibraciones; por el contrario, las mediciones de vibraciones presentadas en este trabajo son las primeras realizadas, por lo que se consideró necesario diseñar un protocolo de medición de vibraciones que permitiera recolectar los datos de vibración de los transformadores y generar diagnósticos probables de los mismos.

Para la recolección de los datos de vibración de los transformadores de potencias presentados en este trabajo, fue necesario seleccionar los instrumentos adecuados de captación de la señal de vibración, partiendo de trabajos anteriores en el área de vibraciones en transformadores. Para el análisis de los datos recolectados, se seleccionó la técnica de análisis de las transformadas Tiempo-Frecuencia de la señal de vibración con el fin de determinar las armónicas de vibración predominantes y finalmente, basados en los criterios establecidos por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y en los valores de referencia presentados por el Electric Power Research Institute (EPRI) de vibraciones máximas para transformadores, se presenta un diagnóstico probable de los equipos.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los transformadores de potencia son los equipos más importantes y esenciales del sistema eléctrico de potencia, por lo que, dentro del procedimiento de mantenimiento preventivo de estos equipos, es necesario considerar el análisis de vibraciones como una técnica de utilidad para prevenir posibles fallas; además esta técnica permite evaluar la integridad mecánica de los transformadores sin que éstos sean puestos fuera de servicio.

La empresa C.V.G. Electrificación del Caroní, a través del Centro de Investigaciones Aplicadas plantea incorporar el análisis de vibraciones de transformadores de potencia, con la finalidad de diagnosticar posibles fallas. En éste orden de ideas, el presente trabajo plantea realizar el análisis de vibraciones en dos (2) transformadores de potencia ubicados en la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar” y en un transformador de potencia ubicado en la Central Hidroeléctrica “Antonio José de Sucre”.

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Realizar el análisis de vibraciones en un transformador de potencia ubicado en la Casa de Máquinas II de la Central Hidroeléctrica “Antonio José de Sucre” y dos (2) transformadores de potencia ubicados en la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar”.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisión bibliográfica de trabajos de investigación desarrollados en el área de análisis de vibraciones en transformadores de potencia.
- Establecer un protocolo de pruebas para la adquisición de los datos de vibración en los transformadores de potencia a analizar.
- Programar y llevar a cabo pruebas en:

Transformador de potencia No	Marca	Capacidad Nominal MVA	Ubicación
1	ASEA	800	Casa de máquinas II Central Hidroeléctrica Simón Bolívar, GURI.
2	ABB	400	Casa de máquinas I Central Hidroeléctrica Simón Bolívar, GURI.
3	MITSUBISHI	2x250	Casa de máquinas II Central Hidroeléctrica Antonio José de Sucre, MACAGUA.

- Analizar los datos obtenidos durante las pruebas.
- Elaborar y presentar el informe de la investigación realizada

1.3 MOTIVACIÓN

El diagnóstico de los transformadores de potencia actualmente incluye ensayos eléctricos como: medición y análisis de descargas parciales, análisis de gases en el aceite, medición del factor de potencia, medición de la resistencia del aislamiento, entre otros. Al realizarse estos ensayos eléctricos, es necesario sacar de operación al equipo, afectando todo el sistema de generación de la central hidroeléctrica a la cual pertenece. La duración de estos ensayos se encuentra planificada para un determinado tiempo, ésta debe ser reportada para su estudio, provocando un aumento en el tiempo de parada.

El análisis de vibraciones en transformadores de potencia es un área poco explorada en Venezuela. Algunos institutos de investigación de Estados Unidos, Canadá, Rusia, entre otros, han realizado estudios que destacan la importancia del análisis del nivel de vibraciones, que junto con los ensayos eléctricos aplicados, podrían suministrar información valiosa para generar un diagnóstico integral del estado del equipo.

La C.V.G. Electrificación del Caroní es la empresa más importante en el área de generación y transmisión de energía eléctrica en nuestro país, sin embargo dentro de la normativa del mantenimiento de los transformadores de potencia bajo la tutela de esta empresa, no se considera la ejecución de un análisis de vibraciones para el diagnóstico de la integridad mecánica de estos equipos. En consecuencia, el desarrollo de este trabajo permite dar el primer paso hacia la inclusión del análisis de vibraciones como una práctica común dentro del procedimiento de mantenimiento de los equipos de transformación.

1.4 ALCANCE

El presente trabajo se encuentra restringido a las siguientes condiciones:

- a) La adquisición de los datos y análisis de vibraciones se llevará a cabo únicamente en los transformadores de potencia marca ASEA, marca ABB ubicados en la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar” (GURI) y en el transformador de potencia marca MITSUBISHI ubicado en la Casa de Maquinas II de la Central Hidroeléctrica “Antonio José de Sucre” (MACAGUA).
- b) Los equipos destinados para la adquisición y procesamiento de los datos serán los que la empresa C.V.G. EDELCA disponga según su inventario.
- c) La adquisición de los datos se llevará a cabo según la programación propuesta por la empresa C.V.G. EDELCA.
- d) Dado que no se dispone de un historial de la condición de vibración en los transformadores de potencia destinados al análisis, sólo será posible un diagnóstico “probable” del estado de los equipos.
- e) La seguridad y operación de los equipos de adquisición y procesamiento de los datos es responsabilidad absoluta de la empresa C.V.G. EDELCA.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 VIBRACIONES

Las vibraciones se definen como los cambios de posición con cierta periodicidad en trayectorias no circunferenciales de un objeto respecto a una posición de referencia. Para que un cuerpo o sistema pueda vibrar, debe poseer características potenciales y cinéticas. Se habla de cuerpo y sistema, debido a que si un cuerpo no tiene la capacidad de vibrar se puede unir a otro y formar un sistema que vibre; por ejemplo una masa y un resorte, donde la masa posee características energéticas cinéticas, y el resorte, características energéticas potenciales.

Cuando el sistema descrito se pone en movimiento por un desplazamiento o velocidad inicial, las oscilaciones disminuirán gradualmente de amplitud, a causa de las fuerzas de fricción o amortiguamiento que siempre están presentes. Estas fuerzas pueden surgir de varias fuentes, como la resistencia del aire o al fluido de trabajo, la fricción interna del material del cuerpo en vibración, o la fricción entre las superficies que deslizan, permitiendo una disipación de energía, limitando las amplitudes de oscilación.

2.1.1 Movimiento armónico

Cuando un movimiento se repite a intervalos de tiempo τ , se le conoce como periódico, el movimiento periódico más simple es el armónico y es importante de estudiar ya que tiene similitud con muchos movimientos de sistemas vibratorios, todo movimiento periódico debe satisfacer:

$$x(t) = x(t + \tau) \quad (1)$$

donde x es el desplazamiento, t el tiempo y τ es el período del movimiento.

La frecuencia del movimiento armónico “ f ”, se define como el número de ciclos por unidad de tiempo, de tal forma que se relaciona con el periodo de la forma

$$f = \frac{1}{\tau} \quad (2)$$

donde las unidades son ciclos/s ó Hertz.

Frecuentemente se presenta el movimiento armónico como la proyección sobre una línea recta de un punto “P” que se mueve en una circunferencia a velocidad constante como se muestra en la figura 1.

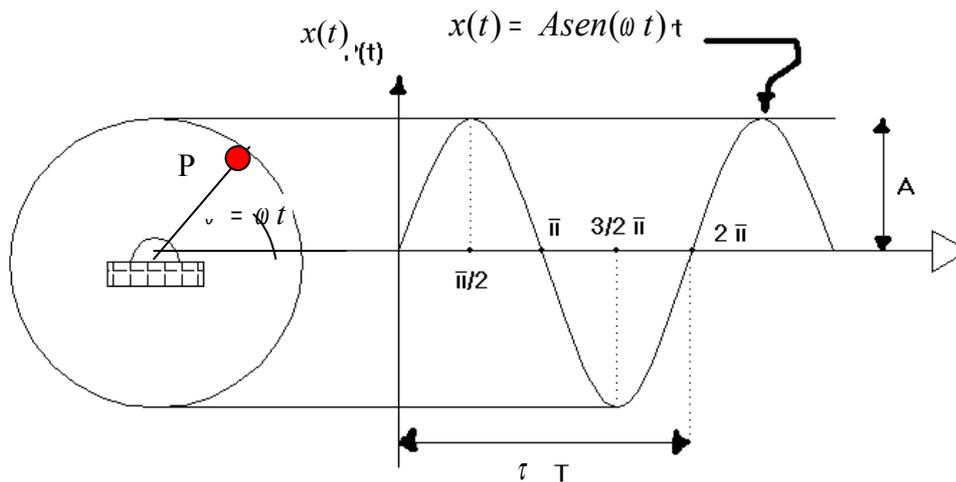


Figura 1

Representación gráfica del movimiento armónico

La cantidad ω es la frecuencia angular y se expresa en radianes/s y $A \text{sen}(\omega t)$ es la proyección sobre una línea recta del desplazamiento del punto P, como el movimiento se repite cada 2π radianes tenemos:

$$\omega = \frac{2 * \pi}{\tau} = 2 * \pi * f \quad (3)$$

2.1.2 Movimiento periódico

Es frecuente que se presenten vibraciones de diferentes frecuencias simultáneas, esto se manifiestan en oscilaciones que se repiten periódicamente como se muestra en la figura 2.

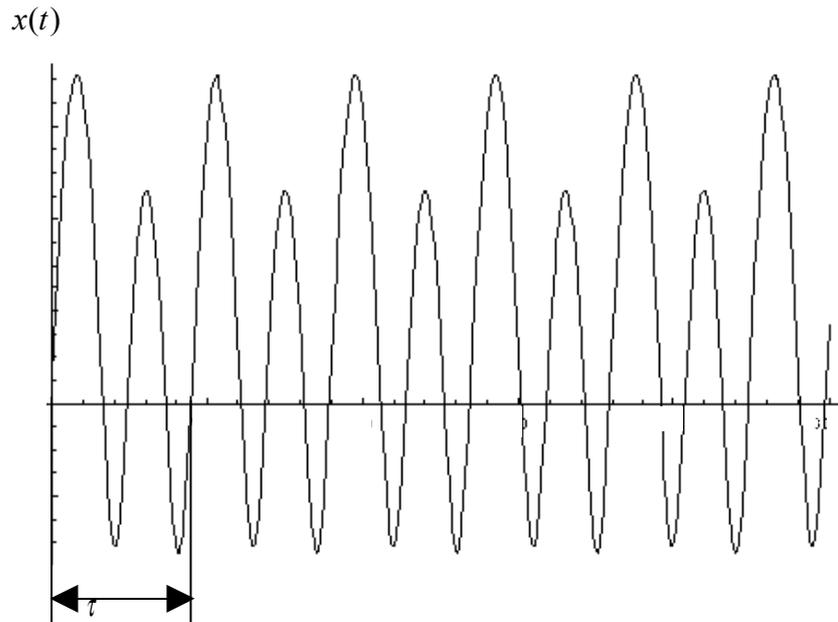


Figura 2

Representación gráfica del movimiento periódico

El matemático J. Fourier (1768-1830), demostró que cualquier movimiento periódico puede representarse por una serie de senos y cosenos relacionados armónicamente. Si $x(t)$ es una función periódica de periodo τ , entonces:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(\omega_1 t) + \dots + a_n \cos(\omega_n t) + b_1 \text{sen}(\omega_1 t) + \dots + b_n \text{sen}(\omega_n t) \quad (4)$$

donde $\omega_1 = 2 * \pi * f$, $\omega_n = n * \omega_1$, a_n y b_n son los coeficientes de Fourier.

Las series de Fourier también pueden representarse en términos de la función exponencial, sustituyendo:

$$\text{Cos}(\omega_n t) = \frac{1}{2}(e^{i\omega_n t} + e^{-i\omega_n t}) \quad (5)$$

$$\text{Sen}(\omega_n t) = -\frac{1}{2}(e^{i\omega_n t} - e^{-i\omega_n t}) \quad (6)$$

Cuando los coeficientes de la serie de Fourier se grafican contra la frecuencia ω_n , el resultado es una serie de líneas discretas que constituyen el llamado espectro de Fourier.

2.1.3 Vibraciones libres

Cualquier sistema que posea masa y elasticidad es capaz de vibrar libremente, lo que implica que ese sistema vibra sin una excitación externa permanente. El sistema de vibración más simple es el de un grado de libertad, donde existe una masa m y un resorte, de masa despreciable y rigidez k , como se muestra en la figura 3, el movimiento de este sistema queda descrito por la coordenada x .

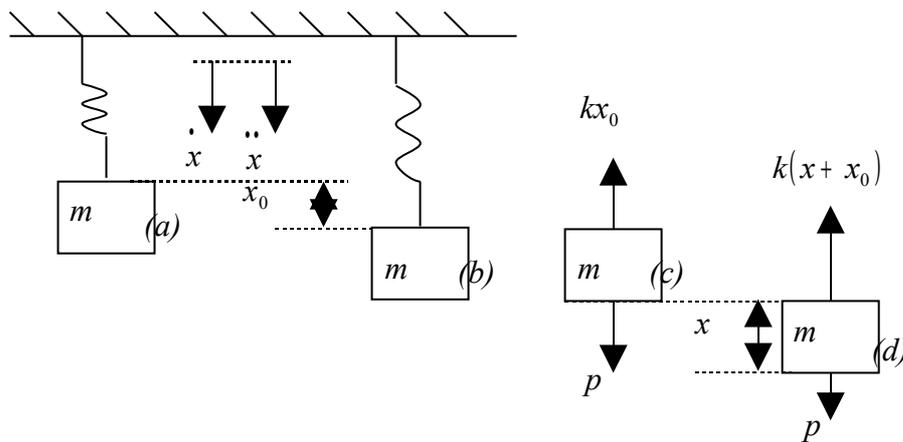


Figura 3

Representación gráfica del sistema masa-resorte

Vibraciones libres

a) Posición no esforzada b) Posición de equilibrio estático

c) Diagrama de cuerpo libre estático d) Diagrama de cuerpo libre dinámico

donde $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ es la velocidad y $\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$ es la aceleración y $p = mg$ es el peso del cuerpo, x_0 es el desplazamiento en el diagrama de equilibrio estático y x es el desplazamiento en el diagrama de equilibrio dinámico.

Al aplicar la Segunda Ley de Newton a la masa m del sistema representado en la figura 3

$$\sum F = m\ddot{x} \quad (7)$$

Del diagrama de cuerpo libre en la posición de equilibrio estático se deduce,

$$-kx_0 + p = 0 \quad (8)$$

Del diagrama de cuerpo libre dinámico se obtiene,

$$-k(x + x_0) + p = m\ddot{x} \quad (9)$$

Finalmente, sustituyendo (8) en (9) y simplificando, se deduce

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (10)$$

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 \Rightarrow \omega^2 = \frac{k}{m} \quad (11)$$

La ecuación (11) es una ecuación diferencial homogénea de 2^{do} orden, donde ω es la frecuencia natural y la solución general de esta ecuación es de la forma:

$$x = a \operatorname{sen}(\omega t) + b \operatorname{cos}(\omega t) \quad (12)$$

En la cual, a y b son constantes arbitrarias y se obtienen de acuerdo a las condiciones iniciales del sistema estudiado.

2.1.3.1 Vibraciones Libres con amortiguamiento viscoso:

Cuando se excita un sistema lineal con un grado de libertad, su respuesta dependerá del tipo de excitación y de amortiguación que esté presente, aunque la descripción real de la fuerza de amortiguamiento es difícil, se pueden usar modelos ideales, que a menudo permiten predecir una respuesta satisfactoria. Entre estos modelos, la fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad y esto permite que el tratamiento matemático más simple. Aplicando la Segunda Ley de Newton a la masa del sistema:

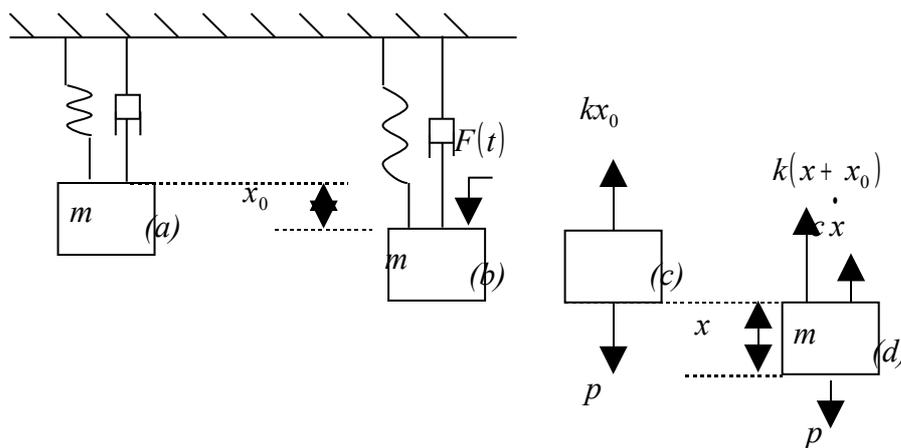


Figura 4

Representación gráfica del sistema masa-resorte

Vibraciones libres con amortiguamiento viscoso

a) Posición no esforzada b) Posición de equilibrio estático

c) Diagrama de cuerpo libre estático d) Diagrama de cuerpo libre dinámico

donde las variables tienen el mismo significado de la figura 3 y $F(t)$ es una fuerza excitadora.

Del diagrama de cuerpo libre en la posición de equilibrio se obtiene

$$-kx_0 + p = 0 \quad (13)$$

Del diagrama de cuerpo libre dinámico se obtiene

$$-k(x + x_0) - c\dot{x} + w - F(t) = m\ddot{x} \quad (14)$$

con $c\dot{x}$ igual a la fuerza de amortiguamiento y c es la constante de proporcionalidad de la fuerza de amortiguamiento.

Sustituyendo (13) en (14) y simplificando, nos queda una ecuación diferencial homogénea de 2^{do} orden.

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \omega^2 x = F(t) \quad (15)$$

La ecuación (15) posee dos soluciones, la primera $F(t)=0$ la cual corresponde físicamente a la vibración libre amortiguada, la segunda $F(t)\neq 0$, que nos permite obtener la solución particular, que es independiente de la solución homogénea. Para $F(t)=0$, la solución general de esta ecuación homogénea es de la forma:

$$x = e^{st} \quad (16)$$

donde s es una constante, al derivar la solución dos veces y sustituir en la ecuación (15), se obtiene

$$\left(s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m} \right) \frac{e^{st}}{m} = 0 \quad (17)$$

$$\left(s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m} \right) = 0 \quad (18)$$

La ecuación (17) se satisface para todos los valores de t , la ecuación (18) es la ecuación característica y tiene dos raíces:

$$s_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (19)$$

con el subíndice 1 para la solución con el signo positivo (+) y el subíndice 2 para la solución con signo negativo (-).

