

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

**INGENIERO ELÉCTRICO**

**Proyecto técnico con enfoque investigativo**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ANALIZADOR DE  
RESPUESTA EN FRECUENCIA PARA UN TRANSFORMADOR DE  
DISTRIBUCIÓN A ESCALA”**

**AUTORES:**

**VÍCTOR ANDRÉS LOJA CHIMBO  
JOHNY FRANCISCO MOLINA MERCHÁN**

**TUTOR:**

**ING. FLAVIO ALFREDO QUIZHPI PALOMEQUE**

Cuenca - Ecuador

2017

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, **Víctor Andrés Loja Chimbo**, con documento de identificación N° **010525117-7**, y **Johny Francisco Molina Merchán**, con documento de identificación N° **010461182-7**, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud, de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ANALIZADOR DE RESPUESTA EN FRECUENCIA PARA UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN A ESCALA**”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: **Ingeniero Eléctrico**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos éste documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, Octubre de 2017



---

Víctor Andrés Loja Chimbo  
C.I. 010525117-7



---

Johny Francisco Molina Merchán  
C.I. 010461182-7

## CERTIFICACIÓN.

Yo, Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque, declaro que bajo mi tutoría, fue desarrollado el trabajo de titulación “Diseño e Implementación de un Analizador de Respuesta en Frecuencia para un Transformador de Distribución a Escala”, realizado por Víctor Andrés Loja Chimbo y Johny Francisco Molina Merchán, obteniendo el Proyecto Técnico con Enfoque Investigativo, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, Octubre de 2017



---

Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque  
C.I. 010225748-2  
TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

## **DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, Víctor Andrés Loja Chimbo, con documento de identificación N° 010525117-7 y Johny Francisco Molina Merchán, con documento de identificación N° 010461182-7, autores del trabajo de titulación “Diseño e Implementación de un Analizador de Respuesta en Frecuencia para un Transformador de Distribución a Escala.” certificamos que el total contenido de este proyecto técnico con enfoque investigativo es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, Octubre de 2017



---

Víctor Andrés Loja Chimbo  
C.I. 010525117-7



---

Johny Francisco Molina Merchán  
C.I. 010461182-7

## **DEDICATORIA**

Para Víctor Loja y Mercedes Chimbo mis padres y para mi hermano Fabián Loja por todo el apoyo y paciencia que tuvieron en el transcurso de la carrera.

Víctor Andrés Loja Chimbo

Para José Molina y Amada Merchán, mis padres porque siempre estuvieron ahí con el apoyo moral y económico, también dedico a toda la docencia que supo compartir sus conocimientos

Johny Francisco Molina Merchán

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente a Dios por habernos permitido culminar con éxito, ayudándonos con salud, entendimiento y fuerza de voluntad, para nunca decaer en las situaciones difíciles de la carrera.

A nuestro tutor, Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque por el apoyo y respaldo, que día a día nos brindó en el transcurso de nuestro proyecto, así como también agradecemos al Ing. José Manuel Aller Castro, que sin ser parte de nuestra investigación nos colaboró con ideas muy importantes para avanzar y culminar el tema.

Víctor Loja C.  
Johny Molina M.

## RESÚMEN

El transformador está propenso a un sin número de fallas a lo largo de su vida útil, los mismos que deben ser tratados y diagnosticados a tiempo, existiendo diversos métodos de análisis y uno de ellos es un Análisis de Respuesta en Frecuencia propuesto en este proyecto, que está basado en conceptos de un FRA normalizado.

El proceso tiene lugar con un generador de funciones, como fuente del sistema, inyectando la señal de análisis al transformador, los datos son receptados y visualizados en un osciloscopio, para luego ser procesados en un ordenador y obtener una función de transferencia generando un diagnóstico del estado del transformador.

El patrón original sin falla se lo denomina “Huella Digital” con el que es comparado cada tipo de falla, originadas intencionalmente con el fin de demostrar y validar la metodología, analizando diferentes frecuencias que son comparadas con la huella digital.

Una vez probadas las fallas de Corto Circuito, Sobre Carga, Corto Circuito entre Espiras y Degradación de Aceite en un transformador modelo, se observa claramente una variación del espectro en sus respectivas respuestas en función de transferencia, dicho esto las señales son tratadas y minuciosamente examinadas para así llegar a la conclusión que la propuesta es válida.

El momento de realizar las pruebas se utilizan varios equipos generadores de señal como son: NI ELVIS, DAQ, MAX038, los cuales debido a su capacidad no solventan la idea de propuesta, utilizando finalmente un generador de funciones y un osciloscopio de laboratorio, los mismos que satisfacen las necesidades de frecuencia a altos rangos, obteniendo datos de visualización a (1Gsa / seg).

Para asegurar que la propuesta es funcional, se toma en cuenta varios aspectos como: Corriente del equipo, resistencia limitadora, impedancia del equipo, impedancia del bobinado primario/secundario y efecto tanque.

Los espectros se los divide en tres regiones clasificándolos en: baja, fundamental y alta frecuencia, esto se lo realiza para un mejor procesamiento de cada señal teniendo en cuenta que cada falla es cotejada siempre con la original (Huella Digital), que es única para cada transformador.

Con la reseña descrita, se aplica el mismo procedimiento para un transformador de distribución, obteniendo resultados positivos y con gráficas compactadas con todas las fallas, incluyendo la

huella digital, pudiendo constatar cada falla encontrada, que con ayuda de tablas se observa cuanto varía con respecto a su original dando valores porcentuales y numéricos.

## **ABSTRACT**

Transformers are prone to a number of faults over their lifetime, for this reason, they must be checked and diagnosed from time to time, before faults occur. There are many methods of checking and diagnosing transformers, being one of them the so-called "frequency response", which is proposed in the present work, this method is based on concepts of a standard FRA (Frequency Response Analysis).

The process consists of a function generator, which acts as the source of the signal that is injected in the transformer, the data is visualized through an oscilloscope, and then processed in a computer, thus, a transfer function is obtained, this transfer function allows to diagnose the transformer.

The original state (no fault) of the transformer, is known as the fingerprint of it. This known state is used to compare to each of the failures that are caused intentionally to validate the methodology, analyzing at different frequencies and comparing with the fingerprint of the transformer.

The most common faults that can occur in a transformer are short circuit, overload, inter turn shorts, and oil degradation. The tests done in a test transformer, clearly show a variation in the spectrum of the corresponding responses in the transfer function. Having said that, the signals are treated and meticulously examined, to conclude that the proposal is valid.

During the tests, various pieces of signal generating equipment were used, such as: NI ELVIS, DAQ, MAX038, which, due to their capacity, did not satisfy the requirements of the proposed idea. The solution to this problem was to use a function generator and an oscilloscope, this equipment did satisfy the requirements of high frequency needed, obtaining data which was visualized at a rate of 1 Gsa/sec.

To make sure the proposal was working, various aspects were taken into consideration: equipment current, limiting resistance, equipment impedance, primary and secondary transformer's winding impedance, and the tank effect.

The spectrum is divided into three regions, classifying it into low, fundamental and high frequency, this is done to better treat each signal, considering that each fault is always correlated with the original state or fingerprint, which is unique for each transformer.

The same procedure described here, is used in distribution transformers, obtaining positive results. All the graphics obtained during the tests, are compared with the fingerprint, and with the help of tables, it is possible to see how much has changed with respect to the original, numeric and percentage values are used.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESÚMEN.....	I
ABSTRACT.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
INTRODUCCIÓN .....	XI
GRUPO OBJETIVO .....	XII
OBJETIVOS .....	XII
OBJETIVO GENERAL: .....	XII
OBJETIVOS ESPECÍFICOS: .....	XII
NOMENCLATURA .....	XIII
CAPÍTULO 1.....	1
1.1 EL TRANSFORMADOR .....	1
1.1.1 GENERALIDADES.....	1
1.1.2 CARACTERÍSTICAS.....	1
1.1.3 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS.....	2
1.1.3.1 NÚCLEO.....	2
1.1.3.2 DEVANADOS.....	3
1.1.3.3 REFRIGERACIÓN.....	3
1.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO .....	3
1.3 TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS .....	4
1.3.1 POTENCIAS COMERCIALES PARA TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS DE POSTERÍA HASTA 500 KVA.....	5
1.4 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.....	5
1.5 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR.....	6
1.6 PRUEBAS EN TRANSFORMADORES.....	7
1.6.1 PRUEBAS TIPO.....	7
1.6.2 PRUEBAS DE RUTINA .....	7
1.6.3 PRUEBAS ESPECIALES .....	8
1.6.4 PRUEBAS ELÉCTRICAS.....	8
1.6.4.1 PRUEBAS DE RUTINA.....	8
1.6.4.2 PRUEBAS TIPO.....	8
1.6.4.3 PRUEBAS ESPECIALES.....	8
1.7 DISPOSICIONES GENERALES .....	9
1.8 REQUISITOS EN TRANSFORMADORES.....	9
1.9 INSPECCIÓN EN TRANSFORMADORES.....	11
1.10 ANÁLISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA.....	11
1.10.1 GENERALIDADES.....	11
1.10.2 OTROS TIPOS DE FALLAS .....	13
1.10.2.1 INTEGRIDAD MECÁNICA.....	13
1.10.2.2 DEFORMACIÓN DEL DEVANADO.....	13
1.10.2.3 TENSION ELECTROMAGNÉTICA.....	13
1.11 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA.....	13

1.11.1 MÉTODO FRA.....	13
1.11.2 MÉTODO DE VOLTAJE DE IMPULSO (LVI).....	13
1.11.3 EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE.....	14
1.11.3.1 FRANALIZER.....	14
1.11.3.2 EQUIPO DE ENTRENAMIENTO NI ELVIS II.....	15
1.11.3.3 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NI DAQ.....	16
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ANALIZADOR DE RESPUESTA EN FRECUENCIA PROPUESTO.....</b>	<b>17</b>
2.1.1 DESCRIPCIÓN.....	17
2.1.2 PROPUESTA.....	17
2.1.3 GENERADOR DE FUNCIONES.....	19
2.1.4 TRANSFORMADOR MODELO.....	19
2.1.5 TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICO DE 5KVA.....	20
2.1.6 OSCILOSCOPIO.....	21
<b>2.2 EXPERIMENTACIÓN DE EQUIPOS PARA OBTENER UN ANALIZADOR DE RESPUESTA EN FRECUENCIA ÓPTIMO.....</b>	<b>22</b>
2.2.1 FRA TRADICIONAL.....	22
2.2.2 EQUIPAMIENTO DE LABORATORIO.....	23
<b>2.3 ANÁLISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA (FRA) TRADICIONAL.....</b>	<b>25</b>
2.3.1 PROPUESTA DE METODOLOGÍA.....	26
2.3.2 GUÍA DE ANÁLISIS.....	27
2.3.3 REGIONES DE ANÁLISIS.....	27
2.3.3.1 REGIÓN 1. EFECTOS EN EL NÚCLEO.....	27
2.3.3.2 REGIÓN 2. INTERACCIÓN ENTRE BOBINADOS.....	28
2.3.3.3 REGIÓN 3. EFECTO DE LA ESTRUCTURA DE DEVANADO DEL DEVANADO BAJO PRUEBA.....	28
2.3.3.4 REGIÓN 4. EFECTO DE LAS DERIVACIONES Y DE LAS DERIVACIONES DE PUESTA A TIERRA.....	28
<b>2.4 PRUEBAS DE ESTRÉS EN TRANSFORMADORES.....</b>	<b>28</b>
2.4.1 PRUEBA DE CORTO CIRCUITO.....	28
2.4.2 PRUEBA DE SOBRE CARGA.....	28
2.4.3 CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS.....	29
2.4.4 DEGRADACIÓN DE ACEITE.....	29
<b>2.5 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA “ORIGINAL – HUELLA”.....</b>	<b>29</b>
<b>2.6 PRUEBAS EN TRANSFORMADOR MODELO.....</b>	<b>33</b>
2.6.1 PROCEDIMIENTO PARA CONFIGURACIÓN DE EQUIPOS DE MEDICIÓN.....	33
2.6.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE CORTO CIRCUITO.....	34
2.6.3 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE SOBRE CARGA.....	35
2.6.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS.....	35
2.6.5 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE DEGRADACIÓN DE ACEITE.....	36
<b>2.7 PRUEBAS EN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5KVA.....</b>	<b>37</b>
2.7.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE CORTO CIRCUITO.....	37
2.7.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE SOBRE CARGA.....	39
2.7.3 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS.....	41
2.7.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE DEGRADACIÓN DE ACEITE.....	42
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>45</b>

<b>3 SECCIONAMIENTO POR REGIONES EN BASE EXPERIMENTAL DE GRÁFICAS RESULTANTES PARA FALLAS EN LA PROPUESTA DE METODOLOGÍA.....</b>	<b>45</b>
<b>3.2 TRANSFORMADOR MODELO .....</b>	<b>46</b>
3.2.1 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN A BAJA FRECUENCIA .	
.....	46
3.2.2 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL.....	47
3.2.3 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN A ALTA FRECUENCIA	48
<b>3.3 TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICO DE 5 KVA.....</b>	<b>49</b>
3.3.2 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN A BAJA FRECUENCIA EN EL BOBINADO X2-X3.....	50
3.3.3 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL EN EL BOBINADO X1-X2. ....	51
3.3.4 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL EN EL BOBINADO X2-X3. ....	52
3.3.5 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN A ALTA FRECUENCIA EN EL BOBINADO X1-X2.....	53
3.3.6 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN A ALTA FRECUENCIA EN EL BOBINADO X2-X3.....	54
<b>3.4 FRA TRADICIONAL CON NUEVO TRANSFORMADOR MODELO .....</b>	<b>55</b>
3.4.1 GUÍA PRÁCTICA DE UN FRA. ....	55
3.4.2 CÁLCULOS SEGÚN EL PRINCIPIO DE UN FRA TRADICIONAL. ....	56
3.4.3 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA UN FRA TRADICIONAL. ....	57
3.4.3.1 SEÑAL DE INGRESO Y SALIDA ORIGINAL SIN AMPLIFICADOR DEL NUEVO TRANSFORMADOR MODELO.....	57
3.4.3.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ORIGINAL SIN AMPLIFICACIÓN EN IMPEDANCIA PARA UN NUEVO TRANSFORMADOR MODELO .....	58
3.4.3.3 SEÑAL DE INGRESO Y SALIDA ORIGINAL CON AMPLIFICADOR DEL NUEVO TRANSFORMADOR MODELO.....	59
3.4.3.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ORIGINAL CON AMPLIFICACIÓN EN IMPEDANCIA PARA UN NUEVO TRANSFORMADOR MODELO .....	60
3.4.3.5 SEÑAL DE INGRESO Y SALIDA EN FALLA DE CORTO CIRCUITO SIN AMPLIFICADOR DEL NUEVO TRANSFORMADOR MODELO.....	61
3.4.3.6 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN CORTO CIRCUITO SIN AMPLIFICACIÓN EN IMPEDANCIA PARA UN NUEVO TRANSFORMADOR MODELO.....	62
3.4.3.7 SEÑAL DE INGRESO Y SALIDA EN FALLA DE CORTO CIRCUITO CON AMPLIFICADOR DEL NUEVO TRANSFORMADOR MODELO.....	63
3.4.3.8 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN CORTO CIRCUITO CON AMPLIFICACIÓN EN IMPEDANCIA PARA UN NUEVO TRANSFORMADOR MODELO .....	64
3.4.4 COTEJO DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA ORIGINAL - FALLA.....	65
3.4.4.1 COTEJO ORIGINAL – FALLA SIN AMPLIFICACIÓN.....	65
3.4.4.2 COTEJO ORIGINAL – FALLA CON AMPLIFICACIÓN.....	66
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>67</b>
<b>4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>69</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>70</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>71</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. TIPOS DE NÚCLEOS EN TRANSFORMADORES. ....	2
FIGURA 2. BOBINADO EN NÚCLEO.....	3
FIGURA 3. ESQUEMA ELÉCTRICO DE UN TRANSFORMADOR.[3].....	4
FIGURA 4. TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.....	4
FIGURA 5. TRANSFORMADOR TRIFÁSICO. [3].....	5
FIGURA 6. CIRCUITO EQUIVALENTE DE TRANSFORMADOR.[3].....	7
FIGURA 7. CIRCUITO EQUIVALENTE ELÉCTRICO DE UN TRANSFORMADOR REDUCIDO AL PRIMARIO.[3].....	7
FIGURA 8. EQUIPO FRANALIZER.[7].....	14
FIGURA 9. EQUIPO DE ENTRENAMIENTO NI ELVIS II. ....	15
FIGURA 10. NI DAQ .....	16
FIGURA 11. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL GENERADOR DE FUNCIONES CON MAX038[10].....	18
FIGURA 12. DIAGRAMA DE UN ANALIZADOR DE RESPUESTA EN FRECUENCIA PARA UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN Y MODELO. ....	19
FIGURA 13. GENERADOR DE FUNCIONES DE LA MARCA GWINSTEK CON NÚMERO DE SERIE SFG-2110. ....	19
FIGURA 14. TRANSFORMADOR MODELO Y PROTOTIPO DE CUBA. ....	20
FIGURA 15. DIAGRAMA CIRCUITAL DE CELDAS REPRESENTATIVOS PARA UN TRANSFORMADOR.[11].....	23
FIGURA 16. DIAGRAMA DE BODE PARA LA IMPEDANCIA DE UN ANALIZADOR FRA ESPECIFICANDO SUS CELDAS DE ANÁLISIS.[11] .....	23
FIGURA 17. FOTO REAL DE UN ANALIZADOR DE RESPUESTA EN FRECUENCIA PARA UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN CON SUS EQUIPOS UTILIZADOS. ....	24
FIGURA 18. FFT ORIGINAL DE LA SEÑAL DE INGRESO PARA EL TRANSFORMADOR MODELO. ....	30
FIGURA 19. FFT ORIGINAL DE LA SEÑAL DE SALIDA PARA EL TRANSFORMADOR MODELO. ....	30
FIGURA 20. FT ORIGINAL PARA EL TRANSFORMADOR MODELO. ....	31
FIGURA 21. FFT ORIGINAL DE LA SEÑAL DE INGRESO PARA EL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN DE 5 kVA. ....	31
FIGURA 22. FFT ORIGINAL DE LA SEÑAL DE SALIDA PARA EL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN DE 5 kVA ENTRE BOBINADOS (X1-X2). ....	32
FIGURA 23. FFT ORIGINAL DE LA SEÑAL DE SALIDA PARA EL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN DE 5 kVA ENTRE BOBINADOS (X2-X3). ....	32
FIGURA 24. FT ORIGINAL DE LA SEÑAL DE SALIDA PARA EL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN DE 5 kVA ENTRE BOBINADOS (X1-X2). ....	32
FIGURA 25. FT ORIGINAL DE LA SEÑAL DE SALIDA PARA EL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN DE 5 kVA ENTRE BOBINADOS (X2-X3). ....	33
FIGURA 26. FFT DE TRANSFORMADOR MODELO EN CONDICIÓN DE FALLA DE CORTO CIRCUITO. ....	34
FIGURA 27. FT DE TRANSFORMADOR MODELO EN FALLA DE CORTO CIRCUITO.....	34
FIGURA 28. FFT DE TRANSFORMADOR MODELO EN CONDICIÓN DE FALLA DE SOBRE CARGA.....	35
FIGURA 29. FT DE TRANSFORMADOR MODELO EN FALLA DE SOBRE CARGA. ....	35
FIGURA 30. FFT DE TRANSFORMADOR MODELO EN CONDICIÓN DE FALLA DE CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS. ....	36
FIGURA 31. FT DE TRANSFORMADOR MODELO EN FALLA DE CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS.....	36
FIGURA 32. FFT DE TRANSFORMADOR MODELO EN CONDICIÓN DE FALLA DE DEGRADACIÓN DE ACEITE. ....	37
FIGURA 33. FT DE TRANSFORMADOR MODELO EN FALLA DE DEGRADACIÓN DE ACEITE.....	37
FIGURA 34. FFT DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5kVA EN CONDICIÓN DE FALLA DE CORTO CIRCUITO PARA EL BOBINADO X1-X2. ....	38
FIGURA 35. FFT DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5kVA EN CONDICIÓN DE FALLA DE CORTO CIRCUITO PARA EL BOBINADO X2-X3. ....	38
FIGURA 36. FT DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5kVA EN CONDICIÓN DE FALLA DE CORTO CIRCUITO PARA EL BOBINADO X1-X2. ....	38
FIGURA 37. FT DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5kVA EN CONDICIÓN DE FALLA DE CORTO CIRCUITO PARA EL BOBINADO X2-X3. ....	39
FIGURA 38. FFT DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5kVA EN CONDICIÓN DE FALLA DE SOBRECARGA PARA EL BOBINADO X1-X2. ....	39

FIGURA 39. FFT DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5kVA EN CONDICIÓN DE FALLA DE SOBRECARGA PARA EL BOBINADO X2-X3. ....	40
FIGURA 40. FT DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5kVA EN CONDICIÓN DE FALLA DE SOBRE CARGA PARA EL BOBINADO X1-X2.....	40
FIGURA 41. FT DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5kVA EN CONDICIÓN DE FALLA DE SOBRE CARGA PARA EL BOBINADO X2-X3.....	40
FIGURA 42. FFT DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5kVA EN CONDICIÓN DE FALLA DE CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS PARA EL BOBINADO X1-X2. ....	41
FIGURA 43. FFT DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5kVA EN CONDICIÓN DE FALLA DE CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS PARA EL BOBINADO X2-X3. ....	41
FIGURA 44. FT DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5kVA EN CONDICIÓN DE FALLA DE CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS PARA EL BOBINADO X1-X2. ....	42
FIGURA 45. FT DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5kVA EN CONDICIÓN DE FALLA DE CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS PARA EL BOBINADO X2-X3. ....	42
FIGURA 46. FFT DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5kVA EN CONDICIÓN DE FALLA DE DEGRADACIÓN DE ACEITE PARA EL BOBINADO X1-X2. ....	43
FIGURA 47. FFT DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5kVA EN CONDICIÓN DE FALLA DE DEGRADACIÓN DE ACEITE PARA EL BOBINADO X2-X3. ....	43
FIGURA 48. FT DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5kVA EN CONDICIÓN DE FALLA DE DEGRADACIÓN DE ACEITE PARA EL BOBINADO X1-X2.....	43
FIGURA 49. FT DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5kVA EN CONDICIÓN DE FALLA DE DEGRADACIÓN DE ACEITE PARA EL BOBINADO X2-X3. ....	44
FIGURA 50. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN CONDICIÓN DE FALLA EN TODO EL ESPECTRO FRECUENCIAL. ....	45
FIGURA 51. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN A BAJA FRECUENCIA.....	46
FIGURA 52. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL. ....	47
FIGURA 53. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN DE ALTA FRECUENCIA. ....	48
FIGURA 54. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN DE BAJA FRECUENCIA EN BOBINADO X1 – X2. ....	49
FIGURA 55. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN DE BAJA FRECUENCIA EN BOBINADO X2 – X3. ....	50
FIGURA 56. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL EN BOBINADO X1 – X2.....	51
FIGURA 57. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL EN BOBINADO X2 – X3.....	52
FIGURA 58. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN DE ALTA FRECUENCIA EN BOBINADO X1 – X2.....	53
FIGURA 59. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN DE ALTA FRECUENCIA EN BOBINADO X2 – X3.....	54
FIGURA 60. ESQUEMA FUNDAMENTAL DE UN ANALIZADOR FRA PARA UN TRANSFORMADOR .....	55
FIGURA 61. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ORIGINAL SIN AMPLIFICADOR.....	59
FIGURA 62. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ORIGINAL CON AMPLIFICADOR.....	61
FIGURA 63. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN CORTO CIRCUITO SIN AMPLIFICADOR. ....	63
FIGURA 64. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN CORTO CIRCUITO CON AMPLIFICADOR. ....	65
FIGURA 65. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ORIGINAL Y CORTO CIRCUITO SIN AMPLIFICADOR. ....	65
FIGURA 66. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ORIGINAL Y CORTO CIRCUITO CON AMPLIFICADOR. ....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. POTENCIAS COMERCIALES DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS SEGÚN ECUATRAN.[4].....	5
TABLA 2. TIPOS DE CONEXIONES MÁS COMUNES EN UN TRANSFORMADOR. ....	6
TABLA 3. TEMPERATURA DE REFERENCIA.[1].....	9
TABLA 4. TOLERANCIAS EN TRANSFORMADORES.[1].....	10
TABLA 5. DIMENSIONES DE TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN Y MODELO.[4].....	20
TABLA 6. PARTES CONSTITUTIVAS DE TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN.[4].....	21
TABLA 7. VARIACIÓN PORCENTUAL ENTRE FALLAS EN REGIÓN A BAJA FRECUENCIA. ....	46
TABLA 8. VARIACIÓN PORCENTUAL ENTRE FALLAS EN REGIÓN DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL. ....	47
TABLA 9. VARIACIÓN PORCENTUAL ENTRE FALLAS EN REGIÓN DE ALTA FRECUENCIA. ....	48
TABLA 10. VARIACIÓN PORCENTUAL ENTRE FALLAS EN REGIÓN DE BAJA FRECUENCIA EN BOBINADO X1 – X2. ....	50
TABLA 11. VARIACIÓN PORCENTUAL ENTRE FALLAS EN REGIÓN DE BAJA FRECUENCIA EN BOBINADO X2 – X3. ....	51
TABLA 12. VARIACIÓN PORCENTUAL EN FALLAS DE REGIÓN EN FRECUENCIA FUNDAMENTAL DEL BOBINADO X1-X2. ....	52
TABLA 13. VARIACIÓN PORCENTUAL EN FALLAS DE REGIÓN EN FRECUENCIA FUNDAMENTAL DEL BOBINADO X2-X3. ....	53
TABLA 14. VARIACIÓN PORCENTUAL ENTRE FALLAS EN REGIÓN DE ALTA FRECUENCIA EN BOBINADO X1 – X2. ....	54
TABLA 15. VARIACIÓN PORCENTUAL ENTRE FALLAS EN REGIÓN DE ALTA FRECUENCIA EN BOBINADO X2 – X3. ....	55
TABLA 16. DATOS DE SEÑAL DE INGRESO SIN AMPLIFICACIÓN Y SIN FALLA DE UN TRANSFORMADOR MODELO NUEVO.....	57
TABLA 17. DATOS DE SEÑAL DE SALIDA SIN AMPLIFICACIÓN Y SIN FALLA DE UN TRANSFORMADOR MODELO NUEVO.....	58
TABLA 18. DATOS DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ORIGINAL SIN AMPLIFICACIÓN EN IMPEDANCIA PARA UN NUEVO TRANSFORMADOR MODELO. ....	58
TABLA 19. DATOS DE SEÑAL DE INGRESO CON AMPLIFICACIÓN Y SIN FALLA DE UN TRANSFORMADOR MODELO NUEVO.....	59
TABLA 20. DATOS DE SEÑAL DE SALIDA CON AMPLIFICACIÓN Y SIN FALLA DE UN TRANSFORMADOR MODELO NUEVO. ....	60
TABLA 21. DATOS DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ORIGINAL CON AMPLIFICACIÓN EN IMPEDANCIA PARA UN NUEVO TRANSFORMADOR MODELO. ....	60
TABLA 22. DATOS DE SEÑAL DE INGRESO SIN AMPLIFICACIÓN EN CORTO CIRCUITO DE UN TRANSFORMADOR MODELO NUEVO.....	61
TABLA 23. DATOS DE SEÑAL DE SALIDA SIN AMPLIFICACIÓN EN CORTO CIRCUITO DE UN TRANSFORMADOR MODELO NUEVO. ....	62
TABLA 24. DATOS DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN CORTO CIRCUITO SIN AMPLIFICACIÓN EN IMPEDANCIA PARA UN NUEVO TRANSFORMADOR MODELO. ....	62
TABLA 25. DATOS DE SEÑAL DE INGRESO CON AMPLIFICACIÓN EN CORTO CIRCUITO DE UN TRANSFORMADOR MODELO NUEVO.....	63
TABLA 26. DATOS DE SEÑAL DE SALIDA CON AMPLIFICACIÓN EN CORTO CIRCUITO DE UN TRANSFORMADOR MODELO NUEVO.....	64
TABLA 27. DATOS DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN CORTO CIRCUITO CON AMPLIFICACIÓN EN IMPEDANCIA PARA UN NUEVO TRANSFORMADOR MODELO.....	64

## INTRODUCCIÓN

El método en su principio comienza con un estudio investigativo sobre una señal sinusoidal y su Transformada Rápida de Fourier, que se obtiene de un osciloscopio o mediante software, que permite visualizar el espectro de la operación matemática.

Teniendo en cuenta todos los datos obtenidos, los limitantes e inconvenientes que se presentan a lo largo del proyecto técnico, detallando uno a uno en el transcurso de la resolución del mismo, se obtienen resultados positivos en cada una de las fallas aplicadas a transformadores nuevos de baja y alta potencia, llegando a citar los aspectos más relevantes que justifican una propuesta clara y totalmente funcional.

Las primeras gráficas realizadas en el capítulo dos muestran las funciones de transferencia en su estado original y en falla que efectivamente cambian su forma dependiendo del tipo de falla al que se somete a un transformador, comparándola siempre con la huella digital.

En el capítulo tres se sobreponen las funciones de transferencia y se compara las fallas con la huella digital, con el fin de observar el comportamiento de cada una de ellas dependiendo del tipo de falla que las afecta.

Para un entendimiento más a detalle se secciona el espectro en tres regiones denominadas: Baja, fundamental y alta frecuencia, las mismas que nos ayudan a entender de manera más profunda las variaciones de las fallas en cada frecuencia de análisis, teniendo presente siempre que existe variación con respecto a la huella digital.

Las gráficas espectrales son también acotadas con valores numéricos y valores porcentuales para ver como varía entre cada falla, los mismos que son expuestos en el capítulo tres por medio de tablas, que en forma de complemento constan de datos esenciales para futuros análisis.

## **GRUPO OBJETIVO**

La culminación de éste proyecto tiene como propósito establecer un método de análisis para transformadores comerciales, ya sea en la fabricación, en la distribución en una empresa comercializadora de energía y que tengan como respaldo la certificación FRA de las pruebas, de esta manera, facilitar la inspección en un transformador de sus características principales de operación, y acortar el tiempo en el que se toma decisiones para su mantenimiento o reemplazo.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL:**

Proponer un Método de Análisis de Respuesta en Frecuencia para Transformadores, Encontrando el Diseño Adecuado para su Posterior Implementación.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Diseñar un analizador FRA funcional que permita obtener gráficas en un plano coordinado, frecuencia versus tiempo.
- Estudiar las formas de onda obtenidas por el analizador FRA, para determinar las características específicas del transformador.
- Investigar documentos relacionados con el analizador FRA para su comparación con la norma IEEE para estandarizar las pruebas.
- Implementación del analizador FRA sobre un modelo a escala de un transformador.

## NOMENCLATURA

SEP	Sistema Eléctrico de Potencia.
FRA	Frecuency Response Analisys.
TAP	Derivación de Transformación.
BIL	Basic Isulation Level.
CUBA	Chasis protector del transformador y recolector de aceite de refrigeración.
ECUATRAN	Empresa Ecuatoriana de Servicio Eléctrico para Transformadores de Media y Alta Potencia.
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización.
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana.
FFT	Transformada Rápida de Fourier.
FT	Función de Transferencia.
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
f.m.e.	Fuerza Electromotriz.
FFT <sub>in</sub>	Transformada Rápida de Fourier de Ingreso.
FFT <sub>out</sub>	Transformada Rápida de Fourier de Salida.
STD	Estándar.
V <sub>pp</sub>	Voltaje pico pico.
SWEEP	Barrido de Frecuencia.



# CAPÍTULO 1

## 1.1 EL TRANSFORMADOR

### 1.1.1 GENERALIDADES.

El transformador es un dispositivo electromagnético que permite aumentar o disminuir la tensión y la intensidad de forma que su potencia es constante, en forma ideal, es decir, sin involucrar pérdidas, definida como una máquina estática, que tiene la finalidad de transmitir energía eléctrica, con características específicas deseadas, a un sistema eléctrico de potencia diferente. [1]

Éstas máquinas, hoy en día son un componente de vital importancia, su estudio se vuelve prioritario, en un sistema eléctrico de potencia “SEP“, permiten transportar la energía a largas distancias, evitando pérdidas considerables a un costo de mantenimiento relativamente bajo.

Los transformadores actualmente se encuentran utilizados en la mayor parte de los equipos eléctricos y electrónicos, sin excluir la alta tensión, en baja tensión funcionan como adaptadores, fuentes de tensión, equipos de medición, etc. Mientras que en la alta tensión los podemos observar en la transmisión de energía, como son las subestaciones, haciendo de reductores o elevadores de tensión, proporcionando niveles de trabajo adecuados. [2]

Un transformador obedece ciertos parámetros eléctricos y características constructivas, que permiten hacer un uso adecuado de éste, rigiéndose a un circuito magnético y un circuito eléctrico, transfiriendo energía eléctrica de un bobinado a otro, generándose un Efecto Joule, el mismo que es reducido mediante sistemas de refrigeración.

### 1.1.2 CARACTERÍSTICAS.

El transformador tiene como principio físico-eléctrico la inducción electromagnética, aplicando una fuerza electromotriz alterna en el devanado primario, debido a la variación de la intensidad y sentido de la corriente alterna, se produce la inducción de un flujo magnético variable en el núcleo de hierro. Éste flujo origina una fuerza electromotriz en el devanado secundario. La tensión depende directamente del número de espiras que conforman los devanados y de la tensión del devanado primario. [3]

De forma general, se caracteriza por convertir niveles de tensión, haciendo posible el transporte, el acople, la comercialización de la energía eléctrica, sin dejar de lado su potencia, número de fases, aplicación y refrigeración.

De acuerdo a su potencia los podemos clasificar en transformadores de distribución, éstos se encuentran entre potencias de 5 kVA a 500 kVA, y en transformadores de potencia que superan los 500 kVA.

Se los puede clasificar por su número de fases como monofásicos o trifásicos.

Otra clasificación destacable, es su ubicación, ya sean aéreos o Padmounted (nivel del suelo).

### 1.1.3 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS.

#### 1.1.3.1 NÚCLEO.

Circuito magnético conformado por chapas metálicas de acero al silicio con un grosor de 1 y 2 mm aproximadamente, que alojan a los devanados, y éstos se los encuentran en tipos de columnas o acorazados, en la figura 1 se muestran núcleos del tipo acorazados y de columnas.[2]

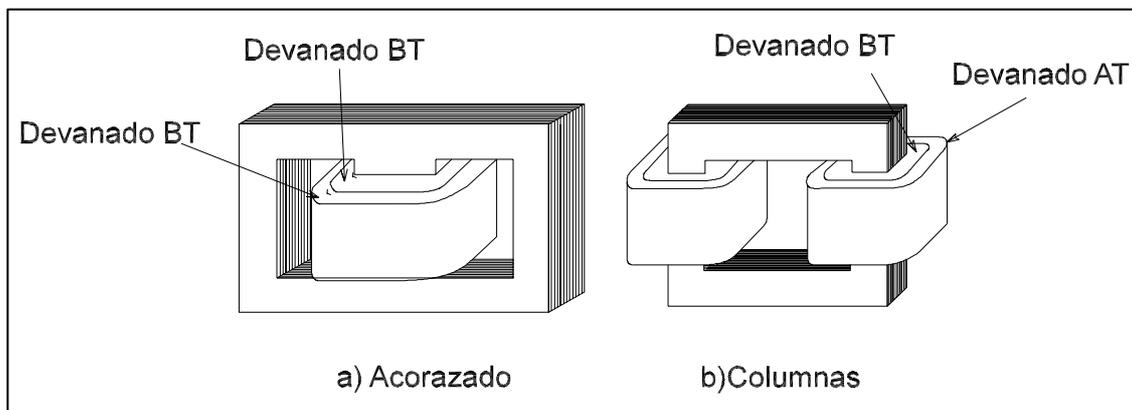


Figura 1. Tipos de Núcleos en Transformadores.

Cuando se trata de un transformador trifásico, el circuito magnético consta de tres columnas idénticas. Las uniones de las columnas con las culatas se denominan juntas y deben tener un espesor lo más pequeño posible para reducir al máximo la reluctancia del circuito magnético. La culata superior se tiene que poder abrir para colocar las bobinas y los aislantes. Las juntas pueden realizarse a tope (plana) o bien al solape (entrelazado).

En la construcción a tope, las columnas y las culatas se montan separadamente. Posteriormente se acolan con piezas de sujeción. En la construcción “al solape” todo el núcleo magnético se construye de una vez, de tal forma que se van ensamblando las chapas con un desfase de posición entre capas sucesivas (pares e impares).[2]

### 1.1.3.2 DEVANADOS.

Forma parte del circuito eléctrico, y están constituidos por el arrollamiento de conductor de cobre barnizado, con el fin de convertir la inducción magnética en una corriente eléctrica utilizable, el diámetro utilizado varía de acuerdo a la tensión y potencia deseada, sin embargo el diámetro está por debajo de los 4 mm. En la figura 2 se observa una bobina.[3]

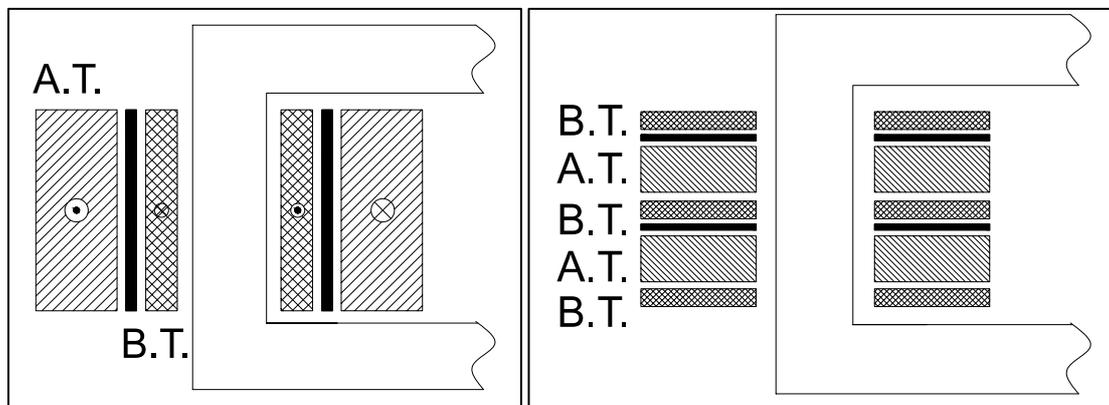


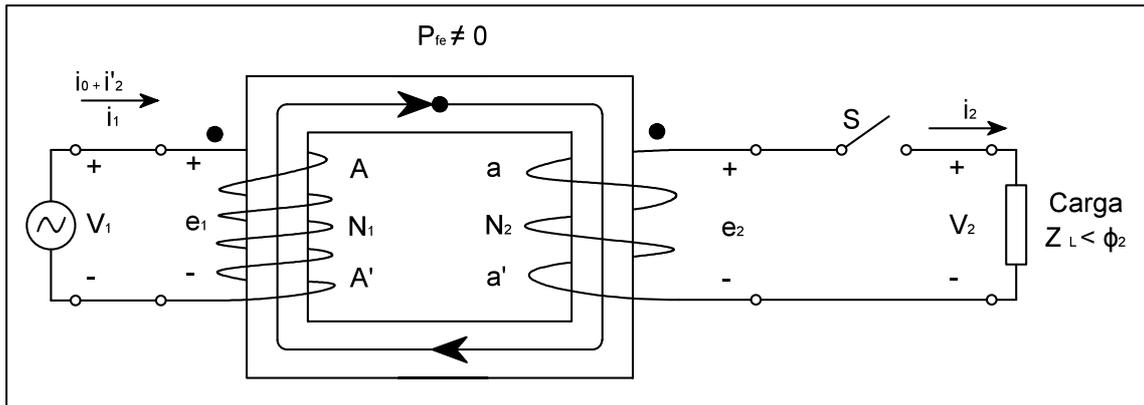
Figura 2. Bobinado en Núcleo.

### 1.1.3.3 REFRIGERACIÓN.

En un transformador, existen una serie de pérdidas que se transforman en calor y que contribuyen al calentamiento de la máquina. Para evitar que se consigan altas temperaturas que puedan afectar los aislamientos, es preciso dotar al transformador de un sistema de refrigeración adecuado. Para potencias pequeñas, la superficie externa de la máquina es suficiente para lograr la evacuación de calor, lo que da lugar a los transformadores en seco. Para potencias más elevadas se utiliza aceite, el mismo tiene dos misiones: Refrigerar y aislar, resultando los transformadores sumergidos en aceite.[3]

## 1.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El núcleo, sea del tipo acorazado o de columnas, conformado por dos bobinas con número de espiras  $N_1$  (primario) y  $N_2$  (secundario), si  $N_1 > N_2$ , resulta un transformador reductor, en la figura 3 se observa un esquema eléctrico de un transformador.



**Figura 3.** Esquema Eléctrico de un Transformador.[3]

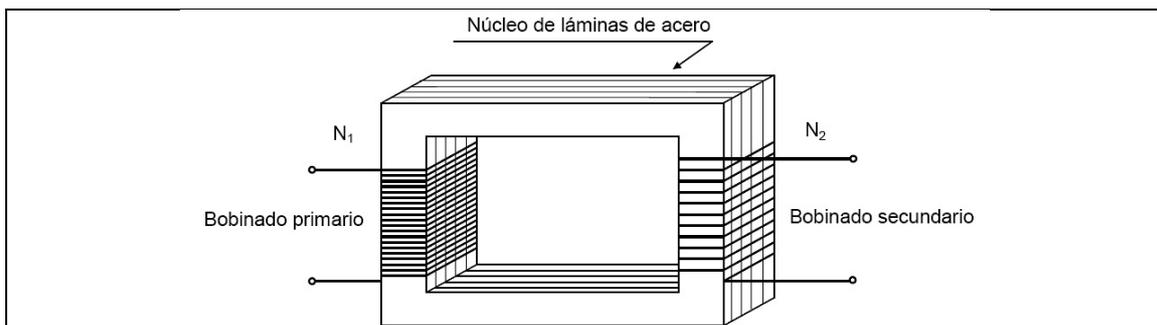
Con la disposición de una fuente de tensión ( $V_1$ ), se suministra la energía a la bobina  $N_1$ , obteniendo una circulación de corriente, que genera un campo magnético a través del núcleo, convirtiéndose en un circuito magnético, inducido a la bobina  $N_2$ , que produce una corriente eléctrica debido a la inducción del campo magnético, alimentando de tensión eléctrica en bornes a la carga  $Z_L$ .

### 1.3 TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Disponen de un circuito magnético y dos circuitos eléctricos, sobre un núcleo magnético formado por chapas apiladas, compuesto por dos devanados llamados primario y secundario.

Al conectar el devanado primario a una corriente alterna monofásica, se establece un flujo magnético alterno dentro del núcleo, éste flujo atraviesa el devanado secundario induciendo una fuerza electromotriz en el mismo devanado, al circular corriente eléctrica en el secundario, se contrarresta el flujo magnético, induciendo sobre el devanado primario una fuerza electromotriz.

Éste tipo de transformadores convierte la energía eléctrica en magnética en el devanado primario y la energía magnética en eléctrica en el devanado secundario.



**Figura 4.** Transformador Monofásico.

### 1.3.1 POTENCIAS COMERCIALES PARA TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS DE POSTERÍA HASTA 500 kVA.

POTENCIA kVA	AUTOPROTEGIDOS (CSP)				CONVENCIONALES (CNV)			
	Dimensiones			Peso	Dimensiones			Peso
	A	L	H	W	A	L	H	W
mm	mm	mm	Kg	mm	mm	mm	Kg	
3	440	400	870	88	520	480	820	79
5	490	450	920	110	520	480	870	98
10	512	470	920	132	520	480	870	122
15	535	495	970	150	540	500	920	138
25	585	545	1020	210	590	550	970	195
37,5	640	600	1020	254	640	600	1020	240
50	640	600	1020	295	640	600	1020	277
75	685	645	1100	350	685	645	1170	380
100	685	645	1100	400	685	645	1170	490
167**	***	***	***	***	730	690	1270	580
333**	***	***	***	***	830	790	1310	600

Tabla 1. Potencias Comerciales de Transformadores Monofásicos según ECUATRAN.[4]

### 1.4 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

La mayoría de sistemas de distribución y generación son transformadores trifásicos, éste tipo de transformadores suelen construirse de dos maneras: La primera consiste en tomar tres transformadores monofásicos y montarlos en un banco trifásico, la segunda a su vez consiste en construir un transformador trifásico, el cual consta de tres conjuntos de devanados enrollados sobre un núcleo común. Éste último es el más utilizado debido a que es más liviano, más pequeño, más barato y más eficiente.

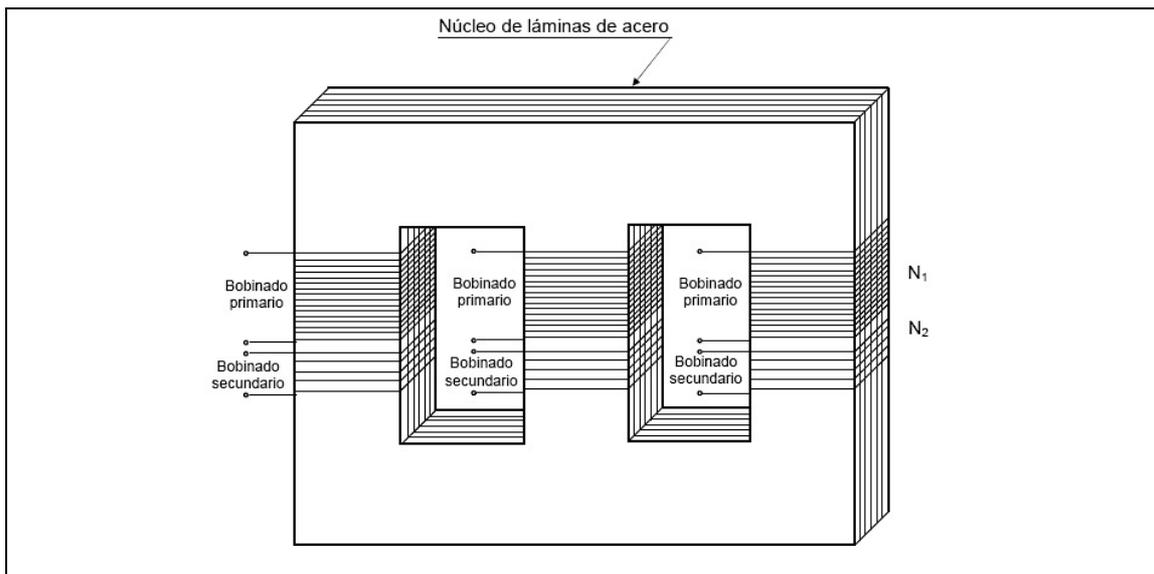


Figura 5. Transformador Trifásico. [3]

Los transformadores trifásicos pueden ser conectados independientemente, en estrella (Y) o en triángulo ( $\Delta$ ), las posibles conexiones que se realizan, se muestran en la tabla 2.

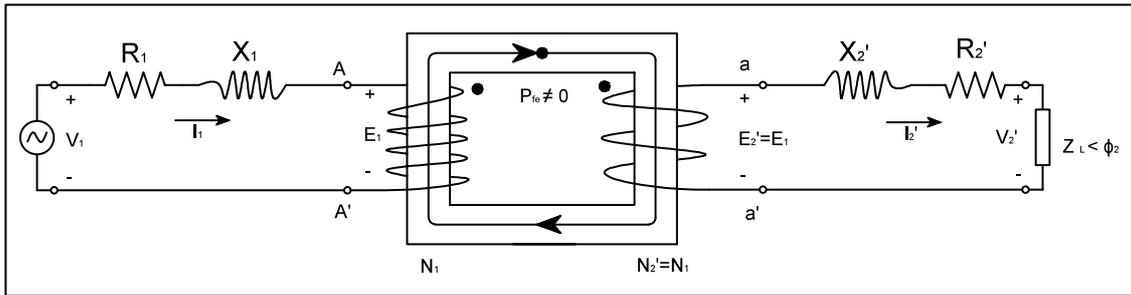
Conexión de devanados	
Tipo de conexión	Figura
Estrella(Y-Y)	
Triángulo-Estrella( $\Delta$ -Y)	
Triángulo( $\Delta$ - $\Delta$ )	
Zig-Zag	

**Tabla 2.** Tipos de Conexiones más Comunes en un Transformador.

Para el análisis de los transformadores trifásicos se debe tomar en cuenta que su comportamiento es similar a los transformadores monofásicos.

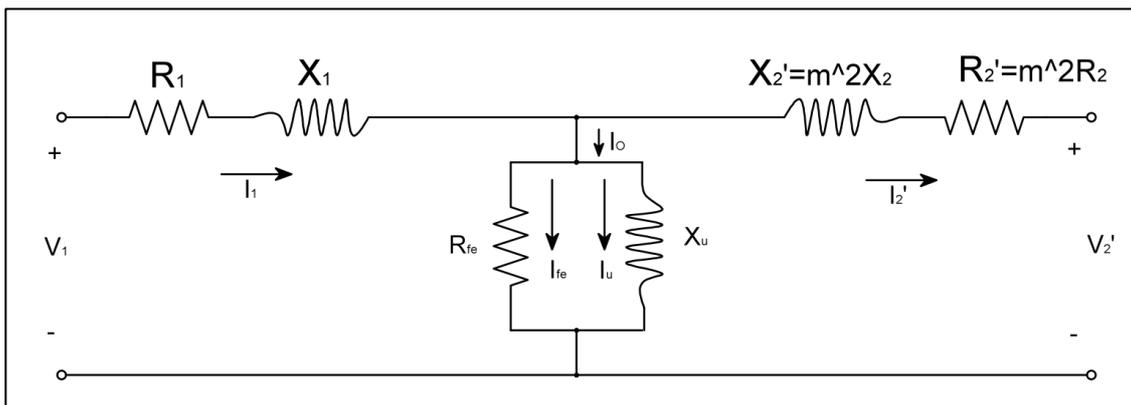
## 1.5 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR

Es de conocimiento general que realizar un análisis matemático sobre un transformador real no es posible, ya que no se consideran aspectos físicos, razón por la cual, se estima una configuración eléctrica considerando los fenómenos físicos, como son: Efecto Joule, magnetismo y pérdidas relacionadas a éstas, acercándose a un modelo más real. En la figura 6 se muestra un esquema con estas consideraciones.[3]



**Figura 6.** Circuito Equivalente de Transformador.[3]

En la figura 6, se muestra un circuito equivalente eléctrico de un transformador, en el que no es posible realizar un análisis entre dos bobinados con diferentes números de espiras, otro impedimento es que existe un circuito magnético, realizando una reducción de espiras del bobinado secundario denominado “reducción al primario”, con el fin de realizar el análisis matemático, considerando fórmulas de reducción de tensiones y de impedancias, resultando un circuito netamente eléctrico, mostrado en la figura 7.[3]



**Figura 7.** Circuito Equivalente Eléctrico de un Transformador Reducido al Primario.[3]

## 1.6 PRUEBAS EN TRANSFORMADORES

Basado en la Norma INEN 2110 las pruebas se definen como:

### 1.6.1 PRUEBAS TIPO

La efectuada por el fabricante a un transformador representativo de una serie de aparatos con valores iguales e igual constitución, con el fin de demostrar el cumplimiento de la normativa.

### 1.6.2 PRUEBAS DE RUTINA

La que se realiza a cada transformador en forma individual.

### **1.6.3 PRUEBAS ESPECIALES**

Pruebas diferentes a las de rutina, acordado entre fabricante y usuario final, exigibles solo en el contrato particular.

### **1.6.4 PRUEBAS ELÉCTRICAS**

Las realizadas a los transformadores con el objeto de determinar su comportamiento eléctrico, las pruebas eléctricas se clasifican de la siguiente manera:

#### **1.6.4.1 PRUEBAS DE RUTINA**

Las pruebas de rutina son:

- Medición de la resistencia de los devanados.
- Medición de la relación de transformación, verificación de la polaridad y desplazamiento angular.
- Medición de los voltajes de corto circuito.
- Medición de las pérdidas con carga.
- Medición de las pérdidas y carga (en vacío).
- Prueba de voltaje aplicado.
- Prueba de sobre-voltaje inducido.
- Medición de aislamiento con Megger.
- Prueba de la rigidez dieléctrica del aceite (para transformadores sumergidos en aceite).

#### **1.6.4.2 PRUEBAS TIPO**

Las pruebas tipo son:

- Prueba de voltaje de impulso con onda completa
- Prueba de calentamiento
- Medición del nivel de ruido.

#### **1.6.4.3 PRUEBAS ESPECIALES**

Las pruebas especiales son:

- Prueba de voltaje incluyendo ondas recortadas.
- Medición de la impedancia de secuencia cero.
- Medición de las capacidades.
- Verificación de la resistencia dinámica.
- Medición de las descargas parciales (Efecto Corona).
- Prueba de los conmutadores con carga y sin ella.
- Medida de las ondas armónicas (transformadores sin carga).

## 1.7 DISPOSICIONES GENERALES

Las pruebas se realizan a los transformadores a cualquier temperatura comprendida entre 10°C y 40° C y aquellos con enfriamiento por agua (si se requiere) a cualquier temperatura que no exceda de 25°C.

Todos los componentes y accesorios externos afectan al funcionamiento del transformador, por lo que deben estar colocados en su lugar.

En los devanados con derivaciones a menos que se acuerde otra cosa entre fabricante y usuario, y a menos que la prueba específicamente requiere otra cosa, las pruebas deben efectuarse en la derivación principal.

Las condiciones de prueba para todas las características a excepción de aislamiento, deben ser a la condición nominal, a menos que en el numeral de la prueba se establezca otra cosa.

Cuando se requiere que los resultados de las pruebas sean corregidos a una temperatura de referencia, la misma debe estar de acuerdo con la tabla 3, a excepción de las de aislamiento. [1]

Clase Térmica del Aislamiento	Calentamiento °C	Temperatura de Referencia °C
A	60	85
Ao	65	
E	75	
B	80	
F	100	115
H	125	
	150	

**Tabla 3.** Temperatura de Referencia.[1]

El voltaje de las fuentes de energía utilizadas en las pruebas deben ser de frecuencia nominal y tener una forma de onda sinusoidal.

## 1.8 REQUISITOS EN TRANSFORMADORES

Las características relacionadas con el comportamiento eléctrico se deben garantizar, según la tabla 4, en la cual se especifican las tolerancias permitidas. El objeto de éstas tolerancias, es de permitir pequeñas variaciones debidas a la fabricación.

Las tolerancias a los valores de pérdidas ofertados o declarados son las que se indican en la tabla 4. Los valores no deben exceder a los valores especificados en las tablas 1 y 2 de la norma NTE INEN 2 114 y 2 115 Segunda revisión.

Características	Tolerancia
<b>1. Pérdidas</b>	
1.1 Pérdidas totales.	+ 6 % de las pérdidas declaradas
1.2 Pérdidas con carga.	+ 10 % de las pérdidas declaradas. Teniendo en cuenta que no se haya sobrepasado la tolerancia para las pérdidas totales.
1.3 Pérdidas sin carga (en Vacío).	+ 10 % de las pérdidas declaradas. Teniendo en cuenta que no se haya sobrepasado la tolerancia para las pérdidas totales.
<b>2. Relación de transformación sin carga (en vacío) de la derivación principal (relación de transformación principal).</b>	El más bajo de los siguientes valores: a) $\pm 0,5\%$ de la relación declarada. b) Un porcentaje de la relación de transformación declarada igual al 10% del voltaje de cortocircuito. Si el voltaje por espira excede esta tolerancia, la relación en las derivaciones debe corresponder a la relación de la espira más cercana.
<b>3. Voltaje de cortocircuito</b>	
3.1 Para la derivación principal (voltaje nominal de cortocircuito).	Comprende a los valores indicados en las tablas 1 y 2 de las NTE INEN 2 114 y 2 115.
3.1.1 Transformadores con dos devanados .	$\pm 10\%$ del voltaje de cortocircuito declarado para esa derivación. $\pm 10\%$ del voltaje de cortocircuito declarado para un par especificado de devanados.
3.1.2 Transformadores con más de dos devanados.	$\pm 15\%$ del voltaje de cortocircuito declarado para un segundo par especificado de devanados. Para los demás pares de devanados pueden ser acordadas y establecidas sus tolerancias.
3.2 Para derivaciones diferentes a la derivación principal.	$\pm 15\%$ del valor establecido para cada derivación dentro del $\pm 5\%$ de la derivación principal. Para las otras derivaciones, la tolerancia se establecerá por acuerdo entre fabricante y comprador.
<b>4. Corriente Sin Carga (en vacío)</b>	$\pm 30\%$ de la corriente sin carga (en vacío) declarada.
<b>5. Eficiencia</b>	De acuerdo con las tolerancias para pérdidas.
<b>6. Regulación</b>	De acuerdo con las tolerancias para voltaje de cortocircuito y pérdidas con carga.

Tabla 4. Tolerancias en transformadores.[1]

La tolerancia en la relación de transformación se aplica a todas las derivaciones, pero en devanados con derivaciones y pocas espiras, se permite acordar entre fabricante y comprador, que la tolerancia se aplique a la relación de transformación más exacta obtenida y no a la relación de transformación especificada. [1]

Las tolerancias para las pérdidas con carga, pérdidas sin carga (en vacío), eficiencia y regulación se aplican a la derivación principal únicamente. Las tolerancias para éstos mismos valores, relacionados con una derivación diferente de la principal, se establecen por acuerdo entre fabricante y comprador.

Cuando una tolerancia en una dirección es omitida se considera que no hay restricción del valor correspondiente a esa dirección.

## **1.9 INSPECCIÓN EN TRANSFORMADORES**

Un transformador se considera que ha pasado la prueba cuando las diferencias entre los resultados de las mediciones de la prueba y las cifras declaradas por los fabricantes no sean mayores que las tolerancias permitidas.

El fabricante debe suministrar una certificación de todas las pruebas de rutina. En el caso de pruebas tipo y especiales, la certificación debe provenir de un laboratorio calificado o reconocido por el INEN. [1]

## **1.10 ANÁLISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA**

### **1.10.1 GENERALIDADES.**

En términos generales, el método tiene como fundamento, comparar dos gráficas que representan al transformador en sus dos estados: funcionamiento óptimo y estado de falla. El proceso se lleva a cabo inyectando una señal sinusoidal y observando su comportamiento por medio de una operación matemática llamada Transformada Rápida de Fourier (FFT), en el cual se observan los armónicos generados por el transformador y su constitución, posteriormente se genera una gráfica que relacione el ingreso y la salida, dicha gráfica se denomina Función de Transferencia (FT), en la que encierra las características y comportamientos del transformador en cada uno de sus armónicos a distintas frecuencias de resonancia.

Es necesario conocer los principios básicos del análisis, para comprender de mejor manera como suceden las variaciones armónicas con respecto a la frecuencia en un transformador,

como por ejemplo: Capacitancia, inductancia y resistividad, están implícitas en un transformador, los devanados generan una resistencia debido a su longitud, una capacitancia se da entre espiras y una inductancia debido a su arrollamiento, éste método al no ser invasivo, no requiere de un desmontaje del transformador, basta con aislar al transformador de la red, para realizar dichas pruebas, y al no ser necesaria la energización, hace que las pruebas sean de un bajo riesgo al choque eléctrico.

El análisis se enfoca en primera instancia a fallas del tipo más común, como por ejemplo: Corto circuito, sobre carga, corto circuito entre espiras y degradación de aceite. Por otro lado, siendo éste método una propuesta solamente, el cotejo se realiza de forma similar al de un análisis FRA, al menos en forma. La diferencia sustancial radica en el tipo de gráfica, mientras un FRA se centra en un barrido de frecuencias y de allí crea una gráfica. Con las resonancias a cada frecuencia del transformador, se muestran las variaciones y se relacionan con la original para obtener conclusiones; la propuesta planteada se fundamenta en una Transformada Rápida de Fourier y su gráfica, es de conocimiento que una FFT muestra en una gráfica los armónicos que se encuentran en una señal, conjuntamente con su frecuencia fundamental, por lo que se pueden realizar dos tipos de análisis: uno involucra los armónicos generados y otro del tipo gráfico, que relaciona el comportamiento con la original.

Un estudio posterior puede analizar una frecuencia superior a 1 MHz, dirigiéndose a fallas menos probables, no por ello menos importantes, siendo más preciso en su estudio.

Actualmente el análisis FRA a transformadores no es muy común, ya que es un método relativamente nuevo, sin embargo, se discuten diversas metodologías de análisis FRA, con distintos resultados y conclusiones, por otro lado ya existe un estándar en cuanto al análisis FRA, IEEE Std C57.149-2012 denominado “*IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers*”, el cual menciona los distintos rangos de frecuencia de análisis, metodologías de conexionado, tipos de configuraciones más comunes, como también explica bajo qué casos se encuentra cada rango de frecuencias, ya sea de corto circuito y sobre cargas.

Una aspecto importante al momento de realizar las pruebas, es el salvado de datos, ya que un transformador tiene una vida útil en el orden de los años, los datos se guardan en formatos estándares para una posterior extracción y permanezcan siendo compatibles con nuevos equipamientos de análisis.

Un análisis mucho más gráfico, no quiere decir que no se lo pueda realizar a través de un método analítico o en su defecto matemático, con un nivel de profundidad más complejo, lo que da lugar y forma a la propuesta, un análisis gráfico de comportamiento.

## **1.10.2 OTROS TIPOS DE FALLAS.**

### **1.10.2.1 INTEGRIDAD MECÁNICA.**

Entre los factores más comunes se encuentra el transporte, ya sea por imperfecciones en el embalaje, defectos en carretera, o simplemente malos procedimientos de transporte, hacen que las características de fábrica de un transformador se vean reducidas, en esencia el movimiento hace que las juntas, núcleo y bobinado sean afectados, reduciendo a corto o largo plazo su fijación, en la manipulación, instalación, fallas futuras y adversidades, hace que su vida útil se reduzca.

### **1.10.2.2 DEFORMACIÓN DEL DEVANADO.**

La deformación de los devanados son variados, sin embargo entre las principales causas se encuentran: Defectos en su fabricación, contaminación de partículas, sobretensiones excesivas, descargas atmosféricas, esfuerzos producidos por corto circuitos y descargas parciales.

### **1.10.2.3 TENSIÓN ELECTROMAGNÉTICA.**

Se da cuando el movimiento del flujo magnético, induce en un conductor una fuerza electromotriz (f.e.m) o una corriente eléctrica inducida. [5]

## **1.11 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA**

### **1.11.1 MÉTODO FRA.**

Es una técnica de diagnóstico para detectar cambios en las características eléctricas de un bobinado en los transformadores de potencia, se lo realiza bajo magnitud, fase y respuesta resonante a través de una función de transferencia representada gráficamente, en el que muestra los posibles estados del transformador, funcionamiento y falla. [4]

### **1.11.2 MÉTODO DE VOLTAJE DE IMPULSO (LVI).**

El método es similar al FRA en metodología, la única diferencia radica en el tipo de señal inyectada, siendo un impulso de bajo voltaje, a diferencia del FRA que inyecta un barrido de frecuencia, éste bajo voltaje tiene el fin de medir el impulso en la salida de los terminales, para luego estos resultados en el dominio del tiempo y transformarlos al dominio de la frecuencia para su posterior cotejo. [6]

### 1.11.3 EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE.

Entre las posibilidades de visualización y generación de una señal, para inyectar posteriormente a los bornes de un transformador, existen disponibles equipos comerciales, como el denominado FRAnalyzer, de igual manera se pueden obtener resultados con equipos de prueba, luego los datos son procesados y se obtiene una gráfica característica que muestra el estado del transformador en una curva con un rango de frecuencias especificado.

#### 1.11.3.1 FRANALIZER.

Equipo diseñado específicamente para el diagnóstico de núcleos y devanados. Entre los problemas más comunes de detección se encuentran los siguientes:

- Deformación del devanado: Axial y radial, como deformación del devanado circunferencial, inclinación, disposición en espiral.
- Desplazamientos entre devanados de alta y baja tensión.
- Colapso parcial del devanado.
- Espiras corto circuitadas o abiertas.
- Movimientos del núcleo.
- Estructuras de sujeción rotas.
- Conexiones internas problemáticas.



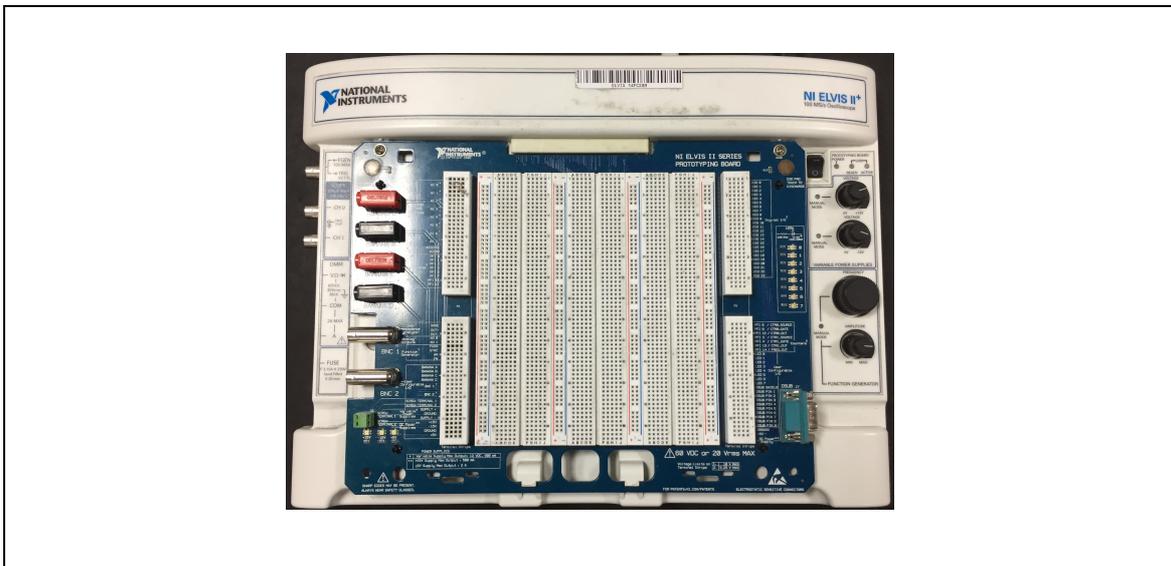
Figura 8. Equipo FRAnalyzer.[7]

Entre las características principales del equipo, se encuentra la capacidad de hacer pruebas en un rango de frecuencias mucho más amplio, de la misma manera sus resultados son más detallados, como por ejemplo: Las gráficas se encuentran no solo en magnitud, sino también en ángulo, el tipo de muestreo y la lectura de datos, también es importante mencionar que los resultados se pueden salvar en diferentes tipos de archivos como el .csv y .txt. [7]

### 1.11.3.2 EQUIPO DE ENTRENAMIENTO NI ELVIS II.

La empresa “National Instrument”, entre su gran variedad de equipos académicos, tiene a disposición un dispositivo denominado ELVIS II, que proporciona un laboratorio virtual, con un entorno de operación mediante LabView y hardware para la adquisición de datos y herramientas como por ejemplo: Osciloscopio, generador de funciones, multímetro, fuentes regulables en DC y analizador de espectros.

Para el Análisis de Respuesta en Frecuencia, el equipo no es de gran utilidad en cuanto al rango de frecuencias, debido a su banda límite de frecuencia establecida a 200 kHz, siendo insuficiente para un análisis que supera dicha banda. En la figura 9 se observa el equipo de entrenamiento NI ELVIS II.



**Figura 9.** Equipo de Entrenamiento NI Elvis II.

Una de las ventajas que posee el “entrenador”, es que permite visualizar una gráfica del tipo BODE, sin la necesidad de una manipulación y procesamiento de datos para el fin requerido, sin embargo, de acuerdo a lo mencionado anteriormente la visualización y análisis se ve limitado.[8]

### 1.11.3.3 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NI DAQ

De la familia “National Instruments”, dicho dispositivo permite la adquisición de datos pueden ser analógicos o digitales, con la ayuda de software LabView de la misma empresa, se puede crear un entorno de simulación con características específicas, sin embargo el instrumento tiene limitaciones técnicas. Para crear una señal a partir de muestreos, es necesario un rango alto de frecuencia que no es posible con el dispositivo, y por ello no se puede construir una señal óptima de análisis, por el déficit de Gsa/seg del equipo. La DAQ posee un muestreo de 400 kSa/seg a 16 bits para adquirir datos y otro muestreo para formar la señal, éste distorsiona a la onda fundamental, lo que hace que la señal se pierda en la fundamental cuadrada con ruido. [9]



Figura 10. NI DAQ.

## **CAPÍTULO 2**

### **2.1 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ANALIZADOR DE RESPUESTA EN FRECUENCIA PROPUESTO**

#### **2.1.1 DESCRIPCIÓN.**

En principio, la metodología de un analizador de respuesta en frecuencia (FRA), es considerado para la ejecución del proyecto, es decir, que la propuesta está fundamentada en los principios del FRA, con sus respectivas modificaciones, ya sea en análisis o en estructuración técnica, para la obtención del analizador. Con la premisa de obtener similares resultados de análisis con recursos asequibles para la propuesta.

#### **2.1.2 PROPUESTA.**

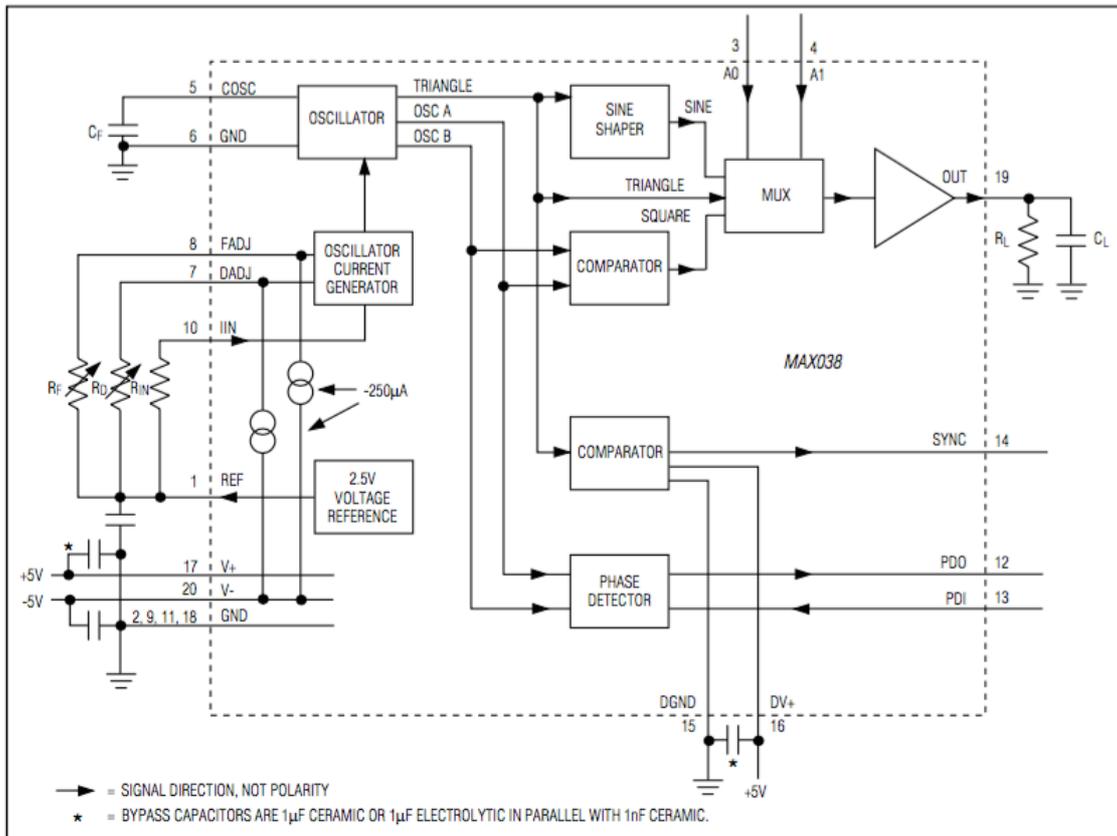
Para definir una propuesta coherente y de fácil entendimiento, es necesario poner en contexto un analizador FRA y su finalidad.

Un analizador en concepto, realiza el análisis frecuencial de un transformador, para dar como resultado un análisis gráfico del estado operacional y estructural de la máquina eléctrica. ¿Cómo se realiza este análisis?. El sistema se basa en un proceso denominado, “Función de Transferencia”, en el cual se inyecta una frecuencia y a la salida se toma ésta, para realizar una relación, salida versus entrada, que en teoría es una función de transferencia.

Equipos especializados realizan el proceso, de generar la señal y recibirla, sino también, procesa y visualiza, de tal manera que se pueda sobre éstas, realizar un diagnóstico de comparación. Sin embargo, no es un equipamiento de fácil adquisición, en el campo, debido a su elevado costo y manipulación especializada para el fin. Razón por la cual, con el entendimiento del concepto de funcionamiento, se propone, con equipos de laboratorio, realizar un símil a dicho análisis, intentando acercarse a una evaluación de Análisis de Respuesta en Frecuencia funcional.

Para dar forma a la propuesta, se disponen de equipos específicos, como: Osciloscopio, generador de funciones y ordenador. El generador de funciones tiene la misión de inyectar una frecuencia constante a un transformador, mientras que un osciloscopio recibe la señal de salida, y permite obtener los datos del transformador, haciendo las veces de un equipo de adquisición de datos.

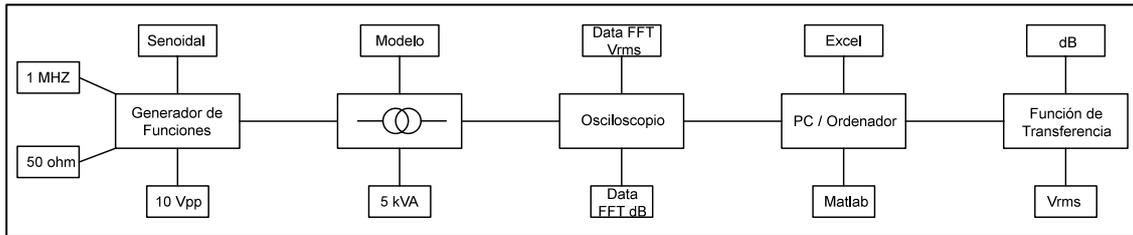
Los datos que se obtienen del proceso tienen como base matemática de visualización una Transformada Rápida de Fourier (FFT), de la cual se obtienen datos de ingreso y de salida para un procesamiento de datos y conseguir una función de transferencia analizable.



**Figura 11.** Diagrama de Bloques del Generador de Funciones con MAX038[10]

El generador de funciones que se utiliza tiene todas las funciones necesarias y los rangos frecuenciales óptimos para lo propuesto, existen equipos dentro de la misma gama de generadores que poseen las características mucho más amplias hablando en rangos frecuenciales, razón por la cual se muestra un esquema en la figura 11 que dispone el generador de funciones Max038, el mismo que aporta un campo de investigación extenso, pudiendo montar dicho esquema y suplir las necesidades de generar la señal requerida.

La figura 12 muestra un esquema a bloques, comenzando con el generador de funciones, entregando una señal sinusoidal hacia el ingreso de los transformadores, obteniendo a la salida una señal diferente a la ingresada dependiendo el caso de falla analizado, posteriormente la señal es procesada en el osciloscopio de forma matemática en una FFT de dos tipos, una en escala a decibeles (dB) y otra en tensión (Vrms), obteniendo una base de datos que son procesadas en un ordenador con ayuda de dos software (Matlab-Excel), los mismos que visualiza la señal FFT tanto de ingreso como de salida, los datos para su mayor exactitud, se toman cinco veces de forma muestral y a su vez con ayuda de un promedio se aproxima a un método más confiable.



**Figura 12.** Diagrama de un Analizador de Respuesta en Frecuencia para un Transformador de Distribución y Modelo.

Con los datos obtenidos se realiza la función de transferencia ( $FFT_{out} / FFT_{in}$ ), siendo  $FFT_{out}$  la señal de salida y  $FFT_{in}$  la señal de ingreso, para su estado original y en falla, tanto en un transformador comercial como en el modelo, éstas se cotejan gráficamente en cada caso de falla propuesto, sin olvidar la referencia, que es la huella digital y contrarrestarlo con la norma IEEE STD C57.149 2012.

### 2.1.3 GENERADOR DE FUNCIONES.

Un generador de funciones es un equipo que permite obtener señales fundamentales como son: Onda sinusoidal, triangular y cuadrada, que de acuerdo a su tecnología de fabricación, entrega a su salida dichas señales en un rango de frecuencias más amplias. Para la propuesta de un Analizador de Respuesta en Frecuencia, se dispone de un generador de funciones de la marca GwInstek, bajo el número de serie SFG-2110, con una impedancia de salida de 50 ohm.

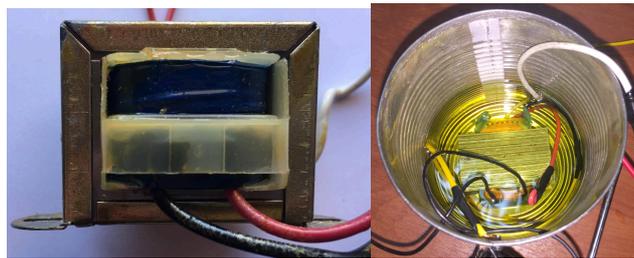


**Figura 13.** Generador de Funciones de la Marca GwInstek con Número de Serie SFG-2110.

### 2.1.4 TRANSFORMADOR MODELO

Un transformador de 120-12V/1A se utiliza como modelo a escala de un transformador de distribución (Véase figura 14), tomando en cuenta las partes constitutivas del transformador y un análisis minucioso, se puede deducir una similitud considerable, sin embargo, no se

asemeja fielmente, porque tiene una cantidad limitada de componentes, es por ello que se realiza un cuadro comparativo (Véase Tabla 5), entre el transformador modelo y el comercial, observando que nuestro modelo a baja potencia carece de ciertas partes, que posee un transformador comercial, es por ello que al transformador modelo se le intenta compensar de alguna manera, para lograr asemejar a un transformador comercial. Construyendo un prototipo de una cuba, para depositar aceite dieléctrico conjuntamente con el transformador modelo, llegando a obtener una semejanza a un transformador de distribución comercial. Dicho modelo permite observar el comportamiento a priori del método de Análisis de Respuesta en Frecuencia propuesto, para posteriormente replicarlo en uno comercial.



**Figura 14.** Transformador Modelo y Prototipo de Cuba.

La placa característica del transformador modelo está definida por:

- Tensión: 120 - 12V AC.
- Tipo: Reductor.
- Cuba: Metálica.
- Aislante: Aceite mineral.

La potencia, dimensiones y peso vienen dadas en la Tabla 5.

Potencia	Dimensiones			Peso
	A	L	H	W
kVA	mm	mm	mm	kg
5	520	430	870	84
0,001	82	82	60	0,65421

**Tabla 5.** Dimensiones de Transformador de Distribución y Modelo.[4]

### 2.1.5 TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICO DE 5kVA

Un transformador de distribución monofásico de 5kVA posee una o dos líneas de media tensión según la conexión, fabricados para montaje en poste. Se fabrican desde 3 kVA hasta 333 kVA y consta de dos configuraciones, la convencional, que tiene unidades sin protecciones

eléctricas, teniendo solo accesorios normales de funcionamiento y los autoprotegidos además de tener los accesorios normales de funcionamiento, consta de elementos de protección contra sobre tensiones, sobre cargas y corto circuitos, incluyendo pararrayo, fusible de distribución, interruptor termomagnético y luz piloto, siendo la base con un enfoque investigativo para la propuesta realizada. La potencia, dimensiones y peso vienen dadas en la tabla 5.[4]

La placa característica del transformador de distribución, es definida por la tabla 6, la misma que es modificada de su fuente original, para agregarle todas las características del transformador modelo y detallar sus partes carentes en relación al Transformador de 5kVA.

ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	
		Transformador 5kVA	Transformador Modelo
1	1	Cuba del Transformador	Cuba del Transformador
2	1	Tapa	Tapa
3	2	Soportes de Montaje	Soportes de Montaje
4	2	Soportes de izado	X
5	1	Banda de Cierre	X
6	1*	Pasatapas de Media Tensión	X
7	3	Pasatapas de Baja Tensión	X
8	1	Válvula de Sobrepresión	X
9	2	Conectores a Tierra	X
10	1	Cambiador de Derivaciones	X
11	1	Placa de características	Placa de características
12	1**	Pararrayos	X
13	1	Interruptor Termomagnético	X

**Tabla 6.** Partes Constitutivas de Transformador de Distribución.[4]

### 2.1.6 OSCILOSCOPIO.

Entre los equipos de visualización de laboratorio, se encuentra el osciloscopio, siendo un equipo electrónico de visualización de señales en tiempo real, dichas señales son presentadas en una pantalla, en un eje coordinado, donde el eje horizontal representa el tiempo, mientras que en el eje vertical, se presenta la magnitud de la señal, que son: Tensión, intensidad de corriente, decibeles, etc. Para la propuesta de un Analizador de Respuesta en Frecuencia se dispone de un Osciloscopio de la marca GwInstek con número de serie GDS-1102A-U, con una frecuencia de hasta 100 MHz y una frecuencia de muestreo de 1GSa/seg, una de las funcionalidades principales, es el almacenamiento de datos, en un formato “.csv”, con el cual se puede realizar el procesamiento de la señal visualizada, lo que permite dar cumplimiento a la propuesta final, en cuanto a la visualización y análisis.

El osciloscopio está configurado según la sección 2.6.1 y se debe tener presente la configuración MATH-FUNCTION, la misma que visualiza diagramas en decibeles y tensión  $V_{rms}$ .

## **2.2 EXPERIMENTACIÓN DE EQUIPOS PARA OBTENER UN ANALIZADOR DE RESPUESTA EN FRECUENCIA ÓPTIMO.**

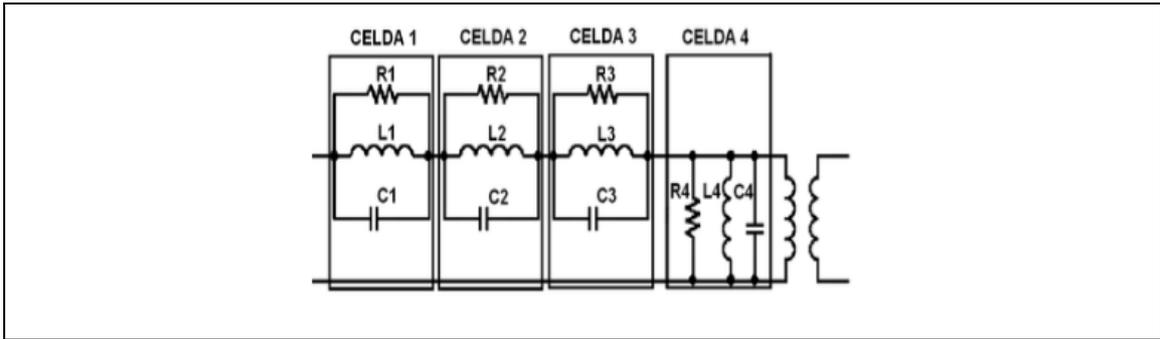
Para la experimentación, se realiza un análisis minucioso y determinar la mejor opción de un sistema funcional, constando de diferentes equipos, ya sea profesional o de instrumentación para laboratorio. Los mismos generan una señal de ingreso y una de salida en terminales del transformador, llevando a cabo una captación de la señal, que es procesada para un análisis post-operación.

Entre los equipos utilizados, se encuentran los de la familia “National Instruments”, se citan el NI ELVIS II, como también la DAQ y por último se dispone de equipos de instrumentación de laboratorio que son: Osciloscopio, generador de funciones y un ordenador para el análisis post-operación con software MATLAB.

### **2.2.1 FRA TRADICIONAL**

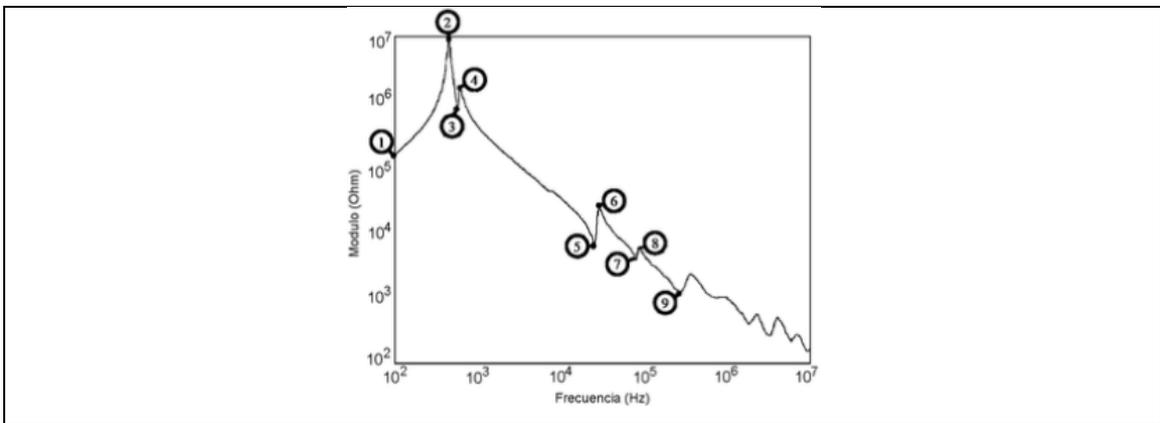
Hoy en día la metodología de análisis FRA, se centra en el estudio de una gráfica que muestra en un rango de frecuencias, el comportamiento del transformador al ser sometido a condiciones de estrés, a través de una función de transferencia, proporcionando una gráfica única para cada transformador, que mediante comparación proporciona información útil para el diagnóstico y evaluación.

El método se fundamenta en un análisis circuital de celdas, el cual describe a un transformador y sus componentes estructurales que reaccionan con la señal ingresada, como por ejemplo: Cuba, aceite aislante e intercambiadores de TAP's. Esta representación se la hace mediante elementos pasivos como: Resistor, capacitor e inductor, el esquema se muestra en la Figura 15.



**Figura 15.** Diagrama Circuital de Celdas Representativos para un Transformador.[11]

Generando una gráfica que detalla la relación del transformador con la frecuencia inyectada, las mismas muestran una variación de frecuencias de resonancia, la figura 16, donde se encuentra los rangos de frecuencias para cada celda.



**Figura 16.** Diagrama de Bode para la Impedancia de un Analizador FRA Especificando sus Celdas de Análisis.[11]

Las gráficas tienen los cotejos para cada celda, y su respectiva variación, en la cual se dan para cada falla ya sea en magnitud o ángulo.

### 2.2.2 EQUIPAMIENTO DE LABORATORIO

Con el ELVIS II y la DAQ no es viable un Analizador de Respuesta en Frecuencia en su totalidad debido a sus deficiencias frecuenciales, se opta por equipos que satisfacen de una forma más completa el analizador, conformado por: Generador de funciones configurado y detallado en la sección 2.1.3 y un osciloscopio configurado y detallado en la sección 2.1.6.

En el generador de funciones se tiene en cuenta el acoplamiento de impedancias hacia el transformador, los mismos que siempre poseen diferente valor óhmico y esto conlleva a futuros datos erróneos considerando que el valor óhmico del generador es mucho menor que el valor

óhmico del transformador. Al tener en cuenta esta observación se evita una atenuación de señal y una reflexión de onda.

Luego de una serie de pruebas con varios equipos (osciloscopios), de diferentes funcionalidades y estudio de sus características, se escoge el osciloscopio detallado en la sección 2.1.6, que satisface todas las necesidades para la elaboración del analizador.

El osciloscopio está conectado de tal manera que en el canal 1, ingresa la señal que entrega el transformador, es decir en las terminales de salida, mientras que en las terminales de ingreso del transformador se conecta a la salida del generador de funciones. En la figura 17 se muestra la implementación del analizador con el transformador de distribución de 5kVA.



**Figura 17.** Foto Real de un Analizador de Respuesta en Frecuencia para un Transformador de Distribución con sus Equipos Utilizados.

El generador de funciones está configurado a 1MHz, con una onda sinusoidal, de preferencia usar una tensión de salida superior a los 20Vpp. Como recomendación, usar el generador en una configuración de señal constante, evitando optar por la característica SWEEP o de barrido, que distorsiona la señal de salida.

El análisis de datos se los realiza mediante ordenador con Excel y software de Matlab, los mismos que generan gráficas para ser cotejadas posteriormente.

## **2.3 ANÁLISIS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA (FRA) TRADICIONAL.**

Un Análisis de Respuesta en Frecuencia, en concepto, es una función de transferencia, que relaciona una señal de ingreso y una de salida, para el caso, es una onda sinusoidal a frecuencia constante. Sin embargo, al poner en práctica éste concepto, es necesario, que oscile entre unos cuantos Hertz a Mega Hertz, denominándolo barrido en frecuencia, lo que permite, hacer una gráfica de la función de transferencia entre un rango de frecuencias seleccionados.

En términos generales, el método tiene como finalidad generar dos gráficas, las cuales son cotejadas, la primera gráfica representa al transformador en un estado óptimo, la segunda muestra una gráfica en condiciones de falla, al sobreponerlas, se observan las variaciones a diferentes frecuencias, las que indican el tipo de falla probable en un transformador.

Al realizar el barrido de frecuencias, se genera una gráfica característica, que define o representa a dicho transformador, con ésta premisa, al existir una variación, ya sea mecánica, constructiva o eléctrica, se ve reflejada en la función de transferencia.

En el FRA tradicional se tiene una señal sinusoidal de ingreso a un rango de frecuencia específico, para el cual se realiza un barrido con la finalidad de obtener una gráfica a la salida del tipo BODE, la misma que indica las resonancias a cada frecuencia y con ello se puede identificar las variaciones, determinando el tipo de falla probable.

Lo que trata el FRA, es que su señal sinusoidal inyectada posea una frecuencia y tensión específica, teniendo en cuenta su amplitud de tensión, ya que si es insuficiente se requiere de una amplificación. Ésta es acoplada con la impedancia del transformador en la parte primaria, la misma que crea una malla en la cual circula una corriente de la fuente del generador de señal, siendo una corriente superior a la corriente de vacío del transformador en la parte primaria, asegurando que la fuente es capaz de suministrar la corriente necesaria para el análisis.

La corriente inyectada en el bobinado primario hace que se origine una impedancia por cada número de vueltas, creando al mismo tiempo un efecto inductivo/capacitivo por cada espira, generando un efecto tanque.

La consecuencia del proceso anterior da como resultado una nueva malla en la parte secundaria del transformador, que a su vez origina el mismo procedimiento.

Con lo mencionado anteriormente se recopila la información de salida como de entrada y se hace la función de transferencia (salida vs entrada), para cada frecuencia de análisis que se

interpreta en magnitud y fase, ya sean en tensión, corriente o impedancia, destacando la última como gráfica de análisis, relacionando tensión y corriente.

La gráfica se crea por un barrido, generando un punto a cada frecuencia que posteriormente forma un gráfico de tipo BODE con todas las frecuencias.

La medición tiene que ser lo más precisa, para no caer en un error, para ello es necesario de una resistencia en serie al sistema, asegurando obtener una medición que pertenezca al transformador. Otro inconveniente, es la medición de corriente, para ello se usa una sonda de corriente, en la que se observa la señal de corriente, extrayendo los valores pico-pico, además el ángulo se puede observar al sobreponerla con la onda de tensión.

### **2.3.1 PROPUESTA DE METODOLOGÍA**

En primera instancia se tiene que saber que la señal sinusoidal ingresada tiene en su defecto una Transformada Rápida de Fourier (FFT), originada por el osciloscopio, la misma que es utilizada para el análisis, de igual forma se toma la señal de salida del tipo FFT que resulta de la onda sinusoidal luego de atravesar la región primaria a secundaria del transformador, llevando consigo los efectos del equipo en cada una de sus frecuencias resonantes.

El proceso consta de un generador de funciones que envía una señal que posteriormente están presentados en rangos de frecuencia, voltajes o decibeles, los mismos que son recibidos por un osciloscopio, que internamente realiza una operación matemática (FFT), entregando gráficas y a su vez los valores representativos que con ayuda de un software adicional de procesamiento de datos se visualiza en una forma de onda que facilita al entendimiento de la temática.

Los procedimientos a seguir se validan en dos tipos de transformadores, tomando al primero como modelo a escala y llegando a su homólogo comercial de distribución, comparando los dos resultados con un estudio de las gráficas obtenidas y con un símil de la función de transferencia de cada tipo.

Se usa las FFT, encontrando las variaciones en diferentes pruebas realizadas, teniendo como resultado el objetivo de lo propuesto, encontrando así una huella de forma ideal que ayuda radicalmente al comportamiento y funcionamiento del transformador, garantizando su funcionamiento óptimo, para futuras soluciones y prevención de daños originados por estrés mecánico o de carácter eléctrico.

Un análisis FRA se lo realiza con una frecuencia en barrido, utilizado principalmente para generar gráficas definitivas, es decir, que el equipo realiza el procesamiento de la señal y su ploteado, que por lo contrario a nuestro objetivo, es obtener similares conclusiones con equipos y métodos asequibles, por ejemplo equipos de instrumentación de un laboratorio.

### **2.3.2 GUÍA DE ANÁLISIS .**

Consiste en obtener una función de transferencia de un transformador nuevo que lo caracterice, posteriormente se lo somete a un estrés mecánico, eléctrico (post-operación) y con el transformador deteriorado se obtiene una nueva función de transferencia, es decir en falla, disponiendo de éstas dos gráficas, (pre-operación y post-operación), las mismas que son cotejadas y analizadas a diferentes rangos de frecuencias, dependiendo del caso de análisis, refleja variaciones a distintas frecuencias.

El procedimiento se lo realiza bajo dos tipos de magnitudes de amplitud de la función de transferencia, la primera es en decibeles (dB) y la segunda a tensión (Vrms), lo que permite obtener conclusiones más decidoras a distintas frecuencias.

En el cotejo de gráficas, en relación al estándar “IEEE Std C57.149 - 2012”, presentan variación en cuanto a su aspecto en un barrido de frecuencias, mientras que la propuesta, se basa en funciones de transferencia, que tienen como fuente, una Transformada Rápida de Fourier, y por concepto, difieren gráficamente, sin alteraciones en su forma de análisis.

Siguiendo el estándar “Std C57.149-212”, la misma que define el análisis FRA por 4 regiones, comprendido entre 1Hz hasta 1MHz, conformado por efectos definidos posteriormente. Las regiones que se toman de base a la norma están en un rango de hasta 1MHz, faltando el rango o región 4 que se encuentra hasta los 10 MHz, la cual no es considerada debido a varios inconvenientes como por ejemplo la falta de equipos generadores de señal a altas frecuencias, por otra parte las fallas ubicadas en esta región son fáciles de detectar con la ayuda de equipos comerciales desarrollados para el diagnóstico, por tanto ésta metodología resultaría de baja relevancia.

### **2.3.3 REGIONES DE ANÁLISIS**

#### **2.3.3.1 REGIÓN 1. EFECTOS EN EL NÚCLEO**

A baja frecuencia (por debajo de los 2 kHz), la respuesta en frecuencia comienza con la magnitud decreciente de -20 dB/década. Esto se debe a la inductancia magnetizante del núcleo.

Seguido entonces por un mínimo que se produce debido a la resonancia en serie entre la inductancia de magnetización del núcleo y capacitancia total del transformador.[4]

### **2.3.3.2 REGIÓN 2. INTERACCIÓN ENTRE BOBINADOS.**

Entre los 2kHz a 20kHz. La respuesta de frecuencia está influenciada por la interacción entre los devanados, así como por cómo los devanados y neutros están conectados y terminados (delta abierto/cerrado, flotante/conectado a tierra). [4]

### **2.3.3.3 REGIÓN 3. EFECTO DE LA ESTRUCTURA DE DEVANADO DEL DEVANADO BAJO PRUEBA.**

Entre los 20kHz a 1MHz. La estructura del devanado influye fuertemente en la respuesta en frecuencia. En este caso se observa que los intervalos de frecuencia tienen menos resonancia y anti resonancia y una tendencia de elevación principalmente capacitiva, debido a la alta capacitancia del devanado de alta tensión. [4]

### **2.3.3.4 REGIÓN 4. EFECTO DE LAS DERIVACIONES Y DE LAS DERIVACIONES DE PUESTA A TIERRA.**

Más allá de una frecuencia de 1MHz, la tendencia de la respuesta en frecuencia es irregular y compleja, influenciado por los cables de derivación y los conductores de puesta a tierra de medición. [4]

## **2.4 PRUEBAS DE ESTRÉS EN TRANSFORMADORES**

### **2.4.1 PRUEBA DE CORTO CIRCUITO.**

Con el fin de emular una falla de corto circuito en un transformador en operación, y sabiendo que es producida por la unión entre fases, en tiempos muy cortos. Lo que se hace es energizar al transformador a su tensión nominal progresivamente, con las fases del secundario en corto circuito, hasta llegar a su corriente nominal durante unos segundos.

Por lo tanto, éste tipo de falla, contribuye al deterioro del transformador, lo que hace analizable las fallas y su comportamiento en relación al transformador.

### **2.4.2 PRUEBA DE SOBRE CARGA.**

Es de conocimiento que en el campo de trabajo, las situaciones no se dan como en el diseño, razón por la cual, en ciertas situaciones, un transformador se encuentra trabajando por encima de su potencia de tolerancia, lo que hace que el transformador se fatigue y se vea reflejado en un Efecto Joule, es decir el calentamiento del transformador.

La presencia de calor en un transformador representa efectos nocivos para la funcionalidad óptima, y por ende la vida útil se ve disminuido. Este se refleja principalmente en el deterioro del aceite refrigerante, pérdida en las características del aislante, pandeo de la cuba, y aceleramiento de degradación del papel interno, que provoca pérdida de aislamiento eléctrico, entre otros efectos nocivos para el transformador.

Con la finalidad de simular el efecto en un transformador, lo que se ha hecho es cortocircuitar el primario y elevar la tensión en el secundario a la corriente nominal, hasta alcanzar el Efecto Joule esperado para el análisis.

### **2.4.3 CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS**

Una de las consecuencias de un calentamiento, es que el barnizado característico del conductor que conforman el bobinado, se ve deteriorado y se produce una junta entre espiras, que como se sabe, las características eléctricas diferirán en gran manera, no solo por la ley de Ohm, sino también por la inducción producida o denominada Ley de Faraday. Sin llegar a un caso extremo de falla e inoperabilidad del transformador, las características varían con solo existir un ligero acercamiento entre espiras, en el orden de las décimas de milímetro, ya que el espesor de aislamiento de barniz entre espiras, por efectos del calor se reduce.

### **2.4.4 DEGRADACIÓN DE ACEITE**

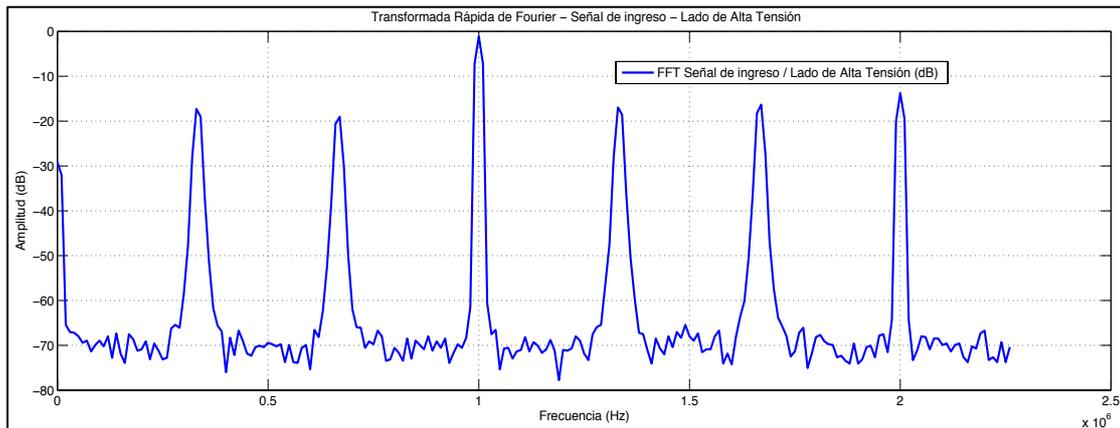
De la misma manera que en el apartado anterior, el incremento de temperatura, hace que las propiedades dieléctricas se vean disminuidas, sin embargo un factor importante que influye en el degradado dieléctrico, es que el papel aislante se desprende de tal forma que expide partículas de papel, haciendo que las propiedades del aceite se vean afectados, disminuyendo la vida útil, como también el funcionamiento.

## **2.5 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA “ORIGINAL – HUELLA”**

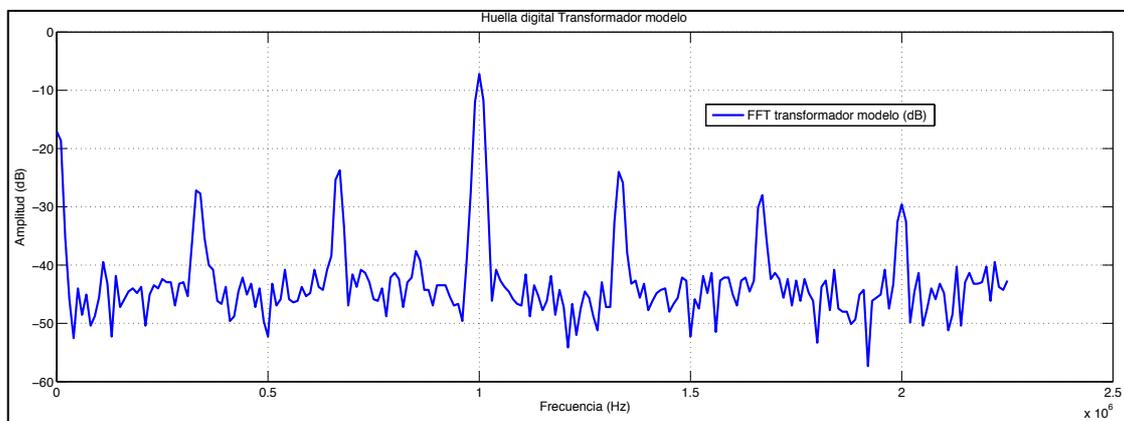
La huella digital muestra una gráfica representativa del transformador, que refleja todas sus características en su estado óptimo de operación, es decir cuando el transformador es completamente nuevo, conteniendo todas las características mecánicas y eléctricas en las condiciones adecuadas.

Como es de conocimiento previo, una función de transferencia es generada a partir de la experimentación en laboratorio, de aquí, se procede a inyectar una señal de 1 MHz a una tensión de 20 Vpp en el lado primario del transformador y obteniendo una señal del tipo FFT a la salida del secundario, cuyo gráfico es visualizado y salvado por el osciloscopio en decibeles, para su posterior comparación y visualización.

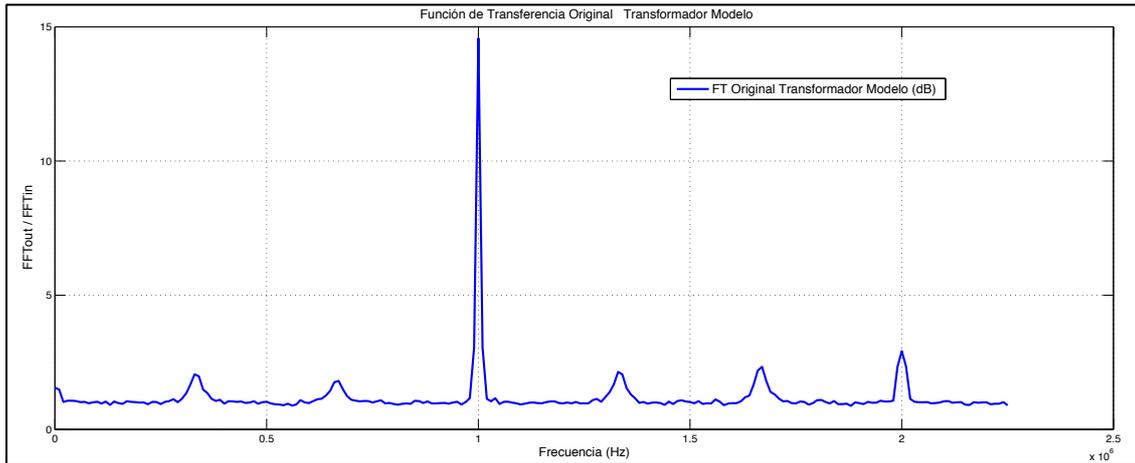
En las figuras 18 y 19 se muestran señales de ingreso (FFT) y salida (FFT), mientras que en la figura 20 se realiza el cociente de la salida e ingreso para obtener su respectiva función de transferencia (FT) resultante, para el transformador modelo.



**Figura 18.** FFT Original de la Señal de Ingreso para el Transformador Modelo.

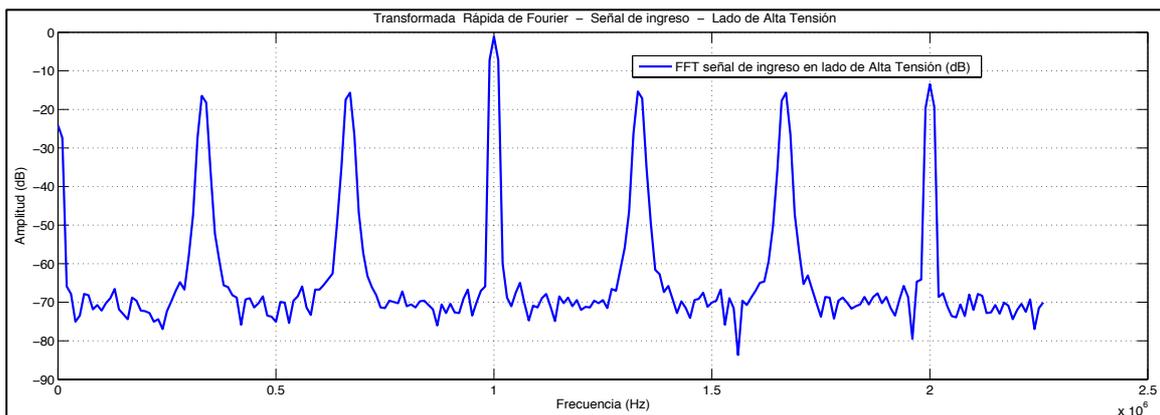


**Figura 19.** FFT Original de la Señal de Salida para el Transformador Modelo.



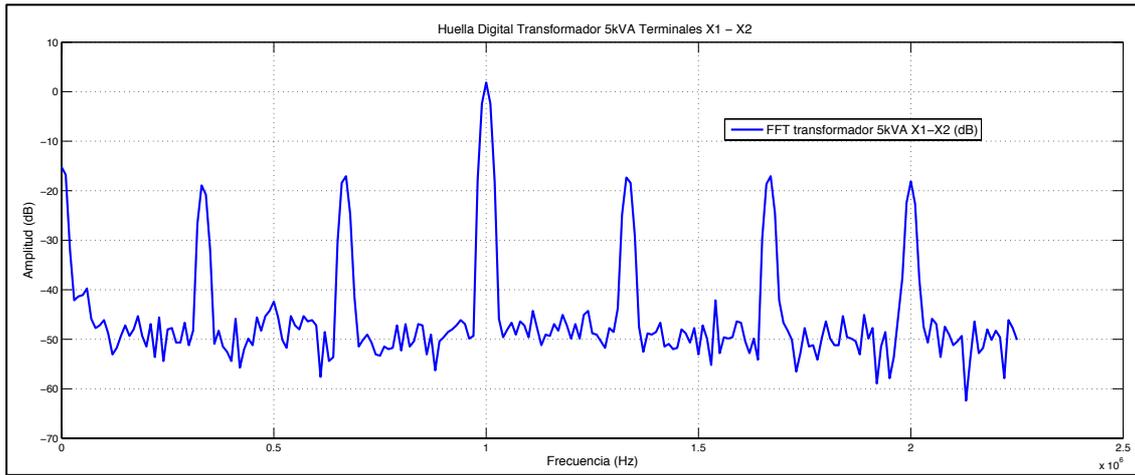
**Figura 20.** FT Original para el Transformador Modelo.

En la figura 21 se muestra la señal de ingreso (FFT) en escala de decibeles, ingresada en el lado primario, para el transformador de distribución de 5 kVA.

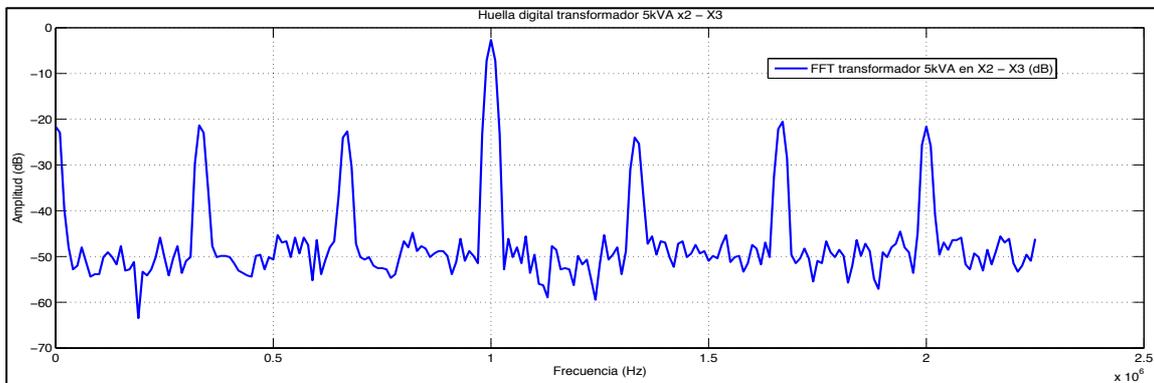


**Figura 21.** FFT Original de la Señal de Ingreso para el Transformador de Distribución de 5 kVA.

Sabiendo que el transformador de distribución posee tres terminales de salida X1, X2 y X3, es necesario obtener respuestas FFT que incluyan todos sus bobinados. En la figura 22 y 23 se muestran Transformadas Rápidas de Fourier para el bobinado X1-X2 y bobinado X2-X3 respectivamente. Sin dejar de lado la respuesta FFT en terminales X1-X3, por lo que es la respuesta FFT entre X1-X2 y X2-X3, siendo redundante para el análisis.

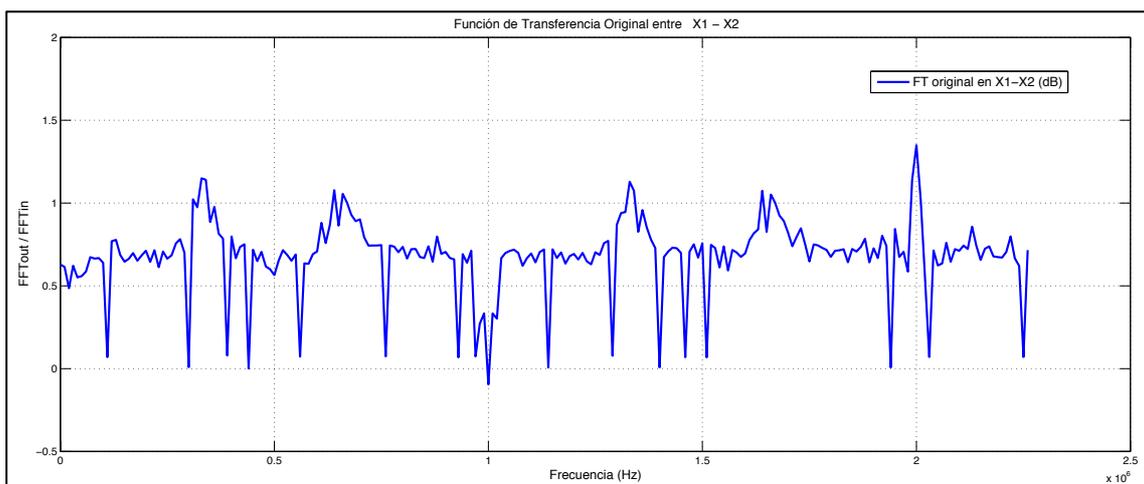


**Figura 22.** FFT Original de la Señal de Salida para el Transformador de Distribución de 5 kVA entre Bobinados (X1-X2).

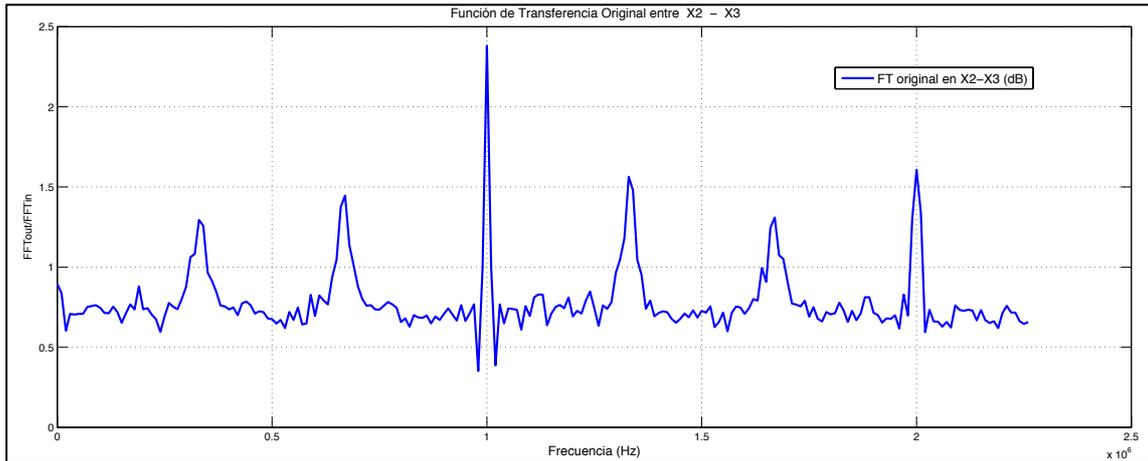


**Figura 23.** FFT Original de la Señal de Salida para el Transformador de Distribución de 5 kVA entre bobinados (X2-X3).

En la figura 24 y 25 se muestran las funciones de transferencia para cada bobinado X1-X2 y X2-X3 en escala de decibeles.



**Figura 24.** FT Original de la Señal de Salida para el Transformador de Distribución de 5 kVA entre Bobinados (X1-X2).



**Figura 25.** FT Original de la Señal de Salida para el Transformador de Distribución de 5 kVA entre Bobinados (X2-X3).

## 2.6 PRUEBAS EN TRANSFORMADOR MODELO

Una vez obtenido las funciones de transferencia originales del transformador a escala, se realiza todas las pruebas de estrés propuestas, teniendo en cuenta, que cada prueba posee su función de transferencia característica, la misma que se compara con la huella digital descrita en la sección 2.5

### 2.6.1 PROCEDIMIENTO PARA CONFIGURACIÓN DE EQUIPOS DE MEDICIÓN.

Una característica primordial al momento de realizar algún tipo de medición, es bajo qué características de configuración se las hace, es decir magnitudes a utilizar, como son: Tensiones, tiempos y escalas utilizadas.

Las configuraciones del generador de funciones no son complejas, sin embargo es necesario que se comprueben para cada medición, tensión constante y evitar activar el modo SWEEP. El generador de funciones debe estar configurado para una señal de 1 MHz y una tensión de 20 Vpp.

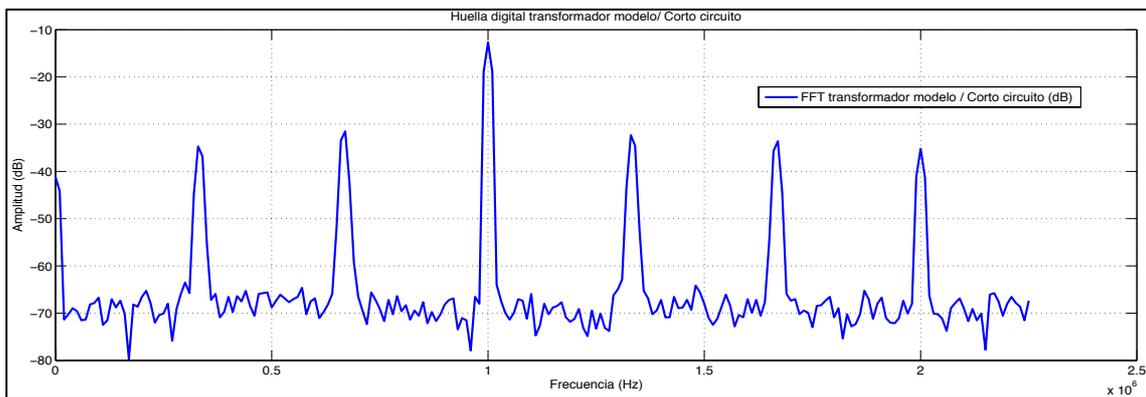
El osciloscopio está configurado de tal forma que las gráficas contengan todo el espectro de análisis, mostrando una forma de onda de fácil entendimiento, evitando así que la visualización no difiera entre cada muestra.

Cabe recalcar que para disminuir el error se realiza 5 muestras de datos, haciendo un promedio y aproximándose a un análisis exacto. La configuración para una toma de datos en la amplitud de decibels es la siguiente:

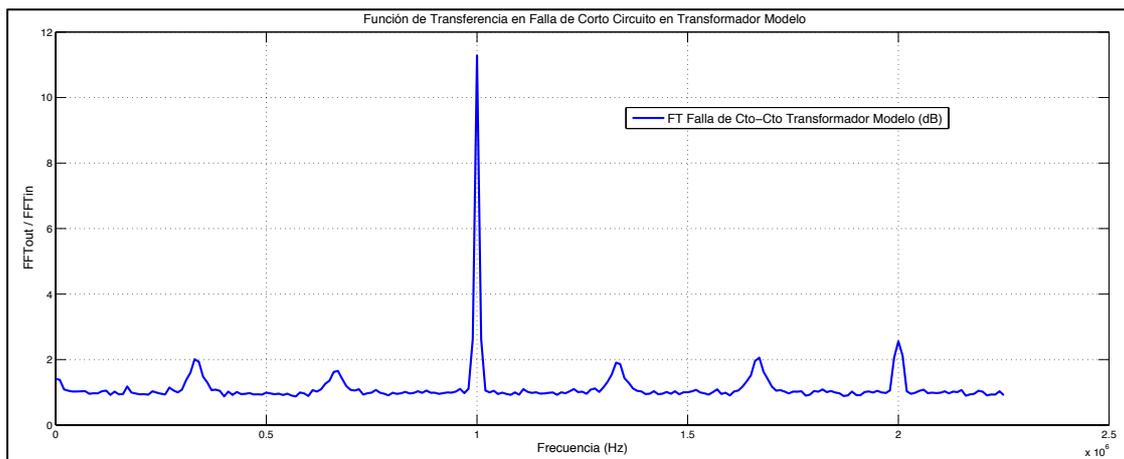
- Operación: FFT.
- Eje horizontal: 50useg.
- Eje vertical: 200mV.
- Configuración MATH - FFT.
- Ventana: Hanning.
- Vertical: 20dB – 0.00 Div.
- Zoom: 1X – 1.010MHz.

### 2.6.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE CORTO CIRCUITO.

Para encontrar una función de transferencia en falla de corto circuito, bajo el concepto de la sección 2.4.1, se obtiene la FFT de ingreso (Véase figura 18) y la FFT de salida (Véase figura 26) en falla a escala en decibeles, con la que se genera una función de transferencia mostrada en la figura 27.



**Figura 26.** FFT de Transformador Modelo en Condición de Falla de Corto Circuito.



**Figura 27.** FT de Transformador Modelo en Falla de Corto Circuito.

### 2.6.3 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE SOBRECARGA.

Para encontrar una función de transferencia en falla de sobrecarga, bajo el concepto de la sección 2.4.2, se obtiene la FFT de ingreso (Véase figura 18) y la FFT de salida (Véase figura 28) en falla a escala de decibeles, con la cual se genera una función de transferencia mostrada en la figura 29.

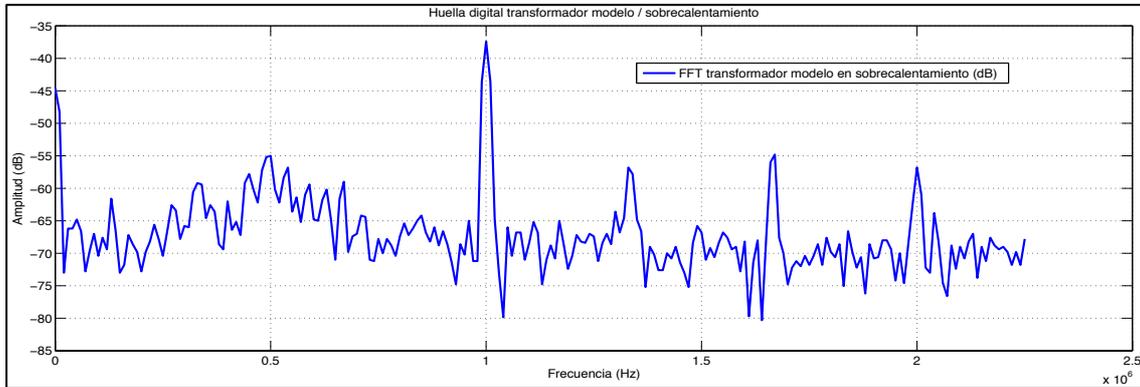


Figura 28. FFT de Transformador Modelo en Condición de Falla de Sobrecarga.

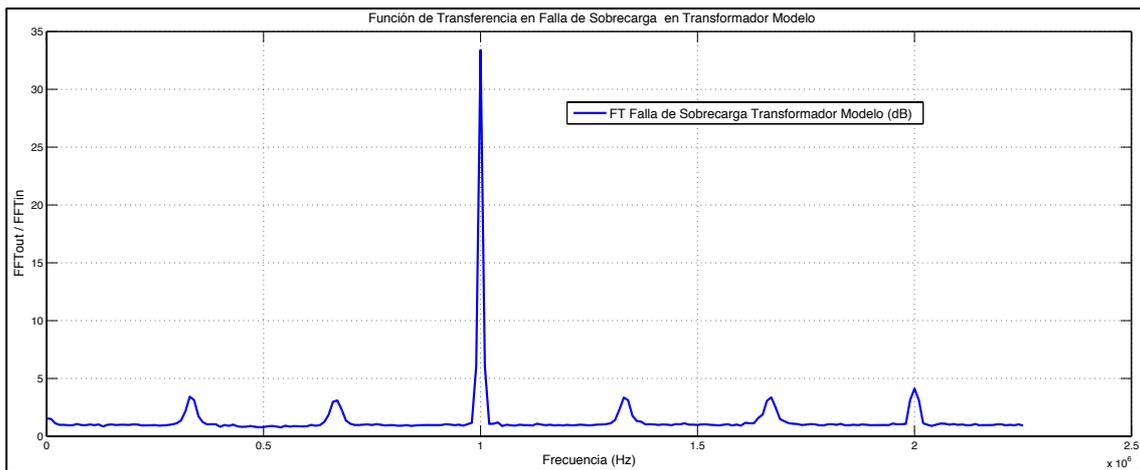
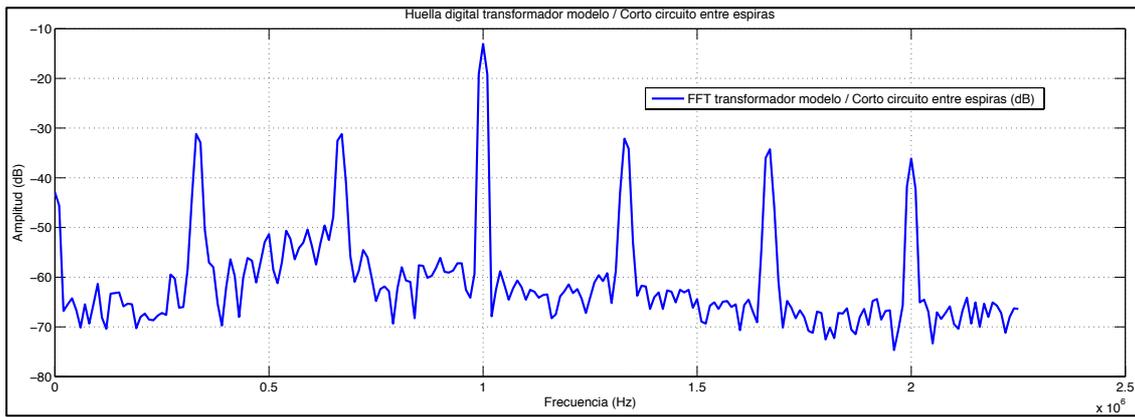


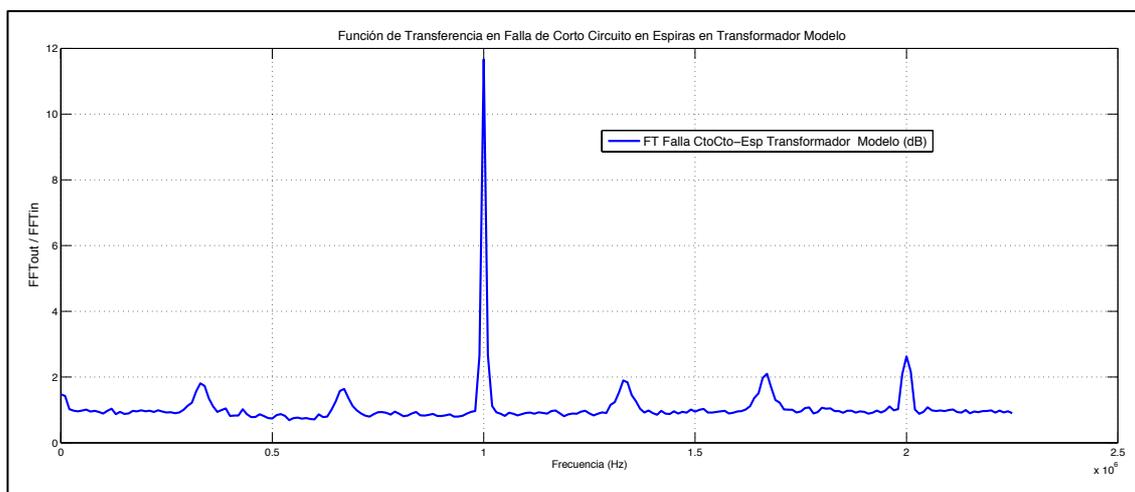
Figura 29. FT de Transformador Modelo en Falla de Sobrecarga.

### 2.6.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS.

Para encontrar una función de transferencia en falla de corto circuito entre espiras, bajo el concepto de la sección 2.4.3, se obtiene la FFT de ingreso (Véase figura 18) y la FFT de salida (Véase figura 30) en falla, a escala de decibeles, con la cual se genera una función de transferencia mostrada en la figura 31.



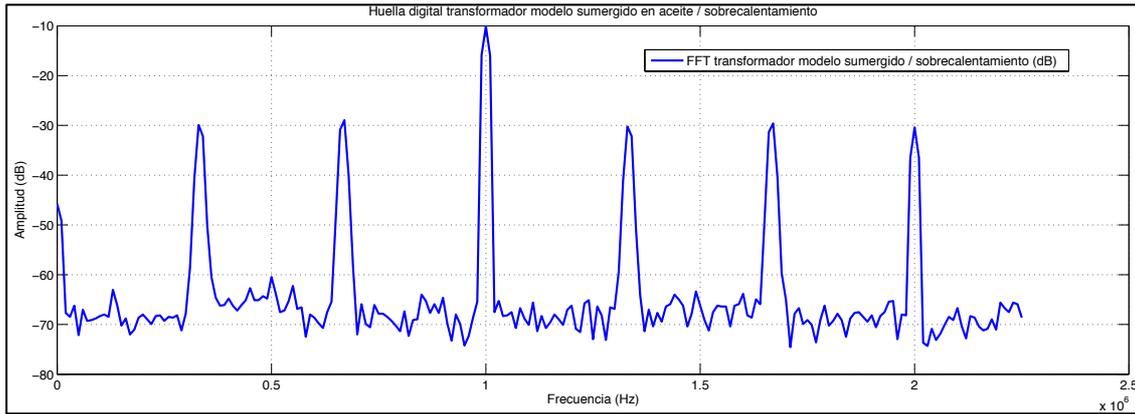
**Figura 30.** FFT de Transformador Modelo en Condición de Falla de Corto Circuito entre Espiras.



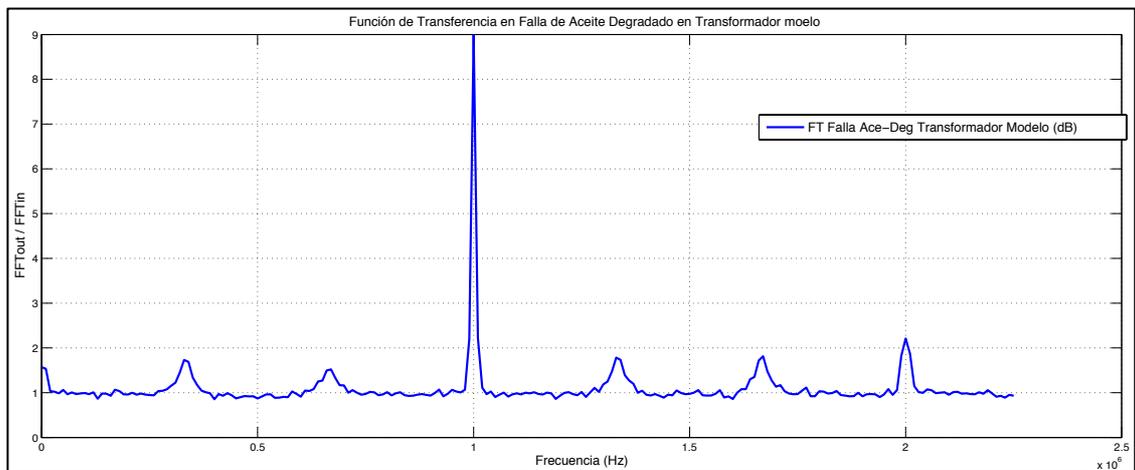
**Figura 31.** FT de Transformador Modelo en Falla de Corto Circuito entre Espiras.

### 2.6.5 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE DEGRADACIÓN DE ACEITE.

Para encontrar una función de transferencia en falla de degradación de aceite, bajo el concepto de la sección 2.4.4, se obtiene la FFT de ingreso (Véase figura 18) y la FFT de salida (Véase figura 32) en falla, a escala en decibeles, con la cual se genera una función de transferencia mostrada en la figura 33.



**Figura 32.** FFT de Transformador Modelo en Condición de Falla de Degradación de Aceite.



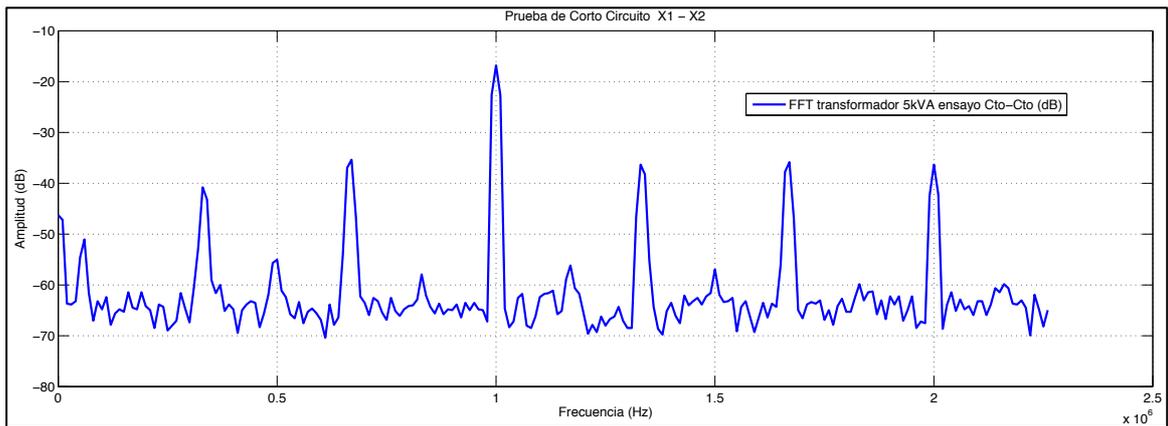
**Figura 33.** FT de transformador modelo en falla de degradación de aceite.

## 2.7 PRUEBAS EN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5KVA

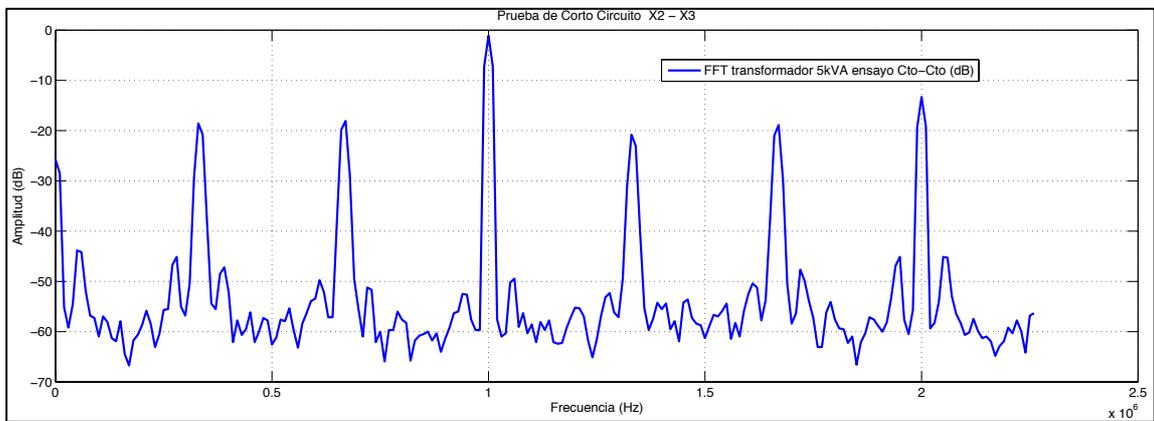
Una vez obtenido las funciones de transferencia originales del transformador de distribución monofásico de 5kVA, se realiza todas las pruebas de estrés propuestas, teniendo en cuenta, que cada prueba posee su función de transferencia característica, la misma que se compara con la huella digital descrita en la sección 2.5. El osciloscopio está configurado según la sección 2.6.1.

### 2.7.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE CORTO CIRCUITO.

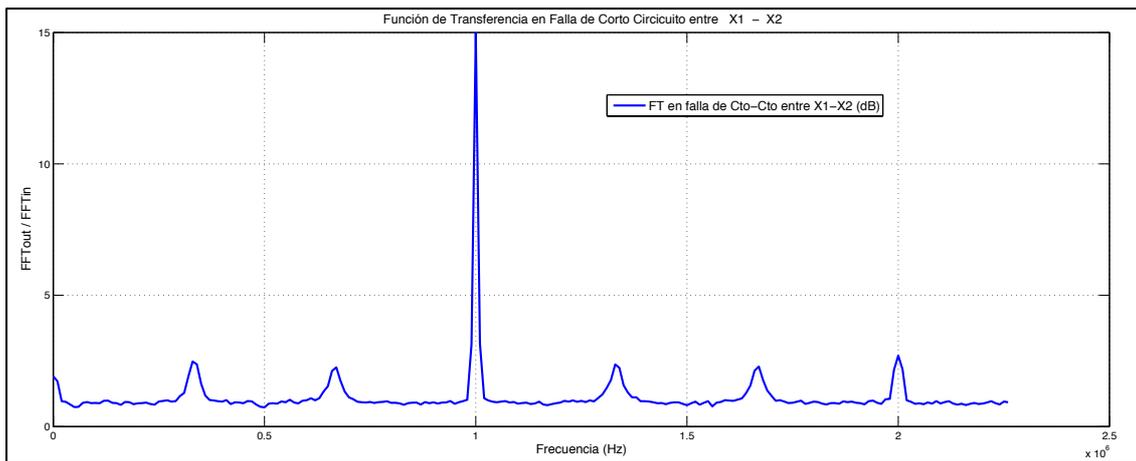
Para encontrar una función de transferencia en falla de corto circuito, bajo el concepto de la sección 2.4.1, se obtiene la FFT de ingreso (Véase figura 21) y la FFT de salida (Véase figura 34, figura 35) en falla a escala en decibeles para los bobinados X1-X2 y X2-X3, con la cual se genera una función de transferencia mostrada en la figura 36 y figura 37 para los dos bobinados.



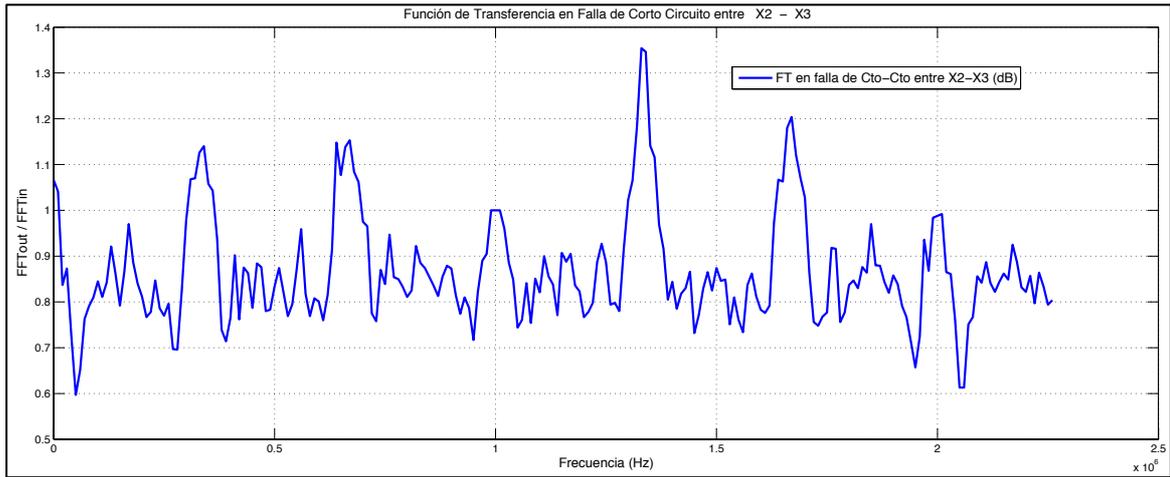
**Figura 34.** FFT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Corto Circuito para el Bobinado X1-X2.



**Figura 35.** FFT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Corto Circuito para el Bobinado X2-X3.



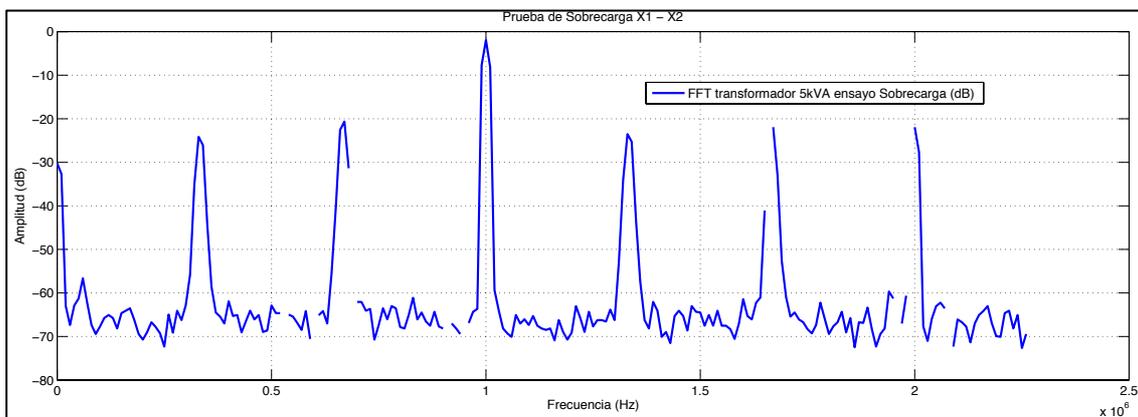
**Figura 36.** FT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Corto Circuito para el Bobinado X1-X2.



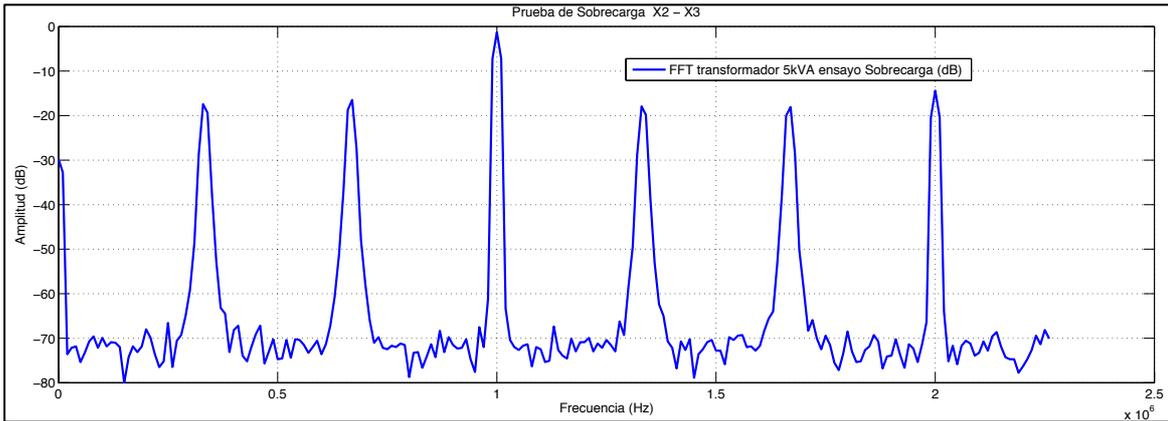
**Figura 37.** FT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Corto Circuito para el Bobinado X2-X3.

### 2.7.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE SOBRECARGA.

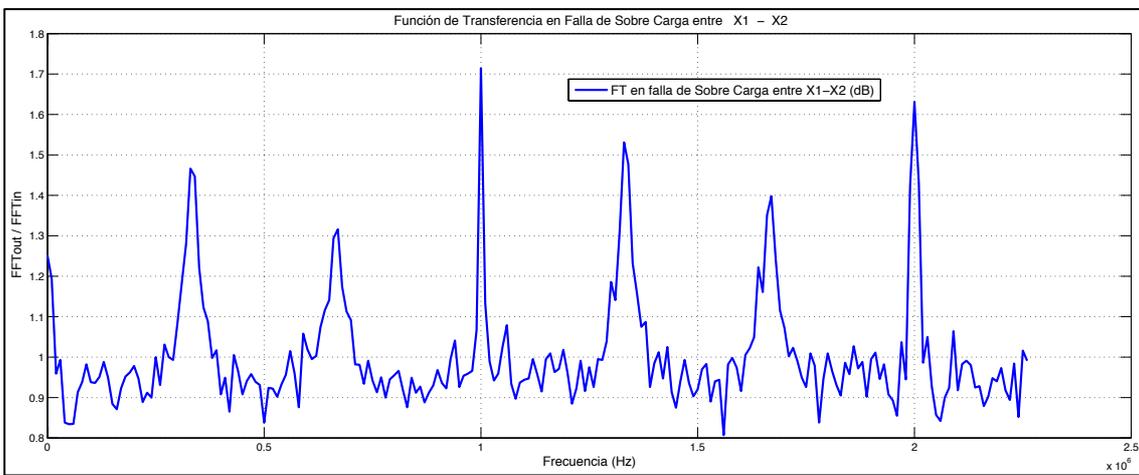
Para encontrar una función de transferencia en falla de sobre carga, bajo el concepto de la sección 2.4.2, se obtiene la FFT de ingreso (Véase figura 21) y la FFT de salida (Véase figura 38, figura 39) en falla a escala en decibeles para los bobinados X1-X2 y X2-X3, con la cual se genera una función de transferencia mostrada en la figura 40 y figura 41 para ambos bobinados.



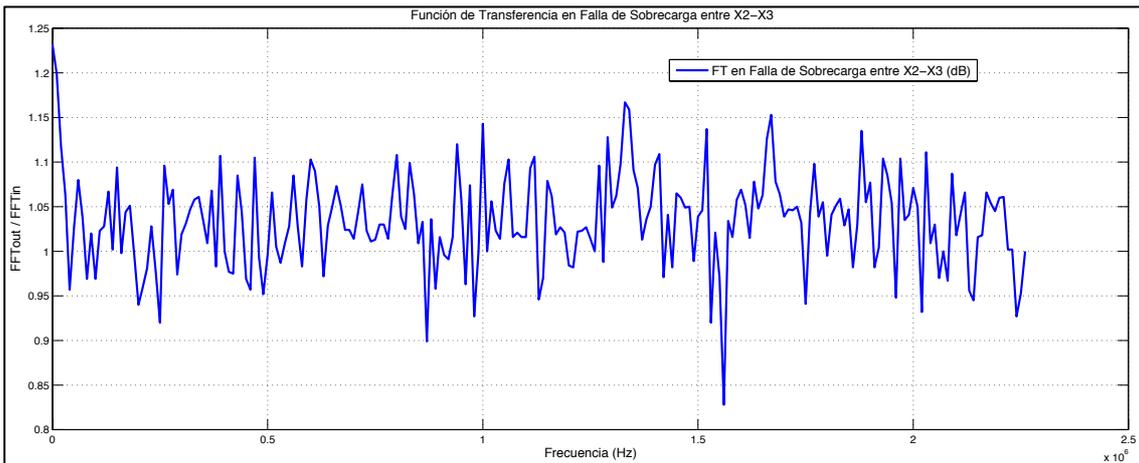
**Figura 38.** FFT de transformador monofásico de distribución de 5kVA en condición de falla de sobrecarga para el bobinado X1-X2.



**Figura 39.** FFT de transformador monofásico de distribución de 5kVA en condición de falla de sobrecarga para el bobinado X2-X3.



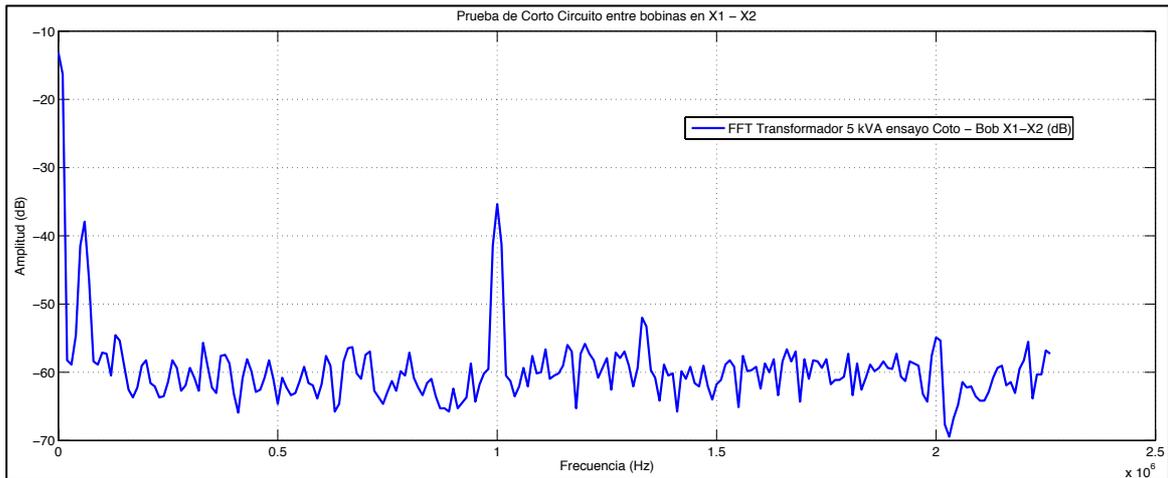
**Figura 40.** FT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Sobre Carga para el Bobinado X1-X2.



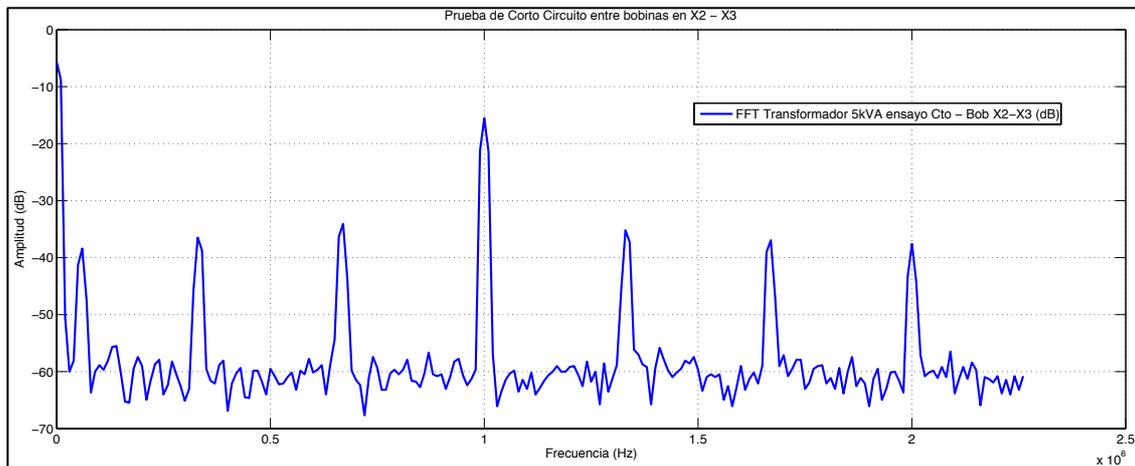
**Figura 41.** FT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Sobre Carga para el Bobinado X2-X3.

### 2.7.3 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS.

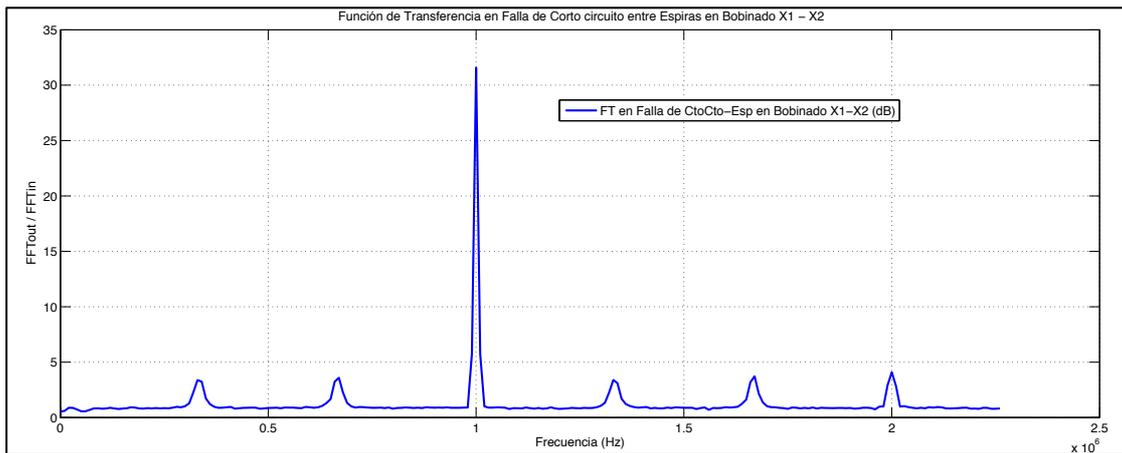
Para encontrar una función de transferencia en falla de corto circuito entre espiras, bajo el concepto de la sección 2.4.3, se obtiene la FFT de ingreso (21) y la FFT de salida (Véase figura 42, figura 43) en falla a escala en decibeles para los bobinados X1-X2 y X2-X3, con la cual se genera una función de transferencia mostrada en la figura 44 y figura 45 para ambos bobinados.



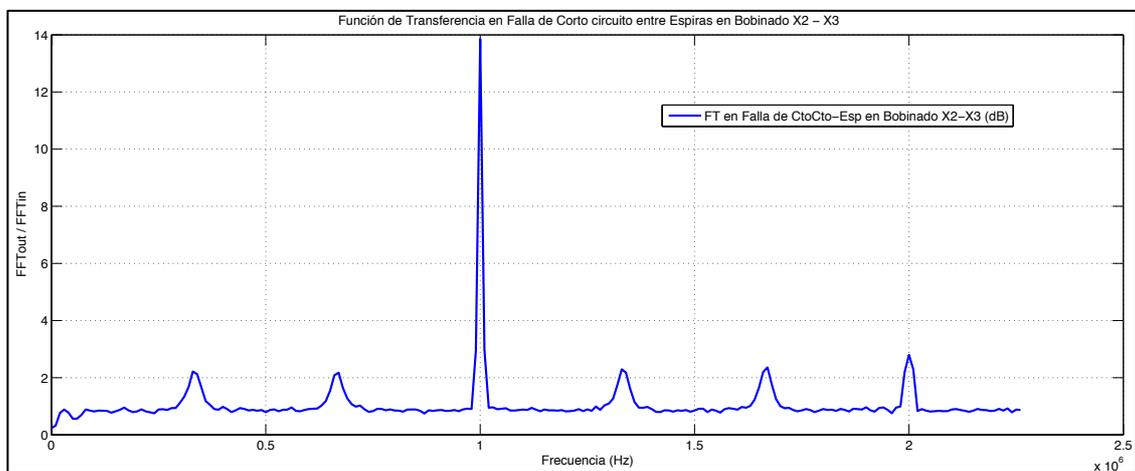
**Figura 42.** FFT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Corto Circuito entre Espiras para el Bobinado X1-X2.



**Figura 43.** FFT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Corto Circuito entre Espiras para el Bobinado X2-X3.



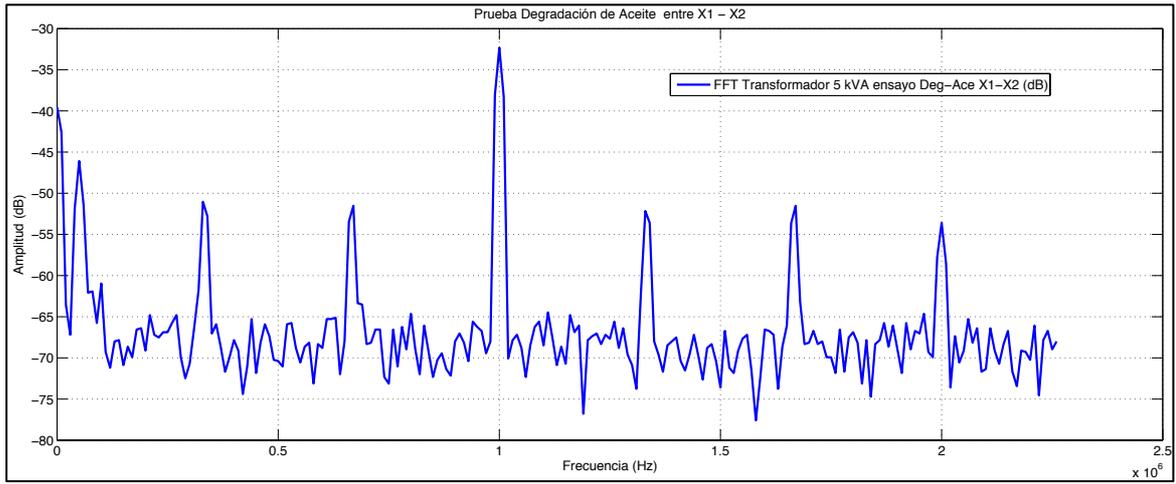
**Figura 44.** FT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falta de Corto Circuito entre Espiras para el Bobinado X1-X2.



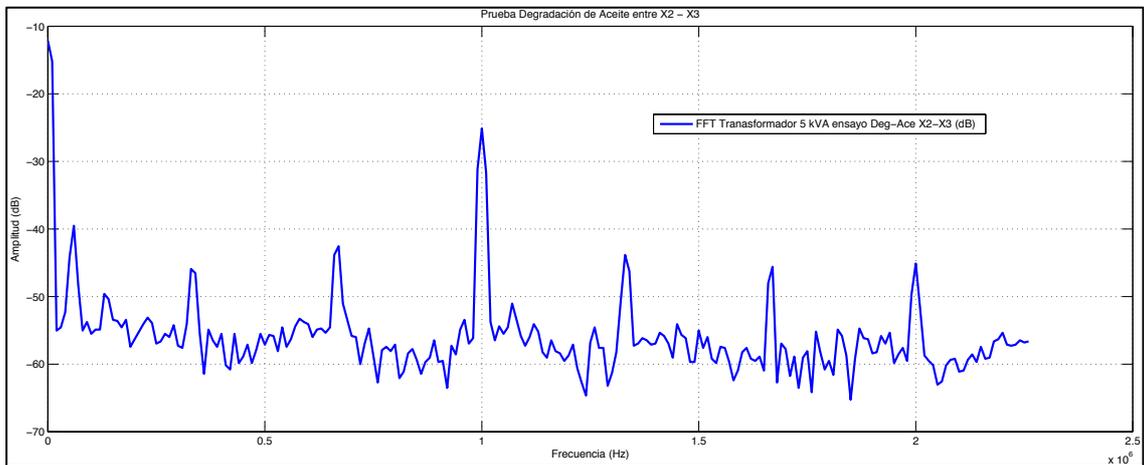
**Figura 45.** FT de transformador monofásico de distribución de 5kVA en condición de falla de corto circuito entre espiras para el bobinado X2-X3.

#### 2.7.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE DEGRADACIÓN DE ACEITE.

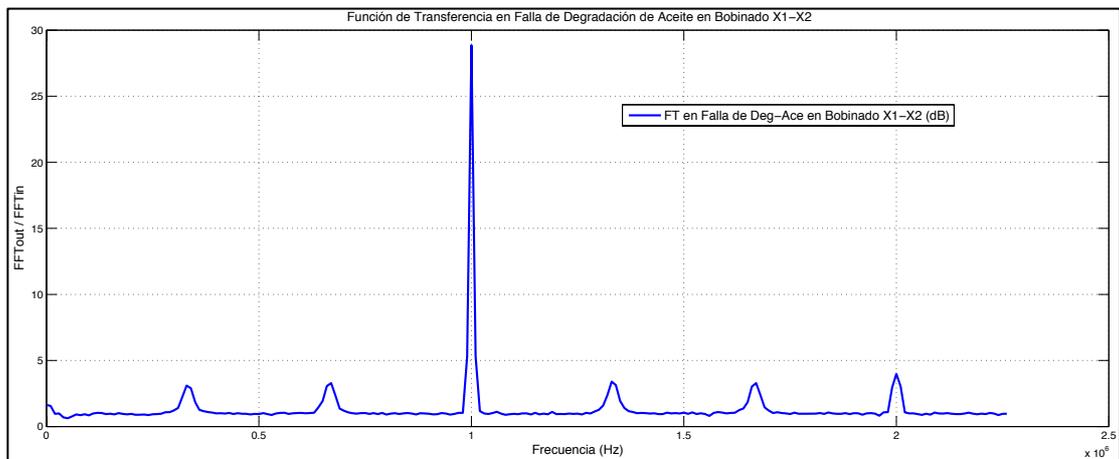
Para encontrar una función de transferencia en falla de degradación de aceite, bajo el concepto de la sección 2.4.4, se obtiene la FFT de ingreso (Véase figura 21) y la FFT de salida (Véase figura 46, figura 47) en falla a escala en decibels para los bobinados X1-X2 y X2-X3, con la cual se genera una función de transferencia mostrada en la figura 48 y figura 49 para ambos bobinados.



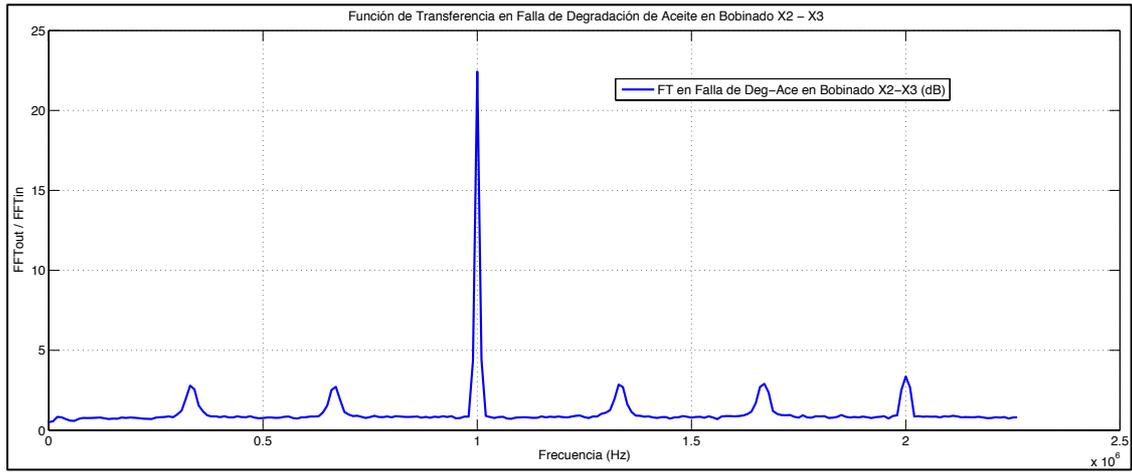
**Figura 46.** FFT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Degradación de Aceite para el Bobinado X1-X2.



**Figura 47.** FFT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Degradación de Aceite para el Bobinado X2-X3.



**Figura 48.** FT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Degradación de Aceite para el Bobinado X1-X2.



**Figura 49.** FT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Degradación de Aceite para el Bobinado X2-X3.

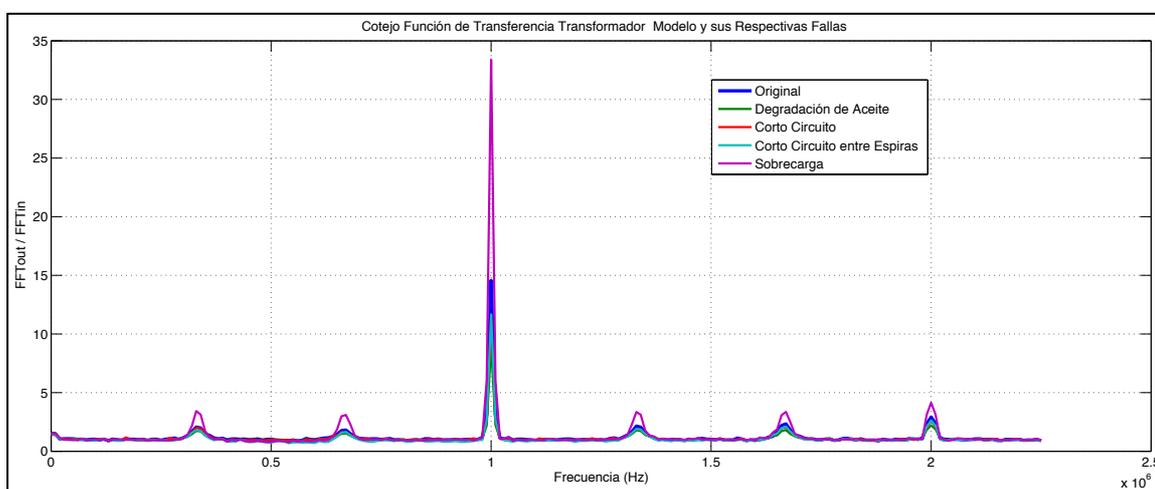
## CAPÍTULO 3

### 3 SECCIONAMIENTO POR REGIONES EN BASE EXPERIMENTAL DE GRÁFICAS RESULTANTES PARA FALLAS EN LA PROPUESTA DE METODOLOGÍA

Para comprobar la eficiencia de lo propuesto de la forma más viable posible se divide al espectro en tres regiones: Baja, fundamental y alta frecuencia, con la finalidad de simplificar y tener una forma más detallada del comportamiento de la onda.

En la región a baja frecuencia, se encuentran lóbulos resonantes, de menor amplitud que la fundamental, al igual sucede con las altas frecuencias, es por ello que una forma más visible se denota en la frecuencia fundamental, la misma que a simple vista ayuda de forma clara a reconocer la falla de cualquier transformador, recordando siempre que se habla de un análisis en su magnitud.

En la figura 50 se muestra una función de transferencia en todo su rango frecuencial analizable, tal como se explica anteriormente. Las formas de onda visualizadas están clasificadas por colores para ayudar a su mejor entendimiento.



**Figura 50.** Función de Transferencia en Condición de Falla en todo el Espectro Frecuencial.

## 3.2 TRANSFORMADOR MODELO

### 3.2.1 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN A BAJA FRECUENCIA .

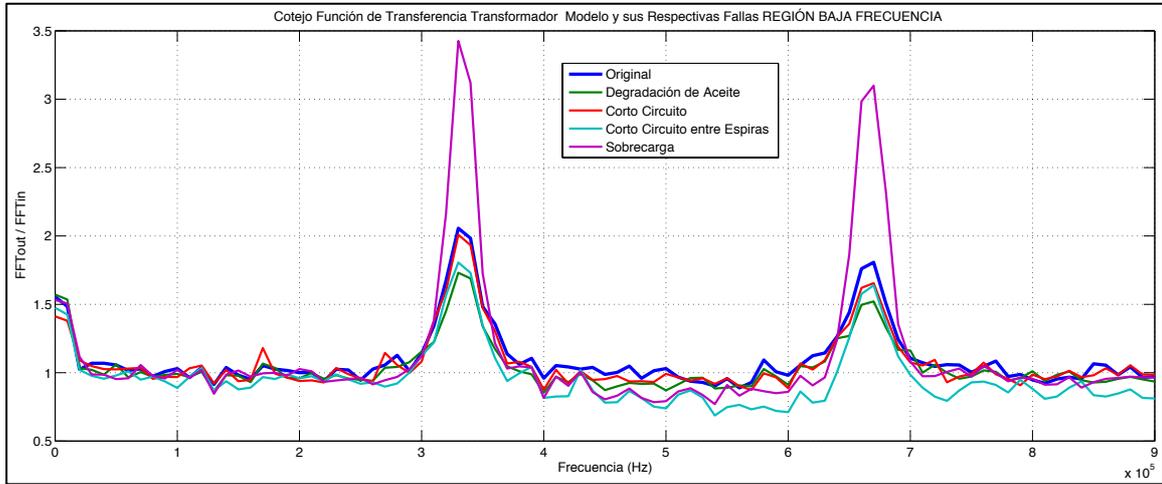


Figura 51. Función de Transferencia en Región a Baja Frecuencia.

En la gráfica 51 se puede observar los dos primeros lóbulos entre un rango de 0Hz a 900kHz, que por efectos de la resonancia se dan en las mismas frecuencias para cada falla.

		Fr=330kHz		Fr=670kHz	
		Lóbulo 1	Posición	Lóbulo 2	Posición
Fallas	Original	2,056		1,807	
	Deg-Ace	1,731		1,521	
	Cto-Cto	2,009		1,655	
	CtoCto-Esp	1,806		1,639	
	Sobre Carga	3,426		3,099	
Δ	ΔDeg-ace	-0,325		-0,286	
	ΔCto-Cto	-0,047		-0,152	
	ΔCtoCto-Es	-0,25		-0,168	
	ΔSobre Carga	1,37		1,292	
Variación	%Deg-Ace	-15,807	Bajo Original	-15,827	Bajo Original
	%Cto-Cto	-2,286	Bajo Original	-8,412	Bajo Original
	%CtoCto-Esp	-12,160	Bajo Original	-9,297	Bajo Original
	%Sobre Carga	66,634	Sobre Original	71,500	Sobre Original

Tabla 7. Variación Porcentual entre Fallas en Región a Baja Frecuencia.

En la tabla 7 se observa las magnitudes para cada frecuencia de resonancia, las mismas que son comparadas con la señal original patrón, observando también su variación porcentual con

respecto a la misma, notando que si el porcentaje es negativo, la señal de falla está por debajo de la referencia o viceversa.

En la falla de Corto Circuito se tiene un resultado porcentual de -2.286%, el mismo que indica que la señal original en caso de falla a Corto Circuito decae un 2.286% con respecto a la señal patrón, que es la forma ideal de éste transformador.

De ésta forma se analiza todas las fallas restantes, teniendo dichos valores porcentuales por encima o por debajo de nuestro patrón especificados en la tabla 7

### 3.2.2 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL

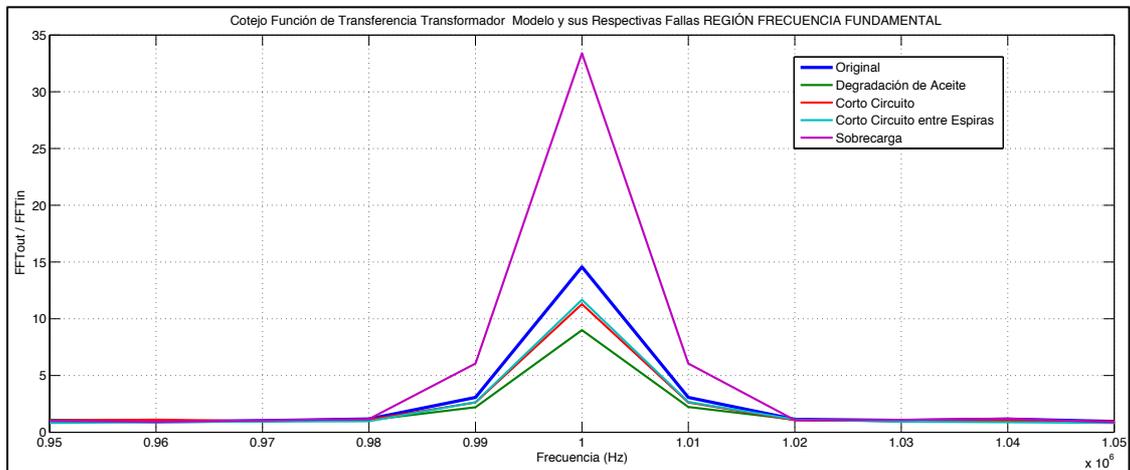


Figura 52. Función de Transferencia en Región de Frecuencia Fundamental.

Fr=1MHz			
Fundamental			Posición
Fallas	Original	14,57	Original
	Deg Ace	9	Bajo Original
	Cto-Cto	11,29	Bajo Original
	CtoCto-Esp	11,67	Bajo Original
	Sobrecarga	33,39	Sobre Original
Δ	Δdeg-ace	-5,57	Bajo Original
	ΔCto-Cto	-3,28	Bajo Original
	ΔCtoCto-Es	-2,9	Bajo Original
	ΔSobrecarga	18,82	Sobre Original
Variación	%Deg-Ace	-38,22923816	Bajo Original
	%Cto-Cto	-22,51201098	Bajo Original
	%CtoCto-Esp	-19,90391215	Bajo Original
	%Sobrecarga	129,1695264	Sobre Original

Tabla 8. Variación Porcentual entre Fallas en Región de Frecuencia Fundamental.

En la frecuencia fundamental se observa una señal de un solo lóbulo y con magnitud de amplitud superior a las de baja frecuencia y alta frecuencia. En éste caso la visualización es más notable en la falla de Sobre Carga, pudiendo constatar en la tabla 8 un nivel porcentual de 129.169% creciente en relación a la original.

### 3.2.3 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN A ALTA FRECUENCIA

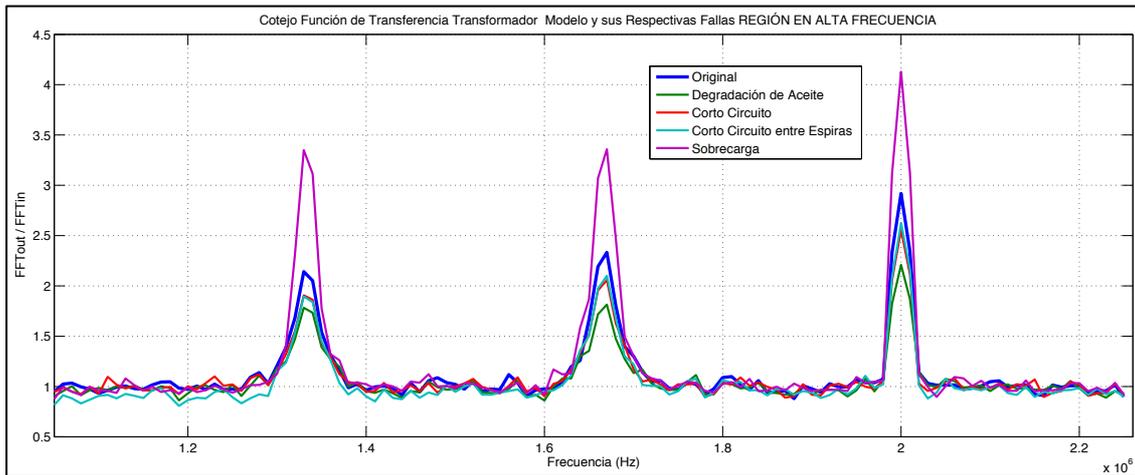


Figura 53. Función de Transferencia en Región de Alta Frecuencia.

		Fr=1,33MHz		Fr=1,67MHz		Fr=2MHz	
		Lóbulo 4	Posición	Lóbulo 5	Posición	Lóbulo 6	Posición
Fallas	Original	2,142		2,333		2,919	
	Deg Ace	1,783		1,814		2,209	
	Cto-Cto	1,906		2,059		2,558	
	CtoCto-Esp	1,895		2,1		2,626	
	Sobre Carga	3,349		3,358		4,128	
$\Delta$	$\Delta$ deg-ace	-0,359		-0,519		-0,71	
	$\Delta$ Cto-Cto	-0,236		-0,274		-0,361	
	$\Delta$ CtoCto-Es	-0,247		-0,233		-0,293	
	$\Delta$ Sobre Carga	1,207		1,025		1,209	
Variación	%Deg-Ace	-16,760	Bajo Original	-22,246	Bajo Original	-24,323	Bajo Original
	%Cto-Cto	-11,018	Bajo Original	-11,745	Bajo Original	-12,367	Bajo Original
	%CtoCto-Esp	-11,531	Bajo Original	-9,987	Bajo Original	-10,038	Bajo Original
	%Sobre Carga	56,349	Sobre Original	43,935	Sobre Original	41,418	Sobre Original

Tabla 9. Variación Porcentual entre Fallas en Región de Alta Frecuencia.

Otra forma de ver la variación de cada falla es con el número de veces que se incrementa la señal patrón, encontrando el cociente resultante con respecto a la original. Tomando por ejemplo la degradación de aceite, tenemos un cociente resultante de 0,6177 veces con respecto a la original, esto quiere decir que el valor está por debajo de la original, por tener un cociente menor a la unidad véase la tabla 9.

### 3.3 TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICO DE 5 KVA

Usando la misma deducción del transformador modelo, se analiza las regiones frecuenciales en baja, fundamental y alta, para cada una de las fallas en relación a la original, teniendo en cuenta que para el caso de un transformador comercial tiene tres terminales de salida en la parte secundaria X1, X2 y X3.

Cada región está delimitada por un rango de frecuencia en cada lóbulo de análisis, detallando amplitudes, diferencias con respecto al original, porcentaje de variación y posición.

#### 3.3.1 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN A BAJA FRECUENCIA EN EL BOBINADO X1-X2.

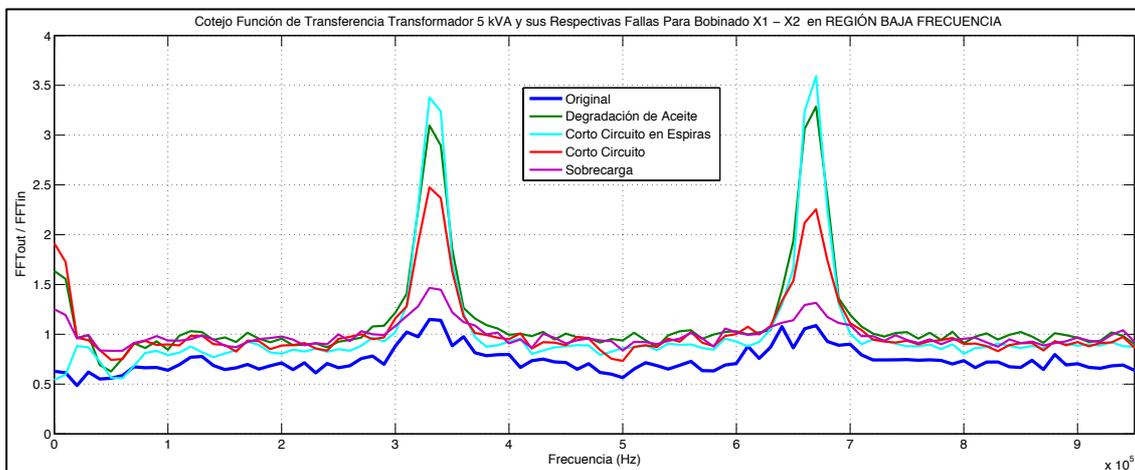


Figura 54. Función de Transferencia en Región de Baja Frecuencia en Bobinado X1 – X2.

		Fr=330kHz		Fr=670kHz	
		Lóbulo 1	Posición	Lóbulo 2	Posición
Fallas	Original	1,294		1,446	
	Deg Ace	2,786		2,714	
	Cto-Cto	1,126		1,153	
	CtoCto-Esp	2,214		2,173	
	Sobre Carga	1,058		1,051	
$\Delta$	$\Delta$ deg-ace	1,492		1,268	
	$\Delta$ Cto-Cto	-0,168		-0,293	
	$\Delta$ CtoCto-Es	0,92		0,727	
	$\Delta$ Sobre Carga	-0,236		-0,395	
Variación	%Deg-Ace	115,301	Sobre Original	87,690	Sobre Original
	%Cto-Cto	-12,983	Bajo Original	-20,263	Bajo Original
	%CtoCto-Esp	71,097	Sobre Original	50,277	Sobre Original
	%Sobre Carga	-18,238	Bajo Original	-27,317	Bajo Original

Tabla 10. Variación Porcentual entre Fallas en Región de Baja Frecuencia en Bobinado X1 – X2.

### 3.3.2 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN A BAJA FRECUENCIA EN EL BOBINADO X2-X3.

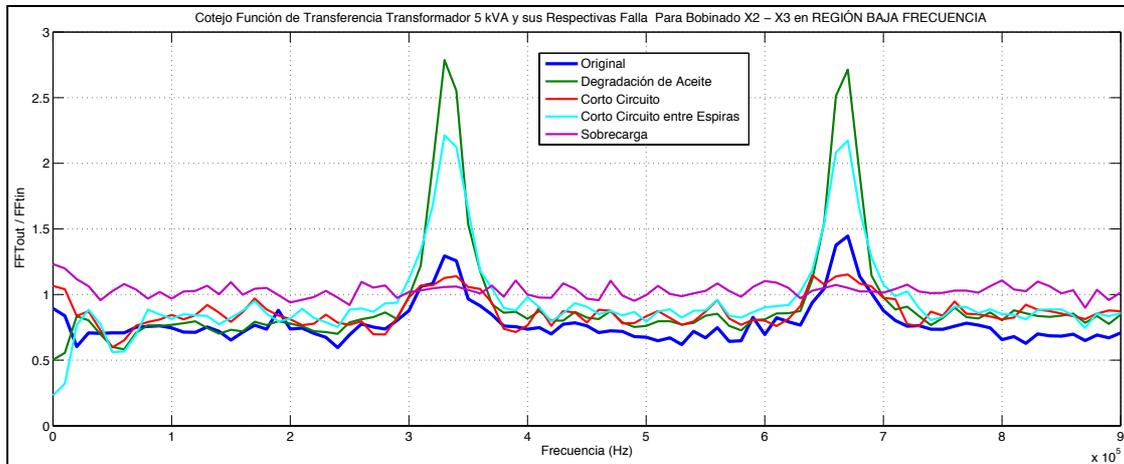


Figura 55. Función de Transferencia en Región de Baja Frecuencia en Bobinado X2 – X3.

		Fr=330kHz		Fr=670kHz	
		Lóbulo 1	Posición	Lóbulo 2	Posición
Fallas	Original	1,294		1,446	
	Deg Ace	2,786		2,714	
	Cto-Cto	1,126		1,153	
	CtoCto-Esp	2,214		2,173	
	Sobre Carga	1,058		1,051	
$\Delta$	$\Delta$ deg-ace	1,492		1,268	
	$\Delta$ Cto-Cto	-0,168		-0,293	
	$\Delta$ CtoCto-Es	0,92		0,727	
	$\Delta$ Sobre Carga	-0,236		-0,395	
Variación	%Deg-Ace	115,301	Sobre Original	87,690	Sobre Original
	%Cto-Cto	-12,983	Bajo Original	-20,263	Bajo Original
	%CtoCto-Esp	71,097	Sobre Original	50,277	Sobre Original
	%Sobre Carga	-18,238	Bajo Original	-27,317	Bajo Original

Tabla 11. Variación Porcentual entre Fallas en Región de Baja Frecuencia en Bobinado X2 – X3.

### 3.3.3 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL EN EL BOBINADO X1-X2.

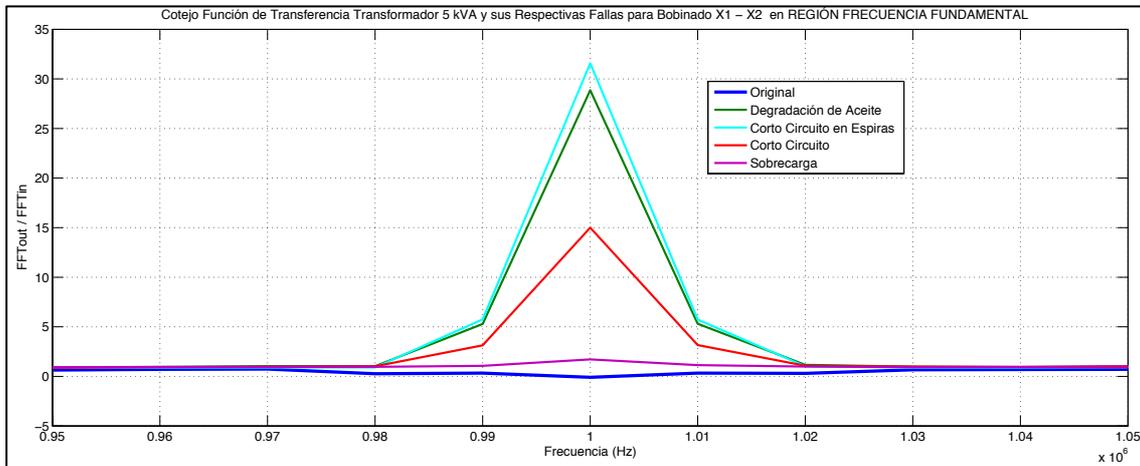
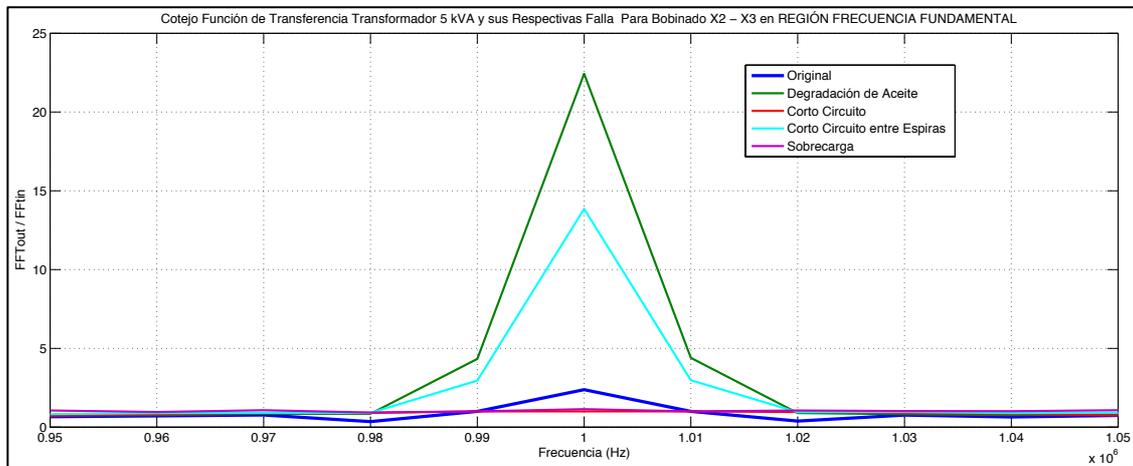


Figura 56. Función de Transferencia en Región de Frecuencia Fundamental en Bobinado X1 – X2.

Fr=1MHz			
Fundamental			Posición
Fallas	Original	2,381	
	Deg Ace	22,43	
	Cto-Cto	1	
	CtoCto-Esp	13,86	
	Sobre Carga	1,143	
$\Delta$	$\Delta$ deg-ace	20,049	
	$\Delta$ Cto-Cto	-1,381	
	$\Delta$ CtoCto-Es	11,479	
	$\Delta$ Sobre Carga	-1,238	
Variación	%Deg-Ace	842,0411592	Sobre Original
	%Cto-Cto	-58,00083998	Bajo Original
	%CtoCto-Esp	482,1083578	Sobre Original
	%Sobre Carga	-51,9949601	Bajo Original

**Tabla 12.** Variación Porcentual en Fallas de Región en Frecuencia Fundamental del Bobinado X1-X2.

### 3.3.4 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL EN EL BOBINADO X2-X3.

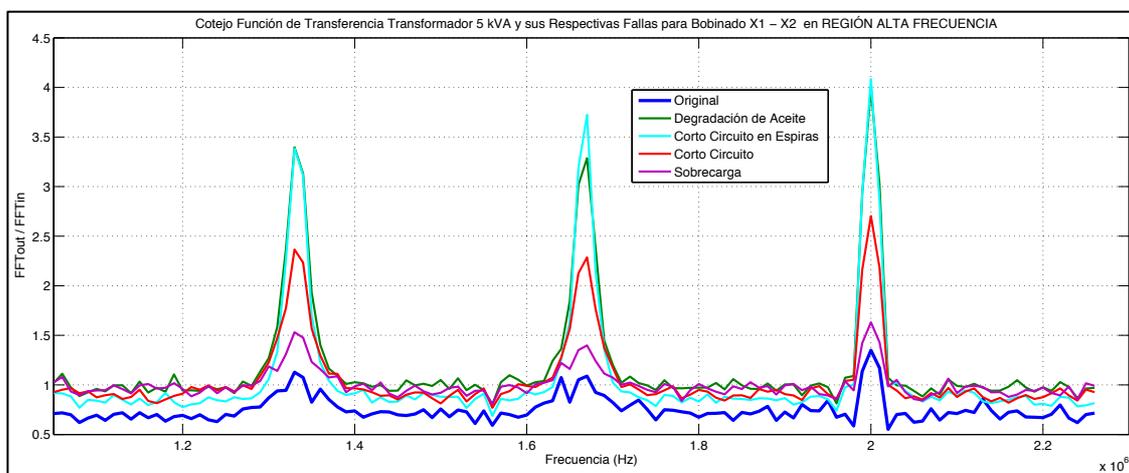


**Figura 57.** Función de Transferencia en Región de Frecuencia Fundamental en Bobinado X2 – X3.

Fr=1MHz			
Fundamental			Posición
Fallas	Original	2,381	
	Deg Ace	22,43	
	Cto-Cto	1	
	CtoCto-Esp	13,86	
	Sobre Carga	1,143	
$\Delta$	$\Delta$ deg-ace	20,049	
	$\Delta$ Cto-Cto	-1,381	
	$\Delta$ CtoCto-Es	11,479	
	$\Delta$ Sobre Carga	-1,238	
Variación	%Deg-Ace	842,041	Sobre Original
	%Cto-Cto	-58,001	Bajo Original
	%CtoCto-Esp	482,108	Sobre Original
	%Sobre Carga	-51,995	Bajo Original

**Tabla 13.** Variación Porcentual en Fallas de Región en Frecuencia Fundamental del Bobinado X2-X3.

### 3.3.5 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN A ALTA FRECUENCIA EN EL BOBINADO X1-X2.

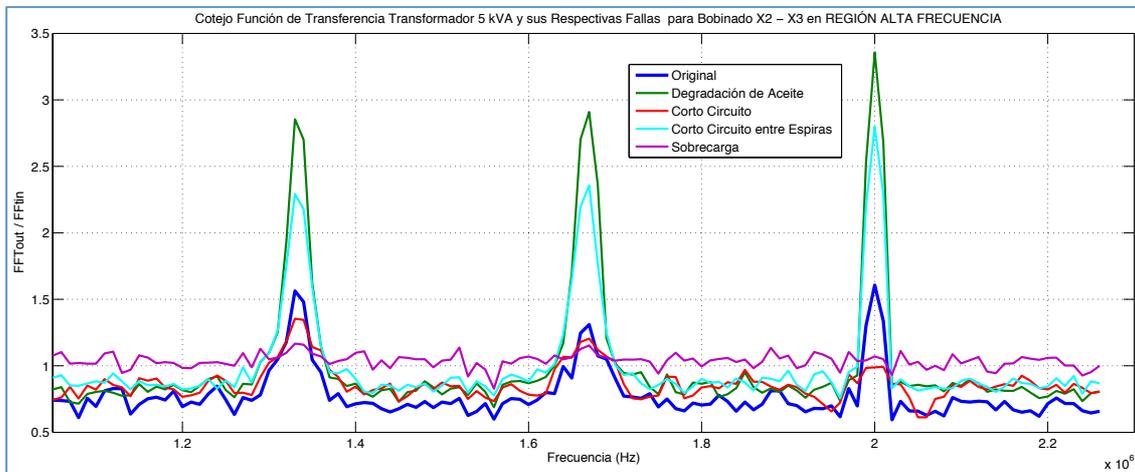


**Figura 58.** Función de Transferencia en Región de Alta Frecuencia en Bobinado X1 – X2.

		Fr=1,33MHz		Fr=1,67MHz		Fr=2MHz	
		Lóbulo 4	Posición	Lóbulo 5	Posición	Lóbulo 6	Posición
Fallas	Original	1,128		1,089		1,349	
	Deg Ace	3,396		3,286		3,988	
	Cto-Cto	3,385		3,724		4,083	
	CtoCto-Esp	2,365		2,286		2,702	
	Sobre Carga	1,531		1,398		1,631	
$\Delta$	$\Delta$ deg-ace	2,268		2,197		2,639	
	$\Delta$ Cto-Cto	2,257		2,635		2,734	
	$\Delta$ CtoCto-Es	1,237		1,197		1,353	
	$\Delta$ Sobre Carga	0,403		0,309		0,282	
Variación	%Deg-Ace	201,064	Sobre Original	94,171	Sobre Original	90,408	Sobre Original
	%Cto-Cto	200,089	Sobre Original	112,945	Sobre Original	93,662	Sobre Original
	%CtoCto-Esp	109,663	Sobre Original	109,917	Sobre Original	46,351	Sobre Original
	%Sobre Carga	35,727	Sobre Original	13,245	Sobre Original	9,661	Sobre Original

**Tabla 14.** Variación Porcentual entre Fallas en Región de Alta Frecuencia en Bobinado X1 – X2.

### 3.3.6 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN A ALTA FRECUENCIA EN EL BOBINADO X2-X3.



**Figura 59.** Función de Transferencia en Región de Alta Frecuencia en Bobinado X2 – X3.

		Fr=1,33MHz		Fr=1,67MHz		Fr=2MHz	
		Lóbulo 4	Posición	Lóbulo 5	Posición	Lóbulo 6	Posición
Fallas	Original	1,563		1,31		1,607	
	Deg Ace	2,854		2,908		3,357	
	Cto-Cto	1,354		1,204		0,988	
	CtoCto-Esp	2,292		2,357		2,798	
	Sobre Carga	1,167		1,153		1,071	
$\Delta$	$\Delta$ deg-ace	1,291		1,598		1,75	
	$\Delta$ Cto-Cto	-0,209		-0,106		-0,619	
	$\Delta$ CtoCto-Es	0,729		1,047		1,191	
	$\Delta$ Sobre Carga	-0,396		-0,157		-0,536	
Variación	%Deg-Ace	82,598	Sobre Original	121,985	Sobre Original	108,899	Sobre Original
	%Cto-Cto	-13,372	Bajo Original	-8,092	Bajo Original	-38,519	Bajo Original
	%CtoCto-Esp	46,641	Sobre Original	79,924	Sobre Original	74,113	Sobre Original
	%Sobre Carga	-25,336	Bajo Original	-11,985	Bajo Original	-33,354	Bajo Original

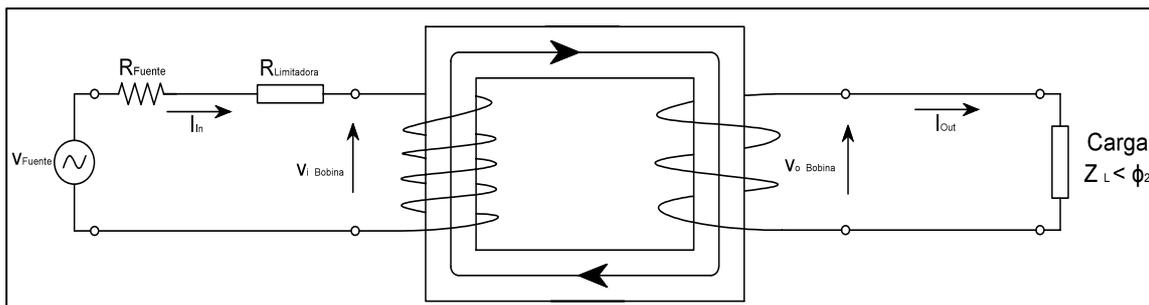
**Tabla 15.** Variación Porcentual entre Fallas en Región de Alta Frecuencia en Bobinado X2 – X3.

### 3.4 FRA TRADICIONAL CON NUEVO TRANSFORMADOR MODELO

Debido a que lo propuesto puede llegar a tener confusión con un FRA convencional ya definido por norma, se implementa un análisis FRA tradicional con sus cálculos basados en la figura 60, en donde se toma en cuenta aspectos como la tensión, corriente e impedancias para su correcto funcionamiento.

#### 3.4.1 GUÍA PRÁCTICA DE UN FRA.

En la figura 60 se muestra un esquema eléctrico con parámetros de ingreso y salida que se toman en cuenta para la metodología, debido a que por cuestiones de cálculo puede llegar a dar valores erróneos en lo propuesto, como por ejemplo en la corriente de la fuente, siendo mayor a la corriente de vacío y justificando así el analizador de repuesta en frecuencia propuesto.



**Figura 60.** Esquema Fundamental de un Analizador FRA para un Transformador

### 3.4.2 CÁLCULOS SEGÚN EL PRINCIPIO DE UN FRA TRADICIONAL.

Para calcular la impedancia total de la parte primaria del transformador, conectado en paralelo a un generador de funciones, que posee una impedancia de 50 ohm, ésta a su vez se encuentra en serie a la resistencia de la bobina, que según datos de placa tiene una impedancia de 234.2 ohm. Como el generador de funciones posee una tensión de 20Vpp, entonces por Ley de Ohm, se encuentra la corriente del sistema primario.

$$R_{total} = 50\text{ohm} + 234,2\text{ohm} = 284,2 \text{ ohm}$$

$$I_1 = \frac{V}{R} = \frac{20V}{284,2\text{ohm}} = 0,0703 \text{ A}$$

Donde  $I_1$  es la corriente del sistema.

De la misma manera se deduce la corriente de vacío del transformador, para ello hay que tener en cuenta los datos de placa que nos indica su potencia y su voltaje, llegando así a una corriente del transformador de 0.2272A.

$$P_{trafo} = 5000 \text{ VA}$$

$$V_{trafo} = 22000 \text{ V}$$

$$I_{trafo} = \frac{5000\text{VA}}{22000\text{V}} = 0,2272 \text{ A}$$

Donde la corriente de vacío es la corriente que circula en el transformador sin carga.

La corriente de generador de funciones se calcula de la siguiente manera

$$V_{gen} = 20 \text{ V}$$

$$R_{gen} = 50 \text{ ohm}$$

$$I_{gen} = \frac{20 \text{ V}}{50 \text{ ohm}} = 0,4 \text{ A}$$

Por lo tanto la corriente de generador tiene capacidad para el transformador con la condición que:

$$I_{gen} > I_{trafo}$$

Estos cálculos permiten confirmar que efectivamente es viable el método, así mismo se los realiza de forma similar para la parte secundaria del transformador.

Para el caso que la fuente no posea la corriente necesaria para abastecer el sistema, se tiene que realizar un acople con un amplificador de señal.

### 3.4.3 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA UN FRA TRADICIONAL.

Implementando el esquema de la figura 60, se realiza la toma de datos de tensión y corriente, en el rango frecuencial, basado en la experimentación práctica se encuentran valores notables de frecuencia, definidos por las posteriores tablas de ingreso y salida.

Una vez encontrados los valores de tensión y corriente a rangos frecuenciales, se encuentran los valores de impedancia a cada una de las frecuencias. Sin dejar de lado el ángulo de desfase entre la señal de tensión y corriente.

Ya con los datos de entrada y salida se encuentra la función de transferencia del sistema original sin falla y sin amplificación, la misma que se le aplica una prueba con un amplificador, al que le sometemos a fallas encontrando la función de transferencia con y sin amplificación.

#### 3.4.3.1 SEÑAL DE INGRESO Y SALIDA ORIGINAL SIN AMPLIFICADOR DEL NUEVO TRANSFORMADOR MODELO.

En la tabla 16 se indica los valores de ingreso en tensión, corriente, impedancia y ángulo que se obtienen a partir de la implementación, de la misma manera se obtiene los datos de salida en la tabla 17.

Ingreso				
Hz	Vpp	App	Ohm	Grados
Frecuencia	Tensión	Intensidad	Impedancia	Ángulo
10	16,7	0,012	1391,67	180
100	20,7	0,004	5307,69	20
1000	21	0,009	2333,33	180
10000	21	0,008	2625,00	180
100000	21,2	0,007	3015,65	20
200000	9,8	0,009	1113,64	20
300000	20	0,012	1666,67	20
400000	16,2	0,013	1285,71	45
500000	10,8	0,010	1048,54	60
600000	18,6	0,014	1319,15	26
700000	15	0,005	2777,78	27
800000	8,19	0,003	3276,00	65
900000	8,19	0,002	3412,50	90
1000000	10,8	0,003	4268,77	90

**Tabla 16.** Datos de Señal de Ingreso sin Amplificación y sin Falla de un Transformador Modelo nuevo.

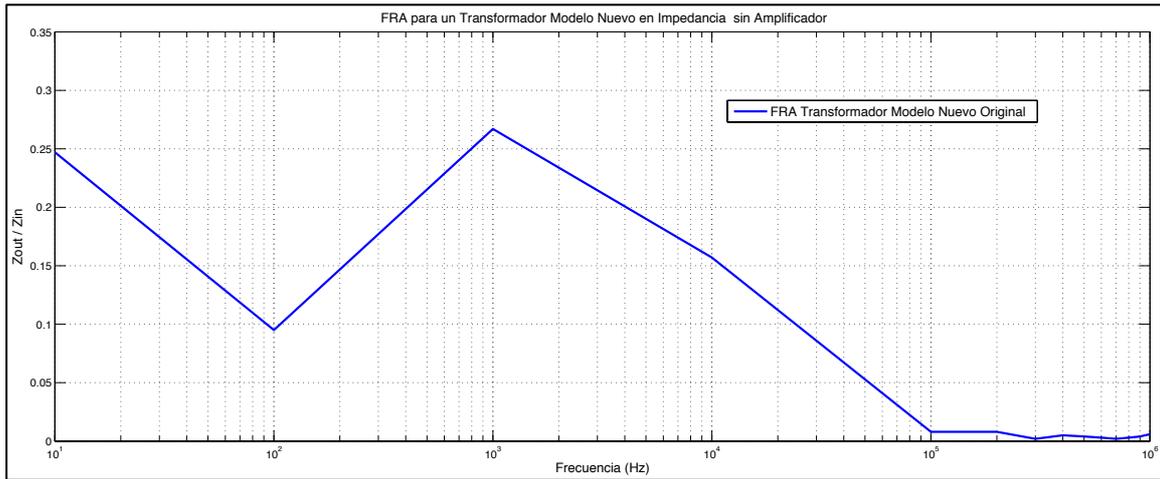
Salida				
Hz	Vpp	App	Ohm	Grados
Frecuencia	Tensión	Intensidad	Impedancia	Ángulo
10	3,44	0,01	344,00	0
100	4,44	0,0088	504,55	0
1000	4,59	0,00736	623,64	0
10000	4,15	0,01008	411,71	41
100000	1,27	0,054	23,52	63
200000	0,672	0,076	8,84	79,2
300000	0,31	0,0904	3,43	43,63
400000	0,596	0,101	5,90	15
500000	0,436	0,115	3,79	20
600000	0,396	0,105	3,77	54
700000	0,364	0,0688	5,29	60
800000	0,364	0,0392	9,29	30
900000	0,352	0,0236	14,92	27
1000000	0,366	0,0151	24,24	180

**Tabla 17.** Datos de Señal de Salida sin Amplificación y sin Falla de un Transformador Modelo nuevo.

### 3.4.3.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ORIGINAL SIN AMPLIFICACIÓN EN IMPEDANCIA PARA UN NUEVO TRANSFORMADOR MODELO .

Salida / Ingreso			
Hz	Vpp	App	Ohm
Frecuencia	Tensión	Intensidad	Impedancia
10	0,2060	0,8333	0,2472
100	0,2145	2,2564	0,0951
1000	0,2186	0,8178	0,2673
10000	0,1976	1,2600	0,1568
100000	0,0599	7,6814	0,0078
200000	0,0686	8,6364	0,0079
300000	0,0155	7,5333	0,0021
400000	0,0368	8,0159	0,0046
500000	0,0404	11,1650	0,0036
600000	0,0213	7,4468	0,0029
700000	0,0243	12,7407	0,0019
800000	0,0444	15,6800	0,0028
900000	0,0430	9,8333	0,0044
1000000	0,0339	5,9684	0,0057

**Tabla 18.** Datos de Función de Transferencia Original sin Amplificación en Impedancia para un Nuevo Transformador Modelo.



**Figura 61.** Función de Transferencia Original sin Amplificador.

### 3.4.3.3 SEÑAL DE INGRESO Y SALIDA ORIGINAL CON AMPLIFICADOR DEL NUEVO TRANSFORMADOR MODELO.

En la tabla 19 se indica los valores de ingreso en tensión, corriente, impedancia y ángulo que se obtienen a partir de la implementación, de la misma manera se obtienen los datos de salida en la tabla 20.

Ingreso				
Hz	Vpp	App	Ohm	Grados
Frecuencia	Tensión	Intensidad	Impedancia	Ángulo
10	0,248	0,0101	24,55445545	-
100	1,03	0,0086	119,7674419	-
1000	3,14	0,00819	383,3943834	-
10000	3,35	0,0048	697,9166667	-
100000	3,4	0,006	566,6666667	-
200000	3,64	0,00559	651,1627907	-
300000	4,15	0,006	691,6666667	-
400000	5,07	0,0088	576,1363636	-
500000	7,07	0,011	642,7272727	40
600000	7	0,00839	834,3265793	10
700000	5,51	0,00559	985,6887299	-
800000	4,36	0,00383	1138,381201	-
900000	3,44	0,0032	1075	-
1000000	2,83	0,00455	621,978022	-

**Tabla 19.** Datos de Señal de Ingreso con Amplificación y sin Falla de un Transformador Modelo nuevo.

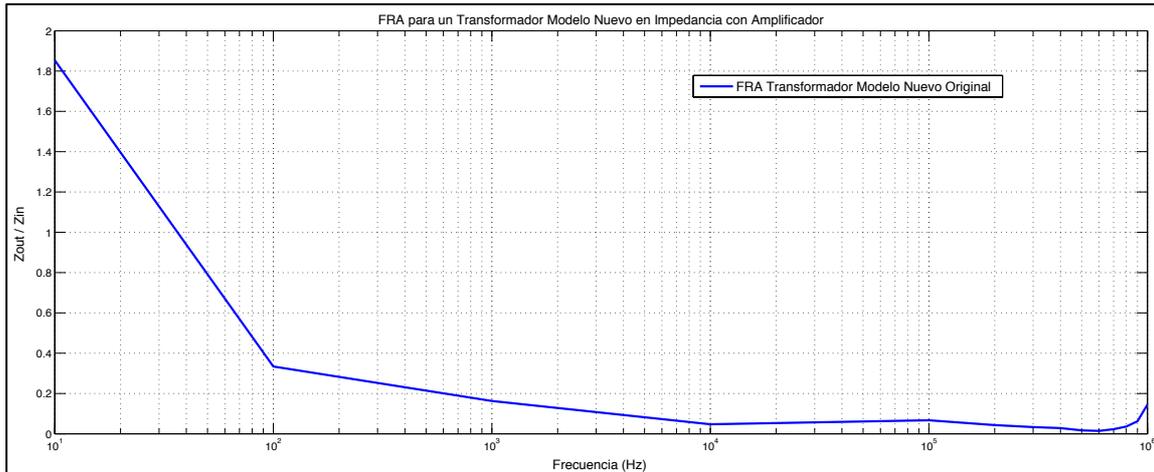
Salida				
Hz	Vpp	App	Ohm	Grados
Frecuencia	Tensión	Intensidad	Impedancia	Ángulo
10	0,364	0,008	45,50	-
100	0,368	0,00919	40,04	-
1000	0,692	0,0111	62,34	-
10000	0,34	0,0103	33,01	-
100000	0,356	0,00939	37,91	10
200000	0,352	0,0126	27,94	0
300000	0,34	0,0151	22,52	60
400000	0,332	0,0203	16,35	77
500000	0,328	0,0296	11,08	40
600000	0,328	0,0277	11,84	80
700000	0,336	0,0146	23,01	33
800000	0,34	0,00819	41,51	10
900000	0,328	0,00496	66,13	-
1000000	0,324	0,00359	90,25	-

**Tabla 20.** Datos de Señal de Salida con Amplificación y sin Falla de un Transformador Modelo Nuevo.

### 3.4.3.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ORIGINAL CON AMPLIFICACIÓN EN IMPEDANCIA PARA UN NUEVO TRANSFORMADOR MODELO .

Salida / Ingreso			
Hz	Vpp	App	Ohm
Frecuencia	Tensión	Intensidad	Impedancia
10	1,4677	0,7921	1,8530
100	0,3573	1,0686	0,3343
1000	0,2204	1,3553	0,1626
10000	0,1015	2,1458	0,0473
100000	0,1047	1,5650	0,0669
200000	0,0967	2,2540	0,0429
300000	0,0819	2,5167	0,0326
400000	0,0655	2,3068	0,0284
500000	0,0464	2,6909	0,0172
600000	0,0469	3,3015	0,0142
700000	0,0610	2,6118	0,0233
800000	0,0780	2,1384	0,0365
900000	0,0953	1,5500	0,0615
1000000	0,1145	0,7890	0,1451

**Tabla 21.** Datos de Función de Transferencia Original con Amplificación en Impedancia para un Nuevo Transformador Modelo.



**Figura 62.** Función de Transferencia Original con Amplificador.

### 3.4.3.5 SEÑAL DE INGRESO Y SALIDA EN FALLA DE CORTO CIRCUITO SIN AMPLIFICADOR DEL NUEVO TRANSFORMADOR MODELO

En la tabla 22 se indica los valores de ingreso en tensión, corriente, impedancia y ángulo que se obtienen a partir de la implementación, de la misma manera se obtiene los datos de salida en la tabla 23. En condiciones de Falla bajo un Corto Circuito.

Ingreso				
Hz	Vpp	App	Ohm	Grados
Frecuencia	Tensión	Intensidad	Impedancia	Ángulo
10	16,7	0,012	1391,67	180
100	20,7	0,0039	5307,69	20
1000	21	0,009	2333,33	180
10000	21	0,008	2625,00	180
100000	21,2	0,00703	3015,65	20
200000	9,8	0,0088	1113,64	20
300000	20	0,012	1666,67	20
400000	16,2	0,0126	1285,71	45
500000	10,8	0,0103	1048,54	60
600000	18,6	0,0141	1319,15	26
700000	15	0,0054	2777,78	27
800000	8,19	0,0025	3276,00	65
900000	8,19	0,0024	3412,50	90
1000000	10,8	0,00253	4268,77	90

**Tabla 22.** Datos de Señal de Ingreso sin Amplificación en Corto Circuito de un Transformador Modelo Nuevo.

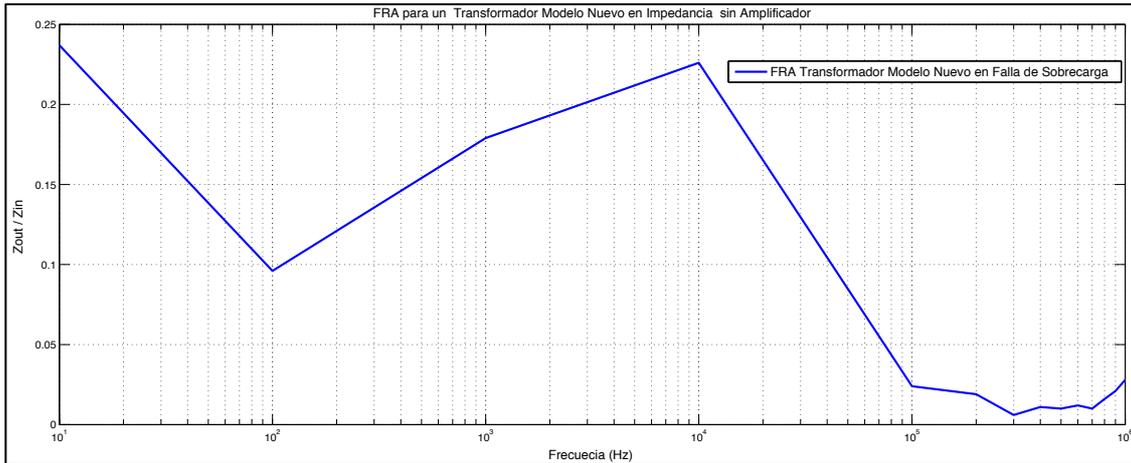
Salida				
Hz	Vpp	App	Ohm	Grados
Frecuencia	Tensión	Intensidad	Impedancia	Ángulo
10	3,4	0,0103	330,0970874	-
100	4,4	0,0086	511,627907	-
1000	4,63	0,0111	417,1171171	-
10000	4,15	0,007	592,8571429	-
100000	1,12	0,0156	71,79487179	-
200000	0,4	0,019	21,05263158	47
300000	0,224	0,0223	10,04484305	75
400000	0,332	0,0226	14,69026549	35
500000	0,28	0,0262	10,6870229	40
600000	0,376	0,024	15,66666667	26
700000	0,448	0,0166	26,98795181	-
800000	0,484	0,00939	51,54419595	-
900000	0,528	0,0074	71,35135135	-
1000000	0,564	0,0048	117,5	-

**Tabla 23.** Datos de Señal de Salida sin Amplificación en Corto Circuito de un Transformador Modelo Nuevo.

### 3.4.3.6 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN CORTO CIRCUITO SIN AMPLIFICACIÓN EN IMPEDANCIA PARA UN NUEVO TRANSFORMADOR MODELO

Salida / Ingreso			
Hz	Vpp	App	Ohm
Frecuencia	Tensión	Intensidad	Impedancia
10	0,2036	0,8583	0,2372
100	0,2126	2,2051	0,0964
1000	0,2205	1,2333	0,1788
10000	0,1976	0,8750	0,2259
100000	0,0528	2,2191	0,0238
200000	0,0408	2,1591	0,0189
300000	0,0112	1,8583	0,0060
400000	0,0205	1,7937	0,0114
500000	0,0259	2,5437	0,0102
600000	0,0202	1,7021	0,0119
700000	0,0299	3,0741	0,0097
800000	0,0591	3,7560	0,0157
900000	0,0645	3,0833	0,0209
1000000	0,0522	1,8972	0,0275

**Tabla 24.** Datos de Función de Transferencia en Corto Circuito sin Amplificación en Impedancia para un Nuevo Transformador Modelo.



**Figura 63.** Función de Transferencia en Corto Circuito sin Amplificador.

### 3.4.3.7 SEÑAL DE INGRESO Y SALIDA EN FALLA DE CORTO CIRCUITO CON AMPLIFICADOR DEL NUEVO TRANSFORMADOR MODELO.

En la tabla 25 se indica los valores de ingreso en tensión, corriente, impedancia y ángulo que se obtienen a partir de la implementación, de la misma manera se obtiene los datos de salida en la tabla 26. En condiciones de Falla bajo un Corto Circuito.

Ingreso				
Hz	Vpp	App	Ohm	Grados
Frecuencia	Tensión	Intensidad	Impedancia	Ángulo
10	0,248	0,0101	24,55445545	-
100	1,03	0,0086	119,7674419	-
1000	3,14	0,00819	383,3943834	-
10000	3,35	0,0048	697,9166667	-
100000	3,4	0,006	566,6666667	-
200000	3,64	0,00559	651,1627907	-
300000	4,15	0,006	691,6666667	-
400000	5,07	0,0088	576,1363636	-
500000	7,07	0,011	642,7272727	40
600000	7	0,00839	834,3265793	10
700000	5,51	0,00559	985,6887299	-
800000	4,36	0,00383	1138,381201	-
900000	3,44	0,0032	1075	-
1000000	2,83	0,00455	621,978022	-

**Tabla 25.** Datos de Señal de Ingreso con Amplificación en Corto Circuito de un Transformador Modelo Nuevo.

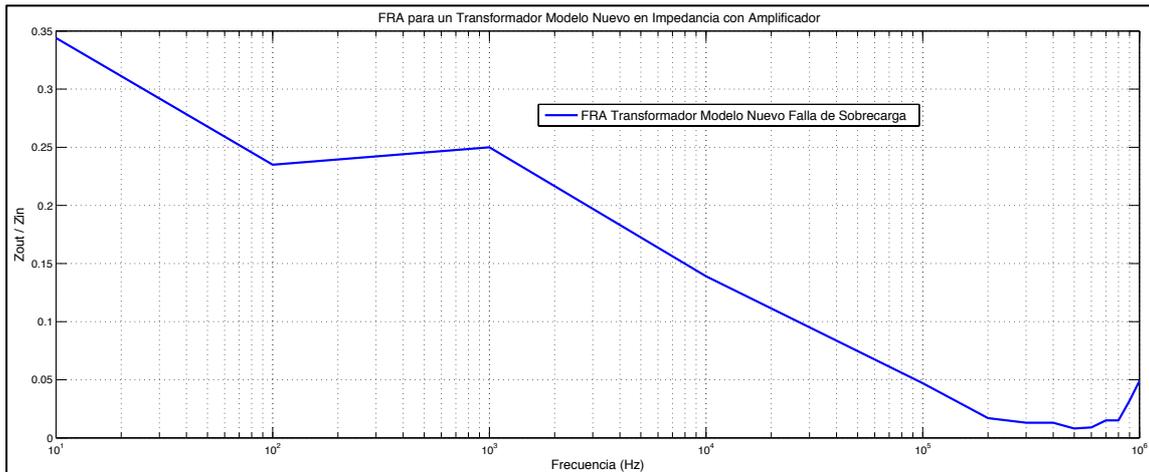
Salida				
Hz	Vpp	App	Ohm	Grados
Frecuencia	Tensión	Intensidad	Impedancia	Ángulo
10	0,076	0,009	8,44	-
100	0,242	0,0086	28,14	-
1000	0,688	0,00719	95,69	-
10000	0,68	0,007	97,14	-
100000	0,18	0,0068	26,47	-
200000	0,1	0,0088	11,36	-
300000	0,0928	0,0105	8,84	-
400000	0,104	0,0138	7,54	-
500000	0,124	0,0233	5,32	36
600000	0,164	0,021	7,81	12
700000	0,152	0,0106	14,34	50
800000	0,125	0,00744	16,80	-
900000	0,113	0,00333	33,93	-
1000000	0,109	0,00359	30,36	-

**Tabla 26.** Datos de Señal de Salida con Amplificación en Corto Circuito de un Transformador Modelo Nuevo.

### 3.4.3.8 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN CORTO CIRCUITO CON AMPLIFICACIÓN EN IMPEDANCIA PARA UN NUEVO TRANSFORMADOR MODELO .

Salida / Ingreso			
Hz	Vpp	App	Ohm
Frecuencia	Tensión	Intensidad	Impedancia
10	0,3065	0,8911	0,3439
100	0,2350	1,0000	0,2350
1000	0,2191	0,8779	0,2496
10000	0,2030	1,4583	0,1392
100000	0,0529	1,1333	0,0467
200000	0,0275	1,5742	0,0175
300000	0,0224	1,7500	0,0128
400000	0,0205	1,5682	0,0131
500000	0,0175	2,1182	0,0083
600000	0,0234	2,5030	0,0094
700000	0,0276	1,8962	0,0145
800000	0,0287	1,9426	0,0148
900000	0,0328	1,0406	0,0316
1000000	0,0385	0,7890	0,0488

**Tabla 27.** Datos de Función de Transferencia en Corto Circuito con Amplificación en Impedancia para un Nuevo Transformador Modelo.

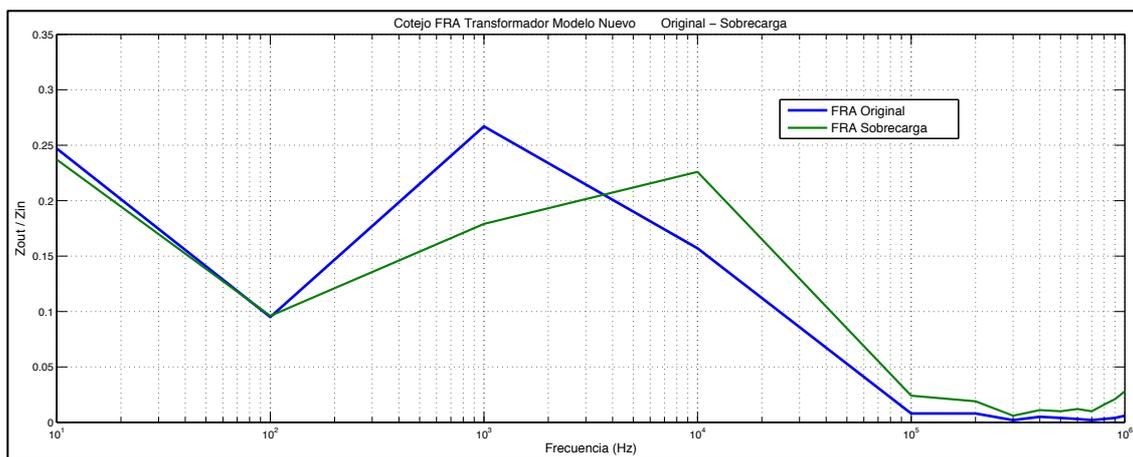


**Figura 64.** Función de Transferencia en Corto Circuito con Amplificador.

### 3.4.4 COTEJO DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA ORIGINAL - FALLA.

#### 3.4.4.1 COTEJO ORIGINAL – FALLA SIN AMPLIFICACIÓN.

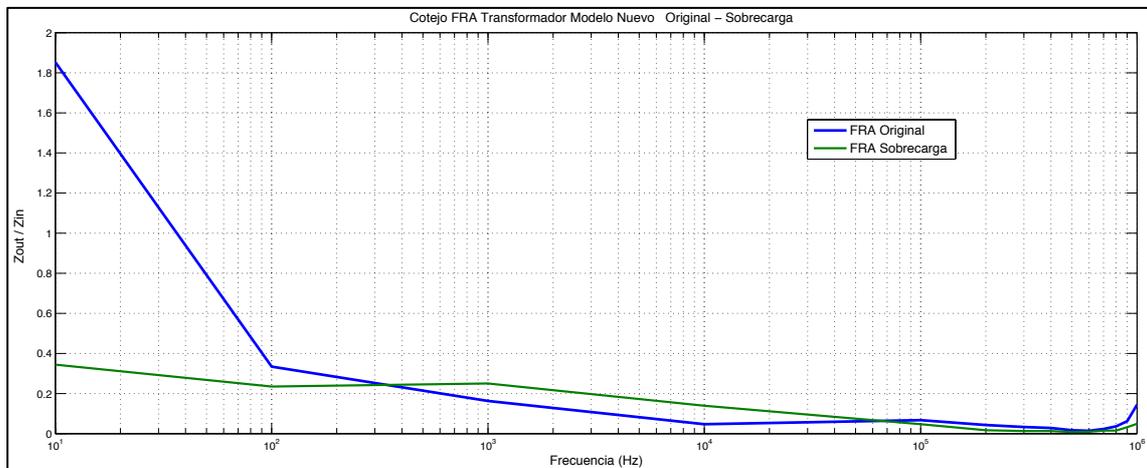
Con las figuras de función de transferencia obtenidas anteriormente en impedancia, original y falla sin amplificación, se las sobrepone con el fin de observar sus variaciones. Éstos se muestra en la figura 65.



**Figura 65.** Función de Transferencia Original y Corto Circuito sin Amplificador.

### 3.4.4.2 COTEJO ORIGINAL – FALLA CON AMPLIFICACIÓN

De igual manera que en el apartado anterior, las gráficas de impedancia original y falla con amplificador se sobreponen para visualizar sus variaciones. Véase en la figura 66.



**Figura 66.** Función de Transferencia Original y Corto Circuito con Amplificador.

## CAPÍTULO 4

### 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proyecto Técnico de enfoque investigativo bajo el tema: “Diseño e Implementación de un Analizador de Respuesta en Frecuencia para un Transformador de Distribución a Escala” surge por la necesidad de solventar problemas de fallas en Transformadores de distribución con la única idea de evitar el desmonte del mismo y simplemente con la opción de desenergizar por un tiempo prudente, encontrando así su estado actual y llegar a un diagnóstico lo más eficiente y acertado posible, ayudando a evitar problemas a futuro en el momento de aplicar lo propuesto.

Un Analizador FRA en la actualidad ya existe, pero debido a su complejidad de parámetros a estudiar e implementar, su costo es sumamente elevado, es allí en donde entra lo propuesto, debido a que con solo utilizar equipos didácticos de laboratorio, con un simple análisis llegar a similares resultados sin obviar o dejar de lado un FRA instrumental comercial, que por su nivel de complejidad da un análisis mucho más completo que lo propuesto.

A lo largo de la trayectoria de la implementación se presentan una serie de complicaciones que enriquecen la temática, ya sea de estudio, en el ámbito práctico e inclusive experimental, llegando a ideas inclusive futuras para nuevas investigaciones.

Hay que destacar que el momento de guardar la data de información entregado por el osciloscopio se debe presionar la tecla del osciloscopio “ GUARDAR ”, cuando se muestren los picos más altos para tener una mayor visualización de señal.

El análisis se basa en un transformador modelo de baja potencia, el mismo que es adecuado para asemejarse a uno de distribución sin embargo se puede comprobar que debido a sus niveles de potencia y características constructivas dan resultados completamente diferentes, es por ello que no es posible su comparación por medio de un FRA, sino que deben ser de iguales características técnicas, físicas y eléctricas, debido a que cada transformador consta con su propia huella digital para la propuesta, es por ello que se realiza una serie de pruebas detalladas en el transcurso de la investigación, llegando a concluir que el método sirve siempre y cuando se tenga una huella digital de un transformador nuevo, previamente a su operación, debido a que la huella digital es diferente para cada transformador.

En el momento de trabajar con formas de onda de corriente y tensión, a principio se pensaba que iba a mejorar con una amplificación de potencia, pero en la práctica no resulta, ya

que el amplificador trae consigo un ruido, que a su vez distorsiona la señal y es más compleja para su análisis, debido a que sus formas de onda se ven deterioradas por la circuitería propia y el rango de frecuencia del amplificador.

En el momento de realizar las lecturas de frecuencia de forma incremental, se nota que la corriente baja progresivamente hasta llegar a un punto máximo de trabajo en el rango de 1MHz, volviéndose un aspecto cíclico y luego de este rango comienza nuevamente el aumento de corriente.

Como recomendación básica para realizar la propuesta hay que tener en cuenta la impedancia del transformador (Transformadores de Alta Potencia), ya que si es muy baja origina un cortocircuito en la fuente alimentadora de señal. En estos casos es conveniente manejar amplificadores de corriente para poder satisfacer la potencia del bobinado del transformador.

En el momento de realizar las pruebas, hay que tener en cuenta las fallas realizadas previamente, es por ello que en caso de implementar el método se recomienda empezar con una prueba menos invasiva para el transformador, evitando dejar sentido el equipo para pruebas futuras.

Cuando se conecta un Generador de Funciones por medio de sondas al bobinado primario o secundario siempre es necesario realizar un estimado del nivel de corriente que se origina en la malla del sistema, para verificar si es posible realizar las pruebas de falla sin la necesidad de un amplificador, para ello es muy útil el uso de la sonda de corriente que es un equipo que trabaja a rangos de alta frecuencia.

Los datos de configuración ya sean de generador de funciones, como del osciloscopio deben ser previamente probados y con ellos mantener un protocolo obligatorio para obtener resultados confiables y verídicos.

La huella digital es única para cada equipo y que a la mínima variación o cambio de la estructura del transformador, provoca un cambio al espectro de la gráfica, como por ejemplo un simple transporte del equipo de un lugar a otro o la altura de la región son puntos suficientes para obtener una huella diferente.

## **TRABAJOS FUTUROS**

Es necesario construir laboratorios con la capacidad de amplificar altas corriente y con un variador a altas frecuencias, porque es necesario conseguir equipos con mayor rango espectral de frecuencias, así como también que posean visualización de muestreos por segundos (1 Gsa/seg), con ayuda de esto podemos abarcar el ultimo rango de 1Mhz a 10 MHz que no se analiza en ésta propuesta, pudiendo concretar y detectar más tipos de fallas.

Aplicando la matemática se puede encontrar la respuesta a muchas inquietudes estudiando a fondo cada señal y así encontrar en forma certera con el tipo de falla resultando un margen de error lo más pequeño posible.

Se deben seguir experimentando en transformadores para obtener más huellas digitales y así identificar algún tipo de patrón general que defina el comportamiento de los transformadores de una forma aproximada.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. E. d. Normalización, *NORMA INEN para Transformadores de potencia, de medida y de protección* vol. 7ma, 1988.
- [2] S. J. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, Tercera ed.: Mc Graw Hill.
- [3] J. F. Mora, *Máquinas Eléctricas*, Quinta ed. España: Mc-Graw Hill.
- [4] Ecuatran, "TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICOS - TRIFÁSICOS," Ecuatran, Ed., ed. Cuenca Ecuador, 2015, p. 16.
- [5] F. Bresciani, *Magnetismo y Electromagnetismo*, Don Bosco ed. Cuenca Ecuador.
- [6] I. S. association, "IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers," vol. IEEE Std C57.149TM-2012, ed. New York, 2013.
- [7] OMICRON, "ANALIZADOR DE RESPUESTA DE FRECUENCIA DE BARRIDO FRAnalyzer ", OMICRON, Ed., ed.
- [8] N. Instruments, "NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite II Series (NI ELVISTM II Series) User Manual," N. Instruments, Ed., ed. Austin, Texas USA: National Instruments Corporation, 2011, p. 75.
- [9] N. Instruments, "DAQ M Series NI USB-621x User Manual - Bus-Powered M Series USB Devices", N. Instruments, Ed., ed. Austin, Texas USA, 2009, p. 204.
- [10] MAXIM, " High-Frequency Waveform Generator," MAXIM, Ed., ed, p. 16.
- [11] H. C. Guillermo Aponte. (2010) Evaluación de la Respuesta en Frecuencia del Transformador utilizando un modelo Circuitual de Celdas. *Revista Energía y Computación*. 8.

## **ANEXOS**

# ANEXO 1

## ANALIZADOR DE RESPUESTA EN FRECUENCIA PROPUESTO A ESCALA VRMS

Una forma alternativa de análisis, es el uso de escalas alternativas a la de decibeles (dB), esto depende básicamente del equipo que se esté usando, en el caso de la metodología propuesta, el osciloscopio permite obtener resultados en dB y Vrms para una Transformada Rápida de Fourier, a continuación se detallan los resultados obtenidos de la experimentación en la escala de Vrms para todas y cada una de las pruebas.

### FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA “ORIGINAL – HUELLA”

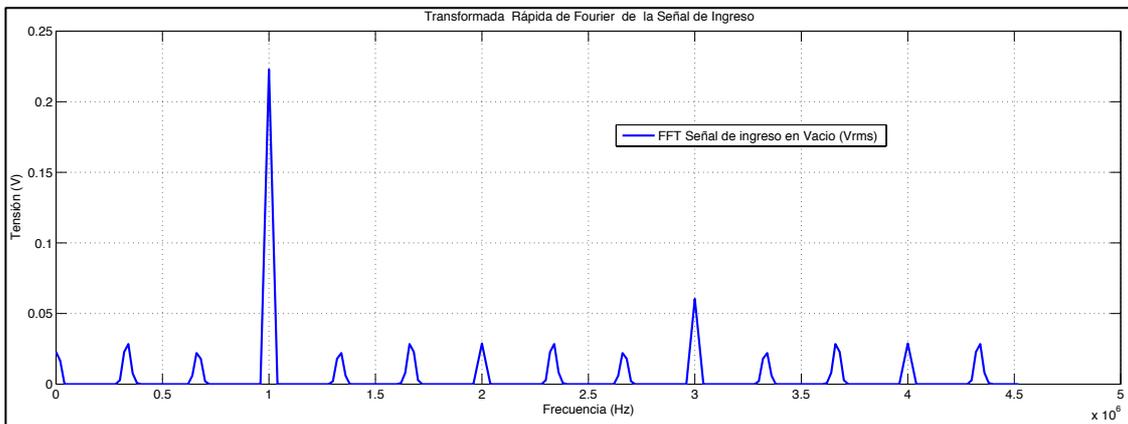


Figura A1.1 FFT Original de la Señal de Ingreso para el Transformador Modelo (Vrms).

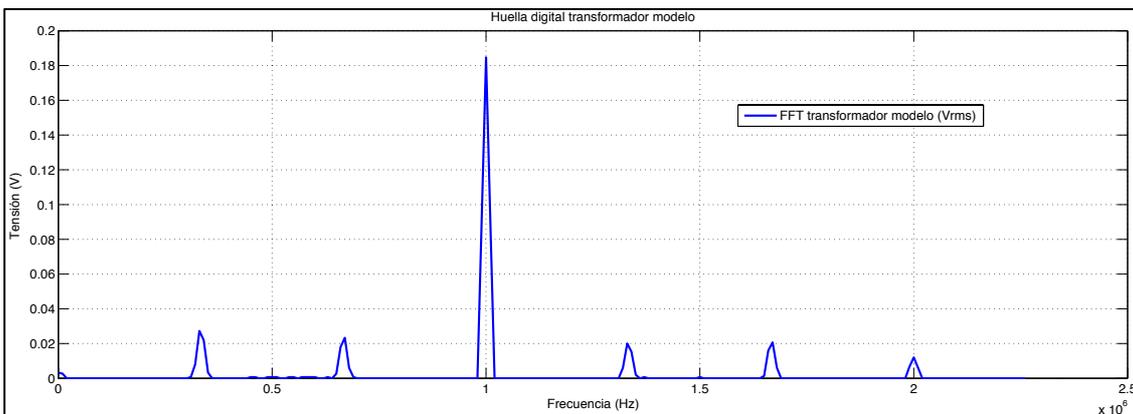
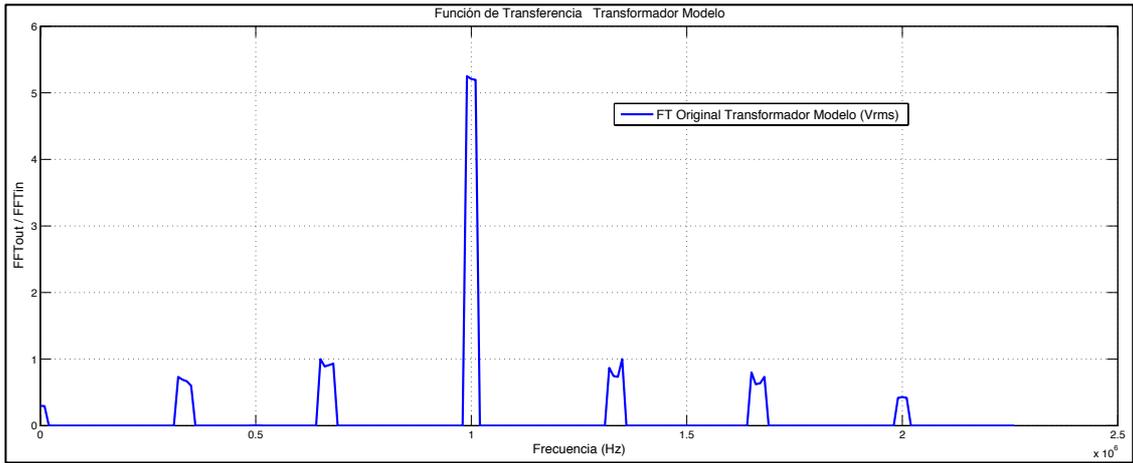
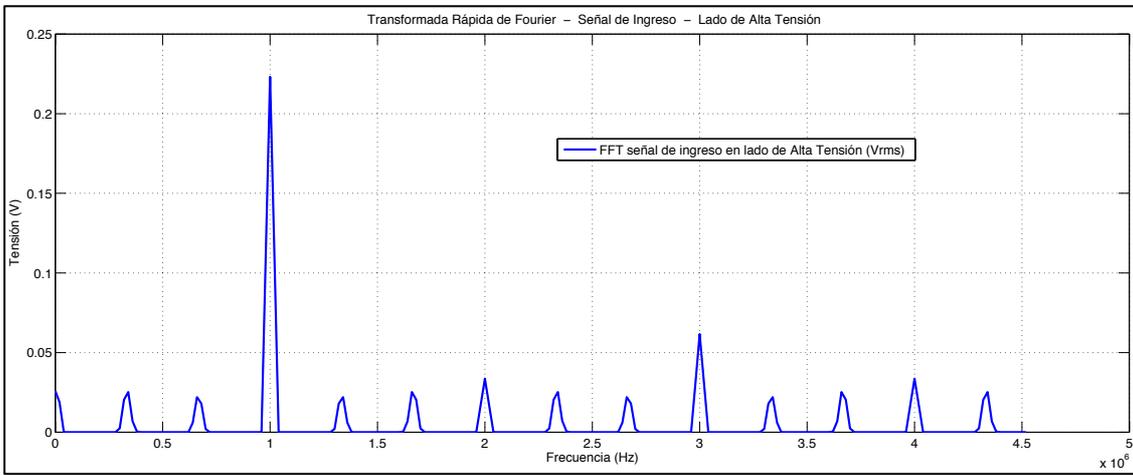


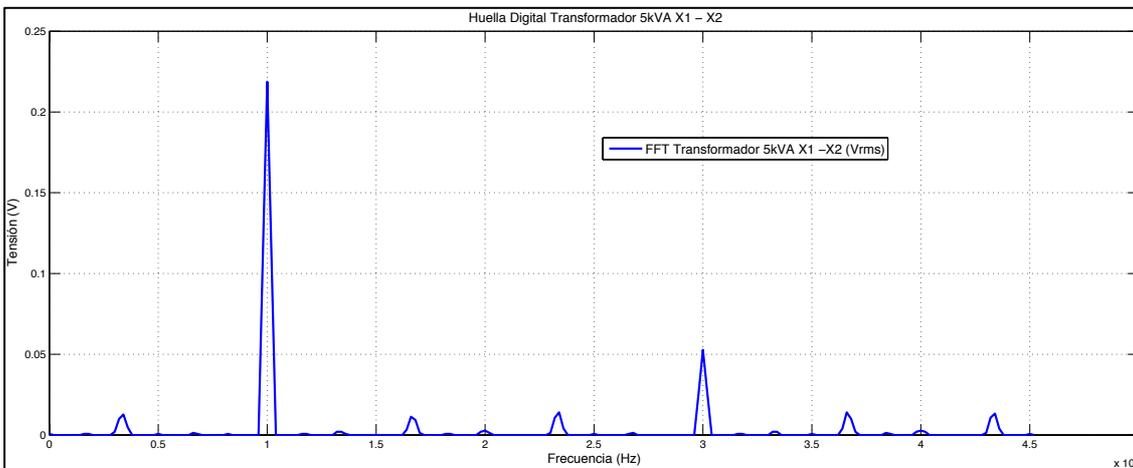
Figura A1.2 FFT Original de la Señal de Salida para el Transformador Modelo (Vrms).



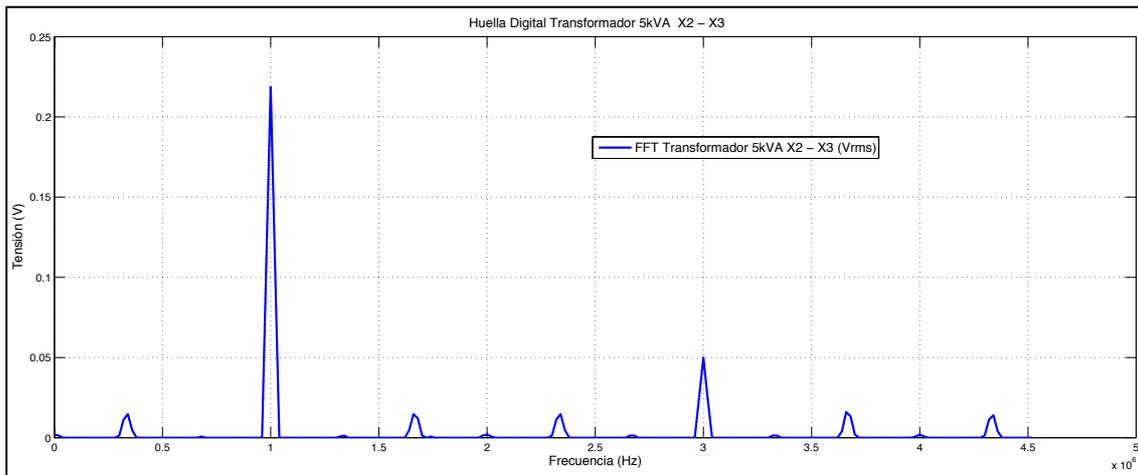
**Figura A1.3** FT Original para el Transformador Modelo (Vrms).



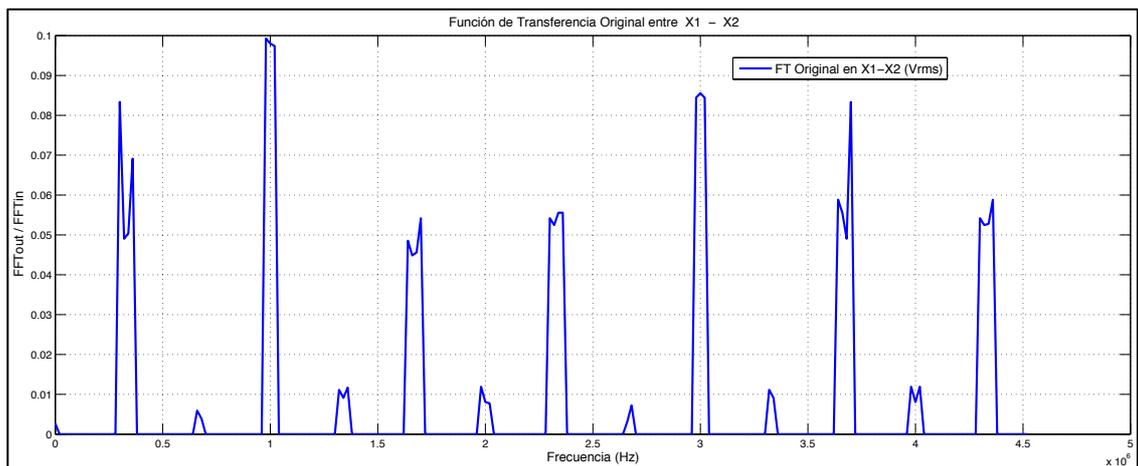
**Figura A1.4** FFT Original de la Señal de Ingreso para el Transformador de Distribución de 5 kVA (Vrms).



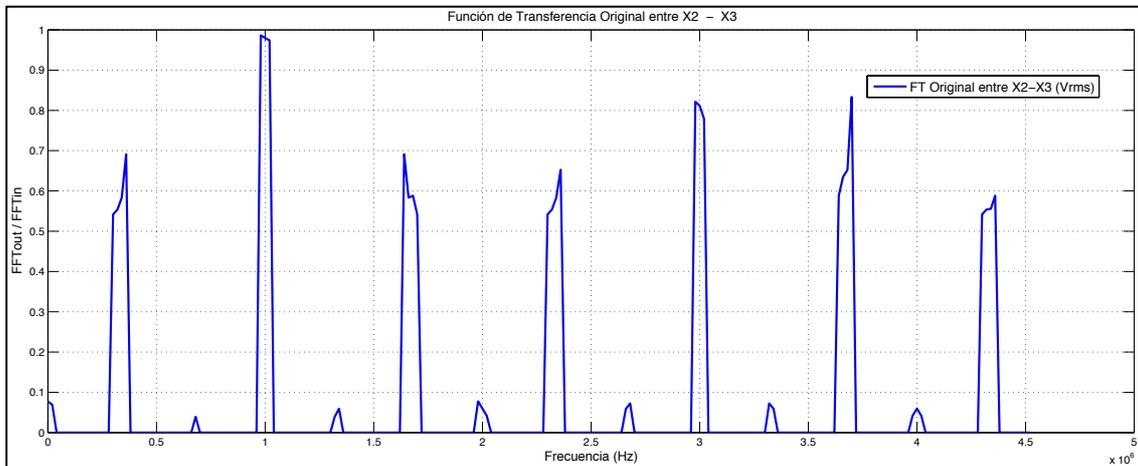
**Figura A1.5** FFT Original de la Señal de Salida para el Transformador de Distribución de 5 kVA entre Bobinados (X1-X2) (Vrms).



**Figura A1.6** FFT Original de la Señal de Salida para el Transformador de Distribución de 5 kVA entre bobinados (X2-X3) (Vrms).

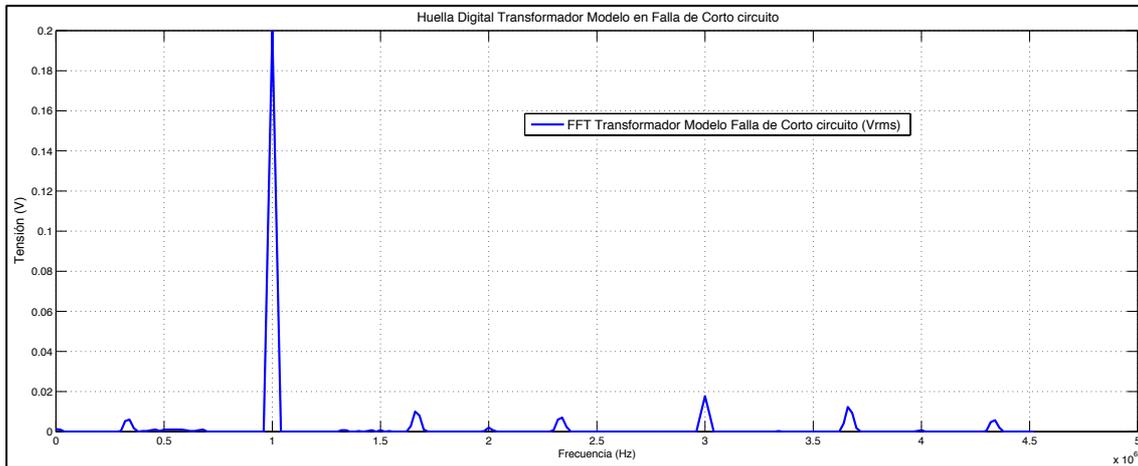


**Figura A1.7** FT Original de la Señal de Salida para el Transformador de Distribución de 5 kVA entre Bobinados (X1-X2) (Vrms).

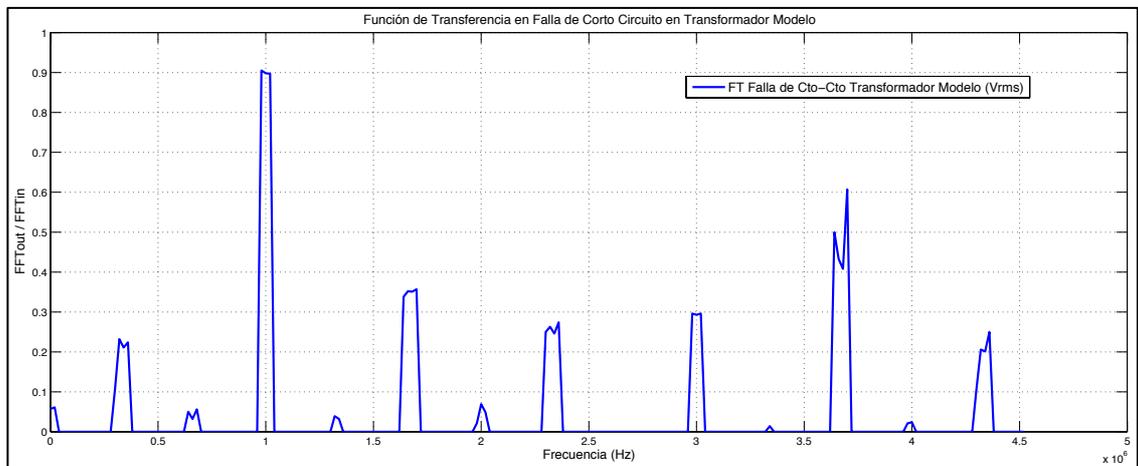


**Figura A1.8** FT Original de la Señal de Salida para el Transformador de Distribución de 5 kVA entre Bobinados (X2-X3) (Vrms).

**PRUEBAS EN TRANSFORMADOR MODELO**  
**FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE CORTO CIRCUITO**



**Figura A1.9** FFT de Transformador Modelo en Condición de Falla de Corto Circuito (Vrms).



**Figura A1.10** FT de Transformador Modelo en Falla de Corto Circuito (Vrms).

## FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE SOBRECARGA

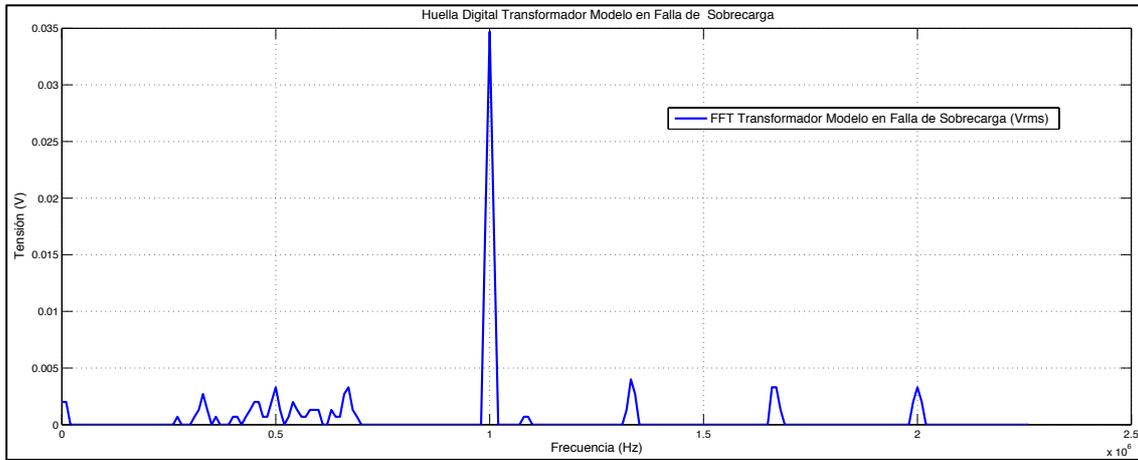


Figura A1.11 FFT de Transformador Modelo en Falla de Sobre Carga (Vrms).

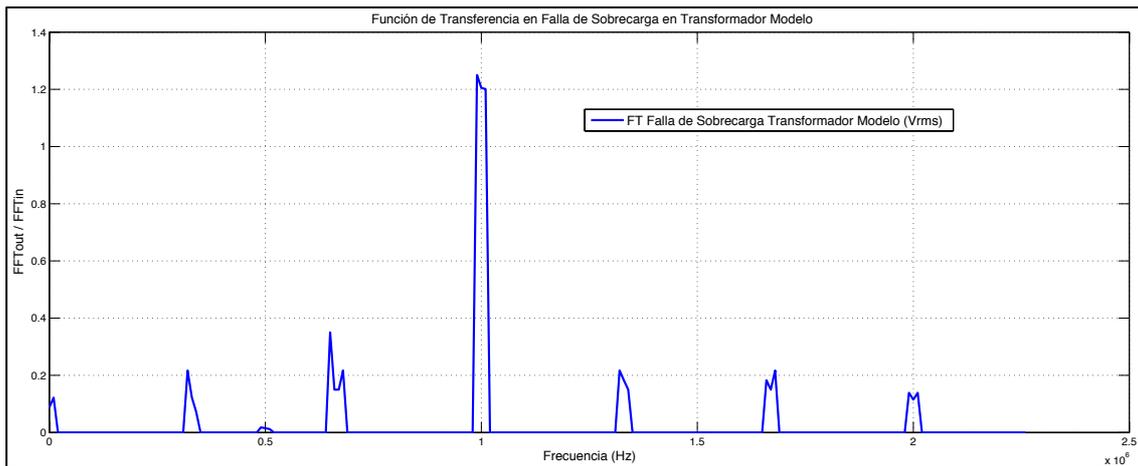


Figura A1.12 FT de Transformador Modelo en Falla de Sobre Carga

## FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS

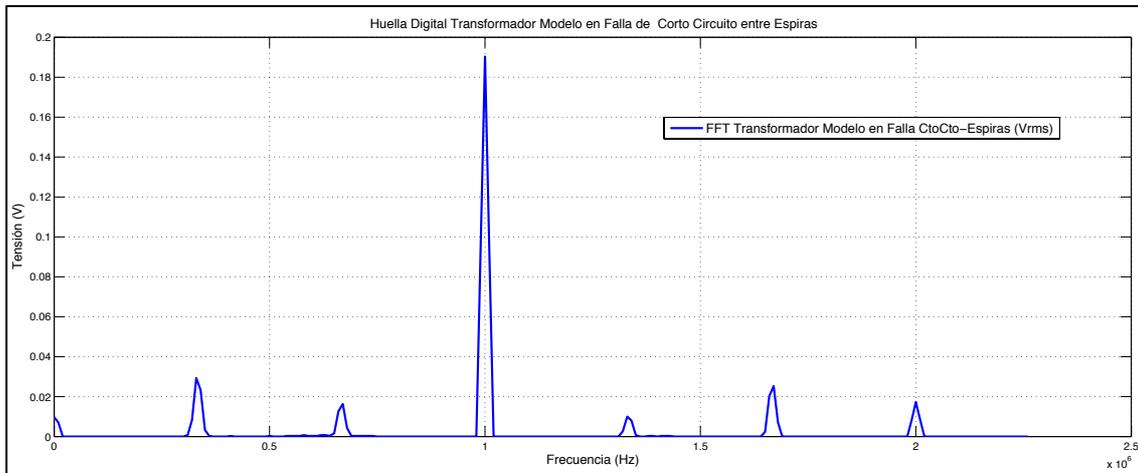


Figura A1.13 FFT de Transformador Modelo en Condición de Falla de Corto Circuito entre Espiras.

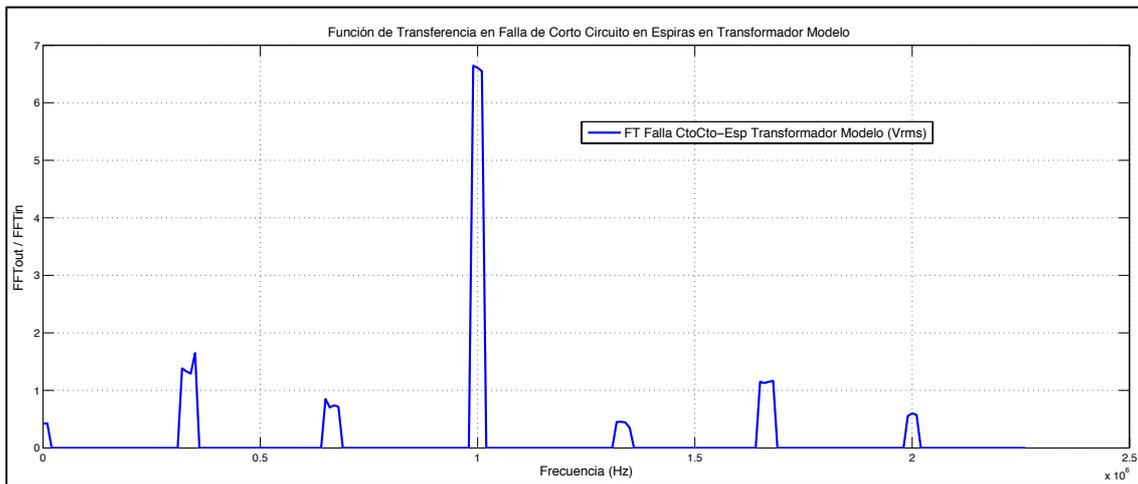


Figura A1.14 FT de Transformador Modelo en Falla de Corto Circuito entre Espiras (Vrms).

## FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE DEGRADACIÓN DE ACEITE

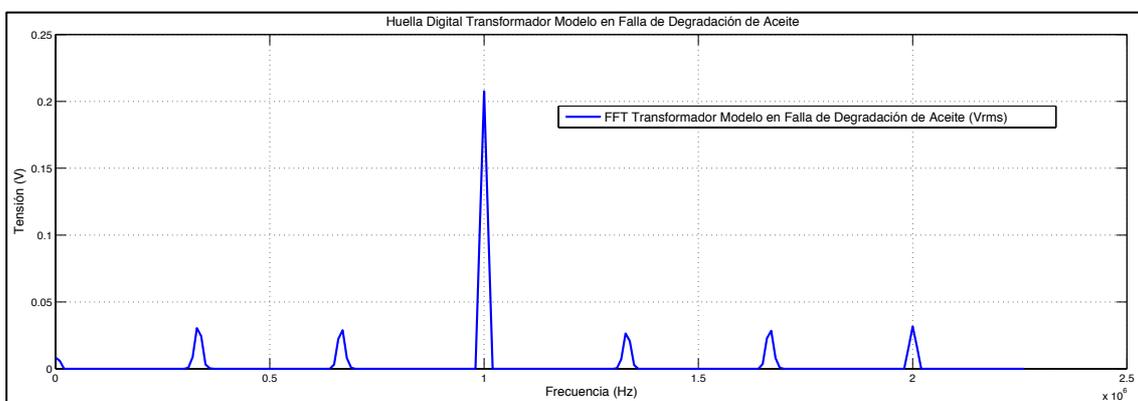
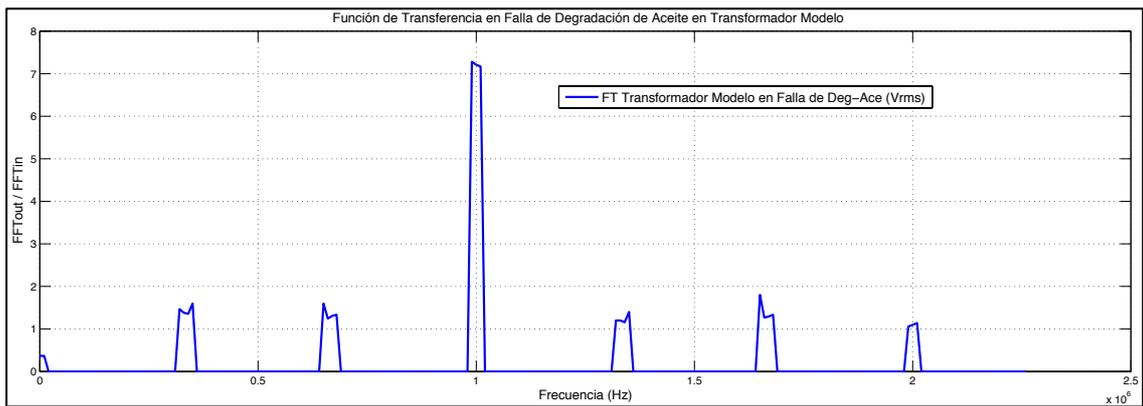


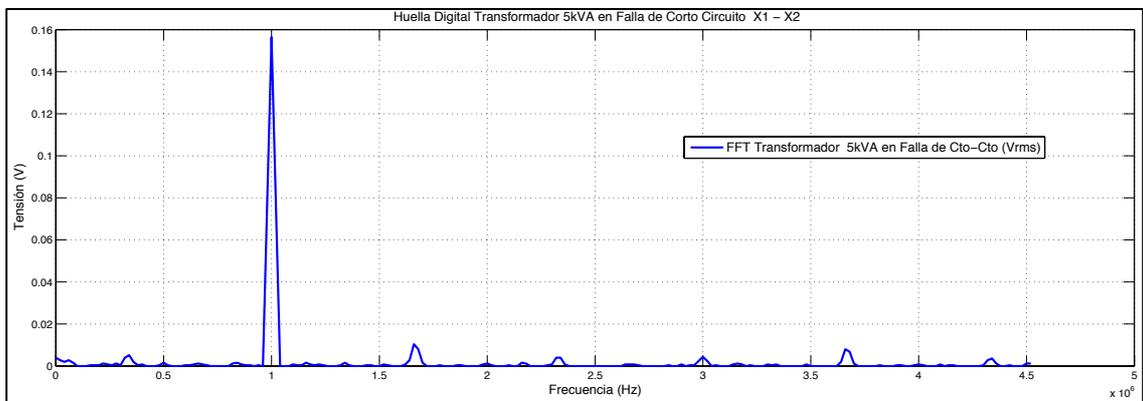
Figura A1.15 FFT de Transformador Modelo en Condición de Falla de Degradación de Aceite (Vrms).



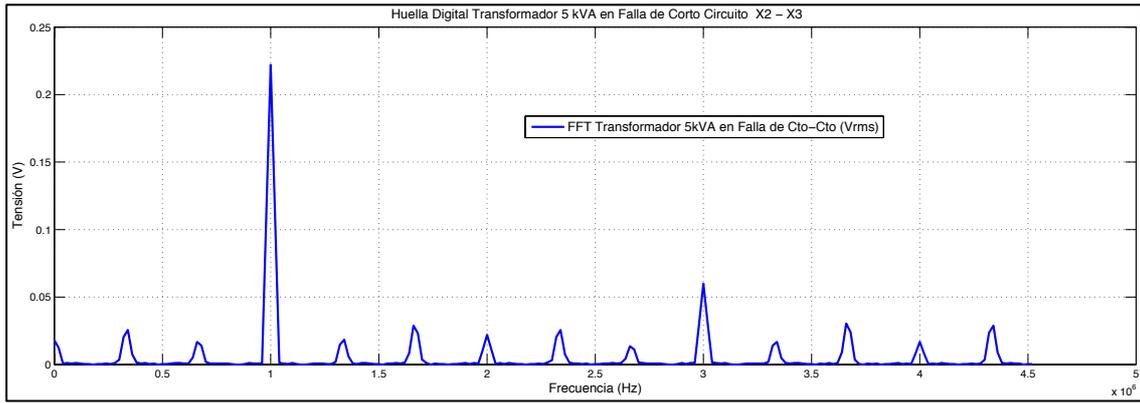
**Figura A1.16** FT de Transformador Modelo en Falla de Degradación de Aceite.

## PRUEBAS EN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN DE 5KVA

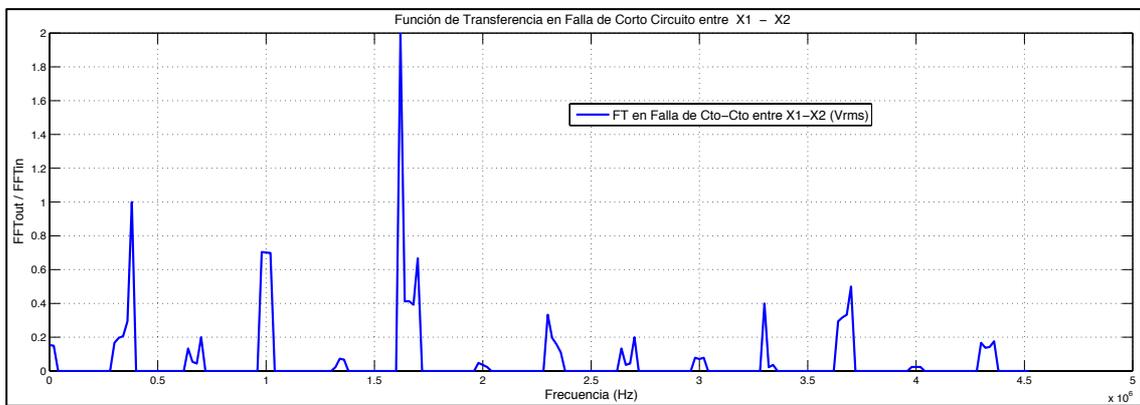
### FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE CORTO CIRCUITO



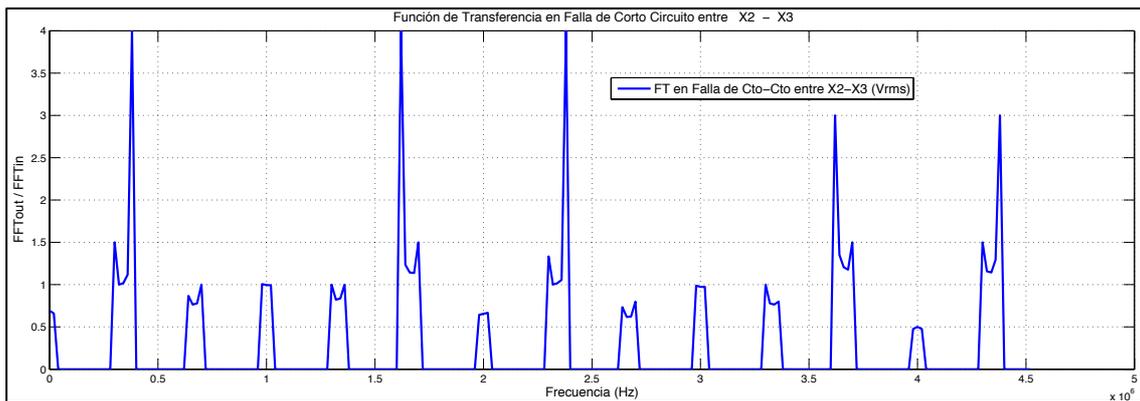
**Figura A1.17** FFT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Corto Circuito para el Bobinado X1-X2 (Vrms).



**Figura A1.18** FFT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Corto Circuito para el Bobinado X2-X3 (Vrms).

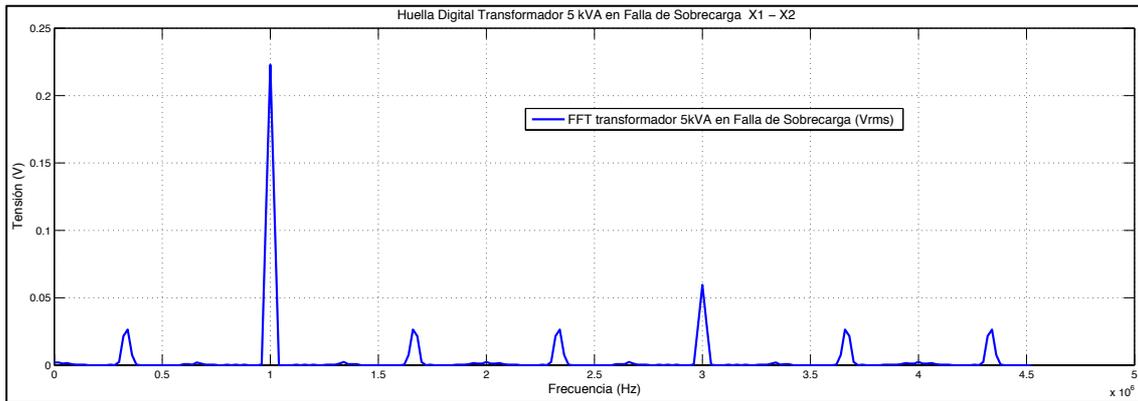


**Figura A1.19** FT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Corto Circuito para el Bobinado X1-X2 (Vrms).

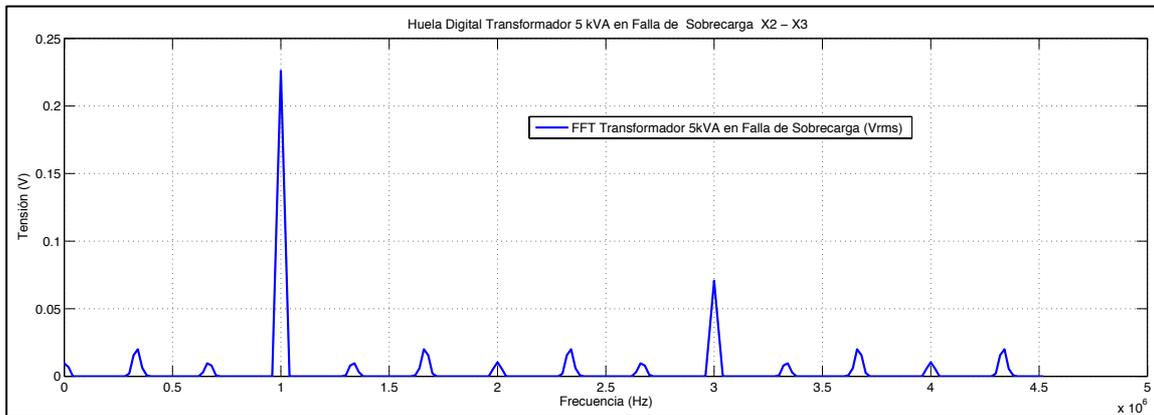


**Figura A1.20** FT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Corto Circuito para el Bobinado X2-X3 (Vrms).

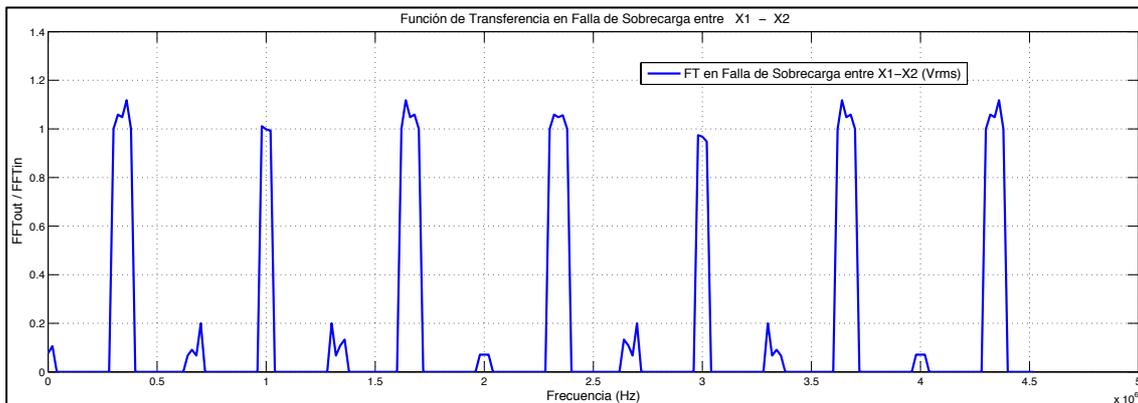
## FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE SOBRE CARGA



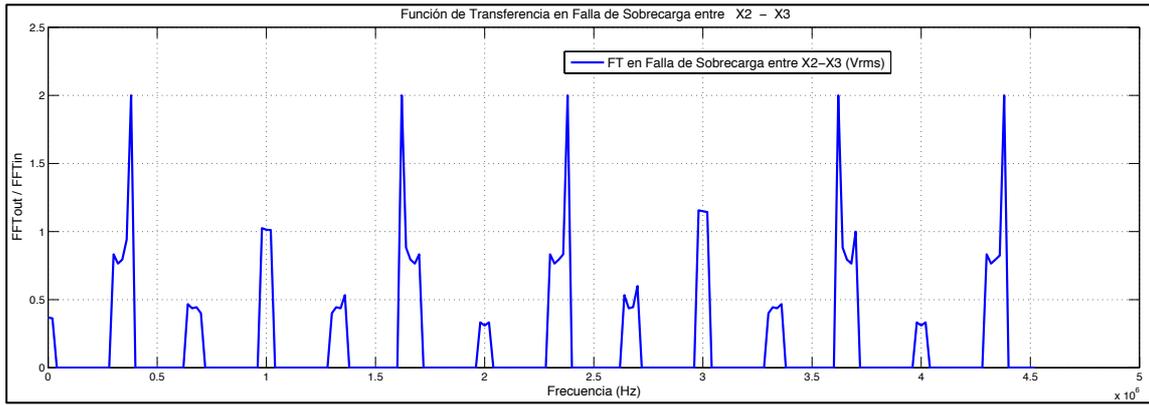
**Figura A1.21** FFT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Sobrecarga para el Bobinado X1-X2 (Vrms).



**Figura A1.22** FFT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Sobrecarga para el Bobinado X2-X3 (Vrms).

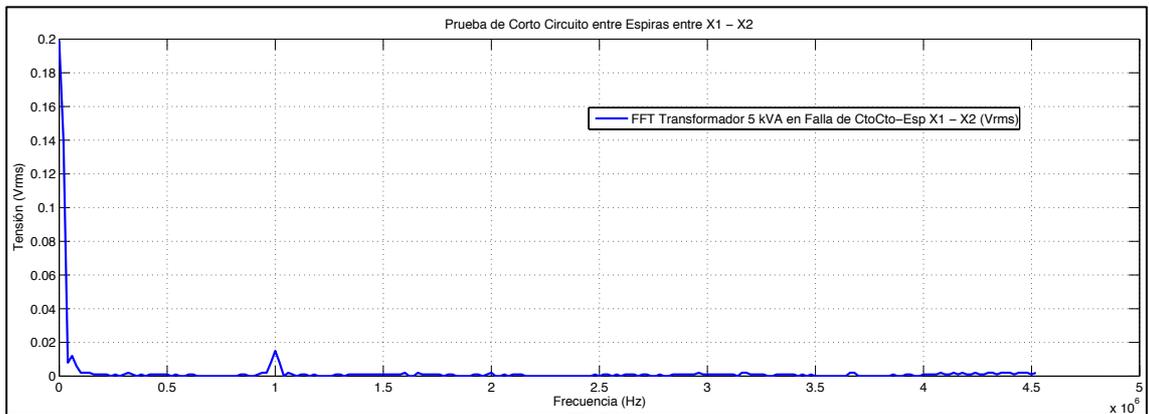


**Figura A1.23** FT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Sobre Carga para el Bobinado X1-X2 (Vrms).

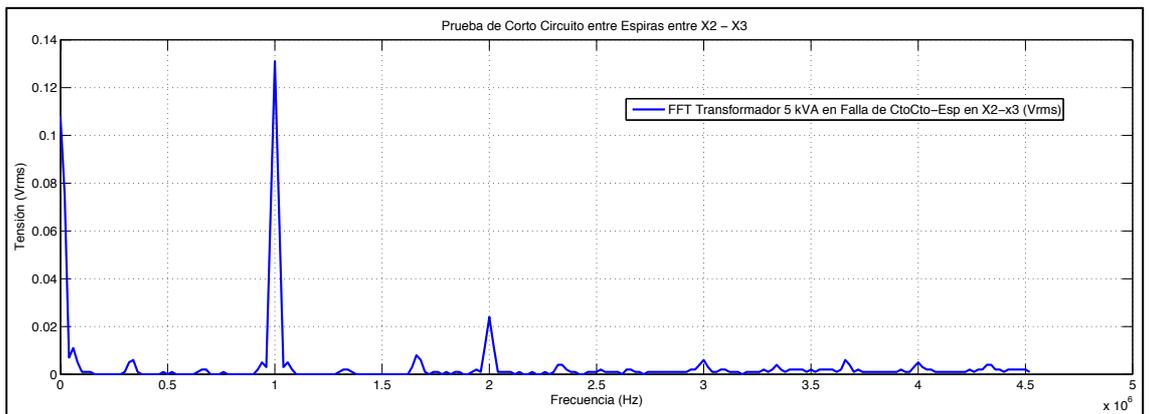


**Figura A1.24** FT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Sobre Carga para el Bobinado X2-X3 (Vrms).

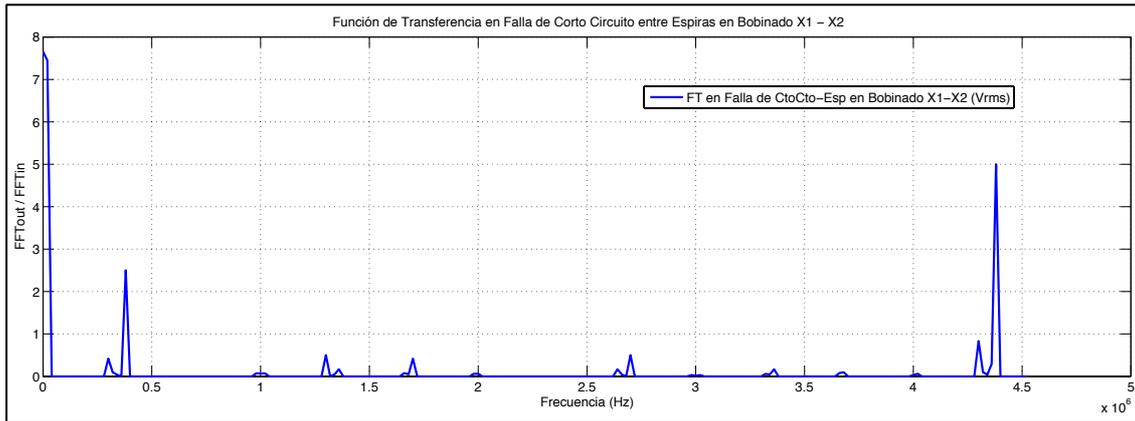
### FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE CORTO CIRCUITO ENTRE ESPIRAS



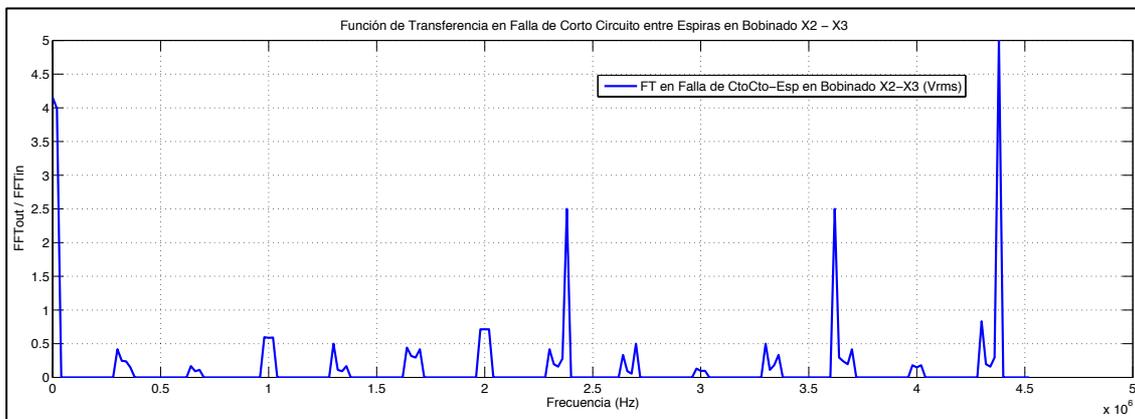
**Figura A1.25** FFT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Corto Circuito entre Espiras para el Bobinado X1-X2 (Vrms).



**Figura A1.26** FFT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Corto Circuito entre Espiras para el Bobinado X2-X3 (Vrms).

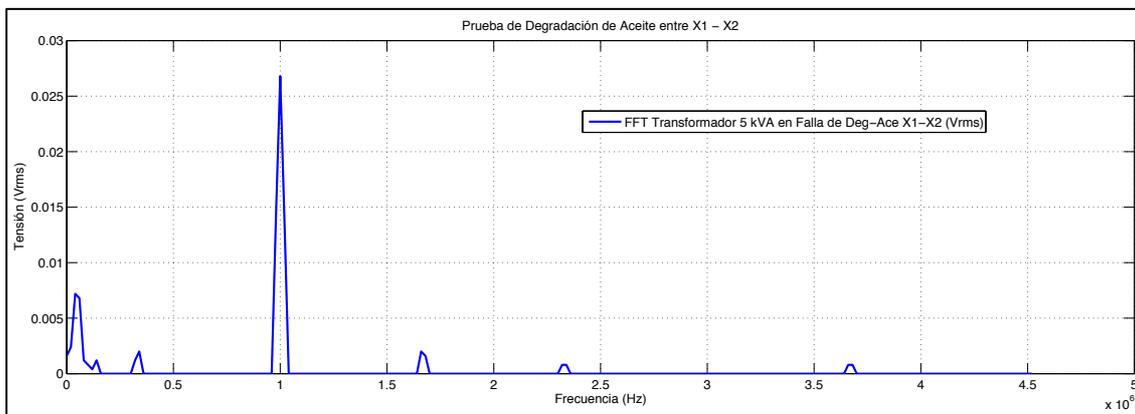


**Figura A1.27** FT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Corto Circuito entre Espiras para el Bobinado X1-X2 (Vrms).

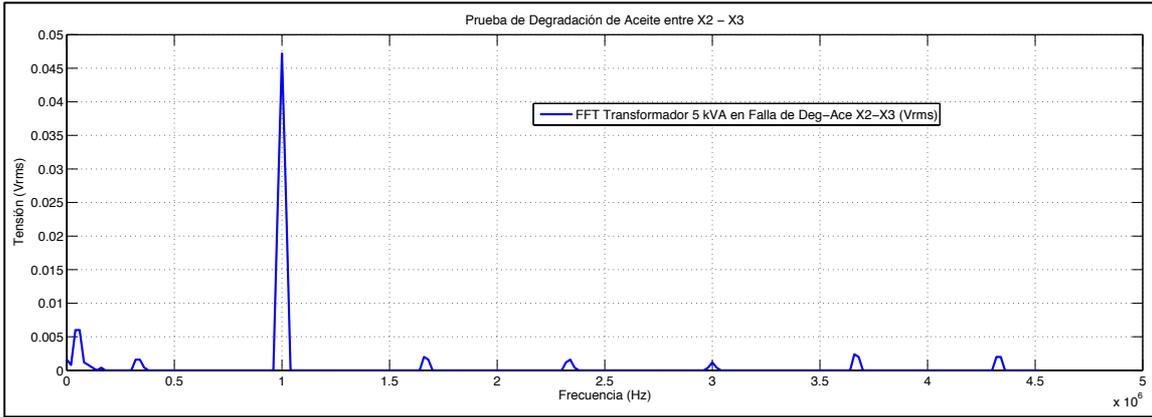


**Figura A1.28** FT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Corto Circuito entre Espiras para el Bobinado X2-X3 (Vrms).

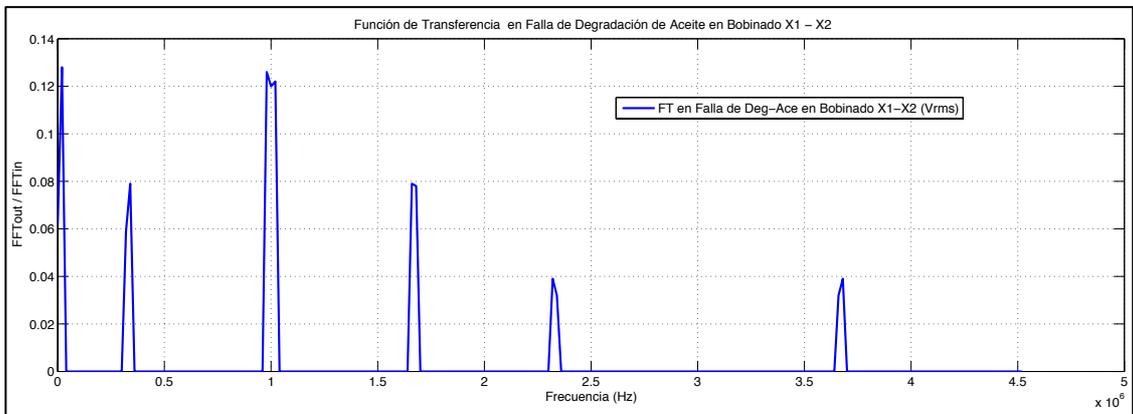
### FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN FALLA DE DEGRADACIÓN DE ACEITE



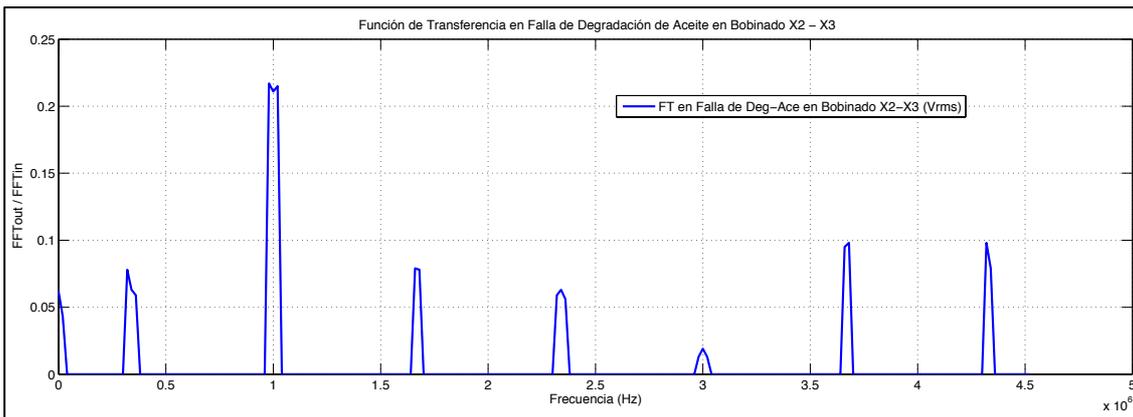
**Figura A1.29** FFT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Degradación de Aceite para el Bobinado X1-X2 (Vrms).



**Figura A1.30** FFT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Degradación de Aceite para el Bobinado X2-X3 (Vrms).



**Figura A1.31** FT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Degradación de Aceite para el Bobinado X1-X2 (Vrms).



**Figura A1.32** FT de Transformador Monofásico de Distribución de 5kVA en Condición de Falla de Degradación de Aceite para el Bobinado X2-X3 (Vrms).

## COMPARACIÓN DE RESULTADOS

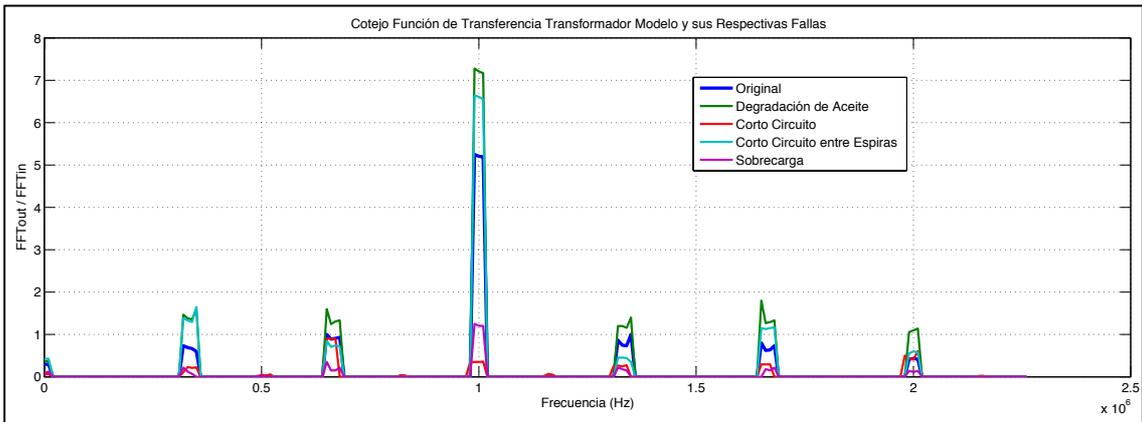


Figura A1.33 Función de Transferencia en Condición de Falla en todo el Espectro Frecuencial.

## TRANSFORMADOR MODELO

### COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN REGIÓN A BAJA FRECUENCIA

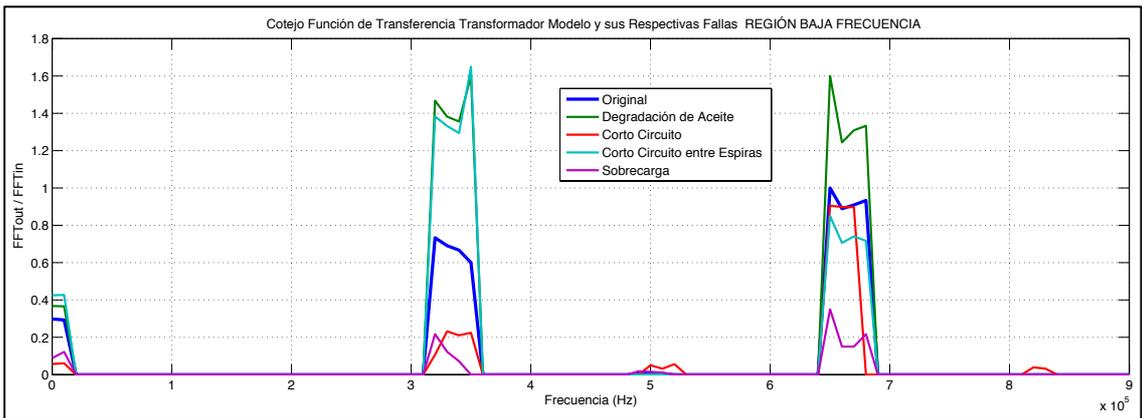


Figura A1.34 Cotejo Función de Transferencia en Región a Baja Frecuencia.

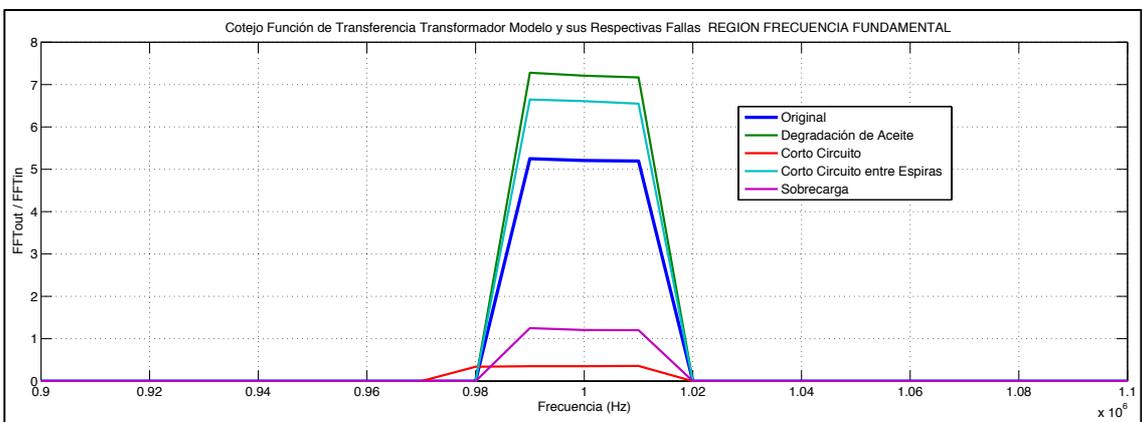
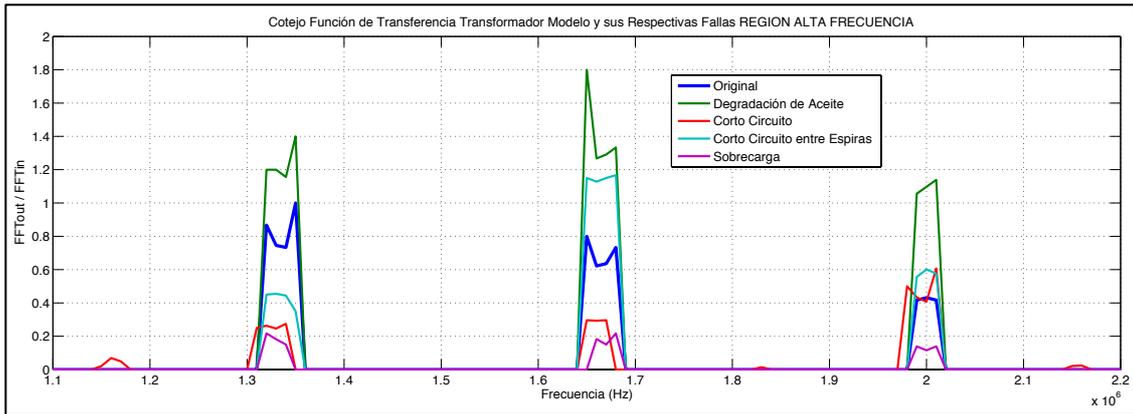
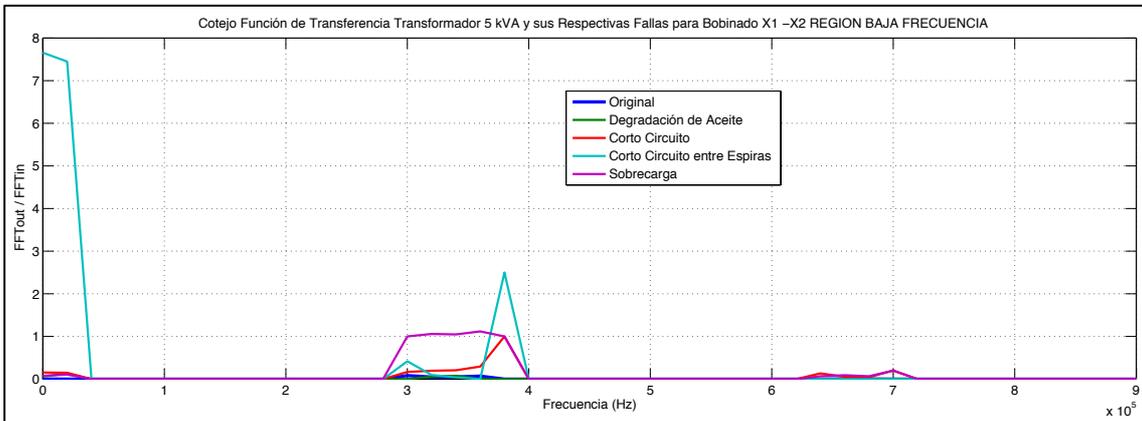


Figura A1.35 Cotejo Función de Transferencia en Región de Frecuencia Fundamental.

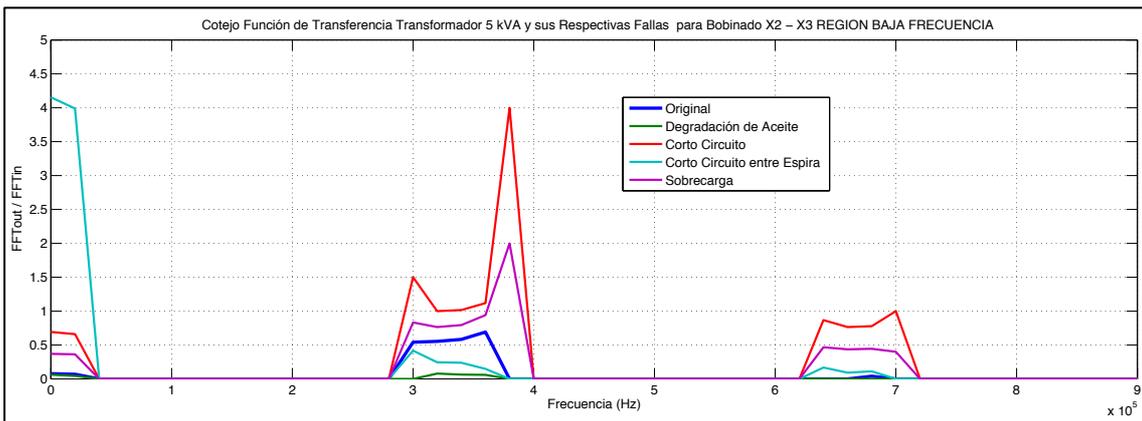


**Figura A1.36** Cotejo Función de Transferencia en Región de Alta Frecuencia.

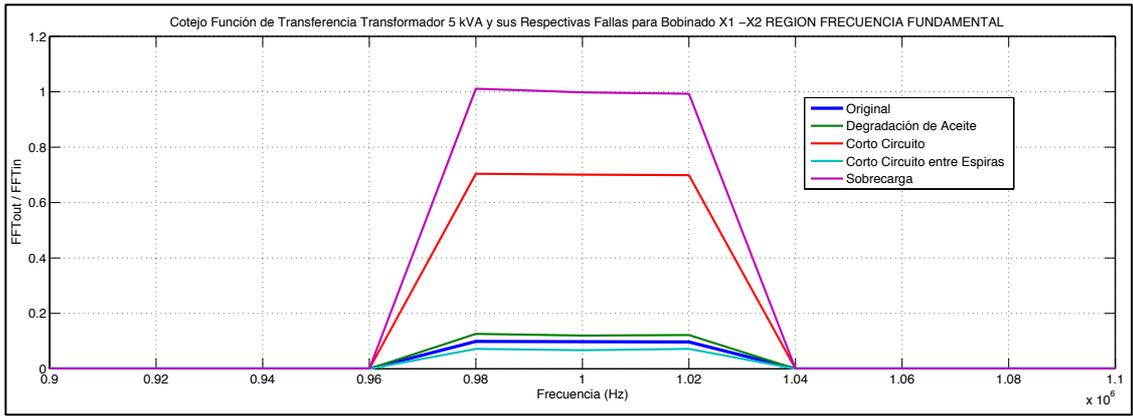
### TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN MONOFÁSICO DE 5 KVA



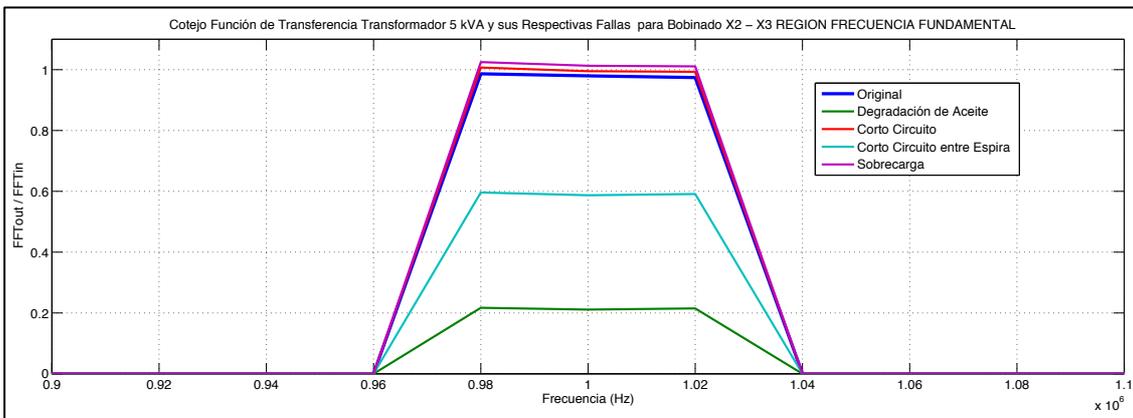
**Figura A1.37** Cotejo Función de Transferencia en Región de Baja Frecuencia en Bobinado X1 – X2.



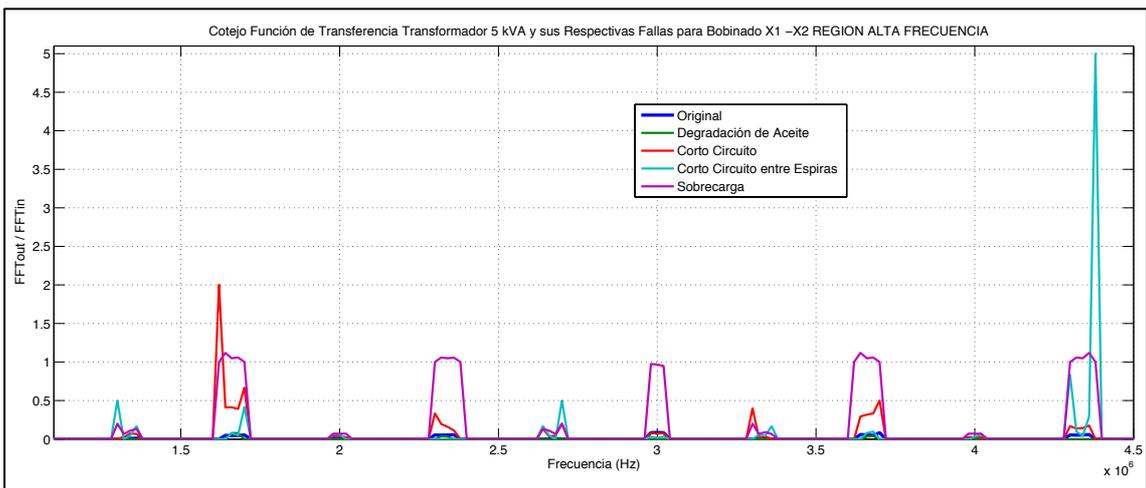
**Figura A1.38** Cotejo Función de Transferencia en Región de Baja Frecuencia en Bobinado X2 – X3.



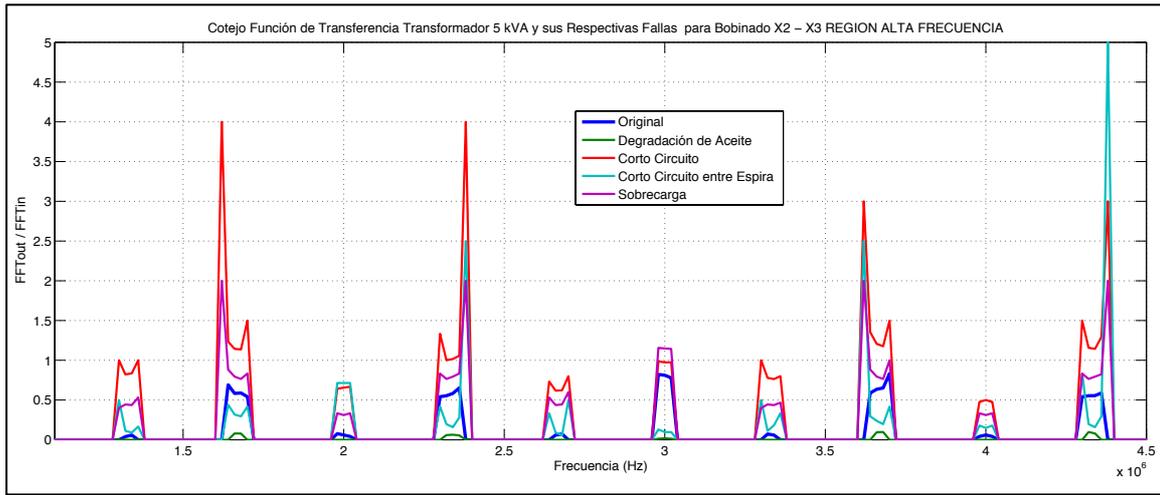
**Figura A1.39** Cotejo Función de Transferencia en Región de Frecuencia Fundamental en Bobinado X1 – X2.



**Figura A1.40** Cotejo Función de Transferencia en Región de Frecuencia Fundamental en Bobinado X2 – X3.



**Figura A1.41** Cotejo Función de Transferencia en Región de Alta Frecuencia en Bobinado X1 – X2.



**Figura A1.42** Cotejo Función de Transferencia en Región de Alta Frecuencia en Bobinado X2 – X3.

## ANEXO 2

### PRUEBAS TERMOGRÁFICAS EN FALLA DE SOBRECALENTAMIENTO Y DETERIORO DE ACEITE A UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO 5 kVA

Con el fin de contribuir al deterioro del transformador, y lograr determinar variación en sus graficas de función de transferencia, se somete al transformador a una sobrecarga prolongada con el fin de elevar su temperatura, este efecto es visualizado mediante una cámara termográfica que muestra los puntos críticos del transformador y la temperatura aproximada al que está sometido. En las figuras se observan las temperaturas a distintos momentos.

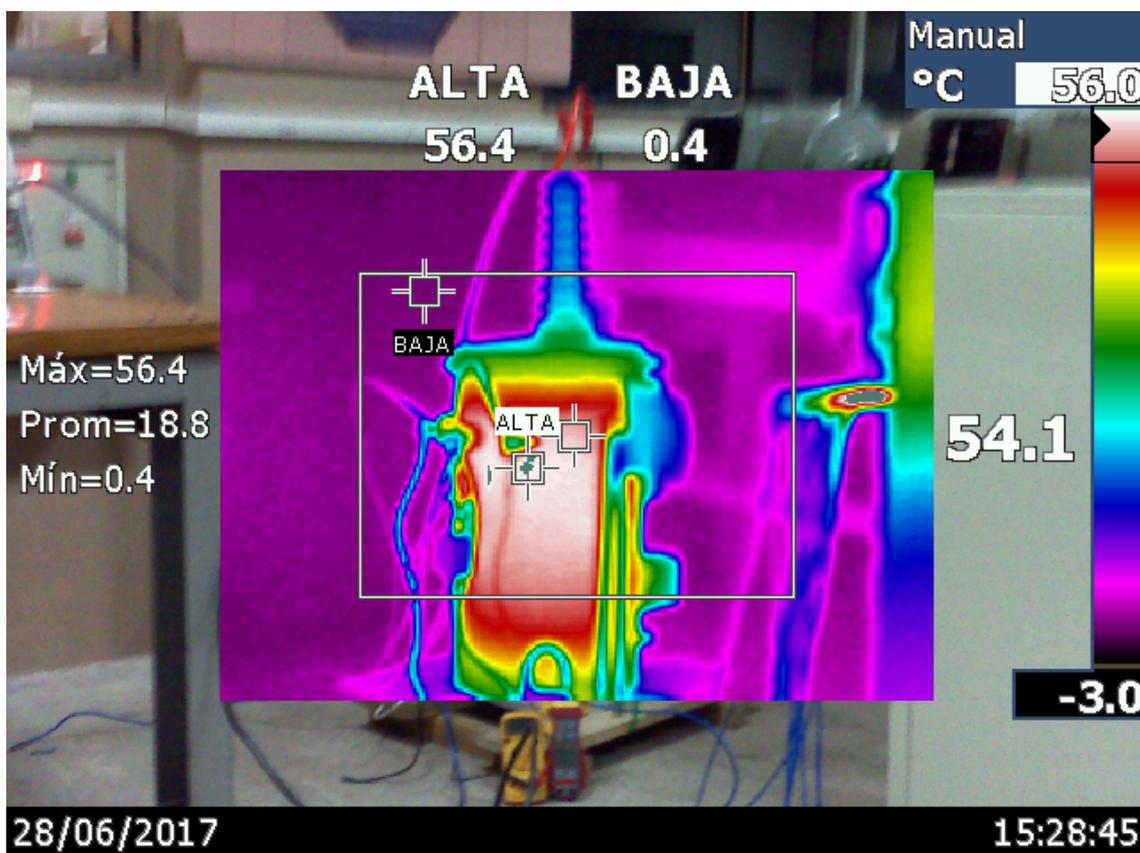


Figura A2.1 Temperatura de Transformador en un promedio de 18.8 °C.

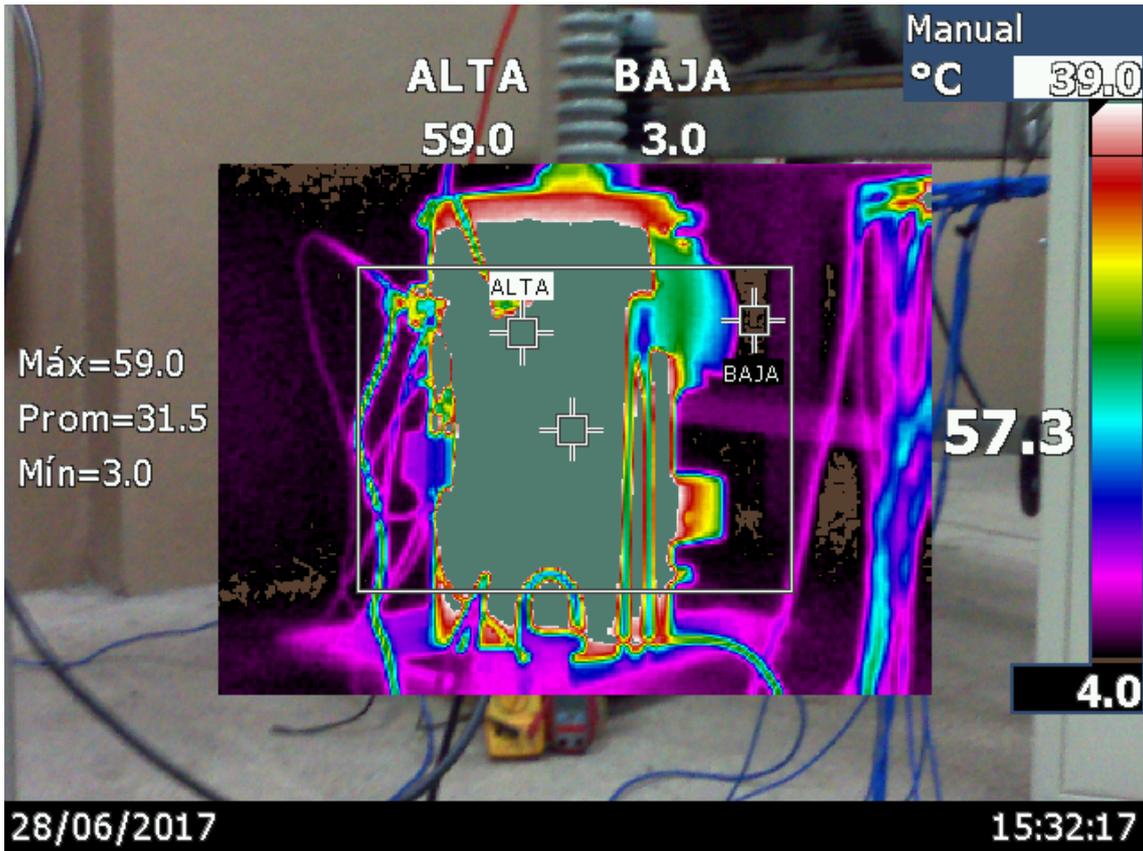


Figura A2.2 Temperatura de Transformador en un promedio de 31.5 °C.

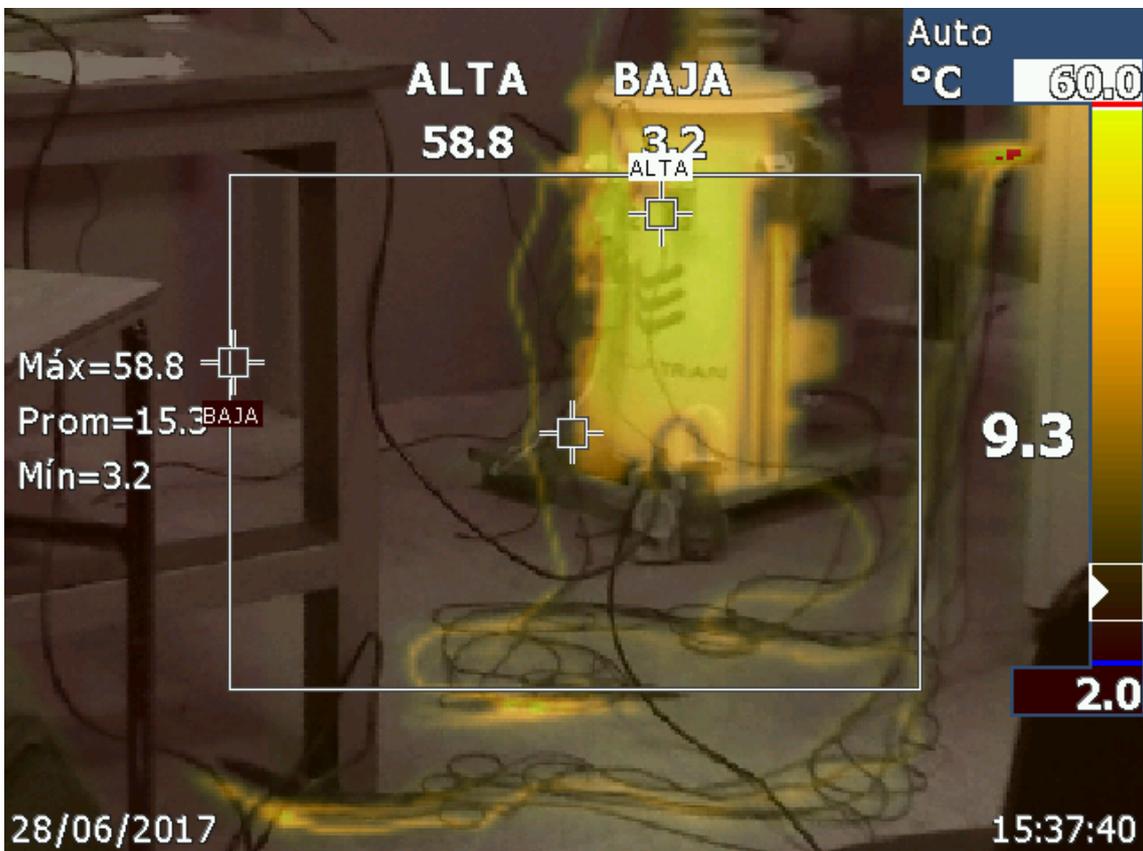


Figura A2.3 Temperatura de Transformador en un promedio de 58,8 °C.

# ANEXO 3



PROTOCOLO DE PRUEBAS

**TRANSFORMADOR MONOFÁSICO**

EC-RG-LA-LA-04-04

---

**DATOS**

TRANSFORMADOR: SUBESTACION TIPO: AUTO-PROTEGIDO KVA: 5 SERIE: 0380512017

VOLTAJE P.(V): 22000GRDY/12700 (1B) Ip (A): 0.39 CLASE P.(KV): 25.0 BIL P.(KV): 125

VOLTAJE S. (V): 120/240 Is (A): 41.67/20.83 CLASE S.(KV): 1.2 BIL S.(KV): 30

DERIVACIONES: +1x2.5%; -3x2.5% POLARIDAD: SUSTRACTIVA CLASE AISL.: AO IN. TEMP.(°C): 65.0

ALT. ENS.(msnm): 3000 REFRIGER.: ONAN FREC (Hz): 60.00 ESPECIF.: 05.148C

**> LIQUIDO AISLANTE**

TIPO: ACEITE(SIN PCB) CLASE: MINERAL REFERENCIA: GS TRANS I RUP. (KV): 34.0 MÉTODO: ASTM D1816 - 1mm

**> PRUEBAS ELÉCTRICAS**

**RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN**

POS	CALCULADO	MÉDIDO	ERROR (%)
1(A)	54.240	54.250	0.018
2(B)	52.917	52.930	0.025
3(C)	51.594	51.606	0.023
4(D)	50.271	50.276	0.010
5(E)	48.948	48.950	0.004

**RESISTENCIA DE BOBINADOS**

DATOS					
POS	To (°C)	Tf (°C)	MATERIAL (P-S)	TKp	TKs
2	20.5	85.0	Cu-Cu	1.253	1.253
RESISTENCIA - BOBINADO MAYOR V. (Ohm)			RESISTENCIA - BOBINADO MENOR V. (mOhm)		
Rp - To		Rp - Tf		Rs - To	
234.2		293.43		78.36	
				Rs - Tf	
				98.18	

**MEDICIÓN Y CÁLCULO DE PÉRDIDAS E IMPEDANCIA**

**ENSAYO SIN CARGA**

MEDIDOS - To			
Voltaje (V)	Io (A)	Io (%)	Po (W)
240.00	0.16	0.77	27.8
Garantizados:		2.5	31

**ENSAYO CON CARGA - MÉTODO DE CORTO CIRCUITO**

MEDIDOS - To		CALCULADOS - To		CALCULADOS - Tf		
Vc (V)	Ic (A)	Pcu (W)	Pcu-In (W)	P-I <sup>2</sup> R (W)	P-I <sup>2</sup> R (W)	Pcu (W)
195.7	0.39	69.1	70.4	70.4	88.2	88.2
Garantizados:						91
						Z (%)
						1.88
						3.0

**CÁLCULO DE EFICIENCIA Y REGULACIÓN**

**EFICIENCIA A Tf - 100% DE CARGA**

FP:	1.0	EFICIENCIA(%)	97.68
-----	-----	---------------	-------

**REGULACIÓN A Tf-100% DE CARGA**

P. NOMINAL (KVA):	5.0	FP:	1.0	REGULACIÓN(%):	1.77
-------------------	-----	-----	-----	----------------	------

**PRUEBAS AL AISLAMIENTO**

**RESISTENCIA DE AISLAMIENTO**

APLICACIÓN	AT-BT	AT-T	BT-T
V DC	5000	0	2500
MEGAOHM	8630	0	8630

**VOLTAJE INDUCIDO**

FRECUENCIA	400	Hz	APLICACION	A.T.	B.T.	UNIDAD
VOLTAJE	756	V	VOLTAJE	-	10	KV
TIEMPO	18	s	TIEMPO	-	60	s

**> CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS**

PESO TOTAL (kg)	LIQ.AISL.(l)	DIAMETRO*(mm)	ALTO*(mm)	PINTURA	COLOR	ESPESOR (um)
84	32	310	560	ELECTROSTATICA	GRIS	>100

\* Dimensiones aproximadas del tanque.

**> OBSERVACIONES**

Obs:

FECHA: 2017-04-26

REVISADO POR: 

ING. EUCLIDES CARRILLO

0380512017-4560

SELO DE CALIDAD **INEN**  
Norma NTE NEN-210

Certificado en:  
Diseño, fabricación y comercialización de Transformadores Monofásicos y Trifásicos de distribución de energía eléctrica suministrados en aceite (L).  
Diseño, instalación y comercialización de proyectos electromecánicos especiales.  
Para el servicio de Mantenimiento y Reparación de Transformadores.  
Comercialización de Accesorios y Transformadores de Potencia.




LÍNEA DE ATENCIÓN NACIONAL E INTERNACIONAL: Tel. (593 3) 3700 100 | AMBATO: Fábrica Calle Venezuela S/N y Bernardo Echaverra (Km. 7 1/2, vía a Guaranda) parroquia Santa Rosa, Casilla 18-01-45 • ventas@ecuatran.com | QUITO: Av. Naciones Unidas y Niñez de Vela, Edif. Metropolitan Off. 307. ecuatran\_uio@ecuatran.com | GUAYAQUIL: Av. Francisco de Orellana y Linderos esquina frente a Dicoentro Edif. AS1 • ecuatran\_gyq@ecuatran.com ATENCIÓN INTERNACIONAL: Tel. (593 3) 3700 100 • Cel. (593) 990 458 595 • ecuatran@ecuatran.com

Figura A3.1 Protocolo de Pruebas Transformador Monofásico de 5 kVA.