

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



**Estudio y Evaluación del Fenómeno de Ferresonancia en  
Subestaciones Eléctricas de Distribución.**

PRESENTADO POR:

**MIGUEL ALONSO ALBERTO PARADA**

**AMILCAR ALEXANDER BARRIENTOS AGUILAR**

**ELIEZER ASAHEL ROSA PASASIN**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO DEL 2015.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR :**

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

**SECRETARIA GENERAL :**

**DRA. ANA LETICIA ZAVALETA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

**DECANO :**

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**SECRETARIO :**

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA**

**DIRECTOR :**

**MSC. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

Título :

**Estudio y Evaluación del Fenómeno de Ferroresonancia en  
Subestaciones Eléctricas de Distribución.**

Presentado por :

**MIGUEL ALONSO ALBERTO PARADA  
AMILCAR ALEXANDER BARRIENTOS AGUILAR  
ELIEZER ASAHEL ROSA PASASIN**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**ING. ARMANDO MARTINEZ CALDERON.**

San Salvador, Agosto del 2015.

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN.**

## ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, jueves 13 de agosto de 2015, en la Sala de Reuniones de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 4:30 horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. MSc. e Ing. José Wilber Calderón Urrutia  
Director

Firma:  

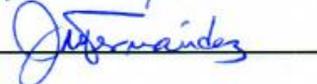

2. MSc. e Ing. Salvador de Jesús Germán  
Secretario

Firma:  




Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

1- Ing. Armando Martínez Calderón

Firma:  
  
  


2- Msc. Luís Roberto Chévez Paz

3- Ing. José Miguel Hernández

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

Estudio y Evaluación del Fenómeno de Ferresonancia en Subestaciones Eléctricas de Distribución.

A cargo de los Bachilleres:

- Alberto parada Miguel Alonso
- Barrientos Aguilar Amilcar Alexander
- Rosa Pasasin Eliezar Asahel

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 9.1

( nueve punto uno )

## **MIGUEL ALONSO ALBERTO PARADA**

### **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente es necesario dar gracias a Dios por permitirme culminar una etapa académica de mi vida para así posteriormente continuar con una nueva etapa como profesional. Agradecer la sabiduría e inteligencia brindada durante todo el proceso.

A mis padres Dimas Humberto y Irma Maritza por su ayuda incondicional en cada paso de mi carrera y mi vida, por sus consejos en los momentos más difíciles, y cuando más los necesitaba y sobre todo el esfuerzo de ellos realizaron para poder sacarme adelante.

A mi abuela y tías, principalmente a Francisca Majano, Yesenia Osiris, Celia Margarita y Elsy Lorena, por su gran cariño y comprensión dado en toda mi vida, su apoyo incondicional en los momentos más difíciles de mi vida, sus palabras de sabiduría y aliento para seguir adelante.

A mis hermanos por ser modelos a seguir en mi vida y apoyarme en cada momento que los necesitara.

A mis compañeros por la compañía y ayuda recibida en esta etapa de mi vida y por los momentos alegres que compartimos.

## **AMILCAR ALEXANDER BARRIENTOS AGUILAR**

### **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco de una manera muy especial a Dios y a mis padres por su amor y paciencia ya que ellos fueron los principales encargados del cimiento de mi vida profesional, inculcándome el deseo de superación y demostrándome con su ejemplo que las metas son alcanzables, que una caída no es una derrota sino más bien el principio de una lucha que termina con Logros y Éxitos. Gracias por siempre orientarme en todo lo que soy y ayudarme siempre a salir adelante a pesar de cualquier inconveniente. Este triunfo no solo es mío sino también de ustedes.

También agradezco a mis hermanos Amilcar Ernesto Barrientos y William Amilcar Barrientos quienes con su ejemplo me motivaron cada día a salir adelante y culminar mi carrera, sin dejar de lado sus consejos y el apoyo brindado desde el inicio de mi carrera hasta el final de ella, sé que tampoco fue fácil pero ahora puedo decirles gracias por TODO.

A mis amigos Esteban Linares, Moisés Martínez, Miguel Cárcamo, Rafael Peñate, Valentín Bolaños y a Mauricio Rodríguez, ya que gracias a sus consejos y ánimos no hubiera sido posible alcanzar todos los logros obtenidos, incluyendo esta tesis.

Agradezco al Sr. Posada y a mis compañeros, con quienes hemos luchado contra toda adversidad en la carrera y que gracias a la ayuda de todos y la ayuda de Dios hemos salido adelante.

### **DEDICATORIA**

A **DIOS**, por estar siempre a mi lado y regalarme la sabiduría necesaria para salir adelante. Señor ahora puedo decir “TODO LO PUEDO EN CRISTO QUE ME FORTALECE”.

## **ELIEZER ASAHIEL ROSA PASASIN**

### **AGRADECIMIENTO**

**A:**

**DIOS:** Por Darme la vida, sabiduría, fortaleza y confianza, para lograr salir adelante y poder así culminar mi carrera.

**MIS PADRES:** Que me han conducido por la vida con amor y paciencia, hoy ven forjado un anhelo, por compartir mis momentos felices y tristeza, por guiarme por el sendero del bien y encaminarme en la vida con la seguridad de una profesión, por sus oraciones, por su apoyo en el logro de todas mis metas.

**MIS HERMANOS:** Sobrinos, cuñadas, por brindarme su apoyo y estar en los momentos difíciles a mi lado.

**MI FAMILIA:** Mi suegro, suegra y cuñadas, por todo su apoyo y ayuda. Por sustituir de alguna forma el hogar que por diferentes motivos tuve que abandonar para incorporarme a mi vida laboral y estudiantil.

**MIS MAESTROS:** por todo su apoyo y conocimiento brindado en toda nuestra formación académica.

**LABORATORISTAS:** Salvador Posada y Juan Olano, en el préstamo de herramienta y equipo, así como la colaboración oportuna para lograr desarrollar este trabajo de graduación.

**Para todos mis amigos y compañeros de trabajo, se les agradece de gran manera por todo el apoyo y tiempo brindado.**

### **DEDICATORIA.**

**MI ESPOSA (QEPD): Linda Norabeth Pérez Villalta,** Quien en vida fue un pilar muy importante y me brindo todo su apoyo y comprensión en todo momento para lograr esta meta, por razones del destino ya no está a nuestro lado, pero si su recuerdo y semilla, solo puedo decirte hasta el cielo, muchas gracias y siempre estarás en un lugar muy especial de mi corazón.

**MI HIJO:** Por el tiempo que le pertenecía y que altruistamente me concedió y porque su presencia ha sido y será siempre el motivo más grande que me ha impulsado para lograr esta meta.

**Porque Jehová da la sabiduría y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia. (Proverbios 2:6)**

**Que Dios los bendiga, muchas gracias.**

# INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
<b>CAPITULO I. CONCEPTOS BASICOS, DEFINICION DE RESONANCIA Y FERRORESONANCIA. ....</b>	<b>13</b>
1.0 ANTECEDENTES.....	13
1.1 CONCEPTOS BASICOS.....	14
1.2 DEFINICION DE RESONANCIA PARA ELEMENTOS ELECTRICOS.....	20
1.2.1 Resonancia en circuitos series RLC lineal.....	21
1.2.2 Resonancia en circuitos series RLC no lineal.....	23
1.3 DEFINICION DE FERRORESONANCIA.....	26
1.4 CLASIFICACION DE LA FERRORESONANCIA DE ACUERDO A SU COMPORTAMIENTO.....	29
1.4.1 Ferroresonancia Fundamental.....	29
1.4.2 Ferroresonancia Subarmónica.....	29
1.4.3 Ferroresonancia Quasiperiódica.....	30
1.4.4 Ferroresonancia Caótica.....	30
<b>CAPITULO II. FERRORESONANCIA EN SUBESTACIONES ELECTRICAS.....</b>	<b>31</b>
2.0 COMPORTAMIENTO NO LINEAL DEL TRANSFORMADOR.....	31
2.1 MODELO DE FERRORESONANCIA EN SISTEMAS ELECTRICOS MONOFÁSICOS.....	31
2.2 MODELOS DE FERRORESONANCIA EN SISTEMAS ELECTRICOS TRIFÁSICOS.....	32
2.3 REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA SUBTERRÁNEO COMO UN SISTEMA CABLE- TRANSFORMADOR.....	39
2.3.1 Diagrama unifilar.....	40
2.3.2 Circuito de Representación Cable-Transformador.....	40
2.4 PROCEDIMIENTO A SEGUIR PARA EL CÁLCULO DE LA LONGITUD CRÍTICA DE LOS CABLES DE ALIMENTACIÓN DE UNA SUBESTACION ELECTRICA.....	41
<b>CAPITULO III. INDICADORES, EFECTOS Y ESTRATEGIAS PARA EVITAR LA FERRORESONANCIA EN UN SISTEMA ELECTRICO.....</b>	<b>49</b>
3.0 CONDICIONES BASICAS DE UN SISTEMA ELECTRICO, PARA QUE LA FERRORESONANCIA PUEDA PRESENTARSE.....	49
3.0.1 Parámetros de alteración.....	50
3.0.2 Reactancia de magnetización de los transformadores.....	51
3.0.3 Reactancia capacitiva de los cables de alimentación.....	51
3.0.4 Resistencia.....	51
3.1 INDICADORES Y EFECTOS PRODUCIDOS POR LA FERRORESONANCIA.....	51

3.1.1 Fallas y daños en los pararrayos.....	51
3.1.2 Distorsión de la forma de onda de los voltajes y las corrientes.....	52
3.1.3 Sobre-calentamiento en el núcleo de los transformadores.....	52
3.1.4 Calentamiento en partes metálicas de los transformadores.....	53
3.1.5 Ruido audible .....	53
3.1.6 Flicker.....	53
3.1.7 Sobretensiones.....	53
3.2 SOLUCIONES PROPUESTAS PARA MITIGAR LAS SOBRTENSIONES PRODUCIDAS POR LA FERRORESONANCIA. ....	54
<b>CAPITULO IV. IMPLEMENTACION DEL FENOMENO DE LA FERRORESONANCIA EN EL LABORATORIO. ....</b>	<b>56</b>
4.0 EQUIPO Y MATERIALES UTILIZADOS.....	56
4.1 ENSAYO DE VACIO, CORTOCIRCUITO Y RESISTENCIA OHMICA EN EL TRANSFORMADOR.....	56
4.1.1 Ensayo de vacío. ....	57
4.1.2 Ensayo de Cortocircuito. ....	58
4.1.3 Resistencia óhmica de las bobinas:.....	59
4.2 LEVANTAMIENTO DE CURVA DE MAGNETIZACION. ....	60
4.3 INTRODUCCION AL SOTFWARE ATP-EMTP. ....	62
4.3.1 Editor Gráfico: ATPDraw v3.8.....	64
4.3.2 Entorno de Trabajo.....	64
4.3.3 Elementos básicos del ATPDraw. ....	65
4.4 ANALISIS DE CIRCUITOS RESONANTES MONOFASICOS. ....	66
4.4.1 Cálculos Teóricos:.....	66
4.5 CIRCUITOS FERRORESONANTES MONOFASICOS IMPLEMENTADOS EN EL LABORATORIO...	67
4.5.1 Circuitos RLC Series Lineales. ....	67
4.5.2 Circuitos LC Series no Lineales. ....	70
4.6 CREACION DE CIRCUITOS MONOFASICOS FERRORESONANTES EN ATPDraw. ....	71
4.7 ESTUDIO CON ATPDraw DE SOBRETENSIONES POR MANIOBRA DE INTERRUPTORES.....	78
4.7.1 Línea Eléctrica en Vacío.....	79
4.8 SIMULACION DE TRANSFORMADOR TRIFASICO SATURABLE EN VACIO UTILIZANDO ATPDRAW.....	80

<b>CAPITULO V. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANALISIS DE CIRCUITOS MONOFASICOS FERRORESONANTES.</b> .....	<b>84</b>
5.0 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS CIRCUITOS RESONANTES MONOFASICOS IMPLEMENTADOS EN EL LABORATORIO. ....	84
5.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS CIRCUITOS RESONANTES MONOFASICOS EN VACIO, IMPLEMENTADOS EN EL LABORATORIO. ....	85
5.1.1 Circuito Resonante con Transformador y Capacitancia de 6 $\mu$ f. ....	85
5.1.2 Circuito Resonante con Transformador y Capacitancia de 10 $\mu$ f. ....	90
5.1.3 Circuito Resonante con Transformador y Capacitancia de 15 $\mu$ F. ....	95
5.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS CIRCUITOS RESONANTES MONOFASICOS, UTILIZANDO UNA PEQUEÑA CARGA RESISTIVA EN EL SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR. ....	100
5.2.1 Circuito Resonante con Transformador y Carga en el Secundario Utilizando Capacitancia De 6 $\mu$ F. ....	101
5.2.2 Circuito Resonante con Transformador y Carga en el Secundario Utilizando Capacitancia de 10 $\mu$ F. ....	102
5.2.3 Circuito Resonante con Transformador y Carga en el Secundario Utilizando Capacitancia de 15 $\mu$ F. ....	103
5.3 DISEÑO DE MODULO DE PRUEBAS PARA SISTEMAS FERRORESONANTES MONOFASICOS. ....	104
5.4 OPERACIÓN DE MODULO DE PRUEBAS PARA SISTEMAS FERRORESONANTES MONOFASICOS. ....	107
5.5 CALCULO DE LONGITUD DE CABLE EQUIVALENTE CON LAS CAPACITANCIAS UTILIZADAS. ....	111
<b>CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b> .....	<b>112</b>
6.0 CONCLUSIONES. ....	112
6.1 RECOMENDACIONES. ....	114
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.</b> .....	<b>115</b>
<b>ANEXOS.</b> .....	<b>116</b>
GLOSARIO .....	116
APENDICE 1 .....	118
A1.0 CURVAS DE MAGNETIZACIÓN TÍPICAS. ....	118
APENDICE 2 .....	121
A2.0 CÁLCULO DE CAPACITANCIAS Y RESISTENCIAS PARA CABLES MONOPOLARES APANTALLADOS CON AISLAMIENTO XLPE. ....	121
EJEMPLOS. ....	124

A2.1 ANÁLISIS DE UN CIRCUITO SUSCEPTIBLE A FERRORESONANCIA.....	124
APENDICE 3 .....	132
A3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS CABLES MONOPOLARES. ....	132
APENDICE 4 .....	139
A4.1 DETERMIJNACION DEL PORCENTAJE DE CARGA RESISTIVA. ....	139
APENDICE 5 .....	143
Norma: C57.105-1978-R1999-IEEE-Guide-for-Application-of-Transformer-Connections-in-Three-Phase-Distribution-Systems-1 .....	143
APENDICE 6 .....	151
GUIAS DE LABORATORIO A IMPLEMENTAR. ....	151
GUIA DE LABORATORIO # 1.....	151
GUIA DE LABORATORIO # 2.....	162
GUIA DE LABORATORIO # 3.....	171

# INDICE DE IMÁGENES

	Pág.
<b>CAPITULO I.</b>	
<b>Imagen 1.1</b> Curva de magnetización con respecto a la Densidad de Flujo [B] vrs Intensidad magnética [H].....	16
<b>Imagen 1.2</b> Curva o lazo de histéresis trazado por el flujo en un núcleo cuando se le aplica una corriente $i(t)$ .....	16
<b>Imagen 1.3</b> Estructura magnética de un transformador de núcleo de hierro, con sus respectivos diagramas esquemáticos y circuitos magnéticos. ....	17
<b>Imagen 1.4</b> Corriente de magnetización causada por el flujo en el núcleo del transformador. ....	19
<b>Imagen 1.5</b> Circuito Resonante Serie.....	20
<b>Imagen 1.6</b> El circuito RLC-serie.....	21
<b>Imagen 1.7</b> Diagrama fasorial de las tensiones dadas para el circuito serie LC.....	22
<b>Imagen 1.8</b> Circuito RLC. ....	22
<b>Imagen 1.9</b> Corriente de un circuito RLC, con R y L fijos en función de XL. ....	23
<b>Imagen 1.10</b> Circuito LC serie no lineal. ....	23
<b>Imagen 1.11</b> Gráfica para analizar el circuito LC no lineal. ....	24
<b>Imagen 1.12</b> Efecto del aumento de Capacitancia en el Circuito.....	24
<b>Imagen 1.13</b> Diagramas fasoriales, en los puntos de operación de la componente fundamental del circuito LC serie no lineal, (a) Caso inductivo (puntos 1 y 2), (b) Caso capacitivo (punto3).....	25
<b>Imagen 1.14</b> Gráfica de inductancias lineales y no lineales. ....	26
<b>Imagen 1.15</b> Gráfica I vrs XC en un circuito RCL con inductancia saturable. ....	26
<b>Imagen 1.16</b> Gráfica característica de impedancia de inductiva y de distintas inductancias capacitancias. ....	27
<b>Imagen 1.17</b> Tensiones y corrientes típicas observadas en un circuito Ferroresonante RLC. ....	28
<b>Imagen 1.18</b> Ejemplo de Ferroresonancia Fundamental. ....	29
<b>Imagen 1.19</b> Ejemplo de Ferroresonancia Subarmónica. ....	30
<b>Imagen 1.20</b> Ejemplo de Ferroresonancia Caótica. ....	30
<b>CAPITULO II.</b>	
<b>Imagen 2.1</b> Sistema Monofásico básico con apertura de una Línea.....	32
<b>Imagen 2.2</b> Transformador trifásico sin carga que tiene efecto de ferroresonancia debido a falla de la Fase C.....	33
<b>Imagen 2.3</b> Circuito simplificado, utilizando las componentes fundamentales de las fuentes de alimentación. ....	34
<b>Imagen 2.4</b> Circuito simplificado de la trayectoria I y la trayectoria II. ....	35
<b>Imagen 2.5</b> Una línea abierta, transformadores en conexión estrella. ....	37
<b>Imagen 2.6</b> Dos líneas abiertas, transformadores en conexión estrella. ....	38
<b>Imagen 2.7</b> Circuito simplificado del caso IV. ....	38
<b>Imagen 2.8</b> Diagrama unifilar de un sistema eléctrico Subterráneo.....	40
<b>Imagen 2.9</b> Circuito de representación de conexión estrella-delta, de un sistema eléctrico subterráneo. ....	41

<b>Imagen 2.10</b> Caso de estudio. Dos líneas abiertas y transformadores en conexión estrella.....	46
<b>Imagen 2.11</b> Circuito simplificado para el caso de estudio.....	46
<b>Imagen 2.12</b> Comportamiento del voltaje de línea.....	46
<b>Imagen 2.13</b> Curva de magnetización V-I típica para devanados de 7.6 KV, en transformadores de distribución.....	47
<b>CAPITULO III.</b>	
<b>Imagen 3.1</b> Curva típica de capacidad de operación en sobrevoltajes, para pararrayos de distribución.....	52
<b>Imagen 3.2</b> Corrientes parásitas en el núcleo de los transformadores.....	53
<b>CAPITULO IV.</b>	
<b>Imagen 4.1</b> Circuito equivalente de transformador conectado en vacío.....	57
<b>Imagen 4.2</b> Circuito de conexión de prueba de vacío. ....	57
<b>Imagen 4.3</b> Circuito equivalente de transformador conectado en cortocircuito. ....	58
<b>Imagen 4.4</b> Circuito de conexión de prueba de cortocircuito.....	58
<b>Imagen 4.5</b> Esquema de transformador monofásico con separación de sus partes reales. ....	60
<b>Imagen 4.6</b> Diagrama de conexión para obtener curva de magnetización. ....	60
<b>Imagen 4.7</b> Curva de magnetización del transformador.....	61
<b>Imagen 4.8</b> Entorno de trabajo de ATPDraw. ....	64
<b>Imagen 4.9</b> Ventana de menú desplegable de elementos utilizados en ATPDraw.....	65
<b>Imagen 4.10</b> Diagrama de conexión para circuito resonante monofásico. ....	66
<b>Imagen 4.11</b> Conexión para realizar pruebas a circuito resonante monofásico. ....	67
<b>Imagen 4.12</b> Modelo de circuito LC serie lineal implementado en ATPDraw. ....	68
<b>Imagen 4.13</b> Resultados obtenidos en ATPDraw, al simular el circuito serie RLC lineal con un valor de capacitancia de 1.5 $\mu$ F.....	69
<b>Imagen 4.14</b> Forma de onda de corriente obtenida en ATPDraw, al simular el circuito serie RLC lineal, con un valor de capacitancia de 1.5 $\mu$ F. ....	69
<b>Imagen 4.15</b> Resultados obtenidos en ATPDraw, al simular el circuito serie RLC lineal, con un valor de capacitancia de 6 $\mu$ F.....	70
<b>Imagen 4.16</b> Esquema dibujado en ATPDraw, de circuitos ferrosesonantes monofásicos con devanado secundario del transformador en vacío. ....	70
<b>Imagen 4.17</b> Esquema dibujado en ATPDraw, de circuitos ferrosesonantes monofásicos utilizando una pequeña carga resistiva en el secundario del transformador. ....	71
<b>Imagen 4.18</b> Ventana de ATPDraw, fuente de voltaje monofásico AC type 14.....	72
<b>Imagen 4.19</b> Ventana de datos del elemento AC type 14, en ATPDraw. ....	72
<b>Imagen 4.20</b> Ventana Help del elemento AC type 14, en ATPDraw.....	73
<b>Imagen 4.21</b> Ventana de selección del tipo de capacitor a utilizar.....	73
<b>Imagen 4.22</b> Ventana de datos del elemento capacitivo en ATPDraw. ....	73
<b>Imagen 4.23</b> Esquema de Unión de Dos elementos en ATPDraw. ....	74
<b>Imagen 4.24</b> Ventana de ATPDraw, para selección de medidor de voltaje. ....	74
<b>Imagen 4.25</b> Ventana de ATPDraw, para selección de fases en el medidor de voltaje.....	74
<b>Imagen 4.26</b> Ventana de ATPDRAW, para selección de medidor de corriente.....	75
<b>Imagen 4.27</b> Ventana de ATPDraw, para selección de fases en el medidor de corriente. ....	75

<b>Imagen 4.28</b>	Menú de transformadores en ATPDraw.....	75
<b>Imagen 4.29</b>	Ventana de ATPDraw, para introducir los parámetros del transformador.....	76
<b>Imagen 4.30</b>	Ventana de ATPDraw, para carga de curva de saturación del transformador.....	76
<b>Imagen 4.31</b>	Modelo final simulado en ATPDraw.....	77
<b>Imagen 4.32</b>	Ventana de ATPDraw, para carga de curva de saturación del transformador.....	77
<b>Imagen 4.33</b>	Ventana de ATPDraw Setting.....	78
<b>Imagen 4.34</b>	Esquema dibujado en ATPDraw, para simular los circuitos resonantes monofásicos utilizando tres interruptores para simular un transitorio.....	79
<b>Imagen 4.35</b>	Resultado obtenido en ATPDraw, de la operación de un interruptor monofásico en un sistema eléctrico.....	80
<b>Imagen 4.36</b>	Resultado obtenido en ATPDraw, para la corriente del circuito simulado.....	80
<b>Imagen 4.37</b>	Esquema dibujado en ATPDraw, para simular un transformador trifásico saturable en vacío.....	81
<b>Imagen 4.38</b>	Ventana para introducir los respectivos parámetros del transformador saturable en ATPDraw.....	81
<b>Imagen 4.39</b>	Ventana para introducir los datos de carga de la curva de magnetización del transformador saturable en ATPDraw.....	82
<b>Imagen 4.0</b>	Forma de onda de los voltajes trifásicos observados en la simulación del transformador saturable en ATPDraw.....	82
<b>Imagen 4.41</b>	Forma de onda de las corrientes trifásicas observadas en la simulación del transformador saturable en ATPDraw.....	83
<b>CAPITULO V.</b>		
<b>Imagen 5.1</b>	Esquema dibujado en ATDRAW, para simular los circuitos resonantes monofásicos.....	85
<b>Imagen 5.2</b>	Sobretensiones en el capacitor y el transformador respecto a la tensión de la fuente en el circuito resonante utilizando la capacitancia de $6\mu\text{F}$ .....	86
<b>Imagen 5.3</b>	Forma de onda en el secundario del transformador antes de la saturación del circuito resonante construido con la capacitancia de $6\mu\text{F}$ .....	87
<b>Imagen 5.4</b>	Forma de onda en el secundario del transformador en saturación del circuito resonante construido con la capacitancia de $6\mu\text{F}$ .....	87
<b>Imagen 5.5</b>	Forma de onda de la corriente, del circuito resonante construido con la capacitancia de $6\mu\text{F}$ .....	88
<b>Imagen 5.6</b>	Comparación de sobretensiones en el capacitor respecto a la tensión de la fuente del circuito resonante utilizando la capacitancia de $6\mu\text{F}$ .....	89
<b>Imagen 5.7</b>	Comparación de sobretensiones en el transformador respecto a la tensión de la fuente del circuito resonante construido con la capacitancia de $6\mu\text{F}$ .....	89
<b>Imagen 5.8</b>	Valores de tensión en el secundario del transformador a tensión nominal, construido con la capacitancia de $6\mu\text{F}$ .....	90
<b>Imagen 5.9</b>	Forma de onda de corriente observada con ATPDraw, en circuito LC serie, con la capacitancia de $6\mu\text{F}$ .....	90
<b>Imagen 5.10</b>	Sobretensiones en el capacitor y el transformador respecto a la tensión de la fuente en el circuito resonante utilizando la capacitancia de $10\mu\text{F}$ .....	91
<b>Imagen 5.11</b>	Forma de onda del voltaje en el secundario del transformador antes de la condición de saturación utilizando un circuito resonante con la capacitancia de $10\mu\text{F}$ .....	92

<b>Imagen 5.12</b>	Forma de onda del voltaje en el secundario del transformador en condición de saturación y en un circuito resonante construido con capacitancia de $10\mu\text{F}$ .....	92
<b>Imagen 5.13</b>	Forma de onda de corriente en condición de saturación para el circuito resonante construido con la capacitancia de $10\mu\text{F}$ . .....	93
<b>Imagen 5.14</b>	Comparación de sobretensiones en el capacitor respecto a la tensión de la fuente del circuito resonante utilizando la capacitancia de $10\mu\text{F}$ . .....	94
<b>Imagen 5.15</b>	Comparación de sobretensiones en el transformador respecto a la tensión de la fuente del circuito resonante construido con la capacitancia de $10\mu\text{F}$ . .....	94
<b>Imagen 5.16</b>	Valores de tensión en el secundario del transformador a tensión nominal, construido con la capacitancia de $10\mu\text{F}$ . .....	95
<b>Imagen 5.17</b>	Forma de onda de corriente observada con ATPDRAW, en circuito LC serie, con capacitancia de $10\mu\text{F}$ .....	95
<b>Imagen 5.18</b>	Sobretensiones en el capacitor y el transformador respecto a la tensión de la fuente en el circuito resonante utilizando la capacitancia de $15\mu\text{F}$ .....	96
<b>Imagen 5.19</b>	Forma de onda de la tensión del secundario del transformador antes de la condición de saturación en el circuito resonante construido con la capacitancia de $15\mu\text{F}$ . .....	97
<b>Imagen 5.20</b>	Forma de onda de la tensión del secundario del transformador con condición de saturación en el circuito resonante construido con la capacitancia de $15\mu\text{F}$ . .....	97
<b>Imagen 5.21</b>	Forma de onda de la corriente en condición de saturación utilizando un circuito resonante construido con la capacitancia de $15\mu\text{F}$ . .....	98
<b>Imagen 5.22</b>	Comparación de sobretensiones en el capacitor respecto a la tensión de la fuente del circuito resonante utilizando la capacitancia de $15\mu\text{F}$ . .....	99
<b>Imagen 5.23</b>	Comparación de sobretensiones en el transformador respecto a la tensión de la fuente del circuito resonante construido con la capacitancia de $15\mu\text{F}$ . .....	99
<b>Imagen 5.24</b>	Forma de onda del secundario del transformador a tensión nominal, construido con la capacitancia de $15\mu\text{F}$ .....	99
<b>Imagen 5.25</b>	Forma de onda de corriente observada con ATPDRAW, en circuito LC serie, con la capacitancia de $15\mu\text{F}$ .....	100
<b>Imagen 5.26</b>	Circuito LC serie con una resistencia de carga en el secundario del transformador a simular en ATPDRAW. ....	101
<b>Imagen 5.27</b>	Circuito LC serie básico utilizado para diseño del módulo.....	105
<b>Imagen 5.28</b>	Parte frontal interna de módulo de prueba. ....	106
<b>Imagen 5.29</b>	Parte interna de módulo de prueba. ....	106
<b>Imagen 5.30</b>	Muestra de módulo de prueba ya finalizado.....	107
<b>Imagen 5.31</b>	Componentes eléctricos utilizados para el diseño del módulo de prueba. ....	108
<b>Imagen 5.32</b>	Bornera de conexión de entrada de fuente variable del módulo de prueba. ....	108
<b>Imagen 5.33</b>	Interruptor de encendido/apagado del módulo de prueba. ....	109
<b>Imagen 5.34</b>	Paro de emergencia del módulo de prueba.....	109
<b>Imagen 5.35</b>	Fusible de 9A para protección del módulo de prueba. ....	109
<b>Imagen 5.36</b>	Borneras de conexión de tierra del módulo de prueba. ....	110
<b>Imagen 5.37</b>	Borneras de conexión del módulo de prueba. ....	110
<b>Imagen 5.38</b>	Ejemplo de conexión de terminales de medidores al módulo de prueba.....	110

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>CAPITULO II</b>	
<b>Tabla 2.1</b> Valores mínimos de $X_c/X_m$ (K), dependiendo el sistema y la configuración .....	44
<b>CAPITULO IV</b>	
<b>Tabla 4.1</b> Datos del transformador Seco .....	56
<b>Tabla 4.2</b> Datos de la curva de magnetización del transformador, obtenidas con el analizador de redes Dranetz.....	61
<b>CAPITULO V</b>	
<b>Tabla 5.1</b> Datos experimentales del circuito resonante utilizando capacitancia de $6\mu\text{F}$ . .....	86
<b>Tabla 5.2</b> Datos obtenidos en ATPDRAW del circuito resonante utilizando capacitancia de $6\mu\text{F}$ . .....	88
<b>Tabla 5.3</b> Datos experimentales del circuito resonante utilizando capacitancia de $10\mu\text{F}$ . .....	91
<b>Tabla 5.4</b> Datos obtenidos en ATPDRAW del circuito resonante utilizando capacitancia de $10\mu\text{F}$ . .....	93
<b>Tabla 5.5</b> Datos experimentales del circuito resonante utilizando capacitancia de $15\mu\text{F}$ . .....	96
<b>Tabla 5.6</b> Datos obtenidos en ATPDRAW del circuito resonante utilizando capacitancia de $15\mu\text{F}$ . .....	98
<b>Tabla 5.7</b> Datos experimentales del circuito resonante utilizando capacitancia de $6\mu\text{F}$ . .....	101
<b>Tabla 5.8</b> Datos en ATPDRAW del circuito resonante utilizando capacitancia de $6\mu\text{F}$ . .....	102
<b>Tabla 5.9</b> Datos experimentales del circuito resonante utilizando capacitancia de $10\mu\text{F}$ . .....	102
<b>Tabla 5.10</b> Datos en ATPDRAW del circuito resonante utilizando capacitancia de $10\mu\text{F}$ . .....	103
<b>Tabla 5.11</b> Datos experimentales del circuito resonante utilizando capacitancia de $15\mu\text{F}$ . .....	103
<b>Tabla 5.12</b> Datos en ATPDRAW del circuito resonante utilizando capacitancia de $15\mu\text{F}$ . .....	104
<b>Tabla 5.13</b> Equivalentes de Valores de capacitancias en longitud de cable de potencia.....	111

## **PREFACIO.**

La Ferroresonancia es un problema que es común en los sistemas de potencia, este fenómeno se presenta generalmente en las subestaciones eléctricas, son varios factores del sistema los que lo pueden provocarlo, entre los principales son, la forma de construcción y características de los transformadores de potencia, los cuales se diseñan para que las pérdidas sean menores, el tipo de conexión de la subestación eléctrica, la longitud de la acometida, mala operación y maniobras de una subestación eléctrica.

Contribuye de gran manera, la impedancia de los transformadores la cual es no lineal, esto provoca que un sistema esté más propenso a producir resonancia con la combinación de alguna reactancia capacitiva, como la que puede generar un cable de potencia, un banco de capacitores o cualquier otro elemento del sistema que se comporte como una carga capacitiva.

Entonces se puede decir que el fenómeno se genera cuando la impedancia de un transformador de una subestación eléctrica se sintoniza con la capacitancia producida por el punto de conexión entre la red y el transformador, se pueden generar distorsiones en la red eléctrica, esta configuración cable y transformador, bajo ciertas condiciones especiales puede presentar sobrevoltajes en el sistema eléctrico, generado por la resonancia, asociada a la resonancia producida entre la capacitancia del cable de conexión y la inductancia del transformador, generalmente puede aparecer por una falla en el sistema eléctrico o por una mala maniobra de operación del sistema. Existen ciertos detalles que son de suma importancia y que no pueden pasar desapercibidos cuando se va a realizar la instalación de una subestación eléctrica como lo es la configuración del sistema (conexión de la subestación eléctrica) y la forma en que esta se esté operando, estos factores determinan considerablemente las probabilidades de la aparición de sobrevoltajes, lo cual puede provocar daños constantes en los equipos e irregularidades en la prestación del servicio. Debido a que en El Salvador, los estudios relacionados a este fenómeno son muy pocos, a pesar de lo dañino y costoso, que puede resultar al presentarse la ferroresonancia en una Subestación Eléctrica, por lo que con este estudio se tratara de caracterizar este fenómeno, para lograr prevenirlo y así evitar que se presente el fenómeno en una Subestación Eléctrica.

A pesar de las limitantes de equipo y materiales presentadas en la realización de este trabajo de investigación, ya que las pruebas se realizaron a bajo voltaje, utilizando un transformador seco monofásico, ya que el equipo para media tensión es muy costoso no se pudieron realizar pruebas de laboratorio a esos niveles de tensión solamente simulados, a pesar de esto se logró una buena aproximación de la modelación del fenómeno con el equipo utilizado a bajo voltaje logrando así cumplir con los objetivos propuestos al desarrollar este trabajo de investigación. Se logró desarrollar un estudio completo del fenómeno de ferroresonancia, así como modelar las condiciones de este de una manera controladas en las que este se desarrolla, mediante el diseño e implementación de un laboratorio a bajo voltaje, el cual quedara en el laboratorio, para que las futuras generaciones de estudiantes de ingeniería eléctrica, puedan hacer prácticas y logren a comprender el origen y entorno en que se produce este fenómeno en un sistema eléctrico.

## RESUMEN DEL TRABAJO.

El presente documento es el resultado del trabajo de investigación, cuya finalidad es el estudio del fenómeno de ferresonancia en Subestaciones Eléctricas, para el cual se presenta la definición y características del fenómeno de ferresonancia, tipos de ferresonancia, análisis matemático, condiciones propicias para que se genere, consecuencias que produce en los sistemas eléctricos y ciertas recomendaciones para mitigar el fenómeno de la ferresonancia, además se presenta el diseño e implementación de un laboratorio básico para lograr comprender con mayor facilidad el fenómeno de la ferresonancia.

Es de recalcar que el tema de la ferresonancia ha sido poco estudiado en el país, a pesar de tratarse de un fenómeno muy perjudicial y costoso económicamente, debido a que su presencia provoca una discontinuidad del servicio eléctrico, y los efectos que genera son dañinos y peligrosos para los equipos y operarios, por lo que es de mucha importancia estudiar a profundidad el fenómeno de la ferresonancia para evitar su presencia, y así poder operar de una forma correcta, segura y eficaz un determinado sistema eléctrico.

El desarrollo de este trabajo de investigación se realizó en tres etapas, las cuales se detallan a continuación.

### **Primer Etapa:**

Se orientó a la recopilación de información en lo que se refiere al fenómeno de resonancia y ferresonancia, para luego estudiar el fenómeno de la ferresonancia en subestaciones eléctricas, es esencial conocer a profundidad un determinado tema, para poder realizar un estudio y más aún cuando se trata de un fenómeno eléctrico transitorio, con sus complicaciones al analizar, esta información se presenta en los capítulos del I al III, los cuales comprenden de definiciones generales del fenómeno de ferresonancia, causas que lo provocan y las consecuencia que se presentan en un sistema eléctrico cuando este fenómeno hace su aparición, también se detallan las medidas y recomendaciones a seguir para evitar la aparición de este fenómeno en las subestaciones eléctricas.

### **Segunda Etapa:**

En esta etapa se realizaron las simulaciones necesarias, es una herramienta fundamental para comprender los diferentes fenómenos que se presentan en las redes eléctricas complejas. Para realizar diseños, además es clave para el dimensionamiento de equipos y determinar los esquemas de operación adecuados de los diferentes sistemas eléctricos.

Para realizar las simulaciones se auxilió del simulador ATP (Electromagnetic transients program), el cual es un programa muy potente y eficaz para realizar la simulación de fenómenos transitorios electromagnéticos y electromecánicos, su conocimiento y aplicación en la ingeniería constituye un gran valor agregado para el desempeño profesional. Para realizar las simulaciones por comodidad se utilizó el ATPDRAW (Graphical preprocessor

to *ATP*), se inició simulando circuitos sencillos LC series lineales, para luego simular circuitos eléctricos más complejos como lo son los circuitos LC no lineales monofásicos y trifásicos, los resultados obtenidos se presentan en el capítulo IV.

Esta herramienta nos fue de mucha utilidad para realizar el estudio del fenómeno de la ferresonancia ya que nos facilitó la realización del diseño e implementación del laboratorio.

### **Tercer Etapa:**

Esta etapa se orientó al diseño e implementación de un laboratorio, debido a la necesidad de hacer pruebas, las pruebas hechas en el laboratorio se validaron con los datos obtenidos en el simulador ATPDRAW, debido a la carencia de la escuela de ingeniería eléctrica para hacer este tipo de pruebas de laboratorio a media tensión, se presentó la necesidad de diseñar el laboratorio, en el cual las pruebas se realizaron a bajo voltaje, debido al costo de equipos y aparatos para poder realizar las pruebas a media tensión, a pesar de esta limitante el estudio del fenómeno a bajo voltaje fue muy satisfactorio ya que se logró estudiar a profundidad el fenómeno, obteniendo muy buenos resultados en las pruebas realizadas, para estas pruebas se utilizó un transformador seco monofásico de 1.2KVA a 120V, para el cual se diseñó un banco de capacitores monofásico con tres etapas para modelar diferentes longitudes de una línea de potencia. El diseño e implementación de este laboratorio se presentan en el capítulo V.

Al finalizar las respectivas pruebas; se diseñó y fabricó un módulo compacto para poder realizar las pruebas de laboratorio de una manera eficiente y segura, el cual quedara en el laboratorio de la escuela de Ingeniería Eléctrica, para que las futuras generaciones de estudiantes de ingeniería eléctrica, puedan hacer prácticas y logren a comprender el origen y entorno en que se produce este fenómeno que es muy importante estudiarlo y conocer bajo qué condiciones se presenta en un sistema eléctrico.

# **CAPITULO I. CONCEPTOS BASICOS, DEFINICION DE RESONANCIA Y FERRORESONANCIA.**

## **1.0 ANTECEDENTES.**

Es de mencionar que en los últimos años se han realizado numerosas investigaciones que involucran a la ferresonancia en los transformadores. El término de ferresonancia apareció por primera vez en la literatura en el año de 1920.

Aunque las primeras publicaciones acerca de este tema aparecieron en 1907. Tomo mayor interés en los años de 1930, cuando se demostró que el uso de capacitores en serie empleados para la regulación de voltaje originaba ferresonancia en los sistemas de distribución, el cual provocaba muchos daños en los equipos del sistema eléctrico debido a los sobrevoltajes que aparecían en el sistema. Desde ese entonces ha tomado mucho interés el estudio de este fenómeno.

Este término caracteriza a todos los fenómenos oscilatorios que aparecen en un circuito eléctrico que tenga al menos:

- a) Una inductancia no lineal (ferromagnética saturable).
- b) Una capacitancia de valor apreciable.
- c) Una fuente de energía (generalmente sinusoidal).
- d) Pocas pérdidas.

Las redes eléctricas son susceptibles de presentar ciertas configuraciones que son propicias para la ocurrencia de ferresonancia dado que pueden existir:

- a) Inductancias saturables en los transformadores de potencia, transformadores de tensión o potencial (que sean inductivos), en las reactancias shunt del sistema.
- b) Capacitancias en los cables, vanos de largas distancias, capacitancias internas en los transformadores, aisladores y sistemas de aislamientos propios de los transformadores, condensadores de compensación serie o paralelo, entre otros.

Las características más comunes que se presentan en el fenómeno de la ferresonancia, serían los cambios de régimen estable a otro régimen estable anormal en condiciones bruscas:

- a) Estado estable normal con tensión sinusoidal a la frecuencia de la red.
- b) Estado estable anormal ferresonante con sobretensiones.
- c) Estado estable anormal ferresonante con sobrecorrientes de gran contenido y amplitud de armónicos muy peligrosos para los equipos, conocido como resonancia armónica.

## 1.1 CONCEPTOS BASICOS.

El fenómeno de la ferresonancia en las Subestaciones Eléctricas, está relacionado con el funcionamiento y características magnéticas de ciertos componentes que forman una subestación eléctrica, a continuación se mencionaran los conceptos más importantes:

### a) Transformador.

El transformador es un dispositivo que convierte la energía eléctrica de un cierto nivel de tensión, en energía eléctrica de otro nivel de tensión, por medio de la interacción electromagnética. Está constituido por dos o más bobinas de material conductor, aisladas entre sí eléctricamente y por lo general enrolladas alrededor de un mismo núcleo de material ferromagnético. La única conexión entre las bobinas la constituye el flujo magnético común que se establece en el núcleo.

Al alimentar el bobinado primario con una fuente de tensión alterna, circulará una corriente eléctrica  $I_1$ , produciendo una fuerza magnetomotriz que causa que se establezca un flujo de líneas de fuerza alterno  $\Phi_1$  en el circuito magnético del transformador. El flujo  $\Phi_1$ , al estar canalizado en el núcleo, induce en las espiras del bobinado secundario una fuerza electromotriz  $E_2$ . Las espiras del bobinado primario también están bajo la influencia de  $\Phi_1$ , por lo tanto en ellas se va a inducir una fuerza contra-electromotriz  $E_1$ , que se opone a la tensión de alimentación, dando como resultado una disminución de la intensidad de corriente  $I_1$ .

Cuando se le aplica carga al secundario del transformador, circula por él la intensidad de corriente  $I_2$ , la cual produce el flujo magnético  $\Phi_2$ , opuesto a  $\Phi_1$ , por lo tanto reduce el flujo resultante en el núcleo dando como resultado que la fuerza contra-electromotriz disminuya y la intensidad de corriente  $I_1$  aumente. Se observa cómo un aumento de la corriente en el secundario  $I_2$  provoca un aumento de la corriente en el primario  $I_1$ , sin que exista conexión eléctrica entre ambos bobinados.

Dado que la fuerza contra-electromotriz es directamente proporcional al flujo inductor  $\Phi_1$ , al disminuir éste, por la contraposición de  $\Phi_2$ , se da un incremento en la corriente  $I_1$ . Existen dos tipos de transformadores que se diferencian por su forma constructiva: **Sumergidos y Secos.**

### Transformadores sumergidos.

El circuito magnético y los devanados están sumergidos en un dieléctrico líquido que garantiza el aislamiento y la evacuación de las pérdidas caloríficas del transformador. Este líquido se dilata en función de la carga y de la temperatura ambiente. Entre estos se pueden mencionar los siguientes:

- ✓ Transformador de núcleo distribuido.
- ✓ Transformador de núcleo arrollado.
- ✓ Transformador rural.

- ✓ Transformador hermético de llenado integral.
- ✓ Transformador auto protegido.

### **Transformadores secos.**

El circuito magnético está aislado (o recubierto) con un material aislante seco de varios componentes. La refrigeración se consigue por medio del aire ambiente, sin líquido intermedio. Este tipo de transformador tiene la ventaja de no presentar ningún riesgo de fuga o contaminación. En contrapartida, requiere precauciones de instalación y mantenimiento (local ventilado, eliminación del polvo). Los devanados suelen ir provistos de sondas de detección que vigilan las temperaturas internas y permite la desconexión de la carga y de la alimentación si surge un problema térmico. Entre estos se mencionan los siguientes:

- ✓ Transformador seco encapsulado en resina epoxi.
- ✓ Autotransformador.
- ✓ Transformador con núcleo toroidal.
- ✓ Transformador de grano orientado.
- ✓ Transformador de núcleo de aire.
- ✓ Transformador de núcleo envolvente.
- ✓ Transformador piezoeléctrico.

### **b) Materiales Ferromagnéticos**

El fenómeno de la magnetización es el que implica en ciertos materiales cuando son colocados en campo magnéticos, reaccionan con el campo y lo modifican. Los materiales que exhiben este fenómeno son llamados materiales magnéticos.

Los materiales magnéticos se clasifican en tres tipos:

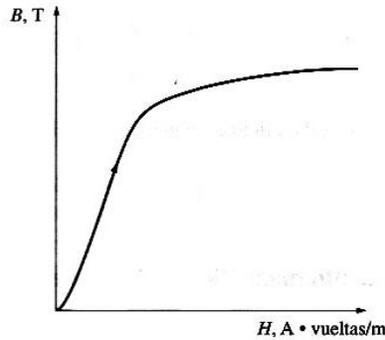
- ✓ Diamagnéticos
- ✓ Paramagnéticos
- ✓ Ferromagnéticos

Es de interés los materiales ferromagnético, por ende se detallan, sus propiedades y característica en los transformadores.

Las propiedades de los materiales ferromagnéticos son:

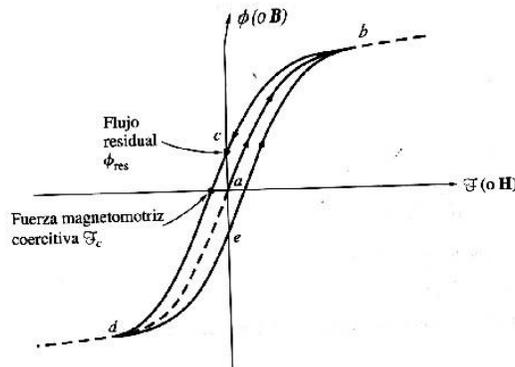
- ✓ Se magnetiza fuertemente en la misma dirección del campo magnético donde están colocados.
- ✓ La densidad de flujo varía en forma no lineal con la intensidad magnética.
- ✓ Este tipo de material presentan saturación, histéresis y retentividad.

**La Saturación:** Este efecto se analiza mejor con la curva de B versus H, donde B varia linealmente con H para valores pequeños de H; conforme H tiende a incrementar, la variación de B decrecerá y para valores grandes de H la curva caerá, a tal grado de que si H aumenta, B prácticamente se mantendrá sin incremento, así como se muestra en la siguiente Imagen:



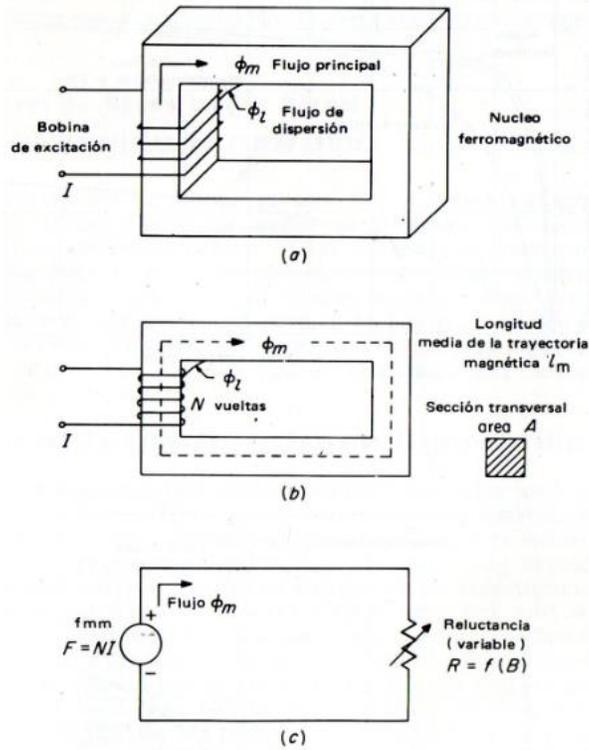
**Imagen 1.1** Curva de magnetización con respecto a la Densidad de Flujo [B] vrs Intensidad magnética [H].

**Histéresis y Retentividad:** un núcleo de un material ferromagnético el cual está sujeto a magnetización cíclica, con flujo inicial en el núcleo que será cero, cuando se incrementa la corriente por primera vez el flujo en el núcleo sigue la trayectoria **ab**, como se detalla en la Imagen 1.2. Estos puntos de la curva son esencialmente la curva de Saturación. Cuando la corriente decrece, el flujo representado en la curva sigue una trayectoria diferente de la seguida cuando la corriente aumentaba. Es decir que cuando la corriente decrece, el núcleo sigue la trayectoria **bcd**, y más tarde cuando la corriente se incrementa nuevamente, el flujo sigue la trayectoria **deb**. La cantidad de flujo presente en el núcleo depende no solo de la cantidad de corriente aplicada a los devanados, sino que también de la historia previa del flujo presente en el núcleo y las diferentes trayectorias en la variación cíclica del flujo mostrada en la curva llamada **histéresis**.



**Imagen 1.2** Curva o lazo de histéresis trazado por el flujo en un núcleo cuando se le aplica una corriente  $i(t)$ .

En la Imagen 1.3, se muestra la estructura magnética de un transformador de núcleo de hierro y sus respectivas representaciones.



**Imagen 1.3 Estructura magnética de un transformador de núcleo de hierro, con sus respectivos diagramas esquemáticos y circuitos magnéticos.**

De la Imagen 1.3 se destacan el flujo principal o útil  $\Phi_m$ , que existe dentro del núcleo ferromagnético, y el flujo de dispersión  $\Phi_L$ , que existe afuera de la estructura del núcleo magnético. En un rango de operación usual la permeabilidad en la mayor parte de los materiales ferromagnéticos es de  $10^3$  a  $10^4$  veces  $\mu_0$ , la permeabilidad del aire o del vacío.

Las relaciones matemáticas que tiene el flujo con respecto al voltaje y a las demás variables de interés para el análisis de los materiales Ferromagnéticos son:

$$\text{Flujo } \Phi = B A \Leftrightarrow B = \mu H \quad (1.1)$$

$$\text{fmm } F = N I = H l_m \Leftrightarrow I = \frac{H l_m}{N}$$

$$dI = \frac{l_m}{N} dH \quad (1.2)$$

Existe una relación de tensión de alimentación de un bobinado del transformador con respecto a su flujo y sus corrientes:

$$e = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.3)$$

$$e = L \frac{dI}{dt} \quad (1.4)$$

$$N \frac{d\phi}{dt} = L \frac{dI}{dt}$$

$$L = N \frac{d\phi}{dI} \quad (1.5)$$

Con las ecuaciones anteriores se obtiene la relación de la inductancia con respecto a la permeabilidad:

$$L = N \frac{d(BA)}{d(Hl_m/N)} = \frac{N^2 A dB}{l_m dH} \quad (1.6)$$

Donde  $\frac{dB}{dH} = \mu$ , la permeabilidad es la pendiente de la curva de densidad de flujo versus intensidad magnética.

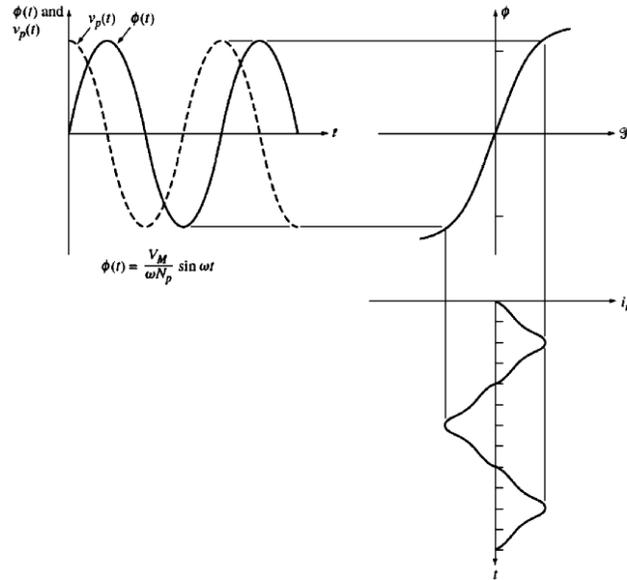
$$L_\mu = \frac{N^2 A}{l_m} \mu \quad (1.7)$$

En la Imagen 1.4 se muestra la magnitud de la corriente de magnetización, las variaciones de flujo contra tiempo, corriente contra fuerza magnetomotriz y corriente contra tiempo.

Se menciona que para este circuito no se tomó en cuenta el análisis de las pérdidas en núcleo y por flujo de dispersión.

Se aplica en las terminales del primario del transformador una tensión senoidal de magnitud y frecuencia constantes, la tensión inducida en el devanado secundario del transformador es senoidal y en fase con el de la fuente de alimentación, según la Ley de Faraday, el flujo producido en el material ferromagnético debe ser senoidal.

$$v = \sqrt{2} * V_{rms} * \cos wt \quad (1.8)$$



**Imagen 1.4 Corriente de magnetización causada por el flujo en el núcleo del transformador.**

En la ecuación 1.8, el voltaje aplicado al transformador:  $V_{rms}$  es el valor eficaz del voltaje de la fuente y  $\omega$  la frecuencia en rad/seg. De acuerdo a la Ley de Faraday, la tensión inducida en las terminales de la bobina es:

$$e_{ind} = v_{ind} = N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.9)$$

El flujo del núcleo se comportara de la siguiente manera, utilizando los valores  $V_{rms}$ :

$$\phi = \frac{1}{N} \int e dt = \frac{1}{N} \int \sqrt{2} V_{rms} \cos(\omega t) dt \quad (1.10)$$

$$\phi = \left( \frac{\sqrt{2} V_{rms}}{\omega N} \right) \text{sen} \omega t \quad (1.11)$$

Si  $\omega = 2\pi f$ , donde  $f$  representa la frecuencia de la fuente de tensión en **Hz** entonces, la ecuación se expresa.

$$\phi = \left( \frac{V_{rms}}{4.44 f N} \right) \text{sen} \omega t \quad (1.12)$$

$$\phi = \phi_{max} \text{sen} \omega t \quad (1.13)$$

$$\phi_{max} = \frac{V_{rms}}{4(\text{Factor de forma})fN}$$

$$V_{rms} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \quad (1.14)$$

El F.F.: Factor de Forma.

$$V_{max.} = 4(F.F.)\sqrt{2} fN\phi_{max} \quad (1.15)$$

En la ecuación 1.15, existe una dependencia del flujo con respecto a la tensión, la frecuencia y el factor de forma de la señal con la que se esté trabajando. Es de notar que al variar tanto la frecuencia y la tensión se presentara un cambio en el flujo máximo que se genera.

La dependencia del flujo y la tensión con respecto a las variables de diseños de los transformadores  $X_m$  es:

$$N = \sqrt{\frac{L l_m}{A \mu}} \quad (1.16)$$

$$V_{max.} = 4(F.F.)\sqrt{2} f \sqrt{\frac{L l_m}{A \mu}} \phi_{max} \quad (1.17)$$

$$w (V_{max.})^2 = (4(F.F.) f \phi_{max})^2 \frac{2 w L l_m}{A \mu} \quad (1.18)$$

$$X_m = \frac{w A \mu}{2 l_m (4(F.F.) f)^2} \left( \frac{V_{max.}}{\phi_{max}} \right)^2 \quad (1.19)$$

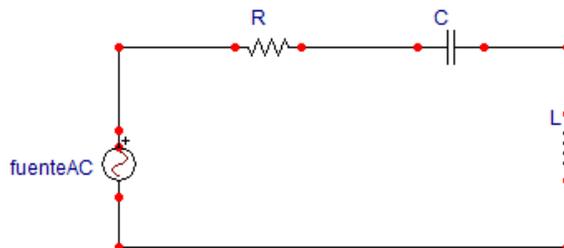
**Es notable la dependencia que existe para los valores constantes de frecuencia, factor de forma y parámetros de diseño del núcleo del transformador. La permeabilidad, la tensión y el flujo son las variables que modificaran el comportamiento del transformador.**

## 1.2 DEFINICION DE RESONANCIA PARA ELEMENTOS ELECTRICOS.

### Resonancia serie:

Se puede definir como el comportamiento de un circuito eléctrico con elementos inductivos y capacitivos, para el cual se verifica que la tensión aplicada en los terminales del mismo circuito y la corriente absorbida estén en fase. La resonancia puede aparecer en todo circuito que tenga elementos **L** y **C**, existirá como una resonancia serie, resonancia paralelo o una combinación de ambos. Se va a estudiar el caso específico de la resonancia serie.

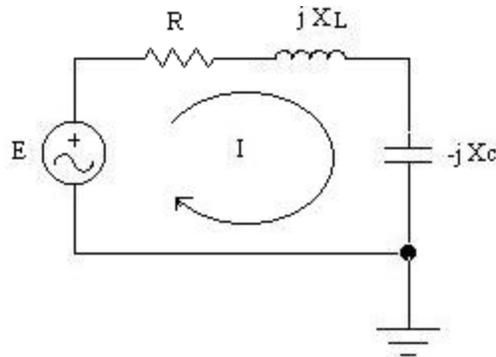
En la Imagen 1.5, se presenta el circuito resonante serie básico, a estudiar como primera aproximación para comprender el fenómeno de la ferroresonancia.



*Imagen 1.5 Circuito Resonante Serie.*

### 1.2.1 Resonancia en circuitos series RLC lineal.

En la Imagen 1.6, se muestra un circuito **RLC** serie típico con una fuente de voltaje con frecuencia arbitraria, que podría ser de 60 Hz.



*Imagen 1.6 El circuito RLC-serie.*

Utilizando la ley de voltajes de Kirchhoff, en el circuito de la Imagen 1.6, se obtiene la siguiente ecuación:

$$E = V = R * I + jX_L I - jX_C I \quad (1.20)$$

La corriente en el circuito está dada por la expresión:

$$i = \frac{V}{j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \quad (1.21)$$

Si se asume que la resistencia  $R \ll X_L$  y  $X_C$ . Se obtiene la expresión 1.22 simplificada para la corriente. La corriente tiene una magnitud  $I$  con un ángulo de  $-90^\circ$ , de esta asimilación es fácil operar la ecuación de Kirchhoff, en función de las magnitudes de voltaje y corriente sin afectar la misma, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$E = X_L I - X_C I \quad (1.22)$$

La tensión en el inductor y en el capacitor está dada por las expresiones siguientes.

$$V_C = X_C I \quad (1.23)$$

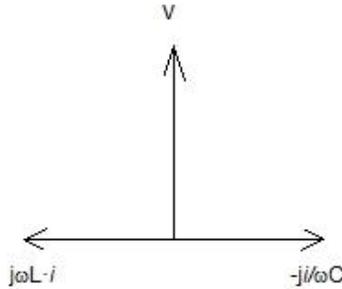
$$V_L = X_L I \quad (1.24)$$

Las corrientes  $I$ , como las tensiones  $V_C$  y  $V_L$  tienden a ser muy grandes cuando:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (1.25)$$

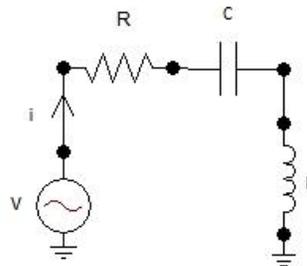
A este fenómeno se le conoce como **condición de resonancia**, y la misma se debe a que las impedancias asociadas a la inductancia y a la capacitancia están desfasadas  $180^\circ$  entre ellas. La corriente total en el circuito, inducirá una tensión en los bornes de la bobina y del

capacitor, también desfasados 180°. En la Imagen 1.7, se presenta el diagrama fasorial de las tensiones del circuito.



**Imagen 1.7 Diagrama fasorial de las tensiones dadas para el circuito serie LC.**

El circuito de la Imagen 1.8, el cual tiene una resistencia activa, la corriente queda limitada por **R**, si estas cargas son muy pequeñas la corriente tendera a ser muy grande.



**Imagen 1.8 Circuito RLC.**

De acuerdo al circuito anterior de la Imagen 1.8, se pueden obtener las siguientes expresiones:

$$i = \frac{V}{R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}} \quad (1.26)$$

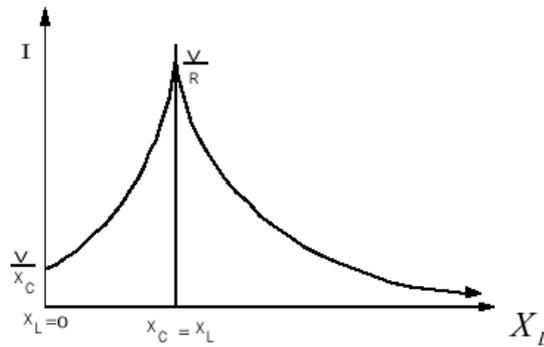
$$V_C = \frac{-jV}{\omega C(R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C})} \quad (1.27)$$

$$V_L = \frac{-j\omega L * V}{(R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C})} \quad (1.28)$$

Para un valor fijo tanto de **L** como de **R**, la corriente se puede caracterizar en funcion del valor de **Xc**, como se muestra en la Imagen 1.9. Para cualquier combinacion de valores de **L** y **C**, existe una frecuencia de resonancia dada por la siguiente expresion.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.29)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.30)$$



**Imagen 1.9** Corriente de un circuito RLC, con R y L fijos en función de XL.

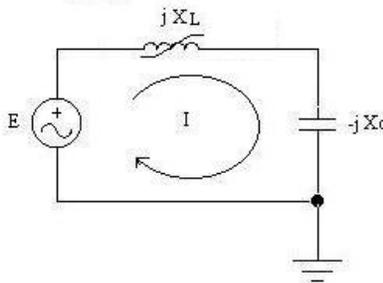
El voltaje que aparece en las reactancias  $X_L$  y  $X_C$ , depende de la corriente que circula por estos elementos,  $V_C = I \times jX_C$  y  $V_L = I \times jX_L$ ; si se tiene valores de corrientes muy elevadas, se pueden obtener sobrevoltajes en las reactancias.

Se consideran solamente aquellas combinaciones de  $L$  y  $C$  que producen resonancia a frecuencia industrial, la cual es de 60Hz, cuando la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva son iguales, las tensiones en los terminales del condensador y de la inductancia son iguales y se compensan, es decir el circuito está en resonancia.

La resonancia armónica existe cuando ciertos equipos (motores de velocidad variable, rectificadores estáticos, entre otros.) generan frecuencias angulares de resonancia igual a  $n\omega_0$ ; siendo  $\omega_0$  la frecuencia angular de la red.

### 1.2.2 Resonancia en circuitos series RLC no lineal.

En el circuito LC no lineal, se tomara la reactancia capacitiva como lineal y la reactancia inductiva como no lineal ( $X_L$  es no lineal), debido a que con esta condición se logra representar la reactancia inductiva de un transformador como elemento no lineal.

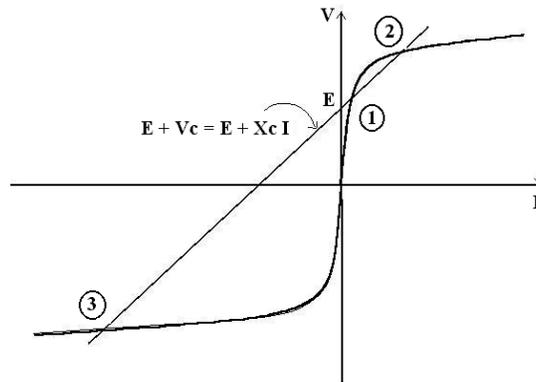


**Imagen 1.10** Circuito LC serie no lineal.

En el circuito de la Imagen 1.10, la reactancia inductiva tiene una leve variación en su simbología, la cual indica que la inductancia no es lineal. La magnitud del voltaje para el caso inductivo y asumiendo una resistencia R despreciable es:

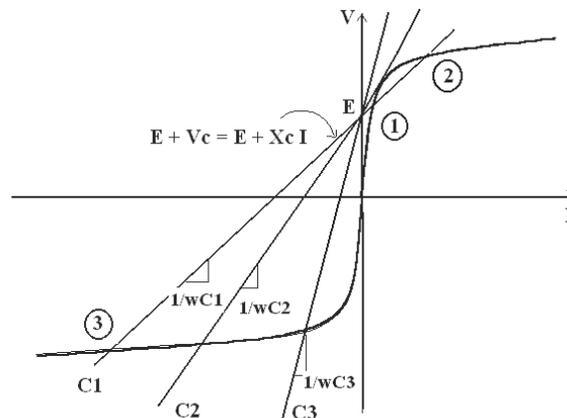
$$V_L = E - V_C \quad (1.31)$$

En la Imagen 1.11, se muestra que la relación entre la tensión y la corriente del transformador, está dada por la curva de magnetización, entonces el punto de operación queda definido como la intersección de dicha curva con la representación del efecto combinado de la fuente y la capacitancia. Los puntos 1, 2 y 3 son las intersecciones que satisfacen la ecuación 1.31 y son definidos como los puntos de operación del sistema. Los puntos 1 y 3 son puntos estables de operación, mientras el punto 2 es un punto inestable.



**Imagen 1.11 Gráfica para analizar el circuito LC no lineal.**

En la Imagen 1.12, la recta  $E+V_C$  gira alrededor del punto E de tensión de la fuente, por lo que su pendiente disminuye a medida que aumenta la capacitancia. A diferencia del caso de resonancia lineal, se tiene un rango amplio de variación de capacitancias para el cual puede desarrollarse la ferresonancia.



**Imagen 1.12 Efecto del aumento de Capacitancia en el Circuito.**

Al analizar estos puntos de operación se visualiza en qué puntos de operación se lograra obtener una condición de estado estable, es decir en qué puntos de operación se encuentra trabajando al circuito de una manera segura.

**Punto de operación (1):** Si se percibe un aumento en la corriente, el voltaje  $V_L$  se incrementa de una forma más rápida que  $E + V_C$ , sobrepasándolo; estos incrementos de voltajes no pueden ser proporcionados por la fuente de tensión del circuito, esta condición provoca un aumento en la corriente lo que origina que regrese al valor original de esta; se podría decir entonces que este es un punto de operación **ESTABLE**. En la Imagen 1.13a, se muestra el diagrama fasorial que detalla esta condición de operación.

**Punto de operación (2):** En este punto se incrementa la corriente, bajo esta condición  $E + V_C > V_L$ , este exceso de voltaje provocara un aumento en la corriente, pero en esta condición no puede regresar al punto de operación. En caso contrario, si  $I$  disminuye, la fuente de alimentación del circuito no podrá entregar la corriente demandada, por lo dicho anteriormente se puede decir que el punto (2) es un punto de operación **INESTABLE**.

**Punto de operación (3):** En este punto ocurre una inversión de dirección de la corriente, esto provoca que los voltajes en los elementos del circuito también sufran un desfase de  $180^\circ$ , en el diagrama fasorial de la Imagen 1.13b se detalla esta condición. Si se diera un incremento de corriente, ocurriría en la dirección contraria y haría que  $E + V_C < V_L$ ; solo que el exceso de voltaje no podrá ser sostenido por la fuente de alimentación, esto provoca que la corriente regrese a su punto original. Es decir que si la corriente disminuye,  $E + V_C$ , aumentan más rápido que  $V_L$ , este se considera un punto de operación **ESTABLE**, ya que el exceso de voltaje hará que la corriente aumente.



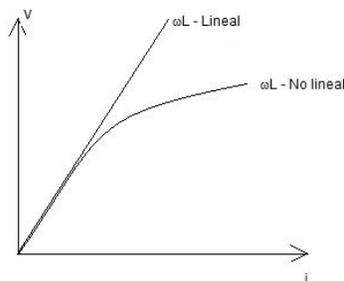
**Imagen 1.13** Diagramas fasoriales, en los puntos de operación de la componente fundamental del circuito LC serie no lineal, (a) Caso inductivo (puntos 1 y 2), (b) Caso capacitivo (punto3).

De los puntos de operación anteriores, se puede definir la ferresonancia en el punto de operación 3, la cual tiene las siguientes características:

- ✓ Se obtiene una mayor corriente en el circuito.
- ✓ Existe saturación del inductor.
- ✓ Aparecen voltajes en los parámetros del circuito que son mucho mayores que el voltaje de la fuente de alimentación del circuito.

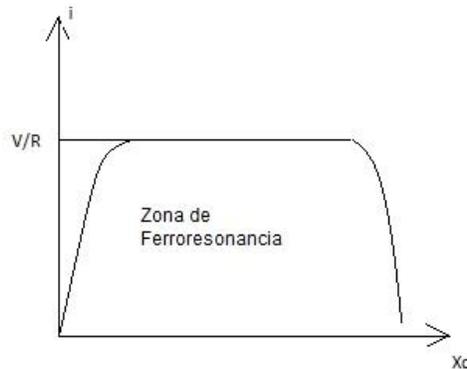
### 1.3 DEFINICION DE FERRORESONANCIA.

La inductancia no lineal en un principio toma diferentes valores por encima del codo de saturación, como se puede apreciar en la Imagen 1.14, los materiales ferromagnéticos que muestran saturación tales como el hierro, están compuestos de regiones microscópicas llamadas dipolos magnéticos, que actúan como pequeños imanes permanentes. Antes de que un campo magnético externo sea aplicado al material, los dipolos se encuentran orientados al azar. Sus pequeños campos magnéticos apuntan en direcciones aleatorias y se cancelan entre sí, de modo que el material no produce un campo magnético global neto. El efecto de saturación ocurre cuando ya prácticamente todos los dipolos se encuentran alineados, por lo que cualquier incremento en el campo aplicado no puede causar una mayor alineación en los dipolos magnéticos.



*Imagen 1.14 Gráfica de inductancias lineales y no lineales.*

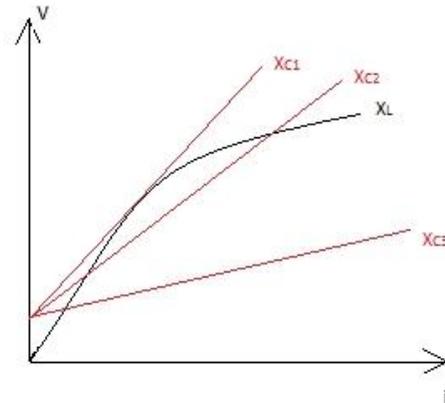
La característica no lineal de la inductancia permite tomar diferentes valores por encima del codo de saturación, existe un rango más grande de valores de capacitancias que pueden inducir la condición de ferresonancia, tal como se muestra en la Imagen 1.15.



*Imagen 1.15 Gráfica  $I$  vs  $X_C$  en un circuito RCL con inductancia saturable.*

En la Imagen 1.15, se muestra la condición de ferresonancia con respecto a las variaciones de corriente y reactancia capacitiva. Se presenta con más frecuencia en sistemas de alta y media tensión, ya que en la mayoría de los casos son las líneas de gran longitud las que aportan la capacitancia necesaria para que ocurra el fenómeno de la ferresonancia.

Las características de tensión en cada uno de los componentes del circuito, en función de la corriente total circulante, es la manera de análisis más complicada debido a las características no lineales y la dependencia de los campos eléctricos y magnéticos asociados a la corriente del circuito, resulta más sencillo recurrir a un método gráfico que describa el fenómeno. En el gráfico de la Imagen 1.16, se superponen las características de las reactancias capacitivas e inductivas.



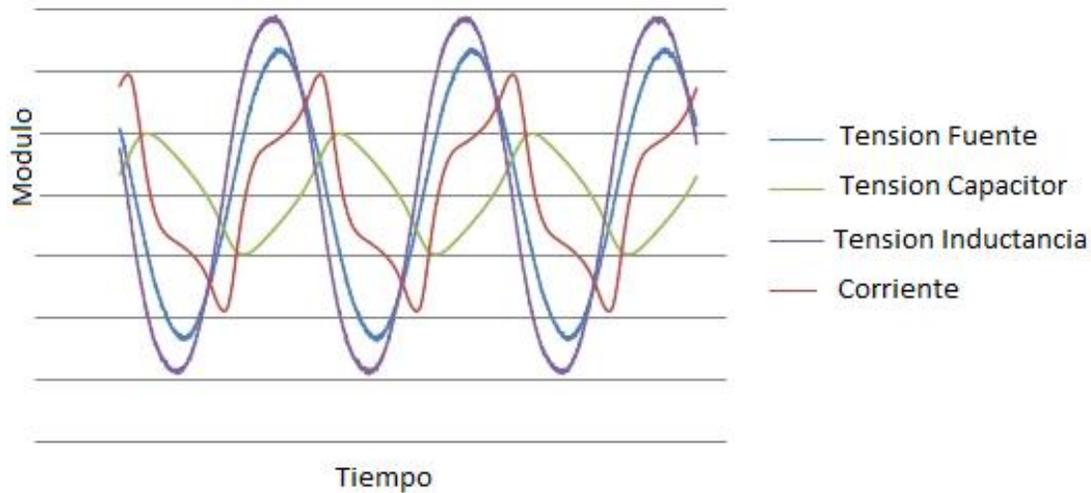
**Imagen 1.16 Gráfica característica de impedancia de inductiva y de distintas inductancias capacitancias.**

Existe el punto donde coinciden ambas características de reactancias, es el punto de resonancia ya que se cumple la condición de la siguiente expresión.

$$X_L = \omega L = X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (1.32)$$

Para cualquier capacitancia, si esta es más pequeña su impedancia asociada será más grande. La capacitancia asociada a la recta  $X_{C1}$ , es la más pequeña de todas, mientras que la capacitancia asociada a  $X_{C3}$ , es la mayor, para capacitancias pequeñas, el sistema esta propenso a entrar en condición de ferresonancia, mientras que para capacitancias más grandes, es más probable obtener condiciones sencillamente resonantes. Para la inductancia  $X_{C2}$ , existen dos puntos de coincidencia con la curva  $X_L$ , si los niveles de tensión se mantienen pequeños, se pueden tener sobretensiones que sean producto de la resonancia, si la tensión sigue subiendo, se consiguen valores de sobretensiones en la zona ferresonante.

En la Imagen 1.17, se muestran las tensiones y corrientes típicas de cada elemento que forman parte de un circuito ferresonante, modeladas en función del tiempo.



**Imagen 1.17 Tensiones y corrientes típicas observadas en un circuito Ferresonante RLC.**

De la gráfica de la Imagen 1.17 se pueden mencionar lo siguiente:

- ✓ Desfase de 180° entre las tensiones del capacitor y del inductor.
- ✓ Sobretensiones en el inductor respecto a la tensión dada por la fuente, debido a grandes corrientes en la condición ferresonante.
- ✓ Distorsión de la forma de onda de la corriente, debido a bruscos crecimientos de la misma al llegar a la zona no lineal.

Las sobretensiones que se presentan en la inductancia, pueden suceder también en la capacitancia del circuito e incluso en la mayoría de los casos, se puede presentar en ambos componentes.

Para encontrar la relación de tensión en cada componente respecto a la tensión de alimentación de la fuente, se dan en las siguientes expresiones.

$$f_{stL} = \frac{V_L}{V} \quad (1.33)$$

$$f_{stC} = \frac{V_C}{V} \quad (1.34)$$

En las expresiones 1.33 y 1.34,  $f_{stL}$  y  $f_{stC}$ , son los factores de sobretensiones inductiva y capacitiva respectivamente. Los valores de  $V_L$  y  $V_C$  están determinados por los voltajes encontrados en el inductor y capacitor respectivamente, y  $V$  se refiere a la tensión de la fuente del sistema.

Los circuitos **RLC** serie Lineal y no Lineal, tienen una característica principal, es el rango de tensión del inductor, para el caso no lineal, está limitado a consecuencia de la saturación

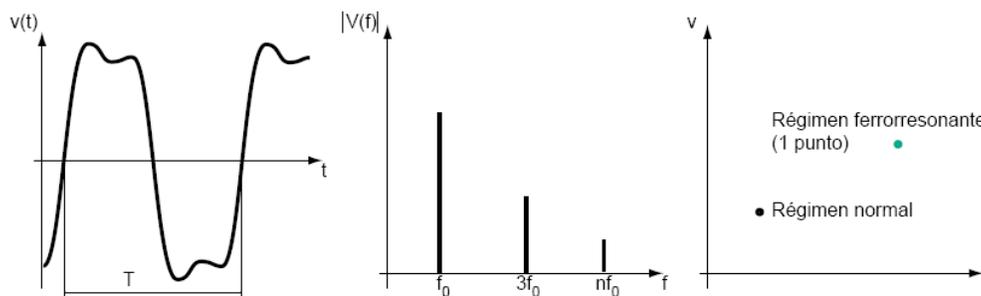
del núcleo magnético, esto no permitirá sobre-elevar la tensión con la misma tasa que lo hace en el rango de linealidad.

#### 1.4 CLASIFICACION DE LA FERRORESONANCIA DE ACUERDO A SU COMPORTAMIENTO.

Existen cuatro tipos principales de ferresonancia: fundamental, subarmónica, quasiperiódica y caótica. Las cuales están ligadas con los comportamientos de los sistemas dinámicos no lineales. A continuación se presenta una breve definición de cada una de estos tipos de ferresonancia que se podrían presentar en un sistema eléctrico, dependiendo de las condiciones en que este se encuentre funcionando.

##### 1.4.1 Ferresonancia Fundamental

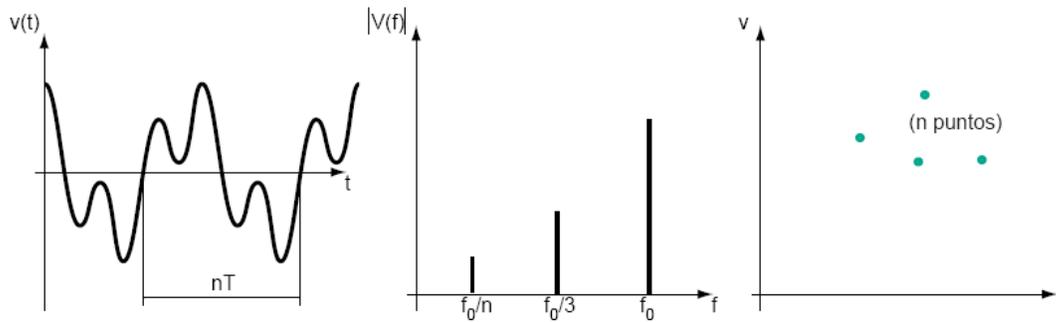
Este tipo de ferresonancia tiene la característica que las ondas de tensión y corriente son periódicas, con igual periodo que la onda del generador y de gran contenido armónico. El espectro de Fourier es discontinuo, compuesto de la onda fundamental y sus armónicos (generalmente los de orden impar). El corte Poincaré presenta un único punto.



*Imagen 1.18 Ejemplo de Ferresonancia Fundamental.*

##### 1.4.2 Ferresonancia Subarmónica.

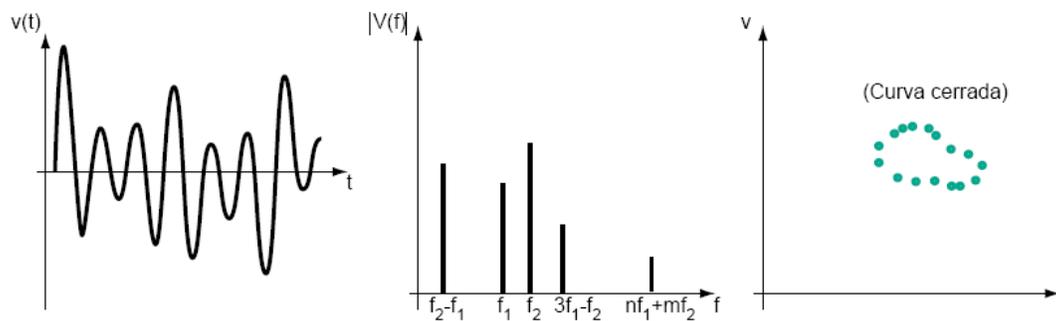
Estas formas de onda son periódicas, el periodo es múltiplo entero del periodo de la onda del generador. El espectro de Fourier se presenta como una componente a una frecuencia que es menor que la fundamental con sus correspondientes armónicas. El corte de Poincaré muestra una cantidad discreta de puntos.



*Imagen 1.19 Ejemplo de Ferroresonancia Subarmónica.*

### 1.4.3 Ferroresonancia Quasiperiódica.

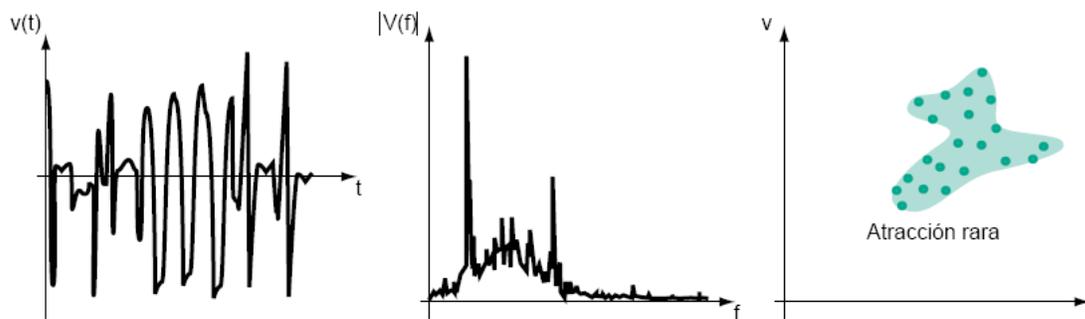
Las señales de tensión y corriente ya no son periódicas. El espectro de Fourier es discontinuo, presentando dos frecuencias dominantes con sus correspondientes armónicas. El corte de Poincaré muestra una curva continua.



*Imagen 1.20. Ejemplo de Ferroresonancia Quasiperiódica.*

### 1.4.4 Ferroresonancia Caótica.

El espectro de Fourier se presenta continuo para todas las frecuencias. El Corte de Poincaré está compuesto de una serie de puntos agrupados que ocupan un área del plano de fase.



*Imagen 1.20 Ejemplo de Ferroresonancia Caótica.*

## **CAPITULO II. FERRORESONANCIA EN SUBESTACIONES ELECTRICAS.**

En una subestación eléctrica, el transformador es el elemento principal, por lo que es importante considerar su comportamiento, cuando la reactancia de magnetización del transformador puede desarrollar una topología de circuito serie con una capacitancia existente en el circuito, como ejemplo la capacitancia a tierra del cable de acometida, se obtiene un fenómeno de resonancia serie, esto sucede principalmente cuando los transformadores operan con muy poca carga o en vacío y la longitud a los dispositivos de desconexión monofásicos resulta ser grande.

Se mostrara que la susceptibilidad de un transformador eléctrico al fenómeno de la ferresonancia es proporcional al cuadrado de la tensión del sistema e inversamente a la potencia en KVA.

### **2.0 COMPORTAMIENTO NO LINEAL DEL TRANSFORMADOR.**

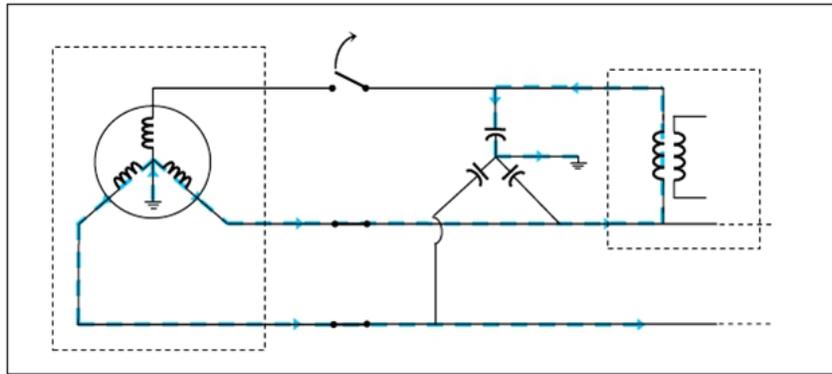
La inductancia no lineal o de magnetización está dada para transformadores, tanto de potencia, de potencial y de corriente. Y su no linealidad se expresa por medio del valor de inductancia que es función de la permeabilidad magnética y que depende del punto de operación en la curva de magnetización del núcleo.

Un transformador instalado en una subestación eléctrica, puede ser, monofásico, trifásico o formar parte de un banco de transformadores, lo cual dependerá de la necesidad de la carga eléctrica que se desea alimentar. Existen configuraciones en un sistema eléctrico que presentan condiciones favorables para que el fenómeno de la ferresonancia ocurra.

Un ejemplo lo presenta una fase energizada en serie con la inductancia del devanado del transformador y la capacitancia a tierra del circuito eléctrico, arreglo que reúne las condiciones necesarias para que el fenómeno de la ferresonancia se presente.

### **2.1 MODELO DE FERRORESONANCIA EN SISTEMAS ELECTRICOS MONOFÁSICOS.**

El fenómeno de ferresonancia en un sistema monofásico, sucede básicamente al tener un transformador conectado a dos líneas de alimentación y una de ellas está en condición de línea abierta, dentro de la cual se forma una trayectoria LC serie no lineal. La corriente circula a tierra a través de la reactancia del transformador y la capacitancia equivalente del alimentador de la línea abierta. Esta condición se detalla en la Imagen 2.1.



*Imagen 2.1 Sistema Monofásico básico con apertura de una Línea.*

La capacitancia del cable de la fase que está en servicio en ningún momento afecta la corriente que circula por el transformador, es por eso que no se incluye en el análisis para definir el fenómeno de la ferresonancia; en cambio la capacitancia de línea abierta juega un papel muy importante ya que esta, forma un arreglo serie con la bobina del transformador y si afecta al funcionamiento normal del sistema eléctrico, provocando las condiciones propicias a que el fenómeno de la ferresonancia se pueda producir.

## **2.2 MODELOS DE FERRORESONANCIA EN SISTEMAS ELECTRICOS TRIFÁSICOS.**

En este tipo de sistema eléctrico, es más común que se presente una conexión que cumpla las condiciones para que pueda ocurrir el fenómeno de ferresonancia. El problema ocurre cuando se desconectan individualmente ya sea uno o dos de las fases que alimentan a un banco de transformadores trifásicos no aterrizados, por lo que se genera un efecto capacitivo de los alimentadores, los cuales presentan una condición adecuada de arreglo serie LC para que el fenómeno de la ferresonancia se pueda producir.

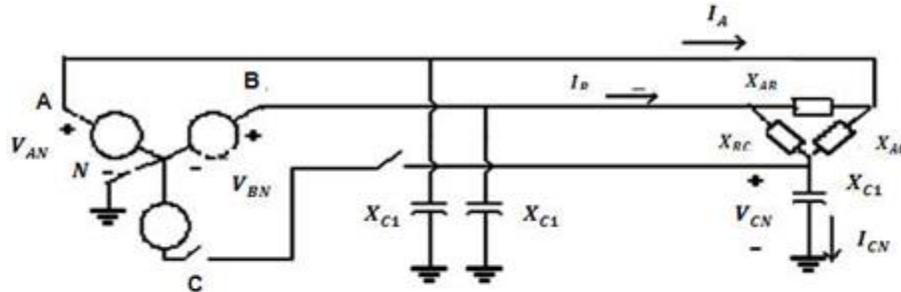
El banco de transformadores puede estar conformado por tres transformadores monofásicos o un solo transformador trifásico, con cualquier conexión en la que no esté aterrizado el lado primario de la subestación eléctrica, es factible que se pueda presentar una condición favorable para que el fenómeno de la Ferresonancia ocurra.

Ver el Apéndice 5 donde se detalla las norma IEEE en donde se puede observar las documentaciones con respecto al tema de la ferresonancia en subestaciones eléctricas de distribución, se muestran las topologías más susceptibles en las que se pueden presentar el fenómeno, alternativas para minimizar los daños, medidas a tomar para prevenir el fenómeno en un banco de transformadores.

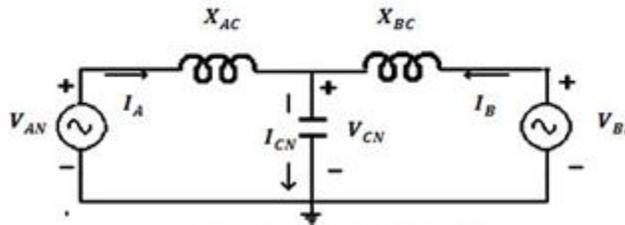
Las cuatro condiciones básicas de conexiones de transformadores, que contribuyen a que el fenómeno de la ferresonancia aparezca en un sistema trifásico son:

**Caso I. Transformadores en Conexión Delta, Con Un Conductor Abierto (Fase C Desconectada).**

Se presenta la condición, en la cual los interruptores de las fases **A** y **B** se encuentran cerrados, por cualquier causa o falla, la fase **C**, no está conectada a la fuente de alimentación, como se ilustra en la Imagen 2.2, con su circuito simplificado.



Caso I: Desconexión de la Fase C



Caso I: Circuito Simplificado

**Imagen 2.2 Transformador trifásico sin carga que tiene efecto de ferresonancia debido a falla de la Fase C.**

En la Imagen 2.2, se elimina la fuente de alimentación de la fase **C**, esta se encuentra desconectada de la alimentación del circuito y no tiene efecto alguno.

Para una mayor simplicidad no se toman en cuenta los efectos capacitivos del sistema con respecto a tierra, los cuales aparecen en las líneas **A** y **B**, junto con el transformador  $X_{AB}$ , ya que éstas no afectan a la tensión del nodo **C**; la reactancia  $X_{AB}$  y las capacitancias mencionadas no forman parte de las trayectorias ferresonantes **LC** y siempre tienen aplicado la tensión nominal.

Al abrirse cualquier fase del circuito siempre se obtiene un circuito **LC** serie, una inductancia no lineal y una capacitancia conectada en serie, esta configuración es peligrosa ya que es factible para provocar el fenómeno de ferresonancia.

Los voltajes, aplicados a las terminales del banco de transformadores, son los voltajes normales de línea a tierra de la fuente, los cuales tienen igual magnitud y están desfasados  $120^\circ$  entre sí, esto es:

$$V_{AN} = V_{AN} \angle -120^\circ \quad (2.1)$$

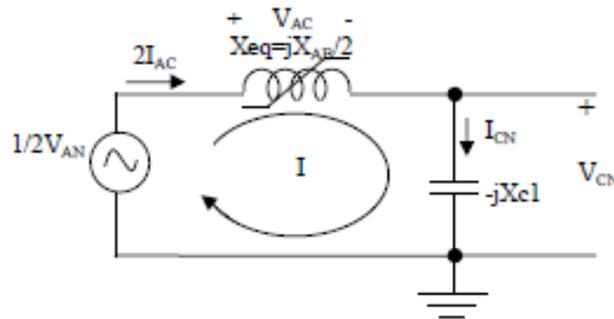
$$V_{BN} = V_{BN} \angle 120^\circ \quad (2.2)$$

Además

$$V_{AN} = V_{BN} \quad (2.3)$$

El voltaje  $V_{CN}$ , en la terminal de la línea abierta, depende de la corriente  $I_{CN}$  que fluye hacia tierra a través de la reactancia capacitiva  $X_{c1}$ . Esta corriente puede ser analizada, a partir de las componentes de los voltajes aplicados al circuito.

Para realizar un el análisis se utilizará el circuito simplificado de la Imagen 2.3.



*Imagen 2.3 Circuito simplificado, utilizando las componentes fundamentales de las fuentes de alimentación.*

El procedimiento para encontrar el comportamiento del voltaje de línea abierta  $V_{CN}$ , en función de la relación  $X_{c1}/X_m$ , es el siguiente:

1. Se asume un valor de voltaje en la reactancia  $X_{eq}$ , dentro de los valores de la curva de magnetización del transformador, que será igual al voltaje en las reactancias  $X_{AC}$  y  $X_{BC}$ . Este valor se asumirá positivo, cuando la corriente concuerde, con la convención adoptada en el circuito de la Imagen 2.3.
2. Se encuentra la corriente  $I_{AC}$  correspondiente a la reactancia  $X_{AC}$ , con base en la curva de magnetización del transformador. Debido a que  $X_{eq}$  resulta del paralelo de las  $X_{AC}$  y  $X_{BC}$ , la corriente total del sistema será  $2I_{AC}$ .
3. Aplicando la ley de voltaje de Kirchhoff, se encuentra el voltaje  $V_{CN}$ , de la siguiente forma:

$$V_{CN} = (1/2) V_{AN} - V_{AC} \quad (2.4)$$

4. Para tener una mejor visualización de los resultados, se divide el voltaje en la línea abierta entre el voltaje nominal de línea a tierra ( $V_{AN}$ ), obteniendo un valor en por unidad.
5. Se encuentra el valor de la magnitud de la reactancia  $X_{c1}$ , dividiendo el valor de  $V_{CN}$ , entre la corriente del sistema encontrada en el paso 2 y además se multiplica por (-1).

$$X_{c1} = -V_{CN} / I \quad (2.5)$$

6. Se determina la relación  $X_{c1}/X_m$ , dividiendo el valor de reactancia  $X_{c1}$  entre el valor de la reactancia de magnetización nominal  $X_m$  de los transformadores del sistema.

7. Se grafica el punto encontrado ( $X_{c1}/X_m, V_{CN}$  (pu)) en un plano cartesiano y se repite este procedimiento cuantas veces sea conveniente.

### Caso II. Transformadores en Conexión Delta, Con Dos Conductores Abiertos (Fase B Y C Desconectadas)

Al tener una conexión Delta con solo la fase A conectada a la fuente de alimentación trifásica, se tienen dos trayectorias a tierra a través de las capacitancias equivalentes de los alimentadores desconectados, de las fases B y C.

Debido a que no forman parte de ninguna trayectoria LC serie y son independientes, no se ha incluido el efecto capacitivo de la línea de la fase A, ni los efectos capacitivos entre líneas.

Los efectos capacitivos de las líneas B y C a tierra son iguales y si los transformadores representados en el circuito de la Imagen 2.4 como  $X_{AB}$  y  $X_{AC}$  son idénticos, entonces las corrientes que fluyen de la línea A hacia tierra por las trayectorias I y II, deben ser exactamente iguales, por lo que el potencial en los puntos B y C es el mismo, ya que corrientes iguales producen caídas iguales en capacitancias iguales.

Los dos circuitos LC serie por donde se han creado las trayectorias I y II son equivalentes y están conectadas a la misma tensión. Se muestra en la Imagen 2.4.

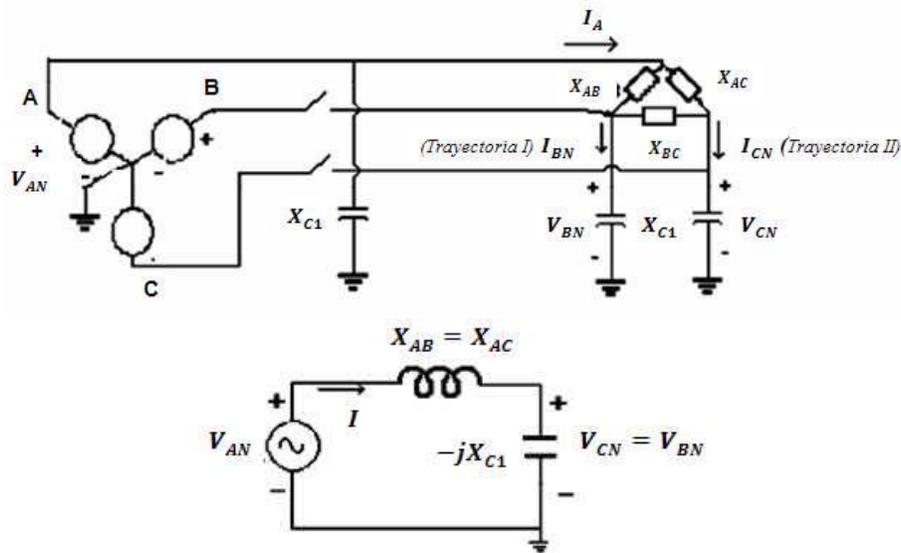


Imagen 2.4 Circuito simplificado de la trayectoria I y la trayectoria II.

Se obtiene un solo circuito "LC serie", se puede analizar por el método gráfico, para el cual se puede aplicar el siguiente procedimiento, para encontrar el comportamiento del voltaje de línea abierta  $V_{BN} = V_{CN}$  en función de la relación  $X_{c1}/X_m$ .

1. Partiendo de la curva de magnetización del transformador, se asume un valor de voltaje en la reactancia  $X_{AB}$ . Este valor se asumirá positivo, cuando la corriente concuerde, según la convención de la Imagen 2.4.

2. Se encuentra la corriente correspondiente a la reactancia  $X_{AB} = X_{AC}$ , con base en la curva de magnetización del transformador, la cual será la corriente del sistema.

3. Aplicando la ley de voltajes Kirchoff para el circuito simplificado de la Imagen 2.4, se puede encontrar el voltaje  $V_{CN}$  en la capacitancia.

$$V_{CN} = V_{AN} - V_{AC} \quad (2.6)$$

4. Para una mejor visualización de los resultados, se divide el voltaje en la línea abierta entre el voltaje nominal de línea a tierra ( $V_{AN}$ ), para obtener un valor en por unidad.

5. Se encuentra el valor de  $X_{c1}$ , dividiendo el valor de  $V_{CN}$ , entre la corriente del sistema encontrada en el paso 2.

$$X_{c1} = -V_{BN} / I = -V_{CN} / I \quad (2.7)$$

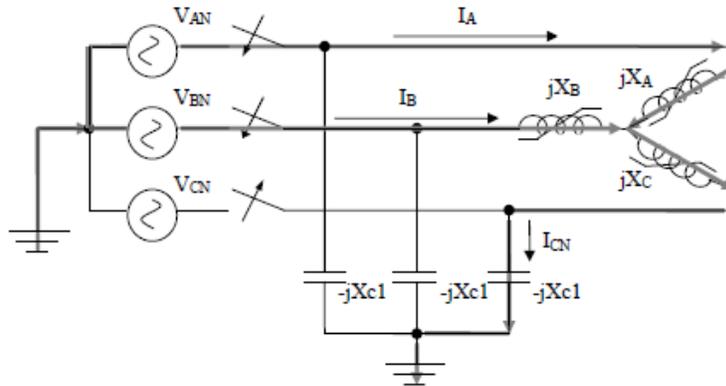
6. Se determina la relación  $X_{c1}/X_m$ , dividiendo el valor de reactancia  $X_{c1}$  entre el valor de la reactancia de magnetización nominal  $X_m$  del transformador del sistema.

7. Con los datos obtenidos se puede calcular un punto de la gráfica correspondiente al valor supuesto de los voltajes  $V_{BN}$  y  $V_{CN}$ . Para encontrar mayor exactitud se calculan más valores, se repite así este procedimiento.

En este caso, los valores de los voltajes de las líneas abiertas a tierra son mayores, que cuando solo una fase esta desconectada de la fuente, y, en ocasiones pueden llegar a ser hasta de cuatro veces el voltaje normal de línea a neutro del sistema, dependiendo de las características del circuito.

### **Caso III. Transformadores conectados en estrella, con una línea abierta.**

En una conexión estrella, en el lado primario del sistema trifásico y una de las fases esta desconectada a la fuente de alimentación trifásica, existe una trayectoria a tierra a través de la capacitancia equivalente del alimentador de la línea abierta. Representando únicamente las trayectorias LC del sistema eléctrico, se obtiene el circuito de la Imagen 2.5.



**Imagen2.5 Una línea abierta, transformadores en conexión estrella.**

Los voltajes  $V_{AN}$  y  $V_{BN}$ , aplicados al banco de transformadores, son los voltajes nominales de línea a tierra de la fuente, tienen igual magnitud y están desfasados  $120^\circ$ , entre sí, mientras que el voltaje  $V_{CN}$ , en la línea abierta del banco es desconocido. Este voltaje depende de la corriente  $I_{CN}$ , que fluye hacia tierra a través de la capacitancia  $X_{c1}$ .

Debido a la no linealidad existente entre el voltaje y la corriente en un transformador,  $X_A$  y  $X_C$  no pueden ser conocidas fácilmente. Este inconveniente hace que el análisis para el caso delta (caso II) no pueda ser utilizado. Por lo que se utilizará el siguiente procedimiento para encontrar la relación voltaje de línea abierta  $V_{CN}$  en función de  $X_{c1}/X_m$ .

1. Partiendo de la curva de magnetización del transformador, se toma un valor de voltaje en la reactancia  $X_c$ . Este valor será negativo, en el caso de que el sistema sea predominantemente inductivo, y positivo cuando sea predominantemente capacitivo.
2. Se encuentra la corriente correspondiente a la reactancia  $X_c$ , con base en la curva de magnetización. Esta corriente se denominará como la corriente del sistema  $I$ .
3. Se utiliza el valor de  $I$  para encontrar el voltaje en la reactancia  $X_A$ , por medio de la curva de magnetización.
4. Utilizando la ley de voltajes de Kirchhoff, se encontrara el voltaje de línea abierta  $V_{CN}$ , de la siguiente forma:

$$V_{CN} = V_{AN} - (V_{XC} + V_{XA}) \quad (2.8)$$

5. Para una mejor visualización de los resultados, se dividirá el voltaje de la línea abierta, entre el voltaje nominal de línea a tierra ( $V_{AN}$ ), y así obtener un valor en por unidad.
6. Se encuentra el valor de  $X_{c1}$ , dividiendo el valor de  $V_{CN}$ , entre la corriente del sistema, que se encontró en el paso 2.

$$X_{c1} = -V_{CN} / I \quad (2.9)$$

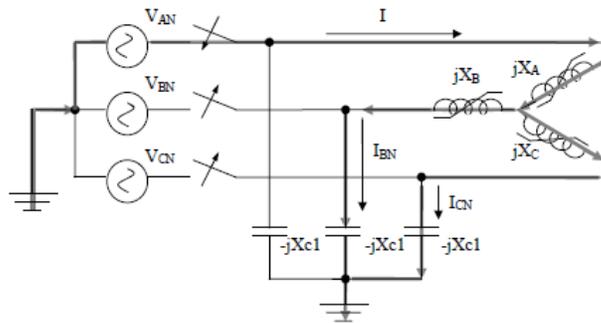
7. Con los datos que se obtienen, se puede verificar un punto en la gráfica. Este procedimiento se repite cuantas veces sea necesario.

#### Caso IV. Transformadores en conexión Estrella, con dos líneas abiertas.

En una conexión estrella, si se mantiene solo una fase conectada a la fuente de alimentación trifásica, existen dos trayectorias a tierra, a través de las capacitancias equivalentes de las líneas abiertas, tal como se ilustra en la Imagen 2.6.

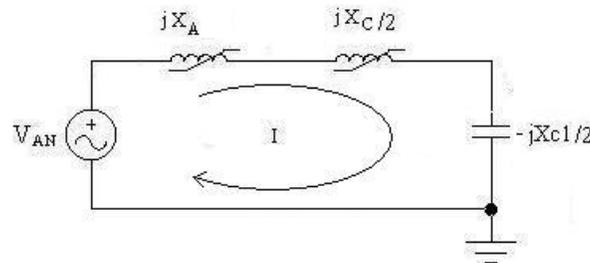
Si los efectos capacitivos a tierra de las líneas abiertas son iguales y si las reactancias de los transformadores  $X_A$ ,  $X_B$  y  $X_C$  son idénticas, entonces las corrientes que fluyen de la línea en servicio hacia tierra por las trayectorias de las corrientes  $I_{CN}$  e  $I_{BN}$  deben ser exactamente iguales, por lo que el potencial en las líneas abiertas es el mismo.

Las trayectorias "LC serie", se muestran con mayor detalle en la Imagen 2.6.



*Imagen 2.6 Dos líneas abiertas, transformadores en conexión estrella.*

La corriente  $I_{CN}$  es igual a la corriente  $I_{BN}$  y ésta a su vez es el doble que la corriente en  $I_A$ , por lo que las reactancias  $X_B$  y  $X_C$  no operan en el mismo punto de la curva de magnetización que la reactancia  $X_A$ .



*Imagen 2.7 Circuito simplificado del caso IV.*

En el circuito simplificado mostrado en la Imagen 2.7, donde  $X_C/2$  indica el paralelo de las reactancias  $X_B$  y  $X_C$  (operan de igual forma), en serie con  $X_c1/2$  y  $X_A$ . Si se asume el voltaje de alimentación como referencia,  $V_{AN} = V_{AN} \angle 0^\circ$  V, la corriente del sistema será entonces:

$$I = \frac{2V_{AN}}{2X_{eq} - X_{c1}} \quad (2.10)$$

En donde

$$X_{eq} = X_A + (1/2) X_C \quad (2.11)$$

Debido a la no linealidad existente entre el voltaje y la corriente en un transformador,  $X_A$  y  $X_c$  no pueden ser conocidas fácilmente. Se utilizará el siguiente procedimiento para encontrar la relación voltaje de línea abierta  $V_{CN}$ , en función de  $X_{c1}/X_m$ .

1. Utilizando la curva de magnetización del transformador, se asume un valor de voltaje en la reactancia  $X_c$ , respecto a  $V_{AN}$ . Este valor será negativo, en el caso, que el sistema sea predominantemente inductivo, y positivo cuando sea predominantemente capacitivo.

2. Se encuentra la corriente correspondiente a la reactancia  $X_c$ , con base en la curva de magnetización. Esta corriente será la del sistema dividido por 2, y con ella se puede entonces encontrar la reactancia  $X_c$ .

$$X_c = \frac{2V_{xc}}{I} \quad (2.12)$$

3. Se utiliza  $I$  para encontrar el voltaje en la reactancia  $X_A$ , por medio de la curva de magnetización:

$$X_A = \frac{V_{XA}}{I} \quad (2.13)$$

4. Se encuentra el valor de  $X_{c1}$ , sustituyendo los valores de las reactancias  $X_A$  y  $X_c$  en la reactancia  $X_{eq}$ , encontrando así el valor de  $X_{c1}$ .

$$X_{c1} = \frac{V_{AN}}{I} + 2X_{eq} \quad (2.14)$$

5. Determinar la relación  $X_{c1}/X_m$ , dividiendo el valor obtenido en el paso anterior, entre el valor de la reactancia de magnetización nominal  $X_m$ .

6. Se encuentra el valor de  $V_{CN}$ , multiplicando el valor de  $X_{c1}$  encontrado en el paso 4, por la corriente del sistema en el paso 2. Luego encontrar el valor en por unidad de éste, dividiéndolo entre  $V_{AN}$ .

$$V_{CN} = X_{c1} * I \quad (2.15)$$

$$V_{CN} (PU) = V_{CN} / V_{AN} \quad (2.16)$$

7. Con los datos que se obtienen, se puede verificar un punto en la gráfica. Se repite este procedimiento cuantas veces sea conveniente.

Es de mencionar que cuando la carga en un transformador es nula o es muy pequeña, existe mayor posibilidad de que un transformador opere en ferresonancia, y esta situación se complica más cuando la operación es en vacío, éste se convierte en un caso más crítico.

### 2.3 REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA SUBTERRÁNEO COMO UN SISTEMA CABLE-TRANSFORMADOR.

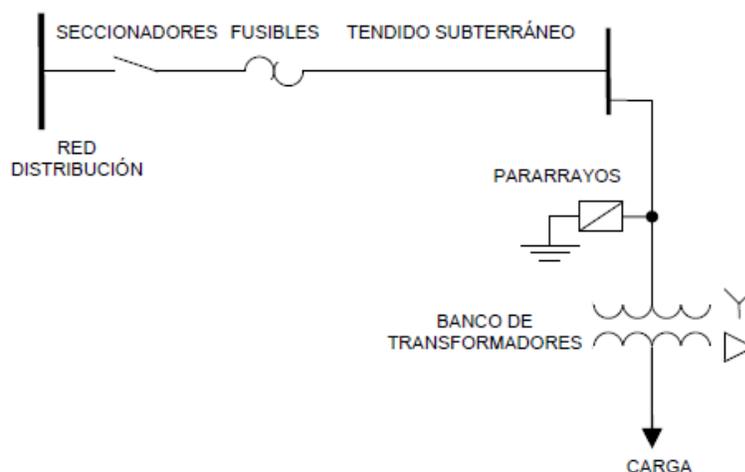
La configuración (cable-transformador) de un determinado sistema eléctrico subterráneo, puede provocar que se presenten sobrevoltajes, como producto de la resonancia entre la

reactancia capacitiva asociada a los cables de alimentación y las reactancias inductivas de los transformadores.

Para las instalaciones de subestaciones eléctricas con acometidas subterráneas, se utilizan cables de potencia con apantallamiento eléctrico, debido a que estos ofrecen mayor seguridad a las instalaciones y una buena continuidad en el servicio. En el apéndice 3, se detalla mayor información de la estructura del tipo de conductor monopolar apantallado. Para representar al sistema de una subestación eléctrica, por medio de sus parámetros eléctricos, es necesario conocer cómo están dispuestos los componentes del mismo.

### 2.3.1 Diagrama unifilar

En un diagrama unifilar, se muestran los componentes básicos de los sistemas subterráneos en media tensión que alimentan a un banco de transformadores, desde una red de distribución aérea, que puede estar formado por tres unidades monofásicas o una unidad trifásica.

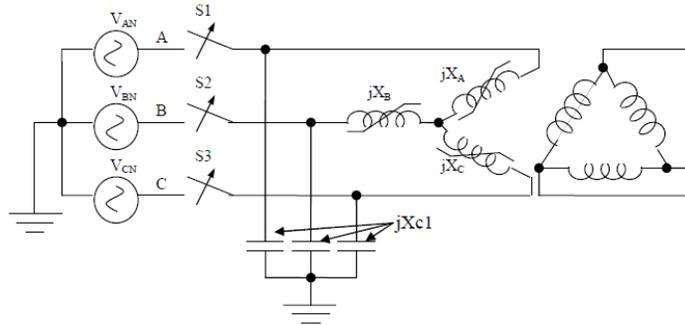


*Imagen 2.8 Diagrama unifilar de un sistema eléctrico Subterráneo.*

### 2.3.2 Circuito de Representación Cable-Transformador.

Para modelar los parámetros, tanto del cable como del transformador, se puede utilizar un modelo sencillo, tal como el mostrado en la Imagen 2.9.

La fuente equivalente representa la red de distribución, como una fuente de alimentación trifásica en conexión estrella y con neutro sólidamente aterrizado, con voltaje constante, de frecuencia nominal de 60 Hz e impedancia interna despreciable. Los voltajes se denotan como  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$  y  $V_{CN}$ , que son los voltajes de la fuente de alimentación trifásica referenciados a tierra, y las fases **A**, **B** y **C** correspondientes a los mismos.



**Imagen 2.9** Circuito de representación de conexión estrella-delta, de un sistema eléctrico subterráneo.

Los interruptores **S1**, **S2** y **S3** representan a los cortacircuitos o fusibles, así como otros elementos de protección monopolares, correspondientes a las fases **A**, **B** y **C**, que son dispositivos que en un momento dado pueden abrir el circuito de más de alguna fase, que dependen de la situación del sistema (fallas, maniobras, etc.) .

Las reactancias saturables **X<sub>A</sub>**, **X<sub>B</sub>** y **X<sub>C</sub>**, representan las reactancias de magnetización de los transformadores. La reactancia capacitiva de las líneas de alimentación se denominara como **X<sub>c1</sub>** (para no confundir con **X<sub>c</sub>** de los transformadores), se asume que los cables de alimentación tienen las mismas características y, por tanto, son reactancias iguales.

#### **2.4 PROCEDIMIENTO A SEGUIR PARA EL CÁLCULO DE LA LONGITUD CRÍTICA DE LOS CABLES DE ALIMENTACIÓN DE UNA SUBESTACION ELECTRICA.**

Para evitar sobrevoltaje por ferresonancia en una subestación eléctrica, es de asegurar que la reactancia capacitiva del cable sea mucho mayor que la reactancia inductiva del transformador; esto se logra limitando la longitud de los alimentadores a un valor que pueda utilizarse en la conexión de transformadores, sin que tenga el riesgo de sobrevoltajes ocasionados por el fenómeno de la ferresonancia.

Resolver de forma analítica un problema de ferresonancia, es muy complejo, por lo que es recomendable utilizar métodos alternativos para solucionar este tipo de problemas.

Un método muy eficaz y recomendable es el de utilizar esquemas resonantes series, en el cual se pueden considerar de manera aproximada los requerimientos necesarios que establecen los valores de capacitancia e inductancia que pueden producir el fenómeno de la ferresonancia en un determinado sistema eléctrico.

Un método sencillo y fácil de implementar, es el del cálculo de la longitud máxima crítica de la acometida de un sistema eléctrico. Para el cálculo de la longitud máxima crítica, se requiere definir cuál debe ser la relación mínima entre la reactancia capacitiva del cable y la reactancia inductiva del transformador.

Obteniendo el dato  $X_c/X_m$ , es fácil encontrar la longitud mínima del cable donde el sistema puede entrar en ferresonancia. Sabiendo que al aumentar esta longitud, se aumenta la capacitancia total del cable, aumentando el riesgo de que se produzca el fenómeno de la ferresonancia, en el momento de haber condiciones de línea abierta.

Para realizar este cálculo se puede utilizar un método general con el cual se determinará la longitud crítica, el cual se enuncia a continuación:

1. Determinar la relación  $X_c/X_m = K$ , donde esta empieza a tener un solo punto de operación en el sistema de distribución.

2. Determinar la reactancia de magnetización del transformador de la siguiente forma:

$$X_m = \frac{V_{nom}}{I_{nom} (Vacio)} \quad \text{Ó} \quad X_m = \frac{Kv^2}{I_{exc\%} * KVA} \quad (2.17)$$

3. Encontrar la reactancia capacitiva del cable a utilizar en la acometida, se utiliza la siguiente ecuación.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C l} \quad (2.18)$$

Dónde:

$f$ : Frecuencia nominal.

$C$ : Capacitancia por unidad de longitud.

$l$ : Longitud del cable.

4. Determinar la longitud del cable de la siguiente forma:

$$l = \frac{1}{2\pi * f * C1 * X_c} \quad (2.19)$$

En donde:

$l$ : Es la longitud del cable en metros.

$f$ : Es la frecuencia de la fundamental en Hz.

$C1$ : Es la capacitancia distribuida en F/m.

$X_c$ : Es la reactancia capacitiva

5. Sustituir la relación de  $k * X_m = X_c$ , en la relación anterior y determinar la longitud máxima del cable:

$$l = \frac{1}{2\pi * f * C1 * X_m * K} \quad (2.20)$$

También se puede utilizar la siguiente expresión para calcular la longitud crítica, donde  $K = X_c/X_m$ .

$$l = \frac{I_{exc\%} * kVA}{K * 2\pi * f * C * KV^2} \quad (2.21)$$

**Consideraciones:**

- ✓ Para valores grandes de la relación de  $X_{c1}/X_m$ , el voltaje presente en el sistema eléctrico, se aproximan al de la fuente de alimentación es decir no aparecen sobrevoltajes; este es el caso donde la capacitancia del sistema y la longitud son muy pequeña.
- ✓ Para valores bajos de  $X_{c1}/X_m$  (grandes longitudes de los alimentadores), los voltajes pueden alcanzar valores muy altos, debido a que el núcleo del transformador está saturado y una condición de resonancia es alcanzada entre  $X_{c1}$  y la reactancia de magnetización del transformador.

Las posibilidades de tener ferresonancia en cables dependerá de:

- ✓ Si la relación  $X_c/X_m$  es muy elevada, no se tienen problemas de ferresonancia.
- ✓ Si la relación  $X_c/X_m$  se reduce, por aumento de  $C$  o por disminución de  $X_m$ , se puede presentar la ferresonancia.

Cuando se emplean cables, la medida principal para evitar la ferresonancia, consiste en limitar la longitud de la acometida para que no se alcance el valor de capacitancia crítica.

La longitud crítica, se define como la mayor longitud de la acometida que puede utilizarse en la conexión del transformador, sin que se tenga el riesgo de ferresonancia.

El cálculo de la longitud máxima crítica, es un método sencillo para poder analizar si un sistema eléctrico puede entrar en resonancia.

Es de mencionar ciertos estudios relacionados con este tema, uno muy interesante es el de las recopilaciones de Ralph Hopkinson, el cual en varios de sus trabajos detalla que para transformadores de potencia, la longitud permisible se obtendrá para  $K$  igual a 30 en el caso de conexión estrella-delta o delta-delta, e igual a 40 para el caso de la conexión delta-estrella. Estos valores, son resultados de estudios en un analizador de red Transient Network Analyzer TNA, correspondientes a sobretensiones no mayores de 1.25 veces la tensión nominal de fase a neutro.

Conexión Primario/Secundario	Transformador $X_c/X_m$ mínimo (K).
Delta/Estrella aterrizada	40 para bancos de 3 transformadores monofásicos.
	30 para transformadores con núcleo de 5 columnas.
Delta/Delta	30
Estrella/Delta	30
Estrella aterrizada/estrella aterrizada	0 para banco de 3 transformadores monofásicos
	1 para transformadores con núcleo de 5 columnas.

*Tabla 2.1 Valores mínimos de  $X_c/X_m$  (K), dependiendo el sistema y la configuración*

**Fuente: “Ferroresonant Overvoltage Control Based on TNA Test on Three Phase Delta-Wye Transformers Banks. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems”. Hopkinson Ralph. Octubre 1967.**

La capacitancia crítica del cable está directamente relacionada a los transformadores, los niveles de pérdidas en vacío de los transformadores que se fabrican hoy en día son una fracción de lo que eran en los transformadores producidos en años atrás, por lo que la longitudes críticas de los cables para los transformadores modernos, son mucho más cortas que las sugeridas, para el tiempo en que fue realizado el estudio de la tabla 2.1, evitando valores de sobretensiones riesgosos, y para la creación de condiciones propicias para la ferresonancia.

Es de mencionar que investigaciones recientes como las realizadas por un grupo de Ingenieros de la Universidad del Valle en Colombia, basadas en el modelamiento del sistema ferresonante en ATP Alternative Transient Program, en conjunto con pruebas de laboratorio para validar el modelo empleado en la herramienta computacional, y utilizando información real proveniente de pruebas de laboratorio (ensayos de vacío y corto circuito) como datos de entrada para la simulación computacional, han encontrado que para que se garantice que el voltaje en la(s) fase(s) desenergizada(s) no supere el 125% del voltaje nominal (y así no se produzca daño del aislamiento y la falla y/o operación de los descargadores de sobretensión), que la relación  $K$  para transformadores monofásicos debe ser 2.5 y para transformadores trifásicos, 2.

Estos valores de  $K$  difieren notoriamente de los presentados en la tabla 2.1 lo cual es debido a las simplificaciones y consideraciones que se deben hacer al realizar estudios en TNA.

Los cables tienen mayor capacitancia fase-tierra por unidad de longitud que las líneas aéreas, de esta manera el problema se establece más fácilmente en redes eléctricas subterráneas. Con voltajes de distribución menores a 13.2KV el problema es moderado, a menos que una considerable longitud de línea esté involucrada.

Para voltajes de distribución más altos 23/13.2KV, la capacitancia de las líneas es ya un problema. Finalmente a voltajes mayores de 34.5/23kv, aún sin considerar a la línea que conecta al transformador, pueden ocurrir sobrevoltajes ferroresonantes por efecto de la capacitancia entre los devanados de alta y baja tensión del transformador y la de los devanados a tierra. La reactancia capacitiva puede ser comparable con la reactancia de magnetización del transformador, la cual incrementa la probabilidad de ocurrencia de los sobrevoltajes ferroresonantes.

En el apéndice 2 las tablas A2.2 y A2.3 muestran algunas longitudes adecuadas de ramal para algunos transformadores de diferente potencia y distintos niveles de voltaje del alimentador primario.

A continuación se presenta un ejemplo de un sistema eléctrico, que esta propenso a que el fenómeno de la ferroresonancia aparezca.

### **EJEMPLO: Cálculo de la capacitancia total de los cables.**

La capacitancia total de los cables monopares apantallados, utilizados para el sistema subterráneo, es la suma de todas las capacitancias distribuidas de estos cables. Esta capacitancia total se puede obtener fácilmente de la siguiente forma:

$$C_1 = C_d * L \quad (2.21)$$

Donde

**C<sub>1</sub>**: es la capacitancia total (μF)

**C<sub>d</sub>**: es la capacitancia distribuida (μF/Km)

**L**: es la longitud (Km)

Utilizando la tabla del Apéndice 2, la cual muestra los valores de capacitancias distribuidas para cables subterráneos con aislamiento XLPE al 100%, se encuentra que un calibre 1/0 con 19 conductores, posee una capacitancia distribuida de 0.483 μF/Km. La longitud total de los cables subterráneos, si se toma un valor de 460 m o 0.46 Km, como ejemplo se tiene que la capacitancia total del cable es:

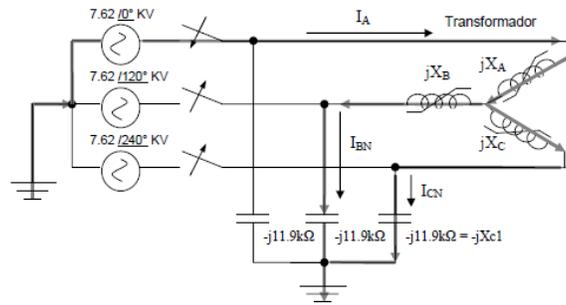
$$C_1 = (0.483 \mu\text{F/Km}) * (0.46 \text{ Km}) = 0.222 \mu\text{F} \quad (2.22)$$

La reactancia capacitiva correspondiente a este valor de capacitancia del cable es:

$$X_{c1} = 1/(377*0.222\text{E-}6) = 11,938 \text{ K}\Omega \approx 11.9 \text{ K}\Omega. \quad (2.23)$$

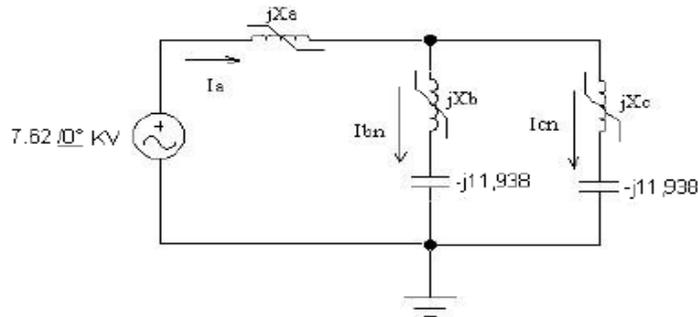
En este caso se utilizara un modelo de Ferroresonancia para analizarlo, se asumirá el caso de dos líneas abiertas y transformadores en conexión estrella (Caso IV). En la Imagen 2.10, se muestra la representación cable-transformador para el presente caso, en el cual por simplicidad se analiza únicamente el transformador.

Los voltajes de las fuentes de alimentación corresponden a los voltajes de línea a neutro de la red de distribución, la cual está sólidamente referenciada a tierra. La reactancia capacitiva de los cables de alimentación es la correspondiente a la calculada anteriormente con la ecuación 2.23.

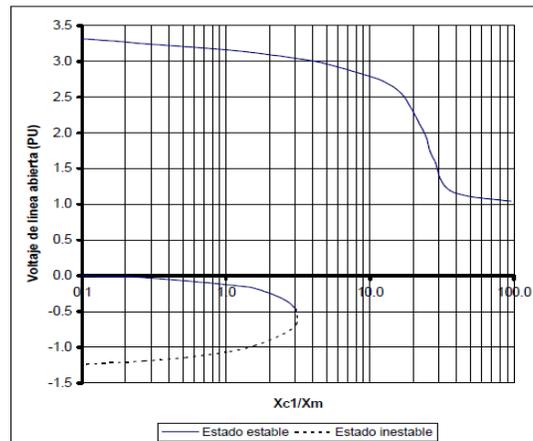


**Imagen 2.10** Caso de estudio. Dos líneas abiertas y transformadores en conexión estrella.

En la Imagen 2.11, se presenta el modelo circuito simplificado del circuito mostrado en la Imagen 2.10, en el cual están incluidos los valores en ohmios de las reactancias capacitivas de los cables, y el valor para la fase **A**, que alimenta al sistema durante la condición de dos líneas abiertas. Las reactancias de los transformadores permanecen como variables.



**Imagen 2.11** Circuito simplificado para el caso de estudio.



$V_{BASE} = 7.62 \text{ KV}$   
 $X_m = 506.7 \text{ K}\Omega$

**Imagen 2.12** Comportamiento del voltaje de línea.

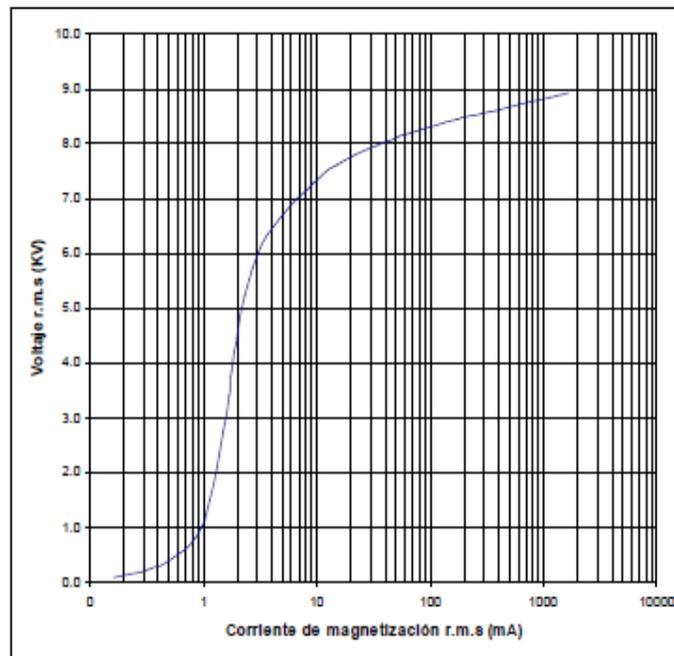
Utilizando la Imagen 2.12, la cual muestra el comportamiento típico del voltaje de línea abierta, respecto a la relación  $X_{c1}/X_m$ , para sistemas de distribución en **13.2 KV**.

Tomando la curva de magnetización de la Imagen 2.13, se obtiene la reactancia nominal de magnetización, dividiendo el voltaje nominal de los transformadores dentro de la corriente de magnetización correspondiente. Obteniendo el siguiente resultado:

$$X_m = 7.62 \text{ KV} / 0.015 \text{ A} = 508 \text{ K}\Omega$$

La relación  $X_{c1}/X_m$  se obtiene, dividiendo el valor de reactancia de los cables dentro de la reactancia nominal de magnetización.

$$X_{c1}/X_m = 11.9 \text{ K}\Omega / 508 \text{ K}\Omega = 0.023$$



*Imagen2.13 Curva de magnetización V-I típica para devanados de 7.6 KV, en transformadores de distribución.*

Se puede deducir el voltaje en **PU** correspondiente a la relación  $X_{c1}/X_m = 0.023$ , mediante la verificación de la curva de la Imagen 2.12.

Se pueden deducir los siguientes puntos de interés:

- Hay dos puntos de operación de estado estable y uno inestable para este valor.
- Uno de los puntos de operación estable corresponde a la región de operación bajo ferresonancia.
- El valor del voltaje correspondiente a la región de operación en ferresonancia es aproximadamente **3.4 PU**.

Para obtener el voltaje de línea abierta en **KV** correspondiente, simplemente se multiplica el valor en **PU** por la base que es para este caso de **7.62 KV**.

Los voltaje de línea abierta se pueden obtener como = **3.4 x 7.62 KV ≈ 25.9 KV**.

El fenómeno de la ferresonancia provoca que aparezcan sobrevoltajes de línea abierta, los cuales difieren con el voltaje de operación normal del sistema eléctrico, esto es perjudicial y dañino para los componentes de la subestación eléctrica.

### **CAPITULO III. INDICADORES, EFECTOS Y ESTRATEGIAS PARA EVITAR LA FERRORESONANCIA EN UN SISTEMA ELECTRICO.**

Al aparecer el fenómeno de la ferresonancia, en el transformador se experimentan sobrevoltajes, que son consecuencia de la interacción de reactancias inductivas y capacitivas, que conducen a la saturación. La ferresonancia es más factible que aparezca en niveles de tensión altos, aunque su presencia es posible en todos los niveles de tensión de un determinado sistema eléctrico.

La proporción de pérdidas, de la reactancia de magnetización, y la capacitancia en niveles de tensión bajos, puede limitar los efectos de ferresonancia.

#### **3.0 CONDICIONES BASICAS DE UN SISTEMA ELECTRICO, PARA QUE LA FERRORESONANCIA PUEDA PRESENTARSE.**

La ferresonancia comúnmente ocurre cuando los transformadores se energizan en vacío o con muy poca carga eléctrica, en acometidas con cables subterráneos, se debe tener cuidado con los rangos de longitudes, debido a que existen longitudes críticas las cuales son propicias a la aparición del fenómeno de la ferresonancia. La longitud mínima de cable requerido para causar la Ferresonancia varía con el nivel de tensión del sistema.

La capacitancia de cables es casi la misma para todos los niveles de tensión de distribución, que varían de 40 a 100nF por 1000 pies, dependiendo el tamaño del conductor. La reactancia de magnetización de un transformador de distribución de 35kV es varias veces más alta que un transformador de 15kv.

En una red real se encuentran una gran infinidad de capacitancias e inductancias, esto hace que las condiciones propicias a la ferresonancia sean innumerables.

Los estudios realizados hasta la fecha, hacen posible identificar ciertas condiciones típicas que muestran mayor susceptibilidad a la ferresonancia, algunos ejemplos comunes:

##### **1) Transformadores conectados a una red con neutro aislado.**

Se puede presentar por una falla en el sistema de puesta a tierra, así como por el acoplamiento de una fuente de emergencia con el neutro aislado. Esto provoca desplazamiento del neutro y un aumento en la tensión respecto a la tierra de una o de dos fases. Los valores de las sobretensiones pueden sobrepasar en régimen estable los valores de la tensión de alimentación y provocar una destrucción dieléctrica del material eléctrico.

##### **2) Transformador alimentado accidentalmente sobre una o dos fases.**

Estas configuraciones aparecen cuando un transformador en vacío o con poca carga eléctrica, se alimenta de una red con una o dos fases, puede ocurrir después de la fusión de un fusible, cuando se corta un conductor o se realizan trabajos de mantenimientos que impliquen la conexión o desconexión de líneas. Las capacitancias que se pueden presentar pueden ser la de los aisladores y sistemas de aislamiento, las de una línea o un cable que alimente a un

transformador y que los devanados primarios están conectados en estrella con neutro aislado, con neutro a tierra, o en conexión estrella.

### **3) Transformadores de potencia AT/MT con neutro aislado.**

Cuando los transformadores tienen la conexión del neutro aislados de tierra, y se conectan al lado de MT entre fase y tierra, si en un momento dado se queda operando en vacío, y si ocurre un fallo a tierra por el lado de AT aguas arriba de la subestación de transformación, provoca que el neutro del lado de AT alcance un potencial elevado.

### **4) Transformador alimentado por una red capacitiva y de poca capacidad de cortocircuito.**

Cuando el transformador está en vacío y se alimenta bruscamente con una fuente de baja capacidad de cortocircuito con respecto a la potencia nominal del transformador mediante un cable o una línea larga. Esta condición puede ser ocasionada por el restablecimiento del servicio de una red de media tensión, residencial o industrial, cuando la longitud del cable de potencia subterráneo es muy largo.

Se pueden mencionar los acontecimientos siguientes que conducen a la ferresonancia:

- ✓ La operación manual de un transformador en vacío, si de las tres fases de alimentación de un transformador sólo una fase está cerrada; el fenómeno de la ferresonancia puede aparecer cuando la primera fase del sistema se cierra en la energización o antes de que la última fase sea abierta en la desenergización.
- ✓ Presencia de capacitancias e inductancias no lineales en un determinado sistema eléctrico.
- ✓ Si en algún punto el potencial no es fijo, provocando una falla en una fase; la operación de un fusible, ya sea por alguna falla o por mala operación lo cual provocaría que el voltaje se distribuya en las demás fases ocasionando sobrevoltajes.
- ✓ Las operaciones de aparatos de protección de sobrecorriente monopoles, entre estos aparatos se encuentran los fusibles o reconectores monofásicos.
- ✓ Las maniobras normales con aparatos monopoles, entre estos se puede mencionar los cortacircuitos usados para energizar o desenergizar los bancos de transformadores.

En resumen para que el fenómeno de la ferresonancia aparezca en un sistema eléctrico depende de muchos factores, los más importantes son:

- ✓ **La capacitancia entre el conductor abierto y el transformador de potencia.**
- ✓ **El voltaje del sistema de alimentación de la subestación eléctrica.**
- ✓ **La magnitud de la carga conectada en los terminales del secundario del transformador.**
- ✓ **La magnitud de la impedancia en el circuito primario entre un conductor abierto y el transformador.**

### **3.0.1 Parámetros de alteración**

Los parámetros que influyen directamente en la aparición del fenómeno de la ferresonancia son la reactancia de magnetización de los transformadores y la reactancia capacitiva de los cables de alimentación.

### 3.0.2 Reactancia de magnetización de los transformadores

La reactancia de magnetización de los transformadores depende en forma directa de las características constructivas, este parámetro no puede ser modificado a efecto de eliminar la ferresonancia.

### 3.0.3 Reactancia capacitiva de los cables de alimentación

Al analizar el comportamiento del voltaje de línea abierta versus la relación  $X_{c1}/X_m$ , el fenómeno de ferresonancia se torna menos significativo, haciendo que la reactancia capacitiva  $X_{c1}$  sea mayor que la reactancia de magnetización  $X_m$ .

Al modificar la reactancia capacitiva a valores tales que,  $X_{c1} \gg X_m$ , se evita en gran medida la ferresonancia y los efectos consecuentes del fenómeno de la ferresonancia. La reactancia capacitiva  $X_{c1}$ , debida a los cables de alimentación, es un parámetro que se puede alterar, está íntimamente relacionado con la longitud, la sección del conductor y el voltaje para el cual están diseñados los cables de alimentación.

### 3.0.4 Resistencia

Al operar un circuito RLC-no lineal en ferresonancia, la corriente en el mismo es máxima y queda limitada únicamente por la resistencia del circuito. Esta corriente  $I_{MAX}$  puede ser limitada hasta un valor igual al voltaje de la fuente sobre la resistencia ( $V/R$ ), con lo cual asegura que los voltajes en las reactancias quedan limitados a un valor máximo.

En los sistemas de distribución, las resistencias propias son de valores tales, que no afectan en forma significativa a la corriente del sistema y, por tanto, al fenómeno de la ferresonancia. La opción en este caso es introducir resistencia o resistencias al sistema con el objeto de atenuar los efectos del fenómeno de la ferresonancia.

## 3.1 INDICADORES Y EFECTOS PRODUCIDOS POR LA FERRORESONANCIA.

La ferresonancia, provoca una sobretensión transitoria en el embobinado primario del transformador, teóricamente hasta de 4 veces la tensión nominal de línea del sistema, que daña principalmente los pararrayos, las terminales del transformador, los equipos de medición en media tensión, y causa riesgos de quemaduras al personal de operación, el transformador sufre calentamiento por altos flujos magnéticos y altas corrientes lo que causa envejecimiento del aislamiento, y en casos extremos daño al mismo transformador. Estas sobretensiones aparecen también en el lado secundario y son las causantes de daños a los equipos que permanecen conectados a la red.

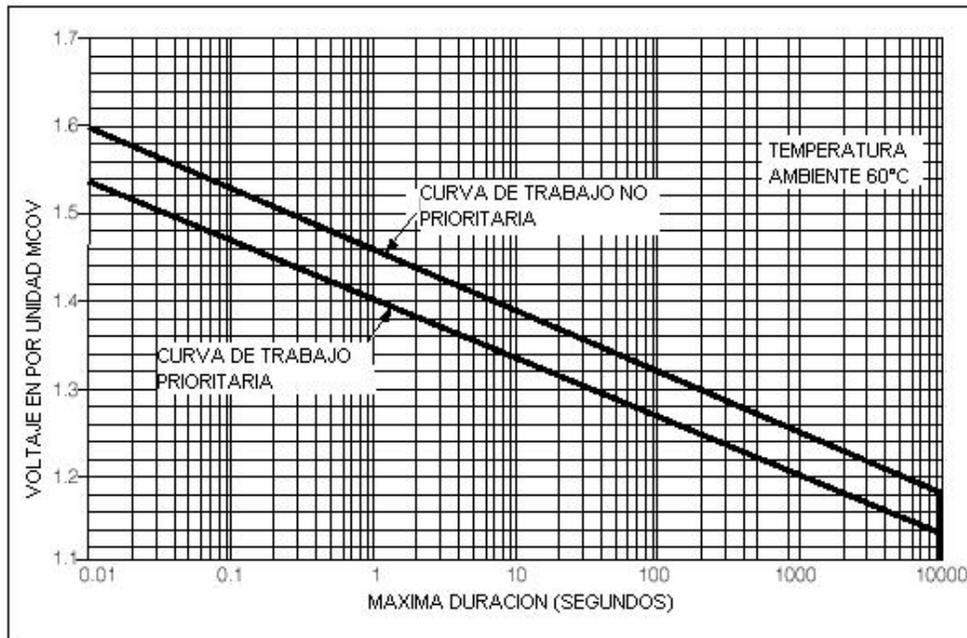
Algunos indicadores y efectos comunes que provocan el fenómeno de la ferresonancia en un sistema Eléctrico.

### 3.1.1 Fallas y daños en los pararrayos

Las líneas de alimentación tienen un efecto capacitivo, los sobrevoltajes son más significativos y pueden ser mayores a 2.5 veces el voltaje nominal de línea a tierra, y se mantienen por tiempos indefinidos. Los pararrayos, conectados a estas líneas, intentan eliminar los sobrevoltajes por medio de la conducción de altas corrientes de la línea a tierra. Estas corrientes se traducen en grandes cantidades de energía disipadas por los pararrayos.

En la Imagen 3.1, se muestra el comportamiento mediante curvas de operación de los pararrayos de distribución, cuando son sometidos a sobrevoltajes.

Cuanto mayor sea la diferencia entre el sobrevoltaje y el MCOV (Tensión máxima de servicio continuo en KV) del pararrayo, al ocurrir el fenómeno de la ferresonancia, los pararrayos son los primeros en ser afectados, provocando daños prematuros en los pararrayos.



**Imagen 3.1 Curva típica de capacidad de operación en sobrevoltajes, para pararrayos de distribución.**

### 3.1.2 Distorsión de la forma de onda de los voltajes y las corrientes.

El fenómeno de la ferresonancia, hace que los transformadores trabajen en la región de saturación, provocando que la forma de onda de la corriente del sistema y los parámetros del mismo se distorsione.

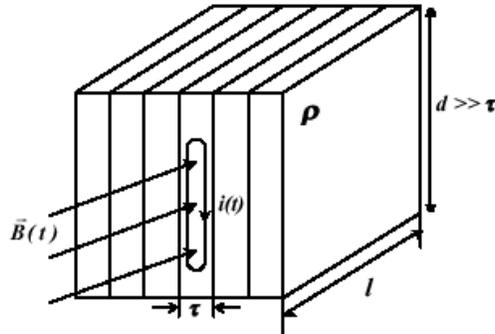
Las distorsiones en la corriente y en los voltajes llevan consigo un gran contenido de armónicos, principalmente impares, que afectan directamente los equipos y el funcionamiento del sistema eléctrico.

### 3.1.3 Sobre-calentamiento en el núcleo de los transformadores

Al concentrarse en los transformadores, los sobrevoltajes provocan aumentos directos en el flujo magnético, provocando que los momentos magnéticos en el núcleo del transformador se alineen en su totalidad, y ya no contribuyan al crecimiento de la densidad de flujo magnético (B). Como consecuencia la permeabilidad del núcleo disminuye y la intensidad del campo magnético (H) aumenta a mayor magnitud, que los aumentos percibidos en la densidad de flujo magnético (B), lo que deriva en aumentos considerables en la corriente de excitación.

Los altos flujo magnético ( $\Phi$ ) en el núcleo del transformador dan lugar a campos eléctricos inducidos que ocasionan una gran cantidad de corrientes parásitas, que circulan en el núcleo y se oponen al cambio de la densidad de flujo ( $B$ ).

La distorsión en la forma de onda del voltaje aplicado al transformador (debido al fenómeno de la ferresonancia), hace que estos campos eléctricos inducidos sean de mayor magnitud. Provocando altas pérdidas en el núcleo del transformador por calentamiento óhmico  $I^2R$ , con temperaturas provocadas en el transformador en vacío, que pueden llegar a ser de magnitudes mayores a las provocadas por una sobrecarga eléctrica en el transformador.



*Imagen 3.2 Corrientes parásitas en el núcleo de los transformadores.*

### 3.1.4 Calentamiento en partes metálicas de los transformadores

La alta densidad de flujo magnético, provoca calentamiento en las partes metálicas del transformador. Desde el instante que el núcleo es mantenido en saturación, el flujo magnético encontrará un camino en la pared del tanque y en partes metálicas.

### 3.1.5 Ruido audible

La alta densidad de flujo existente en el núcleo provocado por los altos voltajes, ocasionará un ruido audible debido a la magnetostricción del acero y al actual movimiento de las laminaciones del núcleo. Este sonido provocado por el transformador es diferente y mayor que el ruido normal que ocasiona el transformador cuando opera en condiciones normales. La magnetostricción en condiciones muy simples significa el cambio en la longitud de los materiales ferromagnéticos, cuando están sujetos a un campo magnético.

### 3.1.6 Flicker.

Al aparecer el fenómeno de la ferresonancia, la magnitud de la tensión puede fluctuar desordenadamente. Algunos aparatos electrónicos pueden ser muy susceptibles a tales fluctuaciones de tensión. La exposición prolongada a estas distorsiones, puede acortar la vida esperada de los equipos eléctricos o puede causar fallas inmediatas.

### 3.1.7 Sobretensiones.

Estas pueden ser permanentes elevadas entre fases o se pueden dar también entre fases y neutro dependiendo de la configuración del sistema eléctrico.

Algunos de estas condiciones no son producidos únicamente por el fenómeno de la ferresonancia. El desplazamiento permanente del punto neutro de una red con neutro aislado puede ser también consecuencia de alguna falla entre una fase y tierra, esta falla es común en los sistemas eléctricos. La dificultad de diagnosticar una falla radica principalmente en la falta de toma de datos, en el momento de que se presenta una falla en un sistema eléctrico. Por lo que se recomienda observar primero la configuración de la red eléctrica, así como los sucesos que preceden a la falla tales como: conexión de los transformadores, pérdida de carga, etc. Los cuales podrían haber iniciado la causa de la falla.

### **3.2 SOLUCIONES PROPUESTAS PARA MITIGAR LAS SOBRETENSIONES PRODUCIDAS POR LA FERRORESONANCIA.**

Existen muchos factores que se deben tomar en cuenta desde el momento que diseña una subestación Eléctrica, a fin de evitar las configuraciones propensas para el origen del fenómeno de la ferresonancia.

La publicación 71 de la IEC especifica que las sobretensiones temporales ocasionadas por el fenómeno de la ferresonancia se deben evitar y limitar, no se deben considerar como base para la elección de la tensión de un pararrayo o para el diseño de aislantes. Esto indica que el procedimiento de coordinación de aislamiento no considera los niveles de sobretensiones debidos a la ferresonancia y por consiguiente los pararrayos, no constituyen una protección contra este fenómeno.

**Algunas soluciones prácticas:** Para mitigar el caso de configuraciones propicias a la aparición del fenómeno de la ferresonancia, se pueden mencionar:

1. **En una red con neutro aislado**, evitar conectar los primarios de transformadores de potencial en estrella con neutro primario a tierra, dejando el neutro de los primarios de los transformadores de potencial aislados o conectándolos en delta.
2. **Usar una carga resistiva permanente**, conectando carga resistiva en el secundario del transformador para absorber la energía almacenada en las capacitancias y con ello prevenir las oscilaciones. Un valor de carga de 1 al 4 % de la capacidad nominal del transformador o banco, dependiendo del largo de los cables de alimentación en el primario.
3. **Prevenir la condición de fase abierta**, mediante la restricción de las maniobras monofásicas o la protección por fusibles cuya fusión produce un corte unipolar, utilizando dispositivos de interrupción trifásica, desde el punto de vista eléctrico es muy práctico pero debido a factores económicos y de disponibilidad de espacio generalmente no es una solución accesible.

Por lo que es recomendable instalar los fusibles, interruptores automáticos, muy próximos al transformador, con el fin de bajar la capacitancia entre el interruptor automático y el transformador por debajo de su valor crítico.

La mayoría de casos la presencia del fenómeno de la ferresonancia es resultado de fusibles dañados en una o dos fases debido a falla, algún tipo de maniobra en alguna fase. Una medida lógica efectiva en contra del fenómeno de la ferresonancia podría ser usar equipo de accionamiento de tres fases.

**4. Limitar las sobretensiones.** Los pararrayos por el lado primario del transformador por lo general limitaran las tensiones de 1.7 a 2.0pu. Existe cierto riesgo de que los pararrayos fallen si las sobretensiones de la ferresonancia permanecen por largo tiempo. De hecho los pararrayos del lado secundario del transformador que tienen niveles más bajos de protección que los pararrayos del lado primario son frecuentemente dañados por causa de la ferresonancia.

**5. Limitar la longitud de los cables,** revisando los parámetros involucrados en los circuitos eléctricos, para analizar si se encuentran dentro de los rangos permisibles para evitar la posibilidad que el fenómeno de la ferresonancia aparezca. La longitud permitida del cable depende también del nivel de tensión. Sin embargo las modernas tendencias en el diseño de transformador con bajas pérdidas y corrientes de excitación están haciendo que sea más difícil evitar la ferresonancia.

**6. Operación de los transformadores conectados en delta,** tales transformadores deberían protegerse porque las tensiones podrían ser extremadamente altas.

En resumen se deben considerar tres recomendaciones importantes, para la eliminación o mitigación del fenómeno de la ferresonancia en una subestación eléctrica.

- a) **Evitar que los valores** de las reactancias de los transformadores y cables de alimentación sean de valores capaces de producir el fenómeno de la ferresonancia.
- b) **Evitar que se formen** trayectorias LC-no lineales.
- c) **Insertar componentes** resistivos al sistema de distribución, para atenuar los sobrevoltajes producidos por la ferresonancia. Finalmente para los usuarios que ya han sufrido el problema de daños por ferresonancia, la solución definitiva que se ha encontrado ha sido la de cambiar la capacitancia del cable mediante la colocación de tablillas derivadoras en algún registro del cable de acometida, como el cable se corta para realizar este arreglo, la capacitancia a tierra del mismo resulta afectada eliminando el riesgo por ferresonancia.

## **CAPITULO IV. IMPLEMENTACION DEL FENOMENO DE LA FERRORESONANCIA EN EL LABORATORIO.**

Es de mucha importancia realizar pruebas prácticas, para validar las investigaciones teóricas sobre el fenómeno de la ferresonancia y de esta forma comprender con mayor claridad las condiciones favorables en las que pueda aparecer el fenómeno de ferresonancia en un circuito eléctrico.

### **4.0 EQUIPO Y MATERIALES UTILIZADOS**

Para la implementación del laboratorio acerca del fenómeno de la ferresonancia, se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

- a) Transformador seco monofásico de baja tensión de 1.2 kVA.
- b) Capacitores de  $6\mu\text{F}$ ,  $10\mu\text{F}$  y  $15\mu\text{F}$ .
- c) Fuente variable de Voltaje.
- d) Multímetro Digital.
- e) Osciloscopio.
- f) Protección de 2A y 9A.
- g) Conductor eléctrico calibre 12.
- h) Amperímetro de Gancho.
- i) Resistencia variable de 0-15 $\Omega$ .
- j) Medidor Power Guide 4400 (DRANETZ).

El Transformador seco utilizado, es el elemento principal en estudio, por lo que es necesario conocer las características eléctricas del transformador, para poder realizar una aproximación más real acerca del comportamiento del fenómeno de la ferresonancia. En la tabla 4.1, se muestran los datos del transformador utilizado.

<b>Tensión Nominal Primario.</b>	<b>120V</b>
<b>Corriente nominal Primaria.</b>	<b>9 A.</b>
<b>Tensión Nominal Secundario.</b>	<b>120V</b>
<b>Corriente nominal Secundario.</b>	<b>9A.</b>
<b>Frecuencia Nominal</b>	<b>60Hz</b>
<b>Potencia</b>	<b>1.2 kVA</b>

*Tabla 4.1 Datos del transformador Seco*

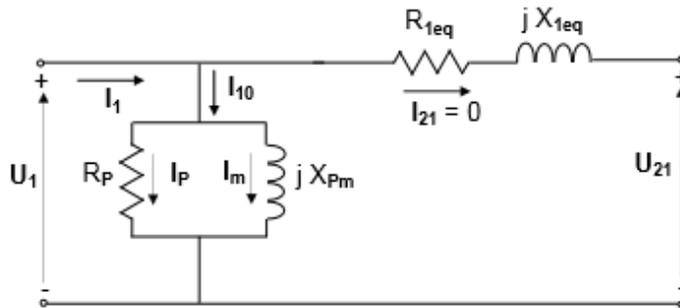
Los datos mostrados en la tabla 4.1, se obtuvieron realizando las pruebas necesarias en el laboratorio, con el propósito de obtener datos más precisos para el estudio a realizar.

### **4.1 ENSAYO DE VACIO, CORTOCIRCUITO Y RESISTENCIA OHMICA EN EL TRANSFORMADOR.**

Para determinar los parámetros eléctricos que caracterizan al transformador, se realizaron los siguientes ensayos.

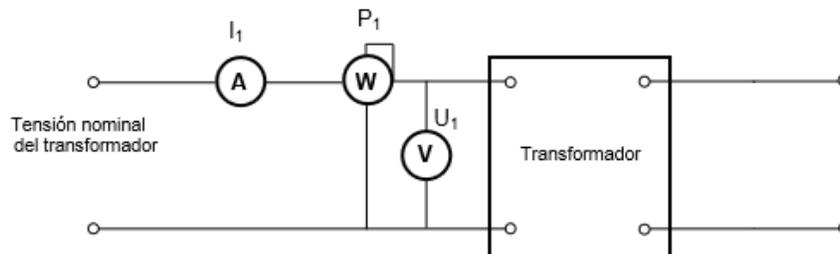
### 4.1.1 Ensayo de vacío.

Este ensayo consiste en alimentar el devanado primario del transformador, con la tensión nominal y dejando el devanado secundario a circuito abierto, el flujo magnético en el núcleo es el nominal y por lo tanto las pérdidas en el mismo son las nominales. Además aparecen pérdidas en el cobre, aunque estas se pueden despreciar comparadas con las pérdidas del hierro, debido a que la corriente de vacío es del orden del 5 % de la corriente nominal (o de plena carga), y como las pérdidas en el cobre son proporcionales al cuadrado de la corriente, en este caso, siendo la corriente muy pequeña, las pérdidas en el cobre serán mucho menores que las nominales. El circuito equivalente de este ensayo se reduce a la rama de excitación que se muestra en la Imagen 4.1.



*Imagen 4.1 Circuito equivalente de transformador conectado en vacío.*

En la Imagen 4.2, se muestra el diagrama de conexión para realizar este ensayo en el laboratorio.



*Imagen 4.2 Circuito de conexión de prueba de vacío.*

El circuito equivalente de este ensayo se reduce a la rama de excitación, por lo que la medida del vatímetro corresponde a las pérdidas en el hierro del núcleo.

Los resultados obtenidos en esta prueba fueron los siguientes:

Lecturas obtenidas con analizador Dranetz:

$$V_{OC} = 122V$$

$$I_{OC} = 0.376A$$

$$W_{OC} = 20.06W$$

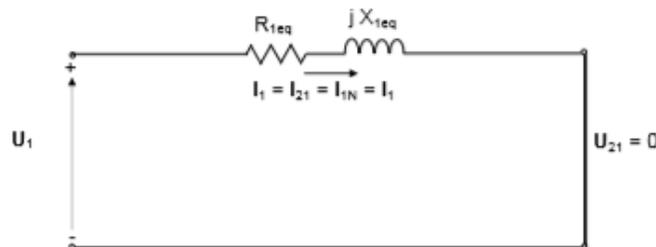
Resultados:

En la rama de magnetización:  $R_m = 759.2522\Omega$

$$X_m = 358.8910\Omega$$

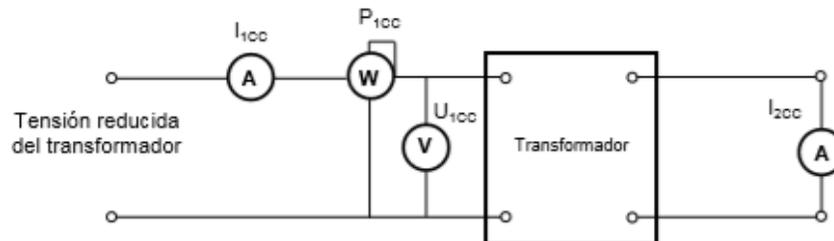
#### 4.1.2 Ensayo de Cortocircuito.

Este ensayo consiste en cortocircuitar el devanado secundario del transformador y alimentar el devanado primario mediante una tensión reducida, cuyo valor es tal que la corriente que circule sea la nominal del transformador. Generalmente el valor de la tensión que se debe de aplicar es del orden del 5% de la tensión nominal, en la rama de excitación se tendrá una corriente, que será unas veinte veces menor que la corriente de vacío con la tensión nominal. Por lo tanto el circuito equivalente se muestra en la Imagen 4.3.



*Imagen 4.3 Circuito equivalente de transformador conectado en cortocircuito.*

En la Imagen 4.4, se muestra el diagrama de conexión para realizar la prueba de cortocircuito.



*Imagen 4.4 Circuito de conexión de prueba de cortocircuito.*

En este ensayo se determinaron las pérdidas en el cobre del transformador, ya que el elemento que consume potencia activa es la resistencia equivalente de los bobinados, y la corriente que se hace circular en esta prueba es la nominal, es decir se obtienen las pérdidas nominales del transformador.

Lecturas del analizador lado primario:

$$V_{SC} = 5.416V$$

$$I_{SC} = 9.213A$$

$$W_{SC} = 38.31W$$

Lecturas del analizador lado secundario:

$$I_{SC} = 8.6A$$

Resultados:

$$X_1 = 1.5636\Omega ; L_1 = 4.1476mH$$

$$X_2 = 0.2129\Omega ; L_2 = 4.6908mH$$

#### 4.1.3 Resistencia óhmica de las bobinas:

Para realizar esta prueba se utilizó una fuente variable de voltaje de DC.

Resistencia en la bobina primaria:

$$V_{DC} = 6.2V$$

$$I_{DC} = 2.4A$$

Resistencia en la bobina secundaria:

$$V_{DC} = 6.2V$$

$$I_{DC} = 2.5A$$

#### Resultados:

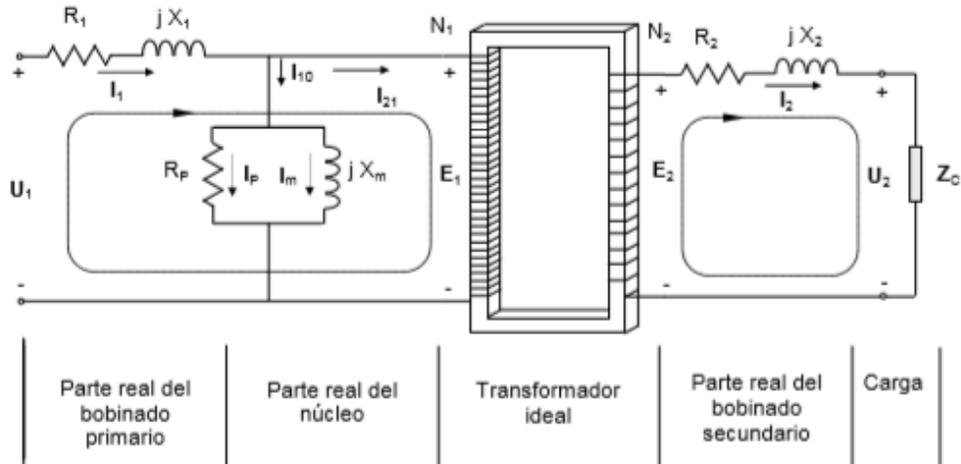
Primario:  $r_{dc1} = 2.5833\Omega$

Resistencia efectiva  $r_{ac1} = 1.25 * r_{dc1} = 3.2292\Omega$

Secundario:  $r_{dc2} = 2.5833\Omega$

Resistencia efectiva  $r_{ac2} = 1.25 * r_{dc1} = 3.1\Omega$

En la Imagen 4.5, se presenta el esquema del transformador monofásico con la separación de cada una de sus partes reales, las cuales se encontraron anteriormente en cada uno de los ensayos realizados.

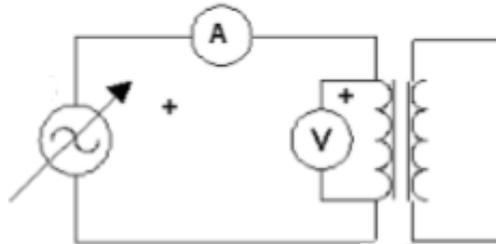


**Imagen 4.5** Esquema de transformador monofásico con separación de sus partes reales.

#### 4.2 LEVANTAMIENTO DE CURVA DE MAGNETIZACION.

Levantamiento de la curva de magnetización del transformador, permite el conocimiento de su comportamiento electromagnético.

Estos datos son de mucha importancia, ya que además de brindar información acerca de las características de magnetización del núcleo del transformador, es indispensable para poder simular correctamente los diferentes circuitos serie LC no lineales, estos dan una estimación muy importante acerca de los rangos de valores de capacitancia para los cuales ciertos circuitos pueden presentar el fenómeno resonante. Para obtener la curva de magnetización del transformador se utilizó el diagrama de conexión mostrado en la Imagen 4.6.



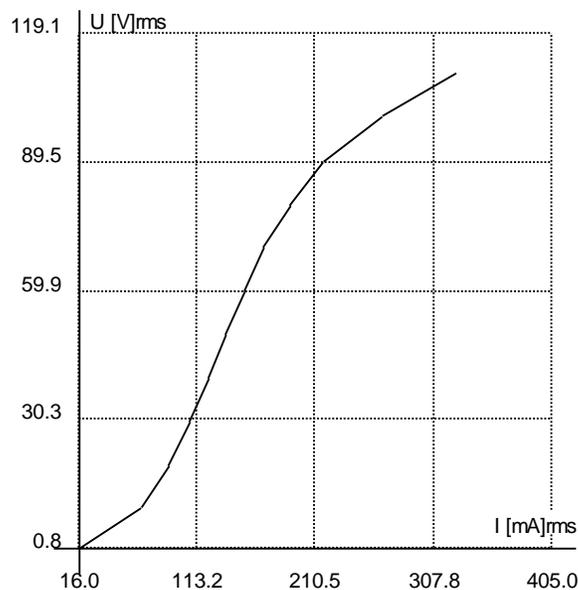
**Imagen 4.6** Diagrama de conexión para obtener curva de magnetización.

De la implementación del circuito expuesto en la Imagen 4.6, se obtuvieron los datos que se muestran en la tabla 4.2, se detallan los valores de las corrientes RMS y tensiones RMS, para obtener los datos se utilizó una fuente variable de voltaje, variando el voltaje en rangos de 10V, y midiendo la respectiva corriente para cada valor de voltaje.

Corrientes RMS (A)	Tensión RMS (V)
0.016	0.75
0.046	5.03
0.081	15.12
0.099	25.00
0.116	35.01
0.130	45.00
0.145	55.20
0.160	65.20
0.178	75.04
0.203	85.16
0.238	95.00
0.291	105.00
0.368	115.20
0.405	119.10

**Tabla 4.2 Datos de la curva de magnetización del transformador, obtenidas con el analizador de redes Dranetz.**

Con los datos de la tabla 4.2, es posible realizar el levantamiento gráfico de la curva de magnetización del transformador, la gráfica de la curva de magnetización obtenida, se muestra en la Imagen 4.7.



**Imagen 4.7 Curva de magnetización del transformador.**

La curva de magnetización de la Imagen 4.7, fue obtenida introduciendo los datos experimentales, al simulador en **ATPDraw**. De la curva de magnetización se obtiene las características magnéticas del transformador, la cual no es lineal, esto se debe a que tanto las pérdidas activas como reactivas del núcleo del transformador tiene un codo de saturación en donde ambas impedancias bajan considerablemente. Es de mucho interés observar que a

partir de cierto valor de tensión de alimentación el transformador opera en la región de saturación la cual está ubicada arriba de la rodilla de la curva de magnetización.

### **4.3 INTRODUCCION AL SOTFWARE ATP-EMTP.**

Para validar los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio, se utilizó el simulador ATP-EMTP (Alternative Transients Program – Electromagnetic Transient Program).

El ATP es un software universal para realizar simulaciones digitales de fenómenos electromagnéticos transitorios. Con este programa digital, se pueden modelar redes complejas y sistemas de control de cualquier estructura, tiene amplias capacidades de modelado y otras características importantes, además del cálculo de transitorios.

En resumen los estudios que utilizan ATP, tienen objetivos que se pueden clasificar en 2 categorías fundamentales:

1. En los diseños que incluyen el dimensionamiento de los equipos, coordinación de aislamiento, nivel de tensión, diseño de los elementos de protección y control, etc.
2. En la solución de problemas de operación, estos suelen ser fallas en las líneas, análisis de sobretensiones, análisis de transitorios.

Los casos típicos de estudio, en los cuales se utiliza ATP se enumeran a continuación:

- ✓ **Transitorio de maniobra**
  - a) Determinísticos
  - b) Probabilísticos
  - c) Maniobras de reactores
  - d) Maniobra de capacitores
  - e) Maniobra de interruptores
  - f) Re-cierres rápidos
  - g) Tensión transitoria de restablecimiento
  - h) Transitorios de maniobras en cables.
- ✓ **Impulsos atmosféricos.**
  - a) Contorneo inverso
  - b) Impulsos inducidos
  - c) Ingresos de impulsos atmosféricos a subestaciones
- ✓ **Coordinación de aislamiento.**
  - a) Líneas aéreas
  - b) Subestaciones
  - c) Subestaciones blindadas en SF<sub>6</sub> (GIS)
  - d) Descargadores
- ✓ **Solicitaciones torsionales de ejes**
  - a) Resonancia sub-sincrónica

- b) Rechazo de carga.
- ✓ **Sistema de alta tensión en corriente continua (HVDC)**
  - a) Control
  - b) Transitorios eléctricos
  - c) Armónicas
- ✓ **Compensadores estáticos**
  - a) Control
  - b) Sobretensiones
  - c) Armónicos
- **Ferroresonancia**
- **Análisis armónico**
- **Arranque de motores**
- **Sistemas de control**
- **Análisis de sistemas desbalanceados**

El software ATP-EMTP, resuelve sistemas eléctricos monofásicos y trifásicos para lo cual las especificaciones de equipos y definición de parámetros eléctricos son fundamentales.

El ATP tiene el objetivo de calcular el valor de las diferentes variables del sistema en un determinado tiempo. Para lograr este objetivo el ATP trabaja con modelos que simulan el comportamiento de los diferentes elementos constitutivos de un sistema eléctrico tales como: resistencias, inductancias, capacitancias, generadores, líneas de transmisión, interruptores, etc. Los cuales son de muy fácil parametrización y el cual permite modificar sus características si fuera necesario. En el software ATP para realizar cualquier estudio intervienen varias aplicaciones, entre las cuales tenemos:

Las diferentes versiones del compilador ATP:

- ✓ Editor de texto.
- ✓ Editor gráfico de circuitos eléctricos (ATPDraw).
- ✓ Herramientas para la visualización gráfica de los resultados (PLOTXY).
- ✓ Entre otros.

Todos estos programas se pueden acceder de forma independiente y cada uno de ellos trabaja de forma individual, pero trabajar de esta forma es muy ineficiente y demora el desarrollo. Para evitar esto existe una herramienta llamada ACC (ATP Control Center) que integra todas estas herramientas la cual permite realizar la secuencia de trabajo de una forma rápida y ordenada. Dicha secuencia de trabajo puede ser resumida de la siguiente manera:

1. Mediante el editor gráfico de circuitos eléctricos se crea el modelo de estudio. Estableciendo los siguientes tipos de extensión (**.adp**, **.cir**, **.acp**)
2. Ya creado el modelo de estudio, se crea un archivo fuente de extensión **.atp** que contiene el código del modelo, este archivo es utilizado por el compilador del ATP. Este archivo también puede ser creado por medio del editor de texto.

3. Se ejecuta el compilador ATP utilizando el archivo **.atp** como fuente, al realizar esta acción se crean los archivos de extensión **.lis** y **.pl4** que contienen los resultados de la simulación.

4. Visualización de resultados, esto se puede realizar de dos formas, la primera mediante el editor de texto que utiliza como fuente el archivo con la extensión **.lis**, aquí se muestran los datos y resultados de forma textual y escrita. El archivo de extensión **.pl4** se abre con el visualizador gráfico en el cual nos muestra los resultados de una forma gráfica y colorida.

#### 4.3.1 Editor Gráfico: ATPDraw v3.8

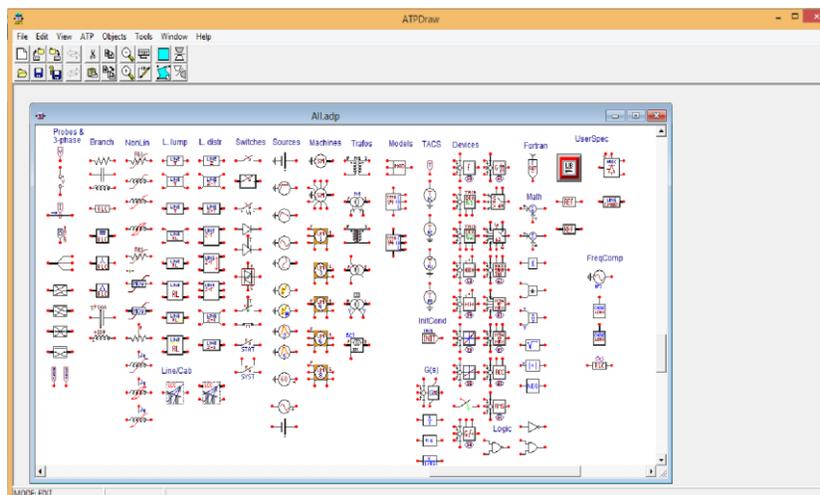
Para simular los circuitos series LC no lineales implementados en el laboratorio se utilizó el simulador **ATPDraw**, el cual es un procesador gráfico manejado por mouse del ATP-EMTP que trabaja bajo plataforma de MS-Windows. En el **ATPDraw** se pueden construir circuitos eléctricos de modo rápido y sencillo, ya que se tiene una interfaz gráfica. Ya creado el circuito el programa genera un archivo ATP con toda la información del circuito creado.

La mayoría de los componentes básicos son soportados por el programa ya sean estos trifásicos o monofásicos, para los elementos que no se encuentran en soportados, el usuario puede crear sus propios modelos usando las opciones **Data Base Module \$INCLUDE**.

También se pueden nombrar a cada uno de los nodos del sistema, esta característica permite identificar con facilidad los nodos que son importantes para el usuario.

#### 4.3.2 Entorno de Trabajo.

El ATPDraw tiene una interfaz muy común en programas que trabajan bajo el entorno de Windows. La Imagen 4.8, indica la pantalla principal de trabajo, es donde se modelan los circuitos eléctricos, estos pueden ser creados o se pueden importar. El movimiento del usuario en esta ventana se puede hacer mediante las barras de desplazamiento o utilizando el Map Windows.



*Imagen 4.8 Entorno de trabajo de ATPDraw.*

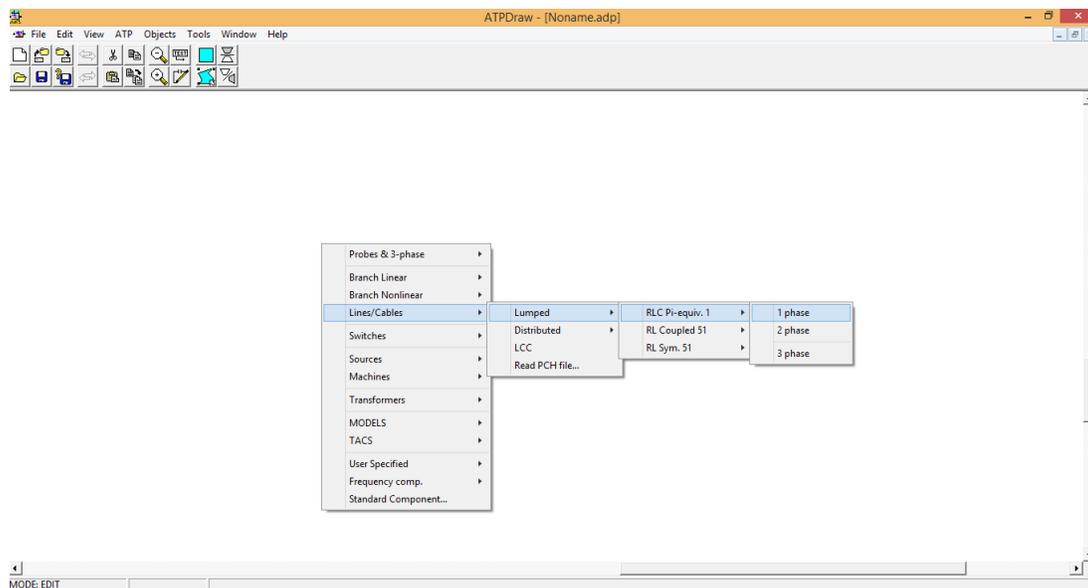
Las partes fundamentales del entorno de trabajo son las siguientes.

**Menú principal:** presenta el acceso a todas las funciones del ATPDraw mediante los diferentes submenús, los submenús que posee son:

- ✓ **File:** permite crear nuevos circuitos eléctricos, guardarlo, o abrir uno ya creado anteriormente; cerrar el archivo, cerrar todos los archivos; importar elementos de otros circuitos; guardar el circuito creado en archivos gráficos; cerrar el programa.
- ✓ **Edit:** Contiene las funciones básicas de edición, como son: copiar/pegar, deshacer/rehacer, duplicar, seleccionar, borrar, rotar, mover etiquetas, ingresar texto, etc.
- ✓ **View:** Se controla la configuración y visualización de las ventanas, se encuentran las opciones de zoom, tipo de letra de los componentes, actualizar cambios y opciones para personalizar la ventana de diseño.
- ✓ **ATP:** Corre el programa ATP, crea el nombre para todos los nodos del sistema, genera o edita los archivos ATP, y especifica la configuración deseada para la simulación.
- ✓ **Library:** Se pueden crear o modificar los componentes ya existentes o aquellos que han sido creados por el usuario.
- ✓ **Tools:** Se tiene el editor de texto, el editor de imágenes, el editor del help, y se puede configurar el ATPDraw de la forma más adecuada para el usuario.
- ✓ **Windows:** El usuario puede seleccionar la ventana correspondiente a cada circuito y activar o desactivar el **MAP WINDOWS**.
- ✓ **Help:** El usuario puede acceder a la documentación de ayuda del ATPDraw.

#### 4.3.3 Elementos básicos del ATPDraw.

Los componentes eléctricos básicos más utilizados del ATPDraw son variados y de fácil acceso, a estos se puede acceder mediante el menú desplegable de elementos que se muestran en la Imagen 4.9.



*Imagen 4.9 Ventana de menú desplegable de elementos utilizados en ATPDraw.*

#### 4.4 ANALISIS DE CIRCUITOS RESONANTES MONOFASICOS.

Obtenidas las características del transformador a utilizar, se realizan los respectivos cálculos teóricos, para luego realizar las simulaciones con el simulador ATPDraw, y después realizar los montajes de los circuitos resonantes monofásicos en el laboratorio.

##### 4.4.1 Cálculos Teóricos:

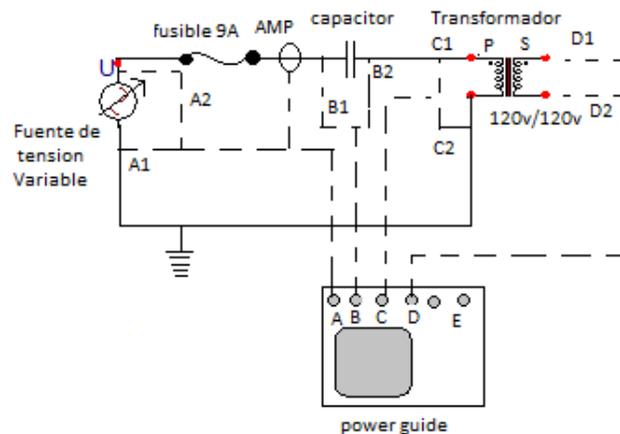
Para establecer el valor de la capacitancia asociada a  $X_C$ , es muy importante hacer el levantamiento de la curva de magnetización descrita en el apartado 4.2 y tomar en cuenta la ecuación siguiente.

$$C = \frac{1}{\omega X_L} \quad (4.1)$$

El valor de  $X_L$  se define como la impedancia reactiva total del transformador en la zona lineal. Para establecer este valor se utilizaran un par de puntos de tensión RMS y corriente RMS, de la componente que está debajo del codo de saturación del núcleo, hallado durante el levantamiento de la curva de magnetización, para encontrar este parámetro se utiliza la siguiente expresión.

$$X_L = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}} \quad (4.2)$$

El montaje del circuito serie LC no lineal implementado en el laboratorio, se muestra en la Imagen 4.10, se detalla el diagrama unifilar y en la Imagen 4.11, se muestra el circuito implementado en el laboratorio.



**Imagen 4.10 Diagrama de conexión para circuito resonante monofásico.**

Esta prueba se realizó, utilizando una fuente variable de voltaje, realizando un barrido de tensión de 10 V, hasta llegar a un voltaje nominal de 110VAC, además se utilizaron tres valores diferentes de capacitancia.



*Imagen 4.11 Conexión para realizar pruebas a circuito resonante monofásico.*

De la curva de magnetización del transformador, la cual se obtuvo en el apartado 4.2, se utilizan un par de puntos de la tabla 4.1, y sustituyendo valores en las ecuaciones 4.1 y 4.2 se obtienen los siguientes resultados.

$$X_L = \frac{V_{RMS\ nominal}}{I_{RMS\ magnetizacion}} = \frac{110.0}{0.327} = 336.391\Omega \quad (4.3)$$

$$C = \frac{1}{\omega X_L} = \frac{1}{2\pi * 60 * 336.392} = 7.8854\mu F \quad (4.4)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi * 60 * 7.8854\mu} = 339.1360\Omega \quad (4.5)$$

Ya obtenidos los cálculos anteriores, se pueden calcular los valores teóricos de los voltajes en el capacitor y en el transformador de un circuito LC serie, para los cuales se tomaron tres valores de capacitancias cercanos al valor calculado anteriormente, con estos valores se modelaran los circuitos a estudiar en el laboratorio, para lograr una mejor comprensión de los circuitos resonantes.

#### **4.5 CIRCUITOS FERRORESONANTES MONOFASICOS IMPLEMENTADOS EN EL LABORATORIO.**

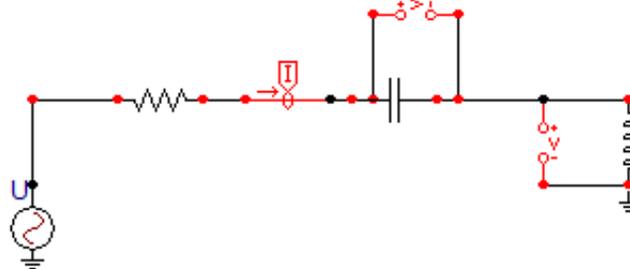
Para el estudio del fenómeno de la ferresonancia, se implementaron 3 circuitos monofásicos ferresonantes, cada circuito se implementó con un valor distinto de capacitancia, con el objetivo de demostrar experimentalmente el comportamiento del fenómeno de la ferresonancia en cada circuito eléctrico, en función de la variación del valor de capacitancia.

##### **4.5.1 Circuitos RLC Series Lineales.**

Se realizó este análisis, como una primera aproximación, ya que se modelara la inductancia del transformador monofásico de una forma lineal, con el propósito de lograr una mayor

comprensión del fenómeno de la resonancia, y de esta manera tener resultados que se deberán corroborar en el laboratorio.

El circuito tomado como modelo en ATPDraw, para realizar las primeras aproximaciones se muestra en la Imagen 4.12, para validar los valores teóricos obtenidos.



*Imagen 4.12 Modelo de circuito LC serie lineal implementado en ATPDraw.*

**Cálculos teóricos y simulados obtenidos.**

**Para  $1.5\mu\text{F}$ :**

$$X_C = \frac{1}{2\pi * 60 * 1.5\mu} = 1.7683k\Omega$$

Se utilizara el valor de  $X_m$  encontrado en el ensayo de vacío, donde:

$$X_m = 358.891\Omega.$$

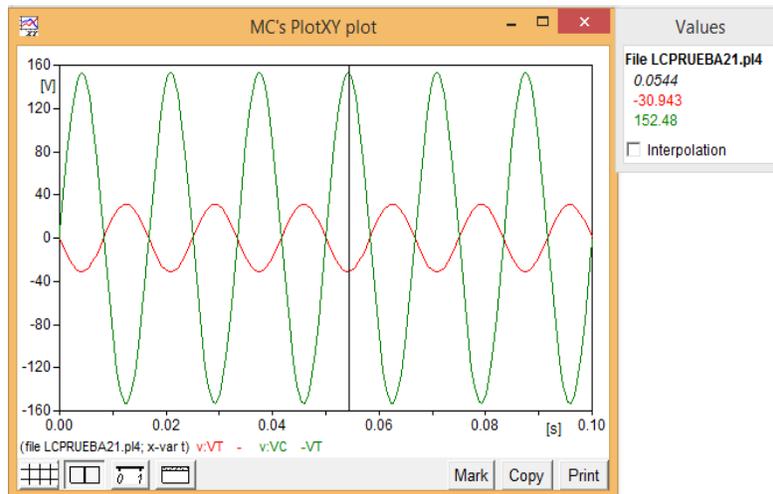
$$Z_T = j(358.891 - 1.7683k) = -j1.4094k\Omega$$

$$I = \frac{122}{-j1.4094k} = j86.5611mA$$

$$V_C = (j86.5611m) * (-j1.7683k) = 153.066V$$

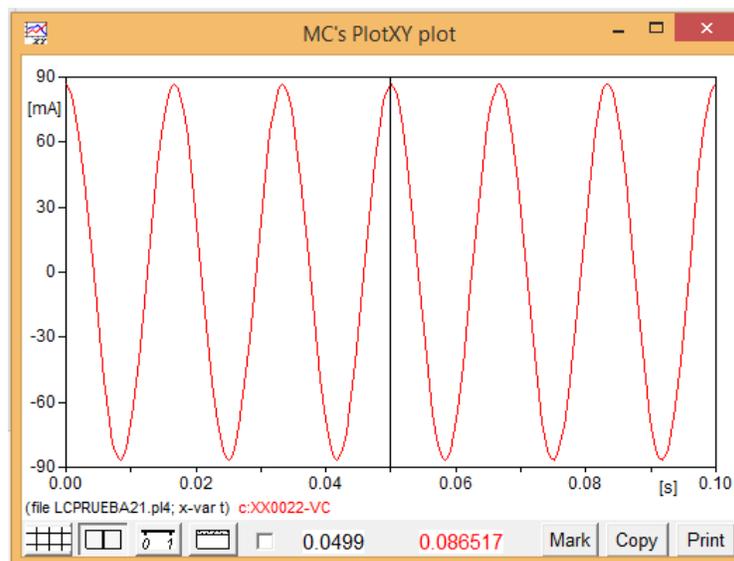
$$V_L = (j86.5611m) * (j358.891) = -31.066V$$

Los resultados obtenidos al simular el circuito con ATPDRAW se muestra a continuación; en la Imagen 4.13, se muestran los valores, los cuales son cercanos a los cálculo teórico, además se puede ver la forma de onda de voltaje en el cual existe un desfase de  $180^\circ$  entre la tensión del transformador (Inductancia no lineal) y la tensión del capacitor, es decir la tensión de la bobina del transformador esta desplazada 180 grados con respecto a la tensión en el condensador, los cuales son  $V_C=152.48V$  y  $V_L=-30.943V$ .



**Imagen 4.13** Resultados obtenidos en ATPDraw, al simular el circuito serie RLC lineal con un valor de capacitancia de  $1.5\mu\text{F}$ .

En la Imagen 4.13, se puede observar que la corriente está atrasada 90 grados con respecto a la tensión de la bobina del transformador y en el capacitor se encuentra adelantada 90 grados. En la Imagen 4.14, se muestra la forma de onda de la corriente obtenida en la simulación.



**Imagen 4.14** Forma de onda de corriente obtenida en ATPDraw, al simular el circuito serie RLC lineal, con un valor de capacitancia de  $1.5\mu\text{F}$ .

Para  $6\mu\text{F}$ :

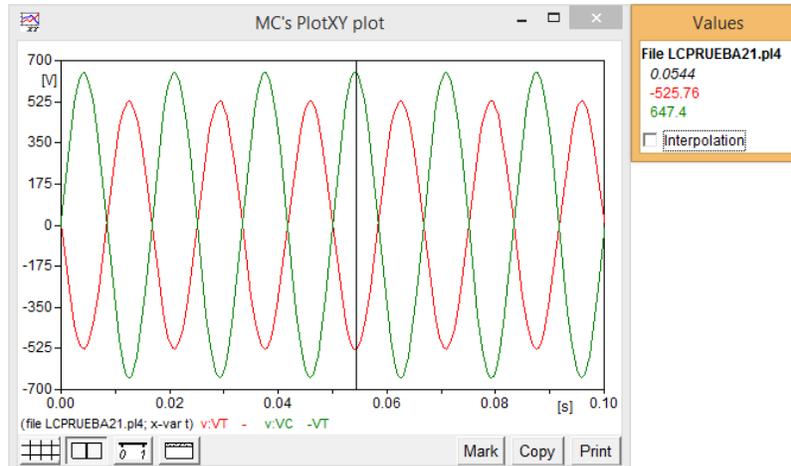
$$X_C = \frac{1}{2\pi * 60 * 6\mu} = 442.087\Omega$$

$$Z_T = j(358.891 - 442.087) = -j83.196\Omega$$

$$I = \frac{122}{-j83.196} = j1.4664\text{mA}$$

$$V_C = (j1.4664m) * (-j442.087) = 648.284V$$

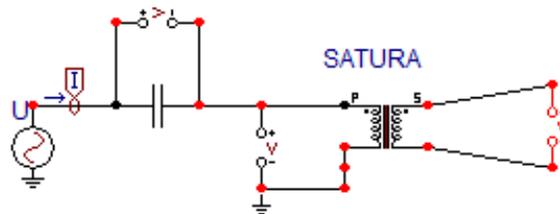
$$V_L = (j1.4664m) * (j358.891) = -526.284$$



**Imagen 4.15** Resultados obtenidos en ATPDraw, al simular el circuito serie RLC lineal, con un valor de capacitancia de  $6\mu F$ .

#### 4.5.2 Circuitos LC Series no Lineales.

Con la implementación de estos circuitos se trata de crear las condiciones adecuadas para que el circuito serie LC no lineal entre en condición de ferresonancia, tomando en cuenta la no linealidad de la inductancia del transformador. En la Imagen 4.16, se presenta el esquema del circuito LC no lineal simulado en ATPDraw, con el cual se realizó la validación de los resultados prácticos, con este modelo se simularon los tres circuitos ferresonantes monofásicos implementados en el laboratorio, se ajustó el valor de la capacitancia del circuito serie LC no lineal para obtener los datos en cada uno de los circuitos implementados.



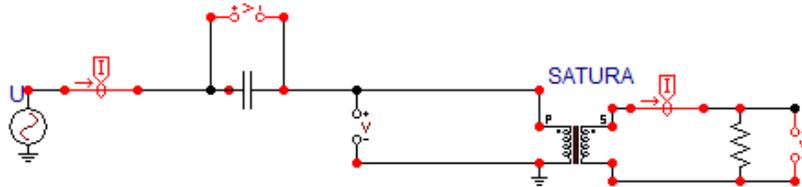
**Imagen 4.16** Esquema dibujado en ATPDraw, de circuitos ferresonantes monofásicos con devanado secundario del transformador en vacío.

Con el modelo utilizado en la Imagen 4.16, los resultados obtenidos son satisfactorios, ya que los valores son similares a los obtenidos en el laboratorio, esto es debido a que se utilizan las siguientes condiciones:

- a) En la simulación se utilizó un modelo de transformador saturable, el cual mediante el simulador ATPDraw permite cargar las características eléctricas del transformador, tomando en cuenta la no linealidad de la inductancia del transformador, lo cual permite tener errores mínimos entre los valores prácticos y simulados.

- b) El transformador se simula con el devanado secundario sin carga, en el capítulo 2 se presentó que esta es una condición favorable para que aparezca el fenómeno de la ferresonancia.
- c) Los valores de capacitancia utilizados en la simulación, las cuales modelan a la capacitancia de un cable de potencia, estas se calcularon de forma que el circuito LC serie no lineal, entre en condición de ferresonancia.

En la Imagen 4.17, se presenta el modelo de circuito implementado en ATPDraw, en el cual se conecta una pequeña carga ( $5\Omega$ ), en el devanado secundario del transformador con el propósito de eliminar la ferresonancia del circuito serie LC no lineal.



*Imagen 4.17 Esquema dibujado en ATPDraw, de circuitos ferresonantes monofásicos utilizando una pequeña carga resistiva en el secundario del transformador.*

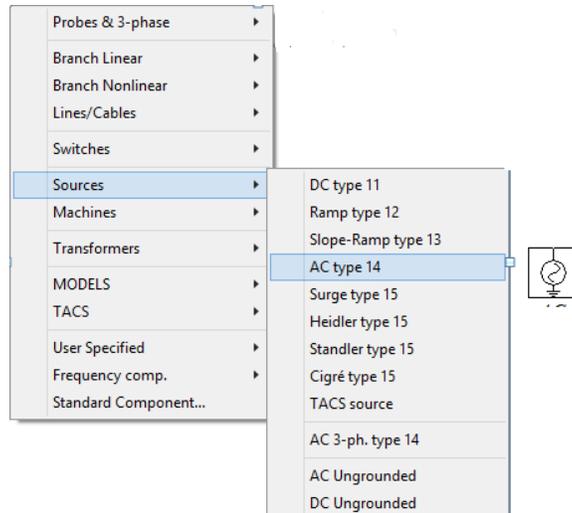
#### 4.6 CREACION DE CIRCUITOS MONOFASICOS FERRORESONANTES EN ATPDraw.

Para una mejor comprensión del programa **ATPDraw** y sus funciones a continuación se explicara el proceso de creación de los circuitos eléctricos LC no lineales, así como el ingreso de datos de los diferentes elementos.

Se va a modelar el circuito de la Imagen 4.16 paso a paso, con el objetivo de comprender el proceso de simulación de un circuito eléctrico básico, el cual es prácticamente similar para todos los circuitos eléctricos, lo que varía es la cantidad de elementos a utilizar.

##### **Paso 1: Fuentes del Tensión.**

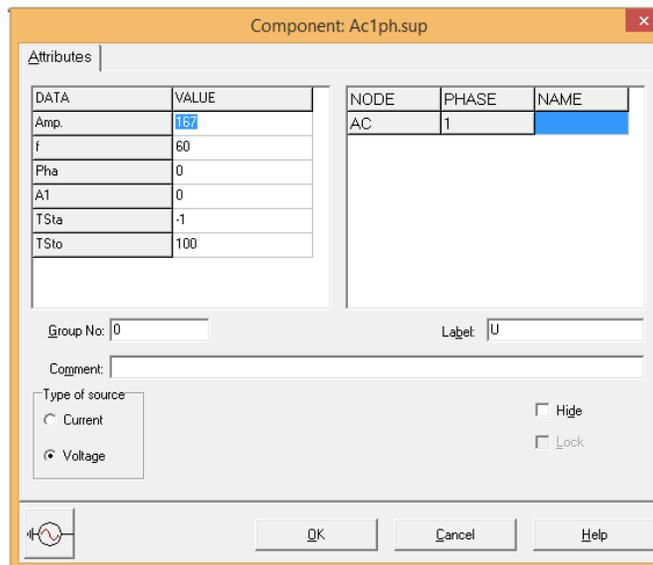
Se coloca la fuente de tensión para la cual se elige del menú desplegable de elementos que se muestra en la Imagen 4.18, se escoge **Source-> AC type 14**, esta es una fuente de tensión monofásica. En la pantalla de diseño se obtiene el icono de la fuente de voltaje.



*Imagen 4.18 Ventana de ATPDraw, fuente de voltaje monofásico AC type 14.*

**Paso 2: Ingreso de datos de fuente de voltaje.**

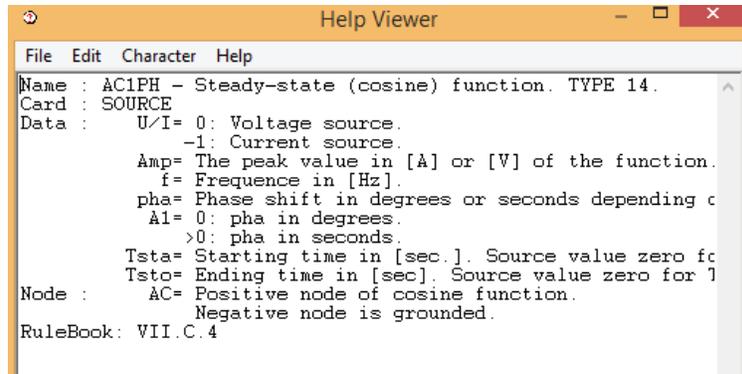
La forma de cargar los datos de la fuente de voltaje es sencilla, se hace doble clic con el botón izquierdo se presenta la ventana que se muestra en la Imagen 4.19, el valor ingresado debe ser la amplitud del voltaje requerido.



*Imagen 4.19 Ventana de datos del elemento AC type 14, en ATPDraw.*

Una vez modificado los campos se hace clic en el botón **ok** y se sale a la pantalla principal. Al salir se observa que el elemento cambia de color (**negro**), esto es porque se ha hecho el ingreso de datos del elemento, si esta operación no se realiza el elemento toma un color **rojo**.

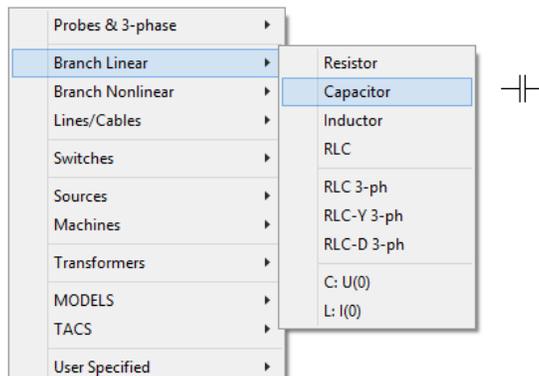
La explicación de todos los parámetros se obtiene mediante el botón de **Help** del elemento, como se muestra en la Imagen 4.20.



*Imagen 4.20 Ventana Help del elemento AC type 14, en ATPDraw.*

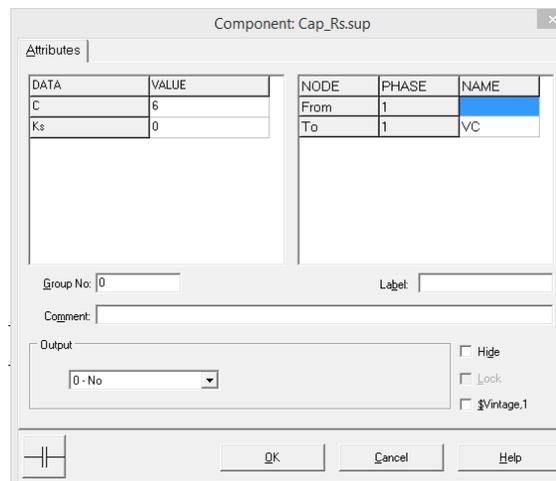
### Paso 3: Ingreso de valor de Capacitancia.

Se ingresa el valor de capacitancia que se desea instalar en el sistema, para lo cual del menú desplegable de elementos se escoge **Branch Linear -> Capacitor**, como se muestra en la Imagen 4.21, este elemento representa un capacitor monofásico lineal



*Imagen 4.21 Ventana de selección del tipo de capacitor a utilizar.*

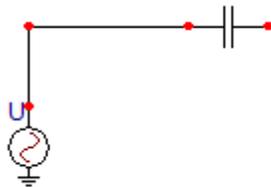
Al hacer doble clic izquierdo sobre el elemento aparece la ventana que se muestra en la Imagen 4.22, en esta ventana se ingresa el valor de capacitancia deseado es de tener en consideración las unidades de los datos, para esto es de revisar la opción Help del elemento como se explicó en el paso 2, con la Imagen 4.20.



*Imagen 4.22 Ventana de datos del elemento capacitivo en ATPDraw.*

#### Paso 4: Conexión de Elementos.

Se conectan los dos elementos entre sí, para realizar esta operación es de situarlos de una forma que sus bornes queden unidos. Otra posibilidad es unirlos mediante una línea que represente una conexión monofásica o trifásica según sea la naturaleza de los elementos interconectados, quedando la conexión de los elementos como se muestra en la Imagen 4.23.

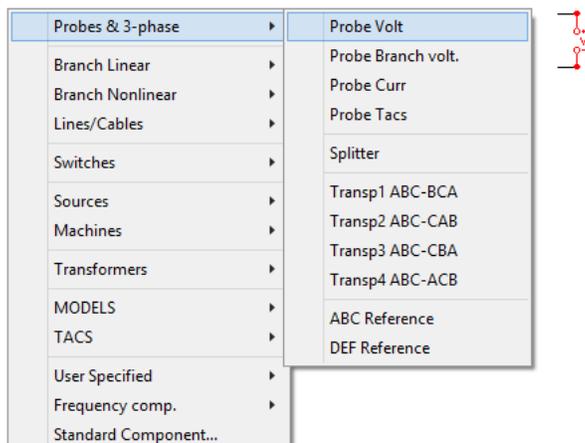


*Imagen 4.23 Esquema de Unión de Dos elementos en ATPDraw.*

Es de mencionar que para los demás elementos se siguen los mismos pasos, tomando en consideración los datos de cada elemento, para lo cual el Help del elemento es de mucha utilidad.

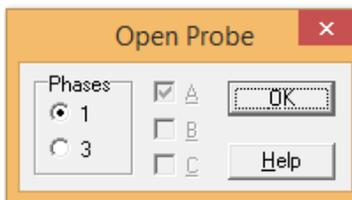
#### Paso 5: Medidores de Voltaje.

El medidor de voltaje utilizado para la simulación fue el **Probe Branch Volt**, la forma de seleccionar este tipo de medidor se muestra en la Imagen 4.24, este es un voltímetro, que mide la tensión entre dos puntos del sistema



*Imagen 4.24 Ventana de ATPDraw, para selección de medidor de voltaje.*

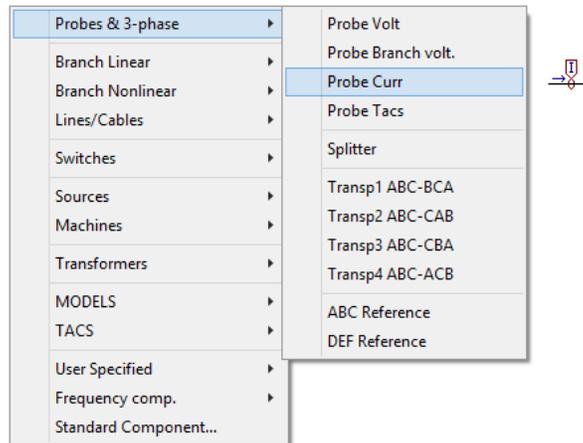
En la Imagen 4.25, se muestra la ventana para seleccionar si se desea un medidor monofásico o trifásico según la necesidad del sistema a simular.



*Imagen 4.25 Ventana de ATPDraw, para selección de fases en el medidor de voltaje.*

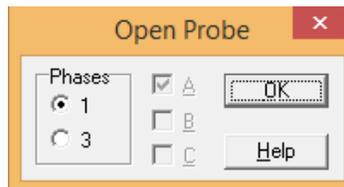
### Paso 6: Medidor de corriente.

Para medir la corriente del sistema se utilizó el medidor **Probe Curr**, la forma de seleccionar este medidor de corriente se muestra en la Imagen 4.26, este es un amperímetro que mide la corriente que circula a través de una rama del circuito eléctrico.



*Imagen 4.26 Ventana de ATPDRAW, para selección de medidor de corriente.*

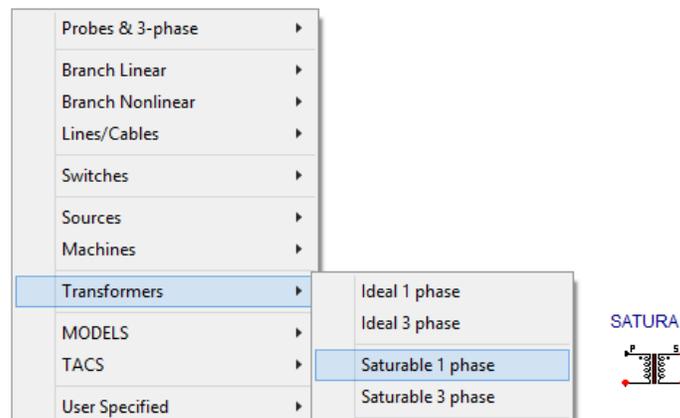
En la Imagen 4.27, se muestra la ventana para seleccionar si se desea un medidor monofásico o trifásico según la necesidad del sistema a simular



*Imagen 4.27 Ventana de ATPDraw, para selección de fases en el medidor de corriente.*

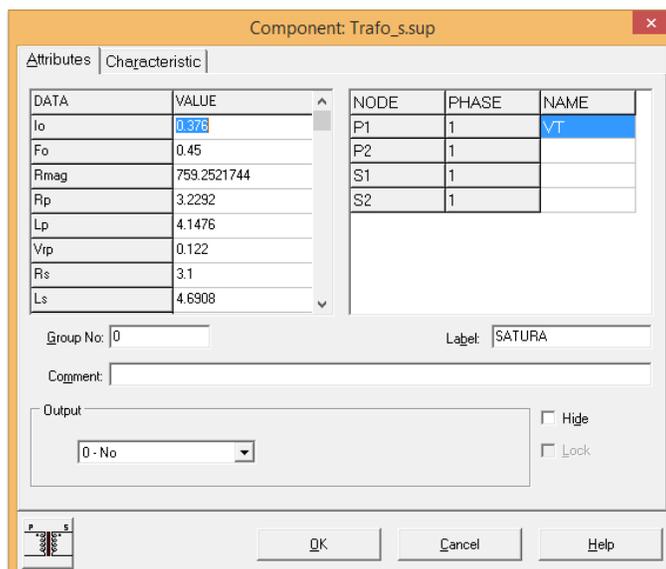
### Paso 7: Modelo de Transformador.

El modelo del transformador a utilizar para realizar las simulaciones fue el **Saturable 1 phase**, el cual es un transformador saturable monofásico, la forma de como seleccionar este tipo de transformador se muestra en la Imagen 4.28.



*Imagen 4.28 Menú de transformadores en ATPDraw.*

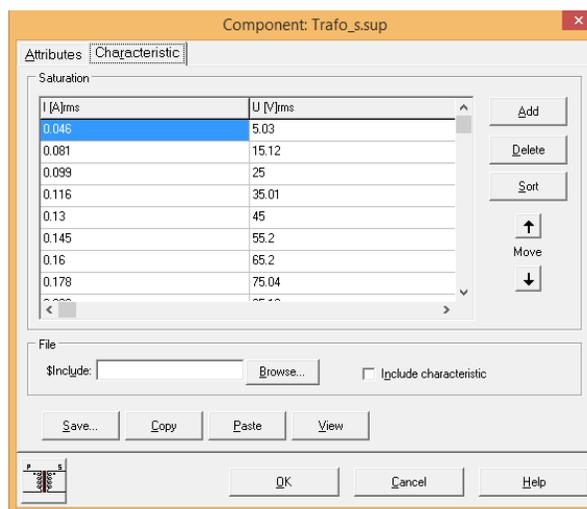
Este modelo de transformador, es de mucha utilidad ya que permite introducir los parámetros eléctricos que caracterizan al transformador, y de esta forma se obtienen resultados simulados cercanos a los valores obtenidos en el laboratorio, ya que permite modelar de una forma más cercana a la operación real del transformador eléctrico. En la Imagen 4.29 se muestra la ventana en la cual se introducen los parámetros del transformador, es recomendable consultar el **Help** del elemento.



*Imagen 4.29 Ventana de ATPDraw, para introducir los parámetros del transformador.*

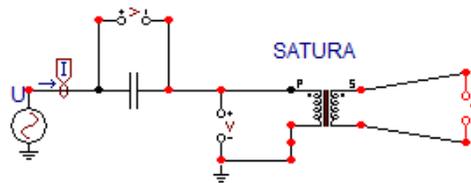
### Paso 8: Introducción de curva de magnetización del Transformador.

Este modelo además de los parámetros eléctricos del transformador permite introducir los datos de corriente y voltaje de la curva de magnetización del transformador, en la Imagen 4.30 se muestra la ventana en la cual se pueden introducir estos parámetros.



*Imagen 4.30 Ventana de ATPDraw, para carga de curva de saturación del transformador.*

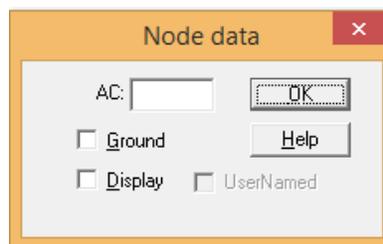
Una vez terminado el modelo del circuito que se desea simular se obtiene el siguiente circuito eléctrico dibujado en **ATPDraw** que se muestra en la Imagen 4.31.



*Imagen 4.31 Modelo final simulado en ATPDraw.*

### **Paso 9: Etiquetar Nodos.**

Todos los elementos tienen la opción **Label** que sirve para etiquetar a los elementos, es decir el usuario puede poner un nombre propio para identificar al elemento. Esto se hace al finalizar el circuito que se desea simular, para realizar esta acción se hace clic derecho en el nodo que se desea nombrar o poner algún nodo a tierra y aparece la ventana de la Imagen 4.32.



*Imagen 4.32 Ventana de ATPDraw, para carga de curva de saturación del transformador.*

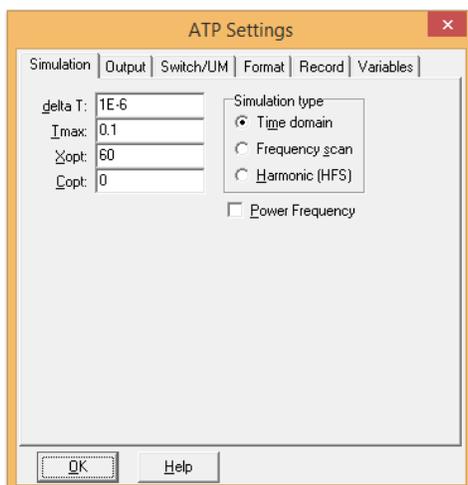
Para identificar el nodo, escribimos el nombre en el cuadro de texto, si se quiere que se muestre en la pantalla se hace check en la opción **Display**, y si se desea hacer tierra, se utiliza la opción **Ground**.

### **Paso 10: Guardar proyecto.**

Antes de correr el programa con el **compilador ATP**, se debe guardar la representación gráfica del circuito en un archivo **.adp** para lo cual se hace clic en cualquiera de los iconos de guardado  .

### **Paso 11: Configuración de parámetros de Simulación.**

Después de guardado el archivo, se deben de configurar los parámetros del proceso de simulación. Estos parámetros son los que definen las condiciones o ajustes generales para la simulación del sistema eléctrico que se ha modelado. Para ingresar a la ventana para modificar estos parámetros se debe escoger la opción **ATP -> Setting** del menú principal y aparece una ventana similar a la de la Imagen 4.33.



*Imagen 4.33 Ventana de ATPDraw Setting.*

Se tienen varias pestañas y cada una de ellas con diferentes opciones, a continuación se detalla cada una de las opciones más comunes y utilizadas.

- ✓ **Delta T:** pasos de tiempo en segundos en que se realiza la simulación.
- ✓ **Tmax:** Tiempo máximo de la simulación en segundos.
- ✓ **Xopt:** indica si las inductancias de los elementos deben ir en [mH], si el valor es 0 y si es igual al de la frecuencia del sistema las inductancias deben ir en [ $\Omega$ ].
- ✓ **Copt:** indica las unidades de las capacitancias del sistema, si el valor es 0 las unidades son [ $\mu\text{f}$ ], caso contrario las capacitancias deben ir en [micro-mho].
- ✓ **Freq:** frecuencia del sistema en Hz.
- ✓ **Power Frequency:** al hacer check en esta casilla habilita la opción de ingresar la frecuencia del sistema.
- ✓ **Simulation Type:** se escoge el tipo que se desea.
  - ✓ Time domain.
  - ✓ Frequency Scan.
  - ✓ Harmonic Frequency Scan.

A continuación se presentan dos pruebas adicionales como ejemplos, con estos se verifico con mayor claridad que el modelo teórico simulado con la herramienta computacional ATPDRAW, se ajusta muy bien al resultado experimental.

#### **4.7 ESTUDIO CON ATPDraw DE SOBRETENSIONES POR MANIOBRA DE INTERRUPTORES.**

##### **Sobretensiones por maniobra de Interruptores.**

A diferencia de los transitorios por descargas atmosféricas, los transitorios por maniobra se originan y se pueden controlar en la misma red. Desde el punto de vista del transitorio, las frecuencias que aparecen se encuentran en el rango de 5 – 20 kHz y se pueden presentar problemas de efectos no lineales, lo cual dificulta la aplicación de los métodos de simulación tanto digital como analógica.

Para el estudio de los transitorios, usando técnicas de simulación, se trata en principio de hacer una representación de las componentes del sistema: Líneas de transmisión, transformadores de potencia, bancos de capacitores e interruptores o bien de los dispositivos

de protección que son los pararrayos. El problema de la representación o modelado de estos componentes se divide en dos puntos: para elementos de red (líneas, transformadores) y para dispositivos de control y protección (interruptores, pararrayos).

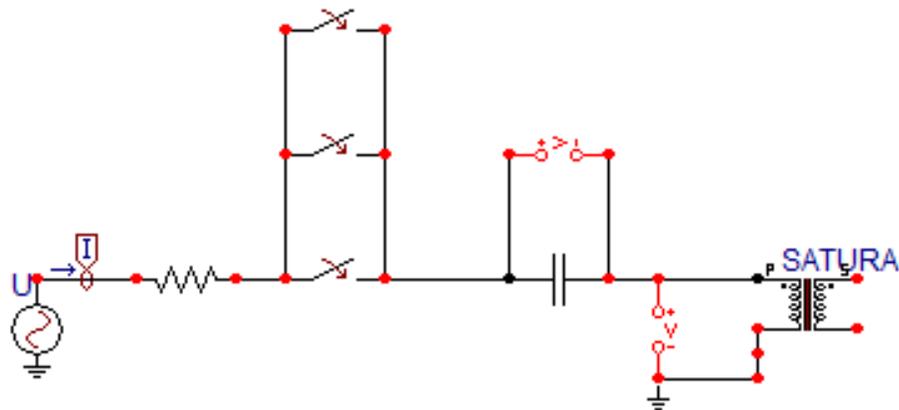
#### 4.7.1 Línea Eléctrica en Vacío

Una línea en vacío constituye un circuito preponderantemente capacitivo. La corriente capacitiva de la línea que se va a interrumpir es de poca intensidad y está adelantada  $90^\circ$  con respecto a la tensión, de manera que cuando la corriente pasa por cero el voltaje tiene su valor máximo.

En la energización y recierre de una línea, pueden parecer voltajes severos, la magnitud de estas sobretensiones dependen de muchos factores entre los cuales se pueden mencionar: longitud de la línea, impedancia, compensación, carga remanente, etc.

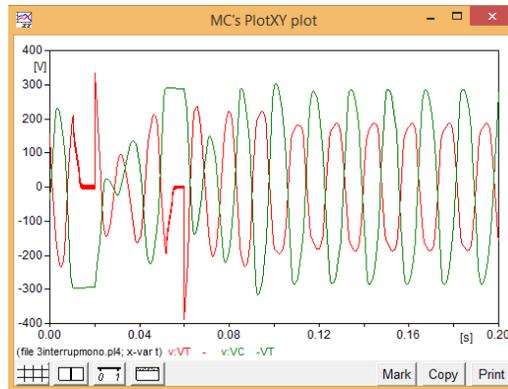
En una línea, la carga remanente antes de su recierre tiene un efecto significativo en los sobrevoltajes producidos, este valor depende del equipo conectado a la línea esto determina el mecanismo de disminución de la sobretensión. Es de mucha importancia mencionar que los transformadores afectan a la energización y recierre por la interacción de sus características magnéticas no lineal con la capacitancia de la línea e inductancia del sistema.

En la Imagen 4.34, se muestra el circuito simulado pero utilizando un interruptor para verificar el comportamiento de las conmutaciones de un interruptor, modelando de esta forma un transitorio dentro de la operación de un sistema eléctrico, para el cual se utilizan tres interruptores con diferentes valores de tiempo de conmutación, para poder de esta forma obtener un resultado más cercano a la operación mecánica real de un interruptor monofásico.



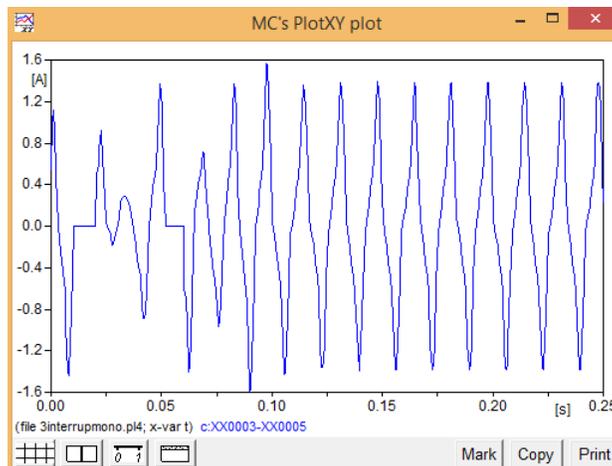
**Imagen 4.34** Esquema dibujado en ATPDraw, para simular los circuitos resonantes monofásicos utilizando tres interruptores para simular un transitorio.

En la Imagen 4.35, se detallan los resultados obtenidos en la simulación del circuito.



**Imagen 4.35 Resultado obtenido en ATPDraw, de la operación de un interruptor monofásico en un sistema eléctrico.**

En la Imagen 4.35, se presentan dos formas de onda la verde, es el comportamiento del voltaje en el capacitor y la roja la del voltaje en el transformador, se puede verificar la inestabilidad y los picos de voltaje que aparecen en el instante de hacer el cierre del interruptor, estos pueden ser dañinos para el sistema eléctrico si son muy elevados los sobrevoltajes.

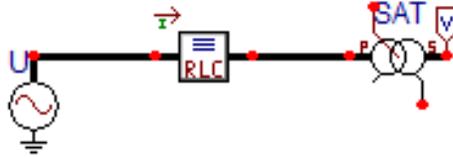


**Imagen 4.36 Resultado obtenido en ATPDraw, para la corriente del circuito simulado.**

En la Imagen 4.36, se observa que la corriente del circuito, tiene un comportamiento inestable y aparecen picos de corrientes en el circuito en el instante de realizar la energización del sistema esto es debido a la operación mecánica del interruptor.

#### **4.8 SIMULACION DE TRANSFORMADOR TRIFASICO SATURABLE EN VACIO UTILIZANDO ATPDRAW.**

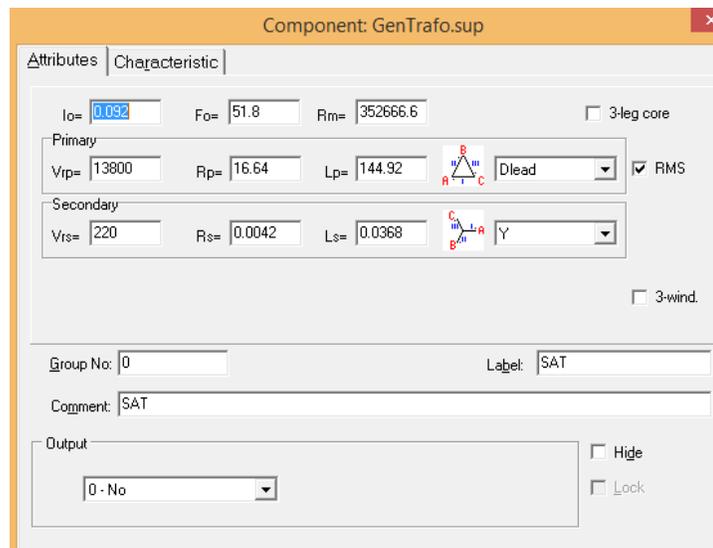
El comportamiento de un transformador trifásico saturable en vacío, se simula utilizando ATPDRAW, es de mucha importancia este análisis debido a que la operación de transformadores en vacío es una de las causas más comunes para que un transformador entre en ferresonancia, en la Imagen 4.37, se muestra el modelo a utilizar para realizar este análisis.



**Imagen 4.37 Esquema dibujado en ATPDraw, para simular un transformador trifásico saturable en vacío.**

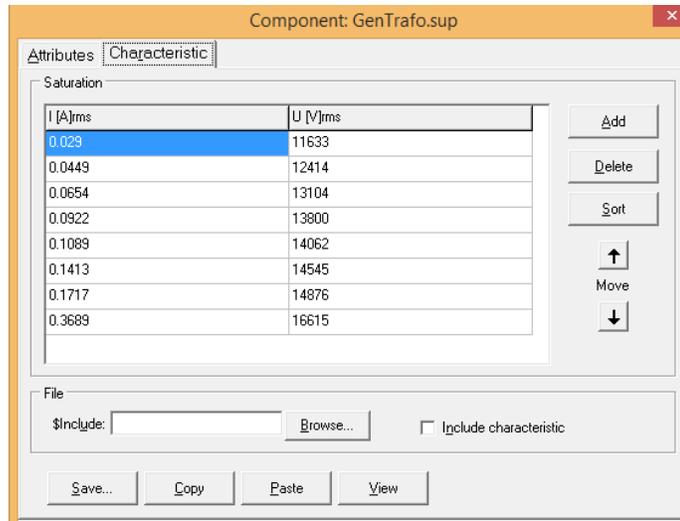
En las imágenes que se muestran a continuación, se detallan algunas ventanas de como cargar los parámetros del modelo del transformador saturable, las cuales son necesarias introducir para obtener un resultado más apegado a la operación real de un transformador.

En la Imagen 4.38, se muestra la ventana en la cual se introducen los parámetros básicos del transformador saturable, este modelo es de gran utilidad ya que nos brinda una muy buena aproximación a la operación real del transformador.



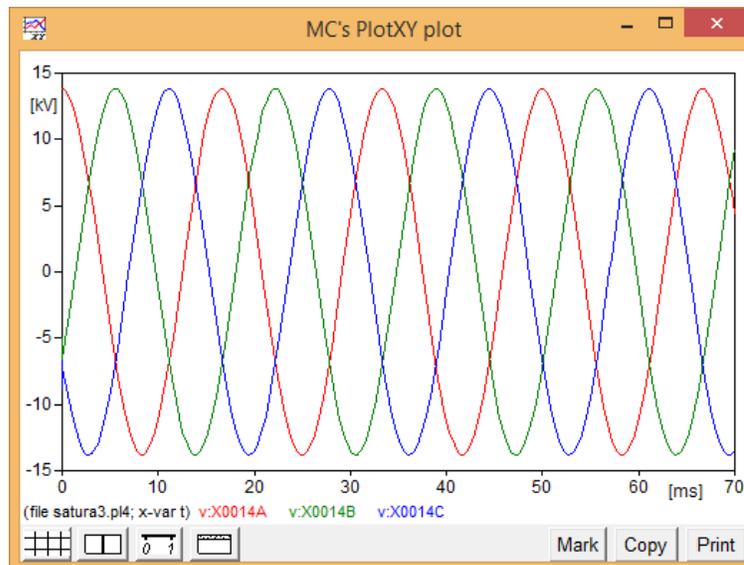
**Imagen 4.38 Ventana para introducir los respectivos parámetros del transformador saturable en ATPDraw.**

En la Imagen 4.39, se muestra la ventana en la cual se introducen los datos de la curva de magnetización del transformador y de esta forma obtener una operación cercana a la real, logrando de esta manera obtener resultados satisfactorios con respecto a los datos obtenidos en la práctica.



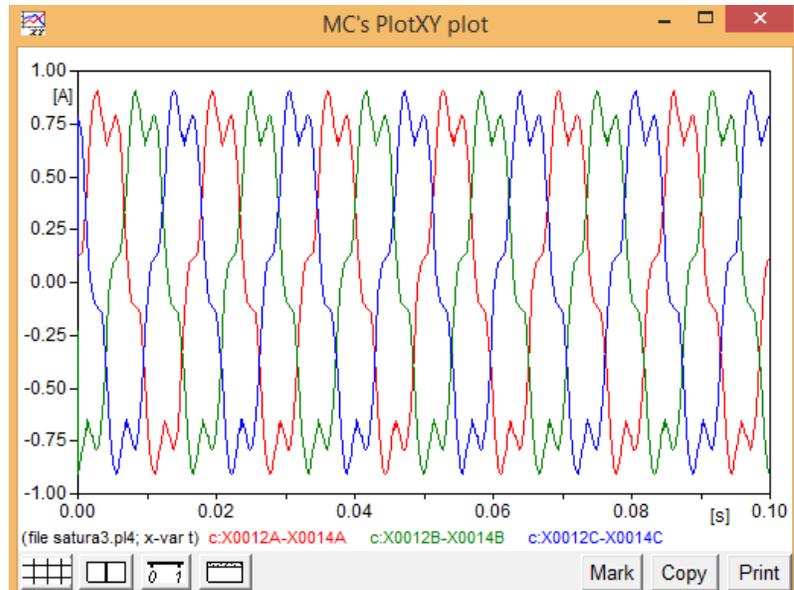
**Imagen 4.39** Ventana para introducir los datos de carga de la curva de magnetización del transformador saturable en ATPDraw.

En la Imagen 4.40, se muestran los resultados del voltaje, al simular el transformador trifásico saturable en la región de saturación.



**Imagen 4.40** Forma de onda de los voltajes trifásicos observados en la simulación del transformador saturable en ATPDraw.

En la Imagen 4.41, se presenta la forma de onda de cada una de las corrientes obtenidas por cada fase del transformador, en la cual se puede notar que es una gráfica típica de saturación de un transformador.



***Imagen 4.41 Forma de onda de las corrientes trifásicas observadas en la simulación del transformador saturable en ATPDraw.***

## **CAPITULO V. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANALISIS DE CIRCUITOS MONOFASICOS FERRORESONANTES.**

Las pruebas experimentales de laboratorio se orientaron a crear las condiciones propicias para que el fenómeno de la ferresonancia se presente en un circuito serie LC no lineal, en donde la capacitancia del cable de potencia se modela con 3 capacitores de diferente valor, simulando diferentes longitudes de cable.

Las condiciones en las cuales se realizaron las pruebas fueron de manera controlada, para evitar daños al bobinado del transformador y además evitar cualquier otro tipo de accidente eléctrico al momento de realizar dichas pruebas.

### **5.0 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS CIRCUITOS RESONANTES MONOFASICOS IMPLEMENTADOS EN EL LABORATORIO.**

En estas pruebas se utilizó un transformador seco de baja tensión, con el cual se realizó el montaje de tres circuitos monofásicos resonantes, cada uno con valores distintos de capacitancia, con el objetivo de demostrar experimentalmente las características de la ferresonancia en un circuito eléctrico y sus diferentes comportamientos en función de la capacitancia del sistema, cabe mencionar que el capacitor utilizado en el circuito LC a implementar modelara la capacitancia del cable de potencia utilizado tanto en una acometida aérea, como en acometidas subterráneas de una subestación eléctrica.

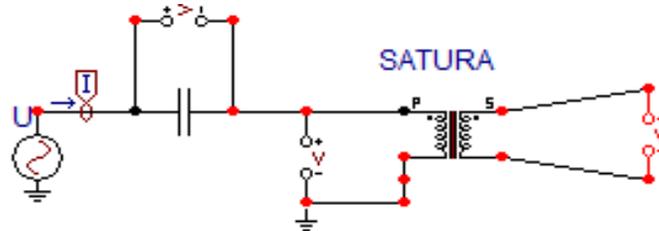
Para que se presente el fenómeno de la ferresonancia en un sistema eléctrico es necesario que se dé la condición de un circuito RLC serie, el cual se representa en una fase del sistema, este principio se aplicara en el laboratorio, con el fin de estudiar con mayor detalle este fenómeno, además en este apartado se utiliza ya el modelo del transformador saturable monofásico en **ATPDraw**, esto con el propósito de obtener resultados más reales.

En el apartado 4.5 se representó la inductancia del transformador monofásico de manera lineal tomando en cuenta solamente el valor de  $X_m$  del transformador obtenido en el laboratorio, la cual se modelara de forma no lineal, es decir con las características de operación del transformador, la curva de magnetización y todos los demás parámetros según el simulador. En la Imagen 5.1, se presenta el circuito implementado en ATPDRAW, para realizar la simulación teórica de los circuitos resonantes.

El circuito siguiente se representa la condición de capacitancia del alimentador primario, que puede ser energizado en serie con un transformador de distribución, el cual puede quedar conectado en esta condición de manera intencional ó accidentalmente debido a una maniobra monopolar ó fusión de un fusible; en cada uno de los casos pueden aparecer sobrevoltajes a través de la capacitancia y el transformador.

Con el propósito de esta implementación, se pretende presentar un análisis aproximado del circuito ferresonante para explicar el fenómeno y calcular los voltajes obtenidos en función de la reactancia capacitiva en serie con un transformador dado.

Para realizar la aproximación de este circuito se tomó en cuenta que la impedancia de la línea es pequeña en comparación con la impedancia de magnetización, la resistencia de pérdidas en el núcleo es mínima.



*Imagen 5.1 Esquema dibujado en ATDRAW, para simular los circuitos resonantes monofásicos.*

## **5.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS CIRCUITOS RESONANTES MONOFASICOS EN VACIO, IMPLEMENTADOS EN EL LABORATORIO.**

Estas pruebas se realizaron utilizando el esquema del circuito planteado en la Imagen 5.1, en las cuales el transformador se utilizara con el devanado secundario en vacío, con el propósito de crear una condición propicia a que el fenómeno de la ferresonancia ocurra, además las capacitancias que se utilizaran se han escogido con valores cercano al valor de capacitancia que hace que el circuito serie LC no lineal, entre en condición de resonancia, este valor se variara con el transcurso del desarrollo de las prácticas en el laboratorio para poder de esta manera observar el comportamiento eléctrico del circuito LC implementado.

Las prácticas realizadas se hicieron siguiendo los criterios de seguridad necesaria y bajo condiciones de aparición del fenómeno de ferresonancia controladas, para evitar cualquier tipo de accidente eléctrico, y de esta manera proteger al equipo y al personal que de operación.

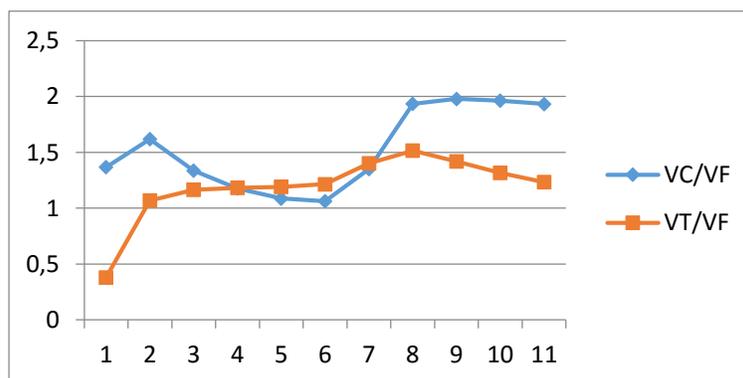
### **5.1.1 Circuito Resonante con Transformador y Capacitancia de 6 $\mu$ f.**

El circuito a realizar es el mostrado en la Imagen 5.1, cuyo primer valor de capacitancia utilizado es de 6 $\mu$ F. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.1, las últimas dos columnas de la tabla muestran una relación de la tensión del capacitor y el transformador, respecto a la tensión de la fuente.

Tensión Fuente RMS (V)	Tensión Capacitor RMS (V)	Tensión Transformador Prim. RMS (V)	Tensión Transformador Sec. RMS (V)	Corriente Prim. RMS (A)	Vcap / Vf	Vtrx / Vf
10.04	13.74	3.83	4.04	0.035	1.36	0.38
20.14	32.61	21.52	22.83	0.082	1.62	1.07
30.19	40.36	35.18	37.45	0.102	1.34	1.16
40.05	47.15	47.35	50.44	0.119	1.18	1.18
50.13	54.53	59.71	63.56	0.138	1.09	1.19
60	63.81	72.90	77.64	0.163	1.06	1.22
70	94.53	98.12	104.3	0.251	1.35	1.40
80.15	155.1	121.5	129.4	0.428	1.93	1.51
90.18	178.5	128	136.1	0.499	1.98	1.42
100.6	197.5	132.5	140.9	0.559	1.96	1.32
110	212.7	135.8	144.4	0.608	1.93	1.23

**Tabla 5.1 Datos experimentales del circuito resonante utilizando capacitancia de  $6\mu F$ .**

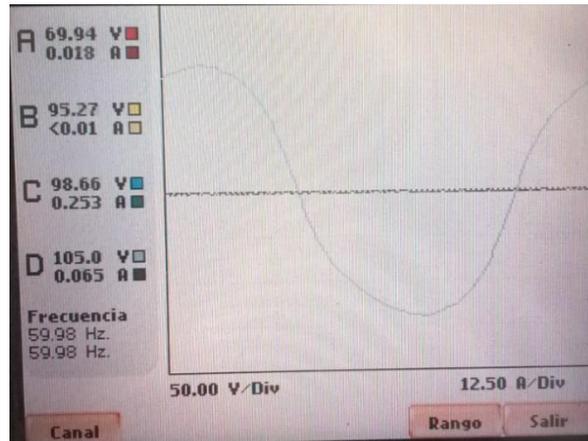
Los datos obtenidos en la tabla 5.1, permite hacer la construcción de las gráfica mostrada en la Imagen 5.2, las cual muestra las sobretensiones que aparecen en el capacitor y el transformador, respecto a la tensión de alimentación.



**Imagen 5.2 Sobretensiones en el capacitor y el transformador respecto a la tensión de la fuente en el circuito resonante utilizando la capacitancia de  $6\mu F$ .**

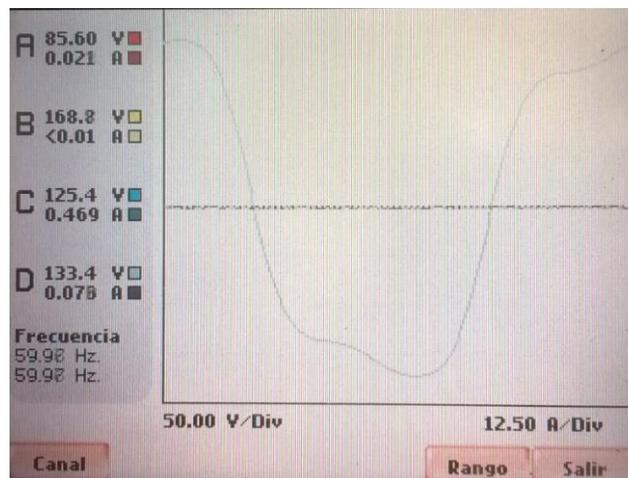
En las imágenes que se muestran a continuación se presentan las formas de las gráficas obtenidas en el laboratorio, tomadas con el equipo de medición **Power Guide 4400 (DRANETZ)**.

En la Imagen 5.3 se puede observar que el transformador aún no está trabajando en saturación ya que la onda senoidal del voltaje, en el lado del secundario del transformador aún no se deforma.



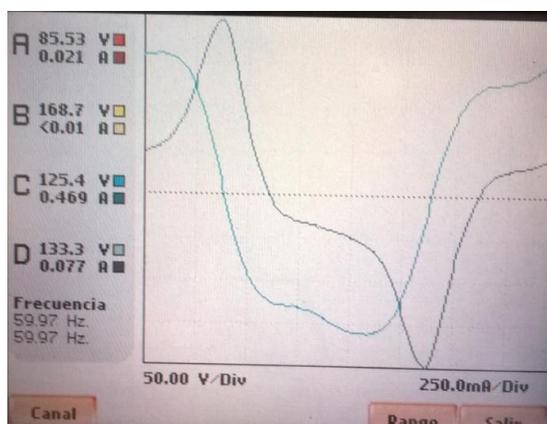
*Imagen 5.3 Forma de onda en el secundario del transformador antes de la saturación del circuito resonante construido con la capacitancia de  $6\mu F$ .*

En la Imagen 5.4, se puede observar una deformación en la onda del voltaje secundario del transformador, es decir ya está en condición de operación de saturación el transformador, es de mencionar que con este valor de capacitancia existe esta transición aproximadamente por los **65V** de alimentación.



*Imagen 5.4 Forma de onda en el secundario del transformador en saturación del circuito resonante construido con la capacitancia de  $6\mu F$ .*

Se puede observar la gráfica de la Imagen 5.5, la forma de onda de la corriente es de saturación del transformador.



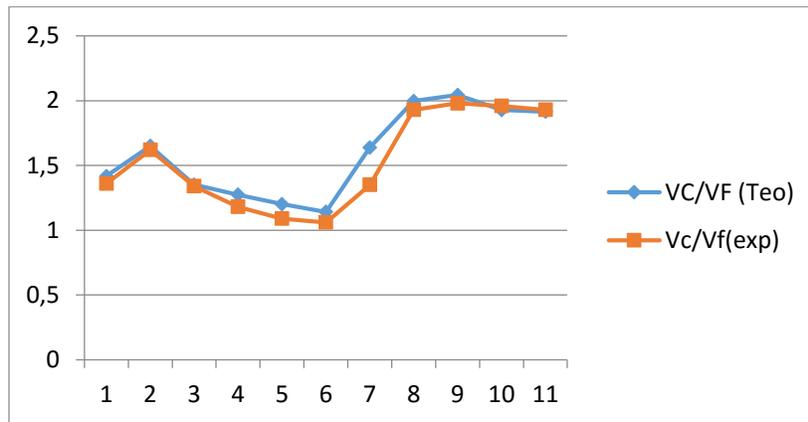
**Imagen 5.5** Forma de onda de la corriente, del circuito resonante construido con la capacitancia de  $6\mu F$ .

Para validar los datos obtenidos en el laboratorio, se hace el estudio teórico de este mismo circuito mediante el uso de **ATPDraw**, utilizando el esquema de la Imagen 5.1, para los mismos valores de tensión de alimentación utilizados en el circuito experimental. La tabla 5.2 muestra los resultados obtenidos con la simulación del circuito en **ATPDraw**.

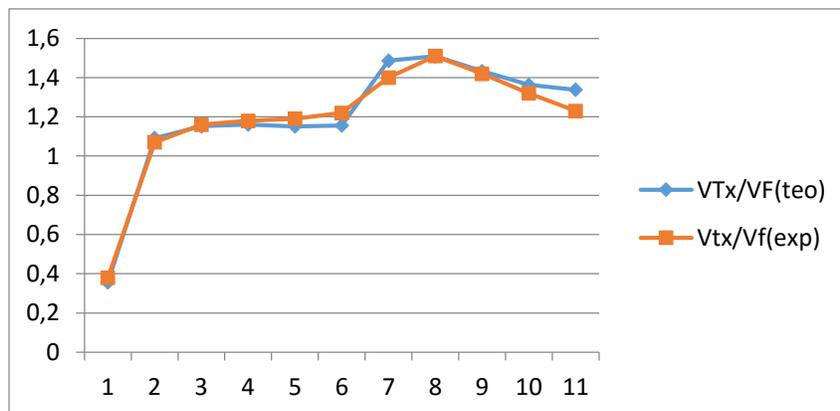
Tensión Fuente RMS (V)	Tensión Capacitor RMS (V)	Tensión Transformador RMS (V)	Tensión Transformador Sec. RMS (V)	Corriente RMS (A)	Vcap / Vf	Vtrx / Vf
10	14.18	3.57	4.70	0.031	1.42	0.35
20	33.00	21.83	23.69	0.078	1.65	1.09
30	40.54	34.55	37.34	0.113	1.35	1.15
40	50.95	46.43	50.06	0.141	1.27	1.16
50	60.06	57.56	63.73	0.164	1.20	1.15
60	68.46	69.38	76.83	0.188	1.14	1.16
70	114.73	104.04	114.80	0.223	1.64	1.48
80	159.78	120.73	128.44	0.434	1.99	1.51
90	183.97	128.91	141.37	0.567	2.04	1.43
100	192.83	136.28	143.94	0.643	1.92	1.36
110	210.62	147.14	149.78	0.707	1.91	1.34

**Tabla 5.2** Datos obtenidos en **ATPDRAW** del circuito resonante utilizando capacitancia de  $6\mu F$ .

Para tener una mejor visualización de los resultados obtenidos se presentan en las imágenes 5.6, 5.7, la superposición de los resultados teóricos con los experimentales.

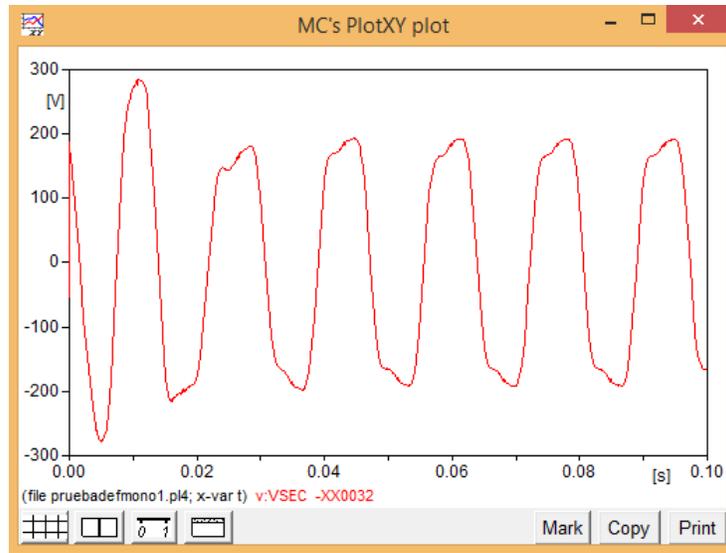


**Imagen 5.6** Comparación de sobretensiones en el capacitor respecto a la tensión de la fuente del circuito resonante utilizando la capacitancia de  $6\mu F$ .

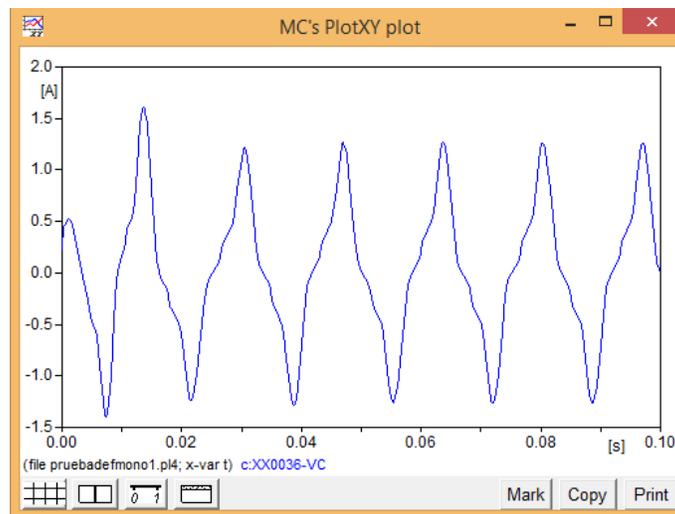


**Imagen 5.7** Comparación de sobretensiones en el transformador respecto a la tensión de la fuente del circuito resonante construido con la capacitancia de  $6\mu F$ .

En las imágenes 5.8 y 5.9, se muestran las formas de onda de voltaje y corrientes obtenidas en la simulación con el programa **ATPDraw**, mediante la implementación del circuito serie LC no lineal. Se puede decir que tanto la onda de voltaje como de corriente del circuito sufren una distorsión muy notable, lo que puede ser perjudicial para la operación del circuito eléctrico.



**Imagen 5.8** Valores de tensión en el secundario del transformador a tensión nominal, construido con la capacitancia de  $6\mu F$ .



**Imagen 5.9** Forma de onda de corriente observada con ATPDraw, en circuito LC serie, con la capacitancia de  $6\mu F$ .

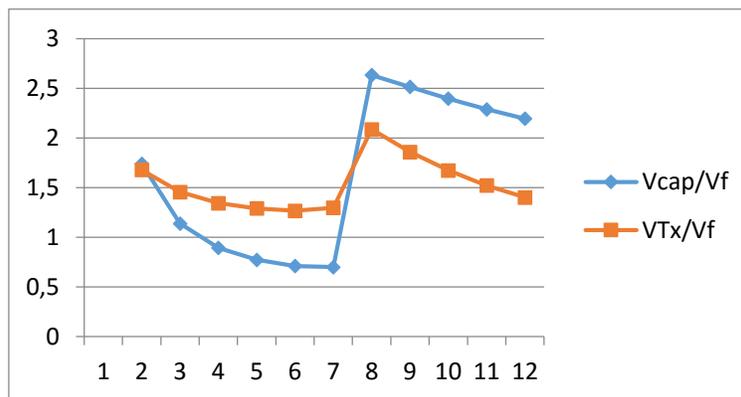
### 5.1.2 Circuito Resonante con Transformador y Capacitancia de $10\mu f$ .

El montaje a realizar es el expuesto en la Imagen 5.1, cuyo valor de capacitancia utilizado es de  $10\mu F$ . Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.3, las últimas dos columnas de la tabla muestran una relación de la tensión del capacitor y el transformador, respecto a la tensión de la fuente.

Tensión Fuente RMS (V)	Tensión Capacitor RMS (V)	Tensión Transformador Prim. RMS (V)	Tensión Transformador Sec. RMS (V)	Corriente Prim. RMS (A)	Vcap / Vf	Vtrx / Vf
10.20	17.76	17.12	18.27	0.072	1.74	1.67
20.22	23.02	29.45	31.39	0.094	1.13	1.45
30.15	26.95	40.51	43.14	0.110	0.89	1.34
40.06	30.97	51.75	55.05	0.127	0.77	1.29
50.02	35.60	63.41	67.61	0.146	0.71	1.26
60.14	42.13	77.99	83.02	0.175	0.70	1.29
70.04	184.5	146.2	155.6	0.868	2.63	2.08
80.07	201.4	148.9	158.3	0.966	2.51	1.85
90.23	216.2	151	160.5	1.064	2.39	1.67
100.3	229.6	152.6	162.2	1.149	2.28	1.52
110	241.4	154.1	163.8	1.230	2.19	1.40

**Tabla 5.3 Datos experimentales del circuito resonante utilizando capacitancia de 10 $\mu$ F.**

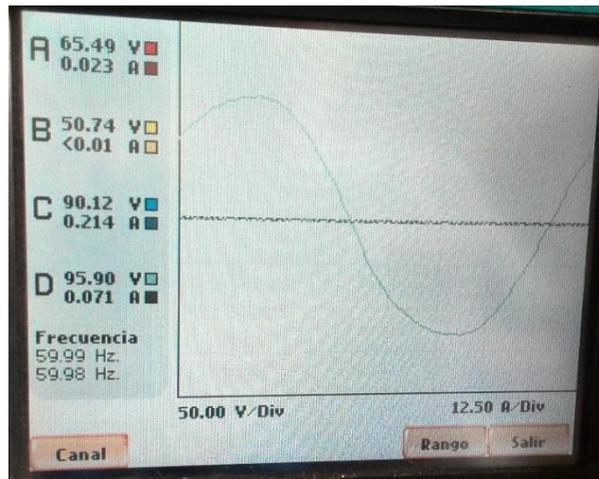
Los datos obtenidos en la tabla 5.3, permite hacer la construcción de la gráfica mostrada en la Imagen 5.10, la cual muestra las sobretensiones que aparecen en el capacitor y el transformador, respecto a la tensión de alimentación.



**Imagen 5.10 Sobretensiones en el capacitor y el transformador respecto a la tensión de la fuente en el circuito resonante utilizando la capacitancia de 10 $\mu$ F.**

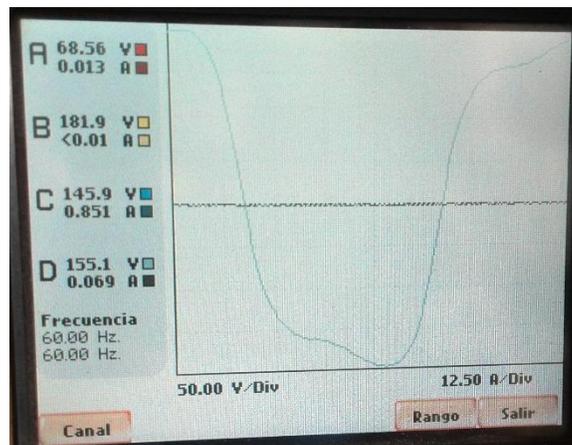
En las imágenes que se muestran a continuación se presentan las formas de las gráficas obtenidas en el laboratorio tomadas con el equipo de medición.

En la Imagen 5.11, se observa la forma de onda de la tensión en el secundario del transformador tomada en el laboratorio con el medidor, la cual aún no se deforma, es decir el transformador aún no está en condición de saturación.



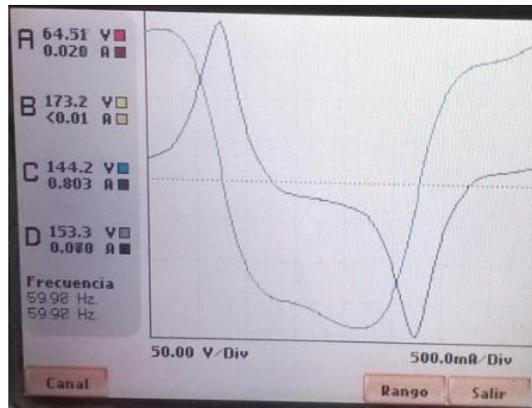
***Imagen 5.11 Forma de onda del voltaje en el secundario del transformador antes de la condición de saturación utilizando un circuito resonante con la capacitancia de 10 $\mu$ F.***

En la Imagen 5.12, se muestra la forma de onda de la tensión en el secundario del transformador, en la cual se puede ver que la forma de onda ya está deformada es decir el transformador ya está operando en condición de saturación, esta condición sucede a un valor de tensión de alimentación cercano a los 70VAC.



***Imagen 5.12 Forma de onda del voltaje en el secundario del transformador en condición de saturación y en un circuito resonante construido con capacitancia de 10 $\mu$ F.***

En la Imagen 5.13, se puede observar la gráfica de la forma de onda de la corriente, la cual es de saturación del transformador.



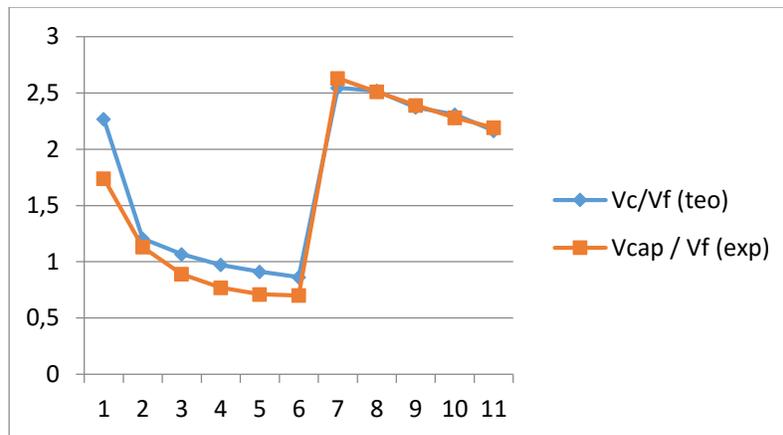
**Imagen 5.13 Forma de onda de corriente en condición de saturación para el circuito resonante construido con la capacitancia de  $10\mu F$ .**

Para validar los datos obtenidos en el laboratorio, se hace el estudio teórico de este mismo circuito mediante el uso de ATPDraw, utilizando el esquema de la Imagen 5.1, para los mismos valores de tensión de alimentación utilizados en el circuito experimental. La tabla 5.4 muestra los resultados obtenidos.

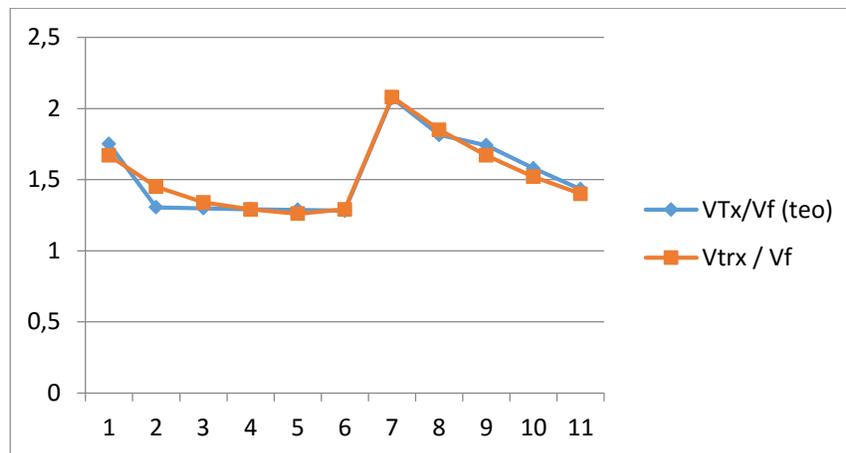
Tensión Fuente RMS (V)	Tensión Capacitor RMS (V)	Tensión Transformador Prim. RMS (V)	Tensión Transformador Sec. RMS (V)	Corriente Prim. RMS (A)	Vcap / Vf	Vtrx / Vf
10	22.68	17.50	18.94	0.068	2.27	1.75
20	24.11	26.09	28.59	0.104	1.20	1.30
30	32.01	38.95	43.08	0.138	1.07	1.29
40	38.86	51.67	57.11	0.167	0.97	1.29
50	45.55	64.34	71.12	0.201	0.91	1.28
60	51.76	76.85	85.37	0.258	0.86	1.28
70	178.16	145.16	160.70	0.667	2.54	2.07
80	201.46	145.11	156.60	0.869	2.52	1.81
90	213.42	156.66	160.15	1.067	2.37	1.74
100	230.85	157.94	163.86	1.182	2.31	1.57
110	238.00	157.61	164.55	1.245	2.16	1.43

**Tabla 5.4 Datos obtenidos en ATPDRAW del circuito resonante utilizando capacitancia de  $10\mu F$ .**

En las imágenes 5.14 y 5.15, que se muestran a continuación, se realizan las comparaciones, entre los resultados teóricos y experimentales obtenidos en los voltajes medidos en el capacitor y el transformador respectivamente.

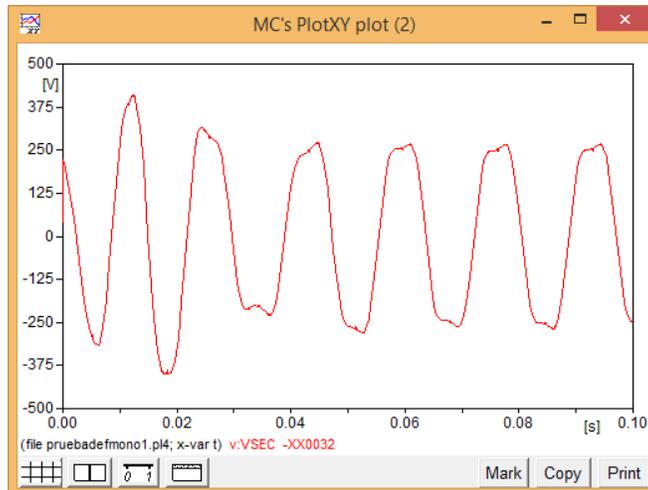


**Imagen 5.14** Comparación de sobretensiones en el capacitor respecto a la tensión de la fuente del circuito resonante utilizando la capacitancia de  $10\mu\text{F}$ .

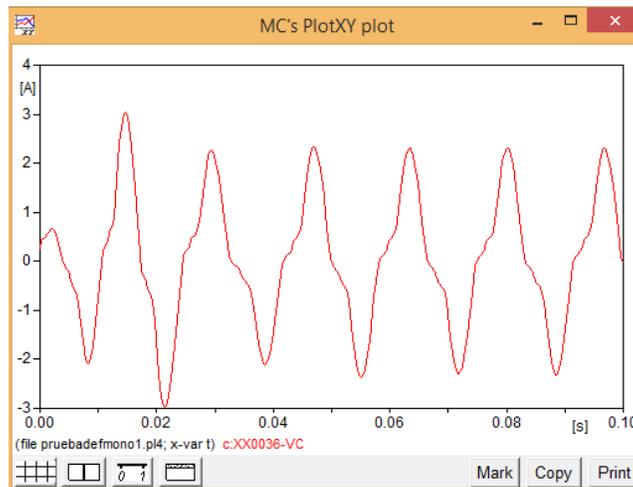


**Imagen 5.15** Comparación de sobretensiones en el transformador respecto a la tensión de la fuente del circuito resonante construido con la capacitancia de  $10\mu\text{F}$ .

Por otra parte las imágenes 5.16, 5.17, se muestran las formas de las gráficas obtenidas en el simulador ATPDraw, al implementar el circuito de la Imagen 5.1, utilizando un  $C=10\mu\text{F}$ .



**Imagen 5.16** Valores de tensión en el secundario del transformador a tensión nominal, construido con la capacitancia de  $10\mu\text{F}$ .



**Imagen 5.17** Forma de onda de corriente observada con ATPDRAW, en circuito LC serie, con capacitancia de  $10\mu\text{F}$ .

Se puede observar que las tendencias de deformación de las ondas de voltaje y corriente se mantienen, con las del caso anterior en el cual se utilizó un capacitor de  $6\mu\text{F}$ .

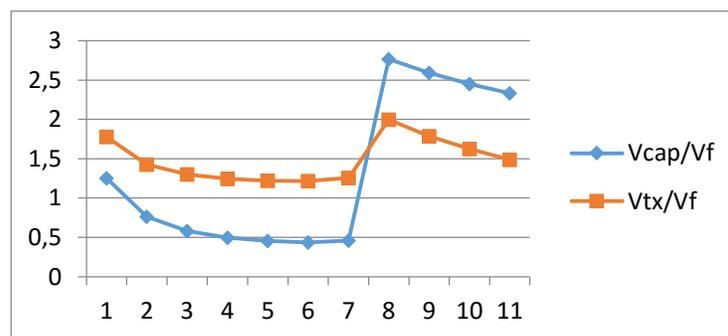
### 5.1.3 Circuito Resonante con Transformador y Capacitancia de $15\mu\text{F}$ .

El montaje a realizar es el expuesto en la Imagen 5.1, cuyo último valor de capacitancia utilizado es de  $15\mu\text{F}$ . Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.5, las últimas dos columnas de la tabla muestran una relación de la tensión del capacitor y el transformador, respecto a la tensión de la fuente.

Tensión Fuente RMS (V)	Tensión Capacitor RMS (V)	Tensión Transformador Prim. RMS (V)	Tensión Transformador Sec. RMS (V)	Corriente Prim. RMS (A)	Vcap / Vf	Vtx / Vf
10.07	12.61	17.89	19.08	0.078	1.25	1.77
20	15.28	28.51	30.35	0.094	0.76	1.42
30.28	17.64	39.37	41.92	0.109	0.58	1.30
40.06	19.94	49.77	53.03	0.123	0.49	1.24
50.22	22.79	61.22	65.17	0.142	0.45	1.21
60.15	26.13	73.13	77.83	0.163	0.43	1.21
70.05	32.29	88.05	93.80	0.205	0.46	1.25
80.03	221.3	159.8	169.7	1.768	2.76	1.99
90.23	233.7	161.2	171.1	1.908	2.59	1.78
100.1	245.4	162.5	172.5	2.028	2.45	1.62
110.1	256.6	163.7	173.7	2.136	2.33	1.48

**Tabla 5.5 Datos experimentales del circuito resonante utilizando capacitancia de 15 $\mu$ F.**

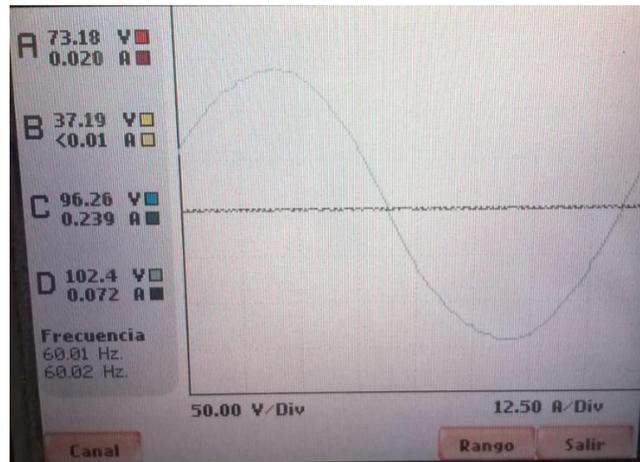
Los datos obtenidos en la tabla 5.5 nos permiten hacer la construcción de la gráfica mostrada en la Imagen 5.18, la cual muestra las sobretensiones que aparecen en el capacitor y el transformador, respecto a la tensión de alimentación.



**Imagen 5.18 Sobretensiones en el capacitor y el transformador respecto a la tensión de la fuente en el circuito resonante utilizando la capacitancia de 15 $\mu$ F.**

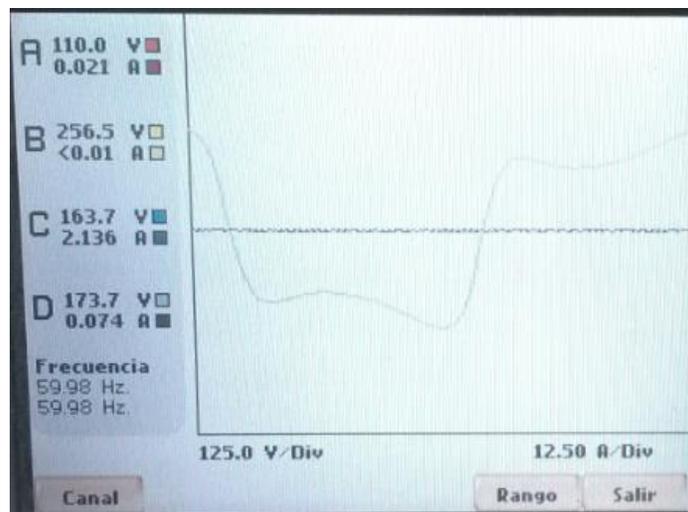
En las imágenes que se muestran a continuación se presentan las formas de las gráficas obtenidas en el laboratorio tomadas con el equipo de medición.

En la Imagen 5.19 se puede observar que el transformador aún no está trabajando en saturación ya que la onda senoidal del voltaje del secundario aún no se deforma.



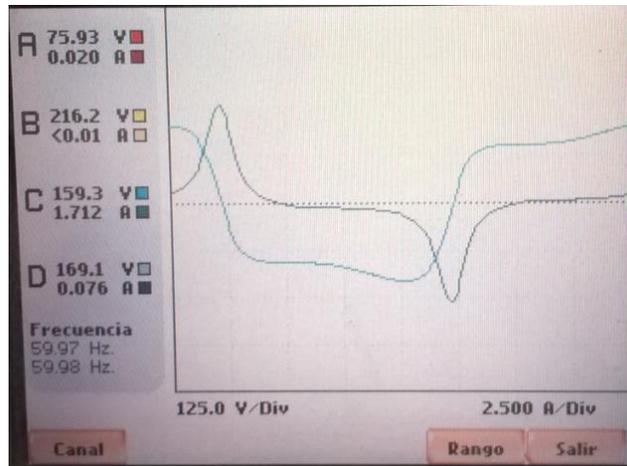
**Imagen 5.19** Forma de onda de la tensión del secundario del transformador antes de la condición de saturación en el circuito resonante construido con la capacitancia de  $15\mu F$ .

De la Imagen 5.20, se puede decir que el transformador ya está trabajando en saturación, ya que la onda senoidal del voltaje del secundario está deformada, es de mencionar que la deformación de la onda con este valor de capacitancia es más crítica ya que la onda de voltaje sufre una mayor deformación en comparación con los otros dos casos implementados.



**Imagen 5.20** Forma de onda de la tensión del secundario del transformador con condición de saturación en el circuito resonante construido con la capacitancia de  $15\mu F$ .

En la Imagen 5.21, se presenta la forma de onda de corriente y voltaje observada en el secundario del transformador.



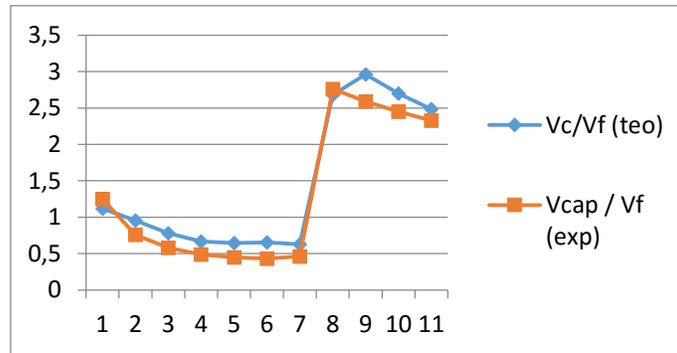
**Imagen 5.21** Forma de onda de la corriente en condición de saturación utilizando un circuito resonante construido con la capacitancia de  $15\mu\text{F}$ .

Para validar los datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio, se hace el estudio teórico de este mismo circuito mediante el uso de **ATPDraw**, la tabla 5.6 muestra los resultados obtenidos.

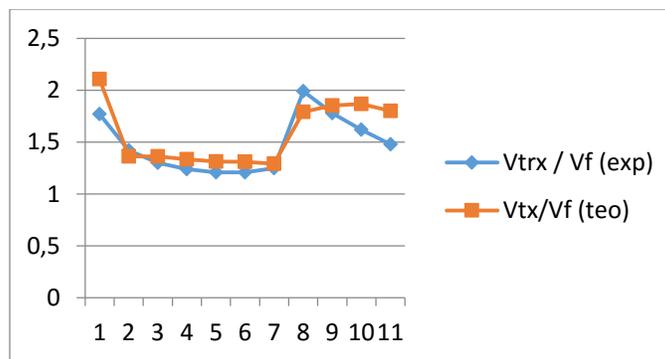
Tensión Fuente RMS (V)	Tensión Capacitor RMS (V)	Tensión Transformador Prim. RMS (V)	Tensión Transformador Sec. RMS (V)	Corriente Prim. RMS (A)	Vcap / Vf	Vtrx / Vf
<b>10</b>	11.16	21.06	23.35	0.078	1.11	2.10
<b>20</b>	19.08	27.22	30.03	0.115	0.95	1.36
<b>30</b>	23.44	40.86	44.99	0.142	0.78	1.36
<b>40</b>	26.74	53.37	59.10	0.161	0.66	1.33
<b>50</b>	32.29	65.72	72.88	0.188	0.64	1.31
<b>60</b>	39.21	78.57	87.09	0.297	0.65	1.30
<b>70</b>	43.93	90.33	100.93	0.417	0.62	1.29
<b>80</b>	214.66	143.24	162.53	1.88	2.68	1.79
<b>90</b>	266.54	166.70	185.62	2.03	2.96	1.85
<b>100</b>	269.96	186.88	207.12	2.17	2.69	1.8688
<b>110</b>	273.45	197.99	219.54	2.24	2.48	1.79

**Tabla 5.6** Datos obtenidos en ATPDRAW del circuito resonante utilizando capacitancia de  $15\mu\text{F}$ .

De la tabla 5.6 se obtienen las siguientes graficas 5.22 y 5.23, en las cuales se comparan los valores obtenidos tanto en la simulación como en el laboratorio, de los voltajes medidos en el capacitor y en el transformador, con el propósito de tener una mejor apreciación y comparar los resultados obtenidos.

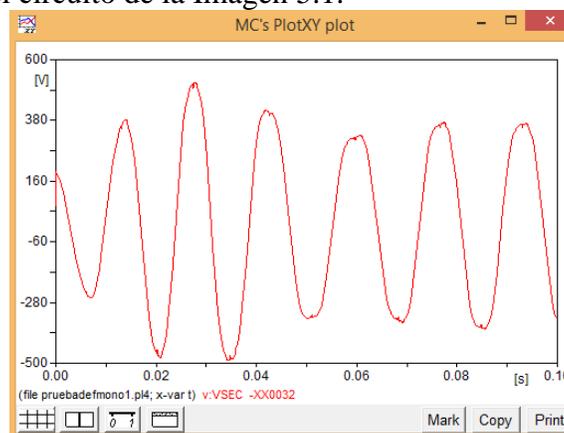


**Imagen 5.22 Comparación de sobretensiones en el capacitor respecto a la tensión de la fuente del circuito resonante utilizando la capacitancia de  $15\mu\text{F}$ .**

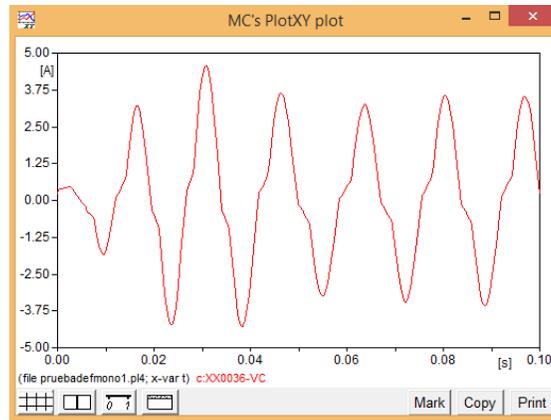


**Imagen 5.23 Comparación de sobretensiones en el transformador respecto a la tensión de la fuente del circuito resonante construido con la capacitancia de  $15\mu\text{F}$ .**

En las Imagen 5.24 y 5.25, se muestran las formas de onda obtenidas con el simulador ATPDraw, al simular el circuito de la Imagen 5.1.



**Imagen 5.24 Forma de onda del secundario del transformador a tensión nominal, construido con la capacitancia de  $15\mu\text{F}$ .**



**Imagen 5.25 Forma de onda de corriente observada con ATPDRAW, en circuito LC serie, con la capacitancia de  $15\mu\text{F}$ .**

Se puede observar que el modelo teórico simulado con la herramienta computacional **ATPDraw**, se ajusta muy bien al resultado experimental, sin embargo al principio del proceso de validación, la respuesta de los circuitos difería en grandes magnitudes, debido a que el núcleo del transformador se consideró netamente inductivo. Una vez se consideraron las pérdidas activas del transformador, se obtuvieron valores más cercanos a los experimentales. En este sentido se corrobora la importancia de ajustar los valores de las pérdidas activas del modelo teórico implementado.

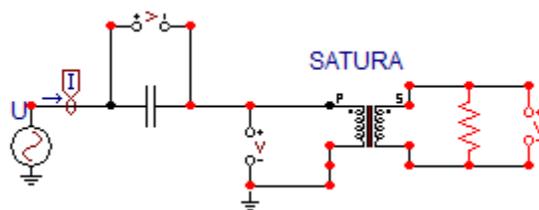
Además es de destacar que el punto de cruce de las curvas de impedancia del capacitor y el transformador, coinciden con el punto de máxima resonancia en el sistema, lo que valida el postulado teórico estudiado anteriormente, en el que se afirma que la igualación de las impedancias capacitivas e inductivas en un circuito LC produce sobretensiones en un sistema eléctrico, es decir el voltaje en las terminales del transformador crece indefinidamente a medida que  $X_c$  se aproxima a  $X_m$ ; sin embargo  $X_m$  no es constante ya que está relacionado con el voltaje de alimentación, además esta relación se determina con el uso de la curva de magnetización del transformador esto hace muy interesante y complejo el análisis del fenómeno de la ferresonancia.

## **5.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS CIRCUITOS RESONANTES MONOFASICOS, UTILIZANDO UNA PEQUEÑA CARGA RESISTIVA EN EL SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR.**

En este apartado se estudia el comportamiento de los mismos circuitos implementados en el apartado 5.1, con la diferencia que el transformador se le instalara una carga resistiva de valor pequeño conectada en el secundario, para ver como es el comportamiento de los respectivos circuitos en comparación con los datos obtenidos anteriormente. Esto es con el objetivo de comprobar la teoría investigada, la cual ha demostrado que la ubicación de resistencia por fase en el secundario de un banco de transformadores monofásicos o transformador trifásico, reduce la probabilidad de ocurrencia de ferresonancia. Este método básicamente refleja la componente resistiva, en la trayectoria LC-serie que se pueda llegar a formar en el lado de media tensión para condiciones de línea abierta. Por lo que es muy importante determinar el porcentaje de carga resistiva a utilizar, en el apéndice 4 se especifica con mayor detalle cómo realizar este cálculo.

Es de mencionar que el porcentaje de carga resistiva (corriente que circula por la resistencia) depende de las características del transformador, el porcentaje de carga resistiva requerida es mayor para transformadores de menor potencia y va disminuyendo a medida que la potencia del transformador aumenta. Además también depende del nivel de voltaje del alimentador primario, ya que, conforme aumenta el nivel de voltaje del alimentador el porcentaje de carga resistiva es mayor.

En la Imagen 5.26 se muestra el modelo del circuito simulado en **ATPDraw**, en el cual se le instaló una pequeña resistencia en el secundario del transformador, el valor de la resistencia utilizada es de **5Ω**, los resultados obtenidos con este modelo se presentan en los siguientes apartados.



**Imagen 5.26 Circuito LC serie con una resistencia de carga en el secundario del transformador a simular en ATPDRAW.**

### 5.2.1 Circuito Resonante con Transformador y Carga en el Secundario Utilizando Capacitancia De 6μF.

El montaje a realizar es el expuesto en la Imagen 5.26 con un valor de capacitancia utilizado de 6μF, y un valor de resistencia de carga en el secundario del transformador de 5Ω. Los resultados experimentales obtenidos se muestran en la tabla 5.7.

Tensión Fuente RMS (V)	Tensión Capacitor RMS (V)	Tensión Transformador Prim. RMS (V)	Tensión Transformador Sec. RMS (V)	Corriente Prim. RMS (mA)
<b>20.08</b>	20.15	0.225	0.219	40.34
<b>39.89</b>	39.99	0.444	0.433	90.56
<b>60.46</b>	60.59	0.677	0.657	134.67
<b>80.24</b>	80.35	0.901	0.873	183.23
<b>100.1</b>	100.2	1.125	1.091	231.45
<b>110.5</b>	109.7	1.233	1.194	250.65

**Tabla 5.7 Datos experimentales del circuito resonante utilizando capacitancia de 6μF.**

Para validar los datos obtenidos, se hace el estudio teórico de este mismo circuito mediante el uso de ATPDRAW, utilizando el esquema de la Imagen 5.26, para los mismos valores de tensión de alimentación utilizados en el circuito experimental. La tabla 5.8 muestra los resultados obtenidos.

Tensión Fuente RMS (V)	Tensión Capacitor RMS (V)	Tensión Transformador Prim. RMS (V)	Tensión Transformador Sec. RMS (V)	Corriente Prim. RMS (mA)
<b>20</b>	20.35	0.563	0.195	45.82
<b>40</b>	40.00	0.567	0.391	92.05
<b>60</b>	60.78	0.765	0.586	137.44
<b>80</b>	81.30	1.09	0.714	184.24
<b>100</b>	101.794	1.60	0.975	230.27
<b>110</b>	111.98	1.86	1.07	249.99

*Tabla 5.8 Datos en ATPDRAW del circuito resonante utilizando capacitancia de 6 $\mu$ F.*

### 5.2.2 Circuito Resonante con Transformador y Carga en el Secundario Utilizando Capacitancia de 10 $\mu$ F.

El montaje a realizar es el expuesto en la Imagen 5.26 con un valor de capacitancia utilizado de 10 $\mu$ F y un valor de resistencia de carga en el secundario del transformador de 5 $\Omega$ . Los resultados experimentales obtenidos se muestran en la tabla 5.9.

Tensión Fuente RMS (V)	Tensión Capacitor RMS (V)	Tensión Transformador Prim. RMS (V)	Tensión Transformador Sec. RMS (V)	Corriente Prim. RMS (mA)
<b>20.09</b>	20.16	0.359	0.354	75.89
<b>39.97</b>	40.06	0.719	0.703	160.23
<b>60.03</b>	60.16	1.086	1.058	220.45
<b>79.96</b>	80.10	1.456	1.414	302.05
<b>100.1</b>	100.3	1.834	1.781	390.12
<b>110</b>	110.2	2.017	1.961	430.87

*Tabla 5.9 Datos experimentales del circuito resonante utilizando capacitancia de 10 $\mu$ F.*

Para validar los datos obtenidos, se hace el estudio teórico de este mismo circuito mediante el uso de **ATPDraw**, utilizando los mismos valores de tensión de alimentación utilizados en el circuito experimental. La tabla 5.10 muestra los resultados obtenidos.

Tensión Fuente RMS (V)	Tensión Capacitor RMS (V)	Tensión Transformador Prim. RMS (V)	Tensión Transformador Sec. RMS (V)	Corriente Prim. RMS (mA)
<b>20</b>	20.52	0.933	0.329	77.34
<b>40</b>	41.06	0.880	0.659	155.19
<b>60</b>	61.60	1.610	0.982	230.48
<b>80</b>	82.38	1.800	1.310	309.03
<b>100</b>	102.98	1.930	1.640	384.18
<b>110</b>	110.82	2.160	1.910	424.97

**Tabla 5.10 Datos en ATPDRAW del circuito resonante utilizando capacitancia de  $10\mu\text{F}$ .**

### 5.2.3 Circuito Resonante con Transformador y Carga en el Secundario Utilizando Capacitancia de $15\mu\text{F}$ .

El montaje a realizar es el expuesto en la Imagen 5.26 con un valor de capacitancia utilizado de  $15\mu\text{F}$ , y un valor de resistencia de carga en el secundario del transformador de  $5\Omega$ . Los resultados experimentales obtenidos se muestran en la tabla 5.11.

Tensión Fuente RMS (V)	Tensión Capacitor RMS (V)	Tensión Transformado r Prim. RMS (V)	Tensión Transformado r Sec. RMS (V)	Corriente Prim. RMS (mA)
<b>20</b>	19.87	0.613	0.584	115.56
<b>40</b>	40.53	1.396	1.377	238.34
<b>60</b>	60.66	2.081	1.829	365.54
<b>80</b>	79.91	2.563	2.515	467.89
<b>100</b>	100.4	3.182	3.135	576.98
<b>110</b>	110.3	3.449	3.446	652.05

**Tabla 5.11 Datos experimentales del circuito resonante utilizando capacitancia de  $15\mu\text{F}$ .**

Para validar los datos obtenidos, se hace el estudio teórico de este mismo circuito mediante el uso de **ATPDRAW**, utilizando el esquema de la Imagen 5.26, para los mismos valores de tensión de alimentación utilizados en el circuito experimental. La tabla 5.12 muestra los resultados obtenidos.

Tensión Fuente RMS (V)	Tensión Capacitor RMS (V)	Tensión Transformador Prim. RMS (V)	Tensión Transformador Sec. RMS (V)	Corriente Prim. RMS (mA)
20	20.86	1.41	0.499	116.65
40	41.37	1.85	0.989	236.42
60	62.06	2.30	1.49	352.44
80	83.63	2.73	2.00	466.62
100	104.43	3.11	3.49	586.46
110	114.88	3.82	3.74	649.09

*Tabla 5.12 Datos en ATPDRAW del circuito resonante utilizando capacitancia de 15 $\mu$ F.*

### 5.3 DISEÑO DE MODULO DE PRUEBAS PARA SISTEMAS FERRORESONANTES MONOFASICOS.

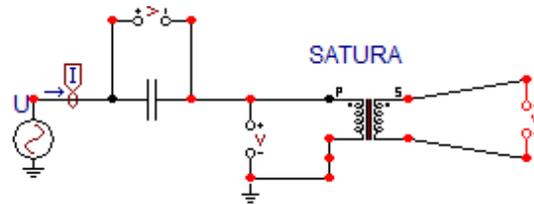
Como se ha comprobado, es de mucha importancia el estudio del fenómeno de la ferresonancia, por lo que se hace indispensable su estudio para las nuevas generaciones de profesionales en el área de Ingeniería Eléctrica, con el objetivo de poder prevenir este tipo de fallas y corregirlas oportunamente en caso de ser necesario, es esta la razón por lo que se decidió hacer el diseño de un módulo de prueba, para poder ejemplificar de una manera real y controlada el fenómeno y poder ser utilizado dentro del laboratorio donde sea relevante el estudio de este fenómeno.

A continuación se detallan los pasos que se siguieron para realizar el diseño del módulo de prueba para circuitos monofásicos ferresonantes.

#### PASO 1: INVESTIGACIÓN.

Por tratarse de un estudio de investigación, es indispensable consultar investigaciones previas, que de una u otra manera estén relacionadas con el tema a desarrollar, esto nos ayudó a obtener una base teórica que nos permitió comprender el tema de interés. Por lo que según la investigación realizada, la configuración básica para que se presente en un sistema de potencia el fenómeno de la ferresonancia, es que bajo ciertas circunstancias se forme una trayectoria serie LC con una fase, como el que se muestra en la Imagen 5.15, la cual es una

de las causas más comunes para que el fenómeno de la ferresonancia se presente. El circuito siguiente representa la condición de capacitancia del alimentador primario, que puede ser energizado en serie con un transformador de distribución, cuya condición puede ser intencional o accidental debido a una maniobra monopolar, a una fusión de un fusible ó apertura accidental, en cada uno estos casos pueden aparecer sobrevoltajes a través de la capacitancia y el transformador.



*Imagen 5.27 Circuito LC serie básico utilizado para diseño del módulo.*

### **PASO 2: MEDICIONES.**

La parte fundamental del módulo de prueba es el transformador seco utilizado, al cual se le realizaron varias pruebas de laboratorio para obtener sus características eléctricas fundamentales y poder así iniciar las respectivas pruebas para el diseño del módulo, estas pruebas se mencionan con detalle en el **apartado 4.1**.

### **PASO 3: CÁLCULOS.**

Después de obtener los parámetros del transformador a utilizar se procedió a realizar los cálculos respectivos para encontrar el valor de capacitancia, a la cual el circuito LC en estudio podría entrar en condición de resonancia, estos cálculos que se realizaron se presentan en el **apartado 4.4.1**.

### **PASO 4: SIMULACIONES.**

Obtenido los cálculos del paso anterior se hicieron las primeras pruebas de simulación en **ATPDRAW**, para tratar de comprender con mayor claridad el comportamiento de un circuito LC serie bajo condiciones de resonancia, para realizar estas pruebas se decidió utilizar tres valores de capacitancia:  $6\mu\text{F}$ ,  $10\mu\text{F}$ ,  $15\mu\text{F}$ , para tratar de observar el comportamiento del circuito en estudio bajo estas condiciones, los resultados obtenidos en estas simulaciones se presentan en el **apartado 5.1**.

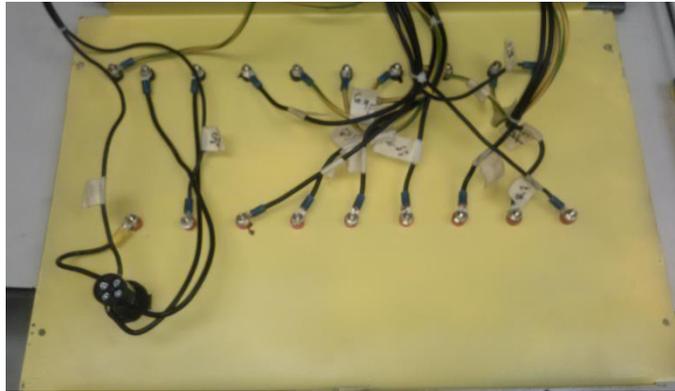
### **PASO 5: PRUEBAS DE LABORATORIO.**

Una vez comprobado y comprendido el comportamiento del circuito LC Serie mediante la simulación en condiciones de resonancia, se iniciaron las pruebas de laboratorio, los resultados obtenidos se presentan en el **apartado 5.1**.

### **PASO 6: DISEÑO DE GABINETE DEL MODULO DE PRUEBA.**

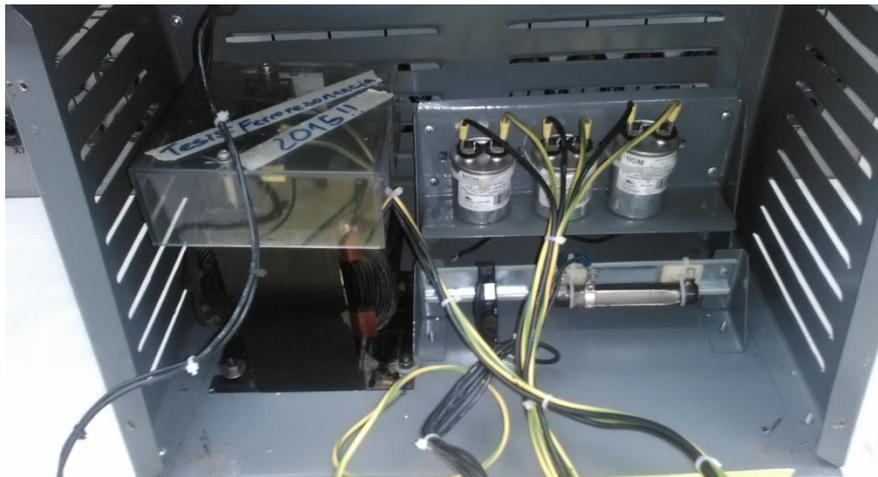
Después de haber realizado las respectivas pruebas de funcionamiento y operación del circuito serie LC, se procedió a realizar el diseño físico del módulo, con el propósito de facilitar la operación práctica y cableada al momento de realizar una prueba de laboratorio, obteniendo como resultado final lo se muestra en las imágenes siguientes.

En la Imagen 5.28, se muestra la forma de conexión de la parte frontal del módulo, en la cual se utilizaron borneras, y terminales de ojo para realizar las respectivas conexiones.



*Imagen 5.28 Parte frontal interna de módulo de prueba.*

En la Imagen 5.29, se detalla la forma de conexión de los dispositivos internos del módulo, transformador, capacitores, fusible y resistencia.



*Imagen 5.29 Parte interna de módulo de prueba.*

En la Imagen 5.30, se muestra el modulo terminado con todos sus componentes y su respectiva simbología de los elementos utilizados, con la finalidad de mayor facilidad en el momento de realizar una determinada prueba.



*Imagen 5.30 Muestra de módulo de prueba ya finalizado.*

#### **5.4 OPERACIÓN DE MODULO DE PRUEBAS PARA SISTEMAS FERRORESONANTES MONOFASICOS.**

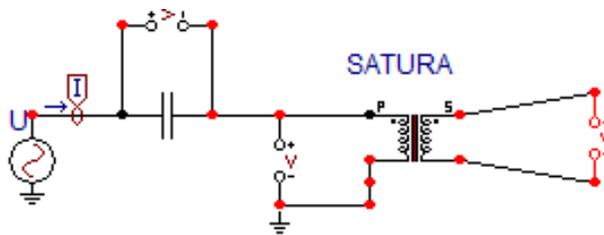
En este apartado se menciona la forma correcta de operación del módulo de prueba para circuitos monofásicos ferresonantes, ya que es de mucha importancia la correcta operación de un equipo, para seguridad del personal que lo opera, así como para la funcionalidad y durabilidad del equipo mismo. Se enuncian los siguientes pasos que se consideran básicos para la correcta operación del módulo de prueba.

##### **PASO 1: DESCRIPCION DE EQUIPO.**

Para realizar una operación eficiente y segura del módulo de pruebas es necesario su respectivo conocimiento básico, este consta de componentes básicos de un circuito LC serie, el cual según la investigación realizada es la forma eficiente y básica de conocer el comportamiento de un circuito ferresonante aplicado a un sistema de potencia, las partes que consta el equipo son:

- ✓ Transformador seco de **1.2KVA, 120V/120V, 60Hz, 9A.**
- ✓ Resistencia variable de **0Ω - 25Ω**, en el módulo se calibro la resistencia para operar a un valor de **5Ω**.
- ✓ Capacitores de **5μF, 10μF, 15μF.**
- ✓ Fusible de **9A.**
- ✓ Stop de Emergencia.
- ✓ Interruptor de conexión del módulo.

En la Imagen 5.31 se detallan los elementos eléctricos básicos utilizados en simulación, del cual se tomó como base para diseñar el modulo.



*Imagen 5.31 Componentes eléctricos utilizados para el diseño del módulo de prueba.*

## **PASO 2: TIPOS DE PRUEBA QUE SE PUEDEN REALIZAR.**

Partiendo del conocimiento básico del módulo en el apartado anterior, se detallan los tipos de prueba que se pueden realizar con el modulo, las cuales son:

- ✓ **Prueba de vacío.**
- ✓ **Prueba de cortocircuito.**
- ✓ **Obtención de curva de magnetización.**
- ✓ **Prueba de ferresonancia.**

Las pruebas mencionadas anteriormente son de mucha utilidad su conocimiento en la formación académica como estudiantes, ya que son básicas y son de mucha utilidad en el ámbito industrial.

## **PASO 3: ALIMENTACION DE VOLTAJE VARIABLE.**

El módulo de prueba no posee una fuente variable de tensión por lo que es necesario alimentarlo con una fuente variable externa, la cual realiza variaciones de voltaje en AC o DC, esta fuente trae sus propios medidores analógicos para realizar las mediciones y de esta forma obtener mejores resultados de análisis del fenómeno, los resultados obtenidos utilizando esta metodología de prueba se presentan en el **apartado 5.1**.



*Imagen 5.32 Bornera de conexión de entrada de fuente variable del módulo de prueba.*

En la Imagen 5.32, al módulo se le implemento una bornera de entrada donde se conectara la fuente variable de alimentación externa y contiene seguidamente las borneras de salida donde nosotros controlamos si pasa la alimentación o no, es decir es un método de seguridad aplicado al módulo por medio un interruptor manual.

#### **PASO 4: PROTECCIONES.**

El módulo posee ciertas protecciones de seguridad, a continuación se enumera cada una de las protecciones de las cuales dispone el módulo:

- ✓ **Interruptor de encendido y apagado** del módulo, para tener un mejor control del voltaje de alimentación del equipo.



*Imagen 5.33 Interruptor de encendido/apagado del módulo de prueba.*

- ✓ **Paro de emergencia**, este es una protección que nos permite por cualquier eventualidad en la cual sea necesario interrumpir la alimentación del módulo y poder hacerlo de una forma rápida y eficaz.



*Imagen 5.34 Paro de emergencia del módulo de prueba.*

- ✓ **Fusible de protección de 9A**, este se utiliza por cualquier situación en la cual se sobrepase el nivel de corriente de alimentación del transformador, ya que la corriente nominal del transformador es de este valor y de esta forma proteger adecuadamente el transformador del módulo.



*Imagen 5.35 Fusible de 9A para protección del módulo de prueba.*

- ✓ **Protección de tierra**, la carcasa del módulo está sólidamente aterrizado a tierra así como posee su respectivo borne de tierra, con la finalidad de seguridad de las personas que operen el modulo, así como para la correcta operación del módulo.



*Imagen 5.36 Borneras de conexión de tierra del módulo de prueba.*

### **PASO 5: CABLEADO DE CIRCUITOS A PROBAR.**

El cableado de los respectivos elementos a conectar se ha diseñado mediante borneras para poder hacerlo de una manera óptima y eficiente mediante conectores rápidos, y de esta forma realizar las respectivas pruebas en el menor tiempo posible obteniendo los resultados esperados, las conexiones internas de las borneras y equipo se realizaron siguiendo las respectivas normas de seguridad para que el modulo opere de una forma eficiente y segura.

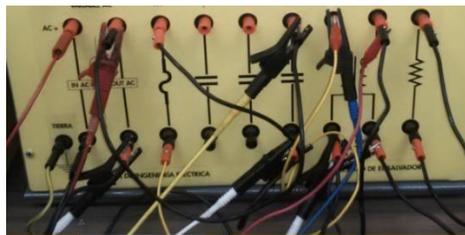


*Imagen 5.37 Borneras de conexión del módulo de prueba.*

En la Imagen 5.37, se puede observar que el modulo se ha diseñado de una manera práctica, para tener acceso a todos los elementos eléctricos para realizar cada una de las respectivas pruebas que se deseen hacer con el modulo.

### **PASO 6: CONEXIÓN DE MEDIDORES.**

El modulo está diseñado para realizar de una manera externa las conexiones de los medidores, en las cuales se pueden conectar la cantidad y tipo necesarios, según la prueba a realizar, es decir no tendríamos ninguna restricción de conexión de medidores. De esta forma se pueden medir los datos eléctricos que se crean convenientes.



*Imagen 5.38 Ejemplo de conexión de terminales de medidores al módulo de prueba.*

En la Imagen 5.38 se puede observar la forma de conectar las terminales de los medidores requeridos para una determinada prueba en el módulo.

## 5.5 CALCULO DE LONGITUD DE CABLE EQUIVALENTE CON LAS CAPACITANCIAS UTILIZADAS.

Se presentan los cálculos de las longitudes equivalentes a los valores de capacitancia utilizadas en el laboratorio, con la finalidad de comparar a que longitud equivale cada valor de capacitancias utilizadas para los circuitos LC no lineales implementados. Asumiendo que se utiliza un cable monopolar apantallado #750 AWG, según tabla A.2.1 de fabricante de cables monopolares, que se muestra en el apéndice 2, el valor de capacitancia es 0.937( $\mu\text{F}/\text{km}$ ). Realizando los cálculos para la capacitancia de  $6\mu\text{F}$ , se calcula la reactancia capacitiva para la cual se utilizar la ecuación siguiente que no relaciona la longitud del cable:

Utilizando la ecuación: 
$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi * 60 * 6 \times 10^{-6}} = 442.087$$

Después de utilizar la ecuación anterior ahora se utilizara la ecuación que involucra la longitud del cable de la cual se despeja L.

$$L = \frac{1}{2\pi f C X_c} = \frac{1}{2\pi * 60 * 0.937 * 10^{-6} * 442.087} = 6.4035 \text{ km.}$$

Siguiendo el mismo procedimiento para las demás capacitancias utilizadas para realizar las pruebas se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 5.13.

Valor de capacitancia utilizada en el laboratorio	Valor de Xc	Valor de Longitud.
6 $\mu\text{F}$	442.087	6.4035km
10 $\mu\text{F}$	265.258	10.6724km
<b>15<math>\mu\text{F}</math></b>	<b>176.839</b>	<b>16.0085km</b>

**Tabla 5.13 Equivalentes de Valores de capacitancias en longitud de cable de potencia.**

## **CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **6.0 CONCLUSIONES.**

Para que ocurra la ferresonancia es muy sencillo, basta tener una fase energizada (equivalente en capacitancia) en serie con la inductancia del devanado del transformador, formando una trayectoria LC.

Las topologías más peligrosas en un sistema trifásico en donde es factible que se pueda presentar el fenómeno de la ferresonancia son:

- ✓ Transformadores en conexión delta, con un conductor abierto.
- ✓ Transformadores en conexión delta, con dos conductores abiertos.
- ✓ Transformadores conectados en estrella, con una línea abierta.
- ✓ Transformadores conectados en estrella, con dos líneas abierta

Para que no ocurra el fenómeno de la ferresonancia es necesario tener en el control de las siguientes condiciones: longitudes máximas de los vanos, operaciones manuales de las protecciones en el transformador, aperturas o maniobras de protección, niveles de tensiones altos, transformadores alimentados sobre una o dos fases, entre otras condiciones que se deben controlar.

La ferresonancia puede provocar que las corrientes y las tensiones superen ampliamente las magnitudes de los aparatos conectados en el sistema de eléctrico de potencia causando daños que podrían ser permanentes, también produce ruido y calentamiento en el transformador, irregulares formas de ondas de tensión y corriente, daños en pararrayos y cables.

Para evitar el fenómeno de resonancia serie, al utilizar transformadores de potencial (TPs), es de no utilizar la conexión en delta abierta, debido a que es factible la aparición de sobrevoltajes, este es un problema común en los sistemas eléctricos industriales utilizados para la medición y protección en los tableros de distribución.

Recientes investigaciones han dado a conocer que la longitud critica del cable está directamente relacionada con las perdidas en vacío de los transformadores, por lo tanto, debido a que los transformadores fabricados en la actualidad presentan niveles de pérdidas más bajos que los transformadores fabricados en años atrás, las longitudes críticas del cable para los transformadores modernos son menores que las calculadas para los transformadores de aquel entonces, esto significa que en los transformadores modernos pueden ocurrir sobretensiones por ferresonancia en circuitos con longitudes de cables asumidas como seguras para los viejos transformadores.

En la aparición de un transitorio o una perturbación en el sistema, que puede ser causada por la utilización de dispositivos de interrupción monoplares (apertura o cierre de un interruptor), o por la operación de protecciones como fusibles, permitiendo la energización o desenergización de una o dos fases, con lo cual la reactancia capacitiva queda conectada en serie con la reactancia inductiva del transformador formando el circuito ferresonante LC.

El análisis de la ferresonancia es difícil, debido a que no ocurre de una forma predecible. Un análisis matemático del problema total se hace muy engorroso, y poco práctico, sin embargo el fenómeno básico y la relevancia de los parámetros involucrados pueden obtenerse del análisis de circuitos simplificados, e incluso a través del uso de métodos gráficos.

Las restricciones en el diseño y los métodos de operación para evitar la ferresonancia, a menudo pueden resultar imprácticos y en ocasiones extremadamente costosos. Por esta razón es necesario examinar más de cerca el grado en que los componentes del sistema pueden tolerar la ferresonancia.

#### **De las pruebas de laboratorio:**

Las sobretensiones en los bornes del transformador llegaron a tomar valores muy peligrosos, tomando valores de un pico de 2.31 veces la tensión de la fuente, las sobretensiones obtenidas en los bornes de los capacitores fueron de hasta 2.28 veces la tensión de la fuente. Todo esto, aun tratándose de un sistema controlado donde solamente se procuró obtener la condición resonante.

Está claro que al presentarse la condición de ferresonancia, las sobretensiones son aún mayores debido a la depresión de la impedancia en el transformador, producto de la saturación del núcleo ferromagnético.

Se pudo comprobar que con valores muy pequeños de capacitancias, en el orden de los microfaradios, cualquier equipo de la industria puede entrar en la condición resonante ó ferresonante. Además es importante notar que si el valor de la capacitancia es apropiado y las tensiones son muy altas (tensiones nominales de operación) las sobretensiones en transformadores pueden llegar a sobrepasar el codo de saturación de los equipos, provocando al mismo tiempo sobrecorriente que ponen en riesgo no solo al sistema, sino también a las personas que están operando el sistema, al darse el caso que las protecciones no actúen adecuadamente.

## **6.1 RECOMENDACIONES.**

El riesgo de la ferresonancia se puede contrarrestar si se tiene presente su posibilidad de aparición, por lo que debe ser un factor importante al tomar en cuenta en el diseño de un sistema de redes eléctricas. Conociendo los procedimientos recomendados para evitar y utilizar los equipos adecuados para reducir al mínimo las consecuencias de que suceda el fenómeno.

Se tendrán que evitarlas configuraciones propensas a la ferresonancia, las cuales pueden presentarse por mal diseño o por las maniobras inapropiadas del sistema eléctrico. Esto conlleva a ciertas maniobras en las redes y la eliminación de ciertos esquemas de aplicación que puedan ser dañinos al sistema. Es necesario que los valores de los parámetros de la red no se encuentren (aunque sólo sea temporalmente) en la zona de riesgo y, si es posible, aplicar un margen de seguridad respecto a ésta u otras zonas de riesgo.

En el caso de la alimentación de un transformador conectado a una red capacitiva, en la que se pueda presentar el fenómeno, una alternativa para solucionarlo es evitar las configuraciones arriesgadas donde la potencia activa sea inferior al 10% de la potencia nominal del transformador. Este riesgo podría suceder durante los periodos de poca carga. Es importante tomar en cuenta que los transformadores fabricados actualmente son más eficientes, es decir que las pérdidas son muy bajas, lo que hace al circuito más susceptible a la aparición de fenómenos ferresonantes.

Para resolver el problema del TPs de resonancia serie que pueda ocasionar la conexión delta abierta, el devanado primario de un conjunto de transformadores de potencial se pueden conectar en estrella aterrizada, limitando de esta manera la posibilidad de que se presente el fenómeno de resonancia serie, debido a que solo se tendría la capacitancia parasita del transformador.

Si ya ha aparecido el problema de daños por ferresonancia en un sistema eléctrico, la solución a implementar es la de cambiar la capacitancia del cable mediante la colocación de tablillas derivadoras en el cable de acometida, el cable se corta para realizar este arreglo, la capacitancia a tierra del mismo resulta afectada eliminando el riesgo por ferresonancia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- ✓ Vembu Gourishankar, D.R., Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A., Conversión de Energía Electromecánica, México, 1975.
- ✓ Dugan, Santoso, McGranaghan, Beaty. Electrical Power Systems Quality, Second Edition. McGraw-Hill – Professional Engineering 2004.
- ✓ John Horak (Basler Electric Company). A Review of Ferroresonance, IEEE.
- ✓ Fitzgerald, A. E. y otros. Máquinas eléctricas. 5a. ed. México: Editorial McGraw-Hill Interamericana de México, S.A. de C.V., 1999. 653 pp.
- ✓ Ferracci, P. (2000). La Ferroresonancia. Cuaderno Técnico, N° 190. Barcelona, España: Schneider.
- ✓ Siegert C., L.A. (1988). Alta Tensión Y sistemas de Transmisión. Ciudad de México: Limusa.
- ✓ IEC 71 1994. Coordinación del aislamiento.
- ✓ López L. Rubén y Dávila S. Simón, “Tesis: Análisis de Sobretensiones generadas por Maniobra de Transformadores de Potencia”. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Abril 1991.
- ✓ Marco Fabio Gudiel Sandoval, “Tesis: Análisis de ferorresonancia en transformadores de distribución alimentados con cable monopolar apantallado”. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Octubre de 2004.
- ✓ Amílcar Jhoel Aponte Jiménez, “Tesis: Diseño y construcción de circuitos ferroresonantes, circuitos para medición de puestas a tierra”. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, abril de 2003.
- ✓ Edison Gustavo Morales López, “Tesis: Análisis de Ferroresonancia en Sistemas de Distribución”. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Diciembre de 1987.
- ✓ ANSI/IEEE, IEEE Guide for Application of Transformers Connections in Three Phase Distribution Systems: Ferro-resonance. P22-23 ANSAI/IEEE Norma: C57.105-1978-R1999

## ANEXOS.

### GLOSARIO:

#### **Permeabilidad Magnética**

Es la capacidad de un medio para atraer y hacer pasar a través de sí los campos magnéticos y está definida por la relación entre la intensidad del campo magnético existente y la inducción magnética que aparece en el interior de dicho material.

#### **Inducción Magnética**

Se le denomina también como densidad de flujo magnético, también se le conoce con el nombre de intensidad de campo magnético, ya que es el campo real. Y se representa por el símbolo **B**, se define como el flujo magnético por unidad de área de una sección normal a la dirección del flujo,

#### **Tensión**

Se le conoce comúnmente como voltaje o diferencia de potencial, es una magnitud física que impulsa a los electrones a lo largo de un conductor en un circuito eléctrico cerrado, lo cual provoca el flujo de una corriente eléctrica. La unidad de medida es el voltio **V**.

#### **Corriente Eléctrica**

Se le conoce también como intensidad eléctrica, se define en el sentido contrario al desplazamiento de los electrones. Es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material. Se debe a un movimiento de los electrones en el interior del material. En el Sistema Internacional de Unidades se expresa en C·s<sup>-1</sup> (culombios sobre segundo), la unidad de medida se denomina amperio.

#### **Inductancia**

A la relación entre el flujo magnético y la intensidad de corriente eléctrica se le denomina inductancia **L**. Si el flujo se expresa en weber y la intensidad en amperios, la inductancia está dada en Henrios **H**.

#### **Capacitor**

Se le conoce como un componente pasivo, que es capaz de almacenar energía eléctrica. Está formado por un par de superficies conductoras en situación de influencia total, generalmente en forma de tablas, esferas o láminas, separados por un material dieléctrico o por el vacío, el cual actúa como aislante, que sometidos a una diferencia de potencial adquieren una determinada carga eléctrica, positiva en una de las placas y negativa en la otra, de lo cual se deduce que la carga total almacenada. La unidad de medida es el Faradio (F), siendo 1 faradio la capacidad de un condensador en el que, sometidas sus armaduras a una d.d.p. de 1 voltio, estas adquieren una carga eléctrica de 1 culombio.

### **Magnetostricción**

Es una propiedad de los materiales magnéticos que hace que estos cambien de forma al encontrarse en presencia de un campo magnético. Este fenómeno es parte de la causa de que se encuentren vibraciones de 100 Hz o 120 Hz en máquinas eléctricas como motores y transformadores.

### **Pararrayos**

Son elementos de protección contra las sobretensiones, se encuentran conectadas permanentemente en el sistema y operan cuando se presenta una sobretensión de determinada magnitud, descargando la corriente a tierra.

### **Contorneo Inverso**

Cuando un rayo impacta en el cable de guarda o en una torre de una línea, el cable de guarda asume un potencial elevado pudiendo considerarse que los conductores se encuentran conectados a tierra, las cadenas de aisladores pueden no soportar esta tensión y se produce una descarga que se conoce con este nombre, pensando que es una descarga que va en sentido contrario a lo que se consideraría normalmente.

### **Corriente de contorneo**

Es la corriente que circula por la superficie de un material aislante, el camino o circuito para dicha corriente lo forman las partículas de suciedad conductora. Debido a estas corrientes el material aislante se puede carbonizar se pueden formar también cavidades de forma acanalada, llamadas fisuras de contorneo

### **MCOV**

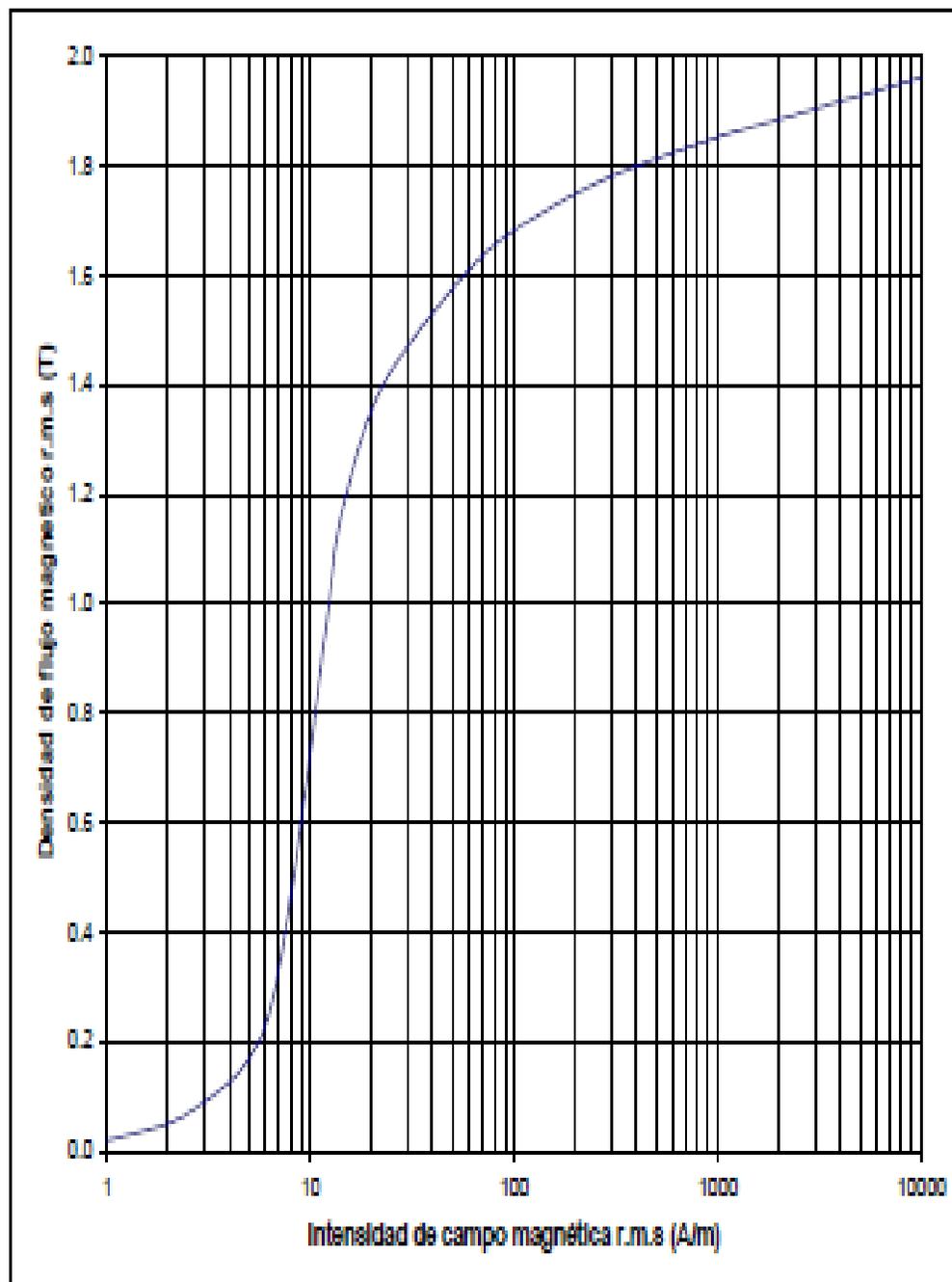
Máxima tensión de operación continua de un pararrayo.

### **Tablillas Derivadoras.**

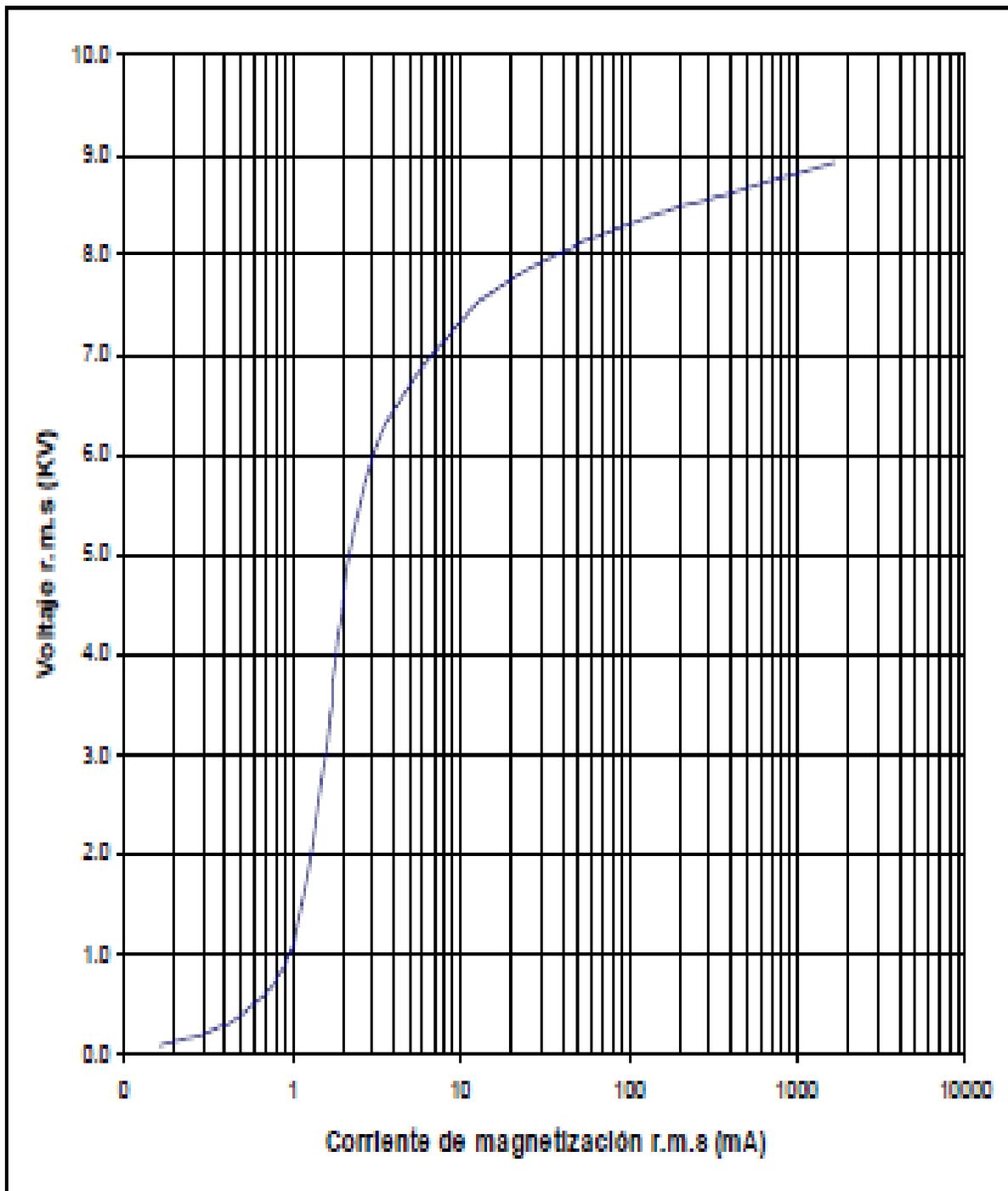
Se utiliza para cambiar la capacitancia del cable, se instalan en algún registro del cable de acometida. Como el cable se corta para este arreglo, la capacitancia a tierra del mismo resulta afectada eliminando el riesgo de resonancia.

## APENDICE 1

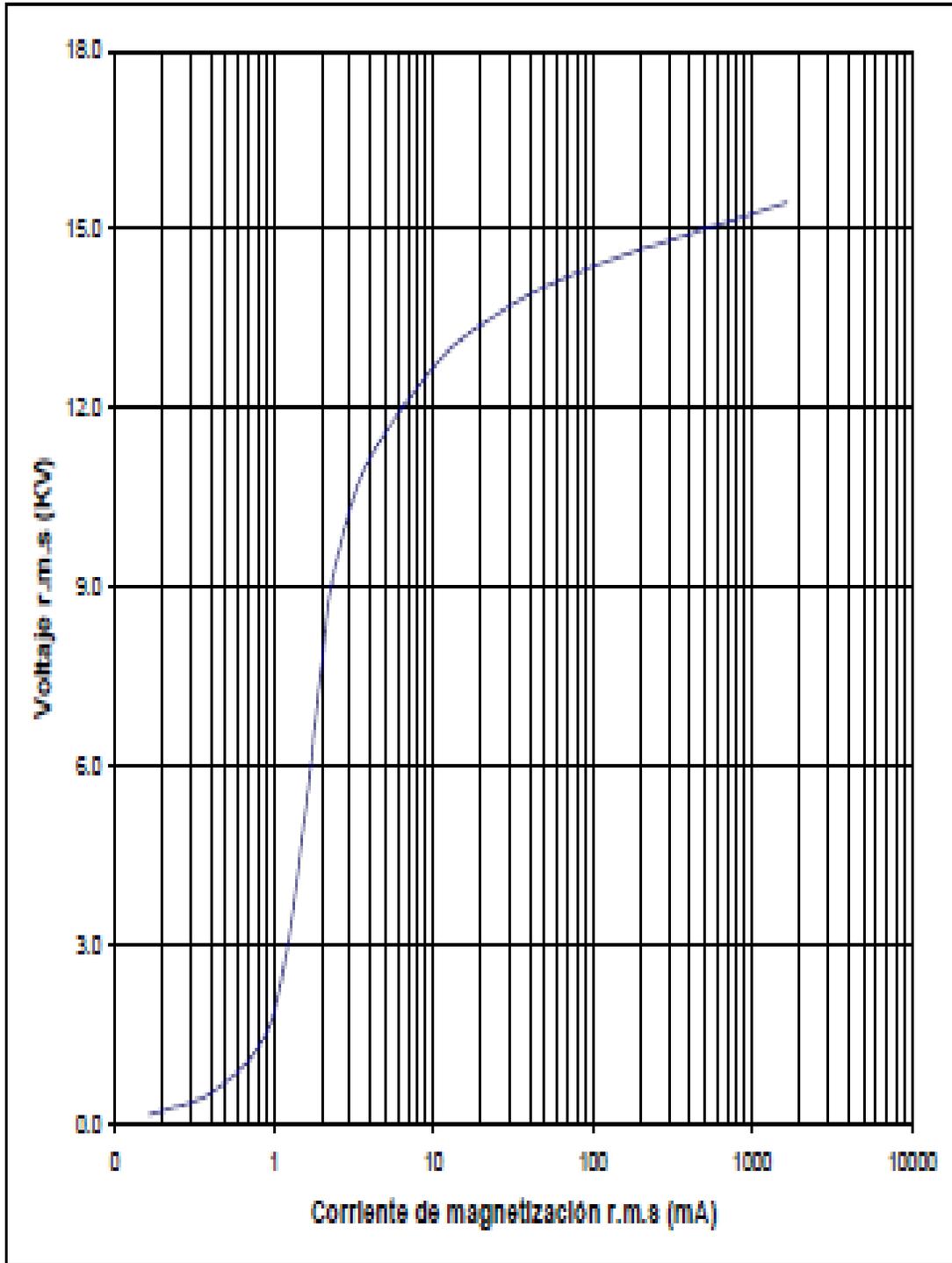
### A1.0 CURVAS DE MAGNETIZACIÓN TÍPICAS.



*A 1.1 Curva de magnetización B-H típica, para núcleos de transformadores de distribución*



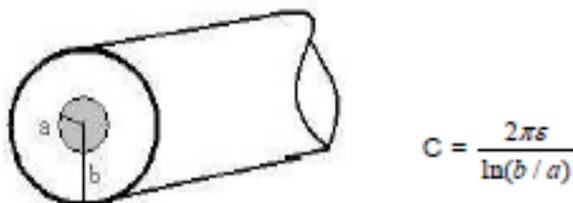
*Imagen A1.2. Curva de magnetización V-I típica para devanados de 7.6 KV, en transformadores de distribución.*



*Imagen A1.3. Curva de magnetización V-I típica para devanados de 13.2 KV, en transformadores de distribución.*

## APENDICE 2

### A2.0 CÁLCULO DE CAPACITANCIAS Y RESISTENCIAS PARA CABLES MONOPOLARES APANTALLADOS CON AISLAMIENTO XLPE.



*Imagen A2.1. Representación general de un conductor cilíndrico.*

La permitividad relativa del XLPE es 2.28.

CABLE SUBTERRANEO DE DISTRIBUCION -15KV- TIPO URD						
AWG Ó KCMIL	No. De conductores	a (Pulg.)	b (Pulg.)	Permitividad en vacío	Permitividad relativa	Capacitancia (μF/Km)
175 mils de aislamiento nominal XLPE – 100% de nivel de aislamiento						
<b>2</b>	1	0.479	0.654	8.850E-12	2.28	0.407
<b>2</b>	7	0.504	0.679	8.850E-12	2.28	0.425
<b>1</b>	1	0.510	0.685	8.850E-12	2.28	0.429
<b>1</b>	19	0.543	0.718	8.850E-12	2.28	0.453
<b>1/0</b>	1	0.546	0.721	8.850E-12	2.28	0.456
<b>1/0</b>	19	0.583	0.758	8.850E-12	2.28	0.483
<b>2/0</b>	19	0.627	0.802	8.850E-12	2.28	0.515
<b>3/0</b>	19	0.677	0.852	8.850E-12	2.28	0.551
<b>4/0</b>	19	0.733	0.908	8.850E-12	2.28	0.592
<b>250</b>	37	0.791	0.966	8.850E-12	2.28	0.634
<b>350</b>	37	0.894	1.069	8.854E-12	2.28	0.709
<b>500</b>	37	1.022	1.197	8.854E-12	2.28	0.801
<b>750</b>	61	1.209	1.384	8.854E-12	2.28	0.937
<b>1000</b>	61	1.358	1.533	8.854E-12	2.28	1.045

*Tabla A2.1. Parámetros para cálculo de capacitancias en conductores subterráneos.*

DATOS DEL TRANSFORMADOR			LONGITUD DEL RAMAL PRIMARIO [m]	
KV.	KVA	lexc%	CABLE	AEREO
<b>13.8</b>	160	1.0	2.6	90
	200	1.0	3.2	112
	250	1.0	4.0	140
	300	1.0	4.8	168
	500	1.0	8.0	280
	750	1.0	12.0	420
	1,000	1.0	16.0	560
	1,500	1.0	24.0	840
	2,000	1.0	32.0	1,121
5,000	1.0	88.1	2,800	
<b>22.8</b>	160	1.0	0.9	33
	200	1.0	1.2	41
	250	1.0	1.5	51
	300	1.0	1.8	63
	500	1.0	2.9	102
	750	1.0	4.4	154
	1,000	1.0	5.9	205
	1,500	1.0	8.8	308
	2,000	1.0	11.7	4,011
5,000	1.0	29.3	1,056	
<b>34.5</b>	300	1.0	0.8	27
	500	1.0	1.3	45
	750	1.0	1.9	67
	1,000	1.0	2.6	90
	1,500	1.0	3.8	134
	2,000	1.0	5.1	179
	5,000	1.0	12.8	450
	10,000	1.0	25.6	895

*Tabla A.2.2. Longitud permitida de ramal primario para transformadores delta - estrella aterrizada.*

DATOS DEL TRANSFORMADOR			LONGITUD DEL RAMAL PRIMARIO [m]	
KV.	KVA	lexc%	CABLE PROETEGIDO	LINEA AEREA
<b>13.8</b>	160	1.0	3.4	120
	200	1.0	4.3	150
	250	1.0	5.3	188
	300	1.0	6.4	225
	500	1.0	10.7	375
	750	1.0	16.0	563
	1,000	1.0	21.3	751
	1,500	1.0	32.0	1,126
	2,000	1.0	42.7	1,502
	5,000	1.0	106.7	3,750
<b>22.8</b>	160	1.0	1.3	44
	200	1.0	1.6	55
	250	1.0	2.0	69
	300	1.0	2.4	83
	500	1.0	3.9	138
	750	1.0	5.9	206
	1,000	1.0	7.8	275
	1,500	1.0	11.7	412
	2,000	1.0	15.6	550
	5,000	1.0	39.3	1,375
<b>34.5</b>	300	1.0	1.0	36
	500	1.0	1.7	60
	750	1.0	2.6	90
	1,000	1.0	3.4	120
	1,500	1.0	5.1	180
	2,000	1.0	6.8	240
	5,000	1.0	17.0	600
	10,000	1.0	34.2	1,200

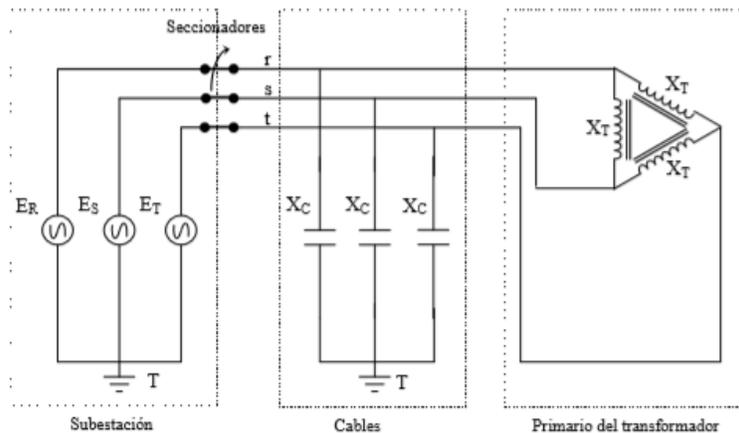
*Tabla A.2.3. Longitud permitida de ramal primario para transformadores estrella-delta.*

## EJEMPLOS.

### A 2.1 ANÁLISIS DE UN CIRCUITO SUSCEPTIBLE A FERRORESONANCIA.

Línea trifásica subterránea 13.8 kV, con transformador en delta-estrella aterrizado, con las siguientes características: Transformadores trifásico de 500 kVA, 13,800/120 V,  $I_0=0.5\%$ . Transformador sin carga apreciable durante periodos nocturnos. Cable monopolar # 2/0 AWG por fase, aislamiento EPR 133% neutro aislado. Longitud del banco es de 800 metros. fusibles seccionadores.

En la Imagen A.2.2, aparece esquematizado el sistema en estudio. La  $X_c$  representa la reactancia capacitiva por fase respecto a tierra para los cables. La  $X_T$  es el valor de la reactancia inductiva de cada fase del transformador en vacío. Este tipo de sistema es más susceptible a ferroresonancia si se abre una fase en lugar de dos fases.



*Imagen A.2.2. Esquema de un sistema eléctrico para estudio de ferroresonancia.*

Para indagar si en el sistema en cuestión se puede presentar ferroresonancia, deben cumplirse las condiciones básicas:

- 1) Conexión serie entre líneas de conductores (capacitancia equivalente) y transformadores (inductancia no lineal).
- 2) Si la red tiene neutro aislado (transformador en  $\Delta$ ), y actúan las protecciones en una fase del transformador o la subestación eléctrica.
- 3) Si se ocuparan transformadores en vacío.

El sistema presenta las condiciones necesarias para que entre en ferresonancia, basado en un análisis gráfico puede se determina si es posible que ocurra el fenómeno. Utilizando la ecuación  $V_L=E+V_C$ , corresponde a una recta con pendiente  $1/W_C$ , que corta el eje Y en el punto E. La relación entre la tensión y la corriente del transformador está dada la curva de magnetización, entonces el punto de operación corresponderá a su intersección con la recta anterior.

Como primer paso es graficar las dos funciones siguientes:

1.  $V_L = E + V_C$ , representa la ecuación malla del circuito en estudio.
2.  $V_L = f(I)$ , representa la curva de magnetización del transformador.

Para el cálculo de la reactancia capacitiva  $X_C$  se utiliza la ecuación siguiente:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fCL} \quad (A2.1)$$

Con los datos de fábrica se encuentra la capacitancia C:

$$C = \frac{K10^{-9}}{18G} = 2.306 \times 10^{-10} \text{ F/m} \quad (A2.2)$$

Dónde:

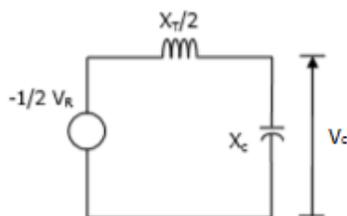
$$G=0.782510861$$

$$K=2.5$$

De la ecuación A2.1 se calcula la reactancia capacitiva:

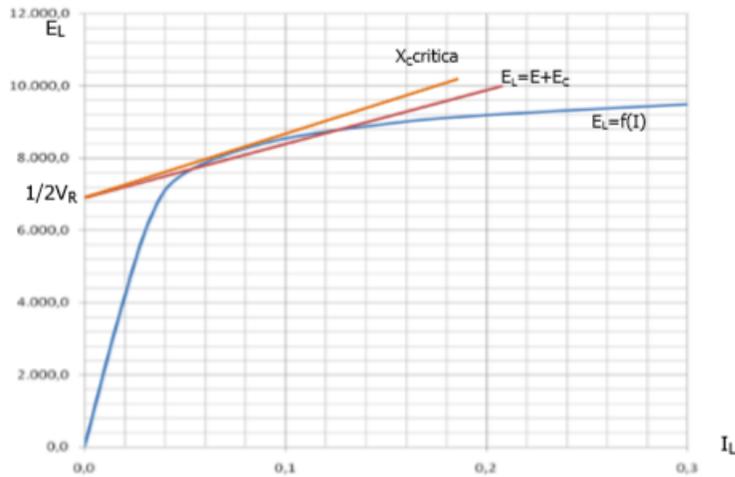
$$X_c = \frac{1}{2\pi fCL} = 14386.94\Omega$$

El circuito equivalente se muestra en la Imagen A.2.2 que se muestra a continuación:



**Imagen A.2.3. Circuito simplificado de un sistema eléctrico para estudio de ferresonancia.**

El paso siguiente consiste en trazar una curva  $V_L = f(I)$ , tomamos como inicio el punto  $\frac{1}{2} V_R$  sobre el eje de las ordenadas para trazar la recta con pendiente  $X_C$ , se deduce del circuito simplificado de la Imagen A2.3, y se puede observar en la Imagen A2.4.



**Imagen A.2.4. Representación gráfica del sistema en estudio.**

En la Imagen A2.4 se puede observar la característica  $V_L = f(I)$ , se tiene una aproximación de la curva de excitación típica para este tipo de transformador. La recta  $V_L = E + V_C$  de pendiente  $X_C$  es menor que  $X_{Ccritica}$ , la cual también es trazada su pendiente desde  $1/2 V_R$  hasta un punto tangente a la curva de excitación. Entonces tenemos que:

$$X_C \leq X_{Ccritica} \quad \rightarrow \rightarrow \rightarrow \text{el sistema es ferroresonante (A.2.3)}$$

El valor de la pendiente crítica ( $X_{Ccritica}$ ) no debería ser un punto de partida para diseñar nuevas redes ya que se recomienda dejar un margen de seguridad.

Suponiendo que la recta  $V_L = E + V_C$  no cortase a la curva de excitación, o lo que es lo mismo  $X_C > X_{Ccritica}$ , el sistema no sería ferroresonante, pero si se podrían presentar sobretensiones y otros problemas como inversión de fases debido a que el transformador podría pasar a un punto de operación ubicado en el tercer cuadrante de la curva de excitación muy por encima del codo de saturación, debido a la apertura de una ó dos fases de la red. Se recomienda

realizar un análisis lineal para limitar estas sobretensiones, como se denota en la siguiente expresión:

$$\frac{V_a}{V_R} = \left[ \frac{\frac{X_{CO}}{X_T}}{1 - 2 \frac{X_{CO}}{X_T}} \right] \quad (A.2.4)$$

Suponiendo una sobretensión máxima del 25% se hace lo siguiente:

$$\frac{V_a}{V_R} = 1.25 \quad \text{Dónde:} \quad k = \frac{X_{CO}}{X_T}$$

$$\left[ \frac{K}{1-2K} \right] = \pm 1.25 \quad (A.2.5)$$

Dónde:  $K_1=0.3571$  y  $K_2=0.8333$

Tomando en cuenta la ecuación A2.5 que  $(1-2K)=0$ , se tiene que  $V_a \rightarrow \infty$ . Despejando  $K_3=0.5$ . El valor mínimo de K será el mayor  $K_2=0.8333 \approx 1$ .

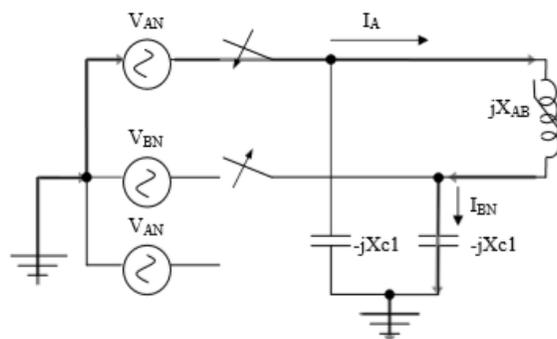
Para el cálculo de la longitud crítica del cable, con un valor de K mínimo = 1 (para sobretensiones no mayores del 25% por encima de la nominal) tenemos la siguiente expresión

$$l_{max} = \frac{I_o \% * (KVA)}{10^5 K 2 \pi f C (KV^2)} = 152 \text{ m} \quad (A.2.6)$$

El circuito en estudio, tiene un cable con una longitud de 800 m, por lo que no cumple con el criterio de  $l_{max}$  calculado, es decir el circuito está bajo condiciones de ferresonancia.

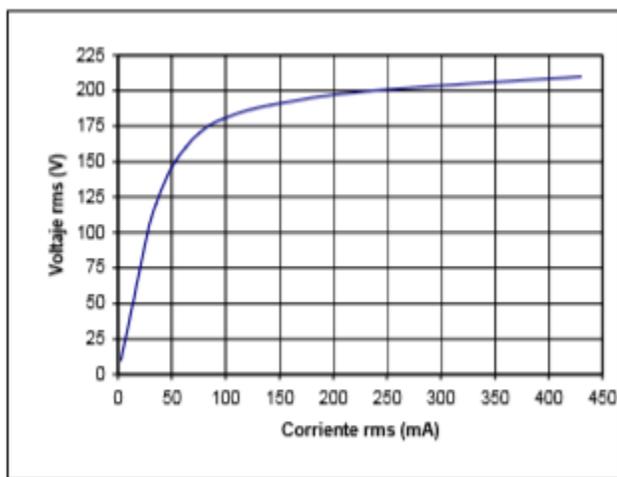
### Ejemplo de cálculo monofásico.

Un transformador monofásico, con valores nominales 120/120 V, está alimentado a un voltaje de 120V, por medio de cables de alta capacitancia, como se muestra en la Imagen A.2.5.



*Imagen A.2.5. Circuito monofásico del sistema en estudio.*

La curva de magnetización del transformador es la que se muestra en la Imagen A.2.6



*Imagen A.2.6. Curva de magnetización del transformador en estudio.*

Determinar gráficamente el comportamiento del voltaje de línea abierta, en función de la relación  $X_{c1}/X_m$ , asumiendo que la fase B está abierta.

**Solución.**

Antes de iniciar el procedimiento antes descrito, es necesario determinar la reactancia nominal de magnetización  $X_m$ , con base en la curva de magnetización del transformador.

$$X_m = \frac{V_{nom}}{I_o} = \frac{120\text{ V}}{0.034\text{ A}} = 3,530\Omega \quad (\text{A2.7})$$

El voltaje, al cual está alimentado el circuito, debido a la situación de línea abierta, es

$$V_{AN} = \frac{120}{\sqrt{3}} = 69.28 \cong 70\text{V}$$

**Paso 1.**

Suponer que el voltaje  $V_{XA} = -210\text{ V}$ .

**Paso 2.**

Con base en la curva de magnetización del transformador, corresponde una corriente igual a **-0.430 A**, la cual será la corriente del sistema para este punto.

**Paso 3.**

Se encuentra el valor de  $V_{BN}$ , de la siguiente forma:

$$V_{BN} = 70 - (-210) = 280\text{ V}$$

**Paso 4.**

Se encuentra el valor de la reactancia  $X_{c1}$ :

$$X_{c1} = -280/(-0.430) = \mathbf{651 \Omega}$$

**Paso 5.**

Determinar la relación  $X_{c1}/X_m$ :

$$X_{c1}/X_m = 651 / 3,530 = \mathbf{0.18}$$

**Paso 6.**

Utilizando  $70 \text{ V} = V_{AN}$  como voltaje base, se puede transformar el voltaje de línea abierta en valores por unidad.

$$V_{BN (pu)} = 280/70 = \mathbf{4.0}$$

**Paso 7.**

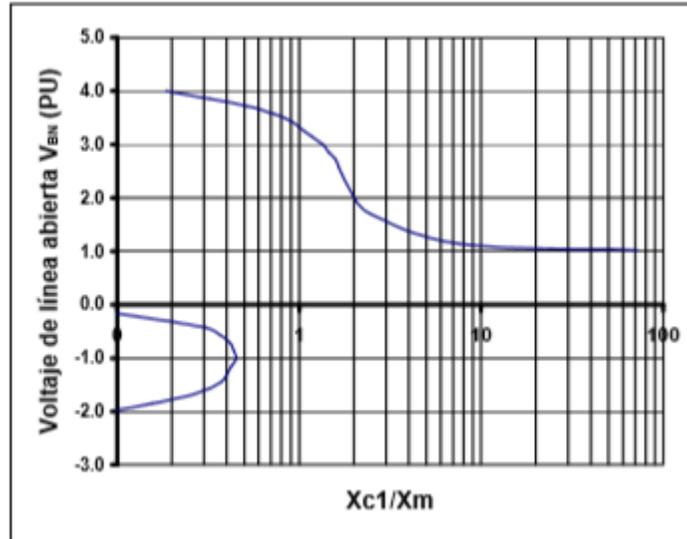
Para dar continuación a este paso, se elaboró la tabla A.2.4, en donde se muestran los resultados de haber realizado este procedimiento varias veces.

Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5	Paso 6
$V_{AB}$ (V)	I (A)	$V_{BN}$ (V)	$X_{C1}$ ( $\Omega$ )	$X_{C1}/X_m$	$V_{BN}/V_{aN}$
-210	-0.430	280	651	0.18	4.0
-190	-0.142	260	1831	0.52	3.7
-170	-0.075	240	3200	0.91	3.4
-150	-0.053	220	4151	1.18	3.1
-130	-0.039	200	5128	1.45	2.9
-100	-0.028	170	6071	1.72	2.4
-75	-0.021	145	6905	1.96	2.1
-50	-0.014	120	8571	2.43	1.7
-10	-0.003	80	26667	7.55	1.1
-1	0.000	71	255600	72.41	1.0
1	0.000	69	-248400	N.E.	N.E.
10	0.003	60	-21600	N.E.	N.E.
50	0.014	20	.1440	N.E.	N.E.
75	0.021	-5	240	0.07	-0.1
100	0.028	-30	1080	0.31	-0.4
130	0.039	-60	1538	0.44	-0.9
150	0.053	-80	1509	0.43	-1.1
170	0.075	-100	1333	0.38	-1.4
190	0.142	-120	845	0.24	-1.7
210	0.430	-140	326	0.09	-2.0

**Tabla A.2.4. Resultados para el ejemplo**

Antes de continuar con el paso de graficar los puntos obtenidos, es conveniente observar que para ciertos valores asumidos de voltaje, en la reactancia del transformador, se obtienen valores negativos de  $X_{C1}$ , lo que indica que son puntos en la gráfica que no pueden existir (N.E).

Comportamiento del voltaje de línea abierta respecto a la relación  $X_{C1}/X_m$  para el ejemplo.



**Imagen A.2.7. Comportamiento del voltaje de línea abierta respecto a la relación  $X_{c1}/X_m$  del sistema en estudio.**

En la gráfica de la Imagen A.2.7, se presenta el comportamiento del voltaje de línea abierta ( $V_{BN}$ ), en función de la relación  $X_{c1}/X_m$ , en donde la relación de reactancias opera bajo tres valores del voltaje de línea abierta, que son los puntos de operación en los circuitos LC serie no lineales. De la gráfica se obtiene el valor crítico de capacitancia:

$$X_{c1 (CRITICA)} = 0.45;$$

$$X_m = (0.45) (3,530) = \mathbf{1,588.5 \Omega}$$

Cuya capacitancia correspondiente es:

$$C_{1 (CRITICA)} = C_{1 (MINIMA)} = 1/[(2\pi)(f)(X_{c1(CRITICA)})]$$

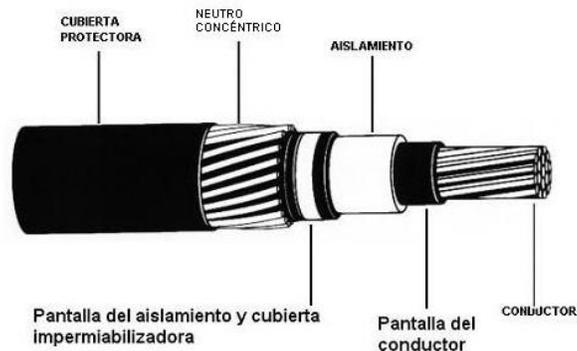
$$C_{1 (CRITICA)} = 1/[(2\pi)(60)(1,588.5)] = \mathbf{1.67 \mu F}$$

Se observa que conforme la relación de reactancias  $X_{c1}/X_m$  disminuye, la capacitancia  $C_1$  aumenta y el voltaje de línea abierta aumenta en magnitud en la parte positiva, correspondiente al punto de operación en ferresonancia. Este aumento de capacitancia está asociado con incrementos en la longitud de los cables de alimentación, por lo que desde ahora se concluye que el efecto es más destructivo, serán para largas longitudes de cables.

## APENDICE 3

### A3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS CABLES MONOPOLARES.

En la Imagen A.3.1, se muestra la constitución típica de un cable de potencia (monopolar apantallado), en el que se indican sus componentes principales.



*Imagen A.3.1. Vista Transversal de un conductor para media tensión.*

#### A3.1.1 El Conductor

El conductor es el encargado de llevar la alimentación al elemento de consumo o en nuestro caso a los transformadores. El material de los conductores regularmente es de cobre electrolítico recocido o aluminio para uso eléctrico.

#### A.3.1.2 Pantallas Del Conductor (Semiconductoras)

Proporcionan una superficie equipotencial que funciona como transición entre un material puramente conductor a otro puramente aislante. El uso de materiales semiconductores se debe a que en esta forma se reduce la intensidad de las cargas eléctricas.

#### A.3.1.3 Aislamiento Primario

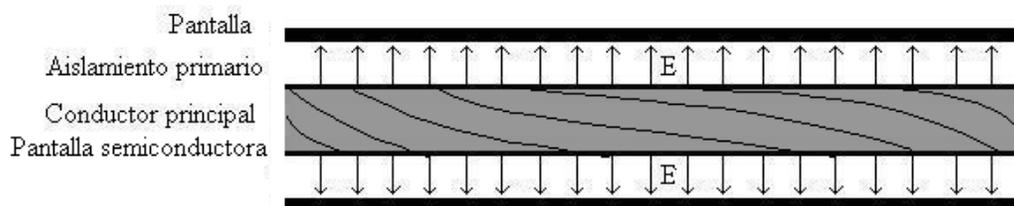
Esta proporciona el aislamiento entre el potencial del conductor y la pantalla de conductores que esta referenciado a tierra. Los aislamientos permitidos para tensiones mayores de 600 V son sintéticos termoestables XLPE o EPR.

#### A.3.1.4 Pantalla Metálica

Está constituida por conductores de cobre o aluminio enrollados sobre la pantalla semiconductor externa; tiene por objeto principal crear una superficie equipotencial para obtener un campo eléctrico radial en el dieléctrico. Asimismo sirve para blindar el cable contra potenciales inducidos por campos eléctricos externos y como protección personal, mediante su conexión efectiva a tierra.

#### A.3.1.5 Campo eléctrico de los cables subterráneos monopoles

El campo eléctrico en un conductor monopolar apantallado posee líneas de flujo eléctrico que en un instante tienen su origen en las cargas positivas del conductor principal y terminan en las cargas negativas de la pantalla. Este campo eléctrico es de forma radial y uniforme.

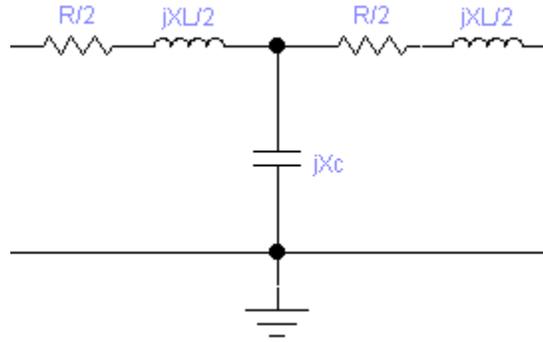


*Imagen A.3.2. Campo eléctrico en un cable de potencia.*

Es importante notar la pequeña distancia que hay de separación entre las dos etapas de conductores (conductor principal y apantallamiento), por lo cual este aislamiento no debe sufrir ningún tipo de daño que cause su deterioro y que pueda provocar algún cortocircuito. Además, con esta mínima distancia hace que se den esfuerzos eléctricos muy grandes en las terminaciones de los cables.

#### A.3.1.6 Reactancias del cable y circuito equivalente

El cable monopolar apantallado, posee tres parámetros que afectan su capacidad: resistencia, inductancia y capacitancia. La resistencia y la inductancia están distribuidas a lo largo del cable y constituyen la impedancia serie. La capacitancia se presenta entre el conductor principal y la pantalla, esto constituye la admitancia en paralelo. Estos parámetros están parcialmente distribuidos en el circuito equivalente y se concentran por medio de circuitos equivalentes que describen el comportamiento. Por esto se toma como referencia el circuito T, que se muestran a continuación:



**Imagen A.3.3. Circuito equivalente para un cable de potencia.**

Para los sistemas de distribución subterráneos, las longitudes de los cables tienden a ser relativamente pequeñas comparadas con la distribución aérea, por esta razón la resistencia y reactancia inductiva serie de este tipo de sistemas es poco significativa. Pero al contrario, la capacitancia paralelo es apreciable aun a longitudes no muy grandes debido a la configuración del cable y esta se vuelve más significativa, aun con poco aumento en la longitud.

### **A.3.1.7 Determinación de la capacitancia del cable**

En los conductores de alimentación subterráneos, el medio del dieléctrico es el aislamiento primario de los cables de potencia. Esta capacitancia es proporcional a la carga de los conductores, el cual se compara con el voltaje entre los conductores. Esta relación puede expresarse por la ecuación:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (A3.1)$$

Dónde:

- C:** es la capacitancia en Faradios,
- Q:** es la carga en culombios, y
- V:** es el voltaje entre los conductores.

Se relaciona el voltaje entre los dos conductores al campo eléctrico en el medio del dieléctrico:

$$V = \int E dl \quad (A3.2)$$

Donde  $\mathbf{E}$  es la intensidad del campo eléctrico y  $d\mathbf{l}$  la distancia incremental, que está entre los conductores. La intensidad del campo eléctrico, en cualquier punto en el espacio, es dependiente de la magnitud de la carga que produce el campo, la distancia de la carga al punto de observación, y la permitividad del medio en que el campo se propaga.

La ecuación anterior esta especificada para la capacitancia de un conductor cilíndrico a una referencia plana a tierra que lo rodea:

$$C = 2\pi \frac{\epsilon}{\ln \frac{b}{a}} \quad (\text{A3.3})$$

Dónde:

**C:** es la capacitancia del cable en F/m

**$\epsilon$ :** es la permitividad del aislamiento,

**a:** es el radio del conductor, y

**b:** es la distancia del centro del conductor al apantallamiento del cable.

La capacitancia que se presenta entre el conductor principal y la pantalla se define como su carga por unidad de diferencia de potencial entre ellos y es función de la longitud, debido a que la capacitancia del cable se comporta como capacitancias distribuidas en paralelo.

### A.3.1.8 Inductancia y reactancia inductiva

La inductancia es la propiedad de un circuito que relaciona la fmm inducida por la velocidad de variación de flujo con la velocidad de variación de la corriente:

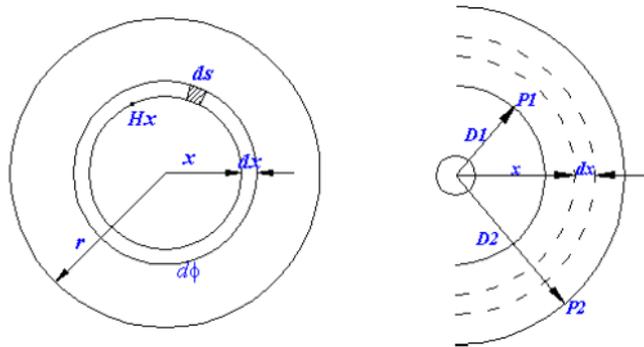
$$L = \frac{d\delta}{dt} H \quad (\text{A3.4})$$

Si el número de enlaces de flujo varía linealmente con la corriente se tendrá:

$$L = \frac{\delta}{i} \quad (\text{A3.5})$$

La inductancia de un conductor de un circuito es igual al número de enlaces de flujo del conductor por unidad de corriente del mismo. En una línea de 2 conductores el número de enlaces de flujo del circuito es la suma de los enlaces de flujo de cada conductor.

### A.3.1.8.1 Inductancia de un conductor debido al flujo interno.



*Imagen A3.4. Flujo interno y flujo externo respectivamente.*

Las líneas de flujo son concéntricas al conductor. La fuerza magnetomotriz fmm en amperios – vuelta, alrededor de cualquier línea cerrada, es igual a la corriente que pasa por la línea. La fmm es igual también a la integral de la componente tangencial de la intensidad de campo magnético a lo largo del cable.

$$\oint H \cdot ds = I [A - vuelta] \quad (A3.6)$$

Dónde:

**H:** es la intensidad del campo magnético en [A-vuelta/m].

**S:** es la distancia a lo largo del camino en m.

**I:** es la corriente abarcada en Amperios.

### A.3.1.8.2 Inductancia de un conductor debido al flujo externo

Se deducen ahora los enlaces de flujo de un conductor inicialmente aislado debidos a la porción de flujo exterior comprendido entre D1 y D2 metros del centro del conductor. En la Imagen A3.4, P1 y. P2 son dos puntos a distancia D1 y D2 del centro del conductor por el que circula una corriente I.

Como las líneas de flujo son círculos concéntricos al conductor, todo el flujo comprendido entre P1 y P2 está dentro de las superficies cilíndricas concéntricas que pasan por P1 y P2. En el elemento tubular que está a x metros del centro del conductor, la intensidad de campo es H<sub>x</sub>.

$$H_x = \frac{I}{2\pi x} [A - \text{vuelta}/m] \quad (\text{A3.7})$$

### A.3.1.8.3 Reactancia inductiva

El valor de la reactancia inductiva depende de la frecuencia del sistema y del valor de la inductancia total (suma de inductancia interna y externa) del cable y se obtiene de:

$$X_L = 2\pi fL \quad (\text{A3.8})$$

Reemplazando L por su equivalente dado en la ecuación anterior, para una frecuencia de 60 Hz, y pasando de valores decimales a logarítmicos.

$$X_L = 2\pi f * 2 * 10^{-7} \ln \frac{DMG}{RMG} \quad [\Omega/m] \quad (\text{A3.9})$$

Donde DMG y RMG deben estar dadas en las mismas unidades. Para el cálculo de la reactancia inductiva se pueden distinguir los siguientes casos:

**A)** Cables sin pantalla o cubierta metálica, o bien, los cables que provistos de pantallas o cubiertas metálicas, se encuentran conectadas a tierra de tal forma que no existen corrientes a través de las mismas, con los RMG y DMG dados.

**B)** Cables con pantallas o cubiertas metálicas que se encuentren conectados a tierra pero de tal forma que permitan circulación de corrientes a través de las mismas. Es el caso de las redes subterráneas. En este aspecto se hará hincapié, en el tratamiento del efecto de estas corrientes, basado en el trabajo desarrollado por HALPERIN y MILLER el cual se utilizará no sólo en este caso, sino también en los desarrollos correspondientes a voltajes, corrientes inducidas y pérdidas en las pantallas y cubiertas metálicas.

La propiedad de un cable que permite al conductor mantener un potencial a través de un material aislante se conoce como capacitancia. Este valor depende de la constante dieléctrica del aislante y los diámetros del conductor. Un cable es un capacitor distribuido, la capacitancia de un conductor, con pantalla conectada a tierra o aterrizada, está dada por los siguientes parámetros y la fórmula es la siguiente:

$$C = \frac{0.00736\varepsilon}{\log_{10} \frac{D}{d}} \quad (\text{A.3.10})$$

Dónde:

**C:** Capacitancia en  $\mu\text{F}$  por 1000 pies

$\varepsilon$ : Constante dieléctrica (k), permitividad ( $\varepsilon$ ) o al SIC (Capacitancia Inductiva Especifica)

**D:** Diámetro sobre el aislante

**d:** Diámetro sobre el conductor.

Investigando en los catálogos de los fabricantes se encontraron las siguientes fórmulas de la capacitancia que se muestra en la siguiente tabla:

FABRICANTE	ABB	CONDUMEX	EL-SEWEDY	BRUGG	LIBRO: ELECTRICAL POWER CABLE ENGINEERING
FORMULA	$C = \frac{\varepsilon_r}{18Ln} \left( \frac{d_o}{d_i} \right)$	$C = \frac{0.0241\varepsilon_r}{\log_{10} \left( \frac{d_s}{dp} \right)} \times 10^{-6}$	$C = \frac{\varepsilon_r}{18Ln} \left( \frac{d_s}{dp} \right)$	$C = \frac{5.56\varepsilon_r}{Ln} \left( \frac{D}{d} \right)$	$C = \frac{0.00736\varepsilon}{\log_{10} \left( \frac{D}{d} \right)}$
UNIDADES	$\left[ \frac{\mu F}{km} \right]$	$\left[ \frac{F}{km} \right]$	$\left[ \frac{\mu F}{km} \right]$	$\left[ \frac{\mu F}{km} \right]$	$\left[ \frac{\mu F}{1000 \text{ feet}} \right]$

**Tabla A3.1. Ecuaciones para cálculos de capacitancia del cable según fabricante.**

Cada fabricante especifica una ecuación para el cable que suministra, sin embargo estas ecuaciones son equivalentes entre los Sistemas Internacional de Unidades y el Sistema Inglés de Unidades.

## APENDICE 4

### A4.1 DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE CARGA RESISTIVA.

El valor de resistencia escogido debe de cumplir las características de tener un bajo valor óhmico y gran capacidad de corriente. Con esta resistencia ubicada en el secundario del transformador, la condición de ferresonancia puede aparecer, pero el fenómeno se ve limitado a rangos permitidos, es decir no dañinos para nuestro sistema eléctrico. A continuación se detalla la forma de calcular este valor de resistencia.

$$I(\text{cargatotal}) = \frac{KVA}{\sqrt{3} \cdot KV} = \frac{1000 \cdot KV}{\sqrt{3} \Omega(\text{cargatotal})} \quad (\text{A.4.1})$$

$$\Omega(\text{cargatotal}) = \frac{100 \cdot KV^2}{KVA} \quad (\text{A.4.2})$$

$$I_R = \frac{100 \cdot KV}{\sqrt{3} \cdot R} \quad (\text{A.4.3})$$

$$R = \frac{R}{X_m} * X_m \quad (\text{A.4.4})$$

$$\frac{I_R}{I(\text{cargatotal})} = \frac{I_{exc\%}}{100 \left( \frac{R}{X_m} \right)} \quad (\text{A.4.5})$$

$$\%I_R = \frac{I_{exc\%}}{\left( \frac{R}{X_m} \right)} \quad (\text{A.4.6})$$

De las ecuaciones anteriores:

**R:** Resistencia/fase a ubicarse en el secundario del transformador.

**%I<sub>R</sub>:** Corriente por la resistencia, en % de la corriente de carga total.

**I<sub>exc</sub>%:** Corriente de excitación en %.

**KV:** Voltaje nominal entre fases.

Adicionalmente se puede mencionar

$$\frac{X_{Co}}{X_m} = \frac{10}{377} \times \frac{l}{Co \cdot l} \times \frac{I_{exc\%} \cdot KVA}{KV^2} \quad (\text{A.4.7})$$

**Donde:**

**Co:** Es la capacitancia a tierra de secuencia cero en (μF/m).

**L:** Longitud del ramal en m.

**I<sub>exc</sub>%:** Corriente de excitación en %.

**KV:** Voltaje nominal entre fases.

**KVA:** Potencia nominal del transformador.

DATOS DEL TRANSFORMADOR		PARA RAMAL DE 1.5 Km.*			
KV.	KVA	I <sub>exc</sub> %	X <sub>co</sub> /X <sub>m</sub>	R/X <sub>m</sub>	%I*R
<b>13.8</b>	160	1.0	0.068	0.035	18.80
	200	1.0	0.085	0.070	14.29
	250	1.0	0.107	0.085	11.76
	300	1.0	0.128	0.090	11.11
	500	1.0	0.213	0.150	6.60
	750	1.0	0.320	0.195	5.13
	1,000	1.0	0.427	0.240	4.17
	1,500	1.0	0.640	0.350	2.86
	2,000	1.0	0.854	0.500	2.00
	5,000	1.0	2.134	0.580	0.58
<b>22.8</b>	150	1.0	0.025	0.025	40.00
	200	1.0	0.031	0.030	33.30
	250	1.0	0.039	0.036	27.80
	300	1.0	0.047	0.042	23.80
	500	1.0	0.078	0.062	16.10
	750	1.0	0.117	0.080	12.50
	1,000	1.0	0.156	8.550	9.30
	1,500	1.0	0.235	4.290	6.30
	2,000	1.0	0.313	3.195	5.20
	5,000	1.0	0.782	0.450	2.20
<b>34.5</b>	500	1.0	0.034	0.033	30.30
	750	1.0	0.051	0.045	22.22
	1,000	1.0	0.068	0.052	19.23
	1,500	1.0	0.102	0.077	12.99
	2,000	1.0	0.137	0.110	9.09
	5,000	1.0	0.342	0.220	4.50

**Tabla A.4.1. Ejemplos de porcentajes de carga resistiva secundaria requerida para prevenir sobrevoltajes ferroresonantes para transformadores conectados en Estrella-Delta para tramos de 1.5km.**

Se asume  $C_0=0.35$  ( $\mu\text{F}/\text{milla}$ ).

DATOS DEL TRANSFORMADOR			PARA RAMAL DE 1.5 Km.*		
KV.	KVA	I <sub>exc</sub> %	X <sub>co</sub> /X <sub>m</sub>	R/X <sub>m</sub>	%I*R
<b>13.8</b>	160	1.0	0.068	0.16	6.25
	200	1.0	0.085	0.19	5.26
	250	1.0	0.107	0.23	4.35
	300	1.0	0.128	0.24	4.16
	500	1.0	0.213	0.42	2.39
	750	1.0	0.320	0.62	1.61
	1,000	1.0	0.427	0.70	1.43
	1,500	1.0	0.640	0.82	1.22
	2,000	1.0	0.854	0.90	1.11
	5,000	1.0	2.134	1.30	0.80
<b>22.8</b>	160	1.0	0.025	0.06	18.2
	200	1.0	0.031	0.08	12.5
	250	1.0	0.039	0.09	11.11
	300	1.0	0.047	0.12	8.33
	500	1.0	0.078	0.18	5.56
	750	1.0	0.117	0.26	3.85
	1,000	1.0	0.156	0.31	3.23
	1,500	1.0	0.235	0.48	2.08
	2,000	1.0	0.313	0.62	1.61
	5,000	1.0	0.782	0.85	1.18
<b>34.5</b>	500	1.0	0.034	0.09	11.76
	750	1.0	0.051	0.15	6.90
	1,000	1.0	0.068	0.16	6.25
	1,500	1.0	0.102	0.23	4.35
	2,000	1.0	0.137	0.32	3.13
	5,000	1.0	0.342	0.65	1.54

**Tabla A.4.2. Ejemplos de porcentajes de carga resistiva secundaria requerida para prevenir sobrevoltajes ferroresonantes para transformadores conectados en Delta – Estrella sólidamente aterrizada para tramos de 1.5km.**

Se asume  $C_0=0.35$  ( $\mu\text{F}/\text{milla}$ )

DATOS DEL TRANSFORMADOR			REQUERIMIENTOS DE RESISTENCIA				
KV.	KVA	lexc%	$R_N(\Omega)$	$R_N(\text{p.u.})$	$V_n$ (V)	$I_n$ (A)	$P_{RN}$ (KW)
<b>13.8</b>	160	1.0	5,950	5.0	2.650	0.45	1.19
	200	1.0	4,760	5.0		0.56	1.48
	250	1.0	3,810	5.0		0.70	1.85
	300	1.0	3,175	5.0		0.84	2.22
	500	1.0	1,905	5.0		1.39	3.70
	750	1.5	845	3.33		3.14	8.34
	1,000	1.3	733	3.85		3.62	9.62
	1,500	1.2	529	4.17		5.02	13.32
	2,000	1.2	336	4.17		6.70	17.76
	5,000	1.0	190	5.0		13.9	37.0
<b>22.8</b>	160	1.0	16,245	5.0	4.390	0.27	1.15
	200	1.0	12,300	5.0		0.34	1.48
	250	1.0	10,940	5.0		0.40	1.85
	300	1.0	8,665	5.0		0.50	2.22
	500	1.0	6,200	5.0		0.84	3.70
	750	1.5	2,310	3.33		2.53	8.34
	1,000	1.3	2,000	3.85		2.19	9.62
	1,500	1.2	1,445	4.17		3.04	13.32
	2,000	1.2	1,085	4.17		4.05	17.76
	5,000	1.0	520	5.0		8.44	37.0
<b>34.5</b>	300	1.0	19,840	5.0	6.640	0.34	2.22
	500	1.0	11,900	5.0		0.56	3.70
	750	1.5	5,290	3.33		1.26	8.34
	1,000	1.3	4,580	3.85		1.46	9.62
	1,500	1.2	3,305	4.17		2.02	13.32
	2,000	1.2	2,480	4.17		2.69	17.76
	5,000	1.0	1,190	5.0		5.58	37.0
	10,000	1.0	695	5.0		11.2	74.00

**Tabla A.4.3. Requerimientos de resistencias en transformadores conectados en Estrella-Delta a través del neutro, para prevenir sobrevoltajes ferroresonantes.**

## APENDICE 5

### Norma: C57.105-1978-R1999-IEEE-Guide-for-Application-of-Transformer-Connections-in-Three-Phase-Distribution-Systems-1

ANSI/IEEE C57.105-1978

IEEE GUIDE FOR APPLICATION OF TRANSFORMER

in such time phase that the total net flux entering either end yoke from all three legs is zero (triple harmonics excepted). If the voltages exciting each leg are unbalanced by a neutral shift, then the three fluxes do not add to zero, and the resulting net flux is forced out of the end yokes with a return path from one yoke to the other through air, tank, and core-clamping structures. This net flux may be viewed as the sum of three equal in-phase flux components in the three legs and is commonly called the zero-sequence flux.

Any condition which impresses zero-sequence voltage on a YG-YG transformer with 3-legged core will cause tank fluxes. In order of increasing severity, but without regard to duration, these conditions are unbalanced phase-to-neutral load, unbalanced primary voltages with neutral shift, SLG primary fault, and SLG secondary fault. During the secondary SLG fault, the short-circuited secondary coil on one leg will not tolerate flux in the faulted leg. Therefore, almost the full magnitude of normal core leg flux is forced out of the yoke into the tank. Severe heating of the tank wall and core clamping parts results from eddy-current and hysteresis losses.

Measures which have been used to counter the tank-heating effect in YG-YG transformers with 3-legged core-form construction are only partly effective and are not economical for small transformers. Placing a heavy conductive belt around the interior of the tank wall to completely enclose the core in a shorted turn restrains the flux from entering the tank wall, but does not prevent the flux from entering the core-clamping structures. Adding a third winding (tertiary) of a substantially lower power rating and connected  $\Delta$  reduces the zero-sequence exciting flux by reducing the level to which zero-sequence voltage may rise, but does not prevent flux from entering the tank. Also, the tertiary causes the transformer to act as a ground current source with the attendant disadvantages and hazards described in 2.6, 5.2.2, and 5.3.2. For this reason, if a  $\Delta$  tertiary is employed, the primary-to-tertiary impedance should be low enough to assure that primary protective devices will isolate the transformer under abnormal conditions before thermal damage occurs to the transformer windings.

It is recommended that YG-YG transformers with core-form construction have 4- or 5-legged cores or be of triplex construction.

#### 6.3.2 Open-Conductor Faults

When a very substantial part of the load consists of 3-phase induction motors, an open-conductor fault on either primary or secondary may result in serious overload. The motors, if running when the fault occurs, continue to run as single-phase motors unless or until disconnected by motor protection devices. While thus running, the motors draw single-phase power from the unfaulted conductors and transform power to the remaining two phases by furnishing voltage to the faulted conductor. In this manner virtually all of the normal 3-phase load must be supplied through the transformer bank as single-phase power. The condition is obviously one of severe unbalance. The effect of single-phase load is described in 6.2.

#### 6.3.3 Phase-to-Phase Faults

Secondary phase-to-phase faults may cause blowing of one or more primary fuses. On systems supplied by Y-Y connections, whether grounded or not, the combination of the blown fuse(s) and a phase-to-phase fault not involving ground may result in full line-to-line primary voltage, appearing across the open fuses. Unless the probability of ungrounded faults is minimal, full-rated primary fuses are recommended for Y-Y connections.

## 7. Ferroresonance

### 7.1 Qualitative Description

Ferroresonance is a phenomenon usually characterized by over-voltages and very irregular wave shapes and is associated with the excitation of one or more saturable inductors through capacitance in series with the inductor. In single- and 3-phase power distribution circuits susceptible to ferroresonance, the capacitance usually is due to

presence of shunt capacitor banks, series capacitor banks, cable circuits, overhead lines, and the internal capacitance of transformers and other equipment. The saturable inductor usually is present in the form of a transformer or reactor which utilizes an iron core. Under normal conditions, ferroresonance will not occur in distribution systems, but certain conditions may be established during single-pole switching or the operation of single-pole protective devices which permit ferroresonance to result. The wiring connections used for distribution transformer banks are an important factor influencing whether ferroresonance can occur during single-phase conditions.

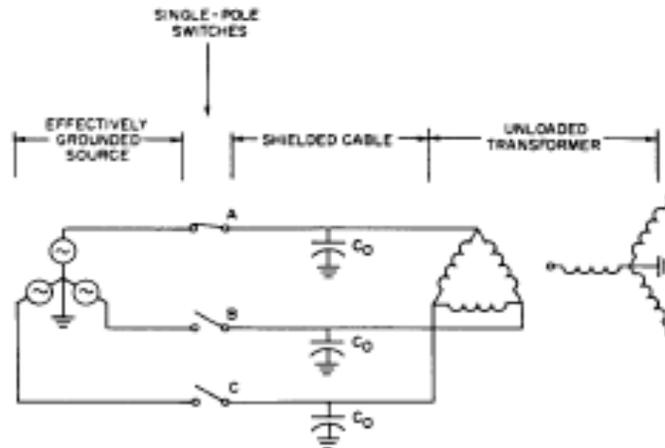


Figure 13— Circuit for Ferroresonance Discussion

When ferroresonance is present in a distribution system, it usually causes one or more of the following abnormalities which are easily measured or observed:

- 1) High voltage phase-to-phase, phase-to-ground, or both with peak voltages which may be five or more times the system normal peak voltage
- 2) Extremely jagged and irregular voltage and current wave shapes
- 3) Excessively loud noise in the transformer due primarily to magnetostriction at high flux densities. Frequently the transformer is described as rattling, rumbling, or whining when ferroresonance is present. These noises are considerably different from those which emanate from the transformer when excited from a sinusoidal source at rated voltage and frequency.

The simple 3-phase circuit of Fig 13 will be used to discuss how ferroresonance can occur. A 3-phase effectively grounded source supplies single-conductor shielded cables through three single-pole switches. This type of cable has capacitance from phase to ground  $C_0$ , but phase-to-phase capacitance essentially is not present. At the end of the cable circuit is an unloaded 3-phase transformer bank with the primary windings connected in  $\Delta$ . When the single-pole switch for phase A is closed as shown in Fig 13, two phases of the transformer are energized by a path through the cable capacitances from phases B and C to ground. At the instant the switch in phase A is closed, the capacitance to ground on phases B and C appears as a short circuit, and the transformer windings of legs A-B and A-C start to draw normal inrush or exciting current. The transformer iron during the first cycle of applied voltage may saturate due to closing at or near voltage zero, or due to residual flux in the transformer core or both. Saturation results in a large current pulse through the transformer windings and capacitances of phases B and C. Next the transformer iron drops out of saturation leaving a substantial trapped charge (voltage) on the cable capacitance. In subsequent cycles the transformer iron may go into saturation in the opposite direction, thereby changing the polarity of the trapped charge on the capacitance. If the transformer continues to go into and out of saturation in either a cyclical or random fashion, high sustained overvoltages will occur phase-to-phase and phase-to-ground. These sustained overvoltages can cause over-excitation of the transformer, surge arrester failure, and even failure of major insulation in the transformer or

system. When the second phase in Fig 13 is closed, the overvoltages may persist or become higher. Closing the third phase restores balanced 3-phase conditions, and ferroresonance will terminate.

A distribution system should be designed and operated so that ferroresonance is unable or very unlikely to occur during single-phase conditions. For a given system and method of operation, the transformer connections and switching arrangements should be selected so that the probability of ferroresonance and the resultant overvoltages is minimized.

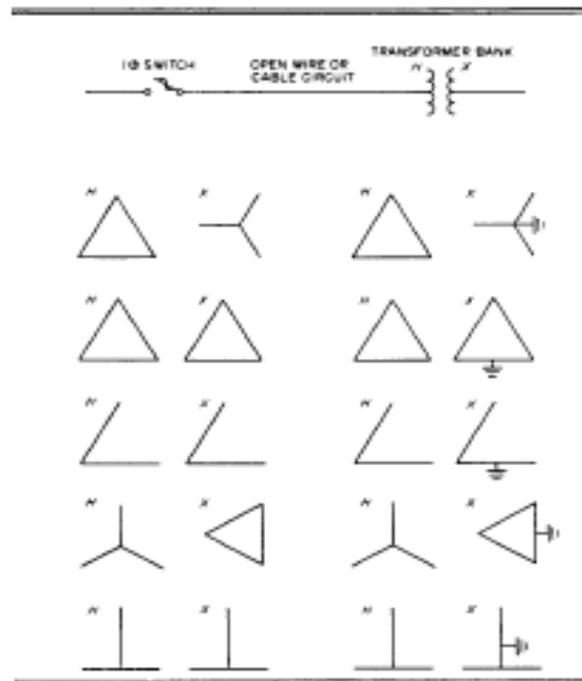
## 7.2 Transformer Connections Highly Susceptible to Ferroresonance

Transformer banks with certain connections are more likely than others to experience ferroresonance when the bank is energized or de-energized with single-pole switches at a location remote from the transformer, or when a conductor or fuse at a remote location opens. In general, ferroresonance is possible if the primary windings of the transformer bank are not grounded, phase-to-phase or phase-to-ground capacitance or both is present between the single-pole switches or fuses and transformer, and the supply system is effectively grounded (3-phase 4-wire). Table 2 shows frequently employed transformer connections which are susceptible to ferroresonance during normal and abnormal single-phase conditions.

Whether ferroresonance will occur with the transformer connections shown in Table 2 depends on the system and transformer electrical characteristics. For a particular transformer connection, the phase-to-phase and phase-to-ground capacitances of the lateral circuit plus the transformer internal capacitance are the parameters which have the most effect on the establishment of sustained ferroresonance during single-phase conditions. For a particular connection sustained ferroresonance will occur only if the capacitances of the lateral circuit and transformer fall within a given range. The upper and lower bounds on this capacitance range are determined mainly by the primary voltage level, transformer size, and to some extent the transformer design. The lower bound is of most interest, and for a given primary voltage level the lower bound of the range decreases as the transformer size decreases. For a given transformer size, the lower bound of the range decreases as the primary voltage level increases. Therefore, ferroresonance is more likely with higher primary voltage in smaller transformers.

The type of construction used for the lateral circuit between the transformer and single-pole devices determines the capacitance and thus is the factor which has the greatest influence on the establishment of a potential ferroresonant circuit. This 3-phase lateral circuit usually consists of overhead line (open wire) or single-conductor shielded cables. The capacitance to ground of cable may be 50 or more times that of overhead line, and this fact greatly increases the probability that the capacitances will be above the lower bound of the range at which ferroresonance can occur with the connections in Table 2.

Table 2— Connections Susceptible to Ferroresonance



For the connections shown in Table 2, ferroresonance usually does not occur if the primary voltage is 15 kV or lower and the lateral circuit is overhead line (open wire) provided the length of line between the single-pole devices and transformer bank does not exceed ordinary lengths. Relatively few cases of ferroresonance have been reported for these conditions because either the line lengths involved are relatively short or the switching and fusing is performed at the transformer location. However, in 25 kV and particularly in 35 kV multigrounded neutral overhead systems ferroresonance is more likely with the connections shown in Table 2. In fact, ferroresonance with overvoltages as high as 4 to 5 per unit has been observed when energizing, at the transformer terminals, ungrounded-Y-Δ banks employing small single-phase transformers. This is due to nonlinear resonance between the internal capacitance of the transformer and the transformers' exciting impedance.

For the connections shown in Table 2, ferroresonance is also likely if the primary voltage is 12 kV or higher (effectively grounded system) and the lateral circuit is single-conductor shielded cable or 3-conductor shielded cable. The chance of occurrence is increased as primary voltage is increased, cable length is increased, and transformer size is reduced. Ferroresonance also can occur for primary voltages below 12 kV when single-conductor shielded cable is used to connect the single-pole switches or fuses to the transformer. However, the experience in the utility industry has shown that ferroresonance is not as likely at the lower voltages (4160 Y and 8320 Y) as at the higher voltages.

Various technical papers have defined the maximum lateral cable lengths which can be used with different sizes of transformers and different primary voltage levels for the connections shown in Table 2, if ferroresonance is to be prevented. A comparison of the data in the various papers shows that the maximum cable lengths, for the same primary voltage and transformer size, vary considerably. This guide does not attempt to arbitrate the differences and arrive at industry acceptable values for maximum allowable cable lengths. It is generally agreed, however, that the allowed cable lengths are relatively short for the transformer connections shown in Table 2, particularly for system voltages of 12 kV and higher. Nevertheless, considering the trend of placing more distribution circuits underground, with resultant

increase of the distance between single-pole devices and transformer, reliance upon limiting cable length to prevent ferroresonance with the connections in Table 2 is unreasonable.

### 7.3 Measures to Minimize the Probability of Ferroresonance with Ungrounded Primary Connection

As discussed in 7.2, ferroresonance is quite likely with the connections in Table 2 if the bank is supplied through single-conductor shielded cables with single-pole devices at the source end of the cables. Although the trend in the utility industry is away from the connections shown in Table 2 (for padmounted and submersible banks, supplied through cable circuits), measures are available which will minimize the probability of ferroresonance if these connections are used.

#### 7.3.1 3-Pole Switches and Fault Interrupters

The use of properly adjusted 3-pole switches and fault interrupters at the source end of the cable circuit will prevent single-phasing during switching and fault conditions and consequently will prevent sustained ferroresonance. However, this is a costly solution which most utilities reject from an economic standpoint. A similar solution is to use only a 3-pole switch at the remote location and fuses only at the transformer location. This is a workable solution, but it has the drawback of causing a line lockout for faults on the cable circuit. Fortunately, the compromise of a 3-pole switch and fuses at the source end of the cable will greatly reduce the probability of ferroresonance when the primary windings are not grounded. Sustained ferroresonance will not occur during switching operations by virtue of the 3-pole switch. If a fuse blows due to a fault on the cable, the capacitance to ground on the open phase is shunted by the impedance in the fault path, and ferroresonance would not be expected. But if a fuse or conductor in the primary circuit causes an open circuit in the absence of a shunt fault, and the transformer is unloaded, ferroresonance can occur.

Fortunately, when a fuse or conductor opens, the load connected to the secondary of the transformer usually is sufficient to prevent sustained ferroresonance. However, if all of the connected secondary load is fed through a breaker or breakers which have undervoltage tripping, then the total secondary load may be disconnected during an open circuit on the primary, and ferroresonance may occur.

#### 7.3.2 Secondary Load

If sufficient load is connected to the secondary of the transformer bank, sustained ferroresonance will not occur during single-phase conditions. The amount of load required depends primarily on transformer kVA rating, primary voltage, cable length, transformer connections, and load characteristics including energy absorbing characteristics. Generally, decreasing the transformer size, increasing primary voltage, and increasing cable length requires increasing the load in order to prevent ferroresonance. Tests and model studies have shown that almost always a high power factor resistive load (one whose inductance is due to stray flux linkages and not by intentional design) equal to 10% of transformer nameplate rating will prevent ferroresonance, and in many cases the resistive load can be considerably less than 10% depending upon the parameters mentioned above. Reliance upon sufficient user connected secondary load to prevent ferroresonance during single-pole switching is not considered acceptable practice by many system operators since secondary load frequently is disconnected during the switching.

#### 7.3.3 Switching at the Transformer

As discussed in 7.2, performance of the single-pole switching at the transformer location generally will not result in ferroresonance except when small banks of three single-phase transformers in 25 and 35 kV distribution systems are energized or de-energized. On 15, 25, and 35 kV systems, ferroresonance generally is not a problem when the single-pole switching is performed at the 3-phase padmounted or subsurface transformers because of the size of the transformers normally involved (150 kVA and above).

**7.3.4 Resistance Grounding of Y-Connected Primary**

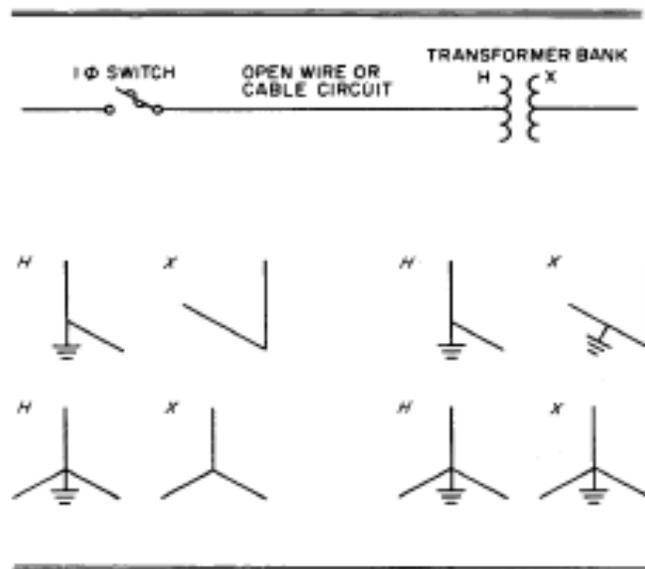
When the neutral of the primary in a Y-Δ bank is grounded through a resistor, ferroresonance can be avoided. This potential solution may establish conflicting constraints in that a resistor must be selected which is low enough to prevent the ferroresonance, yet high enough to prevent the bank from acting as a low-impedance ground-current source. Furthermore, the design of the installation must include adequate protective barriers or warnings to prevent human contact with the neutral point of the primary windings. For the reasons discussed in 2.6, 5.2.2, and 5.3.2, solid grounding of the Y with this connection is not recommended even though grounding would either prevent ferroresonance or minimize its probability.

**7.4 Transformer Connections Least Susceptible to Ferroresonance**

Table 3 shows two transformer connections which, under certain system conditions, will prevent ferroresonance. The open-Y-open-Δ connections will prevent ferroresonance when the single-pole switches are at the source end of the lateral circuit if all lateral circuit capacitance is from phase to ground. In most underground distribution circuits today, single-conductor shielded cables

are used, and these do have all capacitance from phase to ground. The open-Y-open-Δ connection is made with either external connection of two single-phase transformers, or by placing two single-phase core-coil assemblies in a common tank. In either case, the two primary windings are not coupled magnetically, the three phases of the lateral circuit are not coupled capacitively, and ferroresonance will not occur. However, if the circuit between the single-pole switches and open-Y-open-Δ bank has phase-to-phase capacitance as with open wire, ferroresonance can occur. Fortunately, the length of open-wire lateral necessary to permit ferroresonance is much longer than is normally employed. For practical purposes, the open-Y-open-Δ connection can be considered free from ferroresonance.

**Table 3— Connections Which Prevent or are Least Susceptible to Ferroresonance**



Usually underground systems have single-conductor shielded cable for which all circuit capacitance is phase to ground. When this is the case, ferroresonance will not occur with the grounded-Y-grounded-Y connection during remote single-pole switching provided the bank consists of three single-phase transformers or a 3-phase unit with

triplex construction (three single-phase core-coil assemblies in the same tank). If the grounded-Y-grounded-Y transformer is supplied through open-wire circuits where phase-to-phase capacitance is also present, ferroresonance can occur whether or not the bank consists of three single-phase units or is a triplex 3-phase unit. However, the length of line necessary to permit ferroresonance under these conditions (over two miles) is usually greater than that which exists between the single-pole devices and the transformers. But it should be recognized that if an ungrounded-Y or  $\Delta$  capacitor bank exists between the single-pole devices and transformer, ferroresonance can result. For situations where capacitor banks do not exist between the switches and transformer, the grounded-Y-grounded-Y bank made from three single-phase transformers or a 3-phase unit with triplex construction can be considered free from ferroresonance.

Most 3-phase padmounted and submersible transformers with the grounded-Y-grounded-Y winding connections do not employ triplex construction, but they are constructed on a 4- or 5-legged core. This method is used since generally it results in lower cost, weight, and size for the 3-phase transformers. Also these transformers are usually fed through primary circuits consisting of single-conductor shielded cable, and frequently the single-pole switches or fuses are at the source end of the cable circuit. Tests and field experience have shown that ferroresonance can occur with 4- or 5-legged core-form grounded-Y-grounded-Y transformers when supplied through single-conductor shielded cables. The limited test data show that crest voltages as high as 2.35 per unit may occur, but usually they are considerably less than this. Also the available data show that the length of cable which can be used with grounded-Y-grounded-Y transformers is considerably longer than that which can be used with ungrounded primary winding connections without increasing the probability of high overvoltages and ferroresonance. This fact is evidenced by the generally good experiences which utilities have had with transformers employing this type of construction.

## 7.5 Measures to Minimize the Probability of Ferroresonance with Grounded Primary Connections

As discussed in 7.4, there are only two winding connections where ferroresonance definitely will not occur, providing all capacitance of the primary system between the single-pole devices and transformer is from phase to ground. These connections are the open-Y-open- $\Delta$  and grounded-Y-grounded-Y connections made up of either single-phase transformers or a 3-phase triplex unit. If the primary circuit has phase-to-phase capacitance or if the grounded-Y-grounded-Y bank is constructed on a 4- or 5-legged core, ferroresonance can occur. For most systems, the probability of ferroresonance due to the presence of phase-to-phase capacitance in open-wire lines is infinitesimal. However, when 4- or 5-legged core-form grounded-Y-grounded-Y transformers are supplied through circuits where all circuit capacitance is from phase to ground, ferroresonance can occur. Fortunately, the resultant overvoltages should not prove harmful to the transformer or other primary equipment for the time they are present during normal single-pole switching operations. Measures are available, however, to minimize the probability of overvoltages and ferroresonance when the primary windings are grounded.

### 7.5.1 3-Pole Switches and Fault Interrupters

The application of properly adjusted 3-pole switches and fault interrupters at the source end of the supply circuit will prevent sustained overvoltages and ferroresonance, but generally is not an acceptable solution from an economic standpoint. The preventative measures outlined in 7.3.1 also can be used with the open-Y-open- $\Delta$ , and grounded-Y-grounded-Y connections if conditions are such that ferroresonance is possible.

### 7.5.2 Secondary Load

Connecting sufficient load to the secondary of the open-Y-open- $\Delta$ , and grounded-Y-grounded-Y transformers will prevent overvoltages. Usually a resistive load of 10% of bank rating will prevent overvoltage, and in many cases the load can be considerably less than 10% depending upon cable or lateral circuit length, primary voltage, transformer size, and load characteristics.

### 7.5.3 Switching at the Transformer

If the single-pole switching and fusing devices are located at the transformer, and the neutral of the primary windings is grounded, overvoltages and ferroresonance will not occur with either the open-Y-open- $\Delta$  or grounded-Y-grounded-Y connections.

## 7.6 Bibliography

The qualitative guides presented in this section will not suffice for those who desire quantitative information and a more complete and thorough understanding of the basic phenomenon. For these reasons a bibliography is included as part of this guide and appears in Section 9.

## 8. Unsymmetrical Banks and Special Connections

Symmetrical transformer banks are those in which each phase has similar kVA rating, impedance, and voltage ratio. The 3-phase transformers and banks of three similar single-phase transformers connected in Y,  $\Delta$ , or zigzag are symmetrical connections.

### 8.1 T-Connected

The T-connected 3-phase transformer is not a symmetrical connection. Its characteristics are described in 2.4. Although a T connection is theoretically possible with two single-phase transformers, standard voltage ratings do not permit such a connection to have practical significance. The use of the T connection between 2-phase and 3-phase systems (Scott connection) is beyond the scope of this guide. Therefore, the T connection will not be further discussed.

### 8.2 Circulating Delta Currents

#### 8.2.1 Dissymmetry of Voltage Ratios

In  $\Delta$ - $\Delta$  transformer connections, a large circulating current may flow due to dissymmetry of the voltage ratios of the three phases. Fig 14 shows an energized  $\Delta$ - $\Delta$  bank with the secondary open at one corner and a voltmeter inserted. The voltage across the open terminals reversed in phase may be considered an emf which drives current around the closed  $\Delta$  through the impedances of the three legs in series. If, for example, 1.5% of line voltage were measured at the open corner of three otherwise similar transformers having 5% impedance, the circulating current in the  $\Delta$  windings would be  $1.5 \div (5 \times 3) \times 100 = 10\%$  of transformer rated current. No matter what the time phase of this current with respect to load current, at least half and possibly all will add directly in phase with load current in one leg of the  $\Delta$ . (This statement assumes load currents disposed at  $120^\circ$  intervals, but not necessarily otherwise balanced.) Transformer losses are significantly increased, and the circulating current may cause overload. The severity of the additional heating with balanced load may be estimated by a simple equation. With  $K$  standing for the ratio of circulating current to rated current,  $p$  standing for the ratio of load current to rated current, and  $\theta$  standing for the angle between the two currents, the load losses of the most-affected leg in per unit of full-load value are given by  $p^2 + 2pk \cos \theta + k^2$ . For example, if the circulating current is 10% of rated and the load is 100%, the load loss in the most-affected leg ranges from 111% to 121% of normal full-load value as the angle  $\theta$  changes from  $60^\circ$  to  $0^\circ$ .

Although the condition of circulating current is not easily detectable in the excitation current of an unloaded bank, it is apparent in the no-load losses. The easiest method to check for abnormal circulating current in a bank of single-phase units is, of course, to use an ammeter in the  $\Delta$  with the load disconnected.

The circulating current may also occur with the little-used YG- $\Delta$  connection, but source zero-sequence impedance as well as transformer impedance is presented in series to the driving voltage because the currents must circulate through

## APENDICE 6

### GUIAS DE LABORATORIO A IMPLEMENTAR.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA

#### GUIA DE LABORATORIO # 1.

#### “INTRODUCCION AL USO DE ATPDRAW”

#### OBEJTIVOS:

- ✓ Reconocer el entorno del simulador ATPDraw.
- ✓ Comprender la forma correcta de realizar simulaciones en ATPDraw.
- ✓ Analizar e implementar circuitos eléctricos básicos en ATPDraw.

#### INTRODUCCION:

En esta guía de laboratorio se presenta, una breve guía de uso del programa simulador ATPDraw, el cual es muy potente para simular sistemas de potencia, es de mucha utilidad para validar resultados experimentales obtenidos en el laboratorio, así como para realizar estudios de fenómenos transitorios de un sistema eléctrico, para realizar estos análisis, se utiliza el simulador ATP-EMTP (Alternative Transients Program – Electromagnetic Transient Program).

#### EDITOR GRAFICO: ATPDraw v3.8

Para simular circuitos eléctricos, el simulador **ATPDraw**, el cual es un procesador gráfico manejado por mouse del ATP-EMTP que trabaja bajo plataforma de MS-Windows. En el ATPDraw se pueden construir circuitos eléctricos de modo rápido y sencillo, ya que se tiene una interfaz gráfica. Ya creado el circuito el programa genera un archivo ATP con toda la información del circuito creado.

La mayoría de los componentes básicos son soportados por el programa ya sean estos trifásicos o monofásicos, para los elementos que no se encuentran en soportados, el usuario puede crear sus propios modelos usando las opciones Data Base Module \$INCLUDE.

También se pueden nombrar a cada uno de los nodos del sistema, esta característica permite identificar con facilidad los nodos que son importantes para el usuario.

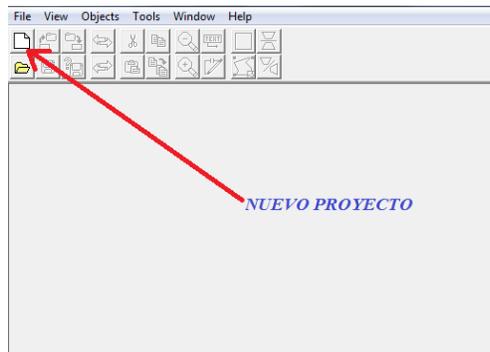
A continuación se detallan las partes fundamentales de ATPDraw:

1. **Después de instalar el programa**, busque el menú de ATPDraw, para abrir el programa como se detalla en la Imagen 1.



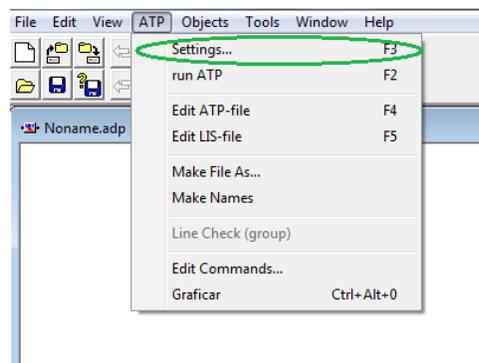
**Imagen 1. Icono de menú inicio de ATPDraw.**

2. **La interfaz del ATPDraw** se ve a continuación, para crear un nuevo proyecto se presione el icono de la hoja en Blanco y aparece el área de trabajo como se muestra en la Imagen 2:



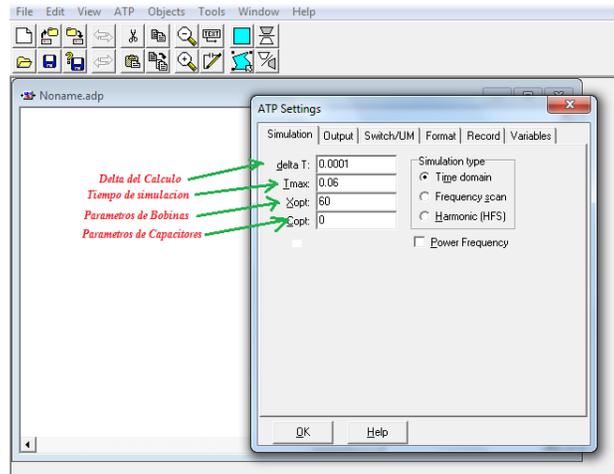
**Imagen 2. Forma de abrir nuevo proyecto en ATPDraw.**

3. **Para modificar las características** de circuito antes de simular, seleccione en el menú *ATP>Settings...*, en la cual aparece la ventana similar de la Imagen 3.



**Imagen 3. Forma de seteo de parámetros de simulación de ATPDraw.**

Es de mucha importancia para obtener buenos resultados, modificar los parámetros de simulación de acuerdo a la necesidad; para circuitos a 60Hz, se puede colocar un tiempo de simulación ( $T_{max}$ ) de 0.06s, el cual mostraría aproximadamente 3 ciclos; el delta( $\Delta T$ ) se refiere al periodo de los cálculos, es recomendable utilizar un valor menor al tiempo de simulación para obtener buena precisión en las gráficas, en la Imagen se muestra la ventana en la que se ingresan estos parámetros de simulación.



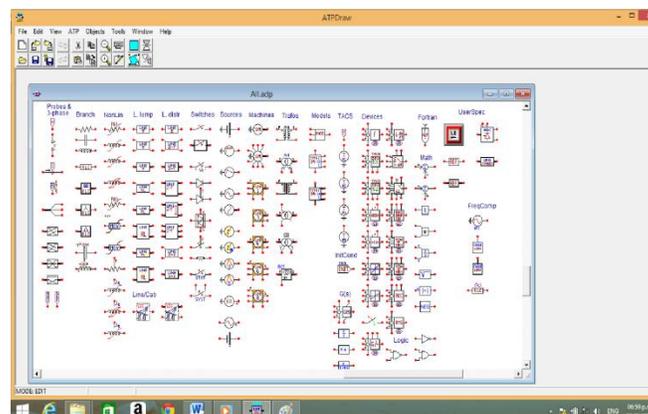
**Imagen 4. Ventana de ATPDraw Setting.**

Si el valor de  $X_{opt}$  es cero la inductancia es en [mHenrio]; de otra forma la inductancia es en [Ohmios], con el valor de la frecuencia en  $X_{opt}$ .

Si el valor de  $C_{opt}$  es cero la capacitancia es en [ $\mu$ Faradio]; de otra forma la capacitancia es en

[ $\mu$ Siemens] con el valor de la frecuencia en  $C_{opt}$ .

**4. Entorno de trabajo,** El ATPDraw tiene una interfaz muy común en programas que trabajan bajo el entorno de Windows. La Imagen 5, indica la pantalla principal de trabajo, es donde se modelan los circuitos eléctricos, estos pueden ser creados o se pueden importar. El movimiento del usuario en esta ventana se puede hacer mediante las barras de desplazamiento o utilizando el Map Windows.



**Imagen 5. Entorno de trabajo de ATPDraw.**

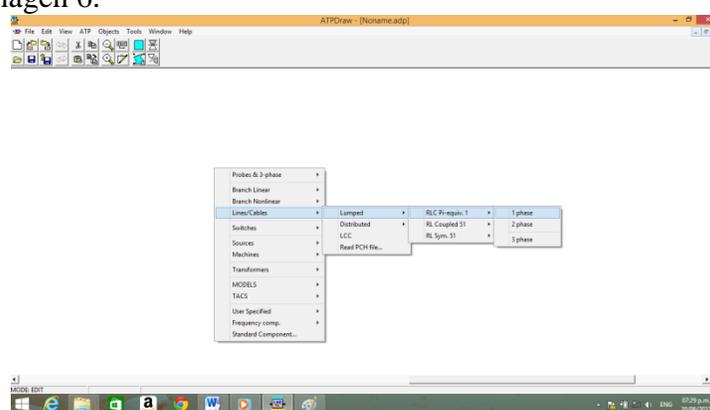
Las partes fundamentales del entorno de trabajo del ATPDraw, son las siguientes.

**Menú principal:** presenta el acceso a todas las funciones del ATPDraw mediante los diferentes submenús, los submenús que posee son:

- ✓ **File:** permite crear nuevos circuitos eléctricos, guardarlo, o abrir uno ya creado anteriormente; cerrar el archivo, cerrar todos los archivos; importar elementos de otros circuitos; guardar el circuito creado en archivos gráficos; cerrar el programa.
- ✓ **Edit:** Contiene las funciones básicas de edición, como son: copiar/pegar, deshacer/rehacer, duplicar, seleccionar, borrar, rotar, mover etiquetas, ingresar texto, etc.
- ✓ **View:** Se controla la configuración y visualización de las ventanas, se encuentran las opciones de zoom, tipo de letra de los componentes, actualizar cambios y opciones para personalizar la ventana de diseño.
- ✓ **ATP:** Corre el programa ATP, crea el nombre para todos los nodos del sistema, genera o edita los archivos ATP, y especifica la configuración deseada para la simulación.
- ✓ **Library:** Se pueden crear o modificar los componentes ya existentes o aquellos que han sido creados por el usuario.
- ✓ **Tools:** Se tiene el editor de texto, el editor de imágenes, el editor del help, y se puede configurar el ATPDraw de la forma más adecuada para el usuario.
- ✓ **Windows:** El usuario puede seleccionar la ventana correspondiente a cada circuito y activar o desactivar el **MAP WINDOWS**.
- ✓ **Help:** El usuario puede acceder a la documentación de ayuda del ATPDraw.

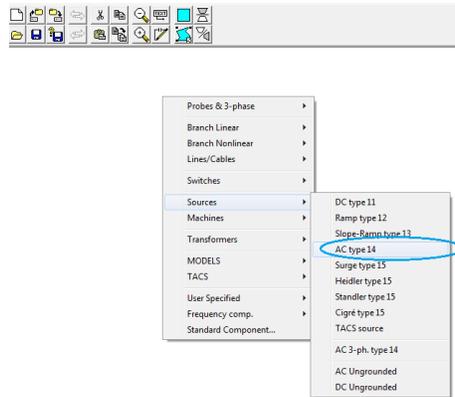
## 5. Elementos básicos del ATPDraw.

Los componentes eléctricos básicos más utilizados del ATPDraw son variados y de fácil acceso, a estos se puede acceder mediante el menú desplegable de elementos que se muestran en la Imagen 6.



*Imagen 6. Ventana de menú desplegable de elementos utilizados en ATPDraw.*

**6. Para insertar un elemento,** se presiona el botón derecho del ratón sobre el área de trabajo, en el cual aparece el menú de componentes (*Component selection menú*), seleccionar una fuente AC, tipo 14 en *Sources>AC type 14*, como se muestra en la Imagen 7.



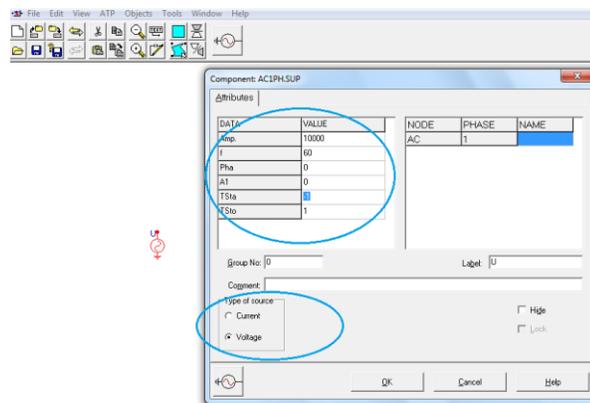
**Imagen 7. Inserción de un elemento en área de trabajo de ATPDraw.**

Para ajustar los parámetros de cualquier elemento, se hace doble clic sobre el icono de éste, así aparecerá la ventana donde están los parámetros.

Los parámetros para la fuente tipo 14 son:

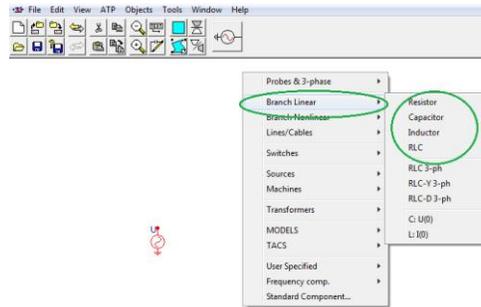
- **Amp:** se introduce el valor pico en [Amperios] o [Voltios] dependiendo del tipo de fuente.
- **f:** frecuencia en [Hertz].
- **pha:** fase de la fuente en grados o segundos dependiendo del valor de *AI*.
- **AI:** si el valor es cero, la fase se da en grados, si el valor es mayor que cero la fase se da en segundos
- **Tsta:** Tiempo de encendido de la fuente [segundos].
- **Tsto:** Tiempo de apagado de la fuente [segundos].
- **Type of source:** se puede escoger si la fuente es de Tensión o Corriente.

En la Imagen 8, se presenta la ventana que muestra ATPDraw, para ajustes de parámetros de la fuente tipo 14.



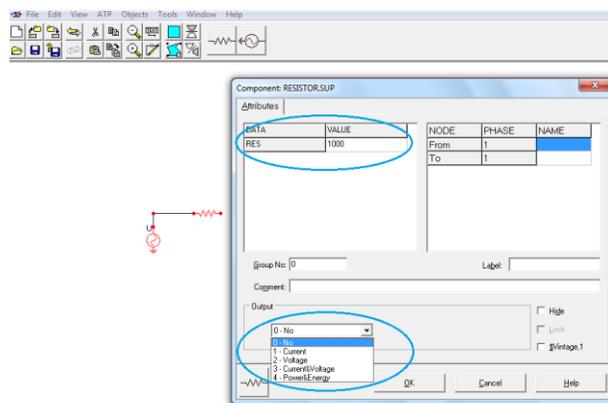
**Imagen 8. Ventana de Ajustes de parámetros de fuente tipo 14.**

**8. Los elementos lineales monofásicos**, tales como resistencias, bobinas y condensadores se encuentran en el menú de componentes, **Branch Linear**. En la Imagen 9 se muestra el menú de selección de los elementos lineales y monofásicos.



**Imagen 9. Menú de selección de elementos lineales monofásicos.**

**10. El parámetro** para la resistencia es *RES* y es el valor de la resistencia en Ohmios. En la Imagen 10, se muestra la forma de ingresar los parámetros de una resistencia.

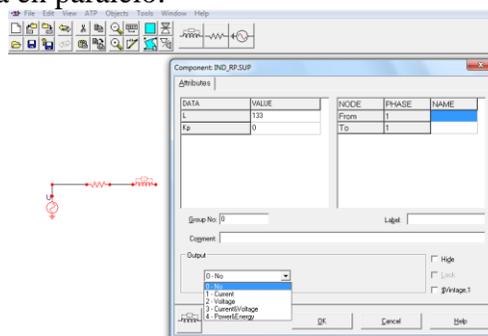


**Imagen 10. Ingreso de parámetros de una resistencia.**

En la Imagen 10, la opción de salida (*Output*), establece que señales pueden ser calculadas en la rama; esta opción aplica, también, para bobinas y capacitores; estas son: Corriente, tensión, Corriente & Tensión y Potencia & Energía (*Current, Voltage, Current & Voltage y Power & Energy*)

**11. Forma de ingresar** los parámetros de un inductor en ATPDraw.

- **L**: inductancia en [**mHenrios**] si  $Xopt=0$ ; inductancia en [**Ohmios**] si  $Xopt=frecuencia$  del sistema
- **Kp**= factor de resistencia en paralelo.



**Imagen 11. Ingreso de parámetros de un inductor.**

## 12. Ingreso de parámetros de un capacitor.

- **C:** Capacitancia en [ $\mu$ Faradios] si  $Copt=0$ ; Capacitancia en [ $\mu$ Siemens] si  $Copt=frecuencia$  del sistema.
- **Ks:** Factor de resistencia en serie.

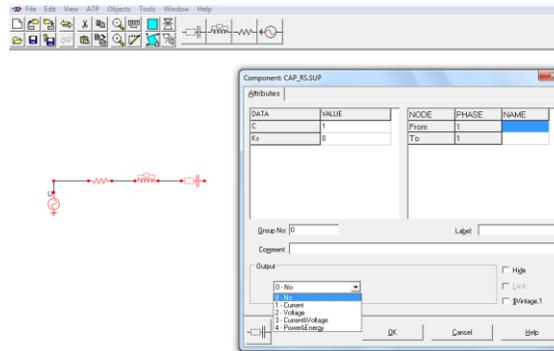


Imagen 12. Ingreso de parámetros de un capacitor.

13. Opción de nombrar los nodos, lo cual es recomendable para facilitar el análisis de los resultados; se hace doble clic sobre el nodo y aparece una ventana con los campos disponibles, ingresar el nombre del nodo (*To:*). También aparece la opción de que el nombre del nodo sea visible (*Display*). En la Imagen 13, se muestra la forma de nombrar los nodos.

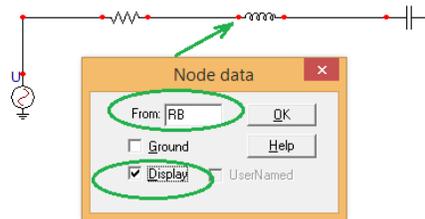


Imagen 13. Opción de nombrar los nodos del circuito.

14. Forma de cerrar el circuito, se realiza el mismo proceso del paso 13, pero en él se marca la opción Tierra (**Ground**), utilizando como retorno la tierra. En la Imagen 14 se muestra la forma de conectar la referencia a tierra de un circuito.

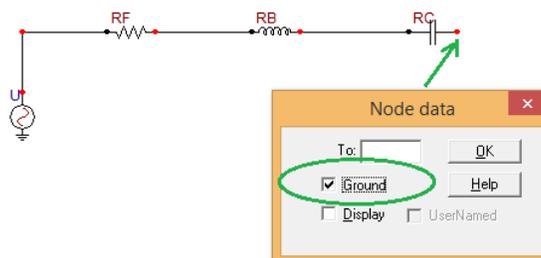
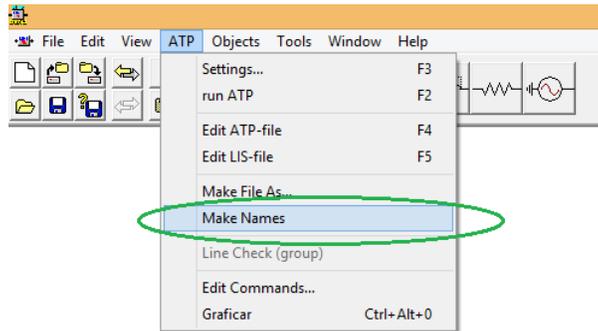


Imagen 14. Forma de referenciar a tierra un circuito.

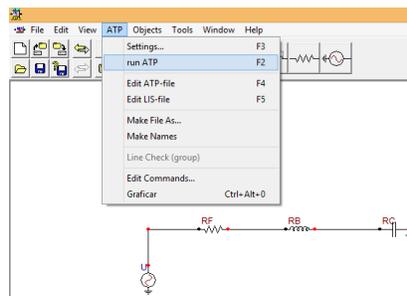
**15. Finalizado el circuito**, se debe de generar un archivo necesario para correr la simulación, esto se hace presionando en el menú **ATP>Make Names**, como se muestra en la Imagen 15



*Imagen 15. Forma de generar un archivo.*

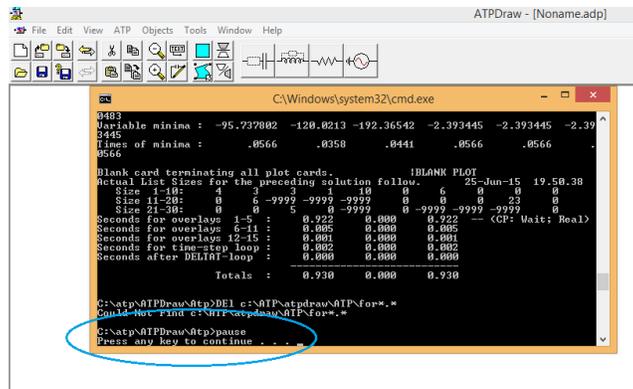
Realizada la generación del archivo, se confirma la acción, seleccionando Yes en la ventana de confirmación.

**16. Ya generado el archivo en ATPDraw**, se corre la simulación seleccionando la opción **ATP >run ATP**, como se muestra en la Imagen 16.



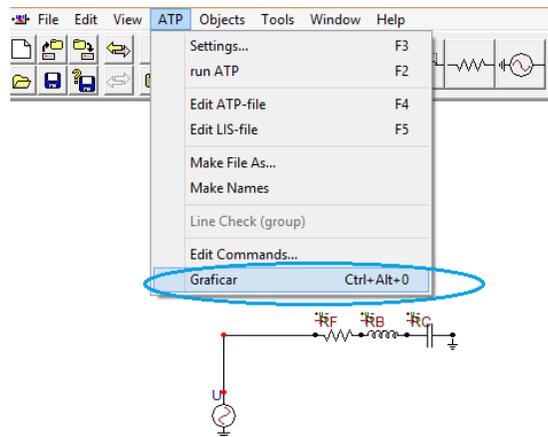
*Imagen 16. Forma de correr la simulación del archivo generado.*

**17. Después de correr el programa**, aparece una consola que muestra el proceso de la simulación, al finalizar muestra el mensaje “**Presione una tecla para continuar...**”, lo cual significa que la simulación ha terminado. Es de verificar que en esta ventana no aparezca ningún mensaje de error, si aparece error es que algún procedimiento se ha realizado mal.



*Imagen 17. Consola que muestra el proceso de simulación del circuito.*

**18. Para observar los resultados** obtenidos de la simulación en el dominio del tiempo, se selecciona en el menú **ATP>Graficar**. Como se muestra en la Imagen 18.



*Imagen 18. Menú de selección para observar resultados en el dominio del tiempo.*

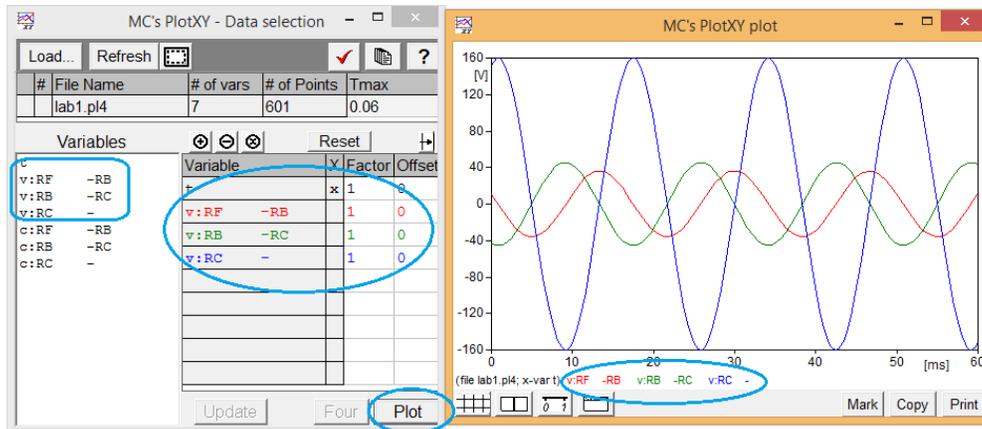
**19. Simular el circuito explicado** en los pasos anteriores con ATPDraw, usando los parámetros que se muestran a continuación, los resultados obtenidos deben ser similares a las señales, que se muestra en la Imagen 19 y 20:

**Fuente de voltaje Type 14:** Amp=120V, f=60, Pha=0, A1=0, Tsta=1, Tsto=-1.

**Resistencia=** 30Ω.

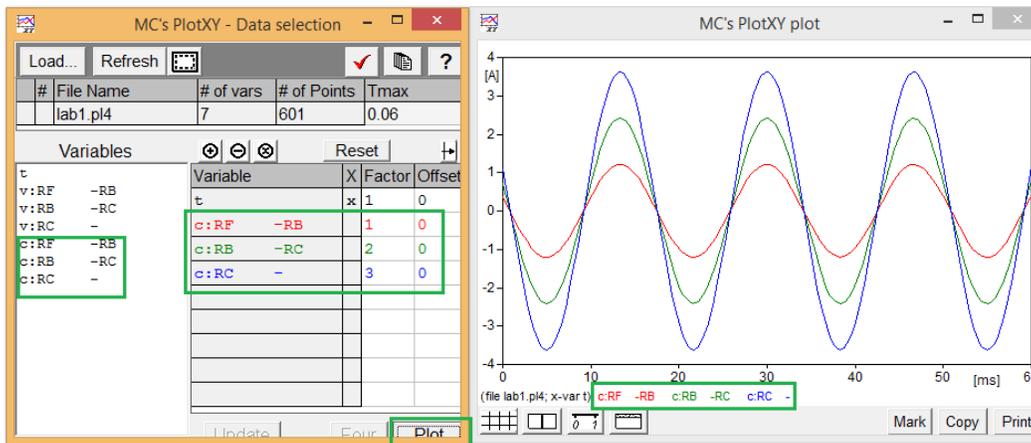
**Inductor=**100mH.

**Capacitor=**20μF.



**Imagen 19. Formas de ondas de Voltajes en el dominio del tiempo.**

En el lado izquierdo de la Imagen 19 aparecen las variables que fueron calculadas, estas comienzan con una v cuando se refiere a tensión y con una c cuando es corriente, seguido de estas están los nombres de los nodos de la rama; para visualizar la variables que se desean calcular solo se deben seleccionar. En este caso se seleccionó la tensión de los tres elementos que forman el circuito. Seguido de esto se pulsa el botón Plot y aparece la ventana con las tres señales. En la parte inferior de la ventana de Grafica están los nombres de las señales escritos con el color correspondiente a cada señal.



**Imagen 20. Formas de ondas de corrientes en el dominio del tiempo.**

En la Imagen 20, se presentan los valores de corrientes obtenidos en cada elemento, para hacer visible la corriente ésta se multiplico por diferentes factores 2 y 3, ya que el orden de las magnitudes de las corrientes son iguales.

**20. Para visualizar las simulación** en estado estable, se selecciona en el menú **ATP>Edit LIS-file**. Esta opción se muestra en la Imagen 21 con los resultados que deben obtenerse en la simulación.

C:\atp\ATPDraw\Atp\lab1.LIS

Sinusoidal steady-state phasor solution, branch by branch. All flows are away from a bus, and the real part, magnitude, or "P" is printed above the imaginary part, the angle, or "Q". The first solution frequency = 6.0000000E+01 Hertz.

Bus K	Bus M	Phasor node voltage		Phasor branch current		Power flow		Power loss	
		Rectangular	Polar	Rectangular	Polar	P and Q	P and Q	P and Q	
FR		120.	120.	.36320688781763	1.2053329628242	21.792413269058	21.792413269058		
		0.0	0.0	1.1493077516107	72.4623017	-68.95846509664	0.0		
RB		109.18379336547	114.42226708057	-.3632068878176	1.2053329628242	-.213162821E-13			
		-34.47923254832	-17.5376983	-1.149307751611	-107.5376983	68.95846509664			
RB		109.18379336547	114.42226708057	.36320688781763	1.2053329628242	.3552713679E-13			0.0
		-34.47923254832	-17.5376983	1.1493077516107	72.4623017	-68.95846509664			27.3851542
BC		152.43167483556	159.86224925422	-.3632068878176	1.2053329628242	-.355271368E-13			
		-48.17180963433	-17.5376983	-1.149307751611	-107.5376983	96.34361926865			
BC		152.43167483556	159.86224925422	.36320688781763	1.2053329628242	-.355271368E-14			-.355271368E-14
		-48.17180963433	-17.5376983	1.1493077516107	72.4623017	-96.34361926867			-96.3436193
TERRA		0.0	0.0	-.3632068878176	1.2053329628242	0.0			
		0.0	0.0	-1.149307751611	-107.5376983	0.0			
Total network loss		P-loss by summing injections =		2.179241326906E+01					

Solution at nodes with known voltage. Nodes that are shorted together by switches are shown as a group of names, with the printed result applying to the composite group. The entry "MUA" is  $\sqrt{P^2 + Q^2}$  in units of power, while "P.F." is the associated power factor.

Node name	Source node voltage		Injected source current		Injected source power	
	Rectangular	Polar	Rectangular	Polar	P and Q	MUA and P.F.
FR	120.	120.	.36320688781763	1.2053329628242	21.792413269058	72.319977769451
	0.0	0.0	1.1493077516107	72.4623017	-68.95846509664	0.3013332

Blank card ending requests for output variables. |BLANK OUTPUT

*Imagen 21. Resultados obtenidos en estado Estable.*

**REPORTE:**

El reporte de laboratorio deberá contener lo siguiente:

- ✓ Portada.
- ✓ Introducción.
- ✓ Objetivos.
- ✓ Desarrollo de la simulación.

Conclusiones

## **GUIA DE LABORATORIO # 2.**

### **“ANALISIS DE FERRORESONANCIA EN CIRCUITOS LC SERIES NO LINEALES”**

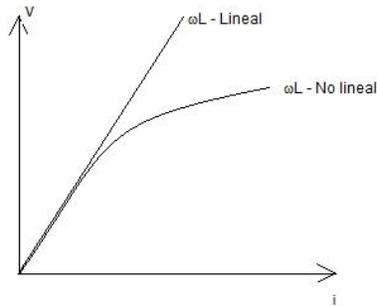
#### **OBEJTIVOS:**

- ✓ Analizar el comportamiento de un circuito LC serie no lineal bajo condiciones de ferresonancia.
- ✓ Analizar el comportamiento de un transformador bajo condiciones de ferresonancia.
- ✓ Obtener de manera experimental las gráficas de B y H, para poder obtener por medio de un osciloscopio la curva de histéresis de un transformador.
- ✓ Utilizar la curva de histéresis para obtener las propiedades magnéticas no lineales de un transformador.

#### **INTRODUCCION:**

La Ferresonancia es un problema que es común en los sistemas de potencia, este fenómeno se presenta generalmente en las subestaciones eléctricas, para que se presente son varios factores del sistema los que lo pueden provocar, entre los principales se pueden mencionar, la forma de construcción y características de los transformadores de potencia, los cuales se diseñan para que las pérdidas sean menores, el tipo de conexión de la subestación eléctrica, la longitud de la acometida, mala operación y maniobras de una subestación eléctrica.

La inductancia no lineal en un principio toma diferentes valores por encima del codo de saturación, como se puede apreciar en la Imagen 1, los materiales ferromagnéticos que muestran saturación tales como el hierro, están compuestos de regiones microscópicas llamadas dipolos magnéticos, que actúan como pequeños imanes permanentes. Antes de que un campo magnético externo sea aplicado al material, los dipolos se encuentran orientados al azar. Sus pequeños campos magnéticos apuntan en direcciones aleatorias y se cancelan entre sí, de modo que el material no produce un campo magnético global neto. El efecto de saturación ocurre cuando ya prácticamente todos los dipolos se encuentran alineados, por lo que cualquier incremento en el campo aplicado no puede causar una mayor alineación en los dipolos magnéticos.



**Imagen 1. Grafica de inductancia lineal y no lineal.**

**CURVA DE MAGNETIZACION.**

Es muy importante la caracterización del transformador seco que se utilizara para realizar las pruebas de laboratorio, el levantamiento de la curva de magnetización del transformador, permite el conocimiento de su comportamiento electromagnético.

Estos datos son de mucha importancia, además de brindar información acerca de las características de magnetización del núcleo del transformador, es indispensable para poder simular correctamente los diferentes circuitos serie LC no lineales, estos dan una estimación muy importante acerca de los rangos de valores de capacitancia para los cuales ciertos circuitos pueden presentar el fenómeno resonante.

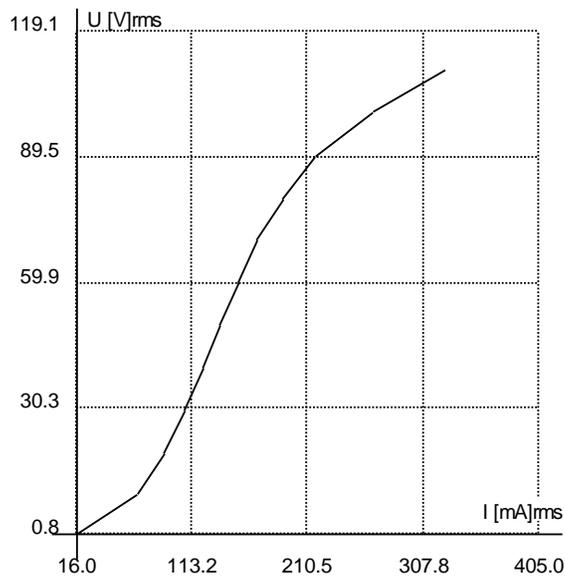
Las propiedades magnéticas macroscópicas de un material lineal, homogéneo e isótropo se definen en función de la susceptibilidad magnética,  $\chi_m$ , coeficiente adimensional que representa la proporcionalidad entre la magnetización o imanación  $M$  y la intensidad de campo magnético  $H$ , según la ecuación:

$$M = \chi_m H \quad (1)$$

La inducción magnética  $B$  está relacionada con estas dos variables:

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 H (1 + \chi_m) = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad (2)$$

Siendo  $\mu$  la permeabilidad magnética del medio,  $\mu_0$  la permeabilidad magnética del vacío y  $\mu_r$  la permeabilidad relativa ( $\mu_r = 1 + \chi_m$ ).



**Imagen 2. Curva de Magnetización.**

En la Imagen 2 vemos que se pueden distinguir tres partes claramente diferenciadas en la curva de imanación. Se observan: una primera zona reversible, en la cual si eliminamos el campo  $H$  exterior, la densidad de flujo también desaparece; una segunda zona irreversible; y una última parte, que representa la zona de saturación, en la cual la permeabilidad relativa es unitaria. El valor de  $B$  que se produce en un material ferromagnético debido a una determinada excitación magnética  $H$  no es una función uniforme, sino que depende del material.

### **EQUIPO Y MATERIALES A UTILIZAR**

Para la implementación del laboratorio acerca del fenómeno de la ferresonancia, se utilizará:

- k) Módulo de Pruebas para circuitos ferresonantes monofásicos.
- l) Fuente variable de Voltaje.
- m) Multímetro Digital.
- n) Amperímetro de Gancho.
- o) Conectores para realizar conexiones en modulo.
- p) Medidor Power Guide 4400 (DRANETZ).

### **DESARROLLO DE LABORATORIO.**

En este laboratorio se implementará un circuito LC serie no lineal, utilizando el módulo de circuitos monofásicos ferresonantes, en el cual se modelará la condición de una línea abierta en un sistema eléctrico, esta es una de las condiciones más frecuentes que puede aparecer, la cual es propicia para que el fenómeno de la ferresonancia aparezca, como se podrá comprender mejor con el desarrollo de este laboratorio.

## PORTE 1: OBTENCION DE CURVA DE MAGNETIZACION

Se analizará un transformador seco de baja tensión con datos de placa que se muestra en la tabla 1, este transformador ya está incorporado en el módulo de prueba para circuitos ferresonantes monofásicos a utilizar

<b>Tensión Nominal Primario.</b>	<b>120V</b>
<b>Corriente nominal Primaria.</b>	<b>9.21A</b>
<b>Tensión Nominal Secundario.</b>	<b>120V</b>
<b>Corriente nominal Secundario.</b>	<b>9.21<sup>a</sup></b>
<b>Frecuencia Nominal</b>	<b>60Hz</b>
<b>Potencia</b>	<b>1.2 KVA</b>

*Tabla 1. Datos del transformador Seco.*

### PASOS A SEGUIR:

#### PASO 1:

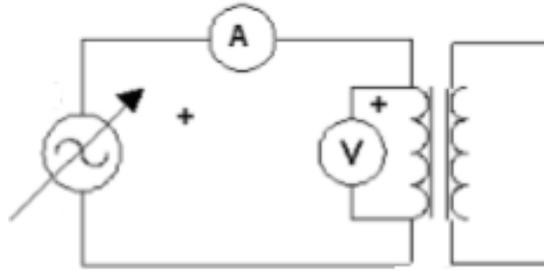
Consultar al instructor para reconocer y comprender la forma correcta de utilizar el módulo de prueba para circuitos ferresonante monofásicos, es de mucha importancia utilizar adecuadamente el equipo para evitar cualquier tipo de accidente eléctrico, ya sea en el equipo o en las personas que lo operan. En la Imagen 3, se presenta el modulo a utilizar para esta prueba.



*Imagen 3. Módulo de pruebas para circuitos ferresonantes monofásicos.*

#### PASO 2:

Implementar el circuito de la Imagen 4, en el módulo de pruebas para circuitos ferresonantes monofásico, para obtener la curva de magnetización del transformador.



*Imagen 4. Circuito de conexión para obtener curva de magnetización.*

**PASO 3:**

Llenar la tabla 2, con los datos de corriente obtenidos con los respectivos valores de voltaje dados.

Tensión RMS (V)	Corrientes RMS (A)
0.75	
5.00	
10.00	
15.00	
20.00	
25.00	
30.00	
35.00	
40.00	
45.00	
50.00	
55.00	
60.00	
65.00	
70.00	
75.00	
80.00	
85.00	
90.00	
95.00	
100.00	
105.00	
110.00	
115.00	
120.00	

*Tabla 2. Datos de la curva de magnetización del transformador, obtenidas experimentalmente.*

Si nos referimos a la curva de magnetización del transformador obtenida, y utilizando un par de puntos de la tabla 2, se puede obtener el valor de la reactancia inductiva con la ecuación siguiente.

$$X_L = \frac{V_{RMS\ nominal}}{I_{RMS\ magnetizacion}}$$

Con la ecuación que se muestra a continuación se puede encontrar el valor de la capacitancia que hace entrar en resonancia el circuito LC serie en estudio.

$$C = \frac{1}{\omega X_L}$$

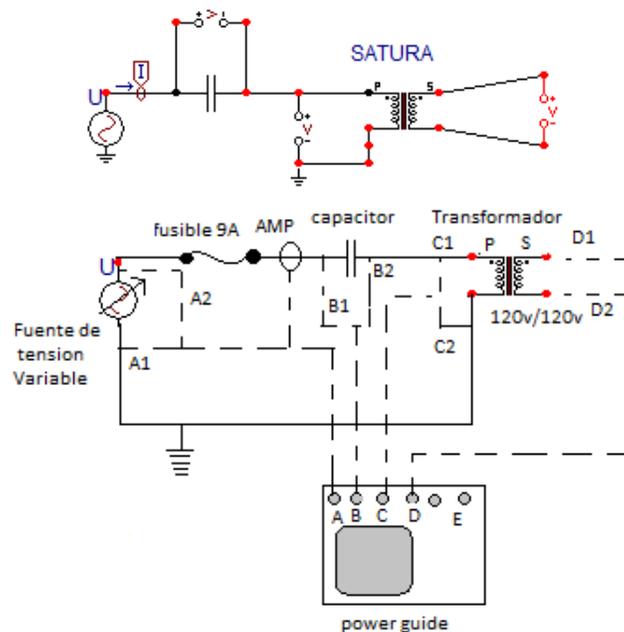
## PARTE 2: IMPLEMENTACION DE CIRCUITO LC SERIE NO LINEAL, EN CONDICION DE FERRORESONANCIA.

Con la implementación de este circuito se trata de crear las condiciones adecuadas y controladas para que el circuito serie LC no lineal entre en condición de ferresonancia, donde el capacitor instalado simula la capacitancia del cable de potencia de un sistema eléctrico y el transformador se utilizara con el devanado secundario en vacío.

### PASOS A SEGUIR

#### PASO 1:

Armar el circuito que aparece en la Imagen 5, en la cual se presenta el esquema del circuito LC no lineal, que se implementara en el laboratorio utilizando el módulo de pruebas para circuitos ferresonantes monofásico. El valor de capacitancia a utilizar será el de 10  $\mu\text{F}$



*Imagen 5. Diagrama esquemático de conexión para circuito LC serie ferresonante monofásico.*

**PASO 2:**

Observar con el Dranetz, para que nivel de voltaje se deforma la onda senoidal en el secundario del transformador en vacío, incluir esta imagen en el reporte de laboratorio y explicar el por qué sucede dicha deformación.

**Paso 3:**

Variar el voltaje de la fuente en rangos de 10V como se muestra en la tabla 3 y medir los datos de tensión y corriente requeridos de la tabla.

Tensión Fuente RMS (V)	Tensión Capacitor RMS (V)	Tensión Transformador Prim. RMS (V)	Tensión Transformador Sec. RMS (V)	Corriente Prim. RMS (A)
10				
20				
30				
40				
50.				
60				
70				
80				
90				
100				
110				

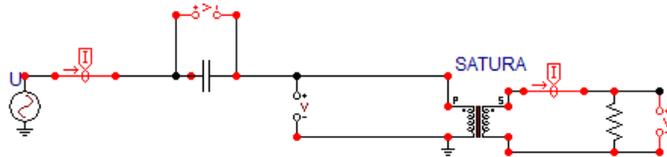
*Tabla 3. Datos experimentales del circuito resonante utilizando capacitancia de 10 $\mu$ F.*

**PARTE 3: IMPLEMENTACION DE CIRCUITO LC SERIE NO LINEAL, ELIMINANDO EL FENOMENO DE LA FERRORESONACIA.**

Con la implementación de este circuito se trata de eliminar las condiciones para que el fenómeno de la ferresonancia aparezca en un circuito serie LC no lineal, donde el capacitor instalado simula la capacitancia del cable de potencia de un sistema eléctrico, el transformador se utilizara instalando en el devanado secundario una pequeña carga resistiva de 5 $\Omega$ .

**PASOS A SEGUIR:****PASO 1:**

Armar el circuito que se presenta en la Imagen 5, en el cual se conecta una pequeña carga (5 $\Omega$ ), en el devanado secundario del transformador con el propósito de eliminar la ferresonancia del circuito serie LC no lineal.



**Imagen 6.** Diagrama de conexión de circuito serie LC no lineal, utilizando una pequeña carga resistiva en el secundario del transformador.

**PASO 2:**

Observar con el Dranetz, si existe deformación de onda para el mismo de voltaje observado, en el paso 2, de la parte 2 del laboratorio, incluir esta imagen en el reporte de laboratorio y explicar que sucede.

**PASO 3:**

Variar el voltaje de la fuente en rangos de 20V como se muestra en la tabla 4 y medir los datos de tensión y corriente requeridos de la tabla.

Tensión Fuente RMS (V)	Tensión Capacitor RMS (V)	Tensión Transformador Prim. RMS (V)	Tensión Transformador Sec. RMS (V)	Corriente Prim. RMS (mA)
20				
40				
60				
80				
100				
110				

**Tabla 4.** Datos experimentales del circuito resonante utilizando capacitancia de  $10\mu F$ .

**ASIGNACIONES:**

- ✓ Investigar como calcular los valores de XL Y C de las ecuaciones planteadas en la parte 1 del laboratorio.
- ✓ Explicar el comportamiento de un circuito serie LC no lineal cuando está en condición de ferresonancia.
- ✓ Con los datos obtenidos en la tabla 2, graficar la curva de magnetización del transformador.
- ✓ Explicar la función que cumple la resistencia instalada en el secundario del transformador y por qué desaparece la ferresonancia bajo esta condición de operación del circuito implementado.
- ✓ Comparar y explicar el porqué de las diferencias de los valores obtenidos en la tabla 3 y 4.

**REPORTE:**

El reporte de laboratorio deberá contener lo siguiente:

- ✓ Portada.
- ✓ Introducción.
- ✓ Objetivos.
- ✓ Desarrollo de la práctica.
- ✓ Conclusiones

### **GUIA DE LABORATORIO # 3.**

#### **“ANALISIS EN ATPDRAW, CIRCUITOS LC SERIES NO LINEALES”**

#### **OBEJTIVOS:**

- ✓ Analizar el comportamiento de un circuito LC serie no lineal bajo condiciones de ferresonancia.
- ✓ Analizar el comportamiento de un transformador bajo condiciones de ferresonancia.
- ✓ Realización de simulaciones en el ATPDraw, para observar el fenómeno de ferresonancia en un circuito LC serie no lineal.

#### **INTRODUCCION:**

Se presenta una breve guía de uso del programa simulador para sistemas de potencia el cual es de mucha utilidad, para validar resultados experimentales obtenidos en el laboratorio, se utiliza el simulador ATP-EMTP (Alternative Transients Program – Electromagnetic Transient Program).

El ATP es un software universal para realizar simulaciones digitales de fenómenos electromagnéticos transitorios. Con este programa digital, se pueden modelar redes complejas y sistemas de control de cualquier estructura, tiene amplias capacidades de modelado y otras características importantes, además del cálculo de transitorios.

En resumen los estudios que utilizan ATP, tienen objetivos que se pueden clasificar en 2 categorías fundamentales:

1. En los diseños que incluyen el dimensionamiento de los equipos, coordinación de aislamiento, nivel de tensión, diseño de los elementos de protección y control, etc.
2. En la solución de problemas de operación, estos suelen ser fallas en las líneas, análisis de sobretensiones, análisis de transitorios.

Esta guía de laboratorio se enfocara al uso del editor gráfico que pose ATP, el cual es de fácil comprensión y uso, es de mencionar que solo es una guía introductoria, profundizar más en el estudio de esta herramienta de simulación potente, queda a disposición del estudiante.

## 1. DESARROLLO DE LABORATORIO.

Para lograr una mayor comprensión del uso de simulador ATPDRAW, se implementara un ejemplo que está relacionado con la guía de laboratorio acerca del análisis de circuitos series LC no lineales, ya que se hará uso de ciertos datos obtenidos del transformador en dicho laboratorio, para introducirlos en el simulador y obtener mejores resultados

## 2. CREACION DE CIRCUITOS MONOFASICOS FERRORESONANTES EN ATPDraw.

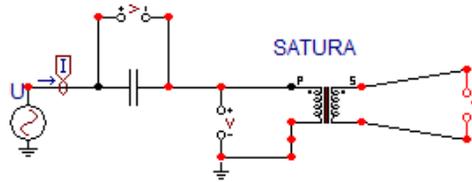
Para una mejor comprensión de aplicación del programa ATPDraw y sus funciones a continuación se explicara el proceso de creación de los circuitos eléctricos LC no lineales, así como el ingreso de datos de los diferentes elementos.

Para tener un mejor entendimiento de cómo usar el ATPDraw se va a simular el circuito de la Imagen 1, paso a paso. El siguiente proceso de simulación es prácticamente similar para todos los circuitos eléctricos, lo que varía es la cantidad de elementos. La tabla 1, muestra los parámetros eléctricos del transformador que se utilizara en la simulación, estos son indispensables para obtener una simulación más precisa.

Datos del transformador	
$X_m$	<b>358.8910<math>\Omega</math></b>
$R_m$	<b>759.2522<math>\Omega</math></b>
$F_o$	<b>0.45</b>
$I_{oc}$	<b>0.376A</b>
$W_{oc}$	<b>20.06W</b>
$I_{sc}$	<b>9.213A</b>
$W_{sc}$	<b>38.31W</b>
$X_1$	<b>1.5636<math>\Omega</math></b>
$X_2$	<b>0.2129<math>\Omega</math></b>
$L_1$	<b>4.1476mH</b>
$L_2$	<b>4.6908mH</b>
$r_{dc1}$	<b>2.5833<math>\Omega</math></b>
$r_{dc2}$	<b>2.5833<math>\Omega</math></b>
$r_{ac1}$	<b>3.2292<math>\Omega</math></b>
$r_{ac2}$	<b>3.1<math>\Omega</math></b>

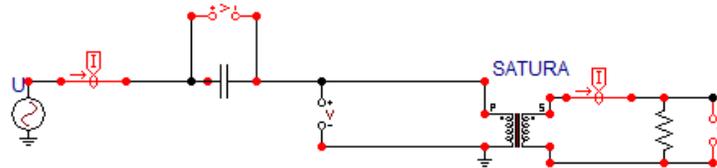
*Tabla 1. Parámetros eléctricos de transformador.*

Con la implementación de este circuito se trata de crear las condiciones adecuadas para que el circuito serie LC no lineal entre en condición de ferresonancia.



**Imagen 1. Esquema dibujado en ATPDraw, de circuitos ferresonantes monofásicos con devanado secundario del transformador en vacío.**

En la Imagen 2, se presenta el modelo de circuito a simular en ATPDraw, en el cual se conecta una pequeña carga ( $5\Omega$ ), en el devanado secundario del transformador con el propósito de eliminar la ferresonancia del circuito serie LC no lineal.



**Imagen 2. Esquema dibujado en ATPDraw, de circuitos ferresonantes monofásicos utilizando una pequeña carga resistiva en el secundario del transformador.**

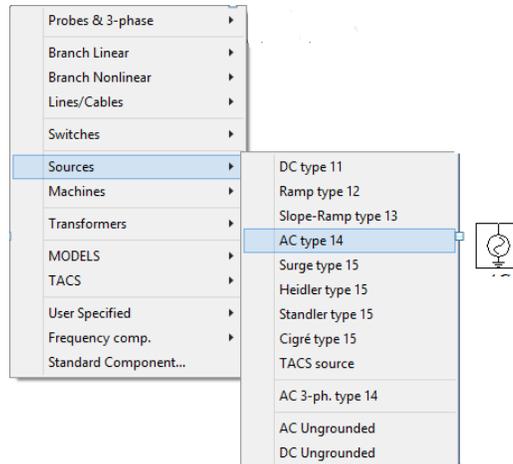
### 3. SIMULACION DE CIRCUITO SERIE LC NO LINEAL, BAJO CONDICION DE FERRORESONANCIA.

El circuito a realizar es el mostrado en la Imagen 1, el valor de capacitancia utilizado va a ser de  $10\ \mu\text{F}$ . Con el propósito de comparar estos resultados con los datos obtenidos en la realización del laboratorio de Análisis de Ferresonancia en circuitos LC series no lineales.

Para validar los datos obtenidos, se hace el estudio teórico de este mismo circuito mediante el uso de ATPDRAW, utilizando el esquema de la Imagen 1, para los mismos valores de tensión de alimentación utilizados en el circuito experimental. A continuación se muestran algunos pasos a seguir en ATPDraw, para simular este tipo de circuitos:

#### Paso 1: Fuentes del Tensión.

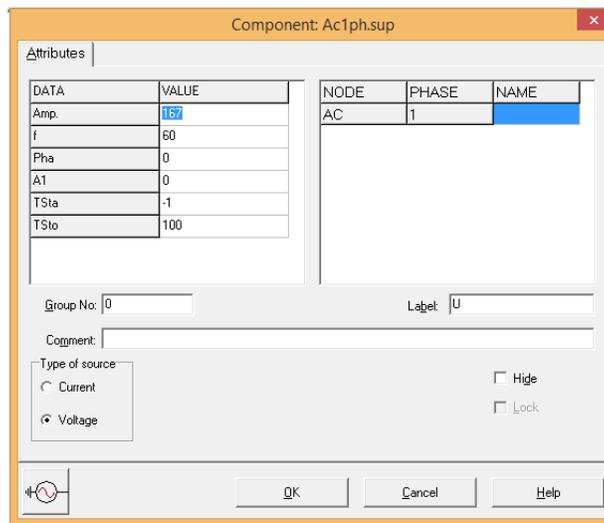
Se coloca la fuente de tensión para la cual se elige del menú desplegable de elementos que se muestra en la Imagen 3, se escoge **Source-> AC type 14**, esta es una fuente de tensión monofásica. En la pantalla de diseño se obtiene el icono de la fuente de voltaje.



**Imagen 3. Ventana de ATPDraw, para elegir fuente de voltaje monofásico AC type 14.**

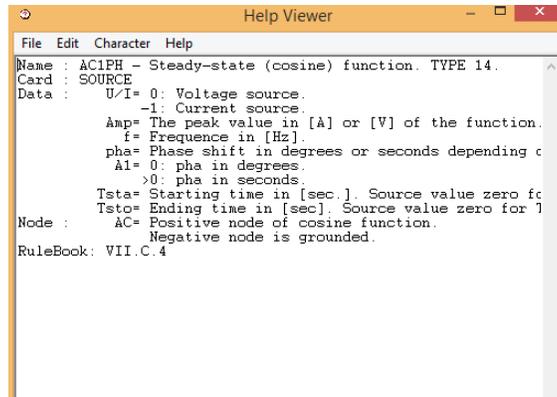
**Paso 2: Ingreso de datos de fuente de voltaje.**

La forma de cargar los datos de la fuente de voltaje es sencilla, se hace doble clic con el botón izquierdo se presenta la ventana que se muestra en la Imagen 4, el valor ingresado debe ser la amplitud del voltaje requerido.



**Imagen 4. Ventana de datos del elemento AC type 14, en ATPDraw.**

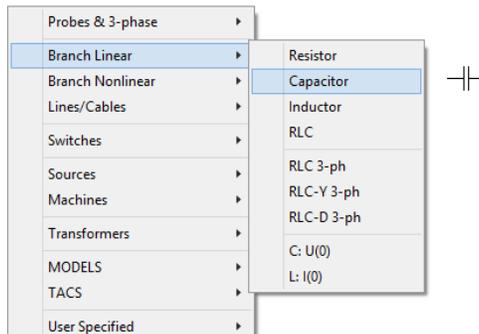
Una vez modificado los campos se hace clic en el botón ok y se sale a la pantalla principal. Al salir se observa que el elemento cambia de color (negro), esto es porque se ha hecho el ingreso de datos del elemento, si esta operación no se realiza el elemento toma un color rojo. La explicación de todos los parámetros se obtiene mediante el botón de Help del elemento, como se muestra en la Imagen 5.



*Imagen 5. Ventana Help del elemento AC type 14, en ATPDraw.*

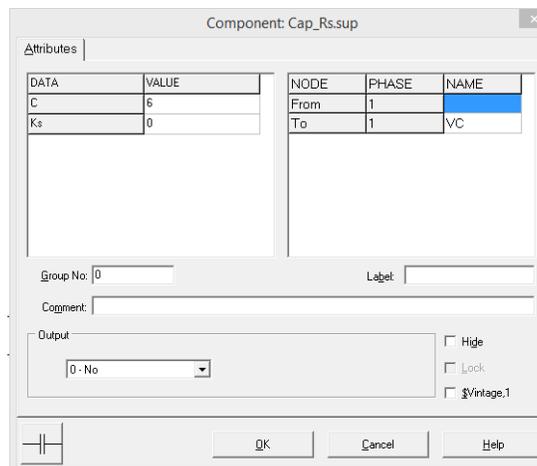
### Paso 3: Ingreso de valor de Capacitancia.

Se ingresa el valor de capacitancia que se desea instalar en el sistema, para lo cual del menú desplegable de elementos se escoge **Branch Linear -> Capacitor**, como se muestra en la Imagen 6, este elemento representa un capacitor monofásico lineal



*Imagen 6. Ventana de selección del tipo de capacitor a utilizar.*

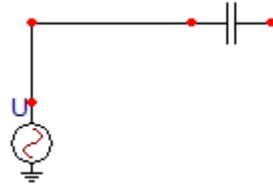
Al hacer doble clic izquierdo sobre el elemento aparece la ventana que se muestra en la Imagen 7, en esta ventana se ingresa el valor de capacitancia deseado es de tener en consideración las unidades de los datos, para esto es de revisar la opción Help del elemento como se explicó en el paso 2, con la Imagen 4.



*Imagen 7. Ventana de datos del elemento capacitivo en ATPDraw.*

#### Paso 4: Conexión de Elementos.

Se conectan los dos elementos entre sí, para realizar esta operación es de situarlos de una forma que sus bornes queden unidos. Otra posibilidad es unirlos mediante una línea que represente una conexión monofásica o trifásica según sea la naturaleza de los elementos interconectados, quedando la conexión de los elementos como se muestra en la Imagen 8.

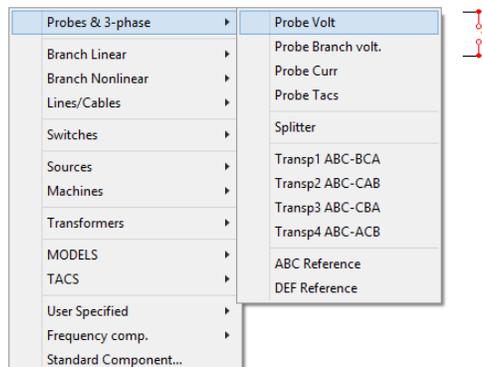


*Imagen 8. Esquema de Unión de Dos elementos en ATPDraw.*

Es de mencionar que para los demás elementos se siguen los mismos pasos, tomando en consideración los datos de cada elemento, para lo cual el Help del elemento es de mucha utilidad.

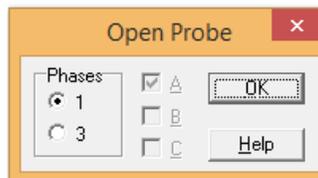
#### Paso 5: Medidores de Voltaje.

El medidor de voltaje utilizado para la simulación fue el **Probe Branch Volt**, la forma de seleccionar este tipo de medidor se muestra en la Imagen 9, este es un voltímetro, que mide la tensión entre dos puntos del sistema



*Imagen 9. Ventana de ATPDraw, para selección de medidor de voltaje.*

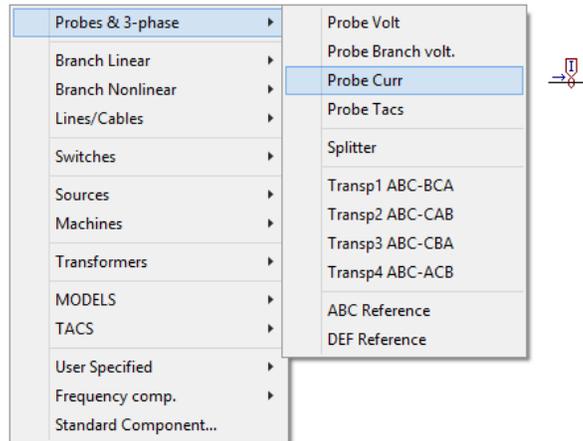
En la Imagen 10, se muestra la ventana para seleccionar si se desea un medidor monofásico o trifásico según la necesidad del sistema a simular.



*Imagen 10. Ventana de ATPDraw, para selección del tipo de medidor de voltaje.*

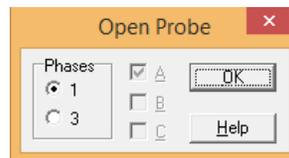
### Paso 6: Medidor de corriente.

Para medir la corriente del sistema se utilizó el medidor **Probe Curr**, la forma de seleccionar este medidor de corriente se muestra en la Imagen 11, este es un amperímetro que mide la corriente que circula a través de una rama del circuito eléctrico.



*Imagen 11. Ventana de ATPDRAW, para selección de medidor de corriente.*

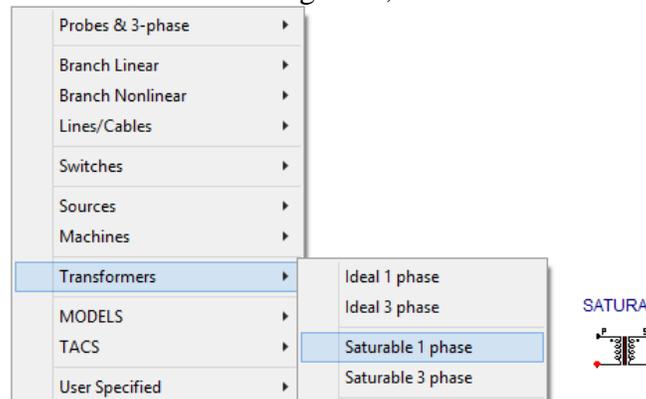
En la Imagen 12, se muestra la ventana para seleccionar si se desea un medidor monofásico o trifásico según la necesidad del sistema a simular



*Imagen 12. Ventana de ATPDraw, para selección del tipo de medidor.*

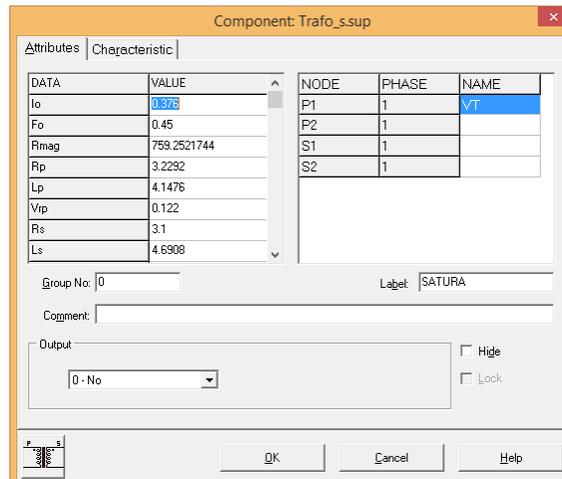
### Paso 7: Modelo de Transformador.

El modelo del transformador a utilizar para realizar las simulaciones fue el **Saturable 1 phase**, el cual es un transformador saturable monofásico, la forma de cómo seleccionar este tipo de transformador se muestra en la Imagen 13,



*Imagen 13. Menú de transformadores en ATPDraw.*

Este modelo de transformador, es de mucha utilidad ya que permite introducir los parámetros eléctricos que caracterizan al transformador, y de esta forma se obtienen resultados simulados cercanos a los valores obtenidos en el laboratorio, ya que permite modelar de una forma más cercana a la operación real del transformador eléctrico. En la Imagen 14, se muestra la ventana en la cual se introducen los parámetros del transformador, es recomendable consultar el Help del elemento.

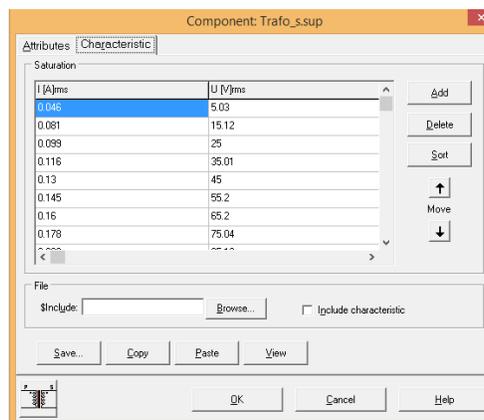


**Imagen 14.** Ventana de ATPDraw, para introducir los parámetros del transformador.

**NOTA:** Para introducir los parámetros solicitados en el menú que se muestra en la ventana de la Imagen 14 es necesario, ver los parámetros eléctricos del transformador que se muestran en la tabla 1.

### Paso 8: Introducción de curva de magnetización del Transformador.

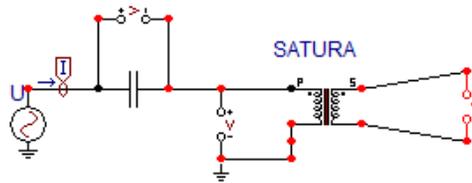
Este modelo además de los parámetros eléctricos del transformador permite introducir los datos de corriente y voltaje de la curva de magnetización del transformador, en la Imagen 15, se muestra la ventana en la cual se pueden introducir estos parámetros.



**Imagen 15.** Ventana de ATPDraw, para carga de curva de saturación del transformador.

**NOTA:** Para introducir los parámetros solicitados en el menú que se muestra en la ventana de la Imagen 15, es necesario revisar los datos obtenidos del laboratorio donde se obtuvo la curva de magnetización del transformador.

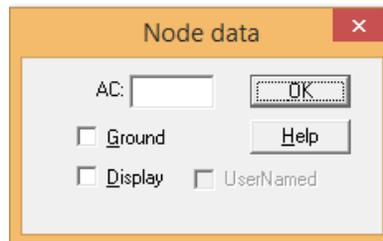
Una vez terminado el modelo del circuito que se desea simular se obtiene el siguiente circuito eléctrico dibujado en ATPDraw que se muestra en la Imagen 16.



*Imagen 16. Modelo final simulado en ATPDraw.*

### **Paso 9: Etiquetar Nodos.**

Todos los elementos tienen la opción **Label** que sirve para etiquetar a los elementos, es decir el usuario puede poner un nombre propio para identificar al elemento. Esto se hace al finalizar el circuito que se desea simular, para realizar esta acción se hace clic derecho en el nodo que se desea nombrar o poner algún nodo a tierra y aparece la ventana de la Imagen 17.



*Imagen 17. Ventana de ATPDraw, para carga de curva de saturación del transformador.*

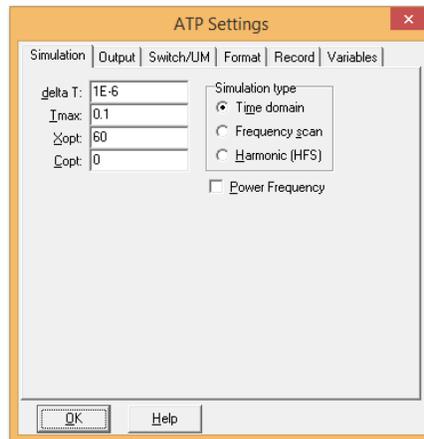
Para identificar el nodo, escribimos el nombre en el cuadro de texto, si se quiere que se muestre en la pantalla se hace check en la opción **Display**, y si se desea hacer tierra, se utiliza la opción **Ground**.

### **Paso 10: Guardar proyecto.**

Antes de correr el programa con el **compilador ATP**, se debe guardar la representación gráfica del circuito en un archivo **.adp** para lo cual se hace clic en cualquiera de los iconos de guardado .

### **Paso 11: Configuración de parámetros de Simulación.**

Después de guardado el archivo, se deben de configurar los parámetros del proceso de simulación. Estos parámetros son los que definen las condiciones o ajustes generales para la simulación del sistema eléctrico que se ha modelado. Para ingresar a la ventana para modificar estos parámetros se debe escoger la opción **ATP -> Setting** del menú principal y aparece una ventana similar a la de la Imagen 18.



**Imagen 18. Ventana de ATPDraw Setting.**

Se tienen varias pestañas y cada una de ellas con diferentes opciones, a continuación se detalla cada una de las opciones más comunes y utilizadas.

- ✓ **Delta T:** pasos de tiempo en segundos en que se realiza la simulación.
- ✓ **Tmax:** Tiempo máximo de la simulación en segundos.
- ✓ **Xopt:** indica si las inductancias de los elementos deben ir en [mH], si el valor es 0 y si es igual al de la frecuencia del sistema las inductancias deben ir en [ $\Omega$ ].
- ✓ **Copt:** indica las unidades de las capacitancias del sistema, si el valor es 0 las unidades son [ $\mu$ f], caso contrario las capacitancias deben ir en [micro-mho].
- ✓ **Freq:** frecuencia del sistema en Hz.
- ✓ **Power Frequency:** al hacer check en esta casilla habilita la opción de ingresar la frecuencia del sistema.
- ✓ **Simulation Type:** se escoge el tipo que se desea.
  - ✓ Time domain.
  - ✓ Frequency Scan.
  - ✓ Harmonic Frequency Scan.

#### **4. RECOPIACION DE DATOS DE SIMULACION.**

Simulado el circuito de la Imagen 16, realizar las siguientes simulaciones necesarias para obtener los datos pedidos por la tabla 2, es de tener en cuidado con el valor solicitado por la fuente de voltaje a la hora de ingresar el parámetro **Vp** en el simulador. Ya que el valor a ingresar es el valor pico del voltaje requerido para la simular.

Tensión Fuente RMS (V)	Tensión Capacitor RMS (V)	Tensión Transformador Prim. RMS (V)	Tensión Transformador Sec. RMS (V)	Corriente Prim. RMS (A)
10				
20				
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				
100				
110				

*Tabla 2. Datos de circuito serie LC no lineal, utilizando capacitancia de 10 $\mu$ F.*

### 5. SIMULACION DE CIRCUITO SERIE LC NO LINEAL, ELIMINANDO EL FENOMENO DE FERRORESONANCIA

El montaje a realizar es el expuesto en la Imagen 2, utilizando un valor de capacitancia de 10 $\mu$ F, y un valor de resistencia de carga en el secundario del transformador de 5 $\Omega$ . Los resultados simulados obtenidos anotarlos en la tabla 3.

Tensión Fuente RMS (V)	Tensión Capacitor RMS (V)	Tensión Transformador Prim. RMS (V)	Tensión Transformador Sec. RMS (V)	Corriente Prim. RMS (A)
10				
20				
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				
100				
110				

*Tabla 3. Datos obtenidos de simulación utilizando capacitancia de 10 $\mu$ F.*

### **ASIGNACIONES:**

- ✓ Explicar porque desaparece el fenómeno de la ferresonancia en la implementación del circuito 2.
- ✓ De los resultados obtenidos en la tabla 2 y 3, calcular la relación de la tensión del capacitor y el transformador, respecto a la tensión de la fuente y graficarlos
- ✓ Presentar las conclusiones de las ventajas de utilizar el simulador para este tipo de circuitos.

### **REPORTE:**

El reporte de laboratorio deberá contener lo siguiente:

- ✓ Portada.
- ✓ Introducción.
- ✓ Objetivos.
- ✓ Desarrollo de la práctica.
- ✓ Conclusiones