

**IDENTIFICACION Y ANALISIS DE LOS EFECTOS ASOCIADOS CON LA
COMPENSACIÓN CAPACITIVA SERIE Y PARALELA EN LA PRUEBA DE
CORTOCIRCUITO DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE**

CARLOS ALBERTO VARELA

DIRECTORES

**GUILLERMO APONTE MAYOR Ph.D
Ingeniero Electricista**

**IVAN FELIPE ORDUÑA ARCOS
Ingeniero Electricista**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA
PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA ELECTRICA
SANTIAGO DE CALI**

2012

**IDENTIFICACION Y ANALISIS DE LOS EFECTOS ASOCIADOS CON LA
COMPENSACIÓN CAPACITIVA SERIE Y PARALELA EN LA PRUEBA DE
CORTOCIRCUITO DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE**

TRABAJO DE GRADO

Presentado por:

CARLOS ALBERTO VARELA

**PARA OBTENER EL GRADO DE INGENIERO ELECTRICISTA DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA
PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA ELECTRICA
SANTIAGO DE CALI**

2012

NOTA DE ACEPTACION:

Director

ING. GUILLERMO APONTE Ph.D.

Director

ING. IVAN FELIPE ORDUNA.

SANTIAGO DE CALI 2012

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por permitirme conocerle y darme una familia maravillosa que me apoyó y tuvo paciencia en todo momento, a mi Madre y a mi Padre que los quiero mucho, a mis hermanos, a mi novia y a mi director de tesis Iván Felipe Orduña al cual le debo la posibilidad de haber culminado este proyecto de grado.

Carlos Alberto Varela

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
 1. ELEMENTOS ELECTRICOS ASOCIADOS A LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO FRANCO EN EL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION	14
1.1 Definición.....	14
1.2 Prueba de Cortocircuito Franco en el Transformador	19
1.3 El Condensador	23
1.3.1 Tiempo de Carga y Descarga del Condensador	25
1.4 Condensadores de Potencia	26
1.4.1 Conexión en Estrella con Neutro Flotante.....	28
1.4.2 Conexión en Estrella con Neutro Aterrizado	28
1.4.3 Conexión en Delta.....	28
1.5 Circuito RLC	29
1.5.1 Circuito RL Serie con C Paralelo	30
1.5.2 Circuito RLC Serie	32
1.6 Mecanismos de Protección.....	36
1.6.1 Protección Contra Magnitudes Elevadas de Corriente	36
1.6.2 Protección contra sobretensiones	37
 2. SIMULACION DE LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO FRANCO CON COMPENSACION DE REACTIVOS	38
2.1 Introducción	38
2.2 Prueba de cortocircuito franco monofásico empleando banco de condensadores en paralelo	45

2.3 Prueba de cortocircuito franco a transformadores de distribución empleando banco de condensadores en serie	72
2.3.1 Transformador con nivel de tensión de 13.8kV	72
2.3.1.1 Análisis Teórico	75
2.3.1.2 Análisis Económico	80
2.3.2 Transformador con nivel de tensión de 19.9kV	80
2.3.2.1 Análisis Teórico	83
2.3.2.2 Análisis Económico	87
2.3.3 Transformador con nivel de tensión de 34.5kV	87
2.3.3.1 Análisis teórico	90
2.3.3.2 Análisis Económico	93
 3. EFECTOS ASOCIADOS A LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO CON COMPENSACION DE REACTIVOS	94
3.1 Efectos Asociados a la Compensación de reactivos en paralelo	94
3.2 Efectos Asociados a la Compensación de reactivos en serie	97
3.2.1 Efectos Asociados a la Compensación de Voltaje a transformadores de 19.9 kV	97
3.2.2 Efectos Asociados a la Compensación de Voltaje a transformadores de 34.5kV	100
3.3 Prueba de cortocircuito a tensión nominal con compensación de reactivos implementada en el campo de pruebas.....	103
3.3.1 Prueba de cortocircuito a tensión nominal sin compensación de reactivos	104
3.3.2 Prueba de cortocircuito a tensión nominal con compensación de reactivos	107
 4. CONCLUSIONES	111
 BIBLIOGRAFIA.....	113

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 1. Esquema representativo del transformador.....	14
FIGURA 2. Modelo circuital del transformador	15
FIGURA 3. Modelo circuital del transformador en cortocircuito	17
FIGURA 4. Modelo simplificado del transformador en cortocircuito.....	17
FIGURA 5. Conexión del transformador trifásico alimentado por dos fases	21
FIGURA 6. Voltaje y corriente en el instante de conexión del condensador	27
FIGURA 7. Circuito asociado a la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos en paralelo.....	31
FIGURA 8. Corriente de la fuente vs potencia reactiva del condensador	31
FIGURA 9. Circuito asociado a la prueba de cortocircuito franco con compensación serie.....	33
FIGURA 10. Variación de la capacitancia vs voltaje en el transformador	34
FIGURA 11. Esquema representativo del transformador en el simulador	38
FIGURA 12. Parámetros requeridos del interruptor y del timer para la simulación	43
FIGURA 13. Parámetros de la fuente y del transformador para la simulación	43
FIGURA 14. Simulación de la prueba cortocircuito franco modelo circuital	44
FIGURA 15. Simulación de la prueba cortocircuito franco	44
FIGURA 16. Parámetros requeridos del condensador para la simulación	48
FIGURA 17. Prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos	48
FIGURA 18. Corriente asociada a los equipos que intervienen en la simulación.....	49
FIGURA 19. Tiempo de estabilización prueba sin compensación de reactivos	51
FIGURA 20. Tiempo de estabilización prueba con compensación de reactivos	51
FIGURA 21. Prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos	55
FIGURA 22. Corriente asociada a los equipos que intervienen en la simulación.....	55
FIGURA 23. Tiempo de estabilización prueba con compensación de reactivos	57
FIGURA 24. Parámetros de la fuente y breaker requeridos por el simulador	60
FIGURA 25. Parámetros del transformador trifásico requerido por el simulador	60
FIGURA 26. Simulación trifásica de la prueba de cortocircuito franco	61
FIGURA 27. Prueba trifásica de cortocircuito franco con compensación de reactivos con capacitores a 7.6kV	62
FIGURA 28. Corriente de los elementos asociados a la prueba de cortocircuito franco con compensación	62

FIGURA 29.	Simulación prueba monofásica de cortocircuito franco al transformador trifásico ..	69
FIGURA 30.	Corriente de los equipos asociados a la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos	69
FIGURA 31.	Tiempo de estabilización de la prueba de cortocircuito franco compensación de reactivos	71
FIGURA 33.	Simulación de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos..	76
FIGURA 34.	Corriente en el transformador con y sin compensación de reactivos	77
FIGURA 35.	Voltaje en el transformador con y sin compensación de reactivos	77
FIGURA 36.	Tiempo de estabilización de la prueba de cortocircuito franco con compensación	79
FIGURA 37.	Corriente en el transformador con y sin compensación de reactivos	83
FIGURA 38.	Voltaje en el transformador con y sin compensación de reactivos	84
FIGURA 39.	Pico asimétrico en la prueba de reactivos con y sin compensación de reactivos ..	85
FIGURA 40.	Tiempo de estabilización de la prueba de cortocircuito franco con compensación	86
FIGURA 41.	Simulación de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos..	90
FIGURA 42.	Corriente en el transformador con y sin compensación de reactivos	90
FIGURA 43.	Voltaje en el transformador con y sin compensación de reactivos	91
FIGURA 44.	Tiempo de estabilización del ensayo con compensación de reactivos	92
FIGURA 45.	Circuito para el análisis de los efectos asociados a la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos.....	95
FIGURA 46.	Condensador # 1 en cortocircuito durante el ensayo	96
FIGURA 47.	Apertura del condensador # 1 durante el ensayo	96
FIGURA 48.	Voltaje y corriente en el capacitor variando la capacitancia	98
FIGURA 49.	Voltaje en el transformador variando la capacitancia del condensador	99
FIGURA 50.	Tensión en el capacitor variando la impedancia de cortocircuito	99
FIGURA 51.	Voltaje y corriente en el capacitor variando la capacitancia	101
FIGURA 52.	Voltaje en el transformador variando los reactivos compensados	101
FIGURA 53.	Tensión en el capacitor variando la impedancia de cortocircuito	102
FIGURA 54.	Variación de la capacitancia en el transformador de 100kVA	102
FIGURA 55.	Osciloscopio implementado durante el ensayo de cortocircuito franco	103
FIGURA 56.	Corriente de corto obtenida en la prueba simulada sin compensación de reactivos	105
FIGURA 57.	Corriente de falla obtenida del ensayo implementado en el campo de pruebas ..	105
FIGURA 58.	Prueba de cortocircuito a tensión nominal al transformador 15kVA	106

FIGURA 59. Conexión en serie del banco de condensadores 7.6kV	107
FIGURA 60. Simulación con los datos teóricos de la prueba de cortocircuito a tensión nominal	109
FIGURA 61. Prueba implementada en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle	109
FIGURA 62. Prueba de cortocircuito a tensión nominal con compensación de reactivos	110

LISTADO DE TABLAS

TABLA 1. Pruebas de diagnóstico para transformadores	16
TABLA 2. Parámetros requeridos para la simulación	39
TABLA 3. Transformadores empleados en el proyecto para el caso paralelo	40
TABLA 5. Parámetros del transformador monofásico 167.5kVA.....	40
TABLA 6. Parámetros exigidos por la herramienta computacional	41
TABLA 7. Resultados obtenidos de las pruebas de rutina	41
TABLA 8. Resultados obtenidos de la prueba de cortocircuito franco	45
TABLA 9. Características de los capacitores a implementar en el simulador	46
TABLA 10. Capacitores a 7.6kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco.....	47
TABLA 11. Validación resultados de la prueba de cortocircuito franco.....	49
TABLA 10. Tiempo de estabilización del circuito de prueba.....	52
TABLA 11. Parámetros de los capacitores a implementar en el simulador.....	53
TABLA 12. Capacitores a 13.2kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco	53
TABLA 13. Reactivos requeridos para los diferentes niveles de compensación	54
TABLA 14. Resultados obtenidos de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos.....	56
TABLA 15. Tiempo de estabilización del circuito de prueba.....	57
TABLA 16. Parámetros del transformador trifásico 500kVA a 13.2kV	58
TABLA 17. Resultados obtenidos de las pruebas de rutina.....	59
TABLA 18. Validación resultados obtenidos de la prueba de cortocircuito franco	61
TABLA 19. Resultados obtenidos de las pruebas de cortocircuito franco con compensación de reactivos.....	63
TABLA 20. Capacitores 7.62kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco.....	64
TABLA 21. Capacitores 13.2kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco	65
TABLA 22. Capacitores requeridos para los diferentes niveles de compensación	66
TABLA 23. Capacitores requeridos para la prueba trifásica de cortocircuito franco	67
TABLA 24. Capacitores requeridos para los diferentes niveles de compensación	68
TABLA 25. Validación resultados de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos.....	70
TABLA 26. Tiempo de estabilización de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos.....	71
TABLA 27. Capacitores 13.2kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco.....	73
TABLA 28. Parámetros del capacitor a implementar en el simulador	74
TABLA 29. Capacitores 2.4kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco	74

TABLA 30. Validación resultados de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos serie	78
TABLA 31. Tiempo de estabilización de la prueba de cortocircuito franco.....	79
TABLA 32. Costo de implementación de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos en serie	80
TABLA 33. Capacitores 13.2kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco.....	81
TABLA 34. Capacitores 2.4kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco	82
TABLA 35. Validación resultados de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos.....	84
TABLA 36. Tiempo de estabilización del circuito de prueba de cortocircuito franco.....	86
TABLA 37. Costo de implementación de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos en serie	87
TABLA 38. Capacitores 13.2kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco.....	88
TABLA 39. Capacitores 2.4kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco	89
TABLA 40. Validación resultados teóricos vs simulados del ensayo.....	91
TABLA 41. Tiempo de estabilización de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos.....	93
TABLA 42. Costo de implementación de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos en serie	93
Tabla 43. Variación de la capacitancia en el ensayo de cortocircuito franco.....	94
tabla 44. Variación de la capacitancia en el ensayo de cortocircuito franco.....	98
TABLA 45. Variación de la capacitancia en el ensayo de cortocircuito franco	100
TABLA 46. Transformador 15kVA implementando para la prueba real	104
TABLA 47. Datos del transformador 15kVA implementando para el ensayo	108

INTRODUCCIÓN

Los transformadores han sido importantes en la historia de la distribución de energía eléctrica tanto en Colombia como a nivel mundial, esto se debe al papel que desempeñan en los sistemas de potencia, los cuales permiten transportar de manera eficiente y económica la energía eléctrica a las ciudades, poblaciones, industrias y donde se requiera.

Debido a la implementación de los transformadores es posible aumentar la magnitud del voltaje en el sistema, lo cual genera menores pérdidas en las líneas de transmisión; adicional a lo anterior también se aumenta la vida útil de los conductores y se mejora la calidad de la energía transmitida.

Por tal motivo los transformadores deben estar en un estado óptimo de funcionamiento por medio de pruebas de diagnóstico confiables y eficientes, las cuales establecen una información real acerca de su condición, y de esta manera se evitan fallas a largo plazo en el dispositivo.

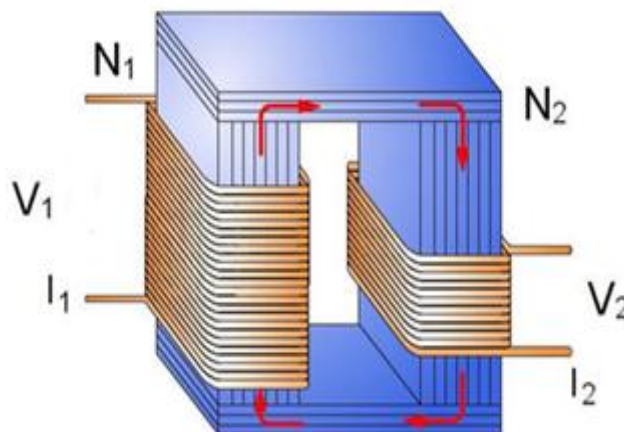
Una de las maneras de incrementar la calidad y confiabilidad de los transformadores es garantizando su aptitud para soportar los esfuerzos electrodinámicos que se presentan bajo una condición de cortocircuito brusco. Esta tarea exige la solución de complejos problemas técnico-científicos como el cálculo de campos magnéticos, de fuerzas electrodinámicas, de las características mecánicas y la comprobación experimental del ensayo de corto franco [1].

1. ELEMENTOS ELECTRICOS ASOCIADOS A LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO FRANCO EN EL TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION

1.1 Definición

El transformador es una maquina electromagnética monofásica o trifásica, compuesta de dos o más bobinas sin conexión eléctrica pero acopladas magnéticamente, por medio de un núcleo que por lo general es magnético tal y como se observa en la Figura 1, estas propiedades facilitan la inducción entre las fases. Su principal uso se da para elevar o reducir tensiones y corrientes a una misma frecuencia y potencia aparente; también es utilizado como mecanismo de protección y/o de medición [2].

Figura 1. Esquema representativo del transformador



Donde

V_1 = Voltaje nominal del devanado primario del transformador (V).

V_2 = Voltaje nominal del devanado secundario del transformador (V).

I_1 = Corriente nominal del devanado primario del transformador (A).

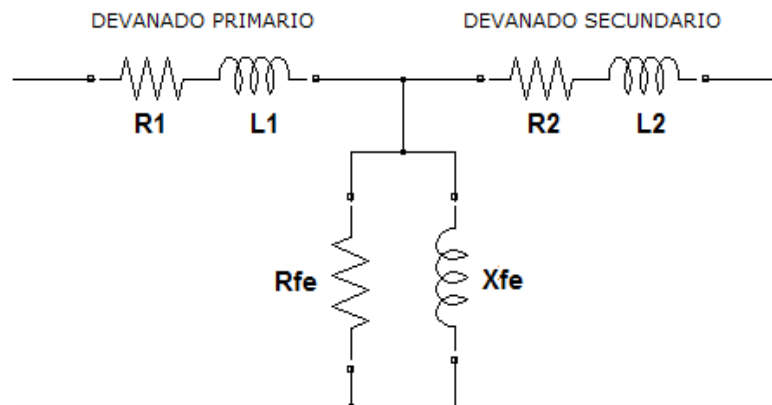
I_2 = Corriente nominal del devanado secundario del transformador (A).

N_1 = Numero de vueltas del devanado primario del transformador.

N_2 = Numero de vueltas del devanado secundario del transformador.

Una manera simple de comprender el comportamiento de los transformadores es el modelo circuital equivalente mostrado en la Figura 2; en este tipo de esquema, los devanados se representan mediante un circuito RL serie, y la rama de magnetización se asemeja a un circuito RL paralelo [3].

Figura 2. Modelo circuital del transformador



Donde

$R1$ = Resistencia óhmica del devanado primario del transformador (Ω).

$R2$ = Resistencia óhmica del devanado secundario del transformador (Ω).

$L1$ = Inductancia del devanado primario del transformador (H).

$L2$ = Inductancia del devanado secundario del transformador (H).

R_{fe} = Resistencia representativa de pérdidas por histéresis (Ω)

X_{fe} = Reactancia de magnetización (Ω).

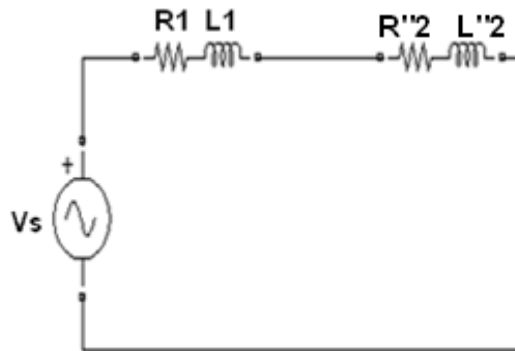
Durante el transcurso de su vida útil, el transformador está sometido a diferentes tipos de estrés, sufriendo impactos térmicos, mecánicos, químicos, eléctricos y electromagnéticos. Teniendo en cuenta lo anterior es importante realizar los ensayos de diagnóstico a los equipos para conocer su estado, para tal fin se implementan las pruebas de rutina y las especiales, ver Tabla 1 [2].

Tabla 1. Pruebas de diagnóstico para transformadores

PRUEBAS DE RUTINA	PRUEBAS ESPECIALES
Medición resistencia de los devanados	Análisis de respuesta en frecuencia (FRA)
Medición resistencia de aislamiento	
Determinación de pérdidas y corriente sin carga	
Determinación de pérdidas y voltaje de cortocircuito	
Relación de transformación	

La prueba de cortocircuito a voltaje reducido, consiste en poner en corto uno de los lados del transformador, generalmente el de baja tensión y por el devanado primario se aplica una onda sinusoidal de potencial reducido, el cual se varía hasta que circule la corriente nominal en el bobinado cortocircuitado [4]. Por temática del proyecto se analiza el comportamiento del transformador en cortocircuito a tensión reducida, ya que bajo estas condiciones, se obtiene la impedancia de cortocircuito, parámetro fundamental para realizar el ensayo de cortocircuito franco.

Al ser la tensión nominal del devanado primario del transformador mucho mayor que el voltaje inyectado en sus terminales, se genera poco flujo magnético, lo cual no permite que haya una considerable inducción en la maquina; por tanto se omite la rama de magnetización en el circuito de la Figura 3 [4].

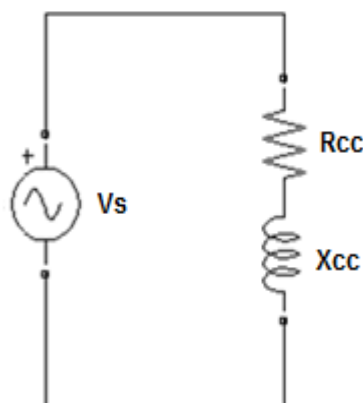
Figura 3. Modelo circuital del transformador en cortocircuito

Donde

$R''2$ = Resistencia del devanado secundario referida al bobinado primario del transformador (Ω).

$L''2$ = Inductancia del devanado secundario referido al bobinado primario del transformador (H).

Sin embargo el esquema que representa el comportamiento del transformador en cortocircuito, se puede reducir, sumando entre si las resistencias y las reactancias de cortocircuito de los devanados de la máquina, ver Figura 4 [4].

Figura 4. Modelo simplificado del transformador en cortocircuito

$$R_{cc} = R_1 + R''2 \quad (1)$$

$$X_{cc} = L_1 + L_2 \quad (2)$$

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} \quad (3)$$

$$V_s = \sqrt{V_{R_{cc}}^2 + V_{X_{cc}}^2} \quad (4)$$

Donde

R_{cc} = Resistencia de cortocircuito del transformador (Ω).

X_{cc} = Reactancia inductiva de cortocircuito del transformador (H).

Z_{cc} = Impedancia de cortocircuito del transformador (Ω).

$V_{X_{cc}}$ = Voltaje en la reactancia de cortocircuito del transformador (V).

$V_{R_{cc}}$ = Voltaje en la resistencia de cortocircuito del transformador (V).

En el esquema del transformador en cortocircuito, los devanados se representan por medio de un circuito RL serie, situación que genera un desfase de noventa grados entre la corriente de corto y la tensión en los terminales de la reactancia. Cabe mencionar que el fenómeno se debe a la naturaleza inductiva de la bobina [6].

$$(\theta) = \text{Arctang} \frac{V_{X_{cc}}}{V_{R_{cc}}} \quad (5)$$

Dónde

θ = Angulo en que se desfasa el voltaje (Rad).

Cabe destacar que al alimentar la bobina se genera una fem auto-inducida la cual se opone al voltaje de la fuente y no permite que el elemento pasivo se cargue de manera instantánea. Cabe destacar que La tensión en un principio crece bruscamente, y luego va disminuyendo de manera exponencial en un periodo denominado transitorio; en ese mismo instante la corriente aumenta su magnitud hasta que se carga el equipo inductivo tal y como se describe en la Ecuación 6. De igual forma, el dispositivo presenta un tiempo de descarga, situación donde el amperaje se incrementa hasta un valor pico y posteriormente decrece y llega a cero, ver Ecuación 7 [6].

$$i(t) = \frac{V}{R} * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (6)$$

$$i(t) = \frac{V}{R} * \left(e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (7)$$

Donde

τ = Constante de tiempo (s).

R=Resistencia asociada a la bobina (Ω).

i= Corriente instantánea de la bobina (A).

V= Voltaje alimentación de la bobina (V).

Teniendo claro el comportamiento del transformador en condición de cortocircuito a voltaje reducido, se procede a estudiar los efectos que se generan en la maquina cuando está en corto y está sometido a su tensión nominal.

1.2 Prueba de Cortocircuito Franco en el Transformador

La prueba de cortocircuito franco está encaminada principalmente a la verificación del diseño de transformadores nuevos, además se realiza con el propósito de determinar la capacidad mecánica del equipo para soportar los esfuerzos electromagnéticos que se presentan en su interior, debido a las elevadas magnitudes de corrientes que circulan en sus bornes secundarios [1].

En la prueba se cortocircuita un devanado del transformador que por lo general es el secundario, ya que se asemeja mejor a las condiciones reales de servicio. Cada fase del dispositivo se somete a un total de seis cortos, tres de los cuales se hacen en el tap nominal, uno en el de máximo potencial y otro en el de mínima tensión, cada uno con una duración de 0.25 segundos; cabe resaltar que el sexto se realiza en el tap mínimo con un tiempo dado por la Ecuación 12, además es importante mencionar que dos de los seis ensayos deben cumplir los requisitos de forma asimétrica en las ondas de voltaje y corriente, ver Ecuación 9 [5].

$$I_{sim} = \frac{1}{Z_{cc}} * I_{1nom} \quad (8)$$

$$I_{asim} = K * I_{sim} \quad (9)$$

$$K = \sqrt{2} * [1 + (e^{-(\phi + \frac{\pi}{2}) * \frac{R_{cc}}{X_{cc}}} * \text{sen}(\phi))] \quad (10)$$

$$\phi = \text{arc tan}\left(\frac{X_{cc}}{R_{cc}}\right) \quad (11)$$

$$t = \frac{1250}{I_{sim}^2} \quad (12)$$

Dónde

I_{sim} = Corriente simétrica de cortocircuito (A).

I_{asim} = Pico asimétrico en el primer ciclo de la corriente de cortocircuito (A).

K= Parámetro adimensional dependiente del transformador.

Φ = Angulo de desfase entre la resistencia y la reactancia inductiva (Rad).

t= Duración de la sexta prueba para transformadores de categoría I (s).

Cabe mencionar que el transformador antes de ser probado debe estar sometido a las pruebas de rutina y adicionalmente se deben efectuar medidas de impedancia en diferentes derivaciones del devanado. Para asegurar la máxima asimetría de la corriente en el instante en que inicia el ensayo, el interruptor se debe poder controlar de manera sincronizada en el tiempo, de tal forma que el ángulo de cierre este dentro del rango de $\pm 15^\circ$ con relación al instante en que la tensión cruza por cero [5].

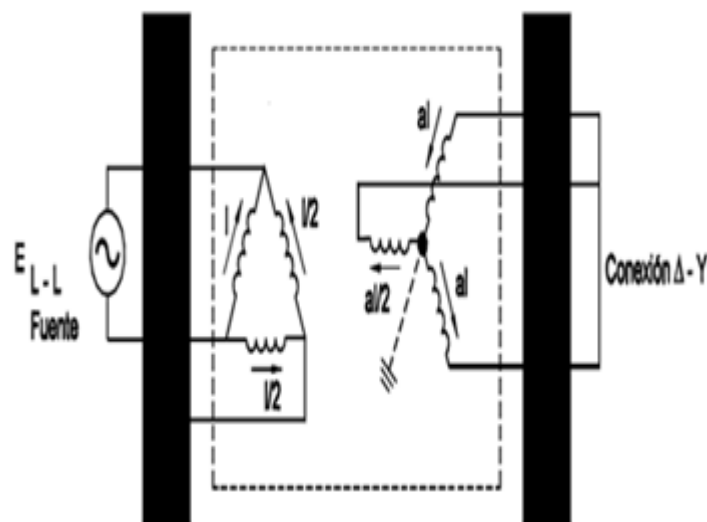
Durante la prueba se verifica que la tensión en los terminales del lado de la fuente de alimentación no tenga una variación mayor al 5%, además se registran los valores de voltaje, corriente y el tiempo. Después de realizar el cortocircuito se repiten los ensayos de rutina, verificando que no existan grandes discrepancias con los resultados obtenidos antes del corto franco; una

evaluación conjunta de estas mediciones indica la necesidad de un mayor o menor grado de inspección visual para confirmar el estado del núcleo, bobinas, cambiador de taps, salidas de alta y baja tensión, cuñas y bridas [5].

Cualquier incremento o variación inusual mayor al 5% durante el ensayo, es una insinuación de una potencial falla interna o mecánica [5]. Si se presentan cambios en el valor de la impedancia, se recomienda medirla en alta y baja tensión, ya que un aumento en ambas mediciones puede revelar deformación de un devanado en una columna del núcleo [5].

Para los transformadores trifásicos, en caso de no disponer de una fuente trifásica adecuada, la prueba presenta la opción de poder realizarse de forma monofásica. Cabe mencionar que al efectuar el ensayo con este tipo de conexión, ver Figura 5, la corriente de corto disminuye debido al aumento en la impedancia de cortocircuito del equipo [5].

Figura 5. Conexión del transformador trifásico alimentado por dos fases



A continuación se describen las características del equipo en el periodo transitorio.

En el momento de energizar el dispositivo para la prueba de cortocircuito franco, se presenta una corriente asimétrica, ver Ecuación 9; la cual puede alcanzar valores de hasta 57 veces el amperaje nominal en transformadores de distribución. Este aumento se debe a la saturación del núcleo y a la reducción en magnitud de la inductancia paralela equivalente vista desde la fuente. Cabe resaltar que el flujo que no atraviesa el elemento magnético, es transportado a través del aire [7].

Es importante destacar que en el momento en que se energiza el transformador, la corriente puede descomponerse en una componente senoidal de estado estable y en una transitoria, de tal forma que la resultante es igual a cero; cabe resaltar que además de estos dos flujos si se añade el residual proveniente de la remanencia del núcleo, se puede llegar a tener un nivel de sobresaturación de casi tres veces el valor en estado estable, lo cual aumenta en magnitud la corriente de magnetización [7].

Otros factores que pueden afectar la magnitud de la corriente de magnetización, es la forma constructiva del transformador, el área de la espira media de los devanados, ya que afecta directamente la saturación del transformador, además del desequilibrio de los amperios-vuelta del sistema producido por la inrush que aparece en el bobinado del equipo conectado a la fuente [7].

Teniendo en cuenta la información anterior, el laboratorio de alta tensión implemento el ensayo de cortocircuito franco. Sin embargo el campo de pruebas está restringido a una limitada capacidad de corriente y un voltaje fijo de 13.2kV; producto de una línea de alimentación que proviene de la subestación Meléndez. Esto genera una gran limitante, ya que existe una variedad de transformadores de distribución que trabajan por encima de este nivel de potencial y amperaje.

Para superar poder superar esta limitante, surge la necesidad de aumentar el alcance de la prueba por medio de la compensación de reactivos serie y paralela, la cual se realiza mediante maquinas sincrónicas, compensadores estáticos y bancos de condensadores. Cabe mencionar que aparte de elevar voltajes y corriente en los circuitos eléctricos, también mejora el factor de potencia. Por cuestiones de economía y logística la opción a implementar en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle durante el ensayo de cortocircuito franco es la utilización de capacitores [8].

1.3 El Condensador

El condensador es un elemento pasivo que almacena energía por medio del campo eléctrico, físicamente consta de dos láminas conductoras en paralelo, separadas por medio de un material dieléctrico; debido a sus características físicas, generan un desfase de noventa grados entre la corriente del dispositivo con respecto al voltaje en sus terminales, cuando se conectan varios capacitores en un mismo circuito se puede obtener una capacitancia equivalente dependiendo de la conexión [6]. Cuando se alimenta con una señal sinusoidal, el equipo genera oposición a los cambios bruscos de tensión; además cuando está sometido a elevadas magnitudes de frecuencia, se comporta de manera similar a un cortocircuito, ver Ecuación 17 [10].

$$C = \frac{\epsilon * A}{D} \quad (13)$$

$$I_c = C * \frac{dv(t)}{d(t)} \quad (14)$$

$$V_c = V(t_0) + \frac{1}{C} * \int_{t_0}^t i(t) dt \quad (15)$$

$$Q = w * C * V^2 \quad (16)$$

$$X_c = \frac{1}{w * C} \quad (17)$$

$$C_{eqparalelo} = \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i} \right)^{-1} \quad (18)$$

$$C_{eqserie} = \left(\sum_{i=1}^N C_i \right) \quad (19)$$

Dónde

C= Capacitancia (F).

ϵ = Permitividad del material dieléctrico (F*m/mm²).

A= Área de la superficie de cada placa (mm²).

D= Distancia entre cada placa (m).

I_c= Corriente instantánea del condensador (A).

V_c= Voltaje en los terminales del condensador (V).

Q= Potencia reactiva del condensador (kVAR).

X_c= Reactancia capacitiva (Ω).

w= Frecuencia angular (Rad).

Cabe mencionar que previo al comportamiento del capacitor en la etapa de estabilidad, el condensador presenta ciertas características en el periodo transitorio, situación que se describe a continuación.

1.3.1 Tiempo de Carga y Descarga del Condensador

En el lapso de carga se alimenta el condensador estando previamente desenergizado, con una onda de forma sinusoidal; esta variación repentina amplifica el nivel de armónicos en la señal de alimentación. Cabe mencionar que su estado no cambia instantáneamente, sino que tarda un tiempo en el cual va almacenando energía; en el caso del voltaje este va aumentando exponencialmente hasta un periodo τ y la magnitud de corriente se incrementa aproximadamente una fracción de su valor final. De igual forma se exhibe la etapa de descarga; situación donde se presenta un comportamiento decreciente de tipo exponencial tanto en la carga como en el amperaje, ver Ecuaciones 22 y 23 [6].

$$Q_c = Q_0 * \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}\right) \quad (20)$$

$$I_c = I_0 * e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (21)$$

$$Q_c = Q_m * e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (22)$$

$$I_c = \frac{-Q_m}{R * C} * e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (23)$$

Donde

Q_0 = Carga inicial del condensador (C).

I_0 = Corriente máxima en el condensador (A).

τ = Constante de tiempo (s).

Q_c = Carga del condensador(C).

Q_m = Carga máxima del condensador (C).

I_c = Corriente instantánea del condensador (A).

R = Resistencia eléctrica asociada al condensador (Ω).

Cabe mencionar que los capacitores se utilizan para contrarrestar el efecto inductivo de las bobinas, aumentar el factor de potencia, mejorar la calidad de la energía, regular el voltaje y reducir pérdidas en el sistema. Para la prueba de cortocircuito franco se requiere que estos dispositivos sean de mayor capacidad por tanto deben estar diseñados para funcionar a elevadas magnitudes de voltaje y corriente. Teniendo en cuenta lo mencionado con anterioridad se plantea la opción de implementar condensadores de potencia durante el ensayo.

1.4 Condensadores de Potencia

Los condensadores de potencia son elementos pasivos de mayor capacidad, los cuales están constituidos internamente por varios capacitores conectados tanto en serie como en paralelo. Por lo general presentan un circuito interno de descarga que básicamente es una resistencia, la cual reduce el valor de la tensión residual. Es importante tener en cuenta que el dispositivo está diseñado para soportar sobrecargas de hasta el 110% del voltaje rms nominal; sin embargo no se debe sobrepasar crestas de $1.2 \cdot \sqrt{2}$ de la tensión rms nominal, incluyendo los armónicos pero excluyendo el tiempo transitorio [6]. Para el caso de la corriente se establece que el equipo debe tolerar hasta 135% veces el amperaje nominal y no dar menos del 100% ni más del 115% de la energía reactiva a tensión y frecuencia nominal con una señal de alimentación senoidal [6].

En el momento de conectar los condensadores previamente descargados al sistema, el potencial se hace cero, presentando un comportamiento similar a un cortocircuito, en esta situación el dispositivo alcanza una sobrecorriente tal y como se observa en la Figura 6, la cual presenta elevadas magnitudes de frecuencia, ver Ecuación 24 y un comportamiento descrito por la Ecuación 25, donde es cuatro veces su amperaje nominal. Debido a su naturaleza amplifica el nivel de armónicos en la red de alimentación; y a medida que aumenta la carga sobre el capacitor, el voltaje se incrementa, hasta entrar al periodo estable [6].

$$f_s = \frac{1}{2 * \sqrt{L * C}} = f_{sys} * \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q_c}} \quad (24)$$

$$I_{inrush} = \frac{1000}{V_{LL}} * \sqrt{\frac{2 * S_{sc} * Q_c}{3}} \quad (25)$$

Donde

I_{inrush} = Corriente generada al conectar el banco al sistema (A).

f_s = Frecuencia transitoria del suicheo (Hz).

f_{sys} = Frecuencia del sistema (Hz).

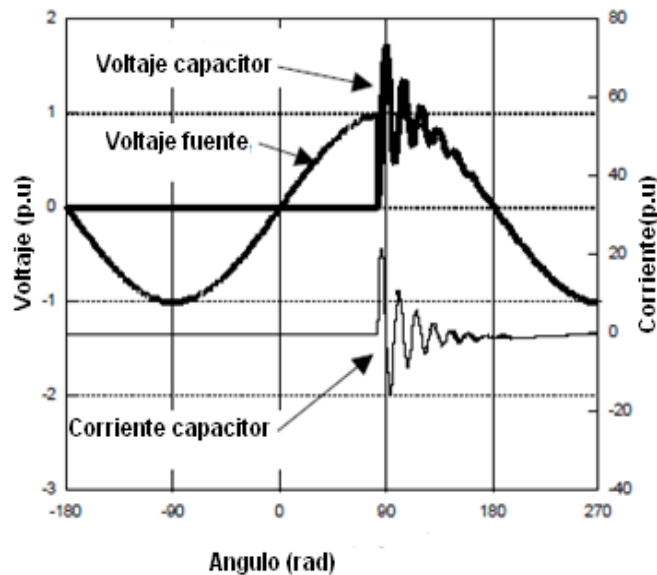
S_{sc} = Capacidad de cortocircuito del condensador de potencia (VA).

Q_c = Potencia reactiva del condensador de potencia (Var).

V_{LL} = Voltaje línea a línea del sistema (V).

L = Inductancia del sistema (H).

Figura 6. Voltaje y corriente en el instante de conexión del condensador



A continuación se describen algunas de las configuraciones más utilizadas al momento de implementar los condensadores en los sistemas de potencia.

1.4.1 Conexión en Estrella con Neutro Flotante

Este tipo de conexión es utilizada en sistemas de media y alta tensión; su principal ventaja es que actúa como filtro ante la presencia de transitorios de magnitudes elevadas de voltaje y además mejora la protección contra sobrecorrientes. Sin embargo y debido a las características del circuito, se genera potencial en el neutro [10].

1.4.2 Conexión en Estrella con Neutro Aterrizado

En esta conexión, la diferencia de potencial en las unidades capacitivas debe ser igual o mayor al voltaje de fase del sistema en el cual se van a implementar; es importante a la hora de seleccionar el condensador tener en cuenta su capacidad para poder proporcionar la potencia reactiva deseada en el circuito eléctrico. La configuración está formada por tres grupos conectados en serie y a su vez en paralelo, donde las fases están en estrella y el punto neutro de las mismas es puesto a tierra. En este tipo de arreglos por lo general se adopta una protección por fusibles para cada unidad, sin embargo existe también la posibilidad de protegerlas por grupo, técnica empleada en redes de distribución con baja capacidad de compensación. Su principal ventaja radica en que permite fácilmente balancear las fases, sin embargo y debido a la interconexión de los capacitores cuando falla alguno de estos dispositivos se generan magnitudes elevadas de tensión en los demás equipos [10].

1.4.3 Conexión en Delta

Este tipo de conexión se emplea por lo general en circuitos de baja tensión, en motores eléctricos y en cargas de valor similar, ya que presenta la ventaja de filtrar las corrientes armónicas del sistema; sin embargo presenta desbalance de fases y magnitudes elevadas de voltaje, ya que no se encuentra aterrizado [10].

A continuación se describe el comportamiento del circuito que se forma cuando se conectan elementos inductivos con capacitivos, cabe mencionar que este sistema es empleado para determinar los efectos que se generan en la prueba de cortocircuito franco utilizando la compensación de reactivos.

1.5 Circuito RLC

En este tipo de sistemas se generan respuestas transitorias de segunda orden, que pueden tener forma de onda amortiguada, sub-amortiguada y sobre amortiguada, las cuales están caracterizadas en la Ecuación 26, en este tipo de circuitos se presentan situaciones donde la carga inductiva puede estar en serie o en paralelo al equipo capacitivo [6]. Cabe mencionar que esta configuración es utilizada en redes de comunicación, en filtros de supresión de armónicos y en sistemas de potencia [6], al tener una componente inductiva y otra capacitiva, estas se oponen entre sí, presentando en ciertas condiciones especiales el fenómeno de la resonancia, estado en el cual se elimina la impedancia reactiva, quedando en fase la onda de voltaje con la de corriente [6].

$$V(t) = K_1 e^{at} + K_2 e^{bt} \quad (26)$$

Dónde

$V(t)$ = Respuesta natural del circuito (V).

K_1 = Constante que depende de la condición inicial y la amplitud de la fuente.

K_2 = Constante que depende de la condición inicial y la amplitud de la fuente.

a = Constantes arbitraria de la forma de respuesta del circuito.

b = Constantes arbitraria de la forma de respuesta del circuito.

1.5.1 Circuito RL Serie con C Paralelo

En esta configuración el condensador previamente cargado, contrarresta la impedancia inductiva del transformador, de tal forma que la magnitud de corriente suministrada por la fuente disminuye, ya que solo observa la parte activa de la carga. En el caso en que el capacitor se encuentra descargado, este toma un lapso de tiempo y se carga, sin embargo mientras ocurre el suceso, se amplifica el nivel de distorsión en la señal de alimentación [6]. Cuando el circuito queda netamente resistivo se dice que está en estado de resonancia; situación donde ocurre la máxima compensación; para llegar al fenómeno se requiere de un valor de capacitancia [6], obtenido mediante la Ecuación 28.

$$Y_p = \frac{R_{cc}}{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} - j \frac{X_{cc}}{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} + jX_c \quad (27)$$

$$0 = j \frac{X_{cc}}{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} + jX_c \quad (28)$$

$$C_{par} = \frac{L}{R^2 + (W * L)^2} \quad (29)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi L} * \sqrt{\frac{L}{C} - R^2} \quad (30)$$

Dónde

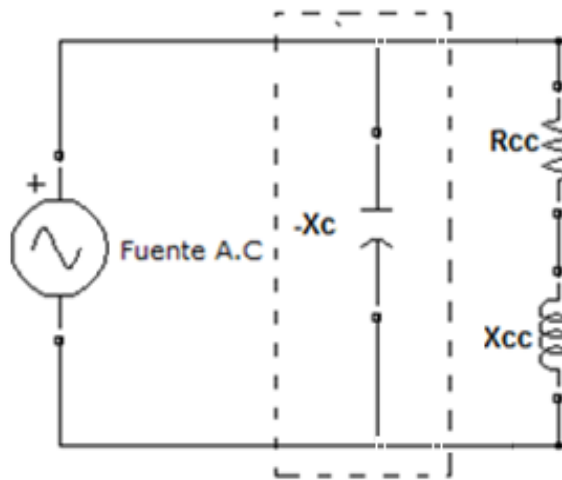
Y_p = Admitancia del circuito (S).

C_{par} = Capacitancia de resonancia (F).

f_0 = Frecuencia de resonancia (Hz).

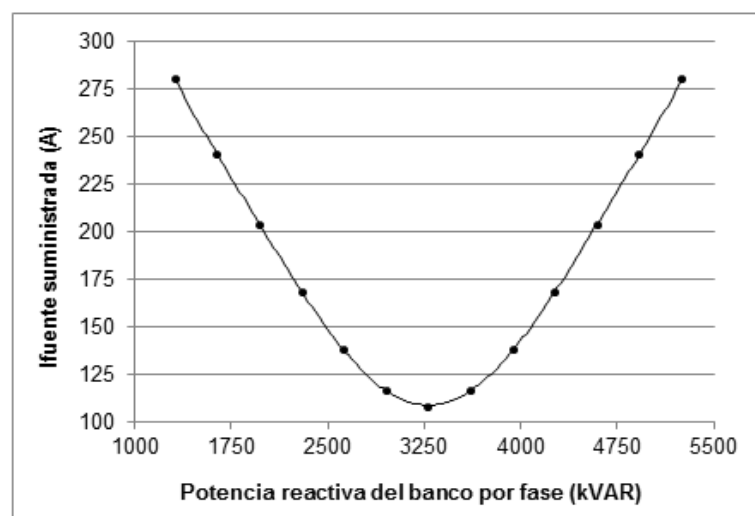
X_c = Reactancia capacitiva del condensador (Ω).

Figura 7. Circuito asociado a la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos en paralelo



Se observa en la Figura 7, que la reactancia de cortocircuito es predominantemente inductiva, situación que obliga a utilizar elementos capacitivos con el fin de contrarrestar los efectos asociados a la naturaleza del transformador, cabe destacar que al variar la capacidad del condensador, manteniendo fijos los parámetros RL, la corriente de la fuente presenta un comportamiento descrito por la Figura 8. Es importante mencionar que esta grafica representa la prueba de cortocircuito franco a un transformador de 100kVA a 13.2kV con compensación de reactivos en paralelo.

Figura 8. Corriente de la fuente vs potencia reactiva del condensador



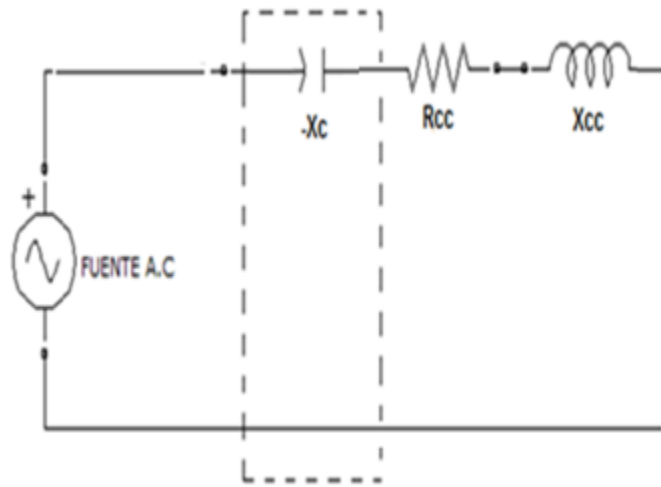
En caso de realizar la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos manteniendo una tensión de alimentación fija de 13.2kV variando la capacidad del transformador, el comportamiento de la forma de onda de la corriente suministrada por la línea va a ser similar al caso anterior, ver Figura 8; sin embargo su magnitud va a ser diferente ya que se va a presentar un incremento o decremento según sea el caso correspondiente. Es importante destacar que este método presenta ventajas tales como el mejoramiento del potencial en la carga y mayor regulación de voltaje [6].

A continuación se procede a determinar el comportamiento del circuito RLC serie con el fin de implementar en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle la prueba de cortocircuito franco a transformadores con tensiones superiores a 13.2kV.

1.5.2 Circuito RLC Serie

La conexión del transformador en serie con el condensador forma un circuito RLC serie, situación donde la tensión en las cargas reactivas son iguales en magnitud pero desfasadas en 180° , lo cual anula la reactancia en el sistema y genera voltajes de mayor magnitud en estos dispositivos que en la fuente de alimentación [6]. Cabe mencionar que la prueba de cortocircuito con compensación de reactivos en serie se representa por medio de la Figura 9.

Figura 9. Circuito asociado a la prueba de cortocircuito franco con compensación serie



Este método posee características tales como aumentar la capacidad de transferencia de potencia, mejorar la estabilidad transitoria del sistema por la reducción de la impedancia, amortiguar las oscilaciones de potencia y reducir las oscilaciones subsíncronas [11]. Para que el sistema esté en estado de resonancia se requiere hallar cierto valor de capacitancia dado por la Ecuación 33, tal que el circuito quede netamente activo [6].

$$Z = \frac{V}{I} = R + (X_{cc} + X_c) \quad (31)$$

$$0 = \left(W * L + \frac{1}{W * C_{serie}} \right) \quad (32)$$

$$C_{serie} = \frac{1}{W^2 * L} \quad (33)$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi * \sqrt{L * C}} \quad (34)$$

Dónde

Z = Impedancia del circuito (Ω).

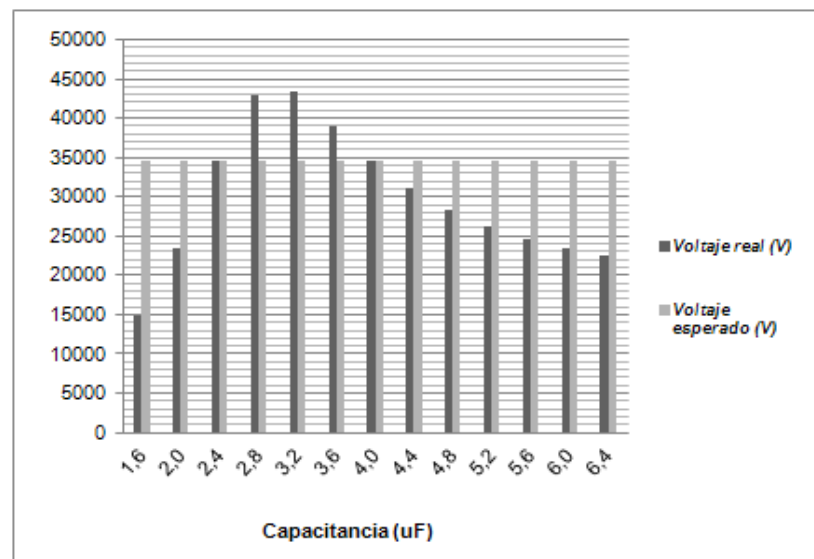
L = Inductancia del transformador en cortocircuito (H).

C_{serie} = Capacitancia serie para entrar en resonancia (F).

f_0 = Frecuencia de resonancia (Hz).

A continuación en la Figura 10 se observan los resultados obtenidos del circuito que representa la prueba de cortocircuito franco a un transformador de 100kVA a 34.5kV con diferentes niveles de compensación de reactivos variando la magnitud de capacitancia la cual se encuentra en serie a los demás elementos del sistema, en este esquema se compara el voltaje esperado y el que se podría alcanzar si se llega al estado de resonancia. Debido a esta situación, es importante verificar el cálculo de los parámetros ya que cualquier variación, puede elevar las magnitudes de tensión en los dispositivos, hasta valores que ponen en riesgo su integridad física.

Figura 10. Variación de la capacitancia vs voltaje en el transformador



Cabe resaltar que la fuente presenta un potencial de 34.5kV, magnitud seleccionada debido a que es un valor muy empleado en los sistemas de potencia; al calcular los parámetros para la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos en serie con alimentación menor a la tensión mencionada, se observa un comportamiento similar al caso anterior, ver Figura 10; sin embargo el voltaje esperado y el obtenido teóricamente varían en menor magnitud.

Al implementar el ensayo de cortocircuito franco en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle, cualquiera de las dos condiciones descritas con anterioridad, serie o paralelo, se va aumentar la gama de transformadores a los cuales se les podría realizar la prueba. Cabe resaltar que debido a las características de la línea de alimentación, en la compensación serie, el objetivo es llegar al voltaje nominal del transformador, para tal fin se requiere un valor de capacitancia dado por la Ecuación 35; y en el caso paralelo el fin es estar lo más cercano al estado de resonancia.

$$C = \frac{1}{W * \frac{X_{cc}}{1000} - \sqrt{\frac{V^2}{I_{cc}^2} - R_{cc}^2}} \quad (35)$$

Donde

V= Voltaje alimentación del circuito (V).

I_{cc}= Corriente simétrica de la prueba de cortocircuito franco (A).

R_{cc}= Resistencia de cortocircuito del transformador (Ω).

Continuando con la prueba de cortocircuito franco es importante mencionar el estudio de los dispositivos de protección asociados al ensayo.

1.6 Mecanismos de Protección

Se implementan en el ensayo de cortocircuito franco con el fin de proteger de fallas eléctricas a los elementos asociados a la prueba, como la línea de alimentación, el banco de condensadores y el transformador. Sin embargo al seleccionar los mecanismos de protección, estos deben resistir los esfuerzos electrodinámicos y térmicos a los que son sometidos, producto de elevadas magnitudes de corriente y tensiones transitorias; las cuales son de amplitud y frecuencia elevadas.

1.6.1 Protección Contra Magnitudes Elevadas de Corriente

Las protecciones son seleccionadas de acuerdo a la potencia de cortocircuito del sistema y el amperaje nominal del banco de condensadores, además es importante tener en cuenta el tiempo transitorio del circuito debido a que es un periodo en el cual se presentan magnitudes elevadas de corrientes y frecuencias, lo cual va a generar disparos indeseados. Los mecanismos de protección son seleccionados de tal manera que presentan una capacidad mínima de 135% de la corriente nominal del capacitor, esta sobrevaloración es debida a tres situaciones: 10% para condiciones de sobretensión, 15% para tolerancia de capacitancia y 10% para armónicos.

En caso de seleccionar fusibles como mecanismo de protección, estos se calculan con el valor pico de la corriente la cual se encuentra entre 1.8 a 2.5 veces el amperaje nominal del banco de condensadores, además es importante hallar la constante de tiempo en el momento de cierre para los filtrar posibles armónicos.

1.6.2 Protección contra sobretensiones

La energización del banco de condensadores genera sobretensiones transitorias al momento de conectarse al sistema, de aquí la necesidad de tener una adecuada protección contra las sobretensiones. En la actualidad se emplean técnicas como el re-cierre controlado de las fases y la utilización de descargadores de sobretensiones, los cuales limitan el voltaje transitorios de 1.8 a 2.5 veces en el punto de aplicación. Sin embargo al emplearlos se debe asegurar que la energía en el dispositivo no se exceda durante el reencendido, o en la conmutación de condensadores debido a la magnificación de la tensión.

Teniendo en cuenta el comportamiento teórico de los elementos asociados a la prueba de cortocircuito franco utilizando la compensación de reactivos serie y paralelo tanto en estado estable como en el periodo transitorio, se procede a la segunda fase del proyecto, etapa en la cual se implementa en el software de simulación los ensayos de corto a tensión nominal.

2. SIMULACION DE LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO FRANCO CON COMPENSACION DE REACTIVOS

2.1 Introducción

Para este proyecto se requiere simular la prueba de cortocircuito franco utilizando la compensación de reactivos tanto en serie como en paralelo. Debido a la disponibilidad del software en la universidad del valle, se emplea la herramienta computacional MATLAB versión 7.12.0.635 el cual aplica soluciones totalmente integradas para llevar a cabo proyectos en donde se utiliza análisis numérico, proceso de señales y visualización de gráficas en un entorno completo. Cabe resaltar que el programa presenta el transformador como dos bobinas acopladas magnéticamente por medio de un núcleo, tal y como se observa en la Figura 11, por tanto para realizar el estudio con este modelo, se requieren ciertos parámetros, que se obtienen a partir de ensayos y cálculos, ver Tabla 2 [11].

Figura 11. Esquema representativo del transformador en el simulador

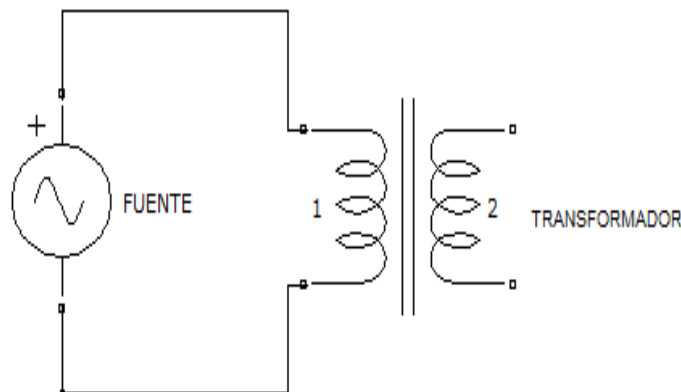


Tabla 2. Parámetros requeridos para la simulación

Parámetros Requeridos (MATLAB)	Parámetros Obtenidos
Resistencia Magnetización (Rm).	$R_m(\Omega) = \frac{V_o^2}{P_o}$
Inductancia de Magnetización (Lm).	$L_m(H) = \frac{V_o}{W * I_m} = \frac{V_o}{W * \sqrt{I_o^2 - (\frac{V_o}{R_m})^2}}$
Resistencia Devanado Primario A.C (R1).	$R_1(\Omega) = \frac{R_{eq}}{1 + [n^2 * \{\frac{R_{sec}}{R_{prim}}\}]}$
Resistencia Devanado Secundario A.C (R2).	$R_2(\Omega) = \frac{R_{eq} - R_{prim}}{n^2}$
Inductancia Devanado Primario (L1).	$L_1(H) = \frac{L_{eq}}{1 + [n^2 * \{\frac{R_{sec}}{R_{prim}}\}]}$
Inductancia Devanado Secundario (L2).	$L_2(H) = \frac{L_{eq} - L_{prim}}{n^2}$

Dónde

V_o = Voltaje obtenido a partir de la prueba de pérdidas y corriente sin carga (V).

P_o = Perdidas activas obtenidas a partir de la prueba de pérdidas sin carga (W).

I_o = Corriente obtenida de la prueba de pérdidas y corriente sin carga (A).

I_m = Corriente de magnetización (A).

R_{eq} = Resistencia equivalente del transformador A.C (Ω).

R_{prim} = Resistencia del devanado primario del transformador D.C (Ω).

R_{sec} = Resistencia del devanado secundario del transformador D.C (Ω).

L_{eq} = Inductancia equivalente del transformador (H).

L_{prim} = Inductancia del devanado primario del transformador (H).

n = Relación de transformación.

Para el análisis del proyecto se tomaron treinta y dos transformadores, de los cuales diecisiete son para la compensación paralela ver Tabla 3 y quince para el caso serie tal y como se observa en la Tabla 4.

Tabla 3. Transformadores empleados en el proyecto para el caso paralelo

TIPO DE COMPENSACION	TIPO DE TRANSFORMADORES	CAPACIDAD kVA
Compensación Paralela	Monofásicos	10 – 15 – 25 35.7 – 50 – 75 100 - 167.5
	Trifásicos	30 – 45 – 75 112.5 – 150 – 225 300 – 400 – 500

Tabla 4. Transformadores empleados en el proyecto para el caso serie

TIPO DE COMPENSACION	TIPO DE TRANSFORMADORES	TENSION kV
Compensación Serie	Monofásicos	13.8 - 19.9 34.5

Para el caso de la compensación en paralelo se utilizaron los parámetros del transformador de mayor capacidad disponible 167.5kVA, ver Tabla 5; Cabe resaltar que los datos fueron cedidos por el laboratorio de alta tensión, los cuales se van a implementar en la herramienta computacional tal y como se observa en la Tabla 6.

Tabla 5. Parámetros del transformador monofásico 167.5kVA

CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR			
Potencia Aparente (kVA)	167.5	Zcc (%)	2.54
V1.Nominal (kV)	13.2	V2.Nom (V)	240
I1.nominal (A)	12.7	I2.nominal (A)	697.9
PRUEBA RESISTENCIA DE DEVANADOS			
Posición Tap	2	Temp Prueba (°C)	25
R. Primaria (D.C)	3.4 (Ω)	R Secundaria (D.C)	1.1(mΩ)

Tabla 6. Parámetros exigidos por la herramienta computacional

PARAMETROS DEL TRANSFORMADOR EXIGIDOS POR MATLAB			
R. Magnetización (Ω)	156.3	R. Primaria (A.C)	3,4(Ω)
L. Magnetización (mH)	96.6	R. Secundaria (A.C)	11.2(m Ω)
L. Primaria (mH)	33.2	L. Secundaria (μ H)	10.8

A continuación se procede a validar los parámetros del dispositivo calculados en la Tabla 2, para tal fin se simula en la herramienta computacional la prueba de cortocircuito bajo carga y la de vacío en el transformador de 167.5kVA, empleando tanto el modelo circuital como el esquema utilizado por el simulador, ver Figura 11; con el fin de comparar los resultados cedidos por el laboratorio de alta tensión con los obtenidos a través del software de simulación, tal y como se visualiza en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados obtenidos de las pruebas de rutina

PRUEBA DE CORTOCIRCUITO A TENSION REDUCIDA (L.A.T)			
Posición Tap	2	Perdidas C.C (W)	1100
Voltaje C.C (V)	368	Corriente C.C rms (A)	12.69
Temperatura Prueba($^{\circ}$ C)	25	Impedancia C.C (%)	2.54
PRUEBA DE CORTOCIRCUITO A TENSION REDUCIDA M.T (SIMULACION)			
Voltaje C.C rms(V)	379	Corriente C.C rms (A)	12.69
Voltaje C.C rms(V)	379	Corriente C.C rms (A)	12.68
PRUEBA DE VACIO (L.A.T)			
Posición Tap	2	Perdidas Vacío (W)	369
Voltaje Vacío rms(V)	240	Corriente Vacío rms (A)	6.8
PRUEBA DE VACIO M.T (SIMULACION)			
Voltaje Vacío rms(V)	240	Corriente Vacío rms (A)	6.92

Donde

L.A.T= Laboratorio de alta tensión de la universidad del valle.

M.T= Esquema del transformador utilizado por la herramienta computacional.

Comparando los resultados obtenidos en la herramienta computacional con respecto a los cedidos por el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle, se observa poca dispersión en los datos; sin embargo el voltaje de cortocircuito presenta una discrepancia mínima, esto es debido al software, el cual omite las pérdidas asociadas al ensayo. Con base en este método, se pudo validar los parámetros medidos en las pruebas de rutina del transformador.

A continuación se simula la prueba de cortocircuito franco, teniendo en cuenta las condiciones que presenta el campo de pruebas del laboratorio de alta tensión de la universidad del valle.

En el software de simulación se programan los elementos que intervienen en la prueba de cortocircuito franco. En un principio el interruptor, ver Figura 12, se encuentra en estado de apertura; a continuación se ajusta el dispositivo para que cierre sus contactos en un tiempo controlado por el timer, y al finalizar el periodo que tarda el ensayo, el equipo cambia a su posición inicial. En el caso de la red de alimentación se utiliza una fuente de voltaje en serie a un circuito RL tal y como se observa en la Figura 14, los cuales representan el comportamiento de la línea que llega al laboratorio de alta tensión [12].

Figura 12. Parámetros requeridos del interruptor y del timer para la simulación

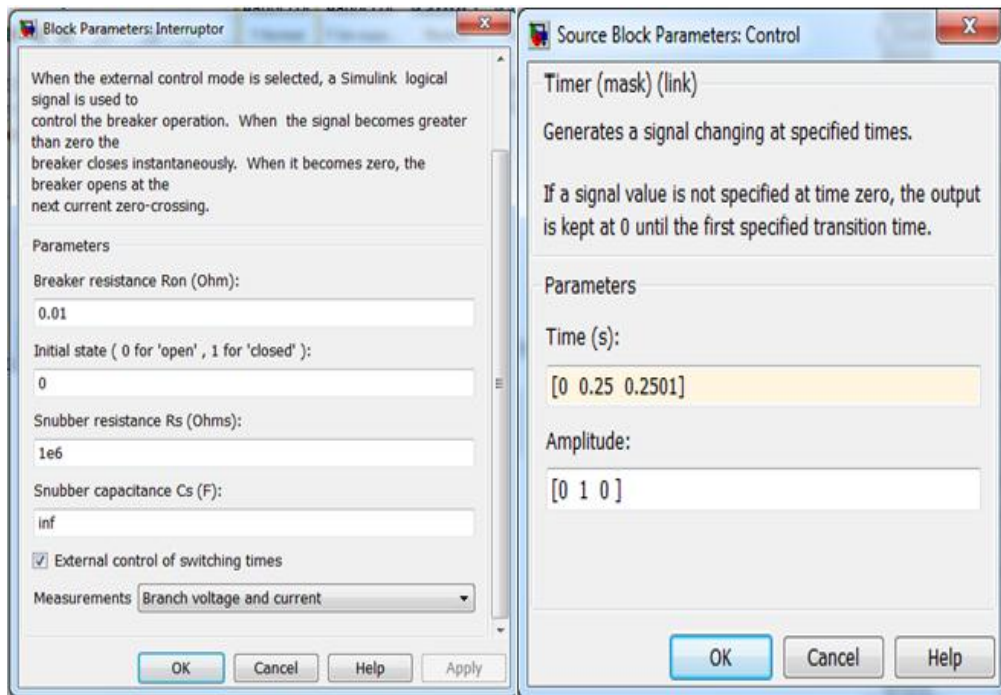
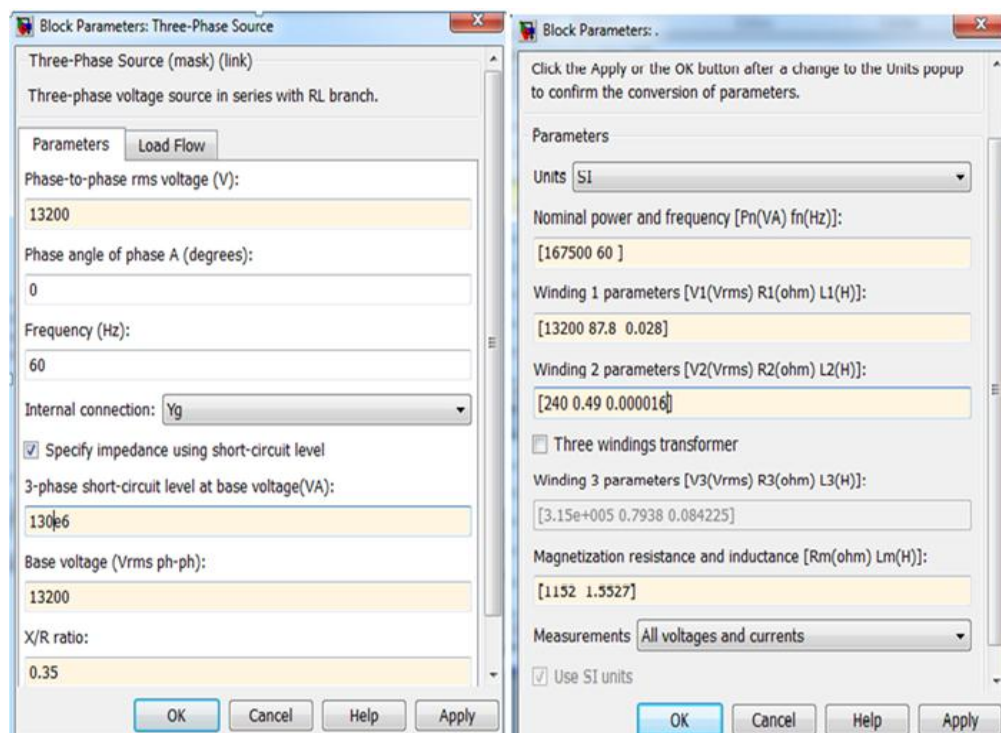


Figura 13. Parámetros de la fuente y del transformador para la simulación



Donde

X/R = Relación entre la reactancia y la resistencia de la red de alimentación.

S_{cc} = Capacidad de cortocircuito trifásico de la red de alimentación (VA).

Cabe mencionar que los parámetros de la línea de alimentación se obtuvieron a través de algunos cálculos [12], y un estudio suministrado por las empresas municipales de Cali (EMCALI).

Figura 14. Simulación de la prueba cortocircuito franco modelo circuital

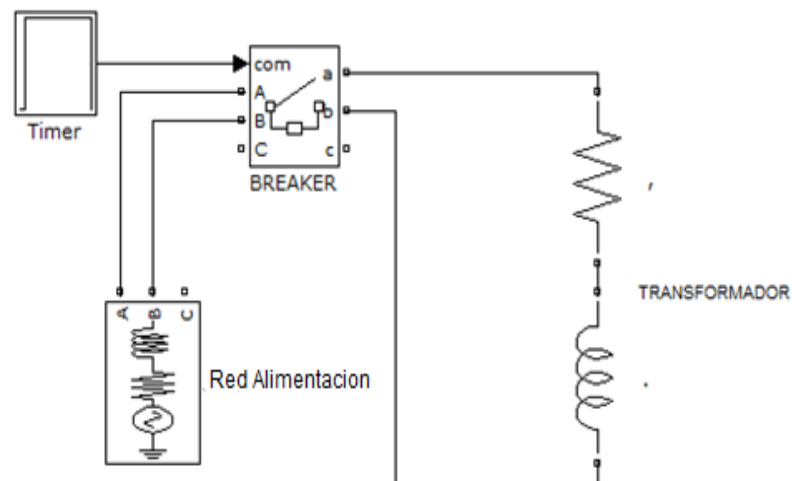


Figura 15. Simulación de la prueba cortocircuito franco

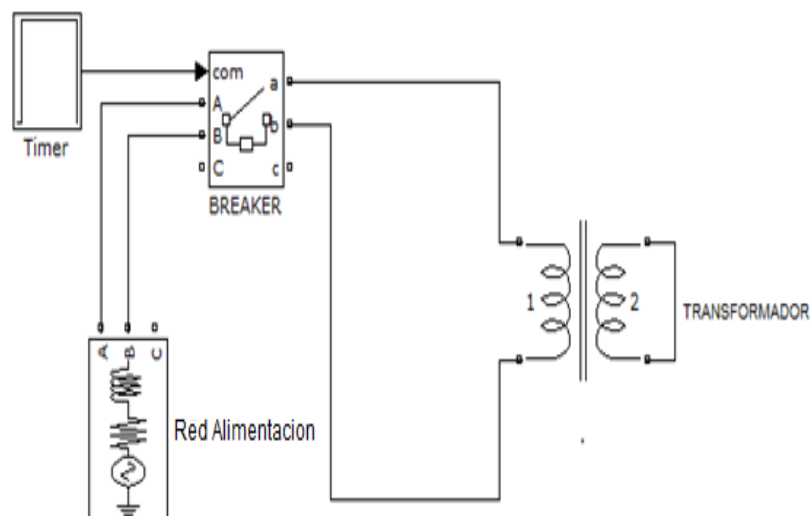


Tabla 8. Resultados obtenidos de la prueba de cortocircuito franco

PRUEBA DE CORTOCIRCUITO FRANCO (TEORICO)			
I simétrica rms (A)	509	V. Prueba(kV)	13.2
I asimétrica (A)	852	ϕ (rad)	1.3
K	1.59	Tiempo Prueba(ms)	250
PRUEBA DE CORTOCIRCUITO FRANCO (SIMULACION M.C)			
I simétrica (A)	720	I Asimétrica (A)	838
I simétrica rms (A)	509.23		
PRUEBA DE CORTOCIRCUITO FRANCO (SIMULACION M.T)			
I simétrica (A)	719	I Asimétrica (A)	840
I simétrica rms (A)	508.57		

De acuerdo a la Tabla 8, no se observan grandes diferencias entre los resultados teóricos con respecto a los del simulador; este proceso de validación es importante ya que permite descartar efectos que no se deban a la compensación de reactivos. A continuación se simula la prueba de cortocircuito franco en el modelo del transformador utilizado por el software computacional, el cual debido a sus características, asemeja mejor las condiciones reales del ensayo.

2.2 Prueba de cortocircuito franco monofásico empleando banco de condensadores en paralelo

Inicialmente se plantea la opción de trabajar con bancos de condensadores de 600kVAR a 7.6kV ya que son características de fácil acceso comercial y además manejan parámetros que se prestan para ser implementados en los ensayos de cortocircuito franco en los transformadores trifásicos. A continuación se proporciona una gama de capacitores tal y como se observa en la Tabla 9 [13].

Tabla 9. Características de los capacitores a implementar en el simulador

VOLTAJE (kV)	POTENCIA (kVAR)	C (μF)	Xc (Ω)	Inom (A)
7.6	100	4.5	580	13.1
7.6	150	6.9	387	19.7
7.6	200	9.1	290	26.2
7.6	300	13.7	194	39.4
7.6	400	18.3	145	52.5
7.6	500	22.8	116	65.6
7.6	600	27.4	97	78.7

Se parte de la Ecuación 29 donde se expresa la capacitancia tal que el circuito entra en estado de resonancia. Sin embargo al momento de realizar el ensayo de cortocircuito franco es poco probable que se presente el fenómeno como tal, debido a la limitación que presentan los bancos de condensadores, como el valor fijo de potencia reactiva que manejan. Teniendo en cuenta lo anterior se calcula la combinación de capacitores tal que el sistema se aproxime al punto de máxima compensación.

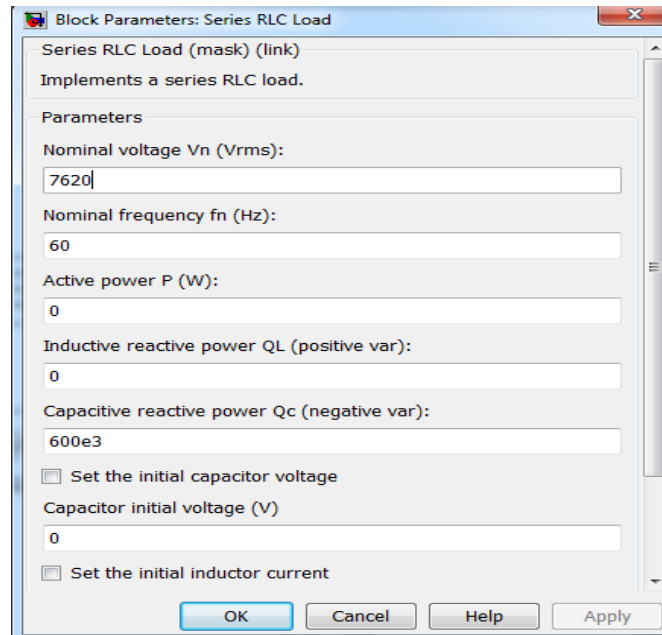
Para determinar el número de condensadores de 600kVAR a 7.6kV que se requieren para acercarse a la máxima compensación de reactivos durante el ensayo, se realiza la prueba de cortocircuito franco a cierta gama de transformadores que van desde 10kVA hasta 167.5 kVA, variando el porcentaje de impedancia de cortocircuito, ver Tabla 10.

Tabla 10. Capacitores a 7.6kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco

Transformador Monofásico (kVA)	Zcc (%)	Q teórico (kVAR)	Q real (kVAR)	Compensa (%)	Condensad Requeridos
10	2.0	428.53	450	37.59	4
	2.5	370.99	360	51.81	5
	3.0	318.41	300	60.25	6
15	2.0	665.66	600	42.37	3
	2.5	564.44	600	55.32	3
	3.0	481.38	450	63.12	4
25	2.0	1149.92	1200	49.80	6
	2.5	955.87	900	60.48	2
	3.0	809.72	900	66.08	2
37.5	2.0	1751.98	1800	53.72	4
	2.5	1444.55	1350	63.23	12
	3.0	1219.99	1200	70.05	6
50	2.0	2359.31	2400	56.58	12
	2.5	1935.64	1800	65.25	4
	3.0	1631.57	1800	70.13	4
75	2.5	2919.03	2700	67.67	6
	3.0	2455.46	2700	72.21	6
100	2.5	3903.98	3600	69.18	8
	3.0	3280.25	3600	73.51	8
167.5	2.5	6472.74	6300	73.35	14
	3.0	5511.61	4500	77.57	12

Teniendo en cuenta que para el transformador de 167.5kVA a 13.2kV, es el caso donde más capacitancia se requiere para la compensación de reactivos, ver Tabla 10, se decidió implementar en el software de simulación los parámetros de este dispositivo.

Figura 16. Parámetros requeridos del condensador para la simulación



Cabe resaltar que el ensayo de cortocircuito franco se realiza a una tensión nominal de 13.2kV, y debido a que los capacitores están diseñados para soportar voltajes de 7.6kV, se implementan en serie formando hilos en el circuito de la prueba tal y como se observa en la Figura 17, y de esta manera se reduce en un 50% la capacidad de los dispositivos.

Figura 17. Prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos

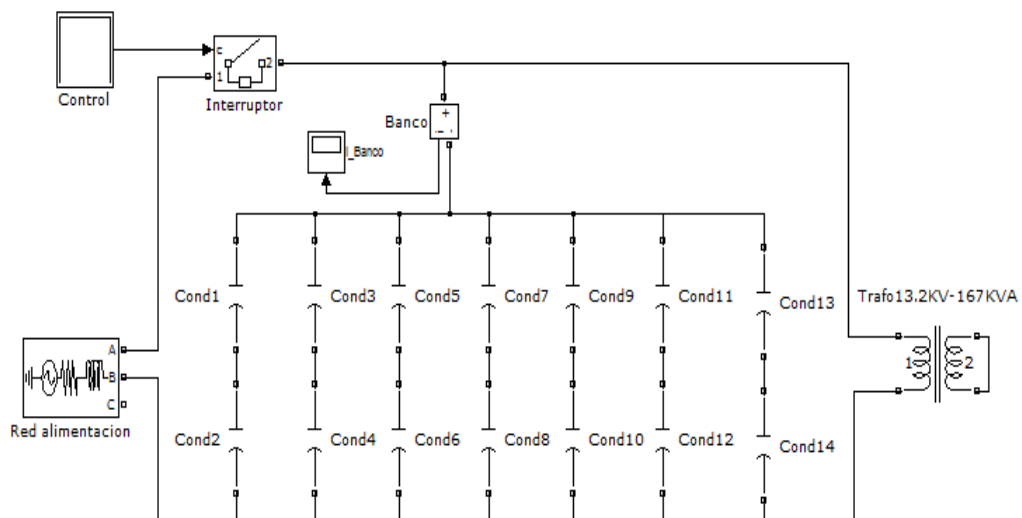


Figura 18. Corriente asociada a los equipos que intervienen en la simulación

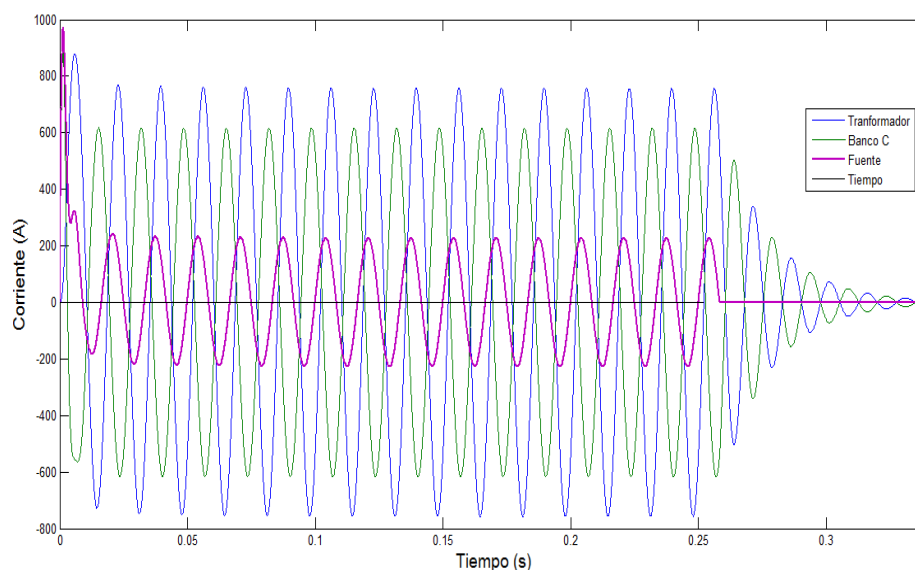


Tabla 11. Validación resultados de la prueba de cortocircuito franco

RESULTADOS TEORICOS DE LA PRUEBA				
I Transformador (A)	I Fuente (A)	I Banco C (A)	I Banco Inrush (A)	Compensación (%)
528.57	147.55	470.15	1098.00	73.35
RESULTADOS SIMULADOS DE LA PRUEBA (MATLAB)				
I Transformador (A)	I Fuente (A)	I Banco C (A)	I Banco Inrush (A)	Compensación (%)
530.56	152.34	447.83	864.85	71.32
PORCENTAJE DE ERROR EN LOS RESULTADOS				
I Transformador (%)	I Fuente (%)	I Banco C (%)	I Banco Inrush (%)	Compensación (%)
0.38	3.4	4.89	21	2.7

Dónde

I Línea= Corriente que suministra la línea de alimentación (A).

I Transformador= Corriente simétrica de cortocircuito del transformador (A).

I Banco Inrush= Pico asimétrico en la corriente del banco de condensadores (A).

I Banco C= Corriente del banco de condensadores (A).

Se observa en el periodo estable de la Figura 18 gran reducción de la corriente suministrada por la línea de alimentación (línea morada), generando una compensación del 71.32% siendo semejante al valor teórico; en el caso de la corriente del banco de condensadores se encuentra por debajo de su amperaje nominal, lo cual es importante para descartar inconvenientes por sobrecorriente en el equipo.

En el periodo transitorio se observa un pico de corriente en el banco de condensadores (línea verde) con una magnitud cercana a 864 amperios, mientras que en la parte estable se obtiene un valor cercano a los 445 amperios; este comportamiento en el capacitor coincide con lo dicho en la etapa anterior donde se establece teóricamente que su corriente es dos veces más grande que en el periodo de carga.

A continuación se determina el tiempo que tarda el circuito en estabilizarse a través de la función de transferencia.

$$H(s) = \frac{1}{Ls + R} \quad (34)$$

$$H2(s) = \frac{1}{0.0666s + 6.89} \quad (35)$$

$$Hc(s) = \frac{\frac{1}{C}s + \frac{Rcc}{C * L}}{s^2 + \frac{Rcc}{L}s + \frac{1}{CL}} \quad (36)$$

$$Hc2(s) = \frac{10.42e3s + 1078.83e6}{s^2 + 103.5s + 157.95e3} \quad (37)$$

Donde

H2(S)= Funcion de transferencia sin compensacion.

Hc2(S)= Funcion de transferencia con compensacion de reactivos.

Por medio del software, se grafican las funciones de transferencia de la prueba de cortocircuito franco con y sin compensación de reactivos, el objetivo es observar la forma de onda que presenta el circuito, además determinar el tiempo que tarda el ensayo en entrar al periodo de estabilización.

Figura 19. Tiempo de estabilización prueba sin compensación de reactivos

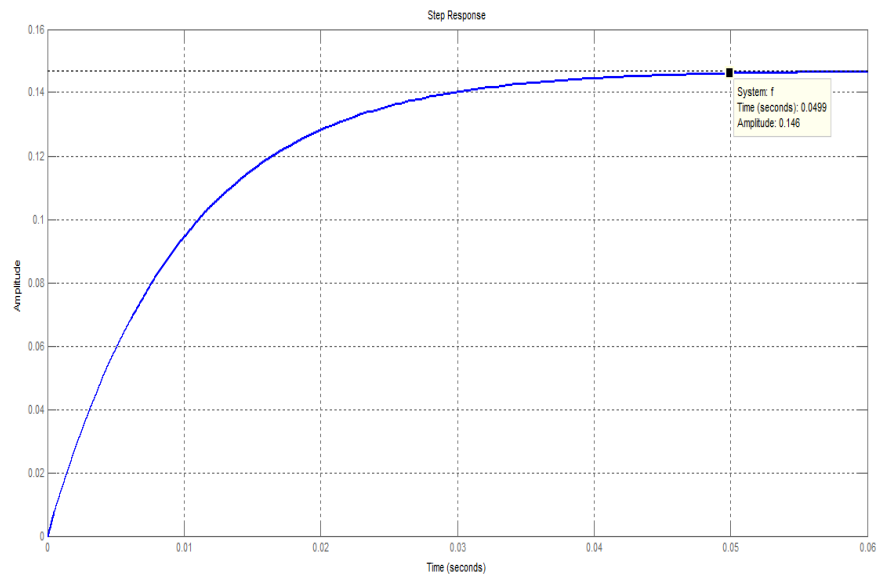
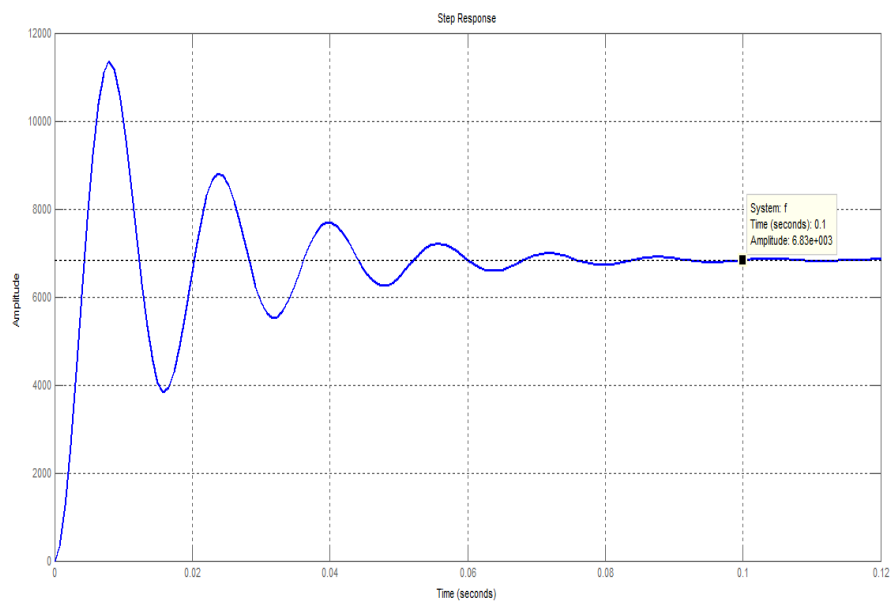


Figura 20. Tiempo de estabilización prueba con compensación de reactivos



Por medio de las graficas 19 y 20 se observa un retardo en la estabilizacion del sistema de casi el doble de tiempo debido a la implementacion del banco de condensadores; sin embargo la prueba de cortocircuito franco presenta una duracion de 0.25 segundos, por tanto es importante mencionar que los resultados finales del ensayo no se ven afectados por la inestabilidad que se presenta en el periodo transitorio. Cabe destacar que este procedimiento se realizo a toda la gama de transformadores monofasicos, ver Tabla 3, los cuales presentaron similar comportamiento a este caso.

Tabla 10. Tiempo de estabilización del circuito de prueba

TIEMPOS DE ESTABILIZACION		
Transformador (kva)	Con Compensación (s)	Sin Compensación (s)
167.5	0.1	0.049

Cabe resaltar que la opción de compensar con bancos de 600kVAR a 7.6kV no presenta inconvenientes con lo exigido por la norma a nivel teórico para ser válida la prueba de cortocircuito franco bajo las condiciones estudiadas en el caso anterior, sin embargo se requieren varios condensadores para cubrir toda la gama de transformadores que se desean probar en el laboratorio de alta tensión. Por tanto se plantea realizar la compensación de reactivos con otra gama de capacitores, los cuales puedan ajustarse mejor a las condiciones del ensayo; la propuesta consiste en implementar bancos de condensadores con características de 13.28kV a 600kVAR, ver Tabla 11 [13].

Tabla 11. Parámetros de los capacitores a implementar en el simulador

VOLTAJE (kV)	POTENCIA (kVAR)	C (μF)	Xc (Ω)	I Nominal (A)
13.28	100	1.5	1764	7.5
13.28	150	2.3	1176	11.3
13.28	200	3.0	882	15.1
13.28	300	4.5	588	22.6
13.28	400	6.0	441	30.1
13.28	500	7.5	353	37.7
13.28	600	9.1	294	45.2

Tabla 12. Capacitores a 13.2kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco

Transformador (kVA)	Zcc (%)	Q teórico (kVAR)	Q real (kVAR)	Compensa Teórico (%)	Numero Condensad
10	2.0	428.53	395	35.34	6
	2.5	370.99	395	63.31	6
	3.0	318.41	296	63.87	2
15	2.0	665.66	600	37.43	1
	2.5	564.44	600	51.23	1
	3.0	481.38	395,22	67.43	6
25	2.0	1149.92	1200	56.80	2
	2.5	955.87	888	66.91	6
	3.0	809.72	888	65.12	6
37.5	2.0	1751.98	1800	55.34	3
	2.5	1444.55	1200	59.23	2
	3.0	1219.99	1200	72.12	2
50	2.0	2359.31	2400	56.58	4
	2.5	1935.64	1800	65.25	3
	3.0	1631.57	1800	70.13	3

75	2.5	2919.03	3000	68.36	5
	3.0	2455.46	2400	73.83	4
100	2.5	3903.98	3600	69.18	6
	3.0	3280.25	3600	73.51	6
167.5	2.5	6472.74	6600	73.03	11
	3.0	5511.61	5400	77.57	9

Con el cambio de condensadores se requieren once capacitores para abarcar toda la gama de transformadores que se desean probar en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle. Sin embargo el objetivo es disminuir al máximo el uso de estos dispositivos; por tanto se realiza la mínima compensación de tal forma que se ajustan las protecciones para que la fuente de alimentación suministre una magnitud de corriente máxima de 200A para la prueba.

Cabe resaltar que esta magnitud de corriente se debe a las características del laboratorio de alta tensión y del relé de sobrecorriente de 80A, ya que por medio de algunos cálculos y la gráfica de funcionamiento del dispositivo, se establece que el equipo de protección soporta los 200A durante un periodo de 2 (s), tiempo suficiente para poder realizar el ensayo.

Tabla 13. Reactivos requeridos para los diferentes niveles de compensación

Tipo de Compensación	Corriente Fuente (A)	Condensad Requeridos
Condensadores 13.2kV Máxima Compensación	135.26	11
Condensadores 7.6kV Máxima Compensación	140.91	16
Condensadores 13.2kV Mínima Compensación	185.15	8
Condensadores 7.6kV Mínima Compensación	165.25	12

A continuación se procede a simular la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos con los condensadores de 13.2kV, ver Figura 21; en la cual se observa la nueva configuración donde se forman ocho ramas de capacitores en paralelo.

Figura 21. Prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos

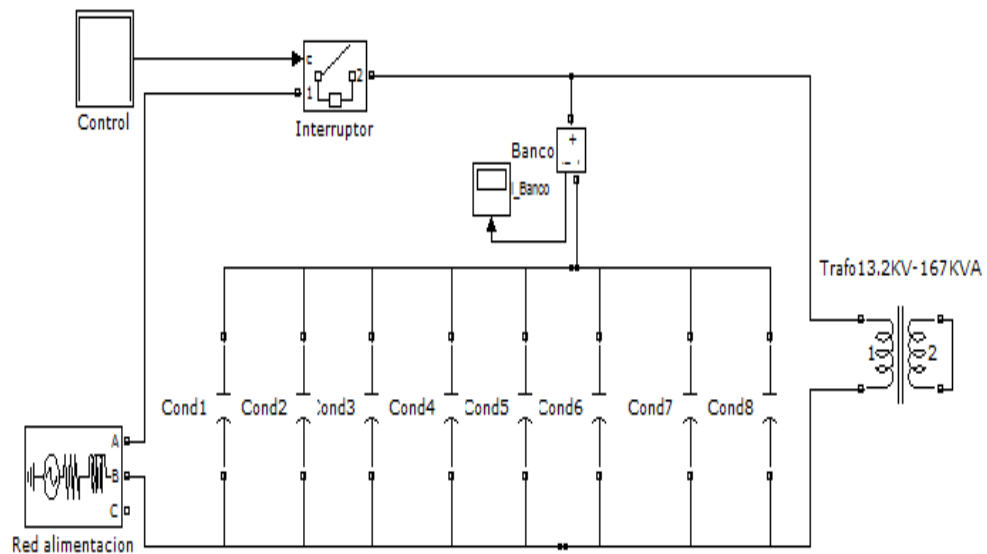
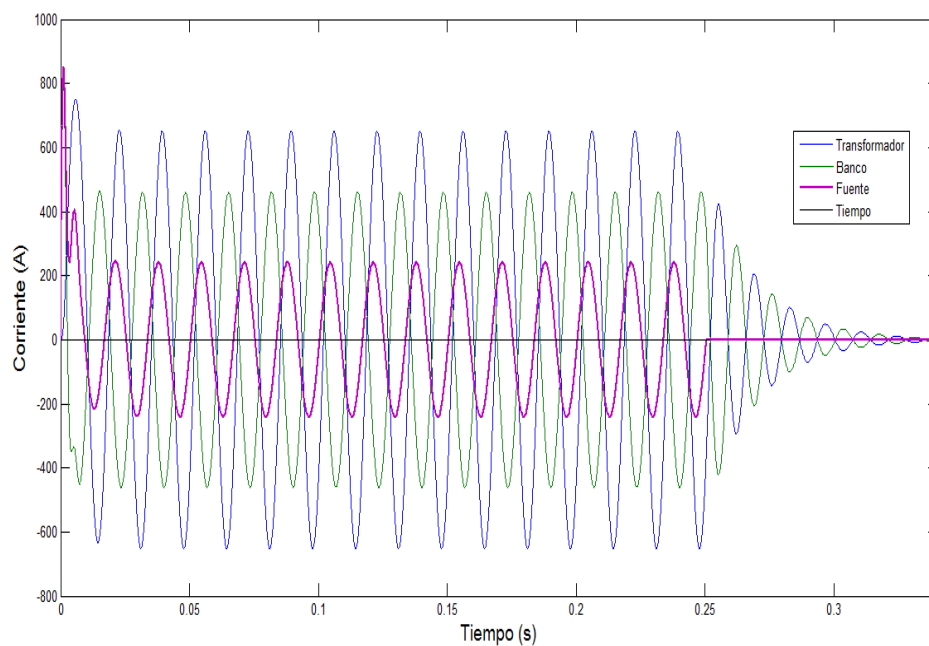


Figura 22. Corriente asociada a los equipos que intervienen en la simulación



De la Figura 22 se observa un comportamiento semejante al caso de la compensación con los capacitores de 7.62kV, sin embargo existe un aumento de muy poca proporción en el amperaje de la línea de alimentación (línea morada), ya que también se presentó una leve reducción de los reactivos compensados, cabe mencionar que la corriente del banco de condensadores (línea verde), está por debajo del valor nominal lo cual descarta problemas en el equipo por sobrecorriente.

Tabla 14. Resultados obtenidos de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos

. DATOS TEORICOS				
Corriente Transformador (A)	I Fuente (A)	I Banco (A)	I Banco Inrush (A)	Compensación (%)
508.57	185.12	363.64	796.23	63.61
DATOS SIMULADOS (MATLAB)				
Corriente Transformador (A)	I Fuente (A)	I Banco (A)	I Banco Inrush (A)	Compensación (%)
509.61	189.32	357.72	798.12	62.87
PORCENTAJE DE ERROR EN LOS RESULTADOS				
Corriente Transformador (%)	I Fuente (%)	I Banco (%)	I Banco Inrush (%)	Compensación (%)
0.2	2.21	1.62	0.23	1.16

Dónde

ICC= Corriente simétrica de cortocircuito (A).

I Línea= Corriente que suministra la línea de alimentación (A).

I Banco= Corriente del banco de condensadores (A).

Es importante destacar que en el periodo transitorio los condensadores presentan un pico de corriente el cual es dos veces el amperaje que alcanza el dispositivo en la etapa estable.

A continuación se verifica el lapso de tiempo que tarda el circuito en pasar del periodo transitorio al estable, a través de la función de transferencia.

$$Hc2(s) = \frac{13.68e3S + 33.83e6}{S^2 + 103.5S + 4.85e6} \quad (38)$$

Figura 23. Tiempo de estabilización prueba con compensación de reactivos

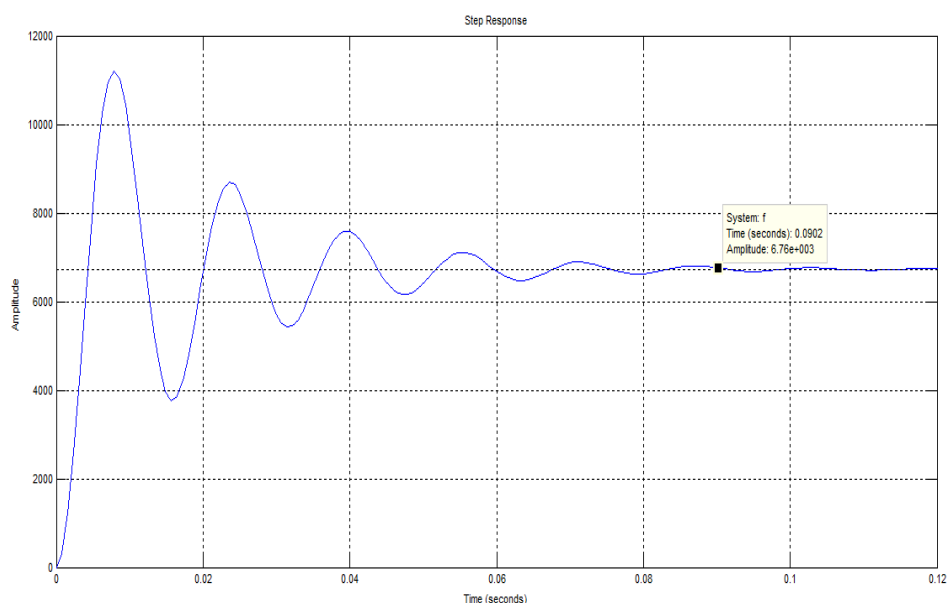


Tabla 15. Tiempo de estabilización del circuito de prueba

TIEMPOS DE ESTABILIZACION		
Transformador (kVA)	Con Compensación (s)	Sin Compensación (s)
167.5	0.09	0.038

De manera similar al caso anterior el lapso de tiempo que tarda la prueba en estabilizarse es mucho menor al que dura el ensayo 250 milisegundos, por tanto el periodo transitorio de la prueba no afecta los resultados finales del ensayo.

Comparando los dos metodos, se observa que no presentan problemas en la parte de simulacion, sin embargo en el segundo planteamiento se requieren menos condensadores, el cual es un factor fundamental a la hora de seleccionar cualquier opcion en el campo de pruebas de la universidad del valle.

A continuación y siguiendo los parámetros de la investigación del caso monofásico, se procede al análisis del ensayo de cortocircuito franco con compensación de reactivos empleando transformadores trifásicos. Situación en la cual se implementó en el software de simulación el dispositivo de 500kVA a 13.2kV, ya que el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle desea aumentar el alcance de la prueba con el fin de probar equipos con estas características [8].

Cabe mencionar que los parámetros requeridos por el software de simulación Tabla 17, se calcularon de acuerdo a la Tabla 3 a partir de los ensayos de rutina. A continuación se procede a validar esta información, simulando las pruebas de rutina y la de cortocircuito franco en la herramienta computacional.

Tabla 16. Parámetros del transformador trifásico 500kVA a 13.2kV

CARACTERISTICAS DEL TRANSFORMADOR			
Potencia Aparente (kVA)	500	Numero de Tap	5
V1.Nominal (kV)	13.2	V2.Nom (V)	460
Clase Refrigeración	ONAN	Zcc (%)	4.28
I1.nominal (A)	21.87	I2.nominal (A)	627.55

Tabla 17. Resultados obtenidos de las pruebas de rutina

PERDIDAS DE CORTOCIRCUITO BAJO CARGA (GRALTA)			
Voltaje Promedio C.C (V)	560	Perdidas C.C (W)	4370
Impedancia C.C (%)	4.28	Corriente C.C rms (A)	21.87
PRUEBA RESISTENCIA DE DEVANADOS			
R. Primaria (D.C)	4.35 (Ω)	R Secundaria (D.C)	29.2(m Ω)
PERDIDAS DE CORTOCIRCUITO BAJO CARGA (SIMULACION)			
Voltaje C.C rms(V)	567	Corriente C.C rms (A)	20.89
PERDIDAS DE VACIO (GRALTA)			
I Vacío Prom rms (A)	5.5	Perdidas Vacío (W)	369
Temperatura Prueba($^{\circ}$ C)	25	Voltaje Vacío rms(V)	265
PERDIDAS DE VACIO (SIMULACION)			
Voltaje Vacío rms(V)	267	I Vacío rms (A)	5.62
PARAMETROS DEL TRANSFORMADOR MATLAB			
R. Magnetización (Ω)	508977.6	R. Primaria (A.C)	5.759(Ω)
L. Magnetización (H)	11.027	R. Secundaria (A.C)	13.7(m Ω)
L. Primaria (H)	0.05754	L. Secundaria (H)	0.0000233

De acuerdo a la Tabla 17, no se observan grandes discrepancias entre la información cedida por el laboratorio de alta tensión con respecto a la obtenida por medio de las simulaciones; teniendo en cuenta esta validación, se puede concluir que el modelo de la Tabla 3, puede utilizarse tanto para el ensayo monofásico como para el trifásico. A continuación se implementa en la herramienta computacional, la prueba trifásica de cortocircuito franco, tal y como se observa en la Figura 26, teniendo en cuenta los parámetros de los dispositivos que exige el simulador, ver Figuras 24 y 25.

Figura 24. Parámetros de la fuente y breaker requeridos por el simulador

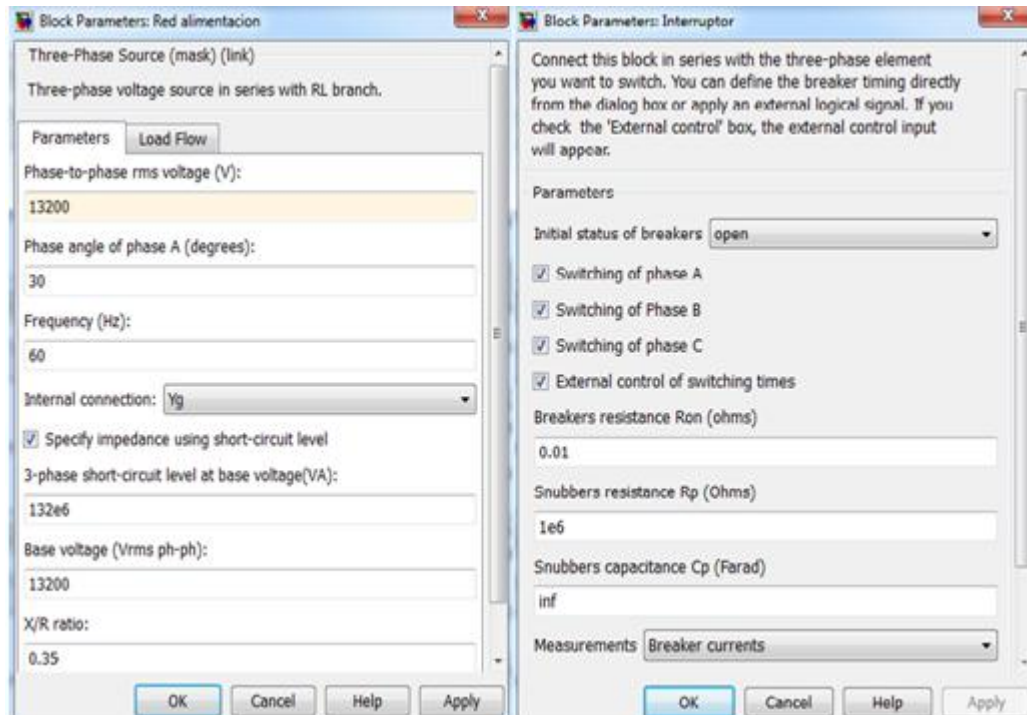


Figura 25. Parámetros del transformador trifásico requerido por el simulador

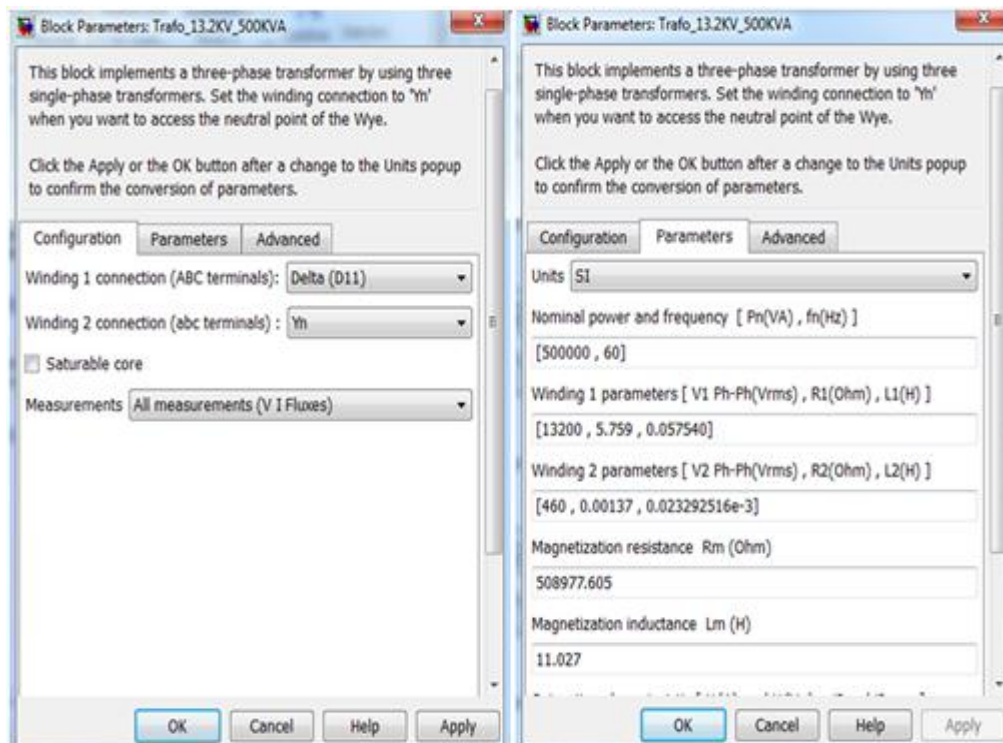


Figura 26. Simulación trifásica de la prueba de cortocircuito franco

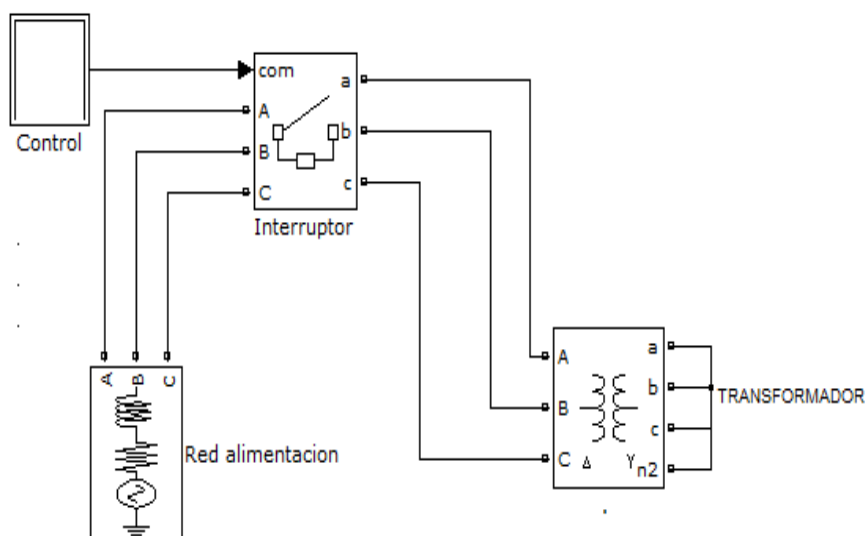


Tabla 18. Validación resultados obtenidos de la prueba de cortocircuito franco

PRUEBA DE CORTOCIRCUITO FRANCO (TEORICOS)			
I simétrica rms (A)	515.51	V. Prueba(kV)	13.2
I asimétrica (A)	1113.6	I simétrica (A)	729.04
K	1.59	ϕ (rad)	1.363
PRUEBA DE CORTOCIRCUITO FRANCO (SIMULACION)			
I simétrica (A)	702.86	I Asimétrica (A)	998
I simétrica rms (A)	497		

De acuerdo a la Tabla 18 no se observan grandes variaciones entre los datos teóricos con los obtenidos por medio de la simulación, cabe destacar que esta comparación es fundamental a la hora de descartar efectos producidos por la herramienta computacional, por tanto se procede a implementar en el simulador el ensayo de cortocircuito franco con compensación de reactivos utilizando el transformador trifásico de 500kVA a 13.2kV empleando el banco de condensadores de 600kVAR a 7.6kV. Es importante mencionar que la selección de estos capacitores, se debe a que se requiere validar el comportamiento del ensayo bajo estas condiciones.

Figura 27. Prueba trifásica de cortocircuito franco con compensación de reactivos con capacitores a 7.6kV

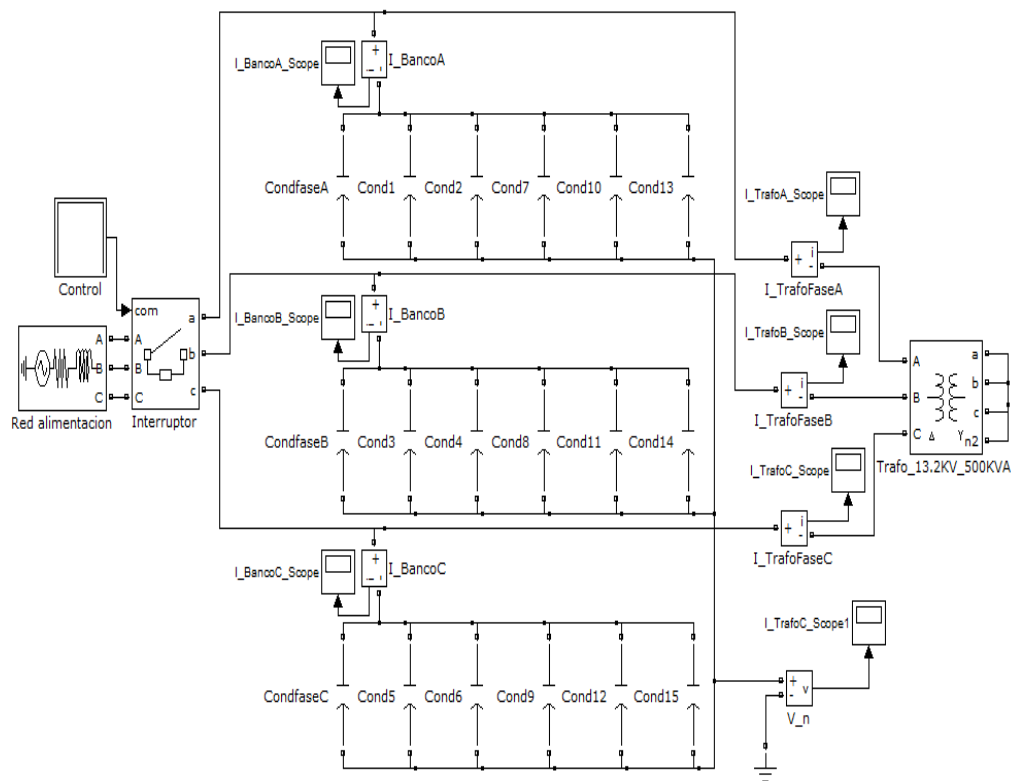


Figura 28. Corriente de los elementos asociados a la prueba de cortocircuito franco con compensación

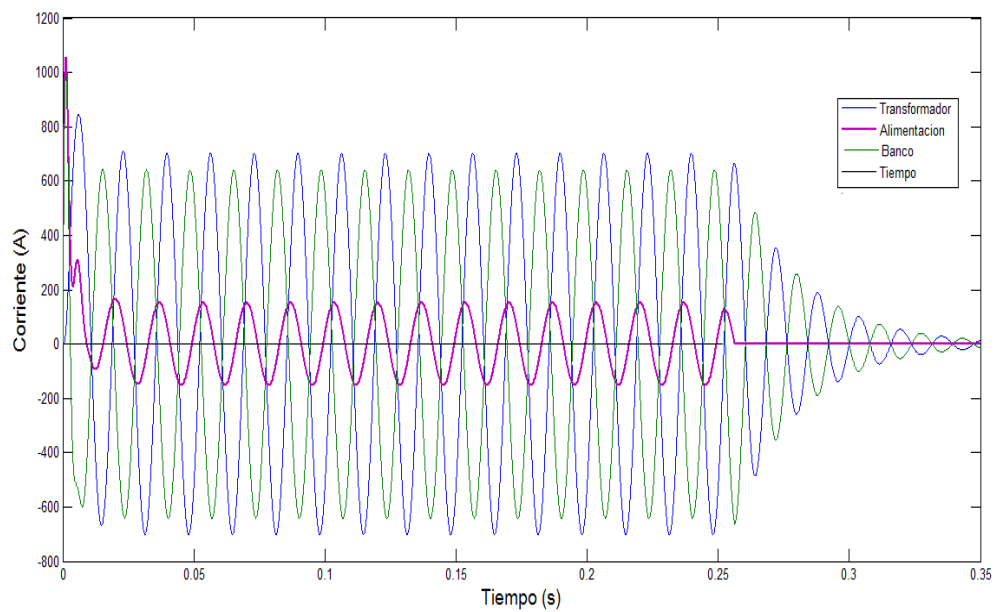


Tabla 19. Resultados obtenidos de las pruebas de cortocircuito franco con compensación de reactivos

PRUEBA DE CORTOCIRCUITO FRANCO CON COMPENSACION DE REACTIVOS (TEORICOS)			
I Banco rms (A)	483	I Banco (A)	670
I C.C rms (A)	506.4	I C.C (A)	710
I asimétrica (A)	1098.54	V. Prueba (kV)	13.2
I Fuente rms (A)	110.23		
PRUEBA DE CORTOCIRCUITO FRANCO CON COMPENSACION DE REACTIVOS (SIMULACION)			
I Banco rms (A)	472	I Banco (A)	667
I C.C rms (A)	501.2	I C.C (A)	708
I asimétrica (A)	1013.54	V. Prueba (kV)	13.2
I Fuente rms (A)	107		
PORCENTAJE DE ERROR EN LOS RESULTADOS			
I Banco rms (%)	2.27	I Banco (%)	0.44
I C.C rms (%)	1.02	I C.C (%)	0.28
I asimétrica (%)	7.73	I Fuente rms (%)	2.93

De igual forma que en los casos anteriores se comparan los resultados de la Tabla 19 obtenidos a través del software computacional con respecto a los datos teóricos de la prueba de cortocircuito franco trifásico con compensación de reactivos; es importante destacar que los valores no varían en gran magnitud, lo cual da validez al ensayo. A continuación por medio de la Tabla 20 se presenta una gama de transformadores, a los cuales se les calculo el número de condensadores requeridos para estar en el punto más cercano de la máxima compensación.

Tabla 20. Capacitores 7.62kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco

Transformador Trifásico (kVA)	Zcc (%)	Q teórico (kVAR)	Q real (kVAR)	Compensa (%)	Condensad Requeridos
30	2.0	342.3	300	19.13	6
	3.0	307.57	300	50.65	6
45	2.0	584.59	600	27.81	12
	3.0	469.33	399.6	53.20	18
75	2.5	919.16	900	49.78	18
	3.5	690.12	600	63.15	12
112.5	2.5	1397.4	1200	51.44	6
	3.5	1039.96	1200	64.28	6
150	2.5	1879.34	1800	55.27	9
	3.5	1390.9	1200	66.30	6
	4.0	1225.62	1200	72.90	6
225	3.0	2408.95	2400	64.09	12
	3.5	2088.53	1800	66.77	9
	4.0	1839.79	1800	73.37	9
300	3.5	2838.17	3000	69.93	15
	4.0	2457.68	2400	74.62	12
	4.5	2193.03	2400	75.79	12
400	3.5	3729.43	3600	71.81	18
	4.0	3281.08	3000	74.25	15
	4.5	2926.85	3000	78.26	15
500	4.0	4104.46	4198	76.08	21
	4.5	3660.66	3600	78.83	18
	5.0	3302.22	3600	79.03	15

De acuerdo a la Tabla 20 se observa que para cubrir toda la gama de transformadores que se desean probar en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle con la máxima compensación de reactivos a la cual se desea llegar, se necesitan veintiún condensadores. Con el fin de reducir el número de capacitores requeridos durante el ensayo, se realiza la prueba con los bancos de condensadores de 600kVAR a 13.2kV, de igual forma que en el caso monofásico, ver Tabla 21.

Tabla 21. Capacitores 13.2kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco

Transformador Trifásico (kVA)	Zcc (%)	Q teórico (kVAR)	Q real (kVAR)	Compensa (%)	Condensad Requeridos
75	2.5	919.16	999.79	49.24	5
	3.5	690.12	599.82	63.14	3
112.5	2.5	1397.4	1397.00	53.07	7
	3.5	1039.96	1039.96	67.17	5
150	2.5	1879.34	1879.52	55.26	9
	3.5	1390.9	1390.90	68.93	7
	4.0	1225.62	1225.62	72.90	6
225	3.0	2408.95	2408.95	64.09	12
	3.5	2088.53	2088.53	69.22	10
	4.0	1839.79	1839.79	73.37	9
300	3.5	2838.17	2792.11	70.96	14
	4.0	2457.68	2457.68	74.62	12
	4.5	2193.03	2193.03	77.60	11
400	3.5	3729.43	3729.43	71.95	19
	4.0	3281.08	3281.08	75.50	16
	4.5	2926.85	2926.85	78.27	15
500	4.0	4104.46	4104.46	76.08	21
	4.5	3660.66	3660.66	78.83	18
	5.0	3302.22	3302.22	80.83	17

Para el caso de los condensadores de 600kVAR a 13.2kV, se observa que al ser implementados en el ensayo de cortocircuito franco con compensación de reactivos se obtienen resultados similares al caso donde se implementaron los capacitores de 600kVAR a 7.6kV, tal y como se observa en la Tabla 20, con respecto al número de capacitancias requeridas para estar lo más cerca posible a la máxima compensación. Por tanto se realiza la prueba utilizando la mínima compensación de reactivos, ver Tabla 22, a la cual se podría realizar en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle.

Tabla 22. Capacitores requeridos para los diferentes niveles de compensación

Tipo de Compensación	Corriente Línea (A)	Condensad Requeridos
Condensadores 13.2kV Máxima Compensación	132.67	21
Condensadores 7.6kV Máxima Compensación	132.68	21
Condensadores 13.2kV Mínima Compensación	196.2	15
Condensadores 7.6kV Mínima Compensación	196.2	15

Al comparar las dos opciones planteadas para la compensación de reactivos, se observa que la respuesta del circuito es similar en ambos casos. Por tanto para reducir los capacitores requeridos en la prueba, se implementa la propuesta que menciona la norma, donde el ensayo a los transformadores trifásicos se realiza alimentando solamente dos fases del equipo, cabe mencionar que de esta forma se reduce la corriente de falla como consecuencia del aumento en la impedancia de cortocircuito del dispositivo.

A continuación se visualiza en la Tabla 23, el número de capacitores requeridos para estar lo más cercano al estado de resonancia, durante la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos al transformador trifásico alimentado por dos fases, cabe resaltar que durante el ensayo se implementa el banco de condensadores de 600kVAR a 13.2kV.

Tabla 23. Capacitores requeridos para la prueba trifásica de cortocircuito franco

Transformador Trifásico (kVA)	Zcc (%)	Q teórico (kVAR)	Q real (kVAR)	Compensa (%)	Condensad Requeridos
30	2.0	713	600	26.32	1
	3.0	492	600	47.04	1
45	2.0	1082	1200	25.99	2
	3.0	741	600	49.79	1
75	2.5	1475	1200	50.54	2
	3.5	1065	1200	63.00	2
112.5	2.5	2219	2400	53.81	4
	3.5	1600	1800	65.91	3
150	2.5	2964.82	3000	58.48	5
	3.0	2484.04	2400	64.17	4
	3.5	2135.65	2400	67.66	4
225	3.0	3727.65	3600	65.21	6
	3.5	3204.63	3000	70.18	5
	4.0	2809.18	3000	73.11	5
300	3.5	4275.60	4200	71.20	7
	4.0	3747.38	3600	67.24	6
	4.5	3334.83	3600	75.99	6
400	3.5	5704.11	5400	72.14	9
	4.0	4998.40	4800	75.71	8
	4.5	4447.64	4200	72.64	7
500	4.0	6249.40	6000	77.83	10
	4.5	5560.61	5400	78.44	9
	5.0	5007.77	4800	82.07	8

A continuación se procede a comparar los resultados obtenidos de las diferentes compensaciones implementadas en las pruebas de cortocircuito franco, cabe destacar que al realizar el ensayo trifásico de forma monofásica, se requieren diez capacitores para cubrir toda la gama de transformadores trifásicos que se desean probar en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle.

Tabla 24. Capacitores requeridos para los diferentes niveles de compensación

Tipo de Compensación	Corriente Línea (A)	Cond Requeridos
Condensadores 13.2kV Máxima Compensación	132.67	10
Condensadores 7.6kV Máxima Compensación	132.68	14
Condensadores 13.2kV Mínima Compensación	169.28	7
Condensadores 7.6kV Mínima Compensación	168.23	12

Al realizar la prueba de cortocircuito franco implementado la mínima compensación de reactivos, se logra reducir de diez a siete el número de capacitores requeridos para poder realizar el ensayo de cortocircuