



REPÚBLICA DEL ECUADOR

**Escuela Politécnica Nacional**

" E S C I E N T I A H O M I N I S S A L U S "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

***Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.***

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS TRANSITORIOS DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO UTILIZANDO MATLAB- SIMULINK**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**GUEVARA BETANCOURT ANDRÉS ALFREDO**

[andres.guevara@epn.edu.ec](mailto:andres.guevara@epn.edu.ec)

**DIRECTOR: DR. NELSON VICTORIANO GRANDA GUTIÉRREZ**

[nelson.granda@epn.edu.ec](mailto:nelson.granda@epn.edu.ec)

**Quito, Noviembre 2018**

## **AVAL**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Andrés Alfredo Guevara Betancourt, bajo mi supervisión.

---

**DR. NELSON GRANDA**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Yo ANDRÉS ALFREDO GUEVARA BETANCOURT, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

ANDRÉS GUEVARA BETANCOURT

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de titulación a mi familia que en el transcurso de todos estos años siempre ha estado ahí para brindarme su apoyo; en especial a mis padres quienes con su apoyo, constantes consejos, con su ejemplo, y trabajo diario, han sido un pilar muy importante en mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a las personas que aportaron para el desarrollo de este trabajo de titulación en especial al Ing. Juan Ramírez y el Dr. Nelson Granda que con sus conocimientos y oportuna ayuda permitieron que este trabajo culmine de la mejor manera.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT .....	IX
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Objetivos.....	1
Objetivo General .....	1
Objetivos Específicos.....	2
1.2 Alcance .....	2
1.3 Marco Teórico .....	3
1.3.1 EFECTOS DE LA FRECUENCIA EN TRANSFORMADORES .....	3
1.3.2 MODELOS DE TRANSFORMADORES DE ALTA FRECUENCIA.....	5
1.3.2.1 MODELOS FÍSICOS .....	6
1.3.2.1.1 Modelo de Tran-Anh.....	6
1.3.2.1.2 Modelo de Abed .....	7
1.3.2.1.3 Modelo de Abeywickrama .....	8
1.3.2.1.4 Modelo de Lu.....	10
1.3.2.1.5 Modelo de Moziful .....	10
1.3.2.2 MODELOS BLACK-BOX .....	11
1.3.2.2.1 Modelo Sabiha.....	12
1.3.2.2.2 Modelo Biernacki.....	14
1.3.2.2.3 Modelo Zhang.....	15

1.3.2.2.4 Modelo Zhongyuan.....	15
1.3.3 MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN DE MATLAB-SIMULINK.....	16
1.3.3.1 Gradiente Descendente.....	16
1.3.3.2 Conjunto Activo .....	17
1.3.3.3 Punto Interior .....	18
1.3.3.4 Programación cuadrática secuencial - SQP.....	19
1.3.3.5 Trust Region Reflective .....	19
1.3.3.6 Levenberg Marquardt.....	20
1.3.3.7 Simplex y Pattern Search .....	20
<b>2. METODOLOGÍA .....</b>	<b>22</b>
2.1. ANÁLISIS DE MODELO A UTILIZAR .....	23
2.2 MODELO DE TRANSFORMADOR DE ALTA FRECUENCIA UTILIZADO .....	23
2.3 ANÁLISIS Y PRUEBAS APLICADAS A TRANSFORMADOR.....	25
2.4 SIMULACIÓN DE DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	26
2.5 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS FORMA TRADICIONAL.....	28
2.6 DESARROLLO DE PROGRAMA EN MATLAB-SIMULINK.....	29
2.7 ESTIMACIÓN DE CAPACITANCIAS .....	29
2.8 SIMULACIÓN EN MATLAB-SIMULINK.....	33
2.9 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS EN MATLAB-SIMULINK.....	36
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>37</b>
3.1 CÁLCULO DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN BASE A PRUEBAS DE CIRCUITO ABIERTO Y CORTOCIRCUITO.....	37
3.2 CÁLCULO DE CAPACITANCIAS.....	42
3.3 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS CON HERRAMIENTA DE MATLAB-SIMULINK.....	48
3.4 RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS.....	50
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>64</b>
4.1 CONCLUSIONES .....	64



4.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTUROS.....	66
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67
6. ANEXOS.....	71
ANEXO I.....	71
ANEXO II.....	73
ORDEN DE EMPASTADO.....	93

## RESUMEN

Este estudio se enfocó en probar una forma alternativa de obtener los parámetros eléctricos del modelo de transformadores trifásicos a partir de mediciones registradas mediante los equipos de protección y medida asociados al transformador. El potencial uso de esta metodología se enfocó en estimar el modelo eléctrico de transformadores trifásicos ya en funcionamiento; en un sistema eléctrico frente a eventos transitorios. La metodología permitirá disminuir tiempos asociados a las pruebas que se deben realizar a un transformador para obtener su modelo equivalente; puesto que, estas pruebas usualmente se realizan con el transformador desenergizado, equipos de prueba costosos y especializados, siendo en algunos casos necesario el traslado del transformador al laboratorio.

Varios estudios existentes presentan modelos completos del transformador para eventos transitorios, los cuales sirvieron de base para estimar los parámetros en MATLAB-SIMULINK. Una vez que se pruebe la efectividad y confiabilidad del modelo desarrollado, éste se convertiría de gran ayuda para la identificación de parámetros en transformadores nuevos o en transformadores en funcionamiento y con muchos años de vida útil; de los cuales solamente se posea información básica como aproximaciones a equipos similares, parámetros que con el pasar del tiempo y las condiciones de funcionamiento pudieron haberse modificado con respecto a los valores al momento de instalación del transformador.

**PALABRAS CLAVE:** Modelo de transformador-alta frecuencia, Función Transferencia, Transformador de alta frecuencia.

## **ABSTRACT**

This research work focused on testing an alternative way to obtaining the electrical parameters of the three-phase transformer model from measurements recorded by the protection and measurement equipment associated with the transformer. The potential use of this methodology would estimate the electrical model of three-phase transformers already in operation of an electrical system at facing transitory events. The methodology will reduce time associated with the tests that must be performed on a transformer to obtain its equivalent model, since these tests are usually performed with the transformer de-energized, expensive and specialized test equipment, being in some cases necessary the transfer from the transformer to the laboratory.

There are several studies that show complete transformer models for transient events, which served as the basis to estimate parameters in MATLAB-SIMULINK. Once the effectiveness and reliability of the model in development be proven, it can become a great help for the identification of parameters in new transformers or transformers in operation, with many years of useful life which only basic information is available as approximations to similar equipment; parameters that with the past of the time and operating conditions could have been modified with respect to the values at the moment of the transformer installation.

**KEYWORDS:** High frequency transformer model, Transfer function, High frequency transformer.

# 1. INTRODUCCIÓN

Los fabricantes de equipos estáticos como transformadores de potencia siguen las normas internacionales y locales que rigen en cada país cuyos estándares se verifican en laboratorios técnicos de las empresas. En los mencionados laboratorios se obtienen los parámetros eléctricos iniciales de fabricación por medio de las pruebas realizadas, y sus resultados proporcionan información de suma importancia para el diseño y desarrollo de toda la red eléctrica, información que se encuentra en la placa de información del equipo [1].

A fin de obtener los valores de los parámetros en los transformadores, se lleva a cabo una serie de pruebas y para el efecto se requieren varios equipos y elementos de medida especializados, que según la precisión de los mismos darán valores con errores máximos permitidos. Por ello, es transcendental que los fabricantes provean estos datos, debido a que, realizar estas pruebas en los sitios de instalación implicaría un costo elevado; aunque este procedimiento sería el ideal porque las pruebas pueden verse afectadas por las distintas condiciones climáticas y geográficas de la ubicación final del equipo [2].

En este primer capítulo se detallan varios aspectos que ayudan a entender el alcance de este estudio técnico, así como los objetivos y la justificación del mismo, en el siguiente literal de objetivos generales y específicos se encuentran los planteamientos que se relacionan entre sí, estos planteamientos guiaron el procedimiento a seguir, para poder cumplir con todos y cada uno de los objetivos planteados. Adicionalmente, se presenta información sobre las diferentes etapas que se realizaron para cumplir con la estimación de parámetros eléctricos del transformador de distribución de 50kVA ante eventos transitorios de alta frecuencia como son las descargas atmosféricas.

## 1.1 Objetivos

### Objetivo General

- Estimar los parámetros eléctricos transitorios de un transformador trifásico de distribución de 50 kVA utilizando MATLAB-SIMULINK, mediante la inyección de un pulso de alto voltaje que simule una descarga atmosférica.

## **Objetivos Específicos**

- Desarrollar un modelo completo de transformador trifásico frente a eventos transitorios mediante el uso del software MATLAB-SIMULINK que represente adecuadamente a los transformadores para poder ser simulado.
- Obtener las curvas de entrada y salida de voltaje del transformador trifásico de distribución de 50 kVA frente a una descarga atmosférica simulada en el Laboratorio de Alto Voltaje de la EPN
- Contrastar las curvas de entrada y salida de un transformador trifásico de distribución de 50 kVA obtenidas mediante simulación con aquellas obtenidas mediante laboratorio.
- Estimar los parámetros del modelo de un transformador trifásico de distribución de 50 kVA frente a eventos transitorios mediante una rutina de cálculo desarrollado en MATLAB-SIMULINK.

## **1.2 Alcance**

Este trabajo busca determinar parámetros eléctricos de transformadores trifásicos mediante el modelado y sintonización de un modelo completo para transformador ante eventos transitorios, el cual con la ayuda de datos de entrada y salida que podrán ser medidos en el laboratorio de Alto voltaje de la EPN, datos que se ingresarán en el modelo realizado en el software MATLAB-SIMULINK a fin de que éste entregue los valores deseados.

Este trabajo incluye la parte práctica en la que se obtendrán los valores de entrada y salida en el laboratorio de alto voltaje, valores que deben ser comparados con los valores teóricos y para luego de un estudio a detalle poder ver las diferencias que ayudarán a sintonizar éste modelo en MATLAB-SIMULINK.

## **1.3 Marco Teórico**

Los transformadores están entre los principales elementos que poseen los sistemas eléctricos de potencia, los mismos que son utilizados para la transformación de los niveles de voltaje ya sea para elevar, reducir o regular los mismos. Los transformadores se encuentran en el punto de unión entre la generación, transmisión y distribución entre los diferentes niveles de voltaje de un sistema eléctrico. Un transformador está conformado por devanados que se encuentran eléctricamente desconectados, pero son devanados que magnéticamente están acoplados; y como producto de aquello, el resultado es que la corriente de un devanado es inducida electromagnéticamente en el otro devanado, modificándose según sea su relación de transformación [3].

### **1.3.1 EFECTOS DE LA FRECUENCIA EN TRANSFORMADORES**

Los eventos transitorios que afectan los sistemas eléctricos de potencia se encuentran desde las denominadas bajas frecuencias 0.1 Hz hasta las altas frecuencias 50 MHz, estas ondas pueden producirse muchas veces por condiciones climáticas como descargas atmosféricas producidas en algún punto del sistema, y que se transfieren a través de las líneas de transmisión y pueden llegar a equipos como los transformadores; de igual manera por operaciones inesperadas de equipos de protección que puedan producir eventos transitorios en estos mismos equipos [4].

Por los motivos expuestos para la simulación de cada uno de estos eventos transitorios, las representaciones y modelaciones de dichos eventos, requieren sean acorde a los diferentes niveles de frecuencia en los que son afectados cada elemento para que tengan una representación y modelación adecuada. La representación matemática de cada elemento es compleja, puesto que varía con la frecuencia y se obtiene un amplio número de ecuaciones para simular cada elemento y evento del sistema eléctrico de potencia.

Por lo expuesto anteriormente, el Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas (CIGRE), especifica los eventos de acuerdo con su rango de frecuencias, tablas que son de gran ayuda para clasificar los modelos matemáticos en: alta, media y baja frecuencia; y simplificar la cantidad de cálculos y ecuaciones que se deberían realizar en los modelos detallados a frecuencias específicas como se puede observar en la Tabla 1.1 [4].

**Tabla 1.1.-Rango de frecuencias fenómenos transitorios [4].**

<b>Estudio Transitorio</b>		<b>Rango Frecuencias</b>
1	Estado estable	0.1Hz – 3kHz
2	Estudio de media frecuencia	50Hz – 20kHz
3	Fenómeno de alta frecuencia	20kHz – 50MHz

**Tabla 1.2.- Clasificación de eventos transitorios de acuerdo a su frecuencia [4].**

<b>Evento</b>	<b>Rango Frecuencias</b>
Ferroresonancia transformadores	0.1 Hz a 1 kHz
Cambio instantáneo de carga	0.1 Hz a 3 kHz
Energización de líneas de transmisión	50 Hz a 20 kHz
Apertura y cierre de líneas de transmisión	50 Hz a 20 kHz
Cortos en líneas de transmisión	50 Hz a 20 kHz
Voltajes transitorios de recuperación	50 Hz a 20 kHz
Arcos secundarios en interruptores	10 kHz a 1 MHz
Descargas atmosféricas	10 kHz a 3 MHz
Fallas subestaciones encapsuladas	100 kHz a 50 MHz

En el presente estudio técnico se revisa únicamente la información involucrada con eventos transitorios lo que incluye todo lo relacionado con alta frecuencia, dado que la simulación y el modelo que se llevó a cabo está relacionado con la simulación de una descarga atmosférica, evento que se encuentra dentro del rango de frecuencias 10kHz – 3MHz que pertenece a un fenómeno de alta frecuencia de acuerdo con la Tabla 1.2.

Los transformadores que se utilizan en sistemas eléctricos (60 Hz), por lo general funcionan y operan a voltaje y frecuencia relativamente constante con mínimas variaciones, controladas por los operadores del sistema. Las características eléctricas que poseen los transformadores en los sistemas eléctricos de potencia; por lo general son: tener un elevado nivel de rendimiento que se encuentra sobre un 90% en su gran mayoría, la regulación de voltaje es mínima llegando a estar en un promedio del 2% por cada tap que los transformadores posean. Pero a pesar de estas excelentes características que brindan un gran nivel de estabilidad a los transformadores, también estos poseen características internas que son dependientes de la frecuencia, como ejemplo son las capacitancias parásitas que pueden llegar a afectar de gran medida la respuesta de los transformadores ante eventos transitorios [3].

En los distintos esquemas de circuito equivalente de transformadores de Alta Frecuencia, intervienen varios aspectos que influyen en el comportamiento final de los transformadores

ante la inyección de ondas con Altas Frecuencias (AF), aspectos como los detallados a continuación: impedancias de cortocircuito, pérdidas en el núcleo y lo más importante a elevadas frecuencias que son las corrientes parásitas y los acoplamientos capacitivos.

Los acoplamientos capacitivos debido a la variación que existe en sus valores cuando éstos se enfrentan a diferentes frecuencias que son expuestos los arrollamientos de un transformador, es el aspecto que más influye cuando se analizan modelos en Alta Frecuencia. Como conclusión varios estudios según sea el rango de frecuencias se limitan a estudiar únicamente la influencia de capacitancias en los modelos de AF [5].

### **1.3.2 MODELOS DE TRANSFORMADORES DE ALTA FRECUENCIA**

En los últimos años los estudios relacionados con modelos de alta frecuencia han aumentado considerablemente, esto se lo puede comprobar en los estudios registrados en la página del Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) y estos estudios o modelos se pueden analizar que sobresalen dos grandes grupos que se diferencian el uno del otro por el concepto que estos emplean para realizar su diseño, estos grupos son:

**1º.- MODELOS FÍSICOS.**- Este tipo de modelos son los que se basan en circuitos formados por elementos eléctricos básicos como son las resistencias, inductores y capacitores, que acoplados y configurados en diferentes arreglos logren representar y reproducir los fenómenos eléctricos y magnéticos de la construcción interna de un transformador, respetando los diferentes criterios técnicos [6].

**2º.- MODELOS TIPO BLACK-BOX .-** Los modelos caja negra o modelos Black-Box son los que se evitan los análisis de los fenómenos físicos que pudiesen afectar a las respuestas de los transformadores; y estos más bien, se enfocan en encontrar una respuesta a través de funciones de transferencia de los mismos. Las funciones de transferencia pueden ser obtenidas a través de la síntesis de curvas obtenidas de modelos de transformadores con resistencias, inductancias y capacitancias o también conocidos como redes o circuitos RLC [6].

Tanto los modelos físicos como los modelos Black-Box que se los obtiene por una deducción de circuitos RLC, toman el nombre de modelos circuitales y son modelos que



fácilmente pueden ser implementados en programas computacionales que sirven de ayuda para la resolución de problemas que posean incógnitas con la operación de esta clase de modelos. Entre los programas computacionales para la resolución de circuitos eléctricos más importantes están MATLAB-SIMULINK, EMTP, PowerFactory, entre otros [7].

### **1.3.2.1 MODELOS FÍSICOS**

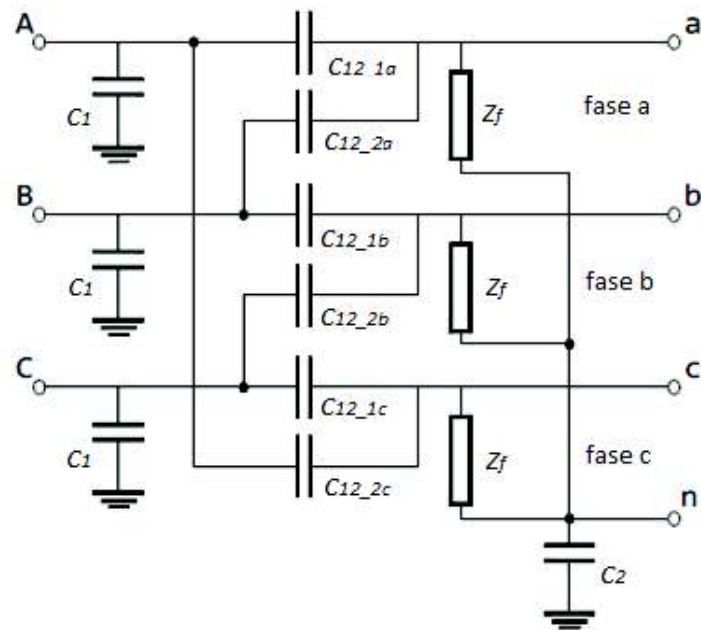
A continuación, se exponen varios ejemplos de modelos físicos de transformadores a alta frecuencia que han sido analizados y experimentados a lo largo de los últimos años en estudios realizados por el IEEE. En este Ítem se detallan los que más importancia han tenido en la realización de varios artículos científicos y estudios técnicos, y que tuvieron influencia en el desarrollo del presente trabajo de titulación. Muchos de estos modelos sirvieron de guía para entender el funcionamiento y la respuesta de los transformadores ante eventos de alta frecuencia [7].

#### **1.3.2.1.1 Modelo de Tran-Anh.**

En el modelo propuesto por Tran-Anh, Auriol y Tran-Quoc [8], en el artículo científico presentado en el año 2006 se observa un modelo a alta frecuencia (AF) que puede trabajar en un rango de frecuencia que va desde los 100 kHz a 10 MHz: en donde se encuentra representado que el transformador ideal, carece del núcleo en el modelo final.

Este modelo es representado por circuitos simplificados que únicamente constan de elementos como resistencias, inductancias y capacitancias. Elementos que fácilmente se los puede representar e implementar en los distintitos softwares de simulación de circuitos eléctricos que permiten manipular los elementos y obtener resultados de las ondas de ingreso y salida del transformador para poder comparar resultados y analizar las medidas realizadas a un transformador de forma experimental y simulada.

Este modelo se lo puede visualizar en la Figura 1.1 y más información detallada se encuentra en la referencia [8].



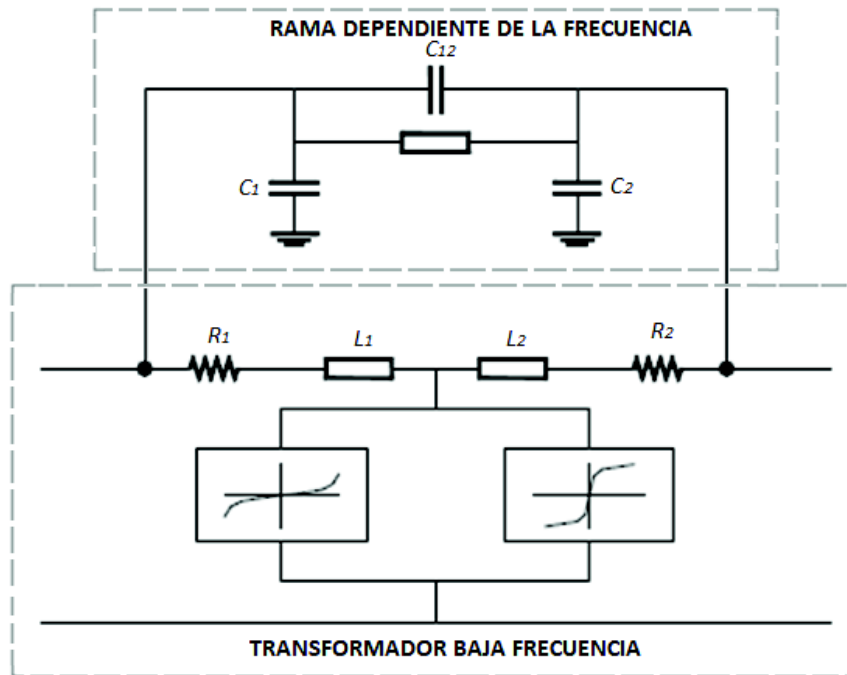
**Figura 1.1.-** Modelo de transformador de alta frecuencia Tran-Anh [8].

Los parámetros de este modelo de Tran-Anh se los describe a continuación:

- $C_1$      capacitores de las fase a tierra.
- $C_{12\_2}$    capacitores entre devanados
- $C_{12\_1}$    capacitores entre fases
- $Z_f$      impedancia de referencia.

### 1.3.2.1.2 Modelo de Abed

En la Figura 1.2 se observa el modelo para alta frecuencia de Abed [9], el cual consta de un circuito de dos ramas claramente definidas como son la rama de baja frecuencia que es la encargada de la respuesta del transformador para eventos y operaciones donde la potencia es elevada, y la segunda ramificación que es la encargada de manejar las respuestas de un transformador ante eventos de alta frecuencia o manejar la respuesta de frecuencia; puesto que cuando las frecuencias son relativamente bajas, esta rama actúa como un circuito abierto por el efecto de las capacitancias que crean impedancias muy altas, pero cuando la frecuencia es elevada, esta rama influye de gran medida, dado que las impedancias se reducen considerablemente. Información más detallada de este modelo se la puede obtener en [9].



**Figura 1.2.-** Modelo equivalente de transformador de AF Abed [9].

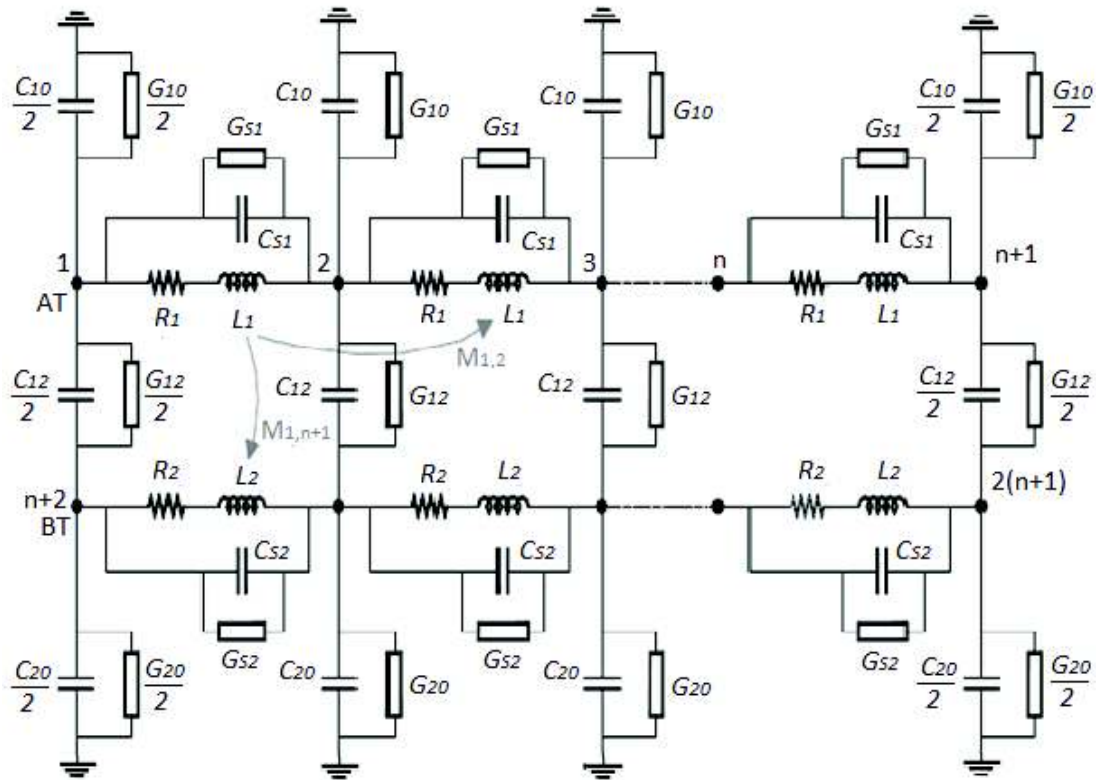
Los parámetros de este modelo de Abed se los describe a continuación:

- $C_1$  capacitor de devanado primario a tierra.
- $C_2$  capacitor de devanado secundario a tierra.
- $C_{12}$  capacitor entre lado de primario y secundario.
- $R_1$  resistencia del devanado primario.
- $R_2$  resistencia del devanado secundario.
- $L_1$  inductancia del devanado primario.
- $L_2$  inductancia del devanado secundario

### 1.3.2.1.3 Modelo de Abeywickrama

En el modelo de transformador para altas frecuencias expuesto por Abeywickrama, Serdyuk y Gubanski publicado en el IEEE en el año 2008 [10] se puede apreciar que consta de una serie de elementos eléctricos RLC (resistencias, inductancias, capacitancias) los cuales son todos dependientes de la frecuencia.

El circuito de este modelo puede ser implementado en MATLAB-SIMULINK, puesto que consta de un conjunto de ecuaciones diferenciales, mismas que representan el comportamiento físico de los elementos eléctricos RLC que forman el circuito del modelo, más información detallada para el modelo de la Figura 1.3 se puede obtener en [10] que es el artículo científico presentado en el IEEE.



**Figura 1.3.-** Modelo transformador de alta frecuencia de Abeywickrama [10].

Los parámetros de este modelo de Abeywickrama se los describe a continuación:

$C_{10}$ ,  $C_{20}$  capacitores de los devanados de alto y bajo voltaje a tierra.

$G_{10}$ ,  $G_{20}$  conductancia de los devanados de alto y bajo voltaje a tierra.

$C_{12}$ ,  $G_{12}$  capacitor y conductancia entre devanados de alto y bajo voltaje.

$C_{s1}$ ,  $C_{s2}$  capacitores en serie de los devanados de alto y bajo voltaje.

$G_{s1}$ ,  $G_{s2}$  conductancia en serie de los devanados de alto y bajo voltaje.

$L_1$ ,  $L_2$  inductancias de los devanados de alto y bajo voltaje.

$R_1$ ,  $R_2$  resistencias de los devanados de alto y bajo voltaje.

### 1.3.2.1.4 Modelo de Lu

Los autores de este modelo [11] describen los problemas que pueden aparecer mientras las frecuencias son más elevadas, problemas que llegan a ser muy significativos a la hora de plantear un modelo puesto que entre los problemas que surgen están las pérdidas en el núcleo, efectos térmicos que afectan a los materiales con los cuales son construidos los transformadores entre otros problemas, motivos por los cuales las personas que intervinieron en el desarrollo de este modelo que son H. Lu, J. Zhu, S. Hui y V. Ramsden, muestran un modelo simple y conciso para transformadores a altas frecuencias que incluyen las pérdidas en el núcleo y efectos térmicos de los devanados, modelo que se expone en la Figura 1.4 [11].

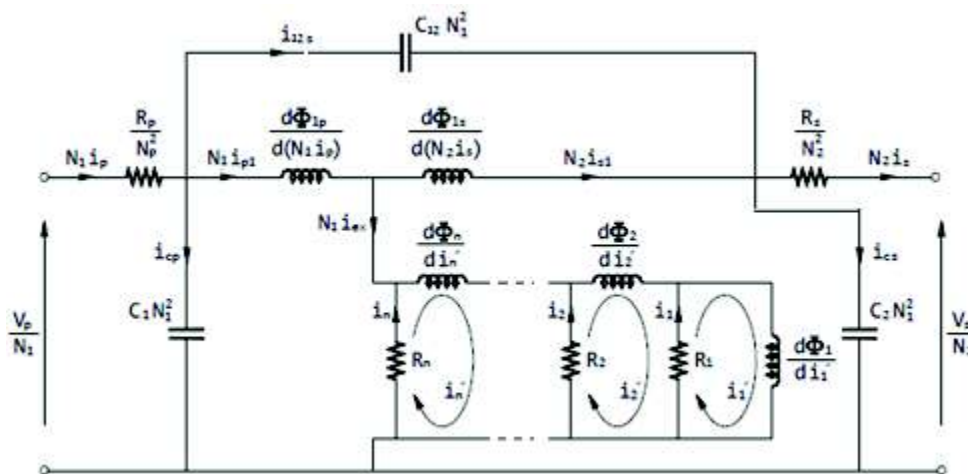


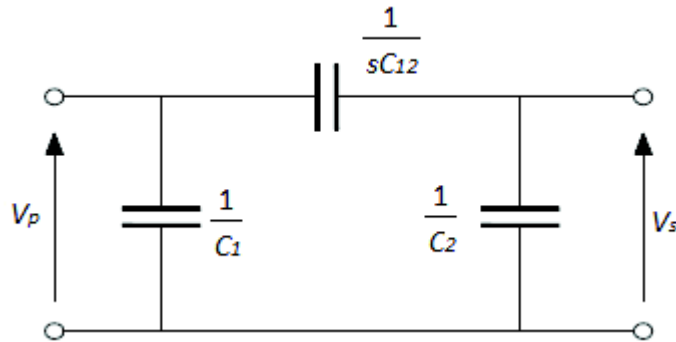
Figura 1.4.- Modelo del transformador de AF de Lu [11].

### 1.3.2.1.5 Modelo de Moziful

De acuerdo a Moziful, Kathrin Coates y Gerard Ledwich [12] los transformadores poseen funciones únicas de transferencia, las mismas que se las puede representar mediante el uso de circuitos RLC que consisten en una serie de inductancias, capacitancias de dispersión entre devanados y a tierra. El flujo magnético que posee, a muy elevadas frecuencias, no es capaz de ingresar en el núcleo y aquel flujo se comporta con ciertas características; en este modelo los autores asumen que dentro de las resistencias en serie se encuentran las inductancias mutuas.

En la Figura 1.5 se puede apreciar el modelo equivalente de alta frecuencia presentado por Moziful, en el cual se puede observar que básicamente se resume a tres capacitancias que

representan un transformador en alta frecuencia, este modelo en la práctica es muy acercado a la realidad puesto que un transformador en altas frecuencias se comporta como un divisor capacitivo.



**Figura 1.5.-** Modelo equivalente del transformador de alta frecuencia de Moziful [12].

La función de transferencia se expresa como Moziful [12]:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{C_{12}}{C_2 + C_{12}}$$

**Ecuación 1.1.-** Función de transferencia modelo Moziful

Donde:

$V_s$  Voltaje de secundario o de bajo voltaje.

$V_p$  Voltaje de primario o de alto voltaje.

$C_{12}$  Capacitor entre devanados primario y secundario.

$C_1$  Capacitor entre devanado primario a tierra.

$C_2$  Capacitor entre devanado secundario a tierra.

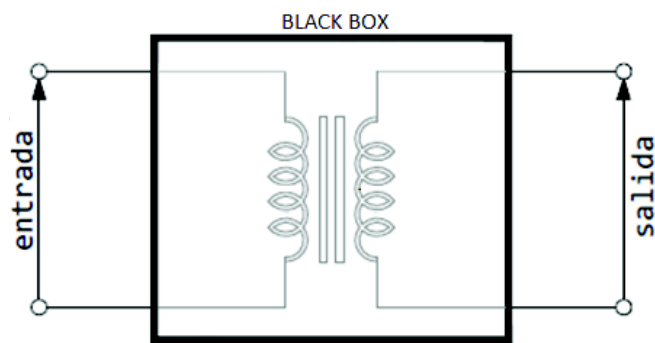
### 1.3.2.2 MODELOS BLACK-BOX

Este tipo de modelos tienen como objetivo encontrar la Función de Transferencia de los transformadores sin que tenga mayor importancia el significado físico del sistema analizado. Los modelos tipo Black-Box, como ya se mencionó en el literal 1.3.2 son similares a los modelos físicos, puesto que los dos modelos están constituidos por circuitos

RLC (resistencias, inductancias y capacitancias) que se encuentran conectados entre sí [13].

La principal diferencia entre los dos modelos radica en que los modelos Black-Box o caja negra no tienen acceso a su composición interna, por tal motivo, el cálculo de sus elementos se basa e inicia en las medidas obtenidas en las relaciones entre la “entrada” y “salida”, es decir en la información que voltajes o corrientes que ingresan al transformador y en la información que sale modificada por los elementos internos de los transformadores. Los componentes del modelo y la Función de Transferencia son obtenidos por medio de la información de datos transitorios de voltaje y corriente [14].

En la Figura 1.6 se puede observar como la información para iniciar los cálculos se la tiene realizando mediciones en la entrada y en la salida de los transformadores, teniendo los elementos internos como suposiciones, puesto que no se pueden realizar mediciones directamente en los elementos.



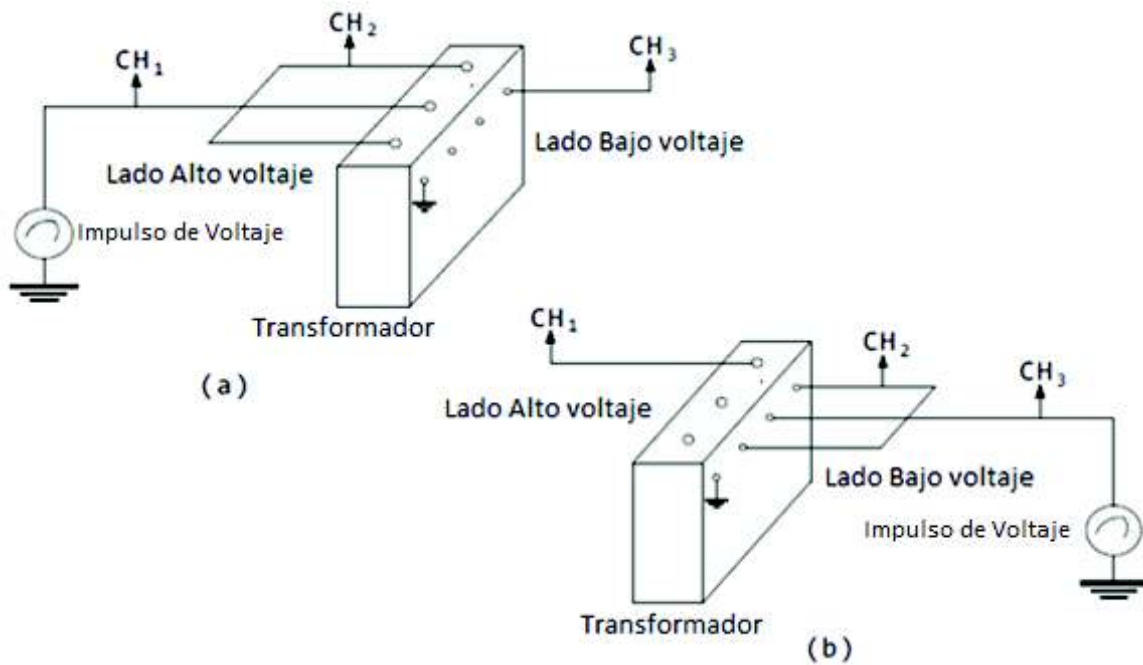
**Figura 1.6.-** Representación Black-Box del transformador

#### **1.3.2.2.1 Modelo Sabiha**

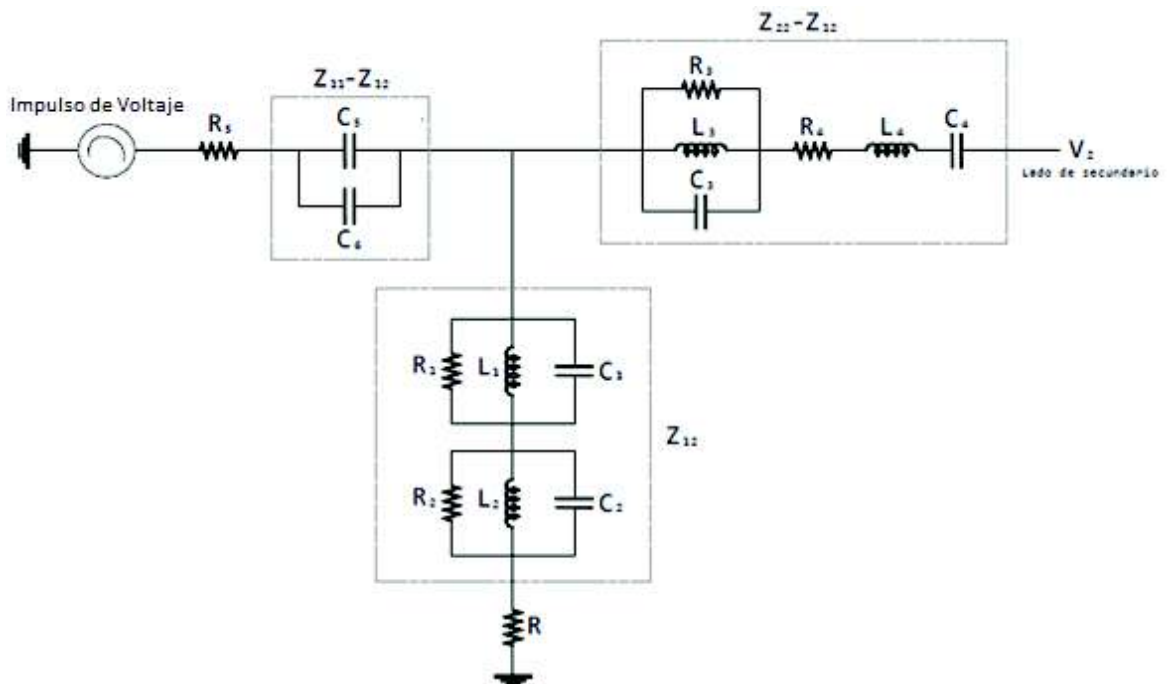
El modelo expuesto por los autores Sabiha y Lehtonen [15] se fundamenta en calcular los parámetros eléctricos de los transformadores mediante la teoría de los cuadripolos o también llamada en inglés two-port donde los parámetros se los calcula con medidas de dos frecuencias de resonancia obtenidas experimentalmente.

Lo beneficioso del modelo es que se puede trabajar tanto en condiciones de vacío como en condiciones a plena carga. Para encontrar los parámetros del modelo, se realiza un estudio de la respuesta de frecuencia del transformador con el uso de medidas experimentales.

En la Figura 1.7 se puede apreciar cómo se debe conectar los bornes del transformador y donde capturar las señales informativas tanto en la entrada y la salida del transformador para los casos en los que se inyecte pulsos por el lado de alto voltaje y se inyecte los mismos por el lado de bajo voltaje [15].



**Figura 1.7.-** Impulso voltaje en: (a) Primario - Alto Voltaje, (b) Secundario - Bajo voltaje



**Figura 1.8.-** Modelo de transformador de AF Sabiha [15].



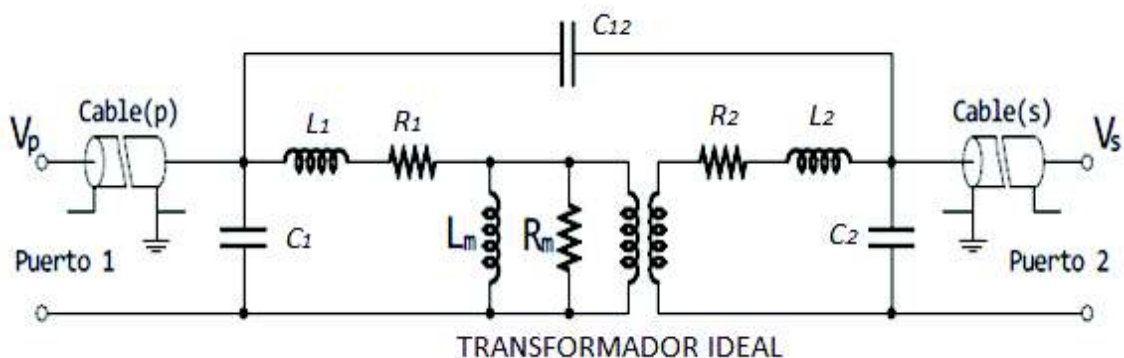
En la Figura 1.8 está representado el modelo interno del transformador de Sabiha [15]. Para información detallada se puede ver el artículo científico presentado por Sabiha en [15].

### 1.3.2.2 Modelo Biernacki

En el modelo expuesto por Biernacki en un transformador que trabaje en un amplio rango de frecuencias, las componentes eléctricas son las detalladas a continuación: inductancias de fuga, inductancias magnetización, pérdidas en devanados, y capacitancias en devanados; son obtenidas en una forma indirecta puesto que para obtener estos resultados se utiliza la técnica conocida como coeficientes de reflexión, además la matriz de dispersión [16].

Para validar su modelo los autores analizaron resultados experimentales que se obtuvieron de un transformador que fue expuesto a un rango de frecuencias que se encontraba entre 50 MHz a 500 MHz, con lo cual confirmaron que es una forma precisa para obtener los modelos de transformadores no lineales, la utilización de la matriz de dispersión.

En la Figura 1.9 se aprecia el modelo de Biernacki y en [16] se encuentra el estudio detallado con el que se obtuvo este modelo, y porque este modelo está considerado dentro del grupo de los modelos tipo Black-Box.



**Figura 1.9.-** Modelo de transformador de Biernacki [16]

Donde:

$V_s$  Voltaje de secundario o de bajo voltaje.

$V_p$  Voltaje de primario o de alto voltaje.

$C_{12}$  Capacitor entre devanados primario y secundario.

- $C_1$  Capacitor entre devanado primario a tierra.
- $C_1$  Capacitor entre devanado secundario a tierra.
- $R_1$  Resistencia del devanado primario.
- $R_2$  Resistencia del devanado secundario.
- $L_1$  Inductancia del devanado primario.
- $L_2$  Inductancia del devanado secundario

### 1.3.2.2.3 Modelo Zhang

Los eventos transitorios que son considerados como extra rápidos de sobrevoltaje, que pueden ser causados por operaciones de conmutación, conexión, desconexión entre otros, tienen efectos muy negativos en los equipos de potencia, de manera especial en los transformadores de potencia.

En la Ecuación 1.2 desarrollada por los autores Zhang, Liang, Xie y Sun se puede apreciar la función de transferencia la cual está ligada al modelo de alta frecuencia simple y robusto que es propuesto para analizar los transformadores en altas frecuencias [17].

$$H(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{Z_{21}}{Z_{11}} = \frac{2S_{12}}{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}$$

**Ecuación 1.2.-** Función de transferencia de Zhang [17].

Donde:

- $U_2$  Voltaje de secundario o de bajo voltaje.
- $U_1$  Voltaje de primario o de alto voltaje.
- $Z_{21}$  Impedancia entre devanados secundario y primario.
- $Z_{11}$  Impedancia del devanado primario

### 1.3.2.2.4 Modelo Zhongyuan

Los autores Zhongyuan, Fangcheng y Guishu [18], en su estudio proponen un modelo de un transformador a AF que se encuentre dentro del rango entre 100 kHz - 1 MHz, modelo

que utiliza los parámetros de dispersión para poder realizar los cálculos. Con los valores de los parámetros obtenidos se puede obtener el circuito equivalente en T.

Una vez obtenido el circuito equivalente en T se procede a utilizar el vector de ajuste para poder aproximar el mismo, modificando los valores de sus admitancias a funciones racionales que consisten en polos y residuos. Al final, se usa un método de simplificación de circuitos que se basa en funciones racionales las cuales son utilizadas para construir el modelo [18].

La función de transferencia que relaciona el voltaje de entrada y el voltaje de salida, se encuentra representada en la Ecuación 1.3 del modelo Black-Box se la puede expresar a través del uso de los parámetros de la matriz de dispersión (S):

$$H(s) = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = -\frac{Y_{21}}{Y_{22}} = \frac{2S_{12}}{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}$$

**Ecuación 1.3.-** Función de transferencia Zhonyuang [18].

En donde se puede detallar que  $V_1(s)$  y  $V_2(s)$  son los voltajes tanto de entrada como el voltaje de salida del transformador.

### 1.3.3 MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN DE MATLAB-SIMULINK

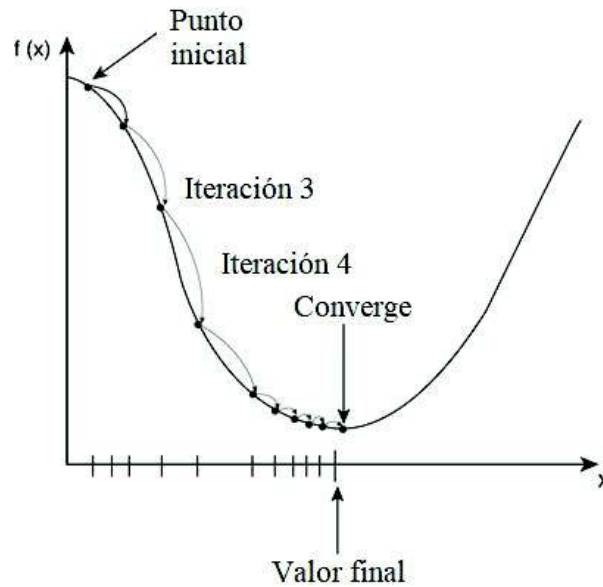
En ingeniería se utiliza muchos métodos para la optimización de funciones y bases de datos. En este estudio técnico en particular, se utilizaron los métodos que facilitan el software MATLAB-SIMULINK, los cuales se los detalla a continuación con una pequeña descripción de cada uno de ellos.

#### 1.3.3.1 Gradiente Descendente

El método de optimización llamado gradiente descendente, es un método iterativo en el cual se puede apreciar una variación de una regresión lineal la cual utiliza una función lineal para encontrar la función resultante, luego de realizar un recorrido punto a punto, recorrido en el cual los valores de los parámetros se ajustan a la función lineal [19].

En la Figura 1.10 se observa cuál es la forma en la que este método trabaja y se observa que para llegar a su objetivo esta función se aproxima hacia el punto mínimo; un paso a la vez, iteración tras iteración hasta poder converger en los valores deseados. Al inicio

realiza pasos o iteraciones de gran amplitud con deslizamientos grandes, disminuyendo sus desplazamientos de manera que se acerca al punto mínimo. Esto se obtiene puesto que el método realiza derivadas parciales de los propios valores que se van obteniendo iteración tras iteración, este proceso se repite una y otra vez hasta que la función cumpla con las condiciones ingresadas por el usuario o a su vez converja y se encuentre el valor mínimo posible [19].



**Figura 1.10.-** Ejemplo del desplazamiento de una función objetivo en la se utiliza el método del gradiente descendente [19].

Los valores iniciales del vector de parámetros son muy importantes, debido a que la convergencia del método depende de estos parámetros. Los valores de los parámetros también influyen en el tiempo en que el método converja y puede variar de minutos, horas, días hasta semanas en llegar a una solución. Los valores que se ingresan al inicio no deben ser cero, ni mucho menos valores grandes que se alejen en un porcentaje muy elevado del resultado final.

### 1.3.3.2 Conjunto Activo

Este método de optimización cumple con la función objetivo de la Figura 1.10, la forma en que se optimiza es la diferencia de este método, para encontrar cada paso de iteración en la función objetivo se van modificando las restricciones de cada paso iterativo y así se

van cumpliendo las condiciones del teorema de Karush-Kuhn-Tucker que indica de la presencia de restricciones modificadas [20].

Las condiciones del Teorema de Karush-Kuhn-Tucker exponen sobre cómo resolver modelos de Programación No Lineal en los que consten restricciones de igualdades como desigualdades; es decir, restricciones de ecuaciones e inecuaciones, a continuación en la Ecuación 1.4 se muestra las funciones utilizadas para realizar la minimización del error [21].

$$\text{Minimizar } f(x)$$

$$g_i(x) \leq 0$$

$$h_i(x) = 0$$

**Ecuación 1.4.-** Condiciones de Karush-Kuhn-Trucker [21].

### 1.3.3.3 Punto Interior

En método de punto interior al igual que los otros métodos como el método del literal 1.3.3.2 Conjunto activo, se puede ver que también tiene condiciones de igualdad y desigualdad, que van cumpliendo en cada paso de las iteraciones en este método de punto interior se cumple con las funciones expuestas en la Ecuación 1.5 a continuación.

$$\text{Mín } c^T \cdot x$$

$$g(x) = 0$$

$$h(x) \leq 0$$

**Ecuación 1.5.-** Problema de programación lineal [20].

En las funciones representadas en la Ecuación 1.5 el valor  $c$  es el valor del vector de coeficientes costo,  $h(x)$  es el vector de restricciones lineales de desigualdad,  $g(x)$  es el vector de restricciones lineales de igualdad.

El método de punto interior para buscar la solución efectúa una transformación y luego procede con la aproximación del problema con condiciones de igualdad, y esta aproximación se realiza con la función de la Ecuación 1.6.

$$\begin{aligned} \text{Mín } c^T \cdot x \\ g(x) &= 0 \\ h(x) + S &\leq 0 \\ S &> 0 \end{aligned}$$

**Ecuación 1.6.-** Función de igualdad método punto interior [20].

#### 1.3.3.4 Programación cuadrática secuencial - SQP

Este método al igual que los anteriores ya descritos se trata de un método iterativo, el cual se lo utiliza para la resolución de problemas en los cuales existe programación no lineal, la característica que identifica este método radica en que la función objetivo es cuadrática, también se expone en este método que las restricciones a las cuales está limitado son lineales [22].

El método SQP modifica las variables en una función objetivo cuadrática, mediante a la utilización de multiplicadores como la de LaGrange y series de Taylor. En este método también son muy importantes los valores iniciales que se les asigna a los parámetros, puesto que de ello dependerá el tiempo que tome en converger el mismo, cabe recalcar que este método realiza la segunda derivada lo que permite que sea mucho más rápido que otros métodos de estimación.

La Ecuación 1.7 detalla el multiplicador de LaGrange que se encuentra conjuntamente con las series de Taylor de segundo orden para poder obtener la aproximación del método SQP.

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot g_i(x)$$

**Ecuación 1.7.-** Aproximación de LaGrange SQP [22].

#### 1.3.3.5 Trust Region Reflective

Este método ya no es un método lineal como los descritos anteriormente, debido a que la aproximación que realiza su función objetivo utiliza una función cuadrática que permite realizar los movimientos en forma elíptica.

Este método al no ser un método lineal la evaluación de las aproximaciones las realiza en cualquier dirección y lado y no se limita a tendencias en descenso de forma lineal, lo que permite evaluar más posibilidades en menor tiempo, en la Ecuación 1.8 se visualiza la aproximación con series de Taylor [22].

$$\text{mín } \{q(s), s \in N\}$$

**Ecuación 1.8.-** Aproximación con series de Taylor [22].

### 1.3.3.6 Levenberg Marquardt

A este método se lo conoce como el método de los mínimos cuadrados, ya que es un método diseñado para trabajar con los errores cuadráticos tal y como se puede observar en la Ecuación 1.9, y al igual que los otros métodos trabaja en forma descendente como la Figura 1.10 hasta llegar al valor deseado de la función objetivo.

$$f(\omega) = \sum_{i=0}^m e_i^2(\omega)$$

**Ecuación 1.9.-** Función de error en sumas cuadráticas [19].

A continuación, se expone la Matrix Henessiana que está en función del Jacobiano para poder simplificar las iteraciones y la función de error, para así en menor tiempo cumplir con la función objetivo.

$$Jf = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

$$H \approx 2J^T J + \lambda I$$

**Ecuación 1.10.-** Matriz Henessiana del Jacobiano a partir de n parámetros [19].

### 1.3.3.7 Simplex y Pattern Search

Los modelos de búsqueda son más simplificados en los cuales no intervienen funciones cuadráticas lo que se resume a mayor facilidad de cálculo, y en el caso de ecuaciones extensas, este modelo consume menos recursos en los programas computacionales.

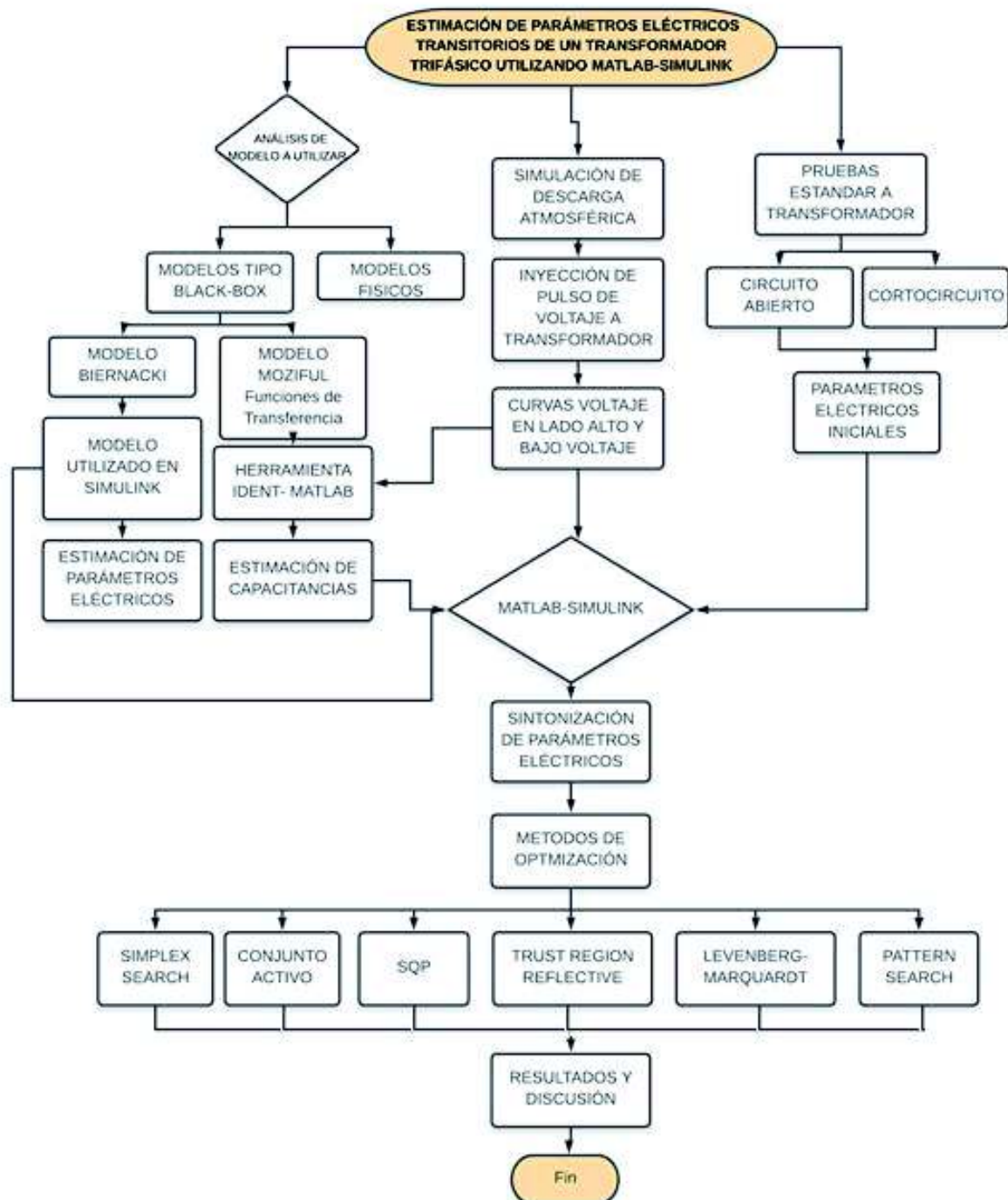
El método crea una secuencia de iteraciones, buscando la dirección adecuada en iteraciones o movimientos exploratorios antes de decidir por cual dirección tomar hasta llegar a la función objetivo. Cuando los movimientos que realizan son prácticamente mínimos o cumplen con las tolerancias establecidas, este método finaliza y llega a estimar los parámetros [22].

La principal diferencia entre el método de búsqueda Simplex Search y el método Pattern Search, viene dada en los límites inferiores puesto que en el primer método no los toma en cuenta; en cambio, el segundo método sí utiliza los límites para poner fin a la secuencia de iteraciones a realizar.



## 2. METODOLOGÍA

A continuación se expone un diagrama de flujo de toda la metodología y proceso a realizarse:



## **2.1. ANÁLISIS DE MODELO A UTILIZAR**

Para el presente estudio se utilizó un modelo Black-Box, que como ya se mencionó en el marco teórico son similares a los modelos físicos, pero que para su análisis únicamente se requiere de la información encontrada en los terminales de entrada y salida de un transformador. En conclusión, se puede considerar un modelo Black-Box como la forma de reducir un transformador a una función de transferencia sin saber su comportamiento interno [13].

Las diferencias entre los dos modelos: Físicos y Black-Box pueden producir dudas para clasificarlos a qué tipo de modelo pertenece uno u otro. La manera de encontrar los valores de los parámetros puede ser la característica más pronunciada para identificar qué clase de modelo es el analizado.

Determinar parámetros no es más que calcular los valores de los elementos que conforman un circuito equivalente, elementos eléctricos RLC (resistencias, inductancias y capacitancias) que conforman el modelo. Mediante el optimizador de parámetros de MATLAB-SIMULINK y con la obtención de parámetros iniciales del transformador de distribución utilizado en este estudio técnico se podrán cumplir con los objetivos de este estudio [13].

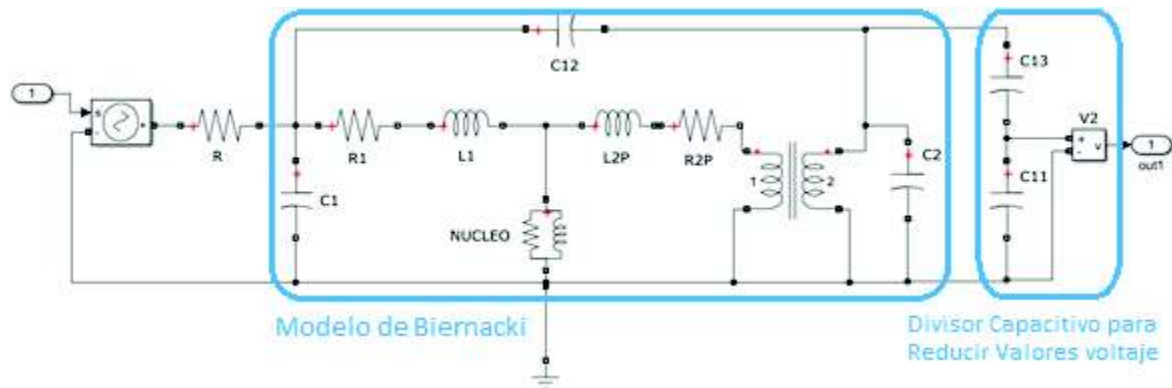
Para este estudio técnico se utilizó un modelo que se basa en el cálculo de parámetros del transformador en función de las curvas de voltaje en el lado de alto voltaje que fue el ingreso de la señal por el lado del primario del transformador y la curva de bajo voltaje en la salida del secundario del equipo analizado, curvas que se encuentran en función del tiempo, para con estos datos y el modelo en función de elementos RLC, mediante el software MATLAB-SIMULINK y la resolución de ecuaciones no lineales que son de gran ayuda en el optimizador de parámetros de MATLAB-SIMULINK, poder obtener los valores de los parámetros del transformador de distribución.

## **2.2 MODELO DE TRANSFORMADOR DE ALTA FRECUENCIA UTILIZADO**

El modelo Black-Box de transformador para alta frecuencia Two-Port de Biernacki [16] fue sobre el que se trabajó en el presente estudio técnico, debido a que es un modelo comprobado y utilizado en muchos estudios realizados en el IEEE además que es simple y conciso, como se puede observar en la Figura 2.1, el modelo se adapta a los objetivos

de este trabajo en el cual se puede visualizar las variables de un transformador trifásico en su modelo T equivalente.

A continuación, en la Figura 2.1 se puede visualizar las adaptaciones que se realizaron al modelo de Biernacki para poder trabajar y manipular los valores de los elementos y las curvas dentro del programa MATLAB-SIMULINK y de esta manera cumplir con los objetivos del presente estudio técnico.



**Figura 2.1.-** Modelo de transformador modificado para la simulación y obtención de datos en MATLAB-SIMULINK.

En la Figura 2.1 los capacitores  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_{12}$  son las capacitancias que aparecen en altas frecuencias en un transformador de potencia, estos capacitores son las capacitancias que aparecen en el devanado primario a tierra  $C_1$ , del devanado secundario a tierra  $C_2$  y la capacitancia entre devanados primario y secundario  $C_{12}$ . En la figura también se observa las capacitancias  $C_{13}$  y  $C_{11}$  que son únicamente un divisor capacitivo utilizado para poder adquirir la curva de voltaje en el secundario del transformador en rangos aceptables por el osciloscopio digital del Laboratorio Alto Voltaje de la Escuela Politécnica Nacional, capacitancias que quedan fuera del modelo y más bien son una carga que tiene el transformador de distribución analizado.

En el desarrollo de este estudio técnico se observó paso a paso el procedimiento para calcular los valores iniciales de todos los parámetros eléctricos del transformador, que sirvieron para inicializar el estimador de parámetros de MATLAB-SIMULINK.

Dentro de las adaptaciones realizadas al modelo de Biernacki [16] está que todos los valores de los parámetros son referidos al lado primario o lado de alto voltaje del transformador de distribución, es por este motivo que los cálculos que posteriormente se realizaron fueron referidos al lado primario.

## 2.3 ANÁLISIS Y PRUEBAS APLICADAS A TRANSFORMADOR

A fin de cumplir con los objetivos establecidos se trabajó en un transformador de distribución de 50 kVA, el cual forma parte del Laboratorio de Alto Voltaje de la Escuela Politécnica Nacional, transformador que pasó por muchos años descuidado y a la intemperie, motivo por el cual, previo a las prácticas a realizarse para cumplir con los objetivos de este estudio técnico se realizaron pruebas según la norma IEEE Std. C57.12.90 [23], que detalla procedimientos para realizar pruebas de rutina a transformadores sumergidos en aceite para verificar el estado del mismo.

Pruebas que se detallan a continuación en la Tabla 2.1. y que en su mayoría salieron satisfactorias.

**Tabla 2.1.- Pruebas Realizadas a transformador Trifásico de Distribución**

<b>PRUEBA REALIZADA</b>	<b>RESULTADO</b>
Prueba Resistencia Aislamiento Bobinados	ACEPTABLE [31][32]
Prueba Resistencia Aislamiento Bobinas a Tierra	ACEPTABLE [31][32]
Prueba de Circuito Abierto	ACEPTABLE [31][32]
Prueba de Cortocircuito	ACEPTABLE [31][32]
Rigidez Dieléctrica de Aceite	NO ACEPTABLE [31]

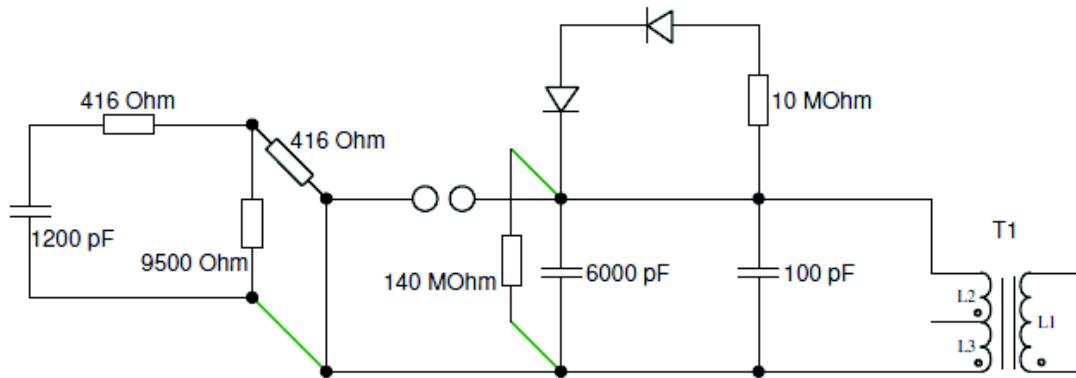
El único análisis que no fue superado fue la prueba dieléctrica al aceite, pues se encontraba en muy mal estado, motivo por el cual fue sustituido por un aceite nuevo, pero antes de cambiarlo el transformador pasó por un mantenimiento en el cual se desarmó su núcleo, se lo limpió, y secó al ambiente, energizándolo por el lado de bajo voltaje para secar todo el aceite que quedó restante en los bobinados.

Todo el procedimiento de pruebas y cambio de aceite se los puede apreciar a detalle en [24].

Una vez realizado el procedimiento para el cambio de aceite dieléctrico y dado el respectivo mantenimiento y limpieza del transformador, el mismo quedó habilitado para poder ser utilizado en el Laboratorio de Alto Voltaje para que pueda ser inyectado un pulso de alto voltaje que simula la inyección de una descarga atmosférica en el transformador.[30]

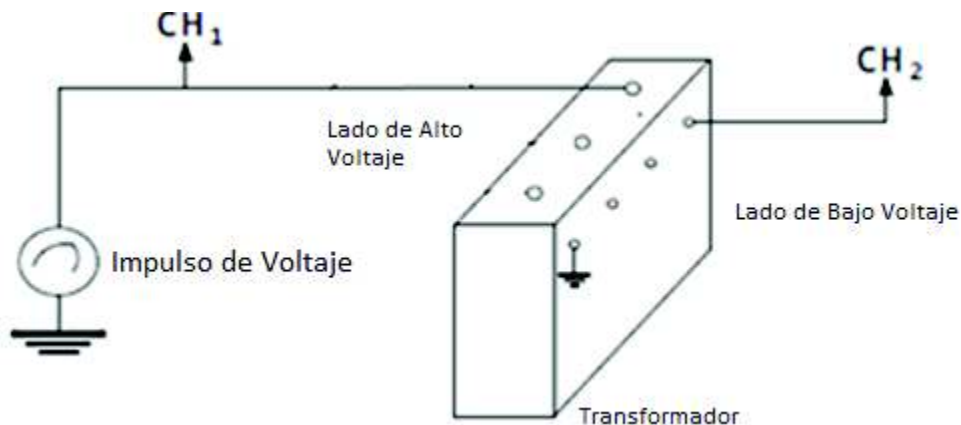
## 2.4 SIMULACIÓN DE DESCARGA ATMOSFÉRICA

El procedimiento para generar el impulso y simular la descarga atmosférica en el Laboratorio de Alto Voltaje fue seguido de acuerdo con la práctica de laboratorio [25] y el detalle del circuito expuesto en el estudio técnico citado en la bibliografía [24], el circuito utilizado para poder generar el mismo es el expuesto en la Figura 2.2:

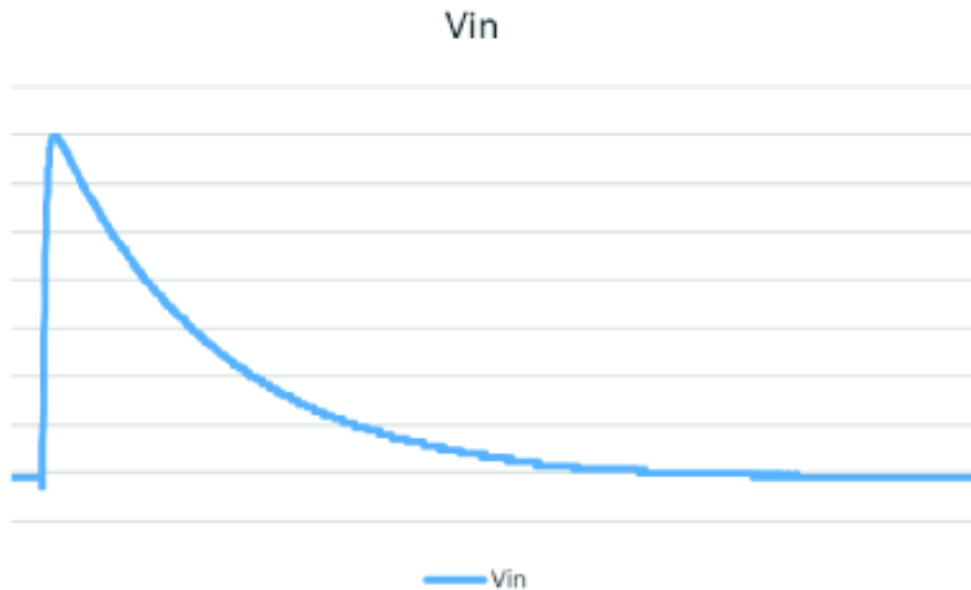


**Figura 2.2.-**Generador de Impulsos de Alto Voltaje Implementado en el Laboratorio de EPN

Como se puede observar en el circuito de la Figura 2.2, se utilizó un generador de impulsos que se basa en esferas espinterométricas las cuales producen ondas de frente corto normalizadas según la IEC 60060-1 que se denomina “High-voltage test techniques” [30], circuito con el cual que se generó ondas como se visualiza en la figura 2.4 las mismas que fueron inyectadas en el transformador y medidas por medio de un osciloscopio digital de acuerdo a la Figura 2.3.



**Figura 2.3.-** Forma de Conexión del Impulso y los canales al osciloscopio.



**Figura 2.4.-** Forma de onda del impulso generado

Una vez comprobado que la simulación y la forma de onda son las correctas como se observa en la Figura 2.4, se procede con la conexión al transformador respetando todas las reglas de seguridad que existen cuando se manipula y trabaja con valores elevados de voltaje, además respetando los niveles de voltaje máximos soportados por el transformador de acuerdo a su Nivel Básico de Aislamiento NBA mejor conocido por sus siglas en inglés BIL y con un porcentaje de protección del 20% para no sobrecargar el transformador del equipo de pruebas, porque en el transcurso de este estudio técnico se realizaron muchas inyecciones de pulso repetitivas con elevados niveles de voltaje.

La adquisición de datos se realizó mediante un osciloscopio digital por medio de dos canales los cuales tomaron las formas de onda de voltajes tanto en el lado de alto voltaje como en el lado de bajo voltaje, estas curvas obtenidas se almacenaron en formato .xlsx para que se las pueda manipular en el software MATLAB-SIMULINK, en este programa se simuló el circuito del modelo utilizado y se aplicaron los valores de las curvas obtenidas.

Para la adquisición de los valores de las curvas de voltaje generadas tanto en el lado de alto voltaje como en el de bajo voltaje, se utilizó divisores capacitivos para reducir el voltaje a valores manipulables por el osciloscopio y de esta forma el dispositivo electrónico no tenga riesgos debido a los altos picos de voltaje, el divisor implementado se lo puede observar en la Figura 2.1 (Pág. 23) [26].

## 2.5 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS FORMA TRADICIONAL

En la Tabla 2.2 y Tabla 2.3 se detallan los datos que se obtuvieron de las pruebas de circuito abierto como las pruebas de cortocircuito respectivamente, que se practicaron al transformador de distribución de 50 kVA según las normas IEEE Std. C57.12.90 [23], los mismos que se utilizaron para calcular los parámetros del transformador en estado estable.

**Tabla 2.2.-** Resultados con pruebas de circuito abierto a Transformador de Distribución

Voltaje de Alimentación BV			Corriente de Magnetización			Potencias en Vacío (20°C)		
X1 - X2	230.60	V	I1	3.45	A.	P	0.10	kW
X2 - X3	230.90	V	I2	2.68	A.	Q	1.10	kVAR
X3 - X1	230.80	V	I3	1.86	A.	S	1.11	kVA
<b>Promedio</b>	230.77	V	<b>Promedio</b>	2.66	A.	<b>Pérdidas</b>	0.10	kW

Los valores de las Tablas 2.2 y 2.3 se utilizaron en el siguiente capítulo de resultados para realizar los cálculos requeridos para estimación de parámetros y cumplir con los objetivos del estudio.

**Tabla 2.3.-** Resultados con pruebas de cortocircuito a Transformador de Distribución

Voltaje de CC (20°C)			Corriente de alto voltaje			Potencias en CC (20°C)		
H1-H2	256.00	V	I1	4.58	A	P	1.140	kW
H2-H3	254.00	V	I2	4.83	A	Q	1.537	kVAR
H3-H1	255.50	V	I3	4.48	A	S	1.913	kVA
<b>Promedio</b>	255.17	V	<b>Promedio</b>	4.63	A	<b>Pérdidas</b>	1.140	kW

Además de los datos obtenidos de las pruebas tradicionales para estimar parámetros también existe la placa del transformador de distribución de 50 kVA, que muestra los valores originales del mismo, valores que se exponen en la siguiente Tabla 2.4 [1].

DATOS DE PLACA	
<b>POTENCIA</b>	50 kVA
<b>CONEXIÓN</b>	Dy5
<b>VOLTAJE PRIMARIO</b>	6000 V
<b>VOLTAJE SECUNDARIO</b>	231.13 V

**Tabla 2.4.-**  
de  
de Distribución

<b><i>CORRIENTE PRIMARIO</i></b>	4.82 A
<b><i>CORRIENTE SECUNDARIO</i></b>	125.2 A
<b><i>FRECUENCIA</i></b>	60 Hz
<b><i>IMPEDANCIA</i></b>	3.95%
<b><i>RELACIÓN TRANSFORMACIÓN</i></b>	26

Datos de placa  
Transformador

Con los datos de las tablas mencionadas, en el siguiente Capítulo 3 de resultados y discusión de los mismos, se procede a calcular los parámetros eléctricos del transformador de distribución de 50 kVA según el modelo T equivalente.

## **2.6 DESARROLLO DE PROGRAMA EN MATLAB-SIMULINK**

Una vez desarrolladas las pruebas tradicionales del transformador con los cuales se pudieron calcular los parámetros eléctricos del mismo y adquiridas las señales de las curvas de los impulsos de voltaje, tanto la señal inyectada en la entrada del lado de alto voltaje y la señal en la salida del transformador de distribución en el lado de bajo voltaje, se procedió con el desarrollo del programa en el entorno de trabajo de MATLAB-SIMULINK, programa que permitió ingresar, editar y manipular los valores de las curvas de voltaje con las diferentes herramientas; así como también ingresar los valores de los parámetros eléctricos calculados manualmente, para con todo esto cumplir con los objetivos del presente estudio técnico.

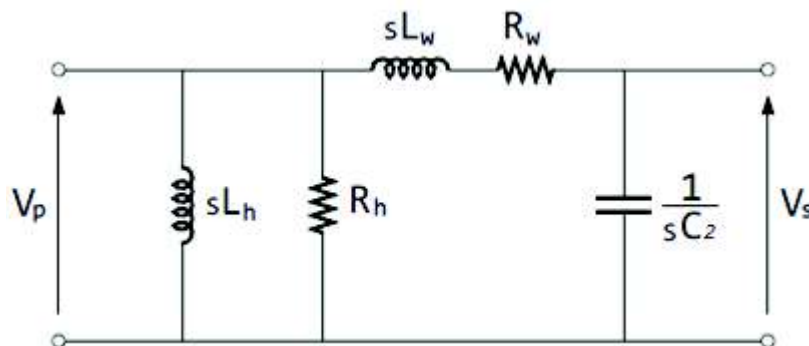
El programa completo se encuentra en el Anexo I, y la forma de implementación y puesta en marcha de éste se siguió según [27].

## **2.7 ESTIMACIÓN DE CAPACITANCIAS**



Para completar con todos los valores de los parámetros eléctricos que requiere el modelo utilizado, que se representa en la Figura 2.1 se debe calcular las capacitancias  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_{12}$ , puesto que estas capacitancias son muy importantes en la representación de un transformador en alta frecuencia, son tan importantes que en uno de los modelos realizados por Moziful [12] para el modelado de transformadores en alta frecuencia, él representa el modelo únicamente con las 3 capacitancias descritas como se observa en la Figura 1.5 (Pág. 11). Se detalla así el modelo debido a que la incidencia del resto de componentes a muy altas frecuencias es muy baja y representa un error mínimo que, para análisis rápidos de transformadores, se puede no tomar en cuenta los valores de los parámetros de inductancias y resistencias de devanados sin inconvenientes y sin causar modificaciones extremas en la curva de salida luego de la función de transferencia.

Moziful en sus modelos también expone representaciones para baja y media frecuencia, modelos que son de ayuda para el cálculo de las capacitancias  $C_2$  y  $C_{12}$ , los cuales son expuestos a continuación en la Figura 2.5 que representa el modelo a baja frecuencia con su función de transferencia representada en la Ecuación 2.1; además está el modelo de media frecuencia representado en la Figura 2.6 y su función de transferencia representado en la Ecuación 2.2 [12]



**Figura 2.5.-** Modelo de Moziful equivalente para el transformador de baja frecuencia

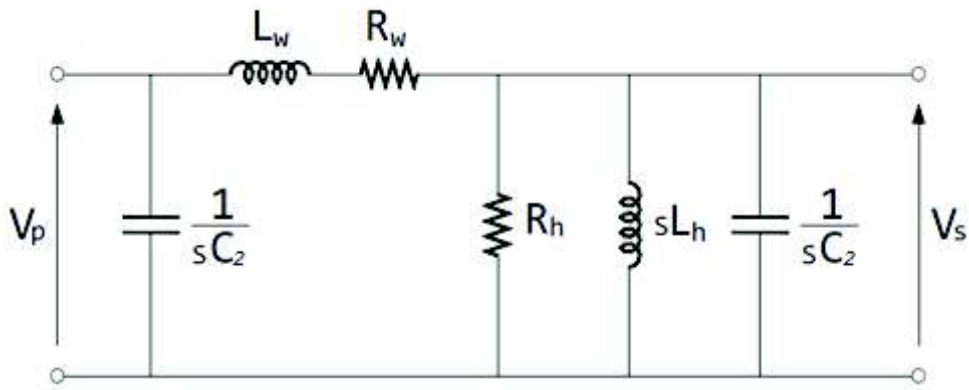
$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{\frac{1}{C_2 L_w}}{s^2 + s \frac{R_w}{L_w} + \frac{1}{C_2 L_w}}$$

**Ecuación 2.1.-** Función de Transferencia para el modelo de Moziful equivalente para el transformador de baja frecuencia [12]

Donde:

$V_s$  Voltaje de secundario o de bajo voltaje.

- $V_p$  Voltaje de primario o de alto voltaje.
- $C_2$  Capacitor entre devanado secundario a tierra.
- $R_w$  Resistencia del devanado.
- $L_w$  Inductancia del devanado.
- $R_h$  Resistencia del núcleo.
- $L_h$  Inductancia del núcleo.



**Figura 2.6.-** Modelo de Moziful equivalente para el transformador de media frecuencia

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{s \frac{1}{C_2 L_w}}{s^3 + s^2 \left( \frac{R_w}{L_w} + \frac{1}{C_2 R_h} \right) + s \left( \frac{1}{C_2 L_w} + \frac{R_w}{C_2 R_h L_w} + \frac{1}{L_h C_2} \right) + \left( \frac{R_w}{C_2 L_w L_h} \right)}$$

**Ecuación 2.2.-** Función de Transferencia para el modelo de Moziful equivalente para el transformador de media frecuencia [12]

Donde:

$V_s$  Voltaje de secundario o de bajo voltaje.

$V_p$  Voltaje de primario o de alto voltaje.

$C_2$  Capacitor entre devanado secundario a tierra.

$R_w$  Resistencia del devanado.

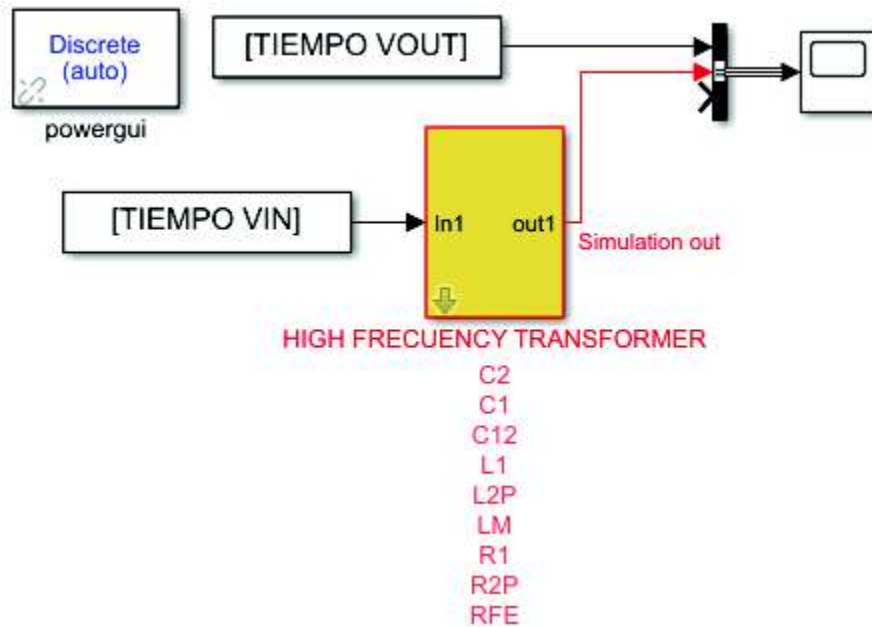
$L_w$  Inductancia del devanado.

$R_h$  Resistencia del núcleo.

$L_h$  Inductancia del núcleo.

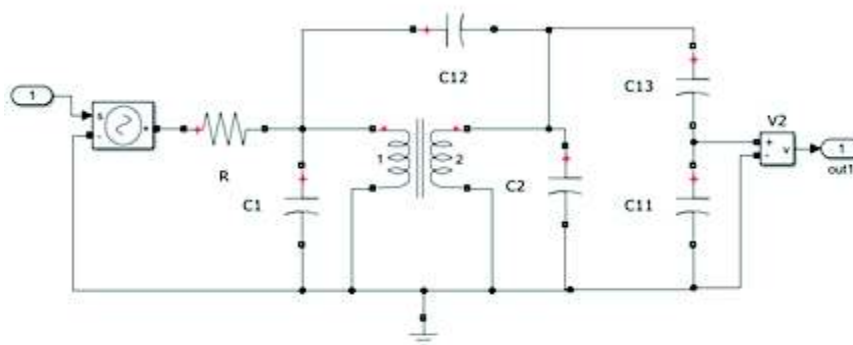
## 2.8 SIMULACIÓN EN MATLAB-SIMULINK

Con todos los datos obtenidos se procedió a simular el modelo en MATLAB-SIMULINK, como se ve la Figura 2.18 en donde se realiza la representación.



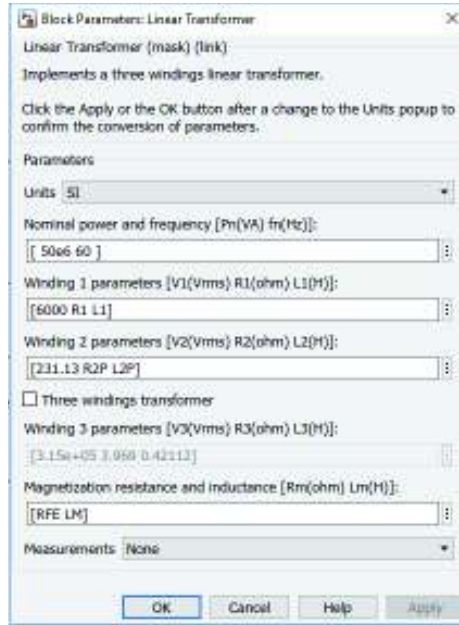
**Figura 2.7.-** Simulación para estimación de Parámetros MATLAB-SIMULINK

Esta simulación como ya fue mencionado sirve para la estimación de parámetros, los mismos que están representados en el modelo mostrado en la Figura 2.8:



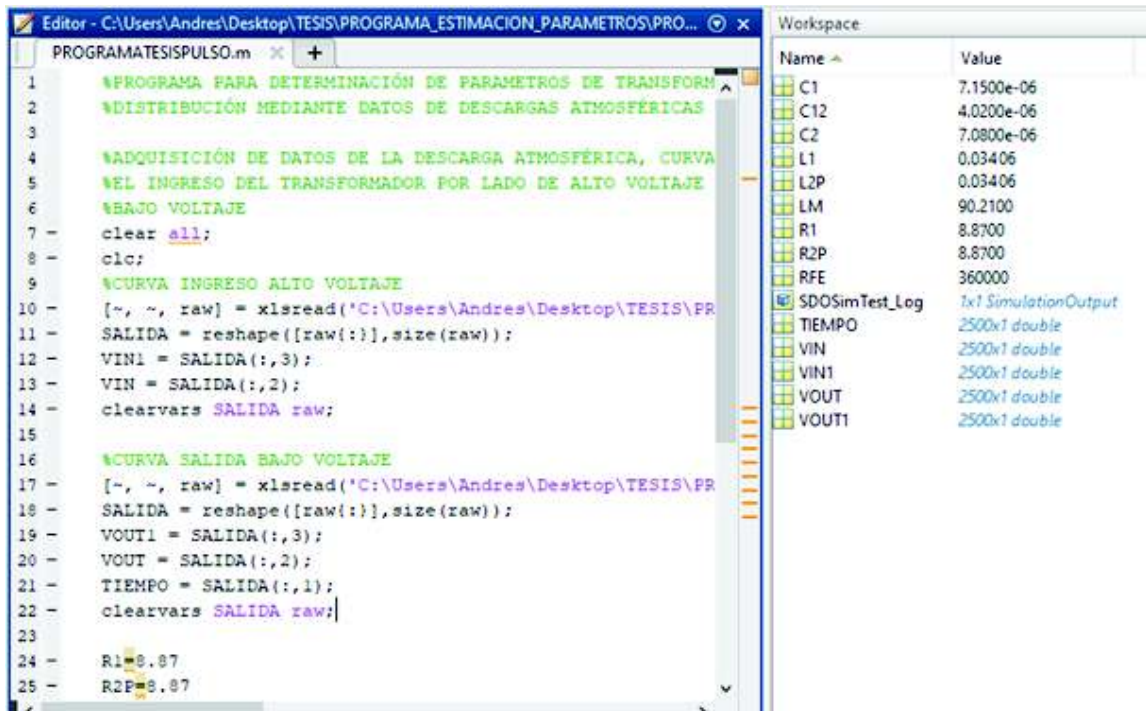
**Figura 2.8.-** Modelo utilizado en la simulación de MATLAB-SIMULINK

El modelo mostrado en la Figura 2.1 es el mismo que el mostrado en la Figura 2.8, únicamente los parámetros eléctricos se los incluye dentro del transformador lineal que tiene en sus librerías MATLAB-SIMULINK. A continuación, se puede observar cómo se ingresan las variables dentro del bloque de parámetros del transformador lineal.



**Figura 2.9.-** Ingreso de Variables en Bloque de Parámetros del Transformador

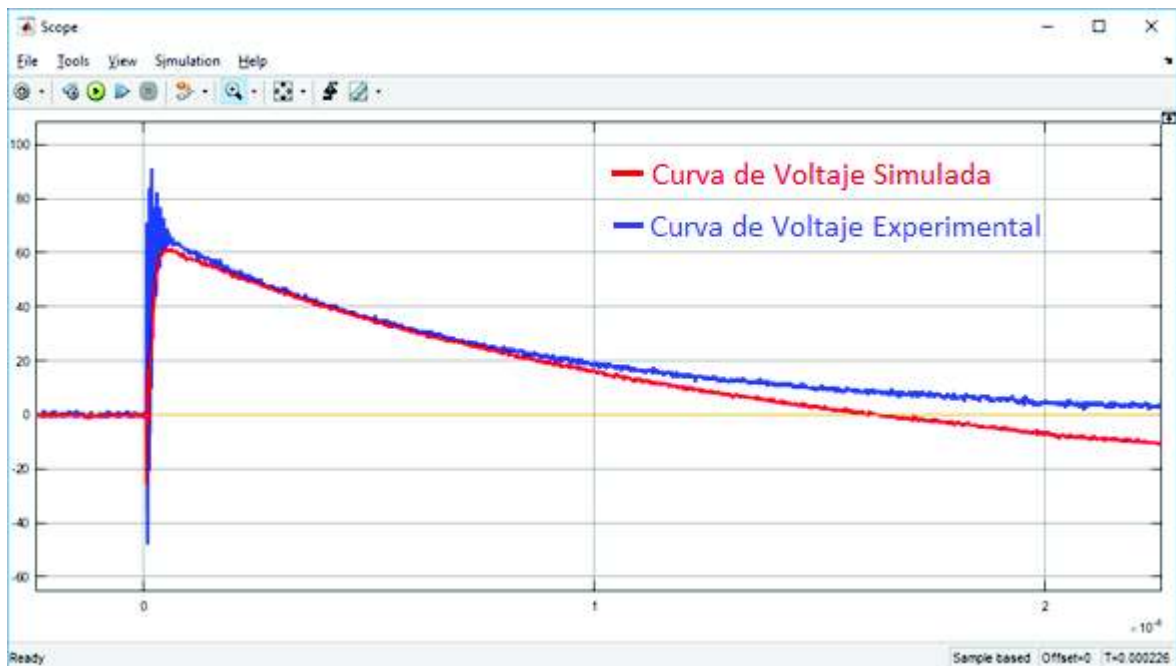
Una vez calculados e ingresados todos los valores de los parámetros para poder realizar la simulación se procedió a correr el programa del Anexo I como se puede observar en la Figura 2.10 en el entorno de MATLAB, para después proceder a correr la simulación en SIMULINK del modelo expuesto en la Figura 2.8, todos los pasos a detalle se encuentran expuestos en el estudio técnico de la referencia [27].



**Figura 2.10.-** Entorno de MATLAB con programa cargado.

Para la simulación realizada se trabajó respetando los valores requeridos en el Bloque de Parámetros del transformador ideal lineal de la librería de MATLAB-SIMULINK representado en la Figura 2.9, y además se utilizó las capacitancias calculadas en la Sección 3.2 para completar todos los valores requeridos en la Figura 2.8.

Después de haber realizado esta primera simulación se obtuvo el resultado expuesto en la Figura 2.11 en la cual se puede ver en color azul la curva obtenida de manera práctica en el laboratorio y con color rojo la curva obtenida de la simulación en MATLAB-SIMULINK, como conclusión de la Figura 2.11 se tiene que las dos curvas son muy similares, lo que indica que los valores iniciales de los parámetros son cercanos a los valores finales luego de la sintonización, esto es positivo puesto que el programa se demoró menos en llegar a la función objetivo y presentar los parámetros estimados..



**Figura 2.11.-** Curvas de Voltaje obtenidas a la salida del transformador (Curva azul-forma experimental vs Curva roja-Simulación)

En la Figura 2.11 la curva obtenida mediante los ensayos de laboratorio vs la curva obtenida en la simulación son muy similares, la diferencia más notoria es en el pico de la cresta en la cual se observa que la curva de color azul que representa a los datos obtenidos de forma práctica en el laboratorio existen muchos picos, lo que se asume se debe al ruido que se genera al transmitir la señal desde el transformador hasta el osciloscopio digital

utilizado, este ruido se genera debido a que la señal es en muy alta frecuencia y elevados voltajes que generan estos picos de ruido.

## **2.9 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS EN MATLAB-SIMULINK**

Lo primero a estimar para obtener mejores resultados y optimizar tiempos de sintonización, son los valores de las capacitancias puesto que estos valores se los obtuvo mediante cálculos gracias a las funciones de transferencia de Moziful [12], son valores que no se los obtuvo de una forma práctica, aspecto opuesto a los parámetros de los devanados y núcleo que se los obtuvo en base a las pruebas de vacío y cortocircuito del transformador [23].

La estimación de parámetros se la realiza mediante la herramienta incluida en MATLAB-SIMULINK, en la cual se seleccionaron las curvas a comparar y los parámetros a estimar, como ya se mencionó en esta primera estimación, la manera de utilizar la herramienta y sus diferentes métodos de estimación se detallan en [27].

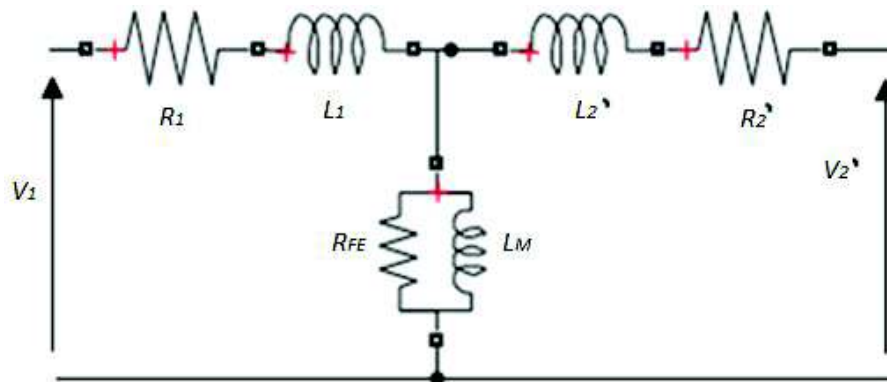
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se obtuvieron los valores requeridos para cumplir con los objetivos del estudio técnico, mismos que fueron analizados y comparados para obtener resultados y sacar conclusiones.

#### 3.1 CÁLCULO DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN BASE A PRUEBAS DE CIRCUITO ABIERTO Y CORTOCIRCUITO

Todas las ecuaciones utilizadas en esta sección 3.1 que sirvieron para calcular los parámetros eléctricos fueron tomadas de [28].

Todos los parámetros fueron calculados referidos al lado primario del transformador, como se detalla a continuación en la Figura 3.1.



**Figura 3.1.-** Representación del modelo equivalente monofásico del transformador.

Para poder obtener los parámetros  $R_{FE}$  y  $L_M$  que son la resistencia e inductancia de magnetización respectivamente se procedió a utilizar los datos de la prueba de vacío expuestos en la Tabla 2.2.

$$P_o = 100 \text{ W}$$

$$V_o = 230.77 \text{ V}$$

$$I_o = 2.66 \text{ A}$$



Se calcula  $R_{FE}$  y  $L_M$  visto desde el secundario puesto que este ensayo, tal y como ya se ha dicho, se realizó midiendo en el lado del secundario del transformador de distribución.

$$R_{FE2} = \frac{\left(\frac{V_0}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{P_0}{3}}$$

$$R_{FE2} = \frac{\left(\frac{230.77 \text{ V}}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{100 \text{ W}}{3}}$$

$$\mathbf{R_{FE2} = 532.55 \Omega}$$

Para calcular la  $R_{FE}$  referida al lado primario lo único que se procedió a realizar la multiplicación del resultado de  $R_{FE2}$  por la relación de transformación (RT) al cuadrado.

$$R_{FE} = R_{FE2} \times RT^2$$

$$R_{FE} = 532.55 \Omega \times 26^2$$

$$\mathbf{R_{FE} = 360 \text{ k}\Omega}$$

A continuación, se procedió con el cálculo de  $L_M$  donde primero se encuentra el valor de  $X_{M2}$

$$X_{M2} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{I_0}{\frac{V_0}{\sqrt{3}}}\right)^2 - \left(\frac{1}{R_{FE2}}\right)^2}}$$

$$X_{M2} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2.66 \text{ A}}{\frac{230.77 \text{ V}}{\sqrt{3}}}\right)^2 - \left(\frac{1}{532.55 \Omega}\right)^2}}$$

$$\mathbf{X_{M2} = 50.31 \Omega}$$

Para calcular la  $X_M$  referida al lado primario lo único que se procedió a realizar es multiplicar el resultado de  $X_{M2}$  por la relación de transformación al cuadrado

$$X_M = X_{M2} \times RT^2$$

$$X_M = 50.31 \Omega \times 26^2$$

$$X_M = 34 \text{ k}\Omega$$

Con el valor de  $X_M$  referida al lado primario ya se pudo encontrar el valor de  $L_M$ .

$$L_M = \frac{X_M}{2\pi f}$$

$$L_M = \frac{34 \text{ k}\Omega}{2\pi \times 60 \text{ Hz}}$$

$$L_M = 90.21 \text{ H}$$

Una vez obtenidos los parámetros de magnetización se procede a calcular los valores de los parámetros de los devanados  $R_1$ ,  $L_1$ ,  $R_2$  y  $L_2$  con la ayuda de los resultados de la prueba de cortocircuito expuestos en la Tabla 2.3 que se la realizó en el lado de alto voltaje.

$$P_{cc} = 1140 \text{ W}$$

$$V_{cc} = 250.17 \text{ V}$$

$$I_{cc} = 4.63 \text{ A}$$

Con los datos expuestos se procedió a calcular la resistencia y la reactancia de dispersión  $R_{cc}$  y  $X_{cc}$  respectivamente.

$$R_{cc} = \frac{\frac{P_{cc}}{3}}{I_{cc}^2}$$

$$R_{cc} = \frac{\frac{1140 \text{ w}}{3}}{(4.63 \text{ A})^2}$$

$$R_{cc} = 17.73 \Omega$$

$$X_{cc} = \sqrt{\left(\frac{V_{cc}}{\frac{\sqrt{3}}{I_{cc}}}\right)^2 - R_{cc}^2}$$

$$X_{cc} = \sqrt{\left(\frac{250.17 \text{ V}}{\frac{\sqrt{3}}{4.63 \text{ A}}}\right)^2 - (17.73 \Omega)^2}$$

$$\mathbf{X_{cc} = 25.67 \Omega}$$

Con los valores obtenidos se procedió a calcular  $R_1$ ,  $R_2'$ ,  $R_2$  y  $X_1$ ,  $X_2'$ ,  $X_2$ . Para lo cual se hizo una aproximación y se consideró que la reactancia de dispersión de cada devanado tanto en el primario como secundario es proporcional al valor del número de espiras elevado al cuadrado y la segunda condición es que en el diseño de transformadores se suele hacer que las pérdidas tanto en el primario como en el lado secundario sean iguales. Con estas dos afirmaciones se tiene que  $R_1 = RT^2 \times R_2$  y que  $X_1 = RT^2 \times X_2$  con lo que:

$$R_1 = \frac{R_{cc}}{2}$$

$$\mathbf{R_1 = 8.87 \Omega}$$

$$\mathbf{R_2' = 8.87 \Omega}$$

$$R_2 = \frac{\frac{R_{cc}}{2}}{RT^2}$$

$$\mathbf{R_2 = 13.11 \text{ m}\Omega}$$

$$X_1 = \frac{X_{cc}}{2}$$

$$X_1 = 12.84 \Omega$$

$$\mathbf{X_2' = 12.84 \Omega}$$

$$X_2 = \frac{\frac{X_{cc}}{2}}{RT^2}$$

$$\mathbf{X_2 = 18.99 \text{ m}\Omega}$$

Una vez obtenidos  $X_1$  y  $X_2$  se pudo calcular los valores de las inductancias  $L_1$ ,  $L_2'$  y  $L_2$  para con esto completar los parámetros eléctricos del circuito equivalente T del transformador de distribución de 50 kVA de la Figura 3.1.

$$L_1 = \frac{X_1}{2\pi f}$$

$$L_1 = \frac{12.84 \Omega}{2\pi \times 60 \text{ Hz}}$$

$$L_1 = 34.06 \text{ mH}$$

$$L_2' = 34.06 \text{ mH}$$

$$L_2 = \frac{X_2}{2\pi f}$$

$$L_2 = \frac{18.99 \text{ m}\Omega}{2\pi \times 60 \text{ Hz}}$$

$$L_2 = 50.38 \text{ }\mu\text{H}$$

Todos los parámetros calculados sirvieron de base para tener como referencia y compararlos con los parámetros que se estimaron al final del estudio técnico y como valores iniciales en la sintonización de parámetros con los diferentes métodos utilizados de MATLAB-SIMULINK, en el marco teórico se explica que mientras los valores iniciales se acerquen más a los valores reales, el tiempo que toma la estimación de los mismos será mucho menor y más efectiva.

En la Tabla 3.1 se pueden apreciar los valores de los parámetros calculados de la forma tradicional y que sirvieron de base para iniciar la estimación y poder comparar con los resultados finales.

**Tabla 3.1.-** Parámetros calculados en la sección 3.1

$R_1$	<b>8.87 <math>\Omega</math></b>
$R_{2P}$	<b>8.87 <math>\Omega</math></b>
$R_2$	<b>13.11 m<math>\Omega</math></b>
$R_{FE}$	<b>360 k<math>\Omega</math></b>
$L_1$	<b>34.06 mH</b>
$L_{2P}$	<b>34.06 mH</b>
$L_2$	<b>50.38 <math>\mu</math>H</b>
$L_M$	<b>90.21 H</b>
$R_{2P}$ , $L_{2P}$ son parámetros referidos al lado primario	

### 3.2 CÁLCULO DE CAPACITANCIAS

Con la ayuda de la herramienta Ident del software MATLAB-SIMULINK se procedió a identificar la función de transferencia para las curvas de entrada y salida obtenidas en el laboratorio, las mismas que luego de ser procesadas y analizadas en la herramienta del programa se obtuvo los siguientes resultados que pueden ser apreciados en la Figura 3.3, además en la Figura 3.2 se puede visualizar el entorno de trabajo de la herramienta Ident del software MATLAB-SIMULINK en donde se pudo procesar las señales de las curvas de la simulación de las descargas atmosféricas para poder obtener las funciones de transferencia que sirvieron para el cálculo de las capacitancias del modelo de alta frecuencia planteado en este estudio técnico.

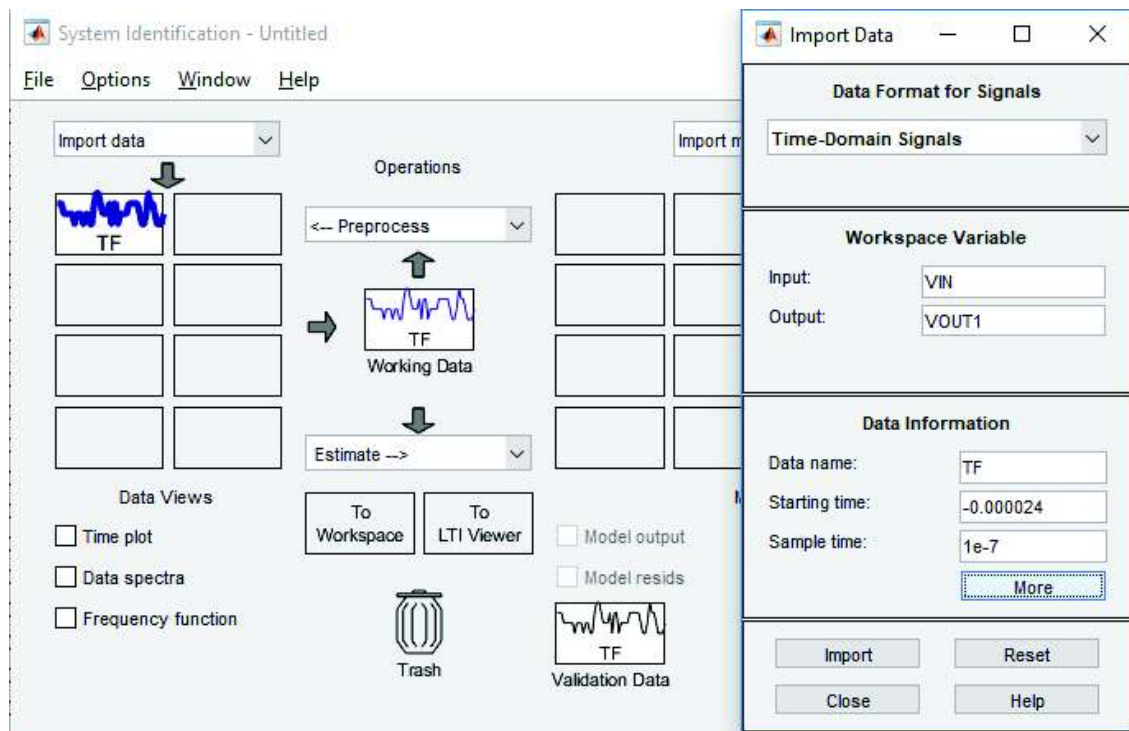
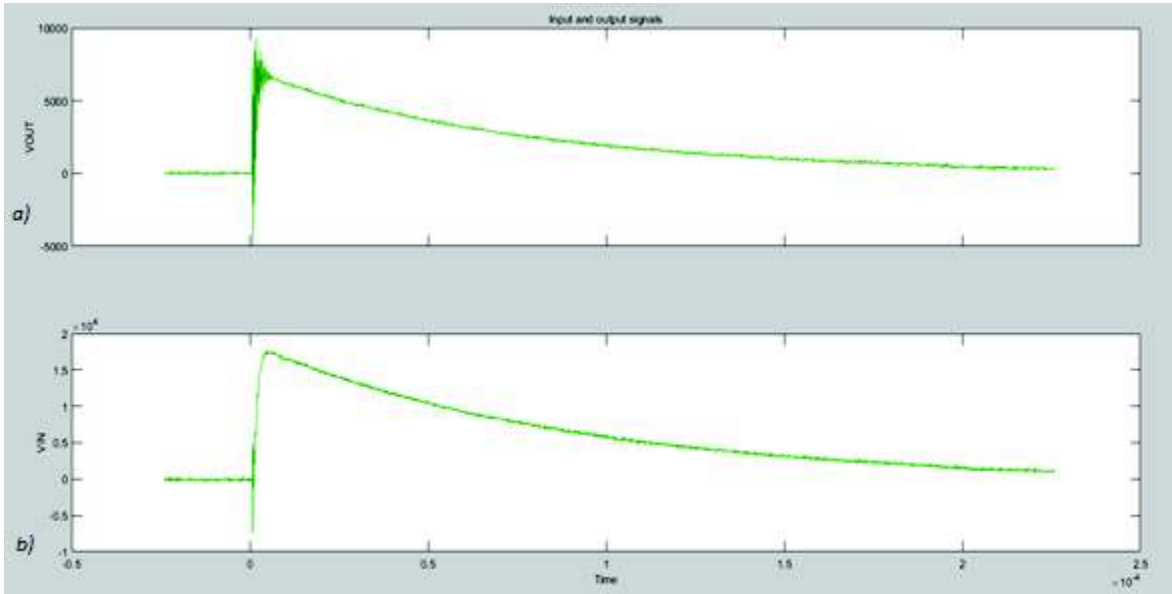


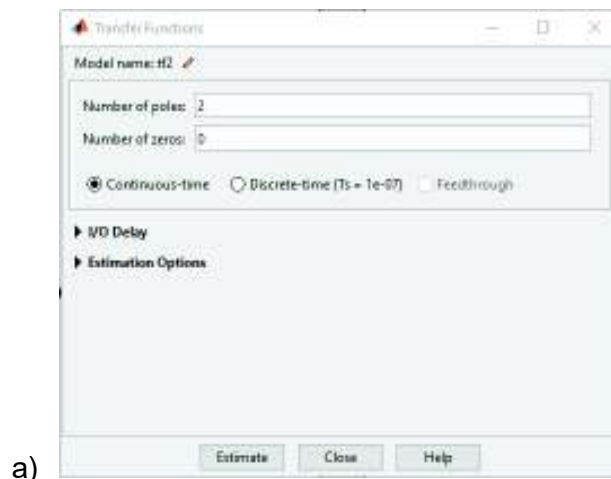
Figura 3.2.- Interfaz de herramienta Ident.

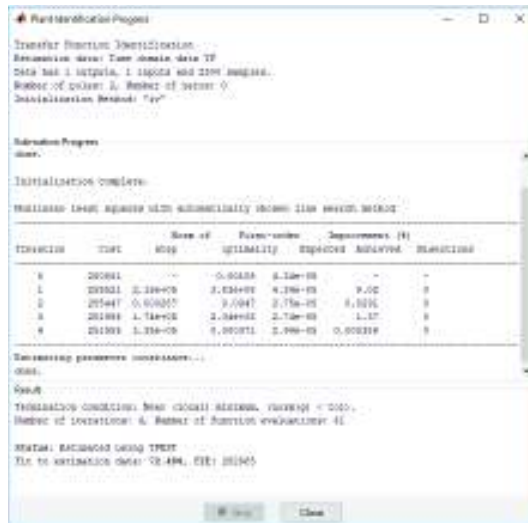


**Figura 3.3.-** Curvas de Voltaje ingresadas en Ident: a) Curva de Salida en lado secundario de bajo voltaje. b) Curva de entrada en el lado del primario del alto voltaje

Una vez ingresados los valores de las curvas se procedió a identificar la función de transferencia aproximada de acuerdo a los requerimientos de las funciones de transferencia para el modelo de media frecuencia y función de transferencia para el modelo de baja frecuencia expuesto en las ecuaciones 2.1 y 2.2 respectivamente.

Primero se analizó para el modelo de baja frecuencia, modelo del cual se pudieron obtener datos para proceder a encontrar el objetivo, reemplazando estos datos en la segunda función a analizar, el cual es el modelo de media frecuencia. En la Figura 3.4 a) se puede visualizar la interfaz para obtener la función de transferencia requerida y en la Figura 3.4 b) el programa calculando, mientras estimaba la función de transferencia para baja frecuencia.



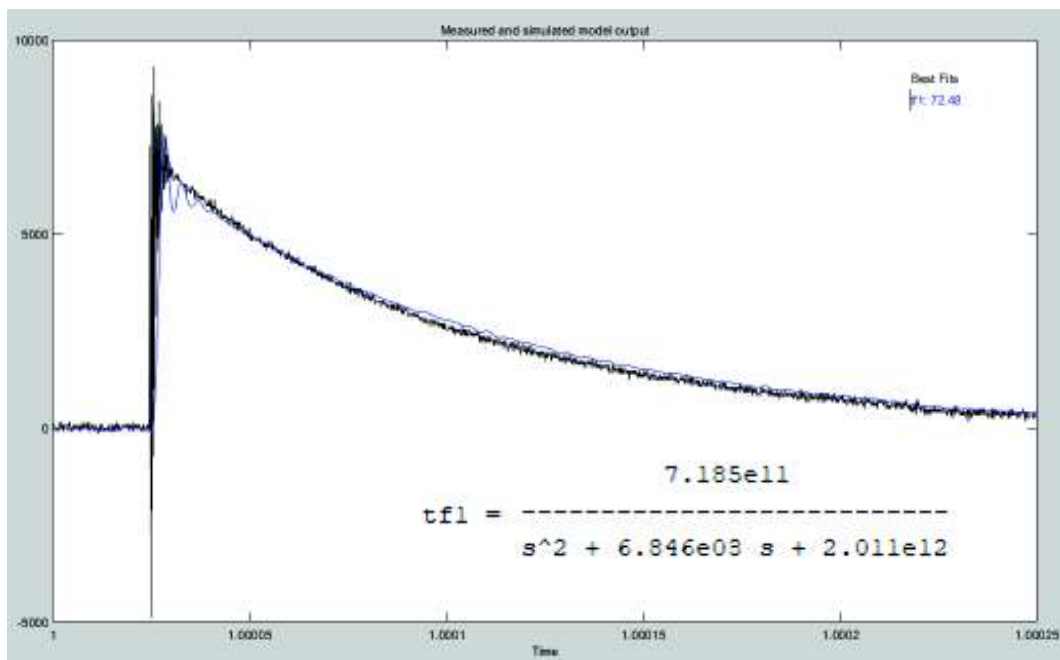


b)

**Figura 3.4.-** Herramienta Ident MATLAB-SIMULINK:

a) Interfaz para cálculo de función de transferencia.

b) Calculando la función de transferencia.

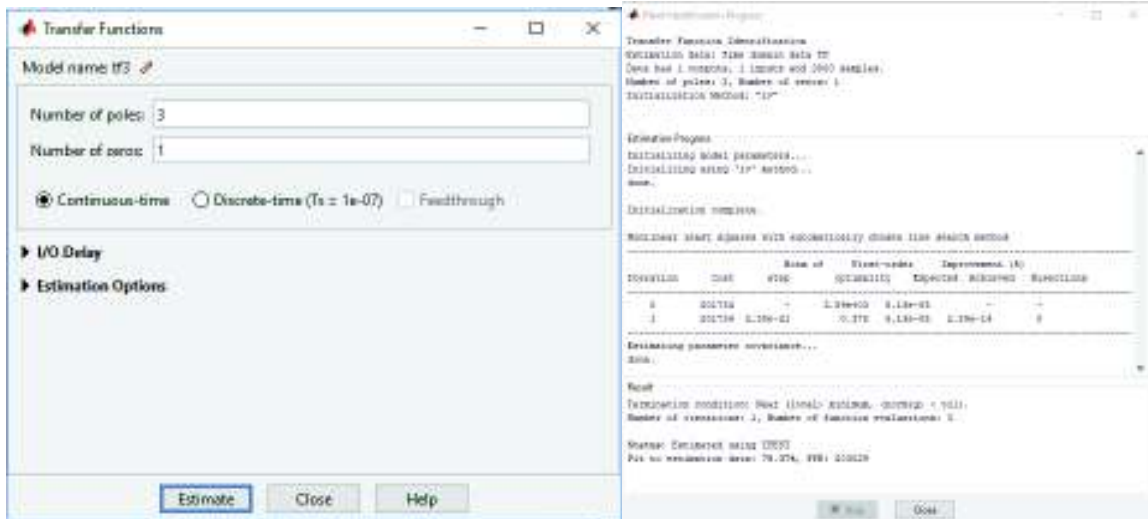


**Figura 3.5.-** Función de Transferencia resultante para cálculo capacitancias.

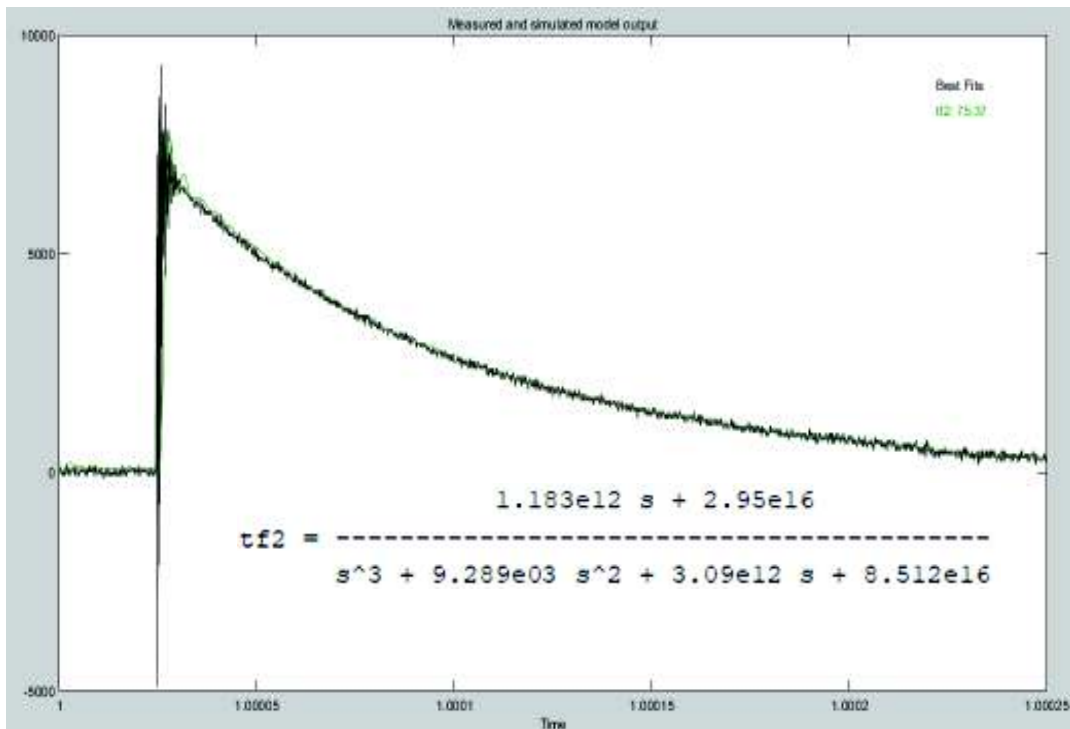
Igualando uno de los términos de la Ecuación 2.1 de baja frecuencia de Moziful con la función de transferencia tf1 obtenida en el primer análisis de la herramienta Ident de MATLAB-SIMULINK se obtuvo la siguiente igualdad:

$$\frac{R_w}{L_w} = 6.846 e3$$

Una vez encontrada la función de transferencia para el modelo de baja frecuencia como se puede apreciar en la Figura 3.5 se procedió con la Ecuación 2.2 de la función de transferencia del modelo de media frecuencia y se sigue el mismo procedimiento como se ve en la Figura 3.6.



**Figura 3.6.-** Interfaz para cálculo de función de transferencia 2 en Ident MATLAB-SIMULINK



**Figura 3.7.-** Función de Transferencia 2 resultante para calculo capacitancias



La igualdad encontrada a partir de la función de transferencia de baja frecuencia se reemplaza en la identidad obtenida a partir de la función de transferencia de media frecuencia de Moziful que se expone a continuación:

$$\frac{R_w}{L_w} + \frac{1}{C_2 R h'} = 9.289 e3$$

$$\frac{1}{C_2 R h'} = 9.289 e3 - 6.846 e3$$

$$C_2 = \frac{1}{2443 \times R h'}$$

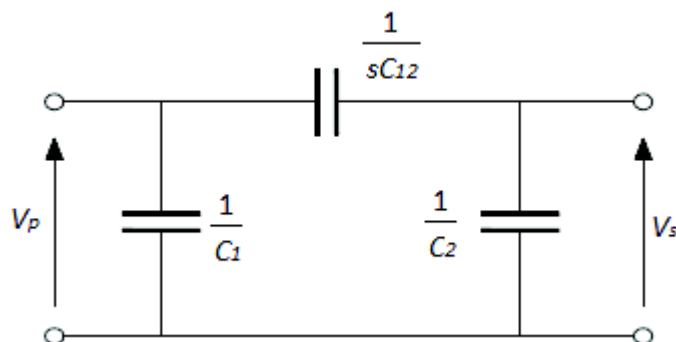
Donde  $R h'$  es la resistencia del núcleo que se calculó con la prueba de vacío, este valor es referido al lado secundario por lo que se procedió a reemplazar  $R h'$  con  $R_{FE2}$ .

$$C_2 = \frac{1}{2443 \times 532.55}$$

$$C_2 = \frac{1}{2443 \times 532.55}$$

$$C_2 = 0.769 \mu F$$

Una vez obtenido el resultado de la capacitancia  $C_2$  se procedió a calcular el valor de la capacitancia  $C_{12}$  con la ayuda del modelo de Moziful para alta frecuencia el cual es mostrado a continuación en la Figura 3.8.



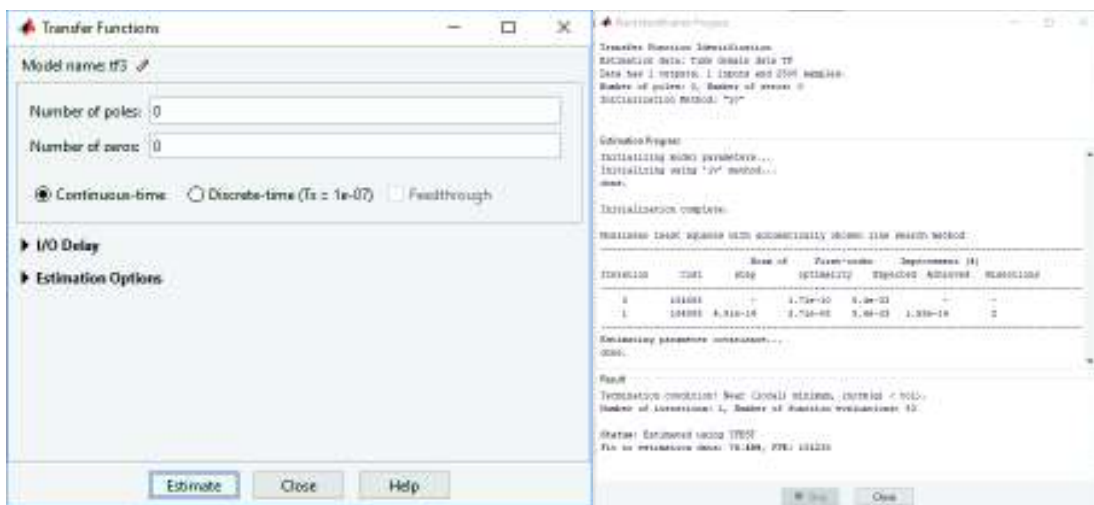
**Figura 3.8.-** Modelo equivalente del transformador de alta frecuencia de Moziful [12].

La función de transferencia se expresa como:

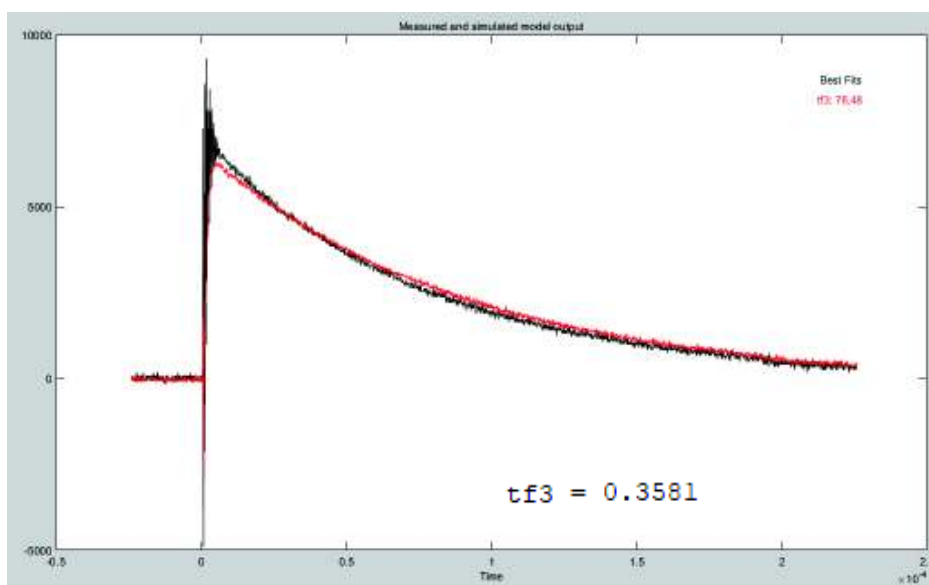
$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{C_{12}}{C_2 + C_{12}}$$

**Ecuación 3.1.-** Función de transferencia del modelo de alta frecuencia Moziful [12].

Para poder obtener el resultado de la función de transferencia nuevamente con la ayuda de la herramienta Ident de MATLAB-SIMULINK se obtuvo el valor deseado, de forma similar a lo ya calculado para los modelos de baja y media frecuencia, para alta frecuencia en la Figura 3.9 se tienen los cálculos y en la Figura 3.10 está la función de transferencia.



**Figura 3.9.-** Interfaz para cálculo de función de transferencia 3 en Ident MATLAB-SIMULINK



**Figura 3.10.-** Función de Transferencia 3 resultante para cálculo capacitancias

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{C_{12}}{C_2 + C_{12}}$$

$$0.3581 = \frac{C_{12}}{0.769 \mu F + C_{12}}$$

$$0.2754 \mu F + 0.3581 C_{12} = C_{12}$$

$$0.2754 \mu F = 0.6419 C_{12}$$

$$C_{12} = 0.429 \mu F$$

Una vez obtenidos los datos de las capacitores  $C_{12}$  y  $C_2$  el capacitor  $C_1$  se asume es similar al capacitor  $C_2$  según lo establecido en [29]

### 3.3 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS CON HERRAMIENTA DE MATLAB-SIMULINK

En la Figura 3.11 se expone la herramienta ajustando las curvas simuladas y adquiridas en el laboratorio únicamente sintonizando los valores de capacitancias, una vez realizada esta primera estimación se procedió a realizar otra estimación con todos los parámetros para ajustar la curva definitivamente.

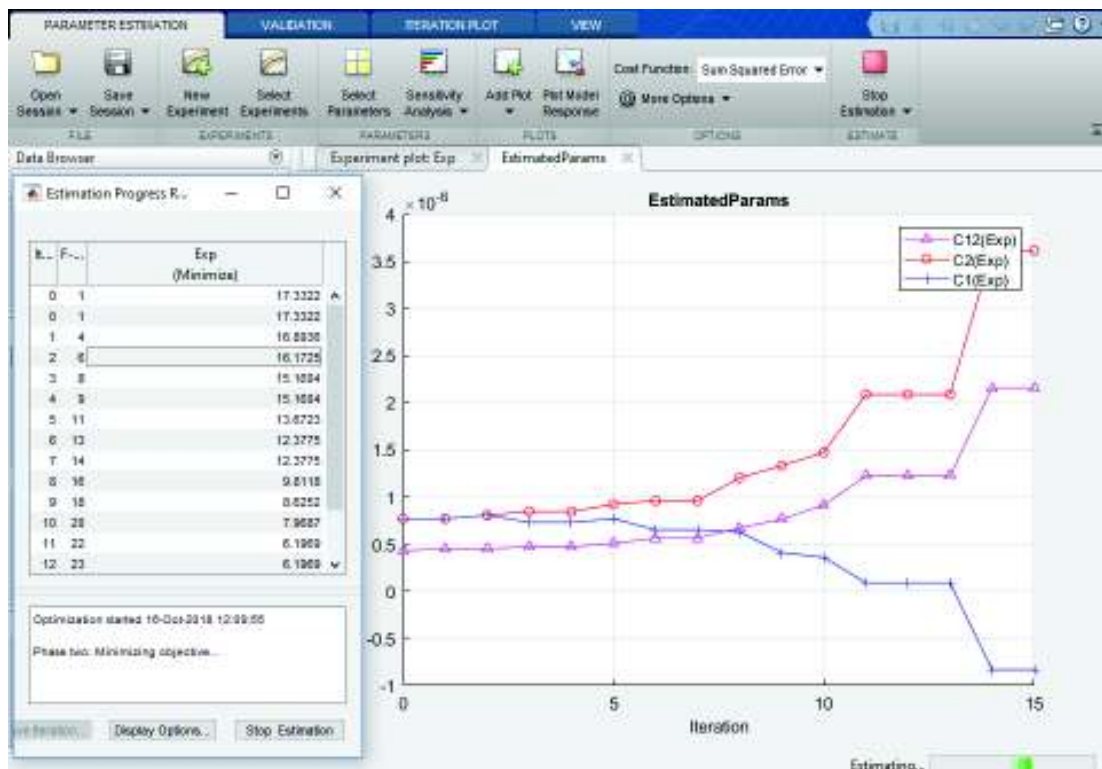


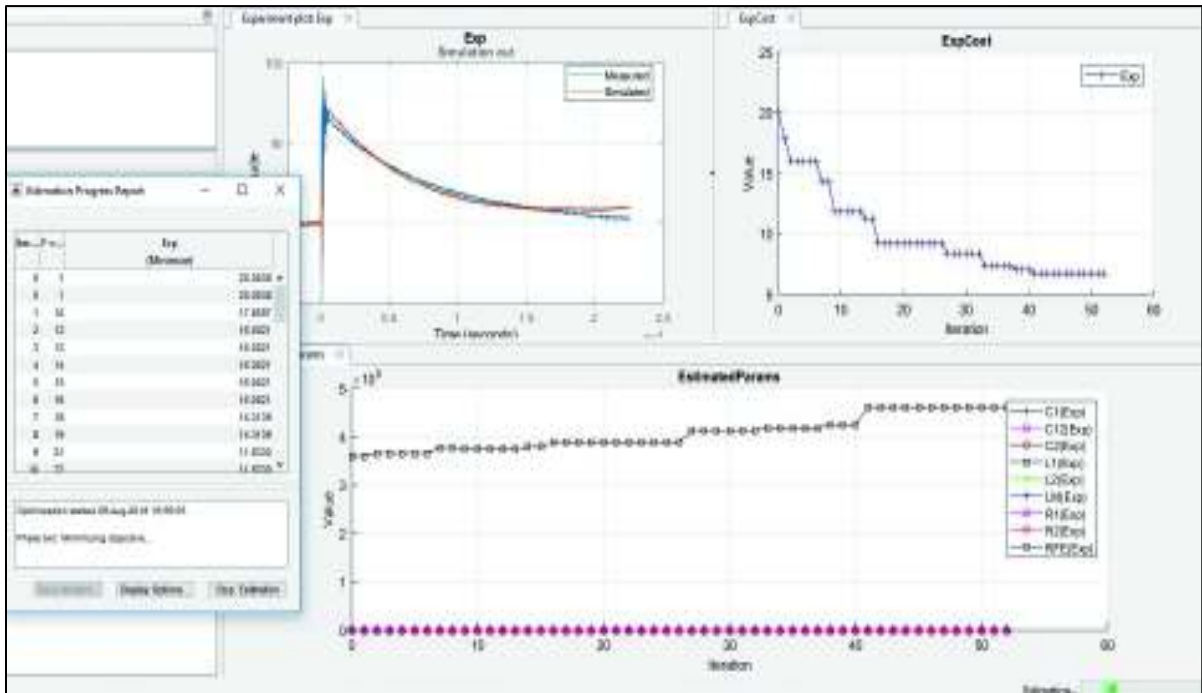
Figura 3.11.- Ventana Estimator Parámetros MATLAB-SIMULINK

Los resultados de las capacitancias que estimó la herramienta de MATLAB-SIMULINK se exponen en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.-** Capacitancias calculadas por Estimador de Parámetros

CAPACITANCIAS	ESTIMADA
$C_1$	7.15 $\mu F$
$C_2$	7.08 $\mu F$
$C_{12}$	4.02 $\mu F$

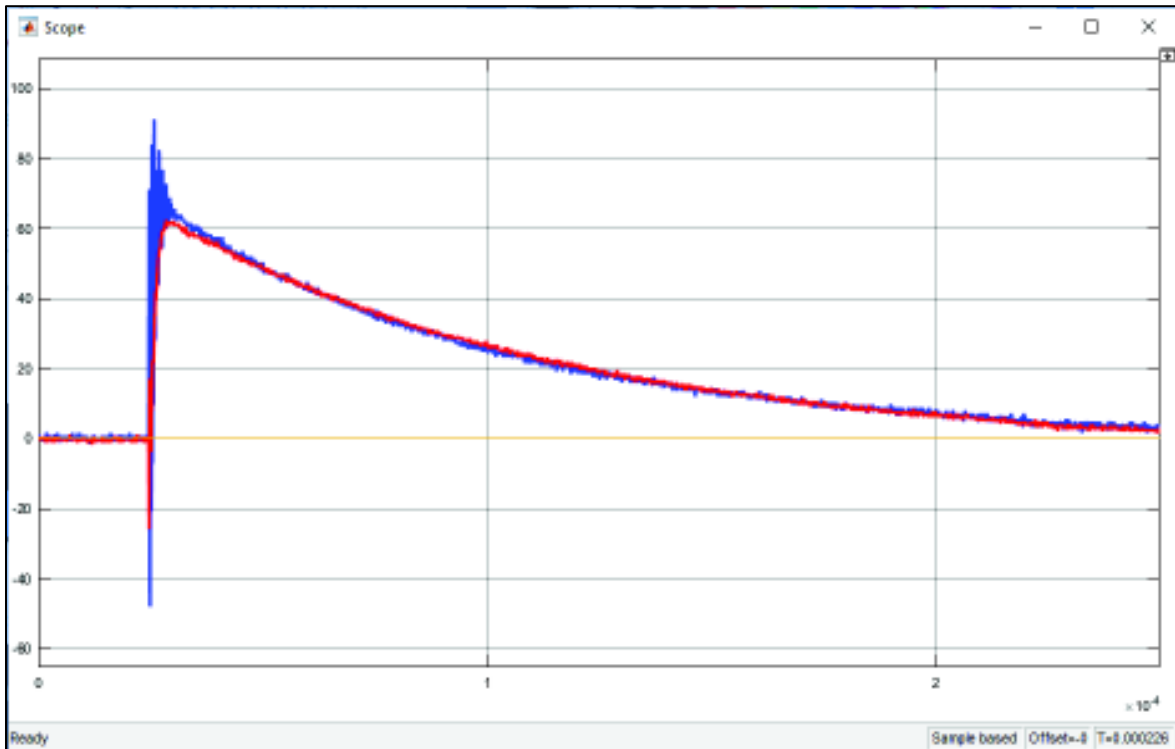
Con los datos de las capacitancias estimadas por MATLAB-SIMULINK se procedió a realizar una nueva estimación, la cual calculó a todos los parámetros del transformador de distribución de 50 kVA como se puede observar en la Figura 3.12.



**Figura 3.12 .-** Estimación parámetros eléctricos transformador 50kVA

Una vez que se obtuvieron los resultados finales de la estimación se los comparó con los valores iniciales para ver qué tan cercanos quedaron los valores de la simulación a los valores calculados con las pruebas tradicionales de cortocircuito y circuito abierto al transformador, esta comparación se detalla en la siguiente sección 3.4 del presente estudio técnico. En la Figura 3.13 se ve el resultado final de la estimación realizada.

La estimación de parámetros se realizó con todos los métodos de optimización expuestos en el marco teórico sección 1.3.3 los cuales se compararán en la siguiente sección 3.4 del presente estudio técnico. La Figura 3.13 expuesta es realizada con el método Simplex Search que fue el primero en ser analizado, las diferentes curvas obtenidas fueron muy similares con todos los métodos estudiados, las diferencias que se pueden encontrar radican en los porcentajes de las tablas expuestas en la siguiente sección del presente capítulo.



**Figura 3.13.-** Curvas resultantes luego de la estimación de parámetros

### 3.4 RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Una vez analizados los resultados se puede observar que las diferencias entre los parámetros estimados y los parámetros referenciales están alrededor del 20% en sus valores más elevados, un indicador positivo y se puede asumir que se encuentran dentro de valores aceptables al tratarse de valores muy pequeños y que en alta frecuencia varios estudios del IEEE los desprecian para cálculos, y también al tratarse de un transformador que tiene una vida útil de 50 años; hecho que permite concluir que existe un deterioro considerable no únicamente en parámetros eléctricos sino también en aislamientos de este transformador.

El presente estudio técnico analizó varios casos, en la Tabla 3.3 se exponen cada uno de los casos analizados en los cuales se puede observar los tres niveles de voltaje que se ensayó (17kV, 40kV, 48kV), inyectados a las fases de alto voltaje del transformador representado con el símbolo H en la Tabla 3.3 y medidos en las diferentes fases de bajo voltaje, representado con los símbolos X1, X2 Y X3.

**Tabla 3.3.-** Tabla de ensayos a realizar al transformador distribución 50 kVA.

	Niveles de Voltaje		
	17kV	40 kV	48 kV
X1	H-X1-17kV	H-X1-40kV	H-X1-48kV
X2	H-X2-17kV	H-X2-40kV	H-X2-48kV
X3	H-X3-17kV	H-X3-40kV	H-X3-48kV
H – Curva de voltaje en lado de alto voltaje Xx – Curva de voltaje en lado de bajo voltaje Xx kV – Nivel de voltaje inyectado en lado de alto voltaje			

A continuación, se observan los valores obtenidos de la simulación de las curvas de voltaje y mediante la herramienta de estimación de parámetros de MATLAB-SIMULINK vs los valores iniciales de los parámetros obtenidos del transformador por medio de las pruebas realizadas al mismo, valores que son presentados en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4.-** Tabla comparativa de resultado del primer caso realizado. Método Simplex Search a 17kV.

PARÁMETROS	CALCULADOS	ESTIMADOS MATLAB-SIMULINK	% DIFERENCIA
$R_1$	8.87 $\Omega$	10.57 $\Omega$	16.08 %
$R_{2P}$	8.87 $\Omega$	11.02 $\Omega$	19.51 %
$R_{FE}$	360 k $\Omega$	452 k $\Omega$	20.35 %
$L_1$	34.06 mH	30.45 mH	11.86 %
$L_{2P}$	34.06 mH	41.23 mH	17.39 %
$L_M$	90.21 H	98.21 H	8.15 %
$C_1$	7.15 $\mu F$	8.15 $\mu F$	12.27 %
$C_2$	7.08 $\mu F$	7.58 $\mu F$	6.60 %
$C_{12}$	4.02 $\mu F$	4.17 $\mu F$	3.60 %

El mayor nivel de voltaje utilizado para las pruebas de 48kV fue con un margen de seguridad del 20% del valor del BIL que para este transformador es de 60kV, puesto que es un transformador que pasó mucho tiempo abandonado en la intemperie; por este motivo, el aislamiento de éste puede estar deteriorado y con los ensayos puede verse más afectado. El nivel del BIL se lo puede comprobar en [30].

Todos los casos expuestos en la Tabla 3.3 se los realizaron en el laboratorio con el circuito de la Figura 1.7 a) a los diferentes niveles de voltaje y en las distintas fases del transformador en el lado del secundario, una vez adquiridos los datos de las curvas de voltaje de todos los casos analizados también se las ingresó en el software MATLAB-SIMULINK para realizar una comparación de todos los casos y ver si el modelo planteado es factible para cualquier caso que se presente y no únicamente para casos específicos.

A continuación, se exponen los resultados de los diferentes casos de voltaje realizados con el primer método de estimación de parámetros Simplex Search en tablas comparativas generales, el resto de las tablas y comparaciones se las puede encontrar en el Anexo II de este estudio técnico.

Las tablas presentadas del primer caso son las siguientes:

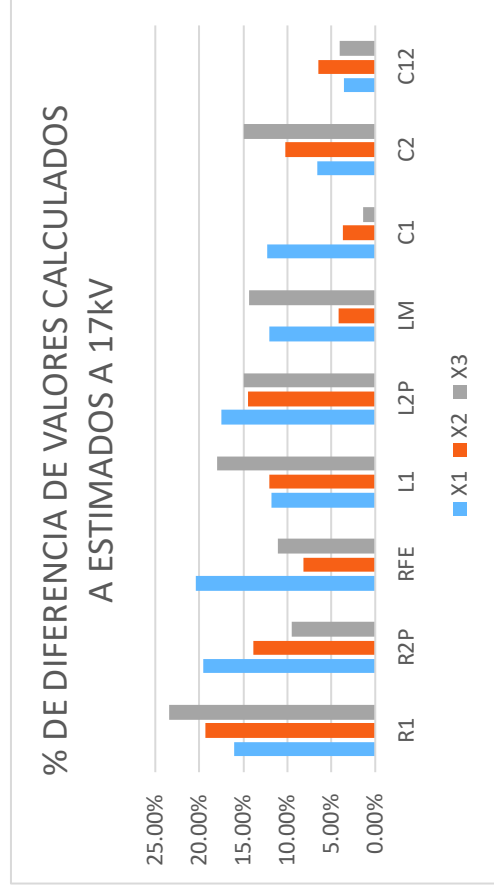
- Tabla 3.5.- Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 17kV con método Simplex Search
- Tabla 3.6.- Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 40kV con método Simplex Search
- Tabla 3.7.- Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 48kV con método Simplex Search
- Tabla 3 8.- Tabla de Parámetros Eléctricos estimados método Simplex Search

Junto con cada una de las tablas se expone un gráfico de resumen con los porcentajes de variación entre los valores de los parámetros calculados de la forma tradicional Vs los parámetros eléctricos calculados con el método de estimación de MATLAB-SIMULINK – MATLAB-SIMULINK.

- Figura 3.14.- Parámetros Eléctricos estimados a 17kV con método Simplex Search
- Figura 3.15.- Parámetros Eléctricos estimados a 40kV con método Simplex Search
- Figura 3.16.- Parámetros Eléctricos estimados a 48kV con método Simplex Search
- Figura 3.17.- Parámetros Eléctricos estimados método Simplex Search

**Tabla 3.3.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 17kV con método Simplex Search

17kV Simplex Search												
PARÁMETROS CALCULADOS		H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO	
		ESTIMADOS	% DIFERENCIA	ESTIMADOS	% DIFERENCIA	ESTIMADOS	% DIFERENCIA	ESTIMADOS	% DIFERENCIA	ESTIMADOS	% DIFERENCIA	
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	10.57 Ω	16.08%	10.99 Ω	19.29%	11.58 Ω	23.40%	11.05 Ω	19.70%			
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	11.02 Ω	19.51%	10.30 Ω	13.88%	9.80 Ω	9.49%	10.37 Ω	14.49%			
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	452 kΩ	20.35%	392 kΩ	8.16%	324 kΩ	11.11%	389 kΩ	7.53%			
L <sub>1</sub>	34.06 mH	30.45 mH	11.86%	38.70 mH	11.99%	41.50 mH	17.93%	36.88 mH	7.65%			
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	41.30 mH	17.53%	39.80 mH	14.42%	40.05 mH	14.96%	40.38 mH	15.66%			
L <sub>M</sub>	90.21 H	102.50 H	11.99%	94.10 H	4.13%	105.30 H	14.33%	100.63 H	10.36%			
C <sub>1</sub>	7.15 uF	8.15 uF	12.27%	6.90 uF	3.62%	7.25 uF	1.38%	7.43 uF	3.81%			
C <sub>2</sub>	7.08 uF	7.58 uF	6.60%	7.89 uF	10.27%	8.32 uF	14.90%	7.93 uF	10.72%			
C <sub>12</sub>	4.02 uF	4.17 uF	3.60%	4.30 uF	6.51%	4.19 uF	4.06%	4.22 uF	4.74%			

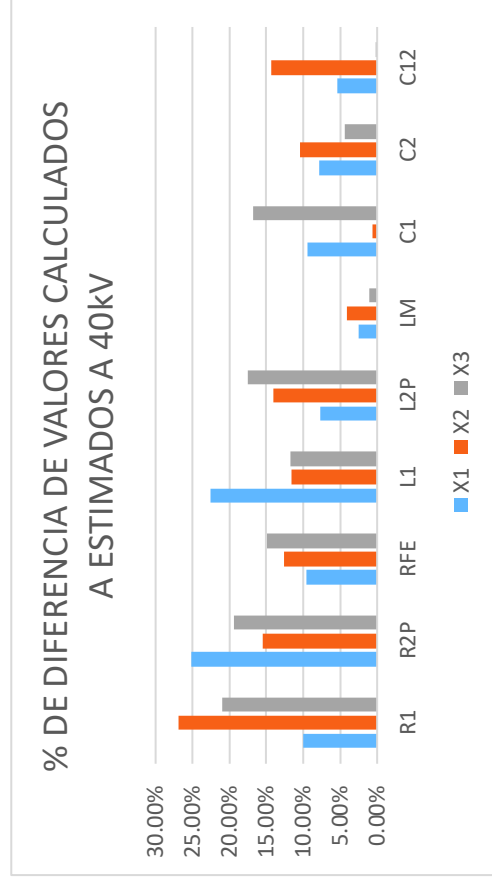


**Figura 3.14.-** Parámetros Eléctricos estimados a 17kV con método Simplex Search



**Tabla 3.4.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 40kV con método Simplex Search

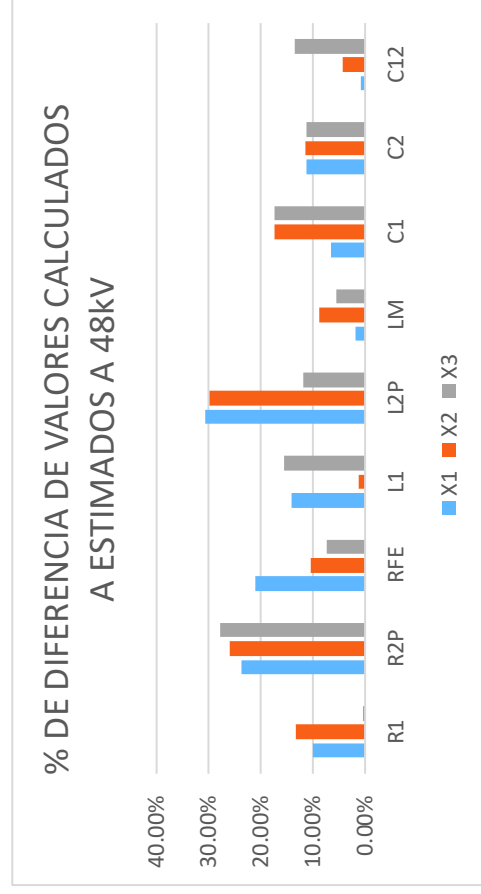
40kV Simplex Search											
PARÁMETROS CALCULADOS	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	9.95%		12.14 Ω	26.94%		11.23 Ω	21.02%		11.07 Ω	19.90%
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	25.15%		10.50 Ω	15.52%		11.00 Ω	19.36%		11.12 Ω	20.21%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	9.55%		412 kΩ	12.62%		423 kΩ	14.89%		411 kΩ	12.41%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	22.52%		38.50 mH	11.53%		30.50 mH	11.67%		32.27 mH	5.56%
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	7.70%		39.60 mH	13.99%		41.30 mH	17.53%		39.27 mH	13.26%
L <sub>M</sub>	90.21 H	2.51%		94.00 H	4.03%		91.20 H	1.09%		91.07 H	0.94%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	9.49%		7.20 uF	0.69%		8.60 uF	16.86%		7.90 uF	9.49%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	7.81%		7.90 uF	10.38%		7.40 uF	4.32%		7.66 uF	7.57%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	5.41%		4.69 uF	14.29%		4.01 uF	0.25%		4.32 uF	6.87%



**Figura 3.15.-** Parámetros Eléctricos estimados a 40kV con método Simplex Search

**Tabla 3.5.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 48kV con método Simplex Search

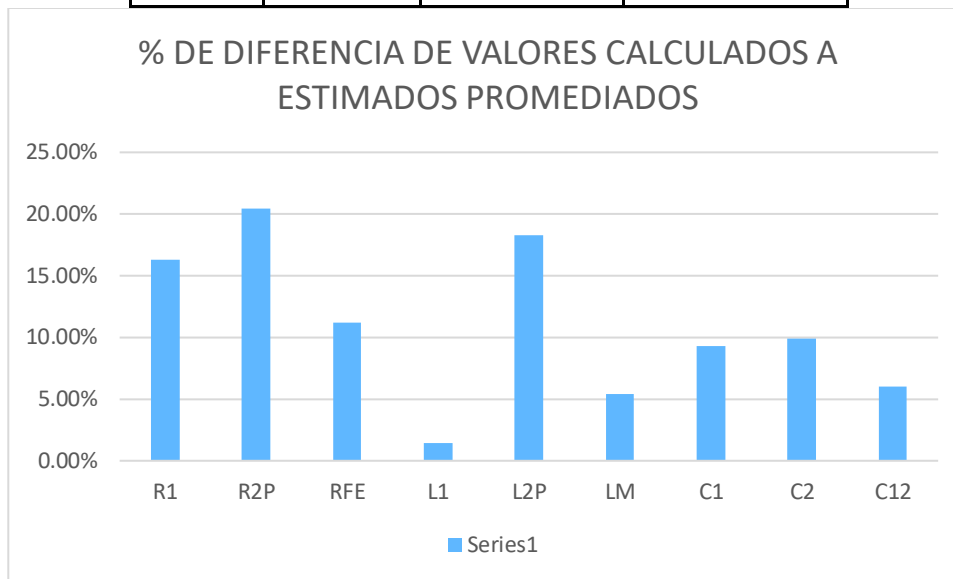
48kV Simplex Search											
PARÁMETROS CALCULADOS	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	9.95%		10.23 Ω	13.29%		8.90 Ω	0.34%		9.66 Ω	8.18%
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	23.73%		11.98 Ω	25.96%		12.30 Ω	27.89%		11.97 Ω	25.90%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	21.05%		402 kΩ	10.45%		389 kΩ	7.46%		416 kΩ	13.39%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	14.16%		34.50 mH	1.28%		29.50 mH	15.46%		34.56 mH	1.45%
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	30.77%		48.50 mH	29.77%		38.65 mH	11.88%		45.45 mH	25.06%
L <sub>M</sub>	90.21 H	1.93%		99.00 H	8.88%		95.40 H	5.44%		94.30 H	4.34%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	6.54%		8.65 uF	17.34%		8.65 uF	17.34%		8.32 uF	14.03%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	11.28%		8.00 uF	11.50%		7.98 uF	11.28%		7.99 uF	11.35%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	0.74%		4.20 uF	4.29%		4.65 uF	13.55%		4.30 uF	6.51%



**Figura 3.16.-** Parámetros Eléctricos estimados a 48kV con método Simplex Search

**Tabla 3.6.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados método Simplex Search

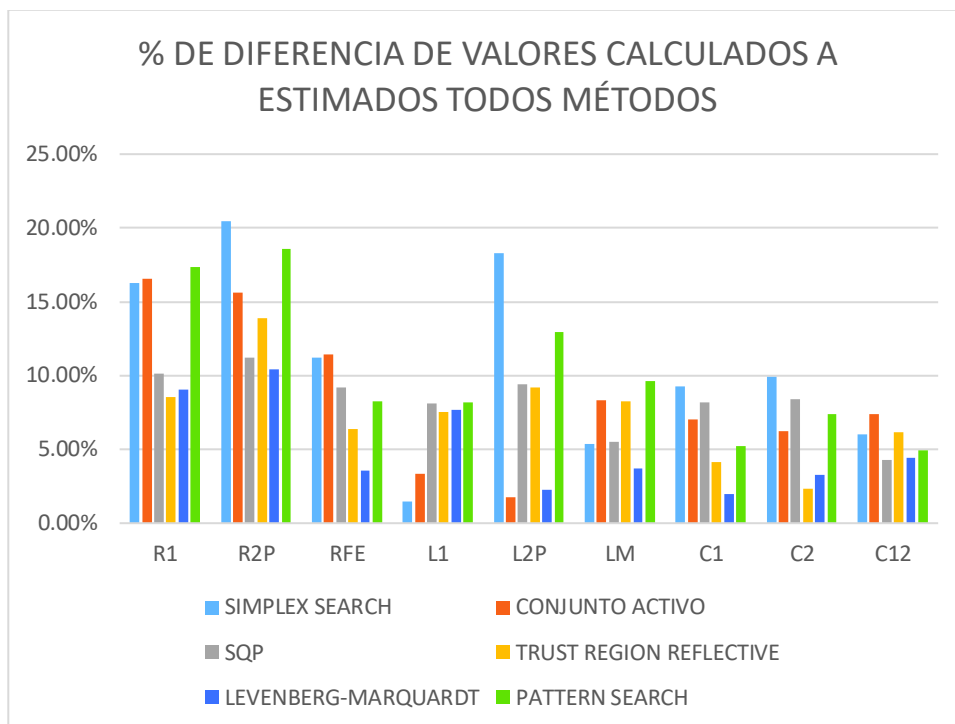
<b>RESULTADOS PROMEDIADOS DE LOS 3 NIVELES DE VOLTAJE CON MÉTODO SIMPLEX SEARCH</b>			
<b>PARÁMETROS CALCULADOS</b>		<b>ESTIMADOS</b>	<b>% DIFERENCIA</b>
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	10.59 Ω	16.27%
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	11.15 Ω	20.47%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	405 kΩ	11.18%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	34.57 mH	1.48%
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	41.70 mH	18.32%
L <sub>M</sub>	90.21 H	95.33 H	5.37%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	7.88 uF	9.30%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	7.86 uF	9.91%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	4.28 uF	6.05%



**Figura3-17.-** Parámetros Eléctricos estimados con método Simplex Search

En los resultados promediados con el primer método Simplex Search se puede visualizar que todos los valores tuvieron una variación que en sus valores máximos están alrededor del 20%, valores con los cuales se puede aceptar que a diferentes niveles de voltaje y en los diferentes devanados que se realizó las pruebas y ensayos, los valores no varían demasiado de los valores expuestos del primer caso en la Tabla 3.3, motivo por el cual se puede considerar que es una forma válida de estimar los parámetros eléctricos del transformador de distribución.

Una vez analizado con el primer método de estimación se procedió a revisar con los otros cinco métodos restantes expuestos en el marco teórico de este estudio técnico, todas las tablas y gráficas se encuentran en el Anexo II. A continuación, se expone un cuadro comparativo y de resumen de los promedios de cada uno de los métodos de estimación que se puede apreciar en la Figura 3.18.



**Figura 3.18 .-** Cuadro comparativo de estimación parámetros con diferentes métodos de estimación en porcentaje

Tanto en la Figura 3.18 como en la Tabla 3.9 se pueden visualizar los porcentajes de los diferentes métodos entre los cuales se observa que entre uno y otro no existen mayores diferencias, por lo que se concluye que lo realizado en este estudio técnico, es aplicable para diferentes niveles de voltaje y diferentes métodos de estimación.

**Tabla 3.7.-** Tabla comparativa de estimación de parámetros eléctricos con los diferentes métodos realizados

PARÁMETROS CALCULADOS	SIMPLEX SEARCH		CONJUNTO ACTIVO		SQP	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA	ESTIMADOS	% DIFERENCIA	ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	10.59 Ω	16.27%	10.63 Ω	16.54%	9.87 Ω	10.12%
R <sub>2P</sub>	11.15 Ω	20.47%	10.51 Ω	15.60%	9.99 Ω	11.22%
R <sub>FE</sub>	405 kΩ	11.18%	407 kΩ	11.47%	397 kΩ	9.21%
L <sub>1</sub>	34.57 mH	1.48%	35.25 mH	3.37%	37.08 mH	8.14%
L <sub>2P</sub>	41.70 mH	18.32%	33.48 mH	1.74%	37.60 mH	9.42%
L <sub>M</sub>	95.33 H	5.37%	98.38 H	8.30%	95.49 H	5.53%
C <sub>1</sub>	7.88 uF	9.30%	7.69 uF	7.06%	7.79 uF	8.16%
C <sub>2</sub>	7.86 uF	9.91%	7.55 uF	6.25%	7.73 uF	8.42%
C <sub>12</sub>	4.28 uF	6.05%	4.34 uF	7.42%	4.20 uF	4.29%
PARÁMETROS CALCULADOS	TRUST REGION REFLECTIVE		LEVENBERG-MARQUARDT		PATTERN SEARCH	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA	ESTIMADOS	% DIFERENCIA	ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	9.70 Ω	8.57%	9.75 Ω	9.05%	10.74 Ω	17.39%
R <sub>2P</sub>	10.30 Ω	13.90%	9.90 Ω	10.43%	10.90 Ω	18.60%
R <sub>FE</sub>	385 kΩ	6.38%	373 kΩ	3.56%	392 kΩ	8.26%
L <sub>1</sub>	36.84 mH	7.54%	36.90 mH	7.71%	37.08 mH	8.16%
L <sub>2P</sub>	37.51 mH	9.21%	34.86 mH	2.29%	39.12 mH	12.94%
L <sub>M</sub>	98.30 H	8.23%	93.67 H	3.69%	99.79 H	9.60%
C <sub>1</sub>	7.46 uF	4.16%	7.29 uF	1.98%	7.54 uF	5.23%
C <sub>2</sub>	7.25 uF	2.33%	7.32 uF	3.25%	7.65 uF	7.42%
C <sub>12</sub>	4.28 uF	6.15%	4.21 uF	4.46%	4.23 uF	4.94%

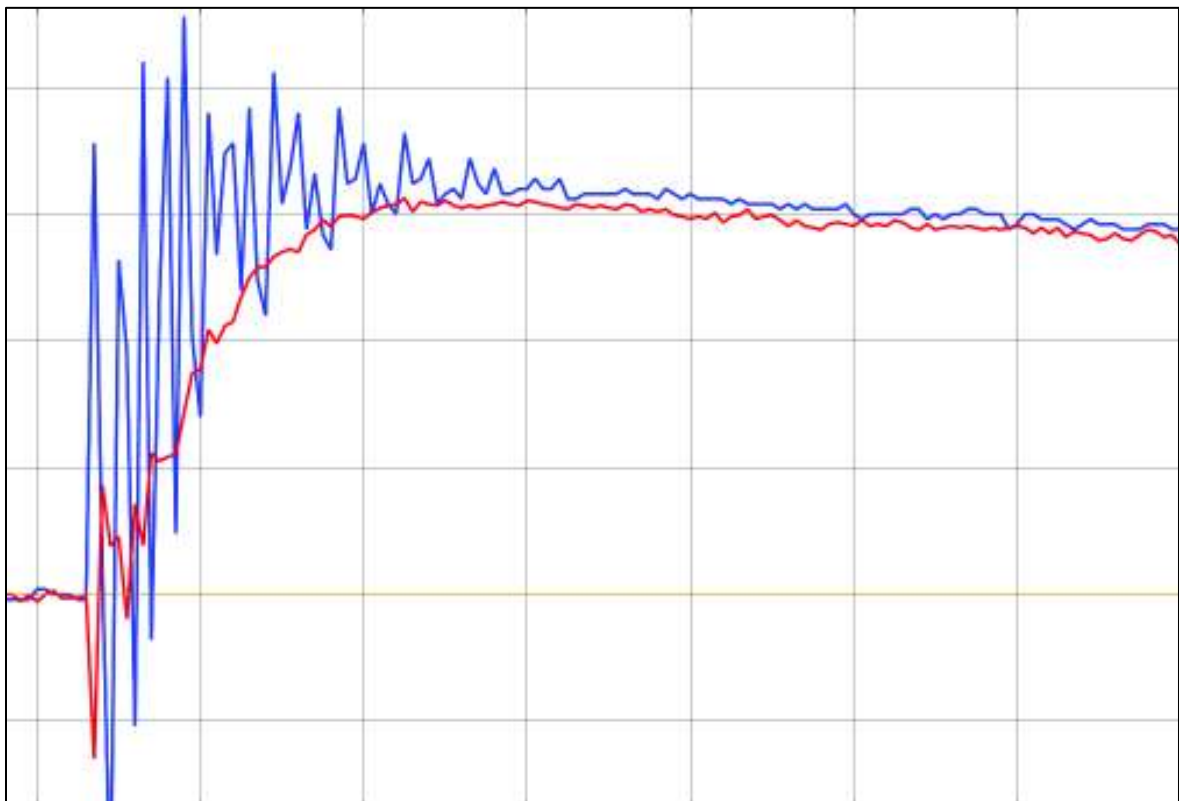
Todos los resultados de este estudio técnico muestran valores aproximados a los calculados, si bien es una buena alternativa para encontrar los valores de los parámetros eléctricos no es la más eficaz, puesto que los valores dependen mucho de las capacitancias que aparecen en el transformador en valores de alta frecuencia, esta alternativa servirá para tener una idea aproximada de cómo se encuentra un transformador después de un evento de alta frecuencia y alto voltaje.

Para poder implementar este sistema para estimar parámetros eléctricos en los transformadores de un sistema eléctrico de potencia se requeriría de analizadores de curvas de voltaje, tanto en la entrada como en la salida de un transformador, puesto que se necesita la forma de onda para poder estimar los parámetros, debido a que con datos de picos de voltaje y duración de los mismos no es suficiente para poder estimar los parámetros eléctricos; por este motivo, la implementación de este sistema tendría un costo considerable por costos de los analizadores para instalar en transformadores de distribución. Una buena opción podría ser en transformadores grandes de subestaciones transmisión y en centrales de generación, en los cuales por el costo-beneficio de estudios, análisis y para precautelar la seguridad de los mismos, sí resulta conveniente poner analizadores en la entrada y salida de los transformadores; además que estos analizadores servirían para monitorear el estado de la red y otras funciones para mejorar la calidad del servicio, que como un beneficio extra podrían servir para utilizar esos valores de curvas y cumplir con los objetivos de este estudio técnico en eventos de perturbaciones de alta frecuencia y voltaje en los mismos.

En los resultados expuestos en el Anexo II se puede observar que en un par de parámetros eléctricos estimados los valores superaron el 30% de diferencia, esto puede deberse al método de estimación utilizado, así como también que por la edad del transformador los parámetros estimados sí pueden presentar un desgaste y se debería poner atención en ellos si la diferencia se repite en varios casos analizados, pero como se puede observar en la Figura 3.18 en el promedio general de todos los métodos, no excede un 20%; debido a que son casos aislados en la estimación de los diferentes métodos, además el mejor método que presenta diferencias más bajas respecto a los valores calculado de forma tradicional es Levenberg-Marquardt y el método que presentó diferencias más elevadas fue el método Simplex Search, de igual manera el tiempo de estimación de los mismos fue inversamente proporcional, el método que más se demoró fue el Levenberg-Marquardt y el que menos tiempo tomaba en las simulaciones fue el método Simplex Search.

En la Figura 3.19 se puede observar en color azul la curva medida experimentalmente y en color rojo la simulada mediante MATLAB-SIMULINK realizando un acercamiento en la parte de la cresta de la curva, donde se puede visualizar la mayor diferencia entre las dos señales, este particular se da en todos los casos analizados a los diferentes niveles de voltaje y con los diferentes métodos de estimación realizados.

La explicación a este particular queda por el ruido producido a elevadas frecuencias que únicamente se puede ver en los datos de la parte experimental, debido a la toma de datos este ruido puede producirse por varios factores como son el cable que lleva la señal al osciloscopio digital, los elementos internos del transformador que al existir cambios bruscos de voltaje y frecuencia pueden llegar a niveles límites de resonancia y ruido, en los cuales se puede observar que el ruido se acentúa donde existe la mayor variación de voltaje, y se estabiliza cuando el cambio ya no es tan brusco como el pico inicial de una onda simulada de descarga atmosférica.

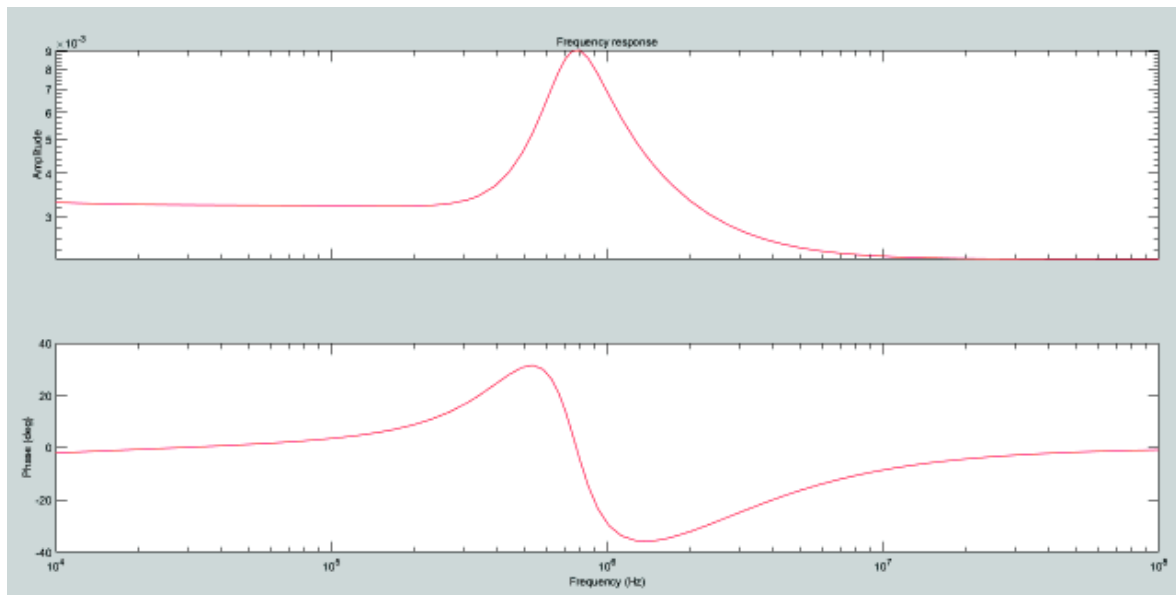


**Figura3-19.- Comparación de cresta de voltaje experimental vs simulada**

En el presente estudio técnico se trató de igualar lo más posible las curvas de la Figura 3.19, pero cuando más se igualaba estas dos curvas los valores de los parámetros llevaban a zonas extremadas de resonancia de los elementos inductivos y capacitivos del transformador, lo que produce una desestabilización total en la estimación de parámetros

llevando a valores totalmente incoherentes, debido a este fenómeno en el cual los cambios de voltaje y frecuencia son extremadamente rápidos así como los cambios de capacitancias e inductancias que no son simuladas en MATLAB-SIMULINK, sino únicamente los promediados, es por este motivo que la curva simulada en color rojo se puede ver una curva más estable sin tanta variación y ruido.

La Figura 3.20 muestra la curva de la frecuencia a la cual trabajó el impulso de voltaje generado en el laboratorio, frecuencia que se encuentra en los valores límites de la zona de resonancia de los elementos inductivos como de las capacitancias parásitas, es por este motivo que la cresta de la Figura 3.19 presenta varios picos de resonancia justo en el impulso y cambio brusco de voltaje generado.



**Figura 3.20.-** Gráfico de Frecuencia de la Función de Transferencia de la curva de voltaje

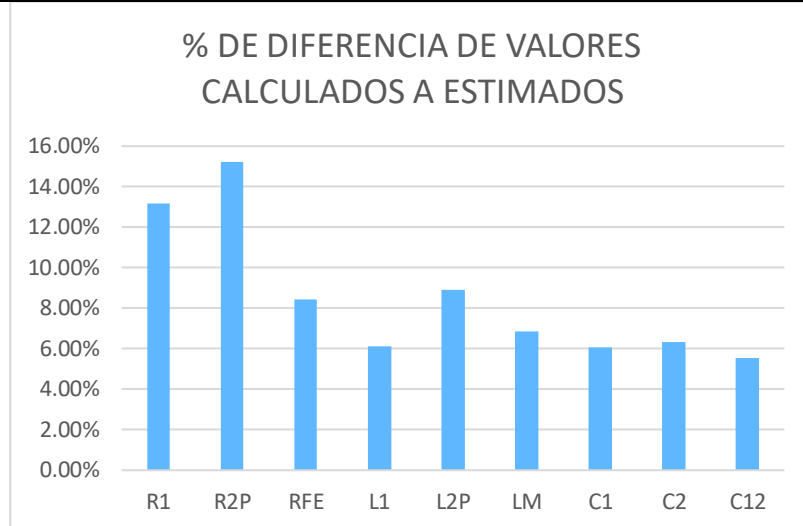
Como se observa en la Figura 3.20 la frecuencia está alrededor de 1 MHz y según los valores calculados de las inductancias internas del transformador se tiene que los valores están alrededor de los mili-henrios mH y los capacitancias alrededor de los microfaradios uF; motivo por el cual de acuerdo a la ecuación de resonancia, cuando existen cambios bruscos en los valores de las capacitancias parásitas que dependen directamente de la frecuencia estos valores por mínimos instantes de tiempo pueden llegar a valores de resonancia que pueden producir esos picos [31].

Finalmente, en la Tabla 3.10 se pueden observar los valores finales obtenidos de un promedio del cálculo de todos los métodos analizados.



**Tabla 3.8.-** Parámetros resultantes promediados de todos los métodos de estimación

RESULTADOS PROMEDIADOS TODOS MÉTODOS			
PARÁMETROS CALCULADOS		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
$R_1$	8.87 $\Omega$	10.21 $\Omega$	13.15%
$R_{2P}$	8.87 $\Omega$	10.46 $\Omega$	15.20%
$R_{FE}$	360 k $\Omega$	393 k $\Omega$	8.42%
$L_1$	34.06 mH	36.29 mH	6.14%
$L_{2P}$	34.06 mH	37.38 mH	8.88%
$L_M$	90.21 H	96.83 H	6.83%
$C_1$	7.15 $\mu$ F	7.61 $\mu$ F	6.05%
$C_2$	7.08 $\mu$ F	7.56 $\mu$ F	6.34%
$C_{12}$	4.02 $\mu$ F	4.26 $\mu$ F	5.56%



**Figura 3.21.-** Porcentaje de diferencia de parámetros estimados vs valores calculados de promedio de todos los métodos de estimación

Los valores obtenidos son todos con diferencias en valores máximos que están alrededor del 15%, probando una vez más la efectividad del este estudio técnico y que puede ser un método alternativo para dar resultados aproximados de parámetros eléctricos de un transformador, sin ser un método exacto puede servir para saber el estado de los mismos.

Se puede observar también en la Figura 3.21 que los porcentajes más altos están en las resistencias de los devanados, con lo que se podría llegar a la conclusión que este

parámetro sea el que más varíe por la antigüedad del transformador, y sus devanados que con el transcurso de los años pueden verse afectada su resistencia y sus devanados tengan más pérdidas de las que se pueden calcular con el método tradicional.

Por otro lado se puede observar que los valores que menos cambios tuvieron son las capacitancias, capacitancias que fueron calculadas por este mismo método de estimación, es por este motivo que al tener una estimación inicial, sus cambios no son tan elevados, con lo que se puede concluir que los valores estuvieron bien sintonizados en su primera estimación, porque éstos no cambiaron en gran proporción y no tuvieron demasiada influencia en el resto de parámetros para modificar la curva a su posición final.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

- Los Modelos de Transformador, tanto modelos físicos como los modelos tipo Black-Box son de gran ayuda para la simulación lo más acercada a la realidad, como en este caso fue de gran ayuda un modelo tipo Black-Box desarrollado por Biernacki [9] en el cual se aprovecha el modelo con sus funciones de transferencia, este modelo ayudo a cumplir con el primer objetivo de este estudio técnico ya que se lo analizo y obtuvo resultados positivos en la estimación de parámetros eléctricos.
- Los programas matemáticos como MATLAB-SIMULINK son muy prácticos a la hora de implementar modelos y resolución de ecuaciones, en este caso en particular sirvió para la resolución de ecuaciones no lineales, así como también para poder obtener la función de transferencia del transformador de distribución de 50 kVA, datos que obtenerlos de una forma manual o con programas desarrollados paso a paso tomaría mucho tiempo.
- La estimación de parámetros mediante el análisis de curvas de entrada y salida es una buena alternativa a las estimaciones tradicionales, pero en altas frecuencias la elevada influencia de las capacitancias parásitas que se tiene en los elementos eléctricos es una limitante para obtener un dato preciso de los parámetros, en este estudio se cumplió con el objetivo de sintonizar parámetros con márgenes de diferencia en valores máximos alrededor del 20% como se expuso en el capítulo 3 de resultados, pero fueron valores con márgenes de error y no exactos.
- El análisis expuesto en el presente estudio técnico sirvió de ayuda para saber el estado en el que se encuentren los devanados y el núcleo transformadores de distribución luego de una descarga atmosférica o un pico de voltaje que circulen por sus bobinados, se comprobó que el método sirvió para todos los casos analizados que se exponen en resumen en la Tabla 3.9, pero una vez más cabe recalcar que da un valor aproximado mas no el exacto.
- Las capacitancias parásitas del transformador de distribución son las que definen las curvas en un modelo de alta frecuencia, la influencia del resto de elementos como inductancias y resistencias es mucho menor a la influencia de las capacitancias en eventos de alta frecuencia, por este motivo el cálculo y la

estimación de las mismas debe ser analizado a detalle para poder obtener resultados más cercanos a sus valores reales en las estimaciones realizadas.

- En modelos de alta frecuencia, puede resumirse únicamente al estudio de las capacitancias parásitas, puesto que ellas pueden dar los datos muy acercados a la realidad del modelo en un 90% sin la inclusión del resto de elementos, como expone Moziful en su artículo científico.
- Se cumplió con el objetivo de obtener una forma alternativa de calcular los parámetros eléctricos de un transformador de distribución para reducir tiempos, la aplicación de este estudio técnico estaría más bien aplicada a transformadores grandes como los de subestaciones y centrales de generación, por el costo-beneficio de la instalación de analizadores que entreguen datos de las curvas de las perturbaciones, puesto que son necesarias las curvas enteras para poder realizar la estimación y no únicamente valores de picos máximos y longitudes de onda, puesto que la estimación se realizaría con márgenes muy amplios de error y desviación.
- El ruido y la resonancia son parámetros que tienen gran importancia en aplicaciones a elevadas frecuencias y elevados voltajes, por este motivo toda actividad que se realice por más mínima que sea se debe realizarla con toda la cautela y precaución para obtener resultados deseados y tener la debida seguridad a la hora de aplicar y trabajar con voltajes elevados a frecuencias altas.
- Las simulaciones que más se acercaron a los valores calculados fueron las que se desarrolló con el método de Levenberg-Marquardt como se aprecia en los resultados del Anexo II y en la Tabla comparativa 3.9, por este motivo es el método que se recomienda para obtener porcentajes de diferencia menores en todos los niveles de voltaje analizados, así también el método más rápido fue el Simplex Search, para poder realizar estimaciones rápidas.

## 4.2 RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTUROS

- Para la toma de datos de las curvas de alto voltaje y alta frecuencia se debe poner atención especial en el ruido que puede producirse en las puntas de prueba que transmiten las señales desde el transformador o el equipo que se esté analizando hacia el osciloscopio, puesto que este ruido puede afectar las curvas y con ello los datos finales, por eso se recomienda tener cables y puntas bien apantalladas.
- Si bien este estudio técnico es aplicable a cualquier transformador y a cualquier nivel de voltaje se recomienda su aplicación a transformadores grandes sean de subestaciones o centrales de generación en donde sea factible instalar analizadores que puedan entregar los datos de las curvas y ondas que circulan por los devanados de los mismos, y que además sean analizadores que puedan servir para otros fines como operaciones y control de calidad de la energía, y como un extra sirva para los objetivos de esta tesis, esta recomendación es por el costo-beneficio, puesto que no es factible instalar analizadores o registradores en transformadores de distribución.
- Un estudio que se debería realizar es el análisis de las capacitancias parásitas a detalle y una forma de calcularlas con un mayor nivel de precisión, este estudio serviría de mucha ayuda para mejorar los niveles de diferencia entre los valores calculados a los estimados de este estudio técnico.
- La simulación de descargas atmosféricas debe llevarse a cabo con todas las seguridades del caso, y el equipo necesario para precautelar la seguridad de personas y dispositivos.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] [NTE INEN, “Norma Técnica Ecuatoriana NTE Transformadores Placa de Características INEN 2130”, Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador, 1998.
- [2] NMX-J-169-ANCE-2004 “Transformadores y Autotransformadores de Distribución y Potencia”, Métodos de Prueba, NMX,2004.
- [3] Avelino Perez Pedro. “Transformadores de Distribución, Teoría, Cálculo, Construcción y Pruebas”. Segunda Edición. Editorial Reverté S.A., México DF, 2001.
- [4] GALVÁN, Verónica. GUTIÉRREZ, José. ORTIZ, Víctor. SÁNCHEZ, Ricardo. “Modelado del Transformador para eventos de Alta Frecuencia”, I Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV), Guadalajara, México.
- [5] Leonardo Montealegre Lobo, “MODELO DE TRANSFORMADORES EN SATURACIÓN UTILIZANDO FUNCIONES DE CÁLCULO DE PARÁMETROS EN EMTP-RV” Instituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica, 2014.
- [6] W. G. Hurley, W. H. Wolfle and J. G. Breslin, “Optimized transformer design: inclusive high frequency effects”, IEEE transactions on power electronics.
- [7] Cándido Capellán Villacián, “APORTACIONES AL MODELADO DEL TRANSFORMADOR EN ALTA FRECUENCIA” Universidad de Cantabria, Santander 2012
- [8] T. Tran-Anh, P. Auriol and T. Tran-Quoc, “High frequency power transformer modeling for Power Line Communication applications”, IEEE Conferences, Power systems conference and exposition (PSCE), 2006.

- [9] N. Y. Abed and O. A. Mohammed, "Physics-based high-frequency transformer modeling by finite elements", IEEE transactions on magnetics, vol. 46, August 2010
- [10] N. Abeywickrama, Y. V. Serdyuk and S. M. Gubanski, "High frequency modeling of power transformers for use in Frequency Response Analysis (FRA)", IEEE transactions on power delivery, vol. 23. October 2008.
- [11] H. Y. Lu, J. G. Zhu, S. Y. R. Hui and V. S. Ramsden, "Dynamic circuit modeling of a high frequency transformer", IEEE Conferences, 29<sup>th</sup> annual IEEE of Power Electronics Specialists Conference (PESC), vol. 2, 1998
- [12] S. Moziful, K. M. Coates and G. Ledwich, "Identification of high frequency transformer equivalent circuit using MATLAB-SIMULINK from frequency domain data", Annual meeting, IEEE Industry Applications Society, New Orleans, Louisiana, October 1997.
- [13] Mork, B., Gonzalez, F., & Ishchenko, D. "Hybrid Transformer Model for Transient Simulation — Part I: Development and Parameters." IEEE Trans. on Power Delivery, 2007.
- [14] Ebrahim Rahimpour<sup>1</sup> and Mehdi Bigdeli, "Simplified Transient Model of Transformer based on Geometrical Dimensions used in Power Network Analysis and Fault Detection Studies", Iran Transformer Research Institute, Zanajn, Iran. Marzo 2009.
- [15] N. A. Sabiha and M. Lehtonen, "Lightning- induced overvoltage's transmitted over distribution transformer with MV spark-gap operation. Part I: High-frequency transformer model", IEEE transactions on power delivery, vol. 25. October 2010.
- [16] J. Biernacki and D. Czarkowski, "High frequency transformer modeling", The 2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, vol. 3.
- [17] X. Zhang, G. Liang, Q. Xie and H. Sun, "Modeling of the transformer windings under VFTO based on transfer function", International Conference on Power System Technology, PowerCon 2006.

- [18] Z. Zhongyuan, L. Fangcheng and L. Guishu, "A high-frequency circuit model of a potential transformer for the very fast transient simulation in GIS", IEEE transactions on power delivery, vol. 23, n° 4, October 2008.
- [19] "Gradiente Descendente," 2013. [Online]. Available:  
<https://matheusfacure.github.io/2017/02/20/MQO-Gradiente-Descendente/>.
- [20] E. Carreño, E. Toro, and A. Escobar, "Optimización de sistemas lineales usando métodos de punto interior," Sci. Tech., vol. 0, 2004.
- [21] "Teorema de Karush Kuhn Tucker en PNL (Ejercicios Resueltos)." 2013.  
<https://www.gestiondeoperaciones.net/programacion-no-lineal/teorema-de-karush-kuhn-tucker-aplicado-a-un-problema-de-programacion-no-lineal/>
- [22] MATLAB-SIMULINK, "Constrained Nonlinear Optimization Algorithms – MATLAB-SIMULINK & MATLAB-SIMULINK,"  
2017. [Online]. Available:  
<http://www.mathworks.com/help/optim/ug/constrainednonlinear-optimization-algorithms.html#bmpd5f>
- [23] IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers, in ANSI/IEEE Std C57.12.90-1987
- [24] Víctor Hugo Tibanlombo, "Estudio de la respuesta en frecuencia mediante pruebas de impulso para la evaluación del estado del aislamiento en transformadores", EPN, septiembre 2018.  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19719>
- [25] Avilés Merino, Fausto, "Hojas Guia de Alto Voltaje" EPN, Mar-2007  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10017>
- [26] "High-voltage test techniques Part 1: General definitions and test requirements", IEC Std. 60060-14, 1989.



- [27] Chiguano Chalaco, Byron Alberto, "Estimación de parámetros eléctricos de la máquina sincrónica utilizando MATLAB-SIMULINK", EPN, febrero 2018.  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19181>
- [28] Jhon J. Grainger-William D. Stevenson, "Análisis de Sistemas de Potencia", McGraw-Hill, 2002.
- [29] Davide Aguglia, "Frequency-Domain Maximum-Likelihood Estimation of High-Voltage Pulse Transformer Model Parameters", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 49, NO. 6, NOVEMBER/DECEMBER 2013
- [30] IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers," in IEEE Std C57.12.00-2015 (Revision of IEEE Std C57.12.00-2010) , vol., no., pp.1-74, 12 May 2016
- [31] Boris Becerra, Edwin Llivicura, "Análisis del Efecto de Resonancia en los transformadores de Pedestal hasta 250 kVA trifásicos", UPS, Marzo 2015  
<https://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7913/1/UPS-CT004758.pdf>

## 6. ANEXOS

### ANEXO I

```
%PROGRAMA PARA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS
DE
%DISTRIBUCIÓN MEDIANTE DATOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

%ADQUISICIÓN DE DATOS DE LA DESCARGA ATMOSFÉRICA, CURVAS DE LA DESCARGA
EN
%EL INGRESO DEL TRANSFORMADOR POR LADO DE ALTO VOLTAJE Y SALIDA POR LADO
DE
%BAJO VOLTAJE
clear all;
clc;
%CURVA INGRESO ALTO VOLTAJE
[~, ~, raw] =
xlsread('C:\Users\Andres\Desktop\TESIS\PROGRAMA_ESTIMACION_PARAMETROS\DES
CARGAS ATMOSFÉRICAS\H1-X1\ALL0000\F0040CH1.xlsx','F0040CH1','E1:G2500');
SALIDA = reshape([raw{:}],size(raw));
VIN1 = SALIDA(:,3);
VIN = SALIDA(:,2);
clearvars SALIDA raw;

%CURVA SALIDA BAJO VOLTAJE
[~, ~, raw] =
xlsread('C:\Users\Andres\Desktop\TESIS\PROGRAMA_ESTIMACION_PARAMETROS\DES
CARGAS ATMOSFÉRICAS\H1-X1\ALL0000\F0040CH2.xlsx','F0040CH2','D1:F2500');
SALIDA = reshape([raw{:}],size(raw));
VOUT1 = SALIDA(:,3);
VOUT = SALIDA(:,2);
TIEMPO = SALIDA(:,1);
clearvars SALIDA raw;

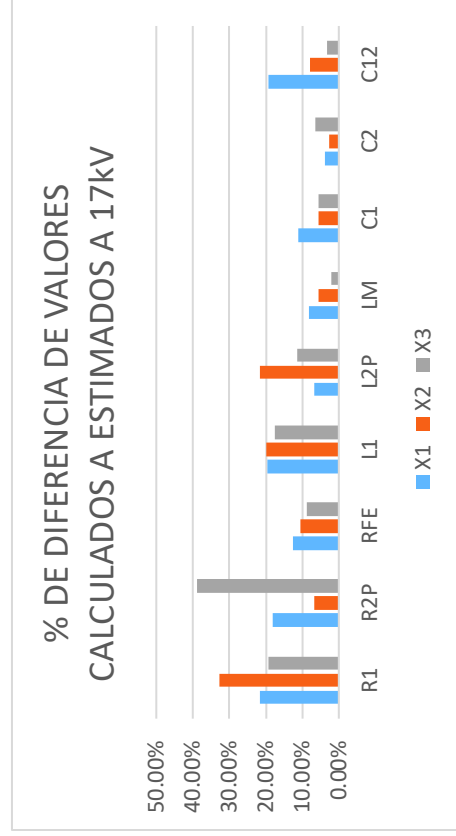
R1=8.87
R2P=8.87
RFE=3.6e5
C1=7.69e-7
C2=7.69e-7
C12=4.29e-7
```

L1=34.06e-3  
L2P=34.06e-3  
LM=90.21

**ANEXO II**

**Tabla A.1.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 17kV con método Conjunto Activo

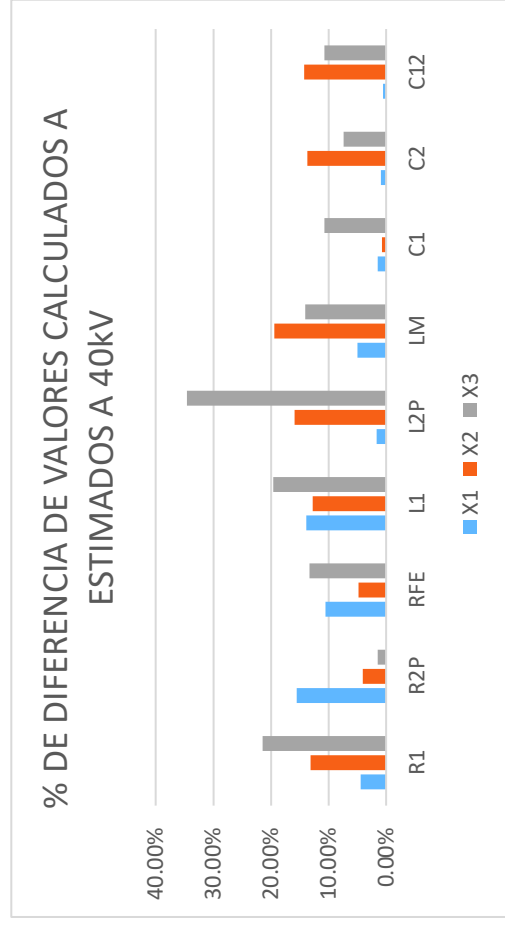
PARÁMETROS CALCULADOS	17kV Conjunto Activo											
	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO		
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA	
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	11.30 Ω	21.50%	13.20 Ω	32.80%		11.00 Ω	19.36%		11.83 Ω	25.04%	
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	10.85 Ω	18.25%	9.50 Ω	6.63%		14.50 Ω	38.83%		11.62 Ω	23.64%	
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	412 kΩ	12.62%	402 kΩ	10.45%		395 kΩ	8.86%		403 kΩ	10.67%	
L <sub>1</sub>	34.06 mH	28.50 mH	19.51%	42.50 mH	19.86%		41.25 mH	17.43%		37.42 mH	8.97%	
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	36.50 mH	6.68%	43.50 mH	21.70%		38.50 mH	11.53%		39.50 mH	13.77%	
L <sub>M</sub>	90.21 H	98.20 H	8.14%	95.60 H	5.64%		92.00 H	1.95%		95.27 H	5.31%	
C <sub>1</sub>	7.15 uF	8.03 uF	10.96%	7.56 uF	5.42%		7.56 uF	5.42%		7.72 uF	7.34%	
C <sub>2</sub>	7.08 uF	7.36 uF	3.80%	6.90 uF	2.61%		7.56 uF	6.35%		7.27 uF	2.66%	
C <sub>12</sub>	4.02 uF	4.98 uF	19.28%	4.36 uF	7.80%		4.15 uF	3.13%		4.50 uF	10.60%	



**Figura A.1.-** Parámetros Eléctricos estimados a 17kV con método Conjunto Activo

**Tabla A.2.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 40kV con método Conjunto Activo

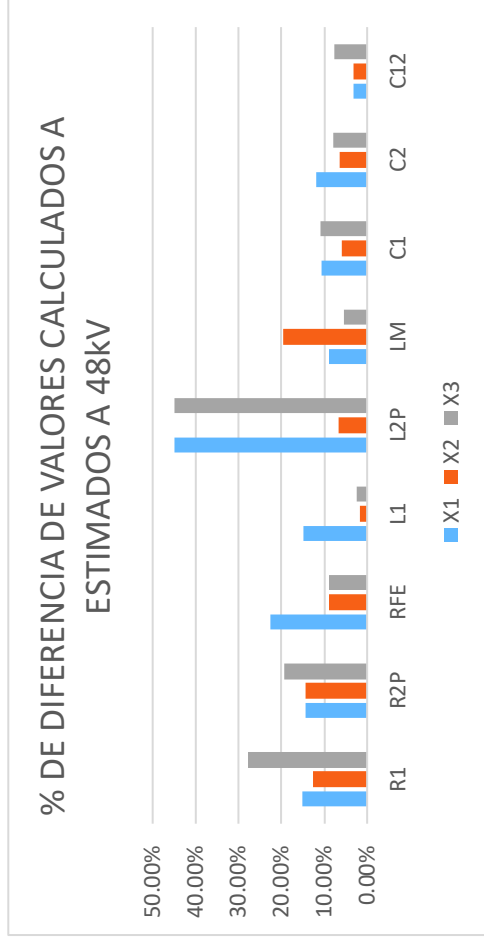
40kV Conjunto Activo											
PARÁMETROS CALCULADOS	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.50 Ω	4.35%		10.20 Ω	13.04%		11.30 Ω	21.50%		10.00 Ω	11.30%
R <sub>2P</sub>	10.50 Ω	15.52%		8.53 Ω	3.99%		9.00 Ω	1.44%		9.34 Ω	5.07%
R <sub>FE</sub>	402 kΩ	10.45%		378 kΩ	4.76%		415 kΩ	13.25%		398 kΩ	9.62%
L <sub>1</sub>	39.50 mH	13.77%		30.20 mH	12.78%		28.50 mH	19.51%		32.73 mH	4.05%
L <sub>2P</sub>	33.50 mH	1.67%		40.50 mH	15.90%		25.30 mH	34.62%		33.10 mH	2.90%
L <sub>M</sub>	86.00 H	4.90%		112.00 H	19.46%		105.00 H	14.09%		101.00 H	10.68%
C <sub>1</sub>	7.25 uF	1.38%		7.20 uF	0.69%		8.00 uF	10.63%		7.48 uF	4.45%
C <sub>2</sub>	7.02 uF	0.85%		8.20 uF	13.66%		7.65 uF	7.45%		7.62 uF	7.13%
C <sub>12</sub>	4.00 uF	0.50%		4.69 uF	14.29%		4.50 uF	10.67%		4.40 uF	8.57%



**Figura A.2.-** Parámetros Eléctricos estimados a 40kV con método Conjunto Activo

**Tabla A.3.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 48kV con método Conjunto Activo

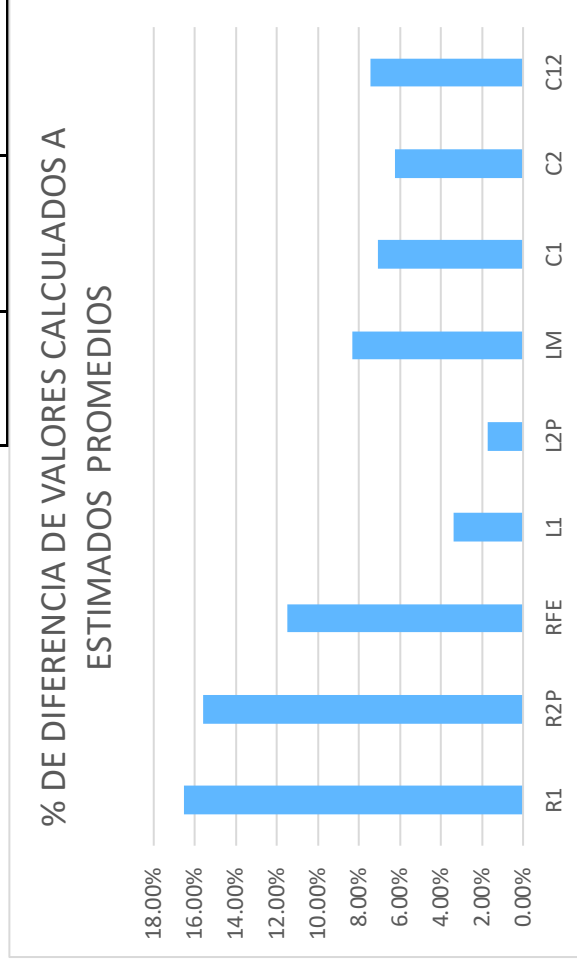
48kV Conjunto Activo											
PARÁMETROS CALCULADOS	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	7.70 Ω	15.19%	10.15 Ω	12.61%		12.30 Ω	27.89%		10.05 Ω	11.74%
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	10.36 Ω	14.38%	10.35 Ω	14.30%		11.00 Ω	19.36%		10.57 Ω	16.08%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	465 kΩ	22.58%	395 kΩ	8.87%		396 kΩ	9.00%		419 kΩ	13.99%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	40.02 mH	14.89%	33.50 mH	1.67%		33.25 mH	2.44%		35.59 mH	4.30%
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	23.50 mH	44.94%	36.50 mH	6.68%		23.50 mH	44.94%		27.83 mH	22.37%
L <sub>M</sub>	90.21 H	99.00 H	8.88%	112.00 H	19.46%		85.60 H	5.39%		98.87 H	8.76%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	8.01 uF	10.74%	7.60 uF	5.92%		8.03 uF	10.96%		7.88 uF	9.26%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	8.03 uF	11.83%	7.56 uF	6.35%		7.69 uF	7.93%		7.76 uF	8.76%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	4.15 uF	3.13%	3.90 uF	3.08%		4.35 uF	7.59%		4.13 uF	2.74%



**Figura A.3.-** Parámetros Eléctricos estimados a 48kV con método Conjunto Activo

**Tabla A.4.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados con método Conjunto Activo

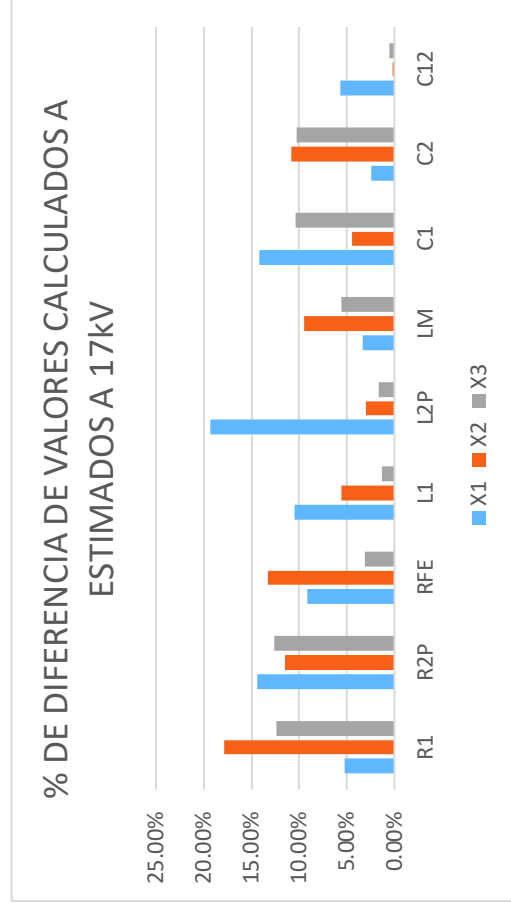
RESULTADOS PROMEDIADOS Conjunto activo			
PARÁMETROS CALCULADOS	ESTIMADOS	% DIFERENCIA	
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	10.63 Ω	16.54%
R <sub>2p</sub>	8.87 Ω	10.51 Ω	15.60%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	407 kΩ	11.47%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	35.25 mH	3.37%
L <sub>2p</sub>	34.06 mH	33.48 mH	1.74%
L <sub>M</sub>	90.21 H	98.38 H	8.30%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	7.69 uF	7.06%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	7.55 uF	6.25%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	4.34 uF	7.42%



**Figura A.4.-** Parámetros Eléctricos estimados con método Conjunto Activo

**Tabla A.5.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 17kV con método SQP

17kV SQP											
PARÁMETROS CALCULADOS	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	5.24%		10.80 Ω	17.87%		10.12 Ω	12.35%		10.09 Ω	12.12%
R <sub>2p</sub>	8.87 Ω	14.38%		7.96 Ω	11.43%		10.15 Ω	12.61%		9.49 Ω	6.53%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	9.09%		415 kΩ	13.25%		349 kΩ	3.15%		387 kΩ	6.90%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	10.49%		36.06 mH	5.55%		34.50 mH	1.28%		36.20 mH	5.92%
L <sub>2p</sub>	34.06 mH	19.29%		35.13 mH	3.05%		33.50 mH	1.67%		36.94 mH	7.80%
L <sub>M</sub>	90.21 H	3.34%		99.65 H	9.47%		85.50 H	5.51%		92.83 H	2.82%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	14.17%		7.48 uF	4.41%		7.98 uF	10.40%		7.93 uF	9.84%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	2.48%		7.94 uF	10.83%		7.89 uF	10.27%		7.70 uF	8.01%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	5.63%		4.01 uF	0.25%		4.00 uF	0.50%		4.09 uF	1.71%

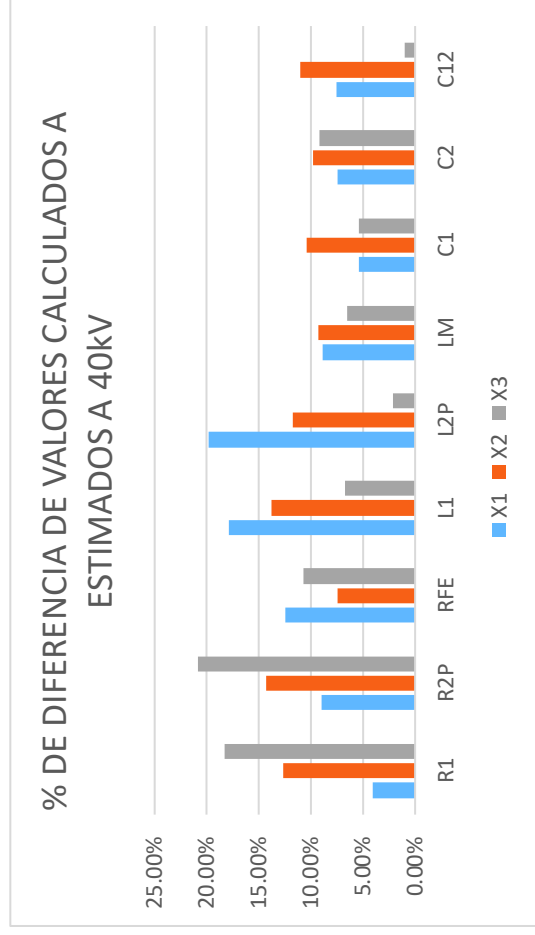


**Figura A.5.-** Parámetros Eléctricos estimados a 17kV con método SQP



**Tabla A.6.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 40kV con método SQP

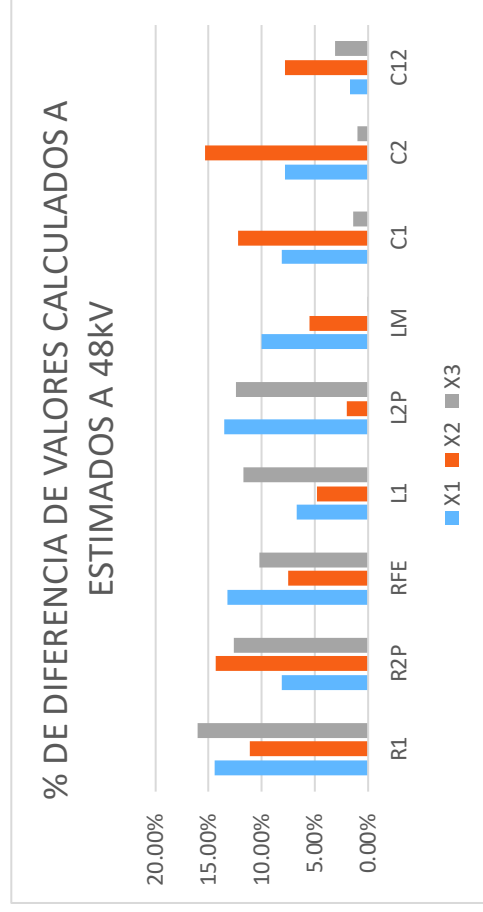
40kV SQP											
PARÁMETROS CALCULADOS	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	4.11%		10.15 Ω	12.61%		10.85 Ω	18.25%		10.08 Ω	12.03%
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	9.03%		10.35 Ω	14.30%		11.20 Ω	20.80%		10.43 Ω	14.98%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	12.41%		389 kΩ	7.46%		403 kΩ	10.67%		401 kΩ	10.22%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	17.93%		39.50 mH	13.77%		36.50 mH	6.68%		39.17 mH	13.04%
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	19.86%		38.60 mH	11.76%		34.80 mH	2.13%		38.63 mH	11.84%
L <sub>M</sub>	90.21 H	8.88%		99.50 H	9.34%		96.50 H	6.52%		98.33 H	8.26%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	5.42%		7.98 uF	10.40%		7.56 uF	5.42%		7.70 uF	7.14%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	7.45%		7.85 uF	9.81%		7.80 uF	9.23%		7.77 uF	8.84%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	7.59%		4.52 uF	11.06%		4.06 uF	0.99%		4.31 uF	6.73%



**Figura A.6.-** Parámetros Eléctricos estimados a 40kV con método SQP

**Tabla A.7.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 48kV con método SQP

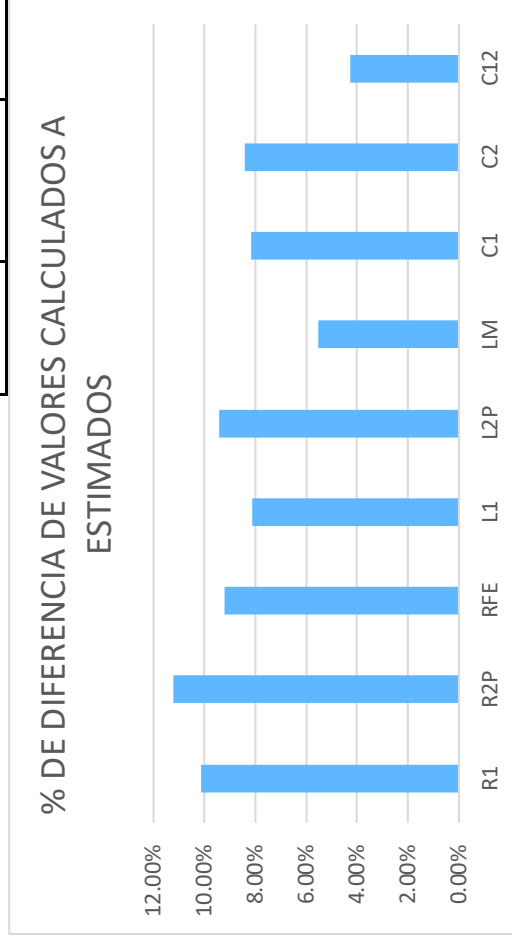
48kV SQP												
PARÁMETROS CALCULADOS	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO		
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA	
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	7.75 Ω	14.45%	9.98 Ω	11.12%		10.56 Ω	16.00%		9.43 Ω	16.00%	5.94%
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	9.65 Ω	8.08%	10.35 Ω	14.30%		10.15 Ω	12.61%		10.05 Ω	12.61%	11.74%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	415 kΩ	13.25%	389 kΩ	7.56%		401 kΩ	10.25%		402 kΩ	10.25%	10.42%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	36.50 mH	6.68%	32.50 mH	4.80%		38.58 mH	11.72%		35.86 mH	11.72%	5.02%
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	39.40 mH	13.55%	33.40 mH	1.98%		38.88 mH	12.40%		37.23 mH	12.40%	8.51%
L <sub>M</sub>	90.21 H	100.23 H	10.00%	95.50 H	5.54%		90.20 H	0.01%		95.31 H	5.35%	5.35%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	7.78 uF	8.10%	8.15 uF	12.27%		7.25 uF	1.38%		7.73 uF	7.46%	7.46%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	7.68 uF	7.81%	8.36 uF	15.31%		7.15 uF	0.98%		7.73 uF	8.41%	8.41%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	4.09 uF	1.71%	4.36 uF	7.80%		4.15 uF	3.13%		4.20 uF	4.29%	4.29%



**Figura A.7.-** Parámetros Eléctricos estimados a 48kV con método SQP

**Tabla A.8.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados con método SQP

RESULTADOS PROMEDIADOS SQP		
PARÁMETROS CALCULADOS	ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	10.12%
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	11.22%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	9.21%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	8.14%
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	9.42%
L <sub>M</sub>	90.21 H	5.53%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	8.16%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	8.42%
C <sub>12</sub>	4.20 uF	4.29%

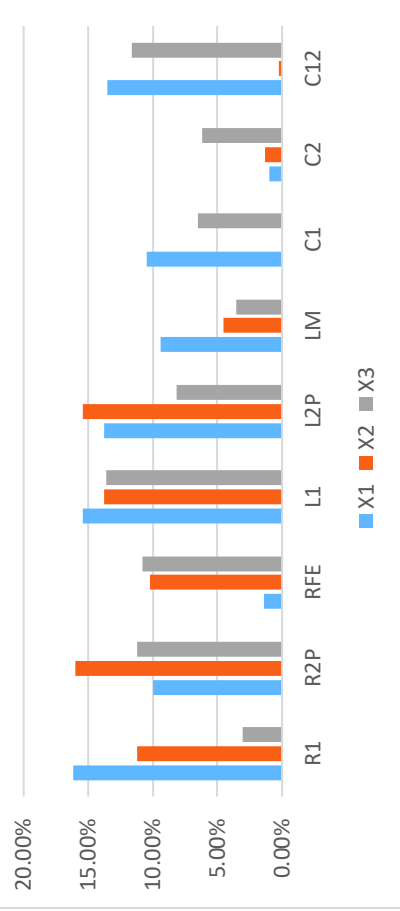


**Figura A.8.-** Parámetros Eléctricos estimados con método SQP

**Tabla A.9.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 17kV con método Trust Region Reflective

17kV Trust Region Reflective											
PARÁMETROS CALCULADOS	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	16.16%		9.99 Ω	11.21%		9.15 Ω	3.06%		9.91 Ω	10.46%
R <sub>2p</sub>	8.87 Ω	9.95%		10.56 Ω	16.00%		9.99 Ω	11.21%		10.13 Ω	12.47%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	1.37%		401 kΩ	10.27%		404 kΩ	10.78%		390 kΩ	7.67%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	15.46%		39.50 mH	13.77%		29.99 mH	13.57%		33.00 mH	3.22%
L <sub>2p</sub>	34.06 mH	13.77%		29.50 mH	15.46%		31.50 mH	8.13%		33.50 mH	1.67%
L <sub>M</sub>	90.21 H	9.41%		94.50 H	4.54%		93.50 H	3.52%		95.86 H	5.89%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	10.51%		7.15 uF	0.00%		7.65 uF	6.54%		7.60 uF	5.88%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	1.00%		6.99 uF	1.29%		7.55 uF	6.23%		7.18 uF	1.44%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	13.55%		4.01 uF	0.25%		4.55 uF	11.65%		4.40 uF	8.71%

**% DE DIFERENCIA DE VALORES CALCULADOS A ESTIMADOS A 17KV**

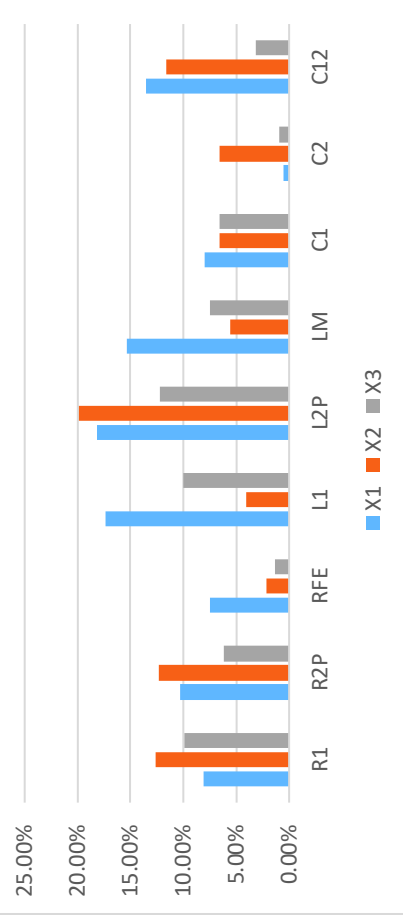


**Figura A.9.-** Parámetros Eléctricos estimados a 17kV con método Trust Region Reflective

**Tabla A.10.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 40kV con método Trust Region Reflective

40kV Trust Region Reflective											
PARÁMETROS CALCULADOS	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	9.65 Ω	8.08%	10.15 Ω	12.61%		9.85 Ω	9.95%		9.88 Ω	10.25%
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	9.89 Ω	10.31%	10.12 Ω	12.35%		9.45 Ω	6.14%		9.82 Ω	9.67%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	389 kΩ	7.46%	368 kΩ	2.17%		365 kΩ	1.37%		374 kΩ	3.74%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	41.20 mH	17.33%	35.50 mH	4.06%		37.85 mH	10.01%		38.18 mH	10.80%
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	41.60 mH	18.13%	42.50 mH	19.86%		38.78 mH	12.17%		40.96 mH	16.85%
L <sub>M</sub>	90.21 H	106.50 H	15.30%	95.50 H	5.54%		97.50 H	7.48%		99.83 H	9.64%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	7.77 uF	7.98%	7.65 uF	6.54%		7.65 uF	6.54%		7.69 uF	7.02%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	7.12 uF	0.56%	7.58 uF	6.60%		7.15 uF	0.98%		7.28 uF	2.79%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	4.65 uF	13.55%	4.55 uF	11.65%		4.15 uF	3.13%		4.45 uF	9.66%

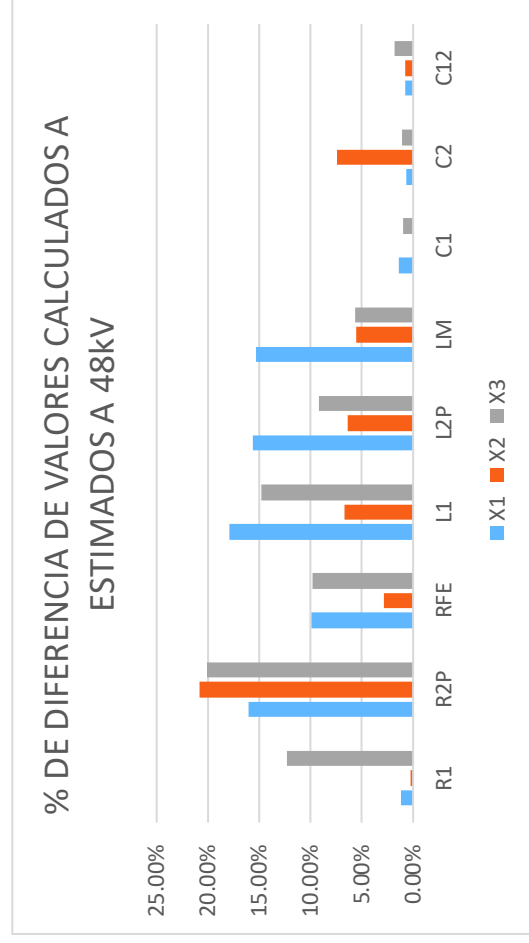
**% DE DIFERENCIA DE VALORES CALCULADOS A ESTIMADOS A 40kV**



**Figura A.10.-** Parámetros Eléctricos estimados a 40kV con método Trust Region Reflective

**Tabla A.11.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 48kV con método Trust Region Reflective

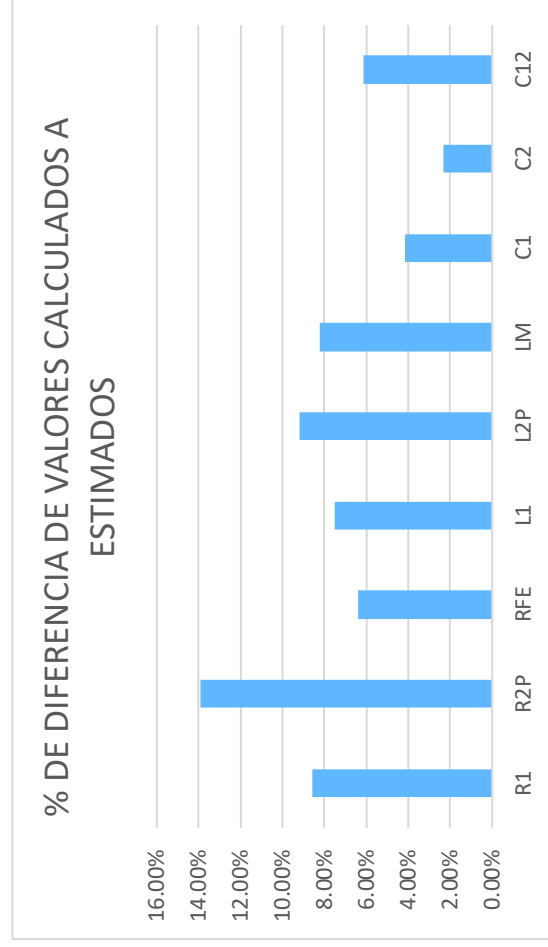
48kV Trust Region Reflective											
PARÁMETROS CALCULADOS	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	1.22%		8.85 Ω	0.23%		10.11 Ω	12.27%		9.31 Ω	4.76%
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	16.00%		11.20 Ω	20.80%		11.10 Ω	20.09%		10.95 Ω	19.02%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	9.89%		371 kΩ	2.83%		399 kΩ	9.82%		390 kΩ	7.63%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	17.93%		36.50 mH	6.68%		39.99 mH	14.83%		39.33 mH	13.40%
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	15.59%		36.40 mH	6.43%		37.50 mH	9.17%		38.08 mH	10.56%
L <sub>M</sub>	90.21 H	15.30%		95.50 H	5.54%		95.60 H	5.64%		99.20 H	9.06%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	1.42%		7.15 uF	0.00%		7.08 uF	0.99%		7.09 uF	0.80%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	0.71%		7.65 uF	7.45%		7.16 uF	1.12%		7.28 uF	2.75%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	0.74%		3.99 uF	0.75%		3.95 uF	1.77%		4.00 uF	0.58%



**Figura A.11.-** Parámetros Eléctricos estimados a 48kV con método Trust Region Reflective

**Tabla A.12.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados con método Trust Region Reflective

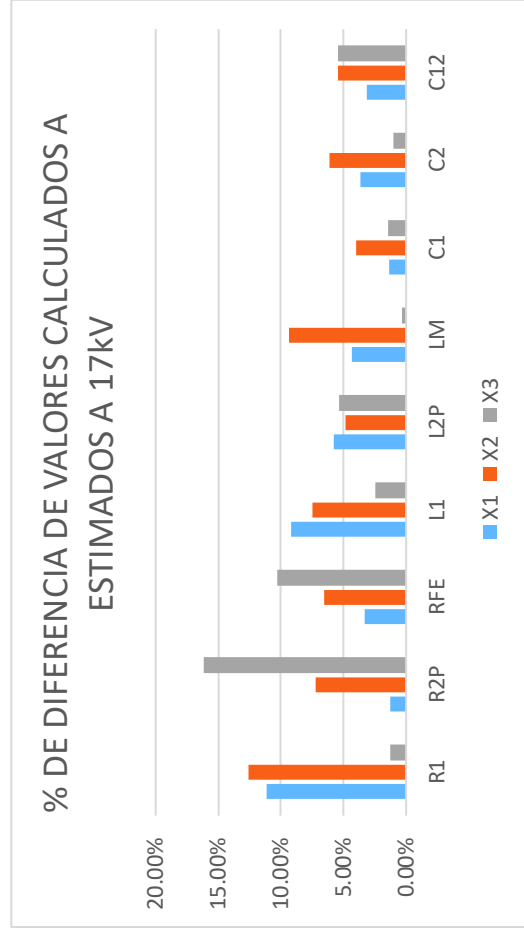
RESULTADOS PROMEDIADOS Trust Region Reflective		
PARÁMETROS CALCULADOS	ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	8.57%
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	13.90%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	6.38%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	7.54%
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	9.21%
L <sub>M</sub>	90.21 H	8.23%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	4.16%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	2.33%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	6.15%



**Figura A.12.-** Parámetros Eléctricos estimados con método Trust Region Reflective

**Tabla A.13.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 17kV con método Levenberg-Marquardt

17kV Levenberg-Marquardt											
PARÁMETROS CALCULADOS	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	9.98 Ω	11.12%		10.15 Ω	12.61%		8.98 Ω	1.22%		9.70 Ω	8.59%
R <sub>2p</sub>	8.98 Ω	1.22%		9.56 Ω	7.22%		10.58 Ω	16.16%		9.71 Ω	8.62%
R <sub>FE</sub>	372 kΩ	3.28%		385 kΩ	6.52%		401 kΩ	10.27%		386 kΩ	6.78%
L <sub>1</sub>	37.50 mH	9.17%		36.80 mH	7.45%		33.25 mH	2.44%		35.85 mH	4.99%
L <sub>2p</sub>	36.15 mH	5.78%		32.50 mH	4.80%		32.33 mH	5.35%		33.66 mH	1.19%
L <sub>M</sub>	94.30 H	4.34%		99.50 H	9.34%		90.50 H	0.32%		94.77 H	4.81%
C <sub>1</sub>	7.25 uF	1.38%		7.45 uF	4.03%		7.05 uF	1.42%		7.25 uF	1.38%
C <sub>2</sub>	7.35 uF	3.67%		7.54 uF	6.10%		7.15 uF	0.98%		7.35 uF	3.63%
C <sub>12</sub>	4.15 uF	3.13%		4.25 uF	5.41%		4.25 uF	5.41%		4.22 uF	4.66%

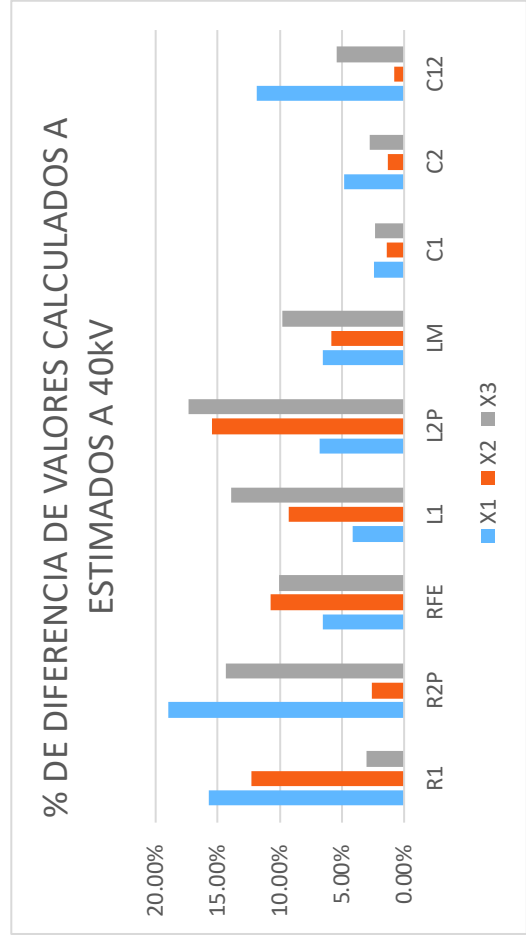


**Figura A.13.-** Parámetros Eléctricos estimados a 17kV con método Levenberg-Marquardt



**Tabla A.14.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 40kV con método Levenberg-Marquardt

40kV Levenberg-Marquardt											
PARÁMETROS CALCULADOS	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	10.52 Ω	15.68%	10.11 Ω	12.27%		9.15 Ω	3.06%		9.93 Ω	10.64%
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	10.95 Ω	19.00%	9.11 Ω	2.63%		10.36 Ω	14.38%		10.14 Ω	12.52%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	385 kΩ	6.54%	325 kΩ	10.77%		400 kΩ	10.05%		370 kΩ	2.74%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	35.52 mH	4.11%	37.56 mH	9.32%		39.56 mH	13.90%		37.55 mH	9.29%
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	36.56 mH	6.84%	29.50 mH	15.46%		41.20 mH	17.33%		35.75 mH	4.74%
L <sub>M</sub>	90.21 H	96.56 H	6.58%	85.20 H	5.88%		100.00 H	9.79%		93.92 H	3.95%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	7.33 uF	2.46%	7.25 uF	1.38%		7.32 uF	2.32%		7.30 uF	2.05%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	7.44 uF	4.84%	6.99 uF	1.29%		6.89 uF	2.76%		7.11 uF	0.38%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	4.56 uF	11.84%	3.99 uF	0.75%		4.25 uF	5.41%		4.27 uF	5.78%

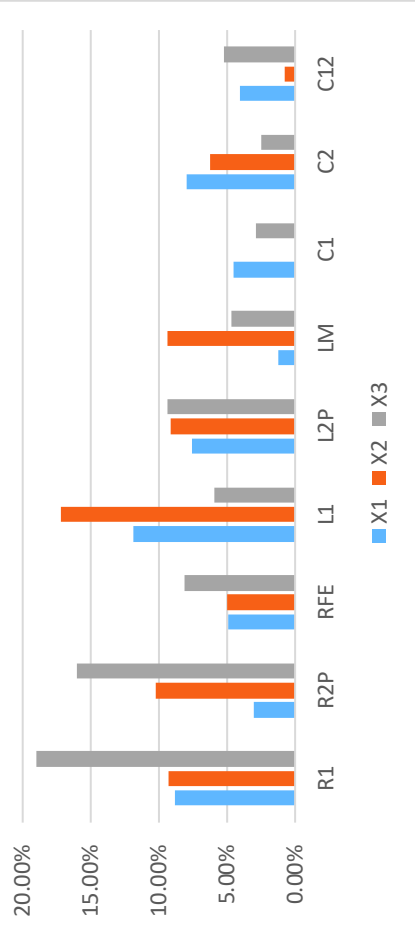


**Figura A.14.-** Parámetros Eléctricos estimados a 40kV con método Levenberg-Marquardt

**Tabla A.15.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 48kV con método Levenberg-Marquardt

48kV Levenberg-Marquardt											
PARÁMETROS CALCULADOS	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.15 Ω	8.83%		9.78 Ω	9.30%		10.95 Ω	19.00%		9.63 Ω	7.86%
R <sub>2P</sub>	8.15 Ω	3.06%		9.88 Ω	10.22%		10.56 Ω	16.00%		9.86 Ω	10.07%
R <sub>FE</sub>	379 kΩ	4.89%		379 kΩ	5.01%		333 kΩ	8.11%		364 kΩ	0.96%
L <sub>1</sub>	38.65 mH	11.88%		41.15 mH	17.23%		32.15 mH	5.94%		37.32 mH	8.73%
L <sub>2P</sub>	36.85 mH	7.57%		37.50 mH	9.17%		31.15 mH	9.34%		35.17 mH	3.15%
L <sub>M</sub>	91.32 H	1.21%		99.50 H	9.34%		86.15 H	4.71%		92.32 H	2.29%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	4.54%		7.15 uF	0.00%		7.36 uF	2.85%		7.33 uF	2.50%
C <sub>2</sub>	7.69 uF	7.93%		7.55 uF	6.23%		7.26 uF	2.48%		7.50 uF	5.60%
C <sub>12</sub>	4.19 uF	4.06%		3.99 uF	0.75%		4.24 uF	5.19%		4.14 uF	2.90%

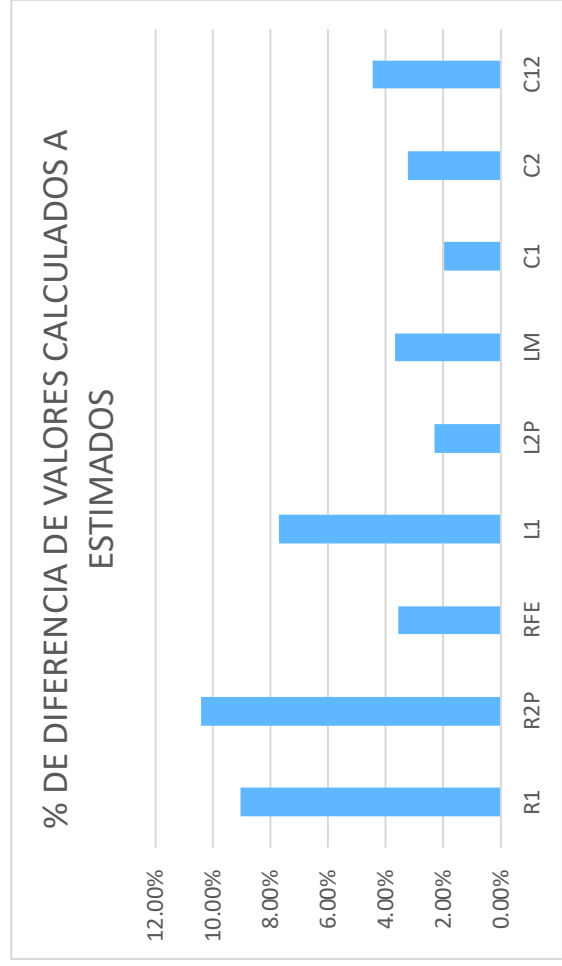
**% DE DIFERENCIA DE VALORES CALCULADOS A ESTIMADOS A 48kV**



**Figura A.15.-** Parámetros Eléctricos estimados a 48kV con método Levenberg-Marquardt

**Tabla A.16.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados con método Levenberg-Marquardt

RESULTADOS PROMEDIADOS Levenberg-Marquardt			
PARÁMETROS CALCULADOS		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	9.75 Ω	9.05%
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	9.90 Ω	10.43%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	373 kΩ	3.56%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	36.90 mH	7.71%
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	34.86 mH	2.29%
L <sub>M</sub>	90.21 H	93.67 H	3.69%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	7.29 uF	1.98%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	7.32 uF	3.25%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	4.21 uF	4.46%

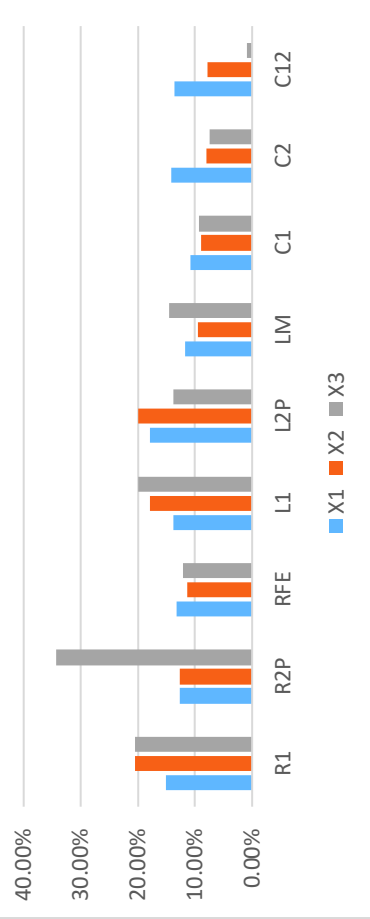


**Figura A.16.-** Parámetros Eléctricos estimados con método Levenberg-Marquardt

**Tabla A.17.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 17kV con método Pattern Search

17kV Pattern Search											
PARÁMETROS CALCULADOS	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	15.12%		11.15 Ω	20.45%		11.16 Ω	20.52%		10.92 Ω	18.77%
R <sub>2p</sub>	8.87 Ω	12.61%		10.15 Ω	12.61%		13.50 Ω	34.30%		11.27 Ω	21.27%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	13.25%		407 kΩ	11.44%		410 kΩ	12.09%		410 kΩ	12.27%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	13.77%		41.50 mH	17.93%		42.50 mH	19.86%		41.17 mH	17.26%
L <sub>2p</sub>	34.06 mH	17.93%		42.50 mH	19.86%		39.50 mH	13.77%		41.17 mH	17.26%
L <sub>M</sub>	90.21 H	11.82%		99.60 H	9.43%		105.60 H	14.57%		102.50 H	11.99%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	10.74%		7.85 uF	8.92%		7.89 uF	9.38%		7.92 uF	9.68%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	14.18%		7.69 uF	7.93%		7.65 uF	7.45%		7.86 uF	9.96%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	13.55%		4.36 uF	7.80%		3.98 uF	1.01%		4.33 uF	7.16%

**% DE DIFERENCIA DE VALORES CALCULADOS A ESTIMADOS A 17kV**

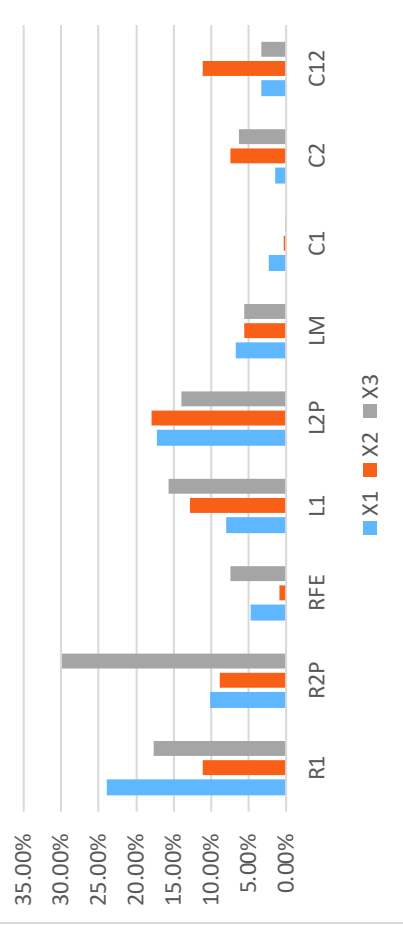


**Figura A.17.-** Parámetros Eléctricos estimados a 17kV con método Pattern Search

**Tabla A.18.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 40kV con método Pattern Search

40kV Pattern Search											
PARÁMETROS CALCULADOS	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	11.65 Ω	23.86%	9.98 Ω	11.12%		10.78 Ω	17.72%		10.80 Ω	17.90%
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	9.87 Ω	10.13%	8.15 Ω	8.83%		12.65 Ω	29.88%		10.22 Ω	13.24%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	378 kΩ	4.76%	357 kΩ	0.95%		389 kΩ	7.46%		375 kΩ	3.88%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	31.52 mH	8.06%	30.20 mH	12.78%		29.45 mH	15.65%		30.39 mH	12.08%
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	29.06 mH	17.21%	41.50 mH	17.93%		39.56 mH	13.90%		36.71 mH	7.21%
L <sub>M</sub>	90.21 H	96.74 H	6.75%	95.60 H	5.64%		85.40 H	5.63%		92.58 H	2.56%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	6.99 uF	2.29%	7.13 uF	0.28%		7.16 uF	0.14%		7.09 uF	0.80%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	6.98 uF	1.43%	7.65 uF	7.45%		7.56 uF	6.35%		7.40 uF	4.28%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	4.16 uF	3.37%	4.52 uF	11.06%		3.89 uF	3.34%		4.19 uF	4.06%

**% DE DIFERENCIA DE VALORES CALCULADOS A ESTIMADOS A 40kV**

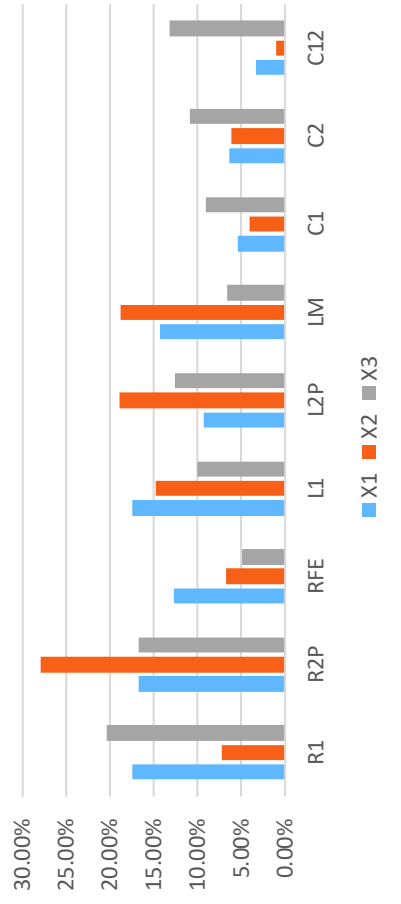


**Figura A.18.-** Parámetros Eléctricos estimados a 40kV con método Pattern Search

**Tabla A.19.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados a 48kV con método Pattern Search

48kV Pattern Search											
PARÁMETROS CALCULADOS	H-X1			H-X2			H-X3			PROMEDIO	
	ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA		ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	10.75 Ω	17.49%	9.56 Ω	7.22%		11.15 Ω	20.45%		10.49 Ω	15.42%
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	10.65 Ω	16.71%	12.30 Ω	27.89%		10.65 Ω	16.71%		11.20 Ω	20.80%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	413 kΩ	12.74%	386 kΩ	6.74%		379 kΩ	4.89%		392 kΩ	8.25%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	41.25 mH	17.43%	39.99 mH	14.83%		37.85 mH	10.01%		39.70 mH	14.20%
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	37.56 mH	9.32%	41.99 mH	18.89%		38.95 mH	12.55%		39.50 mH	13.77%
L <sub>M</sub>	90.21 H	105.23 H	14.27%	111.11 H	18.81%		96.55 H	6.57%		104.30 H	13.51%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	7.56 uF	5.42%	7.45 uF	4.03%		7.86 uF	9.03%		7.62 uF	6.21%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	7.56 uF	6.35%	7.54 uF	6.10%		7.95 uF	10.94%		7.68 uF	7.85%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	3.89 uF	3.34%	3.98 uF	1.01%		4.63 uF	13.17%		4.17 uF	3.52%

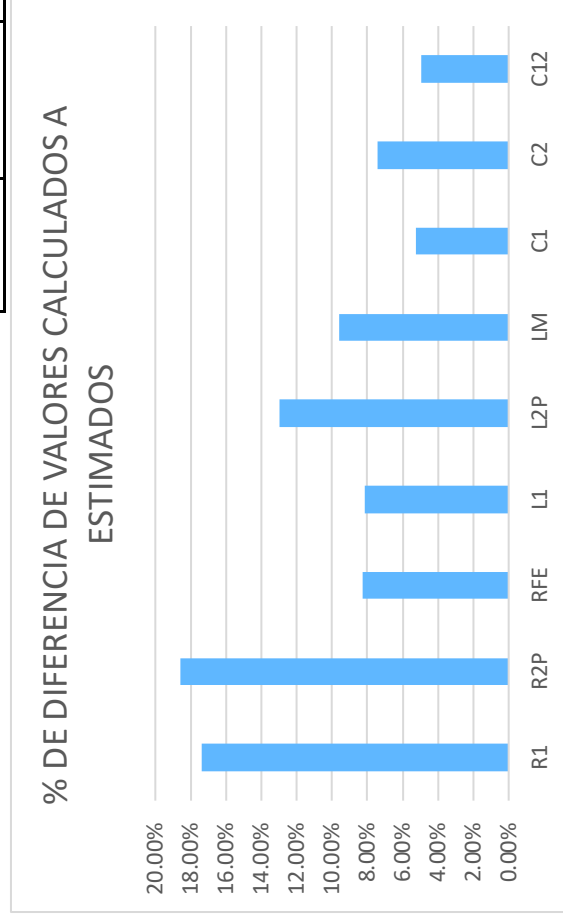
**% DE DIFERENCIA DE VALORES CALCULADOS A ESTIMADOS A 48kV**



**Figura A.19.-** Parámetros Eléctricos estimados a 48kV con método Pattern Search

**Tabla A.20.-** Tabla de Parámetros Eléctricos estimados con método Pattern Search

RESULTADOS PROMEDIADOS Pattern Search		
PARÁMETROS CALCULADOS	ESTIMADOS	% DIFERENCIA
R <sub>1</sub>	8.87 Ω	17.39%
R <sub>2P</sub>	8.87 Ω	18.60%
R <sub>FE</sub>	360 kΩ	8.26%
L <sub>1</sub>	34.06 mH	8.16%
L <sub>2P</sub>	34.06 mH	12.94%
L <sub>M</sub>	99.21 H	9.60%
C <sub>1</sub>	7.15 uF	5.23%
C <sub>2</sub>	7.08 uF	7.42%
C <sub>12</sub>	4.02 uF	4.94%



**Figura A.20.-** Parámetros Eléctricos estimados con método Pattern Search

## **ORDEN DE EMPASTADO**