Luego la solución general está dada por:

$$x = Ae^{s_1 t} + Be^{s_2 t} \quad (20)$$

Donde A y B son constantes que deben ser evaluadas por medio de las condiciones iniciales del sistema a estudiar. Para la ecuación (19), si el término

$\left(\frac{c}{2m}\right)^2 > \frac{k}{m}$, los exponentes de la ecuación (20) son reales y no existe oscilación posible, este caso se conoce como *sistema sobre-amortiguado*; si el término

$\left(\frac{c}{2m}\right)^2 < \frac{k}{m}$, los exponentes de la ecuación (20) son imaginarios, existe oscilación y este caso se conoce como *sistema sub-amortiguado*; y cuando el término

$\left(\frac{c}{2m}\right)^2 = \frac{k}{m}$ se conoce como *sistema críticamente amortiguado*, para este caso la

constante c se le denomina coeficiente de amortiguamiento crítico " c_c ", se determina mediante la expresión

$$c_c = 2\sqrt{km} = 2m\omega \quad (21)$$

Es conveniente expresar el valor de cualquier amortiguamiento en función del amortiguamiento crítico empleando una razón adimensional. Para los tres

casos descritos anteriormente definiremos la relación adimensional $\xi = \frac{c}{c_c}$, donde ξ es la razón de amortiguamiento y varía de acuerdo a las raíces de la ecuación característica. Los tres casos dependen si ξ es mayor que, menor que o igual a uno:

Si $c=c_c$ ó $\xi =1$, el sistema retorna a su posición inicial de equilibrio sin oscilar, esto se cumple para los sistemas críticamente amortiguados o sistemas con amortiguamiento crítico.

Si $c>c_c$ ó $\xi >1$, el sistema no oscila pero retorna a su posición de equilibrio lentamente, esta condición es característica de los sistemas sobre-amortiguados.

Si $c<c_c$ ó $\xi <1$, el sistema oscila alrededor de la posición de equilibrio con una amplitud que decrece progresivamente, lo que es característica propia de los sistemas sub-amortiguados.

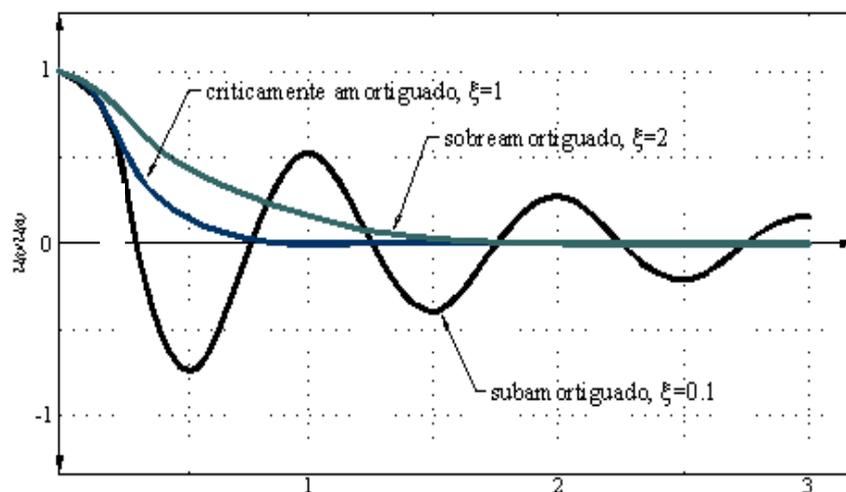


Figura 5

Movimientos sobre amortiguado, críticamente amortiguado y sub amortiguado

Para determinar la cantidad de amortiguamiento presente en un sistema, puede medirse la tasa de caída de las oscilaciones libres, a mayor tasa de caída,

mayor es el amortiguamiento. El decremento logarítmico se define como el logaritmo natural de la razón de dos amplitudes sucesivas cualesquiera y se denota con el símbolo δ y su expresión es:

$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} = \frac{1}{n} \operatorname{Ln} \left(\frac{x_i}{x_n} \right) \quad (22)$$

donde n es el número de crestas o valles seleccionadas para un cierto estudio, x_i y x_n son la magnitud de la amplitud de la cresta inicial y final respectivamente y ξ la razón de amortiguamiento.

2.1.4 Vibraciones excitadas armónicamente

Cuando una fuerza perturbadora armónica $f_o \operatorname{sen}(\alpha t)$ actúa sobre un sistema masa-resorte de un grado de libertad como el descrito en la figura 4, la ecuación diferencial del sistema queda de la siguiente forma:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + \omega^2 x = f_o \operatorname{sen}(\alpha t) \quad (23)$$

La vibración resultante constará de dos partes, una vibración libre y otra vibración forzada. La solución de las vibraciones libres se determina de la misma forma que la descrita para las vibraciones libres amortiguadas. Las vibraciones forzadas tienen como solución:

$$x = A \operatorname{sen}(\alpha t - \phi) \quad (24)$$

$$A = \frac{f_o}{k \sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad (25)$$

$$\operatorname{Tan}(\phi) = \frac{2\xi r}{1-r^2} \quad (26)$$

Donde A es la deformación de frecuencia cero o deformación estática que resultaría si se aplicara una fuerza fija de magnitud f_o al resorte de rigidez k , α es la frecuencia de la fuerza, ϕ es la fase de desplazamiento con respecto a la fuerza

excitatriz, r es la relación de frecuencias $r = \frac{\omega}{\omega_0}$, el término $\frac{f_0}{k\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}}$ se debe a las condiciones dinámicas y se le conoce como factor de amplificación.

Las fuentes comunes de excitación armónica son el desbalance en máquinas rotatorias, fuerzas producidas por máquinas reciprocantes, el movimiento de la máquina misma y otras fuerzas de excitación externa, como el caso de las generadas por vibraciones del núcleo y de los devanados de los transformadores que se abordan en este trabajo. Estas fuerzas de excitación pueden perturbar la operación del equipo o, perturbar la seguridad de la estructura si se desarrollan grandes amplitudes de vibración.

2.1.5 Transformada de Fourier

Las series de Fourier permiten representar una función periódica como una suma de senos y/o cosenos para determinar el espectro de frecuencia de la serie. La transformada de Fourier permite obtener el espectro de frecuencia a funciones que no son periódicas, suponiendo que una función no periódica es periódica con un período infinito.

Charles, A y Matthew, S (2002), definen que:

“La Transformada de Fourier es una transformación integral de una función del dominio del tiempo al dominio de frecuencias, aún cuando la función no sea periódica”(p800).

En el procesamiento de señales digitales la ecuación que define a la transformada de Fourier $X(f)$ es:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (27)$$

donde t representa el tiempo, f representa los valores ordinarios de frecuencia y $x(t)$ es la función continua.

Muchas veces es conveniente escribir la ecuación de la Transformada de Fourier en términos de la frecuencia angular $\omega = 2\pi f$, obteniéndose

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (28)$$

2.1.6 Técnicas de análisis de vibración

El objetivo del análisis de vibraciones es poder extraer el máximo de información relevante que ella posee, con el fin de determinar la condición mecánica de un equipo o máquina. Para esto existen diferentes técnicas de análisis tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, las cuales tienen sus propias ventajas para algunas aplicaciones en particular.

La transformada discreta de Fourier es una herramienta fundamental en el estudio y tratamiento de señales digitales. Su implementación computacional, conocida como el algoritmo de la transformada rápida de Fourier o algoritmo FFT (acrónimo del inglés Fast Fourier Transform) es muy empleado en la discretización y reconstrucción de señales.

Sean los N números complejos x_0, \dots, x_{N-1} , la transformada discreta de Fourier (X_k) o también conocida como la transformada finita de Fourier, se define mediante la siguiente ecuación:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N}kn} \quad (29)$$
$$k = 0, \dots, N-1$$

donde e es la base del logaritmo natural, i es la unidad imaginaria ($i^2=-1$) y π es el número 3,14159.

Evaluando esta suma directamente se requiere que se realicen N^2 operaciones complejas, sin embargo empleando la FFT solo es necesario realizar $N \log_2 N$ operaciones.

El análisis basado en los cálculos de FFT requiere que la frecuencia de muestreo o adquisición de los datos se realicen según el criterio de Nyquist, según el cual la frecuencia de muestreo debe ser como mínimo dos veces la máxima componente frecuencial que contiene la señal a muestrear.

2.1.7 Instrumentos para la medición de vibraciones

Los acelerómetros son dispositivos electrónicos para la determinación del valor de la aceleración en uno o varios ejes de coordenadas de un cuerpo o sistema. Una de sus características es el número de factores g que puede medir, los acelerómetros más empleados son los tipos piezoeléctricos.

El acelerómetro piezoeléctrico: es considerado como el transductor estándar para medición de vibración en máquinas, está compuesto por una masa sísmica, la cual está sujeta a la base con un perno axial, que se apoya en un resorte circular. El elemento piezoeléctrico (elemento de cristal) está ajustado entre la base y la masa. Cuando este elemento está sujeto a una fuerza, se genera una carga eléctrica entre sus superficies. El rango de frecuencias del acelerómetro es muy ancho y se extiende desde frecuencias muy bajas en algunas unidades hasta varias decenas de kHz. La respuesta de alta frecuencia está limitada por la resonancia de la masa sísmica, junto con la elasticidad del piezo elemento. Esa resonancia produce un pico importante en la respuesta de la frecuencia natural del transductor, y eso se sitúa normalmente alrededor de 30 kHz para los acelerómetros que se usan normalmente.

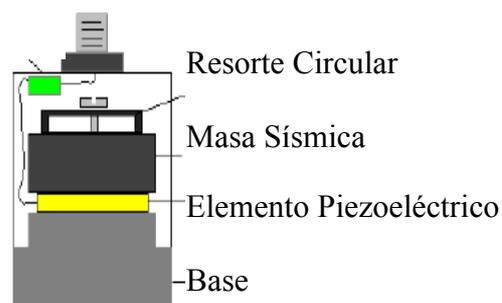


Figura 6

Esquema de un acelerómetro piezoeléctrico

Cuando se coloca un acelerómetro es importante que la ruta de vibración desde la fuente hacia el acelerómetro sea la más corta posible.



Figura 7

Acelerómetro piezoeléctrico

Marca Isotron

2.1.8 Medición de las Vibraciones

El objetivo principal de la medición de las vibraciones que se presentan en una máquina, es implementar un programa de mantenimiento preventivo para dicho equipo y para que éste programa sea eficiente en la prevención de posibles fallas, es necesario determinar ciertas condiciones como: cuál parámetro de vibración se debe medir, cuál debe ser el instrumento para medir ese parámetro, en dónde se debe medir, qué medidas se deben tomar y cómo interpretar las medidas obtenidas.

2.1.8.1 Selección de la medida de vibración:

El desplazamiento, la velocidad y la aceleración son parámetros que se emplean para cuantificar las vibraciones. La medida se selecciona basándose en las frecuencias de vibración presentes en la máquina, el tipo de análisis a ser efectuado y la información que se desea buscar.

- *Desplazamiento:* Es el mejor parámetro para bajas frecuencias donde la velocidad y la aceleración son extremadamente bajas.

- *Velocidad:* Es el parámetro generalmente usado para análisis de las vibraciones de las máquinas. Ésta relacionada con la fatiga de los componentes de un equipo y una medida global de la velocidad es la más adecuada para detectar fallas en las máquinas que ocurren a bajas, medias y altas frecuencias.
- *Aceleración:* Es el parámetro que permite determinar las posibles fallas de un equipo que ocurren a altas frecuencias. Sin embargo, hoy en día es la más utilizada debido a que según el sensor puede obtenerse mediante integración de la señal los parámetros de velocidad y desplazamiento.

2.1.8.2 Selección del transductor de la señal de vibración:

Dependiendo del parámetro a medir seleccionado, se debe seleccionar el transductor o sensor apropiado. Sería ideal que el transductor proporcione directamente la medida seleccionada (desplazamiento, velocidad o aceleración), pero las limitaciones del transductor no siempre permiten una medida directa de vibración en la medida seleccionada. La selección del transductor está basada en la sensibilidad, el tamaño requerido, la medida seleccionada, la frecuencia de respuesta, el diseño y la velocidad de la máquina, en el caso de que esta velocidad se encuentre presente. La respuesta de cualquier instrumento incluyendo el transductor determina la calidad de respuesta frente a un estímulo (voltaje o vibración) a una frecuencia dada. Entre los tipos de transductores se encuentran:

- *Transductores de proximidad o de no contacto:* Con estos transductores se obtiene una señal eléctrica que cambia proporcionalmente al movimiento.
- *Transductores de velocidad:* La señal eléctrica obtenida mediante estos sensores corresponde directamente a la velocidad de la vibración.
- *Acelerómetros:* En general, son los sensores más empleados debido a que la señal obtenida con ellos puede ser integrada una vez y obtener la velocidad o integradas dos veces y obtener el desplazamiento.

2.2 TRANSFORMADORES

El transformador es un dispositivo simple, confiable y eficiente para cambiar energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía eléctrica alterna de otro nivel de tensión, por medio de la acción de un campo magnético. Este dispositivo electromagnético es capaz de aumentar o disminuir el voltaje y la intensidad de una corriente alterna de forma tal que su producto permanezca constante, la potencia eléctrica que se entrega a la entrada de un transformador idealmente debe ser igual a la que se obtiene a la salida del mismo manteniendo la frecuencia.

En su forma más simple, los transformadores se encuentran constituidos por dos o más bobinas o devanados de alambre aisladas entre sí, generalmente, y devanadas alrededor de un mismo núcleo de material ferromagnético, como se muestra en la figura 8.

El propósito del núcleo común es proporcionar un medio por donde fluya el campo magnético y que pase a través de todas las bobinas presentes. La bobina de la izquierda se conecta a una fuente de potencia de corriente alterna, posee un número de vueltas (N_p) y se le conoce como devanado primario. La bobina de la derecha, compuesta por un número de vueltas (N_s) y conectada a una carga, se le denomina devanado secundario, si existe un tercer arrollamiento se le nombra como devanado terciario.

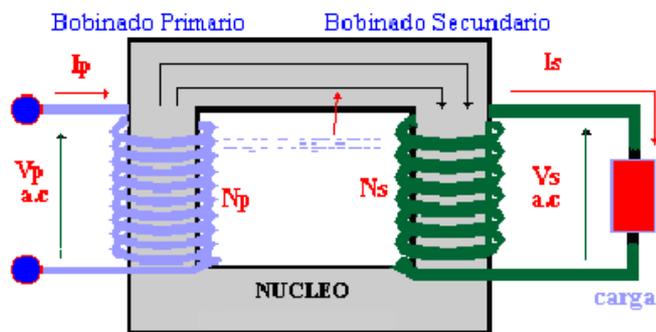


Figura 8

Esquema general del transformador ideal

Estos equipos eléctricos basan su funcionamiento en el principio de inducción electromagnética o Ley de Faraday. De manera sencilla, este principio enuncia que si se coloca un conductor eléctrico en forma de circuito en una región en la que hay un campo magnético y el flujo (ϕ) de dicho campo a través del circuito varía con el tiempo, se puede producir una corriente

$$V_{ind} = - \frac{d\phi}{dt} \quad (30)$$

Debido a esto, cuando se aplica una fuerza electromotriz alterna en el devanado primario, las variaciones de intensidad y sentido de la corriente alterna crearán un campo magnético variable dependiendo de la frecuencia de la corriente. Este campo magnético variable originará, por inducción, la aparición de una fuerza electromotriz en los extremos del devanado secundario.

Sean ϕ_s y ϕ_p los flujos del campo magnético a través de cada espira del primario y del secundario, respectivamente y N_s el número total de espiras de la bobina del secundario. Si la corriente en el primario (I_p) varía con el tiempo, produce en el secundario una fuerza electromotriz inducida V_s .

$$V_s = - \frac{d\phi_s}{dt} = - \frac{d(N_s\phi)}{dt} = - N_s \frac{d\phi}{dt} \quad (31)$$

Al cambiar los papeles de modo que el secundario pase a ser primario y viceversa

$$V_p = - \frac{d\phi_p}{dt} = - \frac{d(N_p\phi)}{dt} = - N_p \frac{d\phi}{dt} \quad (32)$$

Donde, N_p es el número de espiras de la bobina del primario.

Al dividir las dos expresiones antes expuestas se obtiene la relación de transformación para un transformador ideal es:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (33)$$

donde, V_p , V_s y N_p , N_s , son las tensiones y el número de espiras del devanado del primario y el secundario, respectivamente.

2.2.1 Aplicación de los transformadores

En los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica por corriente alterna se ha hecho casi universal el uso de los transformadores, ya que estos hacen posible el funcionamiento de las diferentes partes del sistema a sus tensiones más adecuadas. Sin la simplicidad, manejabilidad y gran rendimiento del transformador hubiera sido imposible el enorme desarrollo de los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica.

Los transformadores utilizados en los sistemas de potencia suelen funcionar con una tensión y una frecuencia constante, en su diseño tiene mucha importancia un buen rendimiento. Estos equipos, en general, poseen eficiencias de potencias que varían entre el 90% y el 99%.

Los transformadores se emplean en la transmisión de energía eléctrica a grandes distancias, elevan la tensión del devanado primario en el devanado secundario. Al poder efectuarse la transmisión a altas tensiones y pequeñas intensidades de corriente, se garantiza que el producto de la tensión por la intensidad, es decir la potencia eléctrica se mantiene relativamente constante, incluyendo pequeñas pérdidas. Cuando la tensión del devanado secundario es mayor que la tensión del devanado primario, el transformador es conocido como elevador.

En la distribución de energía eléctrica, se requiere que la tensión en el devanado secundario sea menor que la tensión en el devanado primario; a los transformadores que logran esta particularidad se les conoce como reductores. Al disminuir la tensión del primario en el secundario, permite que la intensidad de

corriente en el devanado secundario aumente, característica necesaria para que la energía eléctrica sea empleada para la vida diaria del hombre.

En sistemas de potencia y para fines especiales se emplean transformadores en instrumentos de medida y relés de mando. Los transformadores para instrumentos se conocen como transformadores de potencial o transformadores de intensidad, según si su misión es medir tensiones o intensidades de corriente.

En el campo de las comunicaciones eléctricas, también es indispensable el uso del transformador. Estos suelen funcionar a tensiones y frecuencias muy variables y deben inducir las menores diferencias entre las formas de onda de las tensiones e intensidades de corrientes de los lados del devanado primario y del devanado secundario.

Los transformadores empleados en circuitos de comunicación, suelen clasificarse de acuerdo con el dominio de frecuencias en que deben utilizarse en transformadores de radiofrecuencias, frecuencias intermedias y audiofrecuencias. Además de sus usos en sistemas de potencia y de comunicación, los transformadores se emplean en muchas aplicaciones domésticas y especiales, como en timbres eléctricos, circuitos termostáticos, tubos luminosos, cercas eléctricas, entre otros.

2.2.2 Núcleo del transformador

Los dos tipos fundamentales de estructura del transformador son el tipo núcleo, donde dos grupos de devanados abrazan al núcleo único, como se muestra en la figura 9 y el tipo acorazado, en el cual el flujo que atraviesa a un único grupo de devanados está compuesto por dos componentes existentes en circuitos magnéticos en paralelo, según se indica en la figura 10

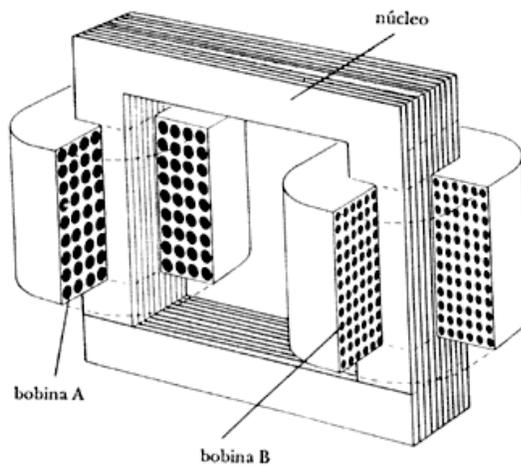


Figura 9

Núcleo del transformador tipo Núcleo

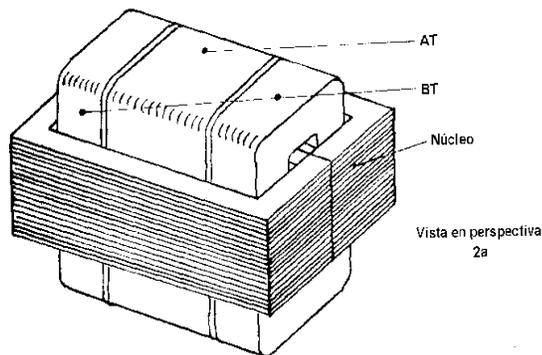


Figura 10

Núcleo del transformador tipo acorazado

Existen diferentes núcleos tipo columna, que están caracterizados por la posición relativa de las columnas, los cuales se mencionan a continuación:

a) Núcleo monofásico

Tienen dos columnas unidas en las partes inferior y superior por medio de un yugo, en algunos casos en cada una de estas columnas se encuentran incrustadas la mitad del devanado primario y la mitad del devanado secundario.

b) Núcleo trifásico

En general, se tienen tres columnas, dispuestas sobre el mismo plano unidas en sus partes inferior y superior por medio de yugos. Sobre cada columna se incrustan los devanados primario y secundario de una fase.

Los núcleos de transformadores, generalmente se construyen de láminas de acero con unos cuantos milímetros de espesor y un contenido de silicio entre 3% y 4%, puesto que el material proporciona pequeñas pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault, gran permeabilidad a inducciones magnéticas relativamente elevadas y costos aceptables. En transformadores pequeños la capa de óxido que se forma entre las láminas suele ser un aislante suficiente para evitar las corrientes de Foucault, pero en núcleos más grandes las láminas se barnizan o revisten de una capa delgada de vidrio adhesivo al acero.

En la actualidad, la tecnología de fabricación del transformador ha permitido construir núcleos donde el flujo magnético es casi paralelo a la dirección de la laminación del acero en casi todos los puntos, de tal manera que se reduce el trabajo de ensamblado.

2.2.3 Devanado del Transformador

Los devanados suelen consistir en bobinas enrolladas y cubierta de cinta aislante, tratadas al vacío, impregnadas de barniz aislante y cocidas. Los devanados de los transformadores pueden clasificarse en devanados de baja tensión y devanados de alta tensión.

En transformadores pequeños para baja tensión se emplea hilo redondo, pero para transformadores grandes los conductores suelen ser de sección rectangular. Cuando la sección de un conductor es grande o la frecuencia es alta, éste presenta gran resistencia a la conducción de la corriente alterna, en consecuencia, los conductores grandes se dividen en hebras o cabos ligeramente aislados entre ellos y traspuestos adecuadamente en el devanado. Si se transponen cabos de igual tamaño de manera que por cada uno circule el mismo flujo total, la corriente total se divide por igual entre los cabos y se reducen a un mínimo las pérdidas.

En transformadores de pequeñas potencias, se suelen construir de una sola espiral de alambre rectangular aislado. El conductor tiene, generalmente, diámetros no superiores a 3.0 ó 3.5mm. El aislamiento suele ser de papel o algodón. Raramente, son esmaltados en el caso que el transformador no es enfriado por aceite.

Cuando la diferencia entre las tensiones primaria y secundaria es notable, los criterios de construcción son diferentes para transformadores de pequeñas potencias. Para transformadores de mediana y gran potencia, se usa una placa de cobre aislado, este aislamiento por lo general es de papel. También, en el caso de que la corriente que transporte el devanado sea elevada ya sea por facilidad de manipulación en la construcción o para reducir las corrientes parásitas, se puede construir el devanado con más de una placa en paralelo.

Los devanados de alta tensión tienen muchas espiras y las corrientes que circulan a través de ellos es relativamente baja, por lo que son de conductor de cobre de sección circular con diámetro de 2.5 ó 3.0mm.

Al momento de colocar los devanados dentro del transformador se debe considerar dos exigencias que son contrastantes entre sí, del aislamiento y la menor

dispersión del flujo. El aislamiento requiere de la mayor separación entre los devanados. Para evitar una gran dispersión del flujo es requisito que el primario se encuentre lo más cerca posible del secundario. En la práctica, se alcanza una solución conveniente del problema de la disposición de los devanados dentro de los siguientes tipos: *concéntricos*, donde cada uno de los devanados están distribuidos a lo largo de toda la columna, el devanado de tensión más baja se encuentra más cerca al núcleo y del devanado de mayor tensión mediante tubos aislantes; *concéntricos dobles*, donde el devanado de menor tensión se divide en dos mitades dispuestas respectivamente al interior y al exterior uno de otro; y *alternados*, donde los devanados se encuentran subdivididos cada uno en un número de bobinas que están dispuestas en columnas en forma alternada.

Las consideraciones que orientan desde el punto de vista de diseño, la disposición de los devanados, son aquellas referentes al enfriamiento, el aislamiento, a la reactancia de dispersión y a los esfuerzos mecánicos. Con respecto al aislamiento, la solución conveniente la representa el tipo concéntrico debido a que solo requiere una capa de aislamiento entre ambos devanados, por lo que en transformadores de tensiones elevadas esta disposición es ventajosa. El llamado concéntrico doble tiene la ventaja de que da lugar a una reactancia de dispersión con un valor de alrededor la mitad de aquel relativo al concéntrico simple. En cambio, el tipo alternado permite variar tales reactancias, repartiendo en forma distinta las posiciones de las bobinas de los devanados. Para los esfuerzos mecánicos son recomendables las disposiciones del tipo alternado, debido a que permite que el transformador los soporte mejor.

Sin importar el tipo de devanado, la construcción de las bobinas se hace generalmente, sobre moldes de madera o metálicos montados sobre bobinadoras, dependiendo principalmente del tamaño de la bobina a construir.

2.2.4 Tanque o cuba del transformador

Los transformadores que emplee la refrigeración por líquido deben tener sus núcleos y devanados necesariamente confinados en tanques que eviten la pérdida del refrigerante, los cuales están contruidos de acero soldado y pueden tener forma redonda, ovalada, elíptica o rectangular. Deben tener una holgura para permitir la delimitación y contracción térmicas del aceite. En los transformadores de distribución, es común utilizar un tanque estanco al aire con una cámara de aire suficiente entre la tapa y el aceite para permitir que éste comprima o dilate el aire encerrado. En algunos transformadores grandes, la cámara sobre el aceite se llena de nitrógeno mantenido a presión ligeramente superior a la atmosférica por medio de una válvula automática accionada por la presión, que admite nitrógeno seco al cilindro que lo contiene comprimido. También existe una válvula de seguridad.

Los tanques de los transformadores son conocidos como la cuba del transformador y algunas veces puede tener en el fondo orificios para vaciarlos, al momento de realizar un cambio del aceite dieléctrico cuando éste se ensucie, tenga demasiada humedad o su nivel de acidez sea elevado y haya perdido sus propiedades dialécticas.

El tanque o cuba es prácticamente toda la superficie del transformador ya que a él se adhieren la mayoría de los accesorios, como sistemas de enfriamiento, indicadores de nivel del aceite, medidores de temperaturas, dispositivos de protección, entre otros. Adicionalmente, el tanque posee tubos por exterior, por interior y superior del mismo con el fin de que cuando el aceite se expanda fluya a través de estos y al estar estos tubos en contacto directo con el medio ambiente el aire enfriará el aceite circulante y permitiendo que éste fluya más fácilmente hasta el fondo del tanque.

En transformadores grandes se suele adicionar un tanque llamado conservador del aceite. Este tanque adicionado, permite que el transformador respire, debido a que el aceite inunda completamente la cuba y parte del tanque conservador. En la parte superior de éste existe una abertura de respiración a la atmósfera, el cual está

equipado de un filtro químico que elimina la humedad y el oxígeno del aire que penetra en el conservador. Éste está equipado con un sumidero para la ocasional extracción de barro y humedad.

2.2.5 Aislamiento para transformadores

Las propiedades principales que determinan el uso de un material aislante dentro de la construcción de un transformador son la resistividad, la permisividad, la histéresis dieléctrica, las propiedades mecánicas y su capacidad de soportar la acción de agentes químicos y el calor.

Uno de los factores que más afectan la vida de los aislamientos, es la temperatura de operación de los transformadores. Durante su operación estas pérdidas están localizadas en los siguientes elementos principales: en el *núcleo*, pérdidas producidas por efectos de histéresis y las corrientes circulantes en las laminaciones, son independientes de la inducción y solo influye el voltaje de operación; y en los *devanados*, aquí las pérdidas se deben principalmente al efecto Joule y en menor medida por corrientes de Foucault, estas pérdidas dependen de la carga en el transformador.

Todas las pérdidas producen calentamientos en los transformadores y se debe eliminar este calentamiento a valores que no resulten peligrosos para los aislamientos, por medio de la aplicación de distintos sistemas de refrigeración.

2.2.6 Métodos de enfriamiento para transformadores

La selección del método de enfriamiento de un transformador es muy importante, ya que la disipación de calor influye en su tiempo de vida y en su capacidad de carga, así como en su área de instalación y costo.

Como ya se mencionó anteriormente, el calor producido por las pérdidas en los transformadores afectan la vida de los aislantes, por esta razón es importante que el calor producido se disipe de manera controlada manteniéndose dentro de los límites tolerables por los distintos aislamientos

2.2.7 Aceite dieléctrico

Los transformadores están enfriados por aire o por aceite. El aceite se considera uno de los mejores medios de refrigeración que tiene buenas propiedades dieléctricas y cumple con las siguientes funciones: actúa como aislante eléctrico, actúa como refrigerante y protege a los aislamientos sólidos contra la humedad y el aire.

A pesar que el aceite dieléctrico no es una característica física del transformador, el estado del mismo afecta el funcionamiento del equipo. Muchos de los aumentos elevados de la temperatura del transformador se deben a que el aceite no se encuentra en buenas condiciones fisicoquímicas.

Generalmente, las deficiencias en el sistema de refrigeración del transformador son causadas por deterioro del estado del aceite. Con el tiempo el aceite pierde su fluidéz de tal forma que comienzan a formarse lodos que se depositan en las paredes de los elementos energizados del equipo, creando una resistencia adicional que no permite la disipación de calor e impidiendo que el aceite cumpla su función de refrigerar.

2.3 VIBRACIONES EN TRANSFORMADORES

La vibración de un transformador se origina en el núcleo y en los devanados o bobinas conductoras de corriente. Cuando los transformadores se encuentran en operación el núcleo vibra de manera compleja, debido a la acción de la magnetostricción y la presencia de fuerzas electrodinámicas. No se sabe cual es la contribución de cada factor en la vibración total del equipo; sin embargo se conoce que la magnetostricción produce vibraciones en el núcleo cuando éste se encuentre energizado, aunque el transformador no se encuentre conectado a una carga, y las fuerzas electrodinámicas producen vibraciones en los devanados de los equipos.

Cuando un material se magnetiza, sus dimensiones cambian ligeramente y éste se expande o contrae dependiendo de la polaridad del flujo magnético, esta deformación elástica reversible inducida magnéticamente se denomina magnetostricción. El origen de la magnetostricción está relacionado con el cambio en la longitud de enlace entre átomos y es una propiedad de los materiales magnéticos, la cual permite el cambio de forma al encontrarse en presencia de un campo magnético. Esto causa una vibración a la frecuencia de las fluctuaciones del campo y es parte de la causa que se encuentren vibraciones de 100Hz ó 120Hz en máquinas eléctricas como motores y transformadores. En el núcleo de los transformadores este cambio causa vibraciones longitudinales en el mismo plano y fuera del plano de laminación del material del núcleo, lo que genera como resultado desplazamientos entre los miembros que constituyen el núcleo. Adicionalmente, la magnetostricción es sensible a los esfuerzos mecánicos.

Las fuerzas electrodinámicas son fuerzas de atracción o repulsión que aparecen entre conductores por efecto del campo magnético creado a su alrededor por la corriente que los recorre. Estas fuerzas son directamente proporcionales al producto de esas corrientes e inversamente proporcionales a la distancia entre conductores. Dichas fuerzas, son una de las causas de que los transformadores, vibren

al doble de la frecuencia de operación del equipo. (120Hz si la frecuencia de operación del equipo es 60Hz).

Con los métodos modernos de diseño del núcleo del transformador es probable reducir el efecto de vibración producto de la magnetostricción y de las fuerzas electrodinámicas presentes, excepto en los puntos donde es interrumpido el flujo magnético; sin embargo, reducir las vibraciones, mediante la aplicación de materiales que presenten cero deformación por magnetización para la construcción del núcleo no garantiza un ataque concertado, debido a que en la práctica se exige ya tantos requisitos a los materiales del núcleo, como por ejemplo: baja histéresis, alta resistividad, ductilidad al laminarse en hojas delgadas, entre otros, que adicionar uno más generaría que la construcción del mismo sea muy difícil.

2.3.1 Transmisión de las vibraciones del núcleo y del devanado al tanque del transformador

Las vibraciones del núcleo y del devanado son transmitidas al tanque del transformador mediante los soportes del núcleo y del aceite. La transmisión a través de los soportes puede ser reducida sustancialmente, empleando soportes antivibratorios; en algunos casos, es posible que el núcleo y el devanado no se encuentren rígidamente unidos al tanque en ningún punto.

Siendo el aceite relativamente incompresible, la porción de vibración que se transmite hacia el tanque a través de él es apreciablemente y probablemente mayor que la porción que se transmite por los soportes. Si se asume que toda la energía es transmitida mediante los soportes y en consecuencia, se instalan soportes antivibratorios de alta eficiencia, la energía transmitida al tanque medida como ruido solo se reduce en 3 dB. Para lograr una reducción mayor en el nivel de ruido es esencial que la energía de vibración transmitida se atenué en todas las fuentes de emisión.

El tanque modifica la forma de vibración del aceite y probablemente, modifica el modo de vibración del núcleo y del devanado, para adoptar su propio modo de vibración con particulares frecuencias. En algunos casos, los paneles de los cuales se construye el tanque podrían entrar en resonancia y esto causaría un incremento en la amplitud de vibración. Como el tanque puede estar construido de paneles de diferentes tamaños y adicionalmente, en algunas caras presenta mayor cantidad de refuerzos o accesorios que otras; en consecuencia, el cálculo de las frecuencias naturales es muy difícil debido al considerable esfuerzo matemático involucrado.

En el caso de los transformadores analizados en éste trabajo se puede suponer que las fuentes de vibración más importantes son las que se generan en el núcleo y en los devanados de los mismos, debido a la magnetostricción y las fuerzas electrodinámicas.

2.4 ANTECEDENTES

Meschesfske C. (1995), miembro del Instituto de Ingeniería Mecánica y Estructural de Ontario, Canadá, presentó un trabajo donde propone un método para la evaluación de la integridad del transformador mediante el monitoreo de vibraciones del equipo, basado en unas pruebas que describen la experiencia en la medición y análisis de vibraciones realizadas para una variedad de equipos eléctricos operados por la British Columbia Hydro Power Authority (BC Hydro) en Canadá.

En 1994 se realizaron mediciones de vibraciones en dos transformadores de potencia trifásicos de la subestación Horseshoe Bay y de un banco de tres transformadores de potencia monofásicos de la subestación de Ingledow, adicionalmente se midieron vibraciones en un reactor de la subestación de Ashton Creek. Para todas las mediciones se utilizaron sensores tipo acelerómetros piezoeléctricos con base magnéticas ubicados en las diferentes caras del tanque del equipo. Al realizar las mediciones en los transformadores se colocaron sensores en las caras laterales y en la cara superior del tanque.

Basado en las pruebas ejecutadas, se concluyó que existe una relación entre los valores de amplitud de vibración que se registran en el tanque del transformador y las condiciones del núcleo y del devanado, permitiendo establecer que el análisis de vibraciones es una herramienta que resulta muy poderosa en el diagnóstico de la integridad de los equipos de transformación en general. Adicionalmente, es una técnica no invasiva que permite determinar si es necesario o no realizar inspecciones internas en equipos como los transformadores, optimizando los programas de mantenimiento de los mismos.

Geisecke J., Spencer G. y Richardson F. (1999), como miembros del Electric Power Research Institute (EPRI), desarrollaron un trabajo con el objetivo principal de optimizar los programas de mantenimiento de transformadores y equipos de subestaciones.

El análisis de vibraciones en transformadores se considera una prueba de mucha importancia dentro de éste trabajo, debido a que permite tomar decisiones rápidas sobre las condiciones de estos equipos. Al finalizar la investigación, se concluyó que los datos obtenidos de las mediciones externas de vibraciones en el tanque del transformador están vinculados con ciertas condiciones del núcleo y del devanado del equipo.

Estos investigadores presentan una metodología de medición de vibraciones que consiste en colocar dos (2) sensores por cada cara lateral enumerando las caras desde el uno (1) hasta el cuatro (4), comenzando por la cara lateral de alto voltaje y en sentido antihorario. Los sensores se identifican con la siguiente nomenclatura 1L, 1R, el número identifica la cara y la letra el lado izquierdo o derecho (left and right) de la misma. Adicionalmente, la ubicación de los sensores debe ser a un metro y medio (1,5m) de elevación referidos a la base del tanque y a medio metro (0,5m) de las esquinas.

Al momento de analizar los datos obtenidos, se evalúa que el transformador se encuentra en buenas condiciones si cumple con las siguientes consideraciones:

- a) El espectro de frecuencia debe mostrar que la mayor amplitud de vibración se debe presentar en la armónica igual a $2X$ (100Hz o 120Hz si la frecuencia de operación es de 50Hz o 60Hz, respectivamente).
- b) Las armónicas pares (120Hz, 240Hz, 360Hz, 480Hz), deben estar presentes y su amplitud de vibración debe ser menor a la amplitud de $2X$.
- c) Las armónicas impares (60Hz, 180Hz, 300Hz), deben tener una tendencia a cero.

Finalmente, si algún transformador no cumple con todas las consideraciones antes expuestas, se recomienda que a éste se le realice una inspección interna.

Berler Z., Golubev A., Rusov V, Tsvetkov V. y Patterson C. (1999), miembros del Instituto Cutler Hammer, presentaron en una conferencia del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), una investigación que relaciona las vibraciones que son medidas en la estructura del transformador con el estado o

condición del núcleo y del devanado. Este estudio menciona que el valor de frecuencia de vibración del transformador es el doble de la frecuencia nominal de operación (100Hz o 120Hz si la frecuencia de operación es de 50Hz o 60Hz, respectivamente).

La metodología de medición planteada en este trabajo, consiste en utilizar doce (12) sensores tipo acelerómetros piezoeléctricos ubicados equitativamente en el tanque en dos de las caras laterales del mismo. La metodología de análisis propuesta por el instituto considera necesario estudiar las siete primeras armónicas partiendo desde 100 Hz o desde 120 Hz.

Bowers S., Davis W. y Graciano J. (2001) presentaron la extensión del proyecto presentado por Geisecke J., Spencer G. y Richardson F., para el Electric Power Research Institute (EPRI), donde se muestra el desarrollo de nuevas tecnologías que permiten constantemente medir y analizar las vibraciones de los transformadores, mediante captadores colocados en el tanque de los equipos y monitoreo continuo a través de programas de computadoras. Estos programas realizan el análisis de los datos de vibraciones obtenidos por los captadores empleando los valores límites determinados por el Electric Power Research Institute (EPRI) y permitiendo a la empresa dueña de los transformadores tomar decisiones oportunas para optimizar los procedimientos de mantenimiento. Los valores límites empleados para la evaluación de los transformadores se presentan en las siguientes figuras:

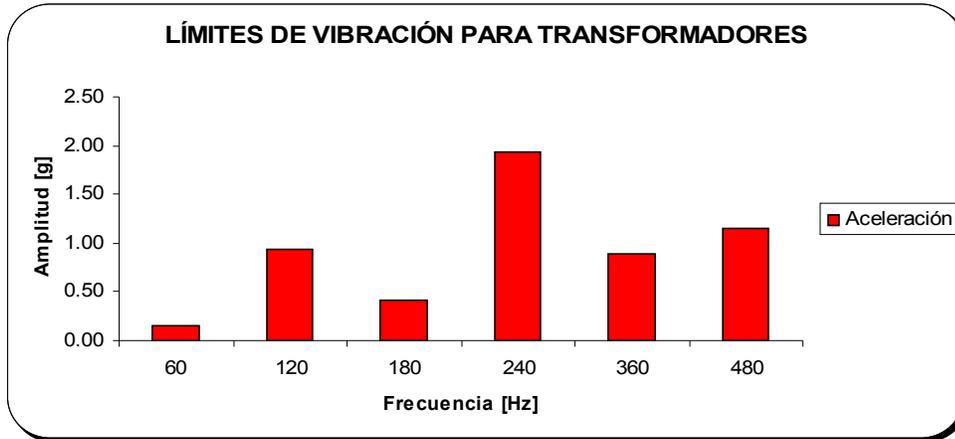


Figura 11.1

Valores de vibraciones aceptables para los transformadores determinados por el Electric Power Research Institute (EPRI)

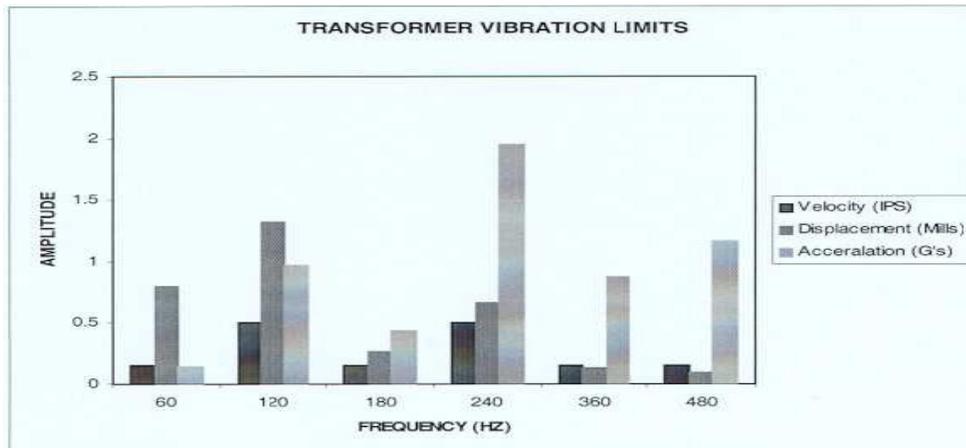


Figura 11.2

Valores de vibraciones aceptables para los transformadores determinados por el Electric Power Research Institute (EPRI)

En las figuras 11.1 y 11.2 los valores de amplitud de vibración se encuentra en unidades g y G, respectivamente, estas unidades corresponden a la aceleración de la gravedad en sistema internacional (figura 11.1) y a la aceleración de la gravedad en sistema ingles (figura 11.2).

Santos O. (2002), presentó ante la Universidad Experimental Politécnica, un trabajo de grado en donde plantea establecer un procedimiento de medición de vibraciones en transformadores de potencia para construir un historial del equipo, que permita detectar posibles anomalías relacionadas con los devanados, núcleos, estructuras de prensado y otros elementos, con el objetivo principal de detectar degradaciones incipientes. El estudio está basado en una investigación no experimental del tipo explicativa descriptiva, debido a que se da a conocer los fundamentos teóricos de la prueba de medición de vibraciones en máquinas eléctricas para su posterior aplicación en transformadores de potencia.

Bartoletti C., Desiderio M., Di Carlo D., Fazio G., Muzi F., miembros del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Sacerdote G. y Salvatori F. (2004), publicaron un trabajo que presenta una nueva técnica basada en las emisiones acústicas para diagnosticar transformadores de potencia de mediano y bajo voltaje. Estas emisiones acústicas se encuentran relacionadas con los niveles de vibración de los transformadores y pueden ser generadas por distintos problemas dentro del equipo.

Para el desarrollo de este estudio se realizaron mediciones en tres transformadores en diferentes condiciones de uso: nuevo, usado y dañado. Los datos de vibraciones de los tres equipos fueron recogidos, colocando sensores tipo acelerómetros piezoeléctricos ENDEVCO 751-10, ubicados en la superficie del tanque del transformador.

La información obtenida durante el desarrollo de este trabajo demostró que las fuentes de emisiones acústicas normales del transformador pueden ser alteradas por defectos mecánicos dentro del equipo y que estos defectos pueden ser detectados a través de la medición de vibraciones en la superficie del tanque del transformador. Adicionalmente, esta técnica permite identificar y reconocer el estado del transformador y con esta información poder tomar decisiones adecuadas con el fin de optimizar el procedimiento de mantenimiento aplicados a estos equipos.

García B., Burgos J.C. y Alonso A. (2006), miembros del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), realizaron una investigación donde se presentan el desarrollo y la verificación experimental de un modelo matemático capaz de estimar las vibraciones normales del tanque del transformador tomando en cuenta algunas variables que pueden ser medidas fácilmente en el equipo. En este trabajo se propone que se use el modelo matemático para estimar las vibraciones normales del transformador y, adicionalmente, que las vibraciones en el tanque sean medidas de forma experimental, el análisis final de la condición del equipo depende de la comparación entre las vibraciones estimadas y las medidas, si estas son aproximadamente iguales se determina que el transformador está en buenas condiciones de operación.

El desarrollo de este modelo se logró mediante la aplicación de conceptos de la teoría de vibración. La verificación experimental del modelo, se obtuvo realizando pruebas con acelerómetros ubicados externa e internamente en el transformador, adicionalmente se provocaron deformación en el devanado y se confirmó que el modelo está en la capacidad de detectar estos daños. En la verificación experimental se realizaron mediciones internas y externas de las vibraciones de un transformador en buenas condiciones, luego a este equipo se causaron deformaciones en el devanado y nuevamente se hicieron mediciones. Finalmente, determinaron que las mediciones externas de vibración obtenidas en la cara inferior del tanque son las más aproximadas al las mediciones internas realizadas; en consecuencia, proponen que empleando un sensor se registren únicamente los valores de vibración en la cara inferior.

Gavidia A. y Velásquez A (2007), presentaron ante la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela un informe de pasantía industrial, en el cual se plantea una propuesta para la medición de vibraciones en transformadores de potencia de la empresa C.V.G. Electrificación del Caroní.

Los equipos de transformación seleccionados para el desarrollo de éste trabajo, fueron seleccionados tres (3) transformadores de potencias monofásicos

asociados a la unidad 20 de la Casa de Máquinas II de la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar, “GURI”, por el Centro de Investigaciones Aplicadas de la empresa. Durante las pruebas se instalaron veintitrés (23) sensores tipo acelerómetros piezoeléctricos, cuya sensibilidad se encuentran en aproximadamente 10 mV/g, distribuidos sobre todas las caras del tanque de cada transformador seleccionado para el estudio, cuatro (4) sensores en las caras laterales y la cara inferior y tres (3) sensores colocados en la cara superior. Finalmente, se concluyó que las variaciones de carga a las cuales puede ser sometido el transformador, no alteran de manera apreciable los valores de amplitud de vibración medidos sobre el tanque del mismo y que las señales registrada por dos sensores que se encuentren en una misma dirección vertical son aproximadamente iguales; adicionalmente, los valores de amplitud registrados en la cara superior son de un orden de magnitud menor a los valores registrados en las otras caras. En consecuencia, fue recomendado colocar dos sensores por cada cara lateral y dos sensores en la cara inferior para recolectar los datos de vibración del transformador a evaluar, y no realizar registros en la cara superior.

CAPITULO III

METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.

El análisis de vibraciones en transformadores, en conjunto con otras pruebas de rutina, se emplea como una técnica que permite determinar un diagnóstico integral de estos equipos. Esta técnica se divide en dos grandes etapas generales: *La recolección de los datos de vibración y El procesamiento de los datos obtenidos.*

Para la etapa de recolección de los datos de vibración se diseñó un protocolo de pruebas en el cual se especifica el transformador seleccionado para el estudio y todos los procedimientos que se deben seguir para la adquisición de los datos. Terminada la etapa de recolección, se da inicio a la etapa de procesamiento de los datos obtenidos, donde a las señales de vibración captada, para los transformadores seleccionados para el estudio, se le aplicó la transformada rápida de Fourier mediante el diseño de un programa computacional. Finalmente, el análisis de los datos de vibración se limita a la comparación con valores de referencia establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI) y el criterio de evaluación para la cara inferior establecido por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), con el fin de emitir un diagnóstico probable de funcionamiento de cada transformador en cuanto a vibraciones se refiere.

3.1 TRANSFORMADORES DE POTENCIA INCLUIDOS EN EL ESTUDIO

La selección de los transformadores de potencia que fueron incluidos en esta investigación, estuvo bajo la responsabilidad de Centro de Investigaciones Aplicadas de la C.V.G. Electrificación del Caroní. En consecuencia, la adquisición de los datos de vibración se llevó a cabo en los transformadores de potencia marca ASEA, marca

ABB ubicados en la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar” (GURI) y en el transformador de potencia marca MITSUBISHI ubicado en la Casa de Maquinas II de la Central Hidroeléctrica “Antonio José de Sucre” (MACAGUA II), con las siguientes características:

3.1.1 Transformador 1: Banco de tres transformadores monofásicos asociados a la unidad No.20 de la Casa de Máquinas II de la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar”. Cada uno de potencia nominal de 269MVA, frecuencia de operación de 60Hz y niveles de tensión de 765/18KV. Marca ASEA.



Foto 1

Transformador 1

Fuente: Ing. Rodrigo Rey

3.1.2 *Transformador 2*: Transformador de potencia trifásico asociado a la unidad No.7 de la Casa de Máquinas I de la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar”. Potencia nominal de 420MVA, frecuencia de operación de 60Hz y niveles de tensión de 400/18KV. Marca ABB.



Foto 2

Transformador 2

Fuente: Br. A. Velásquez

3.1.3 *Transformador 3*: Transformador de potencia trifásico asociado a las unidades No.13 y No.14 de la Casa de Máquinas II de la Central Hidroeléctrica “Antonio José de Sucre”. Potencia nominal de 500MVA, frecuencia de operación de 60Hz y niveles de tensión de 400/13,2KV. Marca MITSUBISHI.

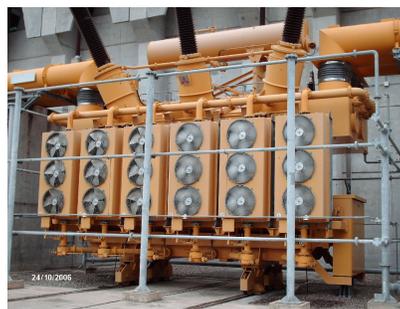


Foto 3

Transformador 3

Fuente: Ing. Rodrigo Rey

Adicionalmente, en el estudio se incluyeron los dos transformadores descritos a continuación:

3.1.4 Transformador 4: Banco de tres transformadores monofásicos asociados a la unidad No.19 de la Casa de Máquinas II de la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar”. Cada uno de potencia nominal de 269MVA, frecuencia de operación de 60Hz y niveles de tensión de 765/18KV. Marca TOSHIBA.

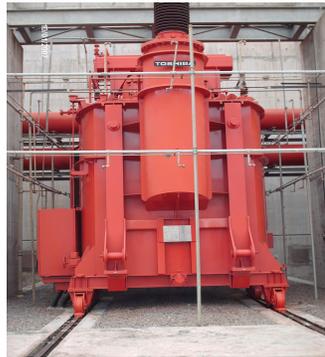


Foto 4

Transformador 4

Fuente: Br. A. Gavidia

3.1.5 Transformador 5: Transformador de potencia trifásico asociado a la unidad No.5 de la Casa de Máquinas I de la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar”. Potencia nominal de 265MVA, frecuencia de operación de 60Hz y niveles de tensión de 400/18KV. Marca ABB.



Foto 5

Transformador 5

Fuente: Br. A. Velásquez

3.2 INSTRUMENTACIÓN

Durante la ejecución de las pruebas de medición del nivel de vibración en los transformadores de potencia seleccionados para el estudio se empleó la siguiente instrumentación:

3.2.1 Dos (2) acelerómetros tipo piezoeléctricos con bases magnéticas.

Marca Isotron.



Foto 6

Sensor tipo acelerómetro piezoeléctrico

Fuente: Br. A. Velásquez

Tabla 1

Especificaciones del fabricante de los acelerómetros piezoeléctricos
empleados durante las pruebas

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	VALOR
Rango	g	± 500
Sensibilidad	$\pm 20\%$ mV/g	10
Frecuencia de resonancia	kHz	50
Frecuencia de respuesta	Hz	20 a 10.000
Rango de temperatura de operación	°C	-55 a 125

3.2.2 Dos (2) acondicionadores de señal.

Marca Nexus



Foto 7

Acondicionador de señal

Fuente: Br. A. Gavidia

3.2.3 Un registrador de señal de vibración.

Marca Nicolet Vision



Foto 8

Registrador de señal de vibración

Fuente: Br. A. Gavidia

3.2.4 Dos (2) cables coaxiales.



Foto 9
Cable coaxial
Fuente: Br. A. Velásquez

3.2.5 Fuente de alimentación.



Foto 10
Fuente de alimentación
Fuente: Br. A. Gavidia

3.2.6 Un registrador de señal de vibración empleado para la ejecución, únicamente, de la prueba en el transformador 3.

Marca Yokogawa.



Foto 11

Registrador de señal de vibración

Fuente: Br. A. Gavidia

3.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO

El análisis del nivel de vibración de los transformadores de potencia, se dividió en dos grandes fases: *Adquisición de los datos de vibración* y *Procesamiento de los datos obtenidos*. Para la fase de adquisición de los datos de vibración se diseñó un protocolo de pruebas para la medición del nivel de vibración de los transformadores, en el cual se especifican los instrumentos y equipos a utilizar, los puntos de registro de la señal de vibración sobre el tanque del equipo, los tiempos estimados de instalación de la instrumentación, adquisición de datos y desinstalación de la instrumentación, entre otros requisitos. En la fase de procesamiento de los datos, se obtuvieron los espectros de frecuencia mediante la aplicación de un programa computacional y con la información extraída de los espectros se construyeron gráficos comparativos entre los datos de vibración registrados por ambos sensores

para cada cara de los equipos y para los valores de frecuencias considerados, luego se comparan con los valores de referencia. Los gráficos comparativos entre los datos de vibración registrados por ambos sensores se encuentran incluidos en los apéndices de este trabajo, debido a la magnitud de la información allí contenida; sin embargo, toda la información contenida en dichas gráficas son presentadas en tablas que permiten sintetizar la información. Las gráficas comparativas con valores de referencia de los valores promedios de amplitud de vibración registrados por los sensores 1 y 2, para todos los transformadores seleccionados para este estudio se presentan como parte de los resultados permitiendo generar diagnósticos probables de la integridad de los equipos evaluados.

Las pruebas se ejecutaron empleando dos (2) sensores tipo acelerómetros piezoeléctricos cuya sensibilidad promedio es 10 mV/g (Marca Isotron), las señales obtenidas por estos sensores fueron amplificadas mediante dos (2) acondicionadores marca Bruel&Kjaer, los cuales producen que la señal proveniente del sensor se eleve a 100 mV/g y esta señal es almacenada en un equipo registrador marca Nicolet Vision de dieciséis (16) canales, el cual guarda la señal obtenida en una memoria para ser descargada posteriormente. En el caso de las pruebas realizadas al transformador 3 el registrador empleado fue de marca Yokogawa también de 16 canales.

3.3.1 Adquisición de los datos de vibración:

La fase de adquisición de los datos se desarrolló en tres (3) actividades:

- *Instalación de los instrumentos de medición:* Se definieron diez (10) puntos de captación de la señal de vibración sobre el tanque del transformador, dos (2) puntos por cada cara lateral y dos (2) puntos en la cara inferior. Todos los puntos de medición seleccionados fueron cubiertos empleando dos (2) sensores que fueron rotados. Los sensores se ubicaron equidistantes en las caras laterales del tanque, siempre en la misma posición, izquierda (sensor 1)

y derecha (sensor 2). Durante esta actividad también se instalaron dos equipos acondicionadores de señal y un equipo registrador.



Foto 12

Instalación de los sensores

Fuente: Br. A. Gavidia



Foto 13

Instalación de los equipos acondicionadores y el equipo registrador

Fuente: Br. A. Velásquez

- *Adquisición de los datos:* Durante esta actividad se tomaron cinco (5) registros para cada transformador de potencia seleccionados para el estudio, lo que hace un total de cuarenta y cinco (45) registros en total. Cada registro contiene dos (2) señales y cada señal contiene un valor promedio de ciento veinte mil (120.000) puntos. La frecuencia de muestreo fue de 2000Hz y un tiempo de muestreo de sesenta (60) segundos.



Foto 14

Registro de las vibraciones del transformador 1

Fuente: Br. A. Velásquez



Foto 15

Registro de las vibraciones del transformador 3

Fuente: Br. A. Velásquez

- *Culminación de la prueba:* Se desinstalaron los instrumentos de medición y equipos utilizados.



Foto 16

Desinstalación de los sensores

Fuente: Br. A. Gavidia

3.3.2 Procesamiento de los datos obtenidos:

Luego de terminada la fase de adquisición de los datos de vibración, comenzó la fase de procesamiento de los datos obtenidos. Para cada transformador se obtuvieron diez (10) señales y cada señal posee en promedio un total de ciento veinte mil (120.000) puntos. Durante esta fase se diseñó un programa computacional que permitió graficar la señal en el tiempo y aplicar, a las señales, la transformada rápida de Fourier con el fin de obtener el espectro de frecuencia.

Trabajando con los gráficos obtenidos a través del programa computacional se construyeron gráficas comparativas. Estas gráficas son imágenes explicativas que permiten comparar:

- El nivel de vibración de todas las caras de un equipo captado por un mismo sensor para los valores de frecuencias seleccionados.
- Los valores de vibración obtenidos por ambos sensores para una misma cara del tanque del equipo.
- Los valores de vibración obtenidos por los sensores en todas las caras del equipo y los valores promedios de amplitud de vibración registrados por ambos sensores con los valores máximos permisibles de amplitud de vibración establecidos el Electric Power Research Institute (EPRI).

Cabe destacar que los valores establecidos por el EPRI no son valores normalizados, por lo que en esta investigación se consideran como valores de referencia. Los resultados de esta investigación son presentados en tablas que recogen todos los valores de amplitud de vibración registrados por los sensores, para todos los transformadores evaluados y se muestran las gráficas comparativas entre los valores promedios de amplitud de vibración registrados por ambos sensores para cada equipo y los valores de referencia; esta información es la necesaria y suficiente para generar los diagnósticos probables de la integridad de los transformadores de potencias incluidos en la investigación. Las otras gráficas construidas se encuentran en los apéndices de esta investigación.

3.4 PROTOCOLO DE PRUEBAS PARA LA MEDICIÓN DEL NIVEL DE VIBRACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA SELECCIONADOS PARA ESTA INVESTIGACIÓN

3.4.1 Objetivo:

- Medir las vibraciones en los transformadores elevadores de potencia.

3.4.2 Requisitos para la ejecución de la prueba:

- Solicitud de la forma de trabajo.
- Tener instalada y calibrada toda la instrumentación.
- Tener preparado el equipo de adquisición de datos.
- No debe haber personas que no estén vinculadas a la prueba en el área de trabajo.
- El transformador debe estar en servicio.
- Revisar todas las conexiones del cableado del circuito de prueba.
- Debido a que los transformadores se encuentran a la intemperie se debe disponer de cobertores para proteger los equipos de medición de las condiciones ambientales.
- Disponer de equipos de radio para la comunicación entre el personal de prueba y el personal de operaciones.

3.4.3 Procedimiento:

El procedimiento cuenta con tres fases:

- a) Instalación de equipos de medición:
 - i. Instalación de diez (10) sensores tipo acelerómetros, que estarán ubicados a dos sensores por cara cada cara como se muestra en la figura 1.
 - ii. Cableado y calibración de todos los sensores.
 - iii. Instalación y calibración de los equipos de adquisición de datos.

iv. El tiempo estimado para la instalación total de los instrumentos es veinticinco (25) minutos.

b) Adquisición de los Datos:

- i. Solicitar la lectura de tensión y de potencia del transformador antes de realizarla prueba.
- ii. Tomar registro de vibraciones del transformador a su potencia nominal.
- iii. Descargar registro.
- iv. El tiempo estimado total para la etapa de adquisición de dato es de veinte (20) minutos.
- v. La frecuencia de muestreo debe ser de 2000 Hz y el tiempo de duración igual a un (1) minuto.

c) Culminación de la prueba:

- i. Desinstalar los equipos de medición.
- ii. Quitar avisos de precaución colocados para la realización de las pruebas.
- iii. El tiempo estimado para esta etapa es de diez (10) minutos.

3.4.4 Instrumentación:

- Dos (2) sensores tipo acelerómetros.
- Dos (2) acondicionadores de señales.
- Seis (6) cables coaxiales de extensión.
- Una fuente de alimentación.
- Computador portátil.
- Soportes de los sensores.
- Registrador.

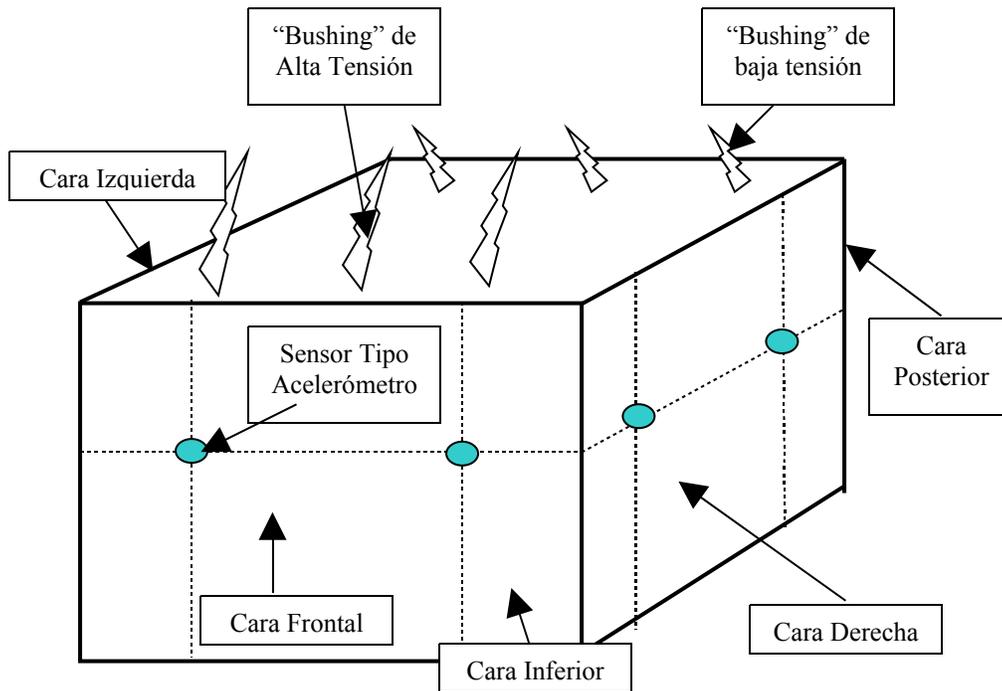


Figura 12

Identificación de las caras y localización de los sensores en el transformador

Leyenda:

- Caras laterales: colocar dos (2) sensores por cara.
- Cara inferior: colocar dos (2) sensores.

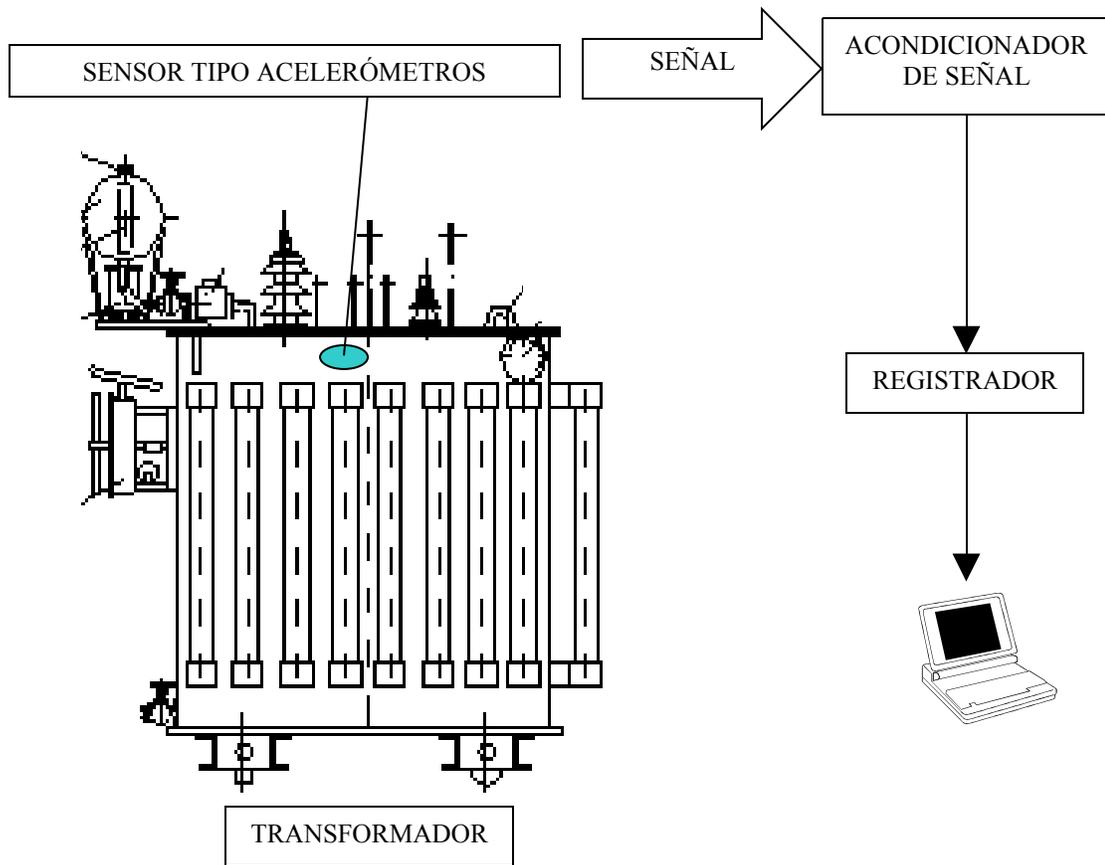


Figura 13

Esquema general del circuito de medición

3.5 REGISTROS DE VIBRACIÓN OBTENIDOS PARA LA INVESTIGACIÓN.

A continuación se desglosan todos los registros obtenidos durante la fase de adquisición de los datos de vibración para todos los transformadores seleccionados para esta investigación.

3.5.1 Registros de vibraciones del transformador 1:

El transformador 1, identificado así para esta investigación, es un banco de tres transformadores monofásicos, que la empresa C.V.G. Electrificación del Caroní, los identifica como Fase A, Fase B y Fase C del transformador de potencia asociado a la unidad No 20 de la Casa de Máquinas II de la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar”, Guri. Para cada transformador se obtuvieron cinco (5) registros de vibración, en total se obtuvieron quince (15) registros para el transformador 1, los cuales se resumen en la siguientes tablas.

Tabla 2

Registro de vibración del transformador 1 Fase C

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO FASE C CONDICIÓN DE OPERACIÓN DEL EQUIPO: 100%
ARCHIVO: Guri 20.01.07 FECHA: 11/01/2007 POTENCIA DEL EQUIPO: 600 MW

MEDICIÓN	HORA [24h]	CARA DEL TRANSFORMADOR
3	11:12	Frontal
4	11:17	Derecha
5	11:20	Posterior
6	11:24	Izquierda
7	11:26	Inferior

Las mediciones comienzan en la número tres (3), porque las dos primeras fueron de calibración y verificación de los instrumentos empleados durante las pruebas.

Tabla 3

Registro de vibración del transformador 1 Fase B

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO FASE B CONDICIÓN DE OPERACIÓN DEL EQUIPO: 100%
ARCHIVO: Guri 20.01.07 FECHA: 11/01/2007 POTENCIA DEL EQUIPO: 600 MW

MEDICIÓN	HORA [24h]	CARA DEL TRANSFORMADOR
8	11:29	Frontal
9	11:32	Derecha
10	11:35	Posterior
11	11:39	Izquierda
12	11:41	Inferior

Tabla 4

Registro de vibración del transformador 1 Fase A

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO FASE A CONDICIÓN DE OPERACIÓN DEL EQUIPO: 100%
ARCHIVO: Guri 20.01.07 FECHA: 11/01/2007 POTENCIA DEL EQUIPO: 585 MW

MEDICIÓN	HORA [24h]	CARA DEL TRANSFORMADOR
13	11:54	Frontal
14	11:57	Derecha
15	11:59	Posterior
16	12:02	Izquierda
17	12:04	Inferior

3.5.2 Registros de vibraciones del transformador 2:

El transformador 2, denominado así en esta investigación, es el transformador trifásico asociado a la unidad No. 7 de la Casa de Máquinas I de la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar”. Para este transformador se obtuvieron cinco (5) registros de vibraciones los cuales se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 5

Registro de vibración del transformador 2

TRANSFORMADOR TRIFÁSICO 2 CONDICIÓN DE OPERACIÓN DEL EQUIPO: 100%
ARCHIVO: Guri 07.10.01.07 FECHA: 10/01/2007 POTENCIA DEL EQUIPO: 330 MW

MEDICIÓN	HORA [24h]	CARA DEL TRANSFORMADOR
1	12:46	Derecha
2	12:47	Posterior
3	12:50	Izquierda
5	12:53	Frontal
6	12:55	Inferior

3.5.3 Registros de vibraciones del transformador 3:

El transformador 3 es el equipo trifásico asociado a las unidades 13 y 14 de la Casa de Máquinas II de la Central Hidroeléctrica “Antonio José de Sucre”. Se obtuvieron cinco (5) registros para este transformador los cuales se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 6

Registro de vibración del transformador 3

TRANSFORMADOR TRIFÁSICO 3 CONDICIÓN DE OPERACIÓN DEL EQUIPO: 100%
CARPETA: Trna 14-13 FECHA: 12/01/2007 POTENCIA DEL EQUIPO: 170 MW

CARPETA	HORA [24h]	CARA DEL TRANSFORMADOR
Lateral Izq	11:10	Izquierda
Cara Posterior	11:15	Posterior
Cara Frontal	11:17	Frontal
Lateral Derecha	11:20	Derecha
Cara Inf	11:25	Inferior

3.5.4 Registros de vibraciones del transformador 4:

El transformador 4, identificado así para esta investigación, es un banco de tres transformadores monofásicos identificados por la empresa C.V.G. Electrificación del Caroní como la Fase A, Fase B y Fase C del transformador asociado a la unidad No. 19 de la Casa de Máquinas II de la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar”. Para cada transformador se obtuvieron cinco (5) registros de vibración los cuales se resumen en las siguientes tablas.

Tabla 7

Registro de vibración del transformador 4 Fase A

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO FASE A CONDICIÓN DE OPERACIÓN DEL EQUIPO: 100%
ARCHIVO: Guri 19.10.01.07 FECHA: 10/01/2007 POTENCIA DEL EQUIPO: 600 MW

MEDICIÓN	HORA [24h]	CARA DEL TRANSFORMADOR
1	10:00	Frontal
2	10:09	Derecha
3	10:13	Posterior
4	10:15	Izquierda
5	10:20	Inferior

Tabla 8

Registro de vibración del transformador 4 Fase B

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO FASE B CONDICIÓN DE OPERACIÓN DEL EQUIPO: 100%
ARCHIVO: Guri 19.10.01.07 FECHA: 10/01/2007 POTENCIA DEL EQUIPO: 665 MW

MEDICIÓN	HORA [24h]	CARA DEL TRANSFORMADOR
6	10:30	Frontal
7	10:32	Derecha
8	10:35	Posterior
9	10:38	Izquierda
10	10:40	Inferior

Tabla 9

Registro de vibración del transformador 4 Fase C

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO FASE C CONDICIÓN DE OPERACIÓN DEL EQUIPO: 100%
ARCHIVO: Guri 19.10.01.07 FECHA: 10/01/2007 POTENCIA DEL EQUIPO: 665 MW

MEDICIÓN	HORA [24h]	CARA DEL TRANSFORMADOR
11	10:44	Frontal
12	10:47	Derecha
13	10:50	Posterior
14	10:53	Izquierda
15	10:55	Inferior

3.5.5 Registros de vibraciones del transformador 5:

El transformador 5 es el equipo de transformación trifásico asociado a la unidad No. 5 de la Casa de Máquinas I de la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar”, Guri. En la siguiente tabla se resumen los cinco (5) registros de vibración obtenidos para este transformador.

Tabla 10

Registro de vibración del transformador 5

TRANSFORMADOR TRIFÁSICO 5 CONDICIÓN DE OPERACIÓN DEL EQUIPO: 100%
ARCHIVO: Guri 05.10.01.07 FECHA: 10/01/2007 POTENCIA DEL EQUIPO: 217 MW

MEDICIÓN	HORA [24h]	CARA DEL TRANSFORMADOR
1	13:08	Derecha
2	13:10	Posterior
4	13:15	Izquierda
5	13:18	Frontal
6	13:20	Inferior

3.6 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la adquisición de los datos de vibración de los transformadores a evaluar, se diseñó un protocolo de pruebas, con el fin de presentar ante la empresa C.V.G. Electrificación del Caroní, un procedimiento a seguir durante la ejecución de las mediciones de vibraciones en los transformadores seleccionados para este estudio. Durante el diseño del mismo, se evaluaron diferentes protocolos de pruebas propuestos por institutos de investigación e investigadores particulares de carácter nacional e internacional en el área de medición y análisis de vibraciones. La revisión crítica de estos protocolos, permitió justificar la selección de sensores para la captación de la señal de vibración, la ubicación de los mismos sobre el tanque del equipo a evaluar y el tiempo total de duración de la prueba. Los sensores seleccionados fueron acelerómetros piezoeléctricos, los puntos de captación de la señal seleccionados fueron diez (10), dos (2) por cada cara lateral y dos (2) en la cara inferior, ubicados equidistantemente a la mitad de la altura del tanque del equipo. Finalmente, los datos de vibración fueron adquiridos empleando dos sensores y realizando un barrido por todos los puntos de medición.

A partir de los datos obtenidos, se graficaron todas las señales en el tiempo y espectros de frecuencias para todos los transformadores evaluados; el análisis de todas estas gráficas permitió seleccionar valores discretos de frecuencias; 60Hz, 120Hz, 180Hz, 240Hz y 480Hz; debido a que eran en estos valores de frecuencia donde la mayoría de los transformadores evaluados presentaban valores de amplitud de vibración apreciables. Cabe destacar que para la selección de los valores discretos de frecuencias se consideró lo expresado en los trabajos presentados por institutos de investigación e investigadores particulares de carácter internacional en el área de medición y análisis de vibraciones en transformadores, a referirse que las armónicas más importantes a ser estudiadas para esta área deben ser las de 60Hz, 120Hz, 180Hz, 240Hz y 480Hz; debido a que las armónicas superiores o no están presentes o los valores de amplitud de vibración tienden a cero.

Los gráficos de espectros de frecuencias, permitieron obtener los valores de amplitud de vibración para las frecuencias antes mencionadas. Estos valores de amplitud fueron tabulados con el fin de presentar para cada transformador estudiado, todos los valores obtenidos para las frecuencias seleccionadas. Empleando las tablas de valores se construyeron gráficas comparativas entre el nivel de vibración de todas las caras de un equipo captado por un mismo sensor para todos los valores de frecuencias seleccionados, los valores de vibración obtenidos por ambos sensores para una misma cara del tanque del transformador y los valores de vibración obtenidos por los sensores en todas las caras del equipo con los valores de referencia.

Geisecke J., Spencer G. y Richardson F. (1999), establecieron valores de vibraciones máximas aceptables para un transformador, estos valores son usados en esta investigación como valores de referencia (tabla 11), con el propósito de presentar el primer diagnóstico de vibraciones mecánicas de los transformadores de potencia seleccionados por la empresa C.V.G Electrificación del Caroní. Cabe destacar, que para el EPRI solo es suficiente que los valores registrados para un transformador sean inferiores a los valores máximos establecidos, para que éste equipo presente niveles de vibración aceptables.

Tabla 11
Valores máximos de amplitud de vibración para transformadores
Electric Power Research Institute (EPRI)

FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN [m/s ²]
60	1.5328
120	9.1969
180	4.0875
240	18.9047
360	8.6859
480	11.2406

Los valores de amplitud de vibración registrados en la cara inferior deben ser los más pequeños en promedios respecto a las otras caras del tanque del transformador, según lo expresado por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Estos valores de amplitud de vibración registrados en la cara inferior del tanque del transformador se encuentran relacionadas con la integridad mecánica de la estructura del núcleo y del devanado del equipo. Esta información permite suponer si en la estructura interna del núcleo y del devanado del equipo evaluado se presentan deformaciones mecánicas

A continuación se presentan los resultados de esta investigación:

3.6.1 Resultados del transformador 1:

Banco de tres transformadores monofásicos asociados a la unidad No. 20 de la Casa de Máquinas II de la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar”, Guri.

3.6.1.1 Transformador Fase A:

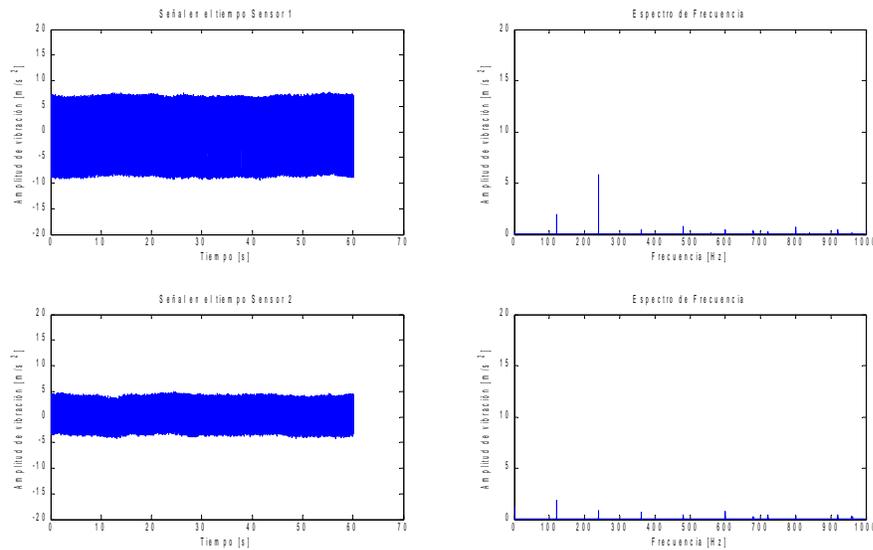


Gráfico 1
Señales en el tiempo y espectros de frecuencia
Cara Frontal
Transformador 1 Fase A

Para todos los transformadores incluidos en el estudio se realizaron gráficas como la gráfica 1 (ver apéndices) de las cuales se obtuvieron los valores de amplitud de vibración para los valores de frecuencias de 60Hz, 120Hz, 180Hz, 240Hz, 360z y 480Hz de cada equipo. Estos valores de amplitud son presentados en tablas como las siguientes:

Tabla 12
Valores de amplitud de vibración Sensor 1 (S1)
Transformador 1 Fase A

FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN DEL SENSOR 1 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S1
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	2.05	4.25	3.94	2.49	1.10	2.77
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	6.21	0.60	1.42	3.31	1.17	2.54
360	0.66	2.87	8.35	4.95	0.16	3.40
480	0.91	0.35	0.47	0.66	0.41	0.56

Tabla 13
Valores de amplitud de vibración Sensor 2 (S2)
Transformador 1 Fase A

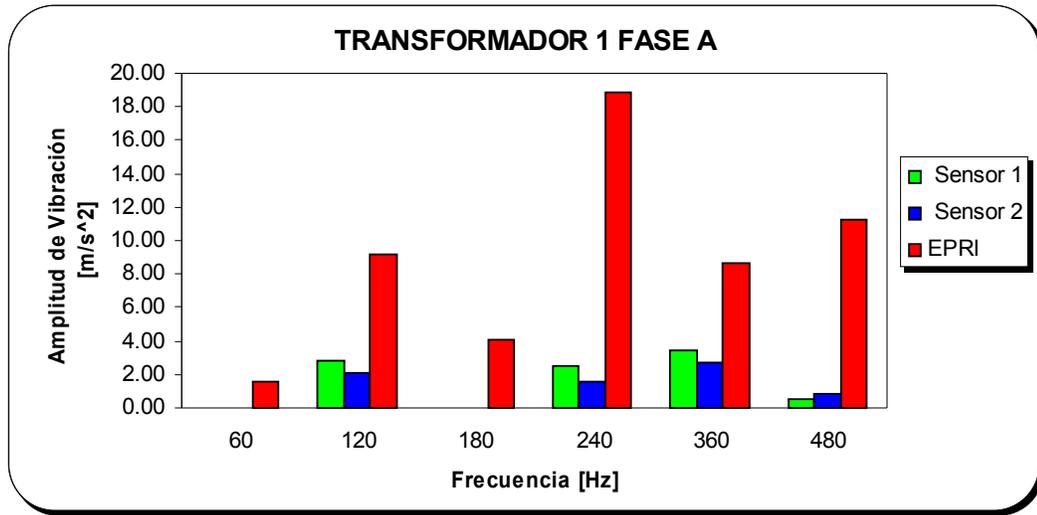
FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN DEL SENSOR 2 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S2
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	2.17	3.18	3.88	0.35	0.72	2.06
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	0.98	1.48	0.72	4.19	0.22	1.52
360	0.91	2.11	5.14	5.26	0.22	2.73
480	0.54	0.35	1.48	1.54	0.28	0.84

En las tablas 12 y 13, se observa que para la frecuencia de 60Hz y de 180Hz los valores de amplitud de vibración captados por el sensor 1 y el sensor 2, en todas las caras del tanque del transformador 1 fase A son cero, de acuerdo con lo establecido por el Electric Power Research Institute (EPRI), donde los valores de amplitud deben ser nula o muy cercana a cero, para las armónicas impares presentar.

En ambas tablas (12 y 13), se presenta que en la frecuencia de 360Hz se presenta el valor de amplitud de vibración promedio más elevado, siguiéndole en orden de magnitud el valor de amplitud promedio registrados para la frecuencia de 120Hz. En la tabla 12, para la frecuencia de 360Hz el valor promedio de amplitud de vibración es 3,40 m/s²; la cara posterior registró el mayor valor de amplitud. En la

tabla 13, el valor promedio de amplitud de vibración para la frecuencia de 360Hz es de 2,73 m/s²; la cara izquierda presentó el mayor valor de amplitud.

También, se muestra en las tablas 12 y 13 que en la cara inferior se registraron los menores valores de amplitud de vibración, respecto a los valores registrados en las otras caras evaluadas, de tal forma que es posible que este equipo no presente deformaciones mecánicas en la estructura del núcleo y/o en la estructura del devanado. Según lo expresado por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), los valores de amplitud de vibración registrados en la cara inferior del tanque del transformador se encuentran relacionadas con la integridad mecánica de la estructura del núcleo y del devanado del equipo.



Gráfica 2

Comparación de los valores de amplitud de vibración promedios del transformador 1 Fase A versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por Electric Power Research Institute (EPRI)

Según la gráfica 2, los valores de amplitud de vibración promedios registrados por los sensores 1 y 2, para el transformador 1 fase A son inferiores a los valores de referencias establecidos por el Electric Power Research institute (EPRI) como valores aceptables de amplitud de vibración para transformadores. En consecuencia este equipo presenta valores de amplitud de vibración aceptables.

3.6.1.2 Transformador Fase B:

Tabla 14
Valores de amplitud de vibración Sensor 1 (S1)
Transformador 1 Fase B

FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN DEL SENSOR 1 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S1
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	2.49	6.46	1.36	6.71	2.68	3.94
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	4.76	4.95	2.43	0.91	1.10	2.83
360	2.24	3.56	6.52	9.17	1.17	4.53
480	2.05	1.36	1.29	0.91	0.35	1.19

Tabla 15
Valores de amplitud de vibración Sensor 2 (S2)
Transformador 1 Fase B

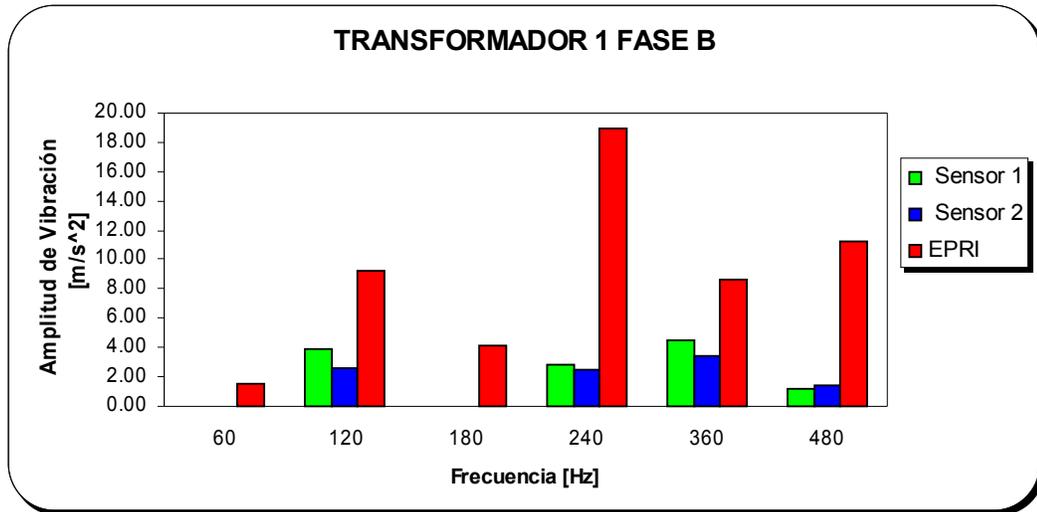
FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN DEL SENSOR 2 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S2
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	2.05	7.03	1.36	1.10	1.73	2.65
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	4.76	3.18	0.54	3.06	0.91	2.49
360	3.43	2.43	5.64	3.31	2.30	3.42
480	0.91	1.42	2.99	0.66	0.85	1.37

En las tablas 14 y 15, se deja ver que para la frecuencia de 60Hz y de 180Hz los valores de amplitud de vibración captados por el sensor 1 y el sensor 2, en todas las caras del tanque del transformador 1 fase B son cero. En consecuencia, este equipo cumple con lo establecido por el Electric Power Research Institute (EPRI), sobre que las armónicas impares deben presentar valores de amplitud nula o muy cercana a cero.

En ambas tablas (14 y 15), se expone que las caras que presentan los valores de amplitud de vibración más elevados son las caras izquierda sensor 1 (tabla 14) y

derecha sensor 2 (tabla 15). En la tabla 14, el valor promedio de amplitud de vibración más elevado es de $4,53 \text{ m/s}^2$ y en la tabla 15, el mayor valor promedio de amplitud de vibración es de $3,42 \text{ m/s}^2$; ambos valores se registraron para la frecuencia de 360Hz.

En las tablas 14 y 15 se nota que en la cara inferior se registraron valores de amplitud de vibración menores en comparación con los valores de amplitud registrados en las otras caras; lo que permite suponer que este equipo no presenta deformaciones mecánicas en la estructura del núcleo y/o en la estructura del devanado, según lo expresado por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), los valores de amplitud de vibración registrados en la cara inferior del tanque del transformador se encuentran relacionadas con la integridad mecánica de la estructura del núcleo y del devanado del equipo.



Gráfica 3

Comparación de los valores de amplitud de vibración promedios del transformador 1 Fase B versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por Electric Power Research Institute (EPRI)

Al observar la gráfica 3, los valores promedios de amplitud de vibración registrados por el sensor 1 y el sensor 2 para el transformador 1 fase B, son inferiores a los valores de referencias establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI) como valores aceptables de amplitud de vibración para transformadores. Debido a lo antes expuesto, este equipo presenta valores de amplitud de vibración aceptables.

3.6.1.3 Transformador Fase C:

Tabla 16
Valores de amplitud de vibración Sensor 1 (S1)
Transformador 1 Fase C

FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN DEL SENSOR 1 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S1
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	2.17	5.01	2.74	12.51	0.72	4.63
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	1.36	1.92	0.79	2.05	0.47	1.32
360	1.04	1.17	5.07	5.83	2.24	3.07
480	0.66	0.98	1.23	1.61	1.17	1.13

Tabla 17
Valores de amplitud de vibración Sensor 2 (S2)
Transformador 1 Fase C

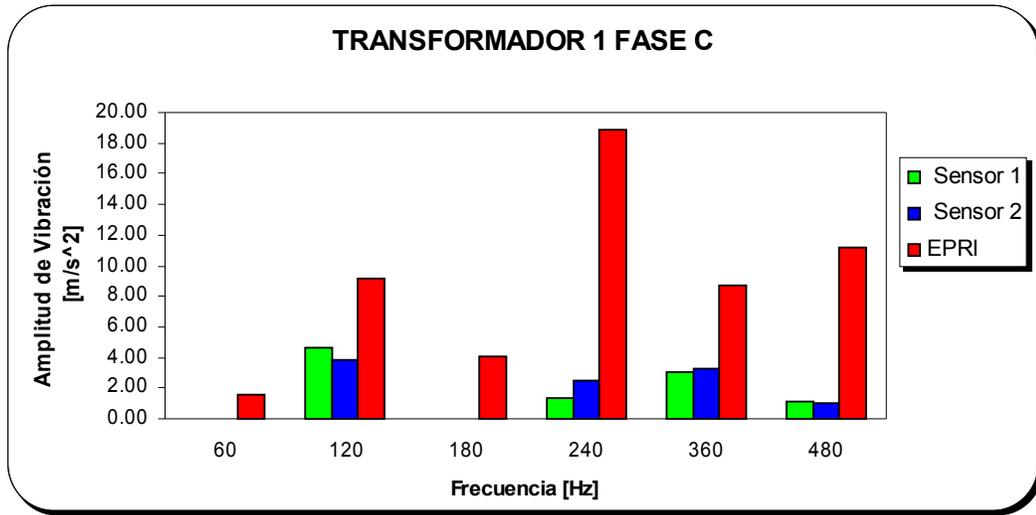
FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN DEL SENSOR 2 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S2
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	1.36	7.47	1.61	5.96	2.62	3.80
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	2.68	2.17	1.29	5.33	0.98	2.49
360	0.28	2.17	4.07	9.17	0.41	3.22
480	0.60	1.10	0.47	2.49	0.60	1.05

En las tablas 16 y 17, se puede observar que para las frecuencias de 60Hz y 180Hz los valores de amplitud de vibración captados por los sensores 1 y 2, en todas las caras del tanque del transformador 1 fase C son cero. En consecuencia, este equipo cumple con lo establecido por el Electric Power Research Institute (EPRI), donde las armónicas impares deben presentar valores de amplitud nula o muy cercana a cero.

En ambas tablas (16 y 17), se aprecia que la cara con mayor amplitud de vibración registrada para ambos sensores es la cara izquierda. Adicionalmente, para la

frecuencia de 120Hz se presenta el valor de amplitud de vibración promedio más elevado, luego le sigue en magnitud la frecuencia de 360Hz. En la tabla 16 el mayor valor de amplitud de vibración es de 4,63 m/s² y en la tabla 17 el mayor valor de amplitud promedio es 3,80 m/s².

También se muestra, en las tablas 16 y 17 que en la cara inferior se registraron valores de amplitud de vibración más pequeños al ser comparados con los valores de amplitud captados en las otras caras; en consecuencia es posible suponer que este equipo no presente deformaciones mecánicas en la estructura del núcleo y/o en la estructura del devanado, según lo expresado por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), los valores de amplitud de vibración registrados en la cara inferior del tanque del transformador se encuentran relacionadas con la integridad mecánica de la estructura del núcleo y del devanado del equipo.



Gráfica 4

Comparación de los valores de amplitud de vibración promedios del transformador 1 Fase C versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por Electric Power Research Institute (EPRI)

En la gráfica 4, se observa que los valores de amplitud de vibración promedios registrados por los sensores 1 y 2, para el transformador 1 fase C, son inferiores a los valores de referencia establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI) como valores aceptables de amplitud de vibración para transformadores; de tal forma que este equipo presenta valores de amplitud de vibración aceptables.

3.6.2 Resultados del transformador 2:

Transformador trifásico asociado a la unidad No. 7 de la Casa de Máquinas I de la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar”, Guri.

Tabla 18
Valores de amplitud de vibración Sensor 1 (S1)
Transformador 2

FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN SENSOR 1 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S1
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	1.31	6.46	8.77	11.92	1.63	6.02
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	1.52	14.55	9.61	8.56	1.94	7.24
360	9.09	15.28	11.82	11.40	0.58	9.63
480	0.79	1.21	4.25	0.79	0.58	1.52

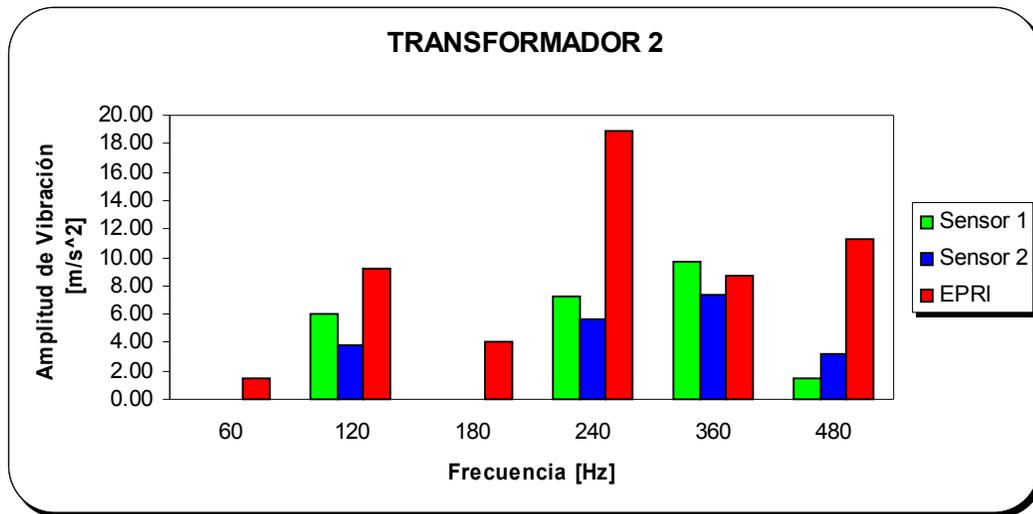
Tabla 19
Valores de amplitud de vibración Sensor 2 (S2)
Transformador 2

FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN SENSOR 2 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S2
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	0.68	3.52	6.57	6.46	2.05	3.86
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	0.37	20.22	3.20	2.47	2.26	5.70
360	10.35	11.92	8.04	2.47	3.94	7.34
480	0.58	2.05	9.40	2.68	1.21	3.18

En las tablas 18 y 19, es se deja ver que para las frecuencias de 60Hz y 180Hz los valores de amplitud de vibración registrados por el sensor 1 y el sensor 2, en todas las caras del tanque del transformador 2 son cero; de tal forma que este equipo cumple con lo establecido por el Electric Power Research Institute (EPRI), donde las armónicas impares deben presentar valores de amplitud nula o muy cercana a cero. La cara derecha presentó los mayores valores amplitud de vibración en general, para

ambos sensores. La mayor amplitud promedio en la tabla 18 tiene una magnitud de $9,63 \text{ m/s}^2$ y en la tabla 19 la mayor amplitud promedio es de $7,34 \text{ m/s}^2$, ambos valores registrados para la frecuencia de 360Hz.

En la cara inferior se registraron magnitudes de amplitud de vibración pequeñas para todas las frecuencias de estudio, en comparación con las magnitudes registradas en otras caras del equipo. El Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), presenta en sus investigaciones que las vibraciones mecánicas registradas en la cara inferior del transformador están relacionadas con deformaciones internas del núcleo y del devanado. En consecuencia, al observar los niveles de vibración registrados en la cara inferior para este equipo, es posible asumir que el mismo no presenta deformaciones mecánicas en la estructura del núcleo y del devanado.



Gráfica 5

Comparación de los valores de amplitud de vibración promedios del transformador 2 versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por Electric Power Research Institute (EPRI)

Al observar la gráfica 5 se nota que para la frecuencia de 360Hz el sensor 1 registró un valor promedio de amplitud de vibración superior al valor de referencia en un 10%. En consecuencia, el transformador 2 presenta valores de amplitud de vibración que son superiores a los valores de referencia establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI) como valores aceptables de amplitud de vibración para transformadores, implicando que este equipo presenta valores de vibración no aceptables.

3.6.3 Resultados del transformador 3:

Transformador trifásico asociado a las unidades 13 y 14 de la Casa de Máquinas II de la Central Hidroeléctrica “Antonio José de Sucre”, Macagua.

Tabla 20
Valores de amplitud de vibración Sensor 1 (S1)
Transformador 3

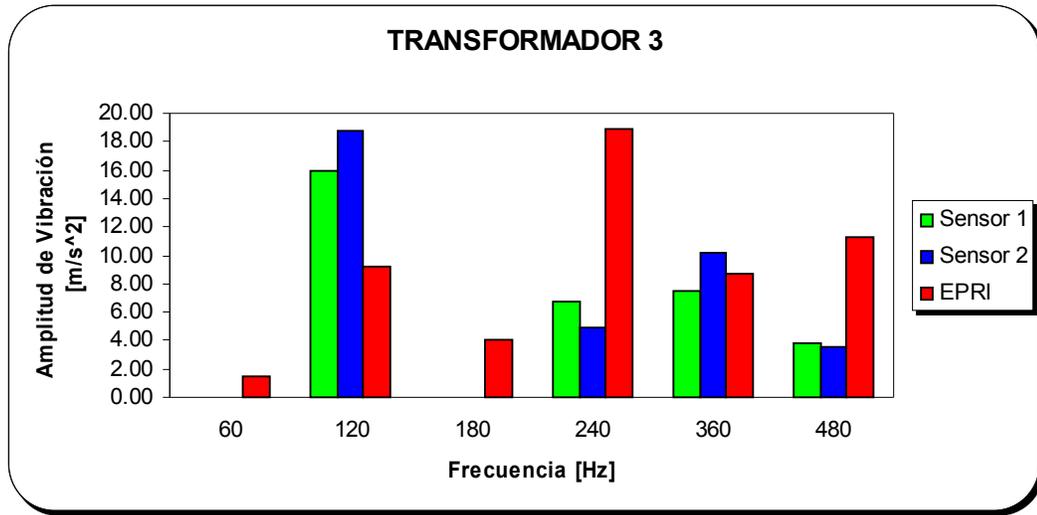
FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN SENSOR 1 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S1
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	2.93	35.67	12.92	5.26	23.13	15.98
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	8.73	5.67	13.17	3.75	2.71	6.81
360	9.17	2.65	15.57	5.64	4.35	7.47
480	3.12	4.66	4.60	0.00	6.49	3.78

Tabla 21
Valores de amplitud de vibración Sensor 2 (S2)
Transformador 3

FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN SENSOR 2 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S2
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	8.92	52.31	10.90	6.59	15.06	18.76
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	5.83	8.70	2.71	3.50	3.84	4.92
360	5.64	6.68	27.67	6.20	4.60	10.16
480	9.23	5.17	0.00	1.99	1.45	3.57

En las tablas 20 y 21, se nota que para las frecuencias de 60Hz y 180Hz los valores de amplitud de vibración registrados por el sensor 1 y el sensor 2, en todas las caras del tanque del transformador 2 son cero; de tal forma que este equipo cumple con lo establecido por el Electric Power Research Institute (EPRI), donde las armónicas impares deben presentar valores de amplitud nula o muy cercana a cero.

Las tablas 20 y 21 muestran que para esta unidad, la cara que registró los valores de amplitud de vibración más altos en general, es la cara derecha. Los valores promedios de amplitud de vibración más elevados se registraron en la frecuencia de 120Hz y 360Hz para ambos sensores respectivamente. Para la cara inferior la amplitud de vibración de la frecuencia de 120Hz se mantiene cerca del promedio general de vibración para esta unidad, por lo que no se puede concluir sobre la integridad mecánica de la estructura del núcleo y/o del devanado de este equipo.



Gráfica 6

Comparación de los valores de amplitud de vibración promedios del transformador 3 versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por Electric Power Research Institute (EPRI)

En la gráfica 6, se observa que para la frecuencia de 120Hz el sensor 1 y el sensor 2 registraron valores promedios de amplitud de vibración que son 1,74 y 2,04 veces superior al valor de referencia, respectivamente. Para la frecuencia de 360Hz, el sensor 2 también registró un valor superior al valor de referencia en 1,17 veces. Debido a lo antes expuesto, el transformador 3 presenta valores de amplitud de vibración superiores a los valores de referencia establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI) como valores aceptables de amplitud de vibración para transformadores. En consecuencia, este equipo presenta valores de vibración no aceptables.

3.6.4 Resultados del transformador 4:

Banco de tres transformadores monofásicos asociados a la unidad No. 19 de la Casa de Máquinas II de la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar”, Guri.

3.6.4.1 Transformador Fase A:

Tabla 22
Valores de amplitud de vibración Sensor 1 (S1)
Transformador 4 Fase A

FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN SENSOR 1 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S1
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	1.17	0.66	2.78	1.80	5.65	2.41
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	2.13	1.63	1.27	1.40	1.03	1.49
360	0.91	2.43	0.22	1.23	1.62	1.28
480	0.60	0.22	0.41	0.20	0.90	0.47

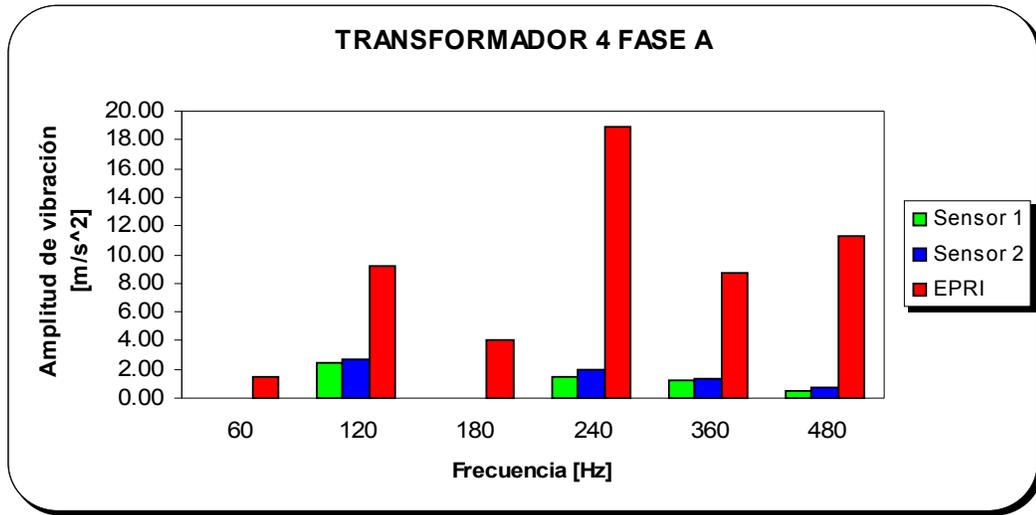
Tabla 23
Valores de amplitud de vibración Sensor 2 (S2)
Transformador 4 Fase A

FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN SENSOR 2 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S2
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	0.79	4.07	4.72	2.01	2.16	2.75
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	3.29	1.44	1.86	1.25	1.95	1.96
360	0.56	1.52	0.30	3.18	0.95	1.30
480	1.54	0.60	0.12	0.75	0.86	0.77

En las tablas 22 y 23, se observa que para las frecuencias de 60Hz y 180Hz los valores de amplitud de vibración captados por los sensores 1 y 2, en todas las caras del tanque del transformador 4 fase A son cero. En consecuencia, este equipo cumple con lo establecido por el Electric Power Research Institute (EPRI), donde las armónicas impares deben presentar valores de amplitud nula o muy cercana a cero.

En ambas tablas (22 y 23), se expone que la frecuencia de 120Hz se presenta el valor de amplitud de vibración promedio más elevado, siguiéndole en orden de magnitud el valor de amplitud promedio registrados para la frecuencia de 240Hz. En la tabla 22, para la frecuencia de 120Hz el valor promedio de amplitud de vibración es $2,41 \text{ m/s}^2$; registrando la mayor amplitud de vibración en la cara inferior. En la tabla 23, el valor promedio de amplitud de vibración para la frecuencia de 120Hz es de $2,75 \text{ m/s}^2$; registrando la mayor amplitud de vibración en la cara posterior.

También, se deja ver en las tablas 22 y 23 que en la cara inferior se registraron los menores valores de amplitud de vibración, respecto a los valores registrados en las otras caras evaluadas, de tal forma que es posible que este equipo no presente deformaciones mecánicas en la estructura del núcleo y/o en la estructura del devanado, según lo expresado por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), los valores de amplitud de vibración registrados en la cara inferior del tanque del transformador se encuentran relacionadas con la integridad mecánica de la estructura del núcleo y del devanado del equipo.



Gráfica 7

Comparación de los valores de amplitud de vibración promedios del transformador 4 Fase A versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por Electric Power Research Institute (EPRI)

En la gráfica 7, se aprecia que los valores de amplitud de vibración promedios registrados por los sensores 1 y 2, para el transformador 4 fase A, son inferiores a los valores de referencia establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI) como valores aceptables de amplitud de vibración para transformadores; en consecuencia, este equipo presenta valores de amplitud de vibración aceptables.

3.6.4.2 Transformador Fase B:

Tabla 24
Valores de amplitud de vibración Sensor 1 (S1)
Transformador 4 Fase B

FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN SENSOR 1 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S1
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	1.91	1.24	1.27	2.01	5.02	2.29
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	4.94	1.16	0.62	1.80	0.44	1.79
360	4.05	2.37	0.33	1.61	0.82	1.84
480	0.53	0.74	0.22	0.68	0.61	0.55

Tabla 25
Valores de amplitud de vibración Sensor 2 (S2)
Transformador 4 Fase B

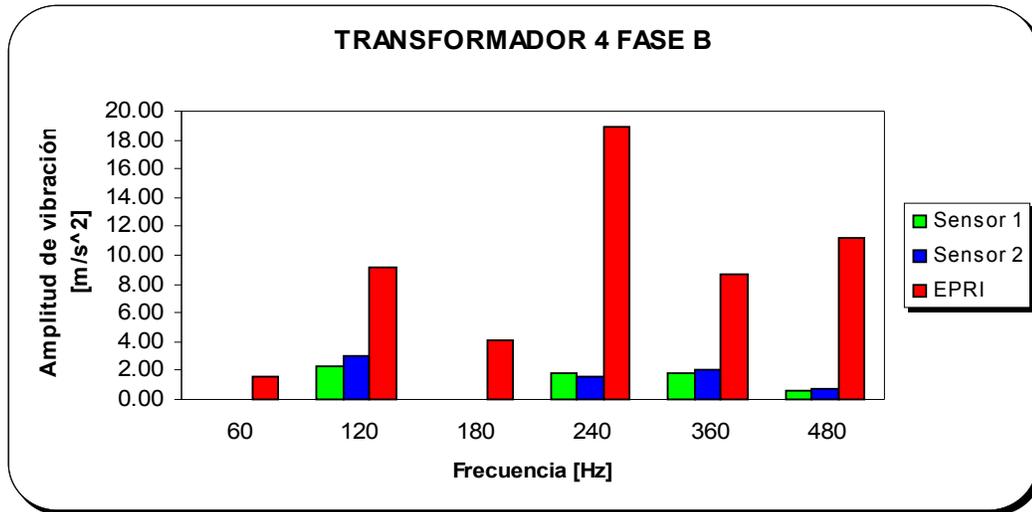
FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN SENSOR 2 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S2
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	1.49	2.63	3.31	0.75	7.12	3.06
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	4.39	1.03	0.41	0.96	0.99	1.55
360	3.00	1.58	0.89	2.78	1.83	2.02
480	1.91	0.48	0.18	0.49	0.74	0.76

En las tablas 24 y 25, se deja ver que para la frecuencia de 60Hz y de 180Hz los valores de amplitud de vibración captados por el sensor 1 y el sensor 2, en todas las caras del tanque del transformador 4 fase B son cero. En consecuencia, este equipo cumple con lo establecido por el Electric Power Research Institute (EPRI), sobre que las armónicas impares deben presentar valores de amplitud nula o muy cercana a cero.

En ambas tablas (24 y 25), se muestra que la cara que presenta el valor de amplitud de vibración más elevado es la cara frontal. En la tabla 24, el valor

promedio de amplitud de vibración más elevado es de 2,29 m/s² y en la tabla 25 el mayor valor promedio de amplitud de vibración es de 3,06 m/s²; ambas magnitudes se registraron para la frecuencia de 120Hz.

En las tablas 24 y 25 se expone que en la cara inferior se registraron valores de amplitud de vibración menores en comparación con los valores de amplitud registrados en las otras caras; lo que permite suponer que este equipo no presenta deformaciones mecánicas en la estructura del núcleo y/o en la estructura del devanado, según lo expresado por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), los valores de amplitud de vibración registrados en la cara inferior del tanque del transformador se encuentran relacionadas con la integridad mecánica de la estructura del núcleo y del devanado del equipo.



Gráfica 8

Comparación de los valores de amplitud de vibración promedios del transformador 4 Fase B versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por Electric Power Research Institute (EPRI)

En la gráfica 8, se nota que los valores de amplitud de vibración promedios registrados por el sensor 1 y por el sensor 2, para el transformador 4 fase B, son inferiores a los valores de referencia establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI) como valores aceptables de amplitud de vibración para transformadores; de tal forma que este equipo presenta valores de amplitud de vibración aceptables.

3.6.4.3 Transformador Fase C:

Tabla 26
Valores de amplitud de vibración Sensor 1 (S1)
Transformador 4 Fase C

FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN SENSOR 1 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S1
60	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.01
120	2.42	1.91	0.90	0.11	3.93	1.85
180	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.01
240	3.80	1.62	1.49	4.10	1.74	2.55
360	8.26	2.75	0.65	6.20	9.43	5.46
480	0.61	0.78	0.57	1.32	0.19	0.69

Tabla 27
Valores de amplitud de vibración Sensor 2 (S2)
Transformador 4 Fase C

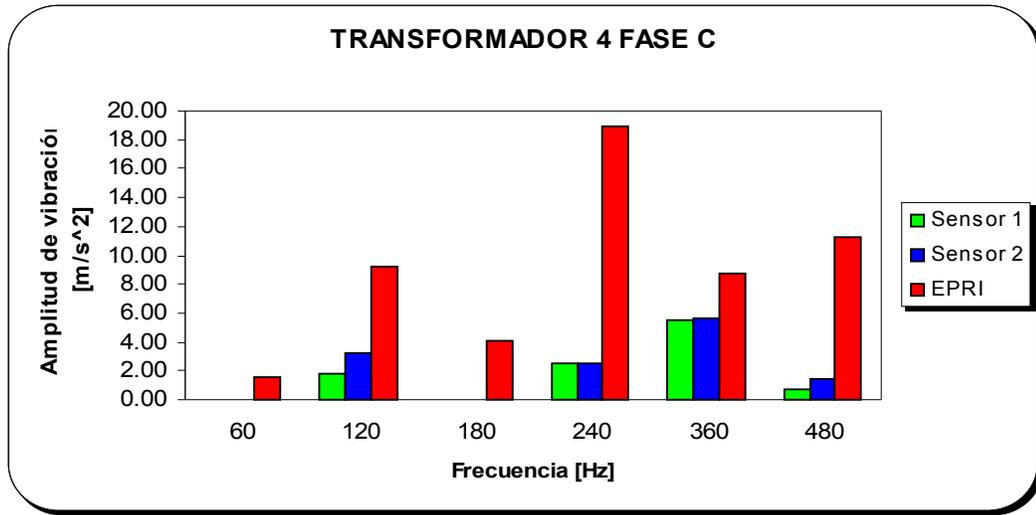
FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN SENSOR 2 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S2
60	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.03
120	4.18	2.29	3.30	0.36	5.95	3.21
180	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01
240	3.89	3.05	0.86	2.12	2.37	2.46
360	5.90	9.52	2.33	4.35	5.78	5.58
480	0.61	1.62	0.48	1.70	2.75	1.43

En las tablas 26 y 27, se puede observar que para las frecuencias de 60Hz y 180Hz los valores de amplitud de vibración captados por los sensores 1 y 2, en todas las caras del tanque del transformador 1 fase C son cero. En consecuencia, este equipo cumple con lo establecido por el Electric Power Research Institute (EPRI), donde las armónicas impares deben presentar valores de amplitud nula o muy cercana a cero.

En las tablas 26 y 27, se muestra que las caras con mayor amplitud de vibración registrada para el sensor 1 y sensor 2 son la cara inferior y la cara derecha.

Adicionalmente, para la frecuencia de 360Hz se presenta el valor de amplitud de vibración promedio más elevado. En la tabla 26 el mayor valor de amplitud de vibración es de 5,46 m/s² y en la tabla 27 el mayor valor de amplitud promedio es 5,58 m/s².

También se nota en las tablas 26 y 27 que en la cara inferior se registraron algunos valores de amplitud de vibración más pequeños al ser comparados con los valores de amplitud captados en las otras caras; en consecuencia es posible suponer que este equipo no presente deformaciones mecánicas en la estructura del núcleo y/o en la estructura del devanado, según lo expresado por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), los valores de amplitud de vibración registrados en la cara inferior del tanque del transformador se encuentran relacionadas con la integridad mecánica de la estructura del núcleo y del devanado del equipo.



Gráfica 9

Comparación de los valores de amplitud de vibración promedios del transformador 4 Fase C versus los valores máximos de amplitud de vibración establecidos por Electric Power Research Institute (EPRI)

En la gráfica 4, se observa que los valores de amplitud de vibración promedios registrados por los sensores 1 y 2, para el transformador 4 fase C, son inferiores a los valores de referencia establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI) como valores aceptables de amplitud de vibración para transformadores; debido a lo antes expuesto, este equipo presenta valores de amplitud de vibración aceptables.

3.6.5 Resultados del transformador 5:

Transformador trifásico asociado a la unidad No. 5 de la Casa de Máquinas I de la Central Hidroeléctrica “Simón Bolívar”, Guri.

Tabla 28
Valores de amplitud de vibración Sensor 1 (S1)
Transformador 5

FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN SENSOR 1 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S1
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	1.83	1.45	5.99	3.84	1.83	2.99
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	2.21	10.02	3.47	11.41	2.21	5.86
360	5.99	5.23	14.56	11.03	2.96	7.95
480	1.32	1.07	4.47	5.74	1.45	2.81

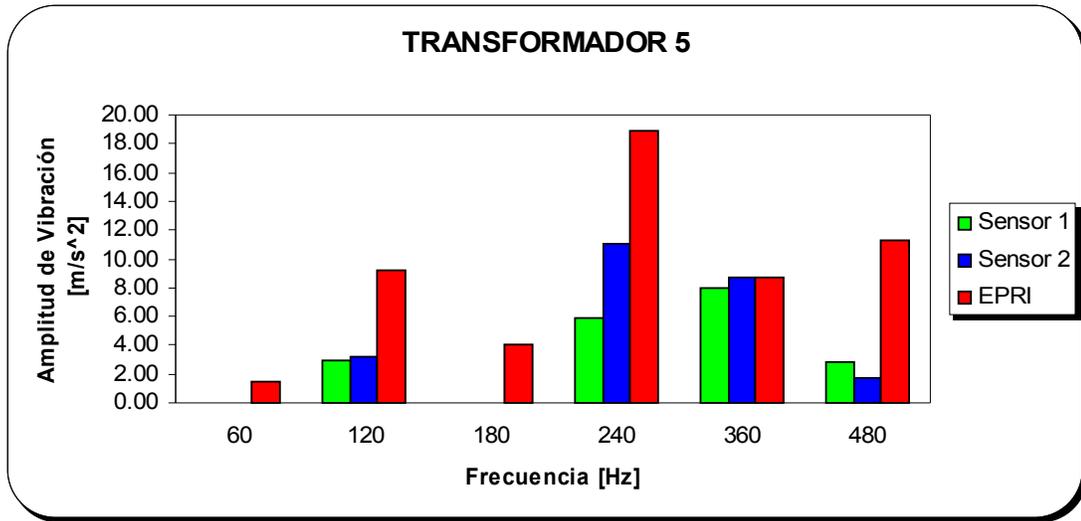
Tabla 29
Valores de amplitud de vibración Sensor 2 (S2)
Transformador 5

FRECUENCIA [Hz]	AMPLITUD DE VIBRACIÓN SENSOR 2 [m/s ²]					
	Frontal	Derecha	Posterior	Izquierda	Inferior	Promedio S2
60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	0.69	2.33	7.00	4.35	1.45	3.16
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	2.71	6.11	19.22	21.11	6.24	11.08
360	0.65	11.28	9.39	19.35	2.80	8.69
480	2.46	1.07	1.95	2.46	0.44	1.68

En las tablas 28 y 29, se muestra que para las frecuencias de 60Hz y 180Hz los valores de amplitud de vibración registrados por el sensor 1 y el sensor 2, en todas las caras del tanque del transformador 2 son cero; de tal forma que este equipo cumple con lo establecido por el Electric Power Research Institute (EPRI), donde las armónicas impares deben presentar valores de amplitud nula o muy cercana a cero. La cara izquierda presentó los mayores valores amplitud de vibración en general, para

ambos sensores. La mayor amplitud promedio en la tabla 28 tiene una magnitud de $7,95 \text{ m/s}^2$ en la frecuencia de 360Hz y en la tabla 29 la mayor amplitud promedio es de $11,08 \text{ m/s}^2$ en la frecuencia de 240Hz.

En la cara inferior se registraron magnitudes de amplitud de vibración pequeñas para todas las frecuencias de estudio, en comparación con las magnitudes registradas en otras caras del equipo. El Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), presenta en sus investigaciones que las vibraciones mecánicas registradas en la cara inferior del transformador están relacionadas con deformaciones internas del núcleo y del devanado. En consecuencia, al observar los niveles de vibración registrados en la cara inferior para este equipo, es probable que el mismo no presente deformaciones mecánicas en la estructura del núcleo y del devanado.



Gráfica 10

Comparación de los valores de amplitud de vibración promedios del transformador 5 versus los valores máximos de amplitud de vibración determinados por Electric Power Research Institute (EPRI)

En la gráfica 10 se observa que para la frecuencia de 360Hz el sensor 2 registró un valor promedio igual al valor de referencia ($8,69\text{m/s}^2$), para el resto de los valores de frecuencia los valores registrados para éste transformador son inferiores a los valores de referencia. En consecuencia, el transformador 5 presenta valores de amplitud de vibración que son inferiores y en un solo caso (360Hz) el valor es igual a los valores de referencia establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI) como valores aceptables de amplitud de vibración para transformadores, de tal forma que este equipo presenta valores de vibración aceptables. Sin embargo, el valor registrado para 360Hz debe ser objeto de atención; debido a que, cualquier variación en los valores de vibración registrados podría producir un aumento en el valor de amplitud de vibración promedio determinada para dicha frecuencia, causando que el transformador 5 presente valores de vibración no aceptables.

En la tabla 30 se presentan los resultados del diagnóstico probable de los transformadores de potencia evaluados durante esta investigación. El diagnóstico de los equipos se llevó a cabo considerando dos condiciones, los valores de amplitud de vibración registrados en la cara inferior y la comparación entre el nivel de vibración emitido por el equipo y los valores de referencia.

Tabla 30
Diagnóstico de los transformadores evaluados

EQUIPO	CRITERIO DEL EPRI	CRITERIO DEL IEEE	DIAGNÓSTICO
Transformador 1 Fase A	✓	✓	Aceptables
Transformador 1 Fase B	✓	✓	Aceptables
Transformador 1 Fase C	✓	✓	Aceptables
Transformador 2	x	x	No aceptables
Transformador 3	x	No es posible concluir	No aceptables
Transformador 4 Fase A	✓	✓	Aceptables
Transformador 4 Fase B	✓	✓	Aceptables
Transformador 4 Fase C	✓	✓	Aceptables
Transformador 5	✓	✓	Aceptables

CONCLUSIONES

El análisis de los datos de vibración obtenidos permite presentar las siguientes conclusiones:

- Se estableció un protocolo de pruebas confiable para la medición de las vibraciones emitidas por los transformadores de potencia, que permitió el diagnóstico del estado de vibración de los equipos evaluados.
- Las frecuencias predominantes presentes en los 5 transformadores de potencia seleccionados para este estudio son 120Hz, 240Hz, 360Hz y 480Hz.
- En todos los transformadores de potencia evaluados, los valores de amplitud de vibración registrados por ambos sensores en las frecuencias de 60Hz y 180Hz, son nulos.
- Según la evaluación realizada, los mayores valores de amplitud de vibración promedio registrados se encuentran en la frecuencia de 120Hz, para 4 de 9 transformadores y 8 de 18 sensores, representando el 44,44% en ambos casos. Teóricamente se esperaba que en 120Hz fuesen los mayores valores para todos los casos.

- Los niveles de vibración registrados en los transformadores 1 Fase A, Fase B y Fase C, los transformadores 4 Fase A, Fase B y Fase C y el transformador 5, son aceptables según los valores de referencias establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI).
- Los niveles de vibración registrados en los transformadores 2 y 3, no son aceptables según los valores de referencias establecidos por el Electric Power Research Institute (EPRI).
- 8 de los 9 transformadores de potencia evaluados (el 88,89% de ellos) no presentan deformaciones mecánicas en la estructura del núcleo y/o devanado, según el criterio de el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Solo en el caso del transformador 3 este criterio no es concluyente.

RECOMENDACIONES

Con el propósito de contribuir en el área de análisis de vibraciones en transformadores, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Realizar mediciones de vibraciones continuamente en los transformadores para construir el historial de vibraciones de cada equipo en particular, que permita obtener un patrón propio de vibración aceptable del transformador y proporcionar diagnósticos más certeros de estos equipos.
- Las pruebas de mediciones de vibraciones deben realizarse en conjunto con otras pruebas de rutina de los transformadores, con el propósito de poder relacionar fallas eléctricas con patrones característicos de vibración.
- Solicitar al fabricante, al momento de comprar un transformador, los niveles normales de vibración, ruido, prensado del núcleo con la finalidad de construir de forma sencilla el historial del equipo y la relación directa de las vibraciones con posibles defectos mecánicos.
- Para facilitar el proceso de medición y análisis de vibraciones, se recomienda la adquisición de analizadores portátiles, los cuales están en la capacidad de registrar la señal en el tiempo, el espectro de frecuencia, la amplitud de vibración para las diferentes frecuencias, entre otras, esto con la finalidad de orientar el estudio de vibraciones mecánicas como una herramienta de mantenimiento preventivo.

- Elaborar un manual de procedimiento para la realización de pruebas de vibración que incluya un índice global de diagnóstico del estado de vibración de cada transformador.
- Realizar un estudio más exhaustivo de los transformadores cuyo nivel de vibración se consideró no aceptables (transformadores 2 y 3)

BIBLIOGRAFÍA

Arias, F. (2004). *El Proyecto de Investigación: Introducción a la Metodología Científica*. Caracas. Episteme. 4ª Edición.

Beer, F. y E. Johnston (1997). *Mecánica vectorial para ingenieros*. México McGraw-Hill. 6ª Edición.

Chapman, S. (1993). *Máquinas Eléctricas*. México. McGraw-Hill 2ª Edición.

Charles, A. y Matthew, S (2002). *Circuitos eléctricos*. México. McGraw Hill.

Crede, C. (1970). *Conceptos sobre choque y vibración en el diseño de Ingeniería*. México. Prentice-Hall.

Feinberg, R. (1979). *Modern Power Transformer Practice*. England. The Macmillan Press LTD.

French, A. (1982). *Vibraciones y Ondas. Curso de Física del MIT*. Caracas. Editorial Reverté.

Roca Vila, R. (1982). *Vibraciones Mecánicas*. México. Editorial Limusa.

Sampieri R., Fernández C. y Baptista P. (2004). *Metodología de la Investigación*. Santiago de Chile. McGraw-Hill. 3ª Edición.

Staff, E. (1965) *Circuitos Magnéticos y Transformadores*. Caracas. Editorial Reverté.

Catlin, J. (1966). *MAINTENANCE ENGINEERING HAND BOOK*. McGraw-Hill. USA.

CODELECTRA (1986). *MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA, REQUERIMIENTOS DE USUARIOS Y FABRICANTES*. CADAFE. Caracas.

Harris, C. y Piersol, A. (2002). *HARRIS' SHOCK AND VIBRATION HAND BOOK*. McGraw-Hill. USA.

Hudson, D. (1961) *SHOCK AND VIBRATION HAND BOOK*. McGraw-Hill. USA.

Thomson, W. (1982). *MANUAL DEL INGENIERO MECÁNICO*. McGraw-Hill. Colombia.

Bartoletti C., Desiderio M., Di Carlo D., Fazio G., Muzi F., Sacerdote G. y Salvatori F. (2004). *Vibro-Acoustic Techniques to Diagnose Power Transformers*. IEEE Trans. Power Del., vol 19, No 1, January. pp. 221-219.

Berler Z., Golubev A., Rusov V., Tsvetkov V., Patterson C. (1999). *Vibro-Acoustic Method of Transformers Clamping Pressure Monitoring*. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, April 2-5, Anaheim, C.A, USA.

Bowers S., Davis W. y Graziano J. (2001). *Extending Transformer Life by Monitoring Vibration*. EPRI Proceedings Substation Equipment Diagnostics Conference IX. Pp. 216-224

García B., Burgos J.C. y Alonso A. (2006) *Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding Deformations Part I: Theoretical Foundation*. IEEE Trans. Power Del., vol 21, No 1, January. pp. 157-163.

García B., Burgos J. y Alonso A. (2006) *Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding Deformations Part II Experimental Verification*. IEEE Trans. Power Del., vol 21, No 1, January. pp. 166-169.

Geisecke J., Spencer G. y Richardson F. (1993-1198). *Lessons Learned from Substation Predictive Maintenance Project*. TC Project #7014, prepared for EPRI, 3412 Hillview Ave., Palo Alto, CA 94304.

Mechefske C.K., (1995). *Correlating Power Transformers tank vibration characteristics to winding looseness*. Insight-J. Non Destruct. Test. Cond. Monitor., vol. 37, No 8, August. pp. 599-604.

Oronoz, S. (2002). *Medición y Análisis de Vibraciones en Transformadores de Potencia Elevadores de Casa de Máquinas I de Gurí*. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”. Puerto Ordaz (Edo. Bolívar). Ingeniería Eléctrica.

Gavidia, A. y Velásquez, A. (2007). *Propuesta para la Medición de Vibraciones en Transformadores*. Universidad Central de Venezuela. Caracas. Escuela de Ingeniería Mecánica.

Morella, M., Padrón, M. y Figuera, L. (2005). *Instructivo para la Presentación de Tesis de Pregrado, Postgrado, Doctorado y Trabajos de Ascenso*. Universidad Central de Venezuela. Caracas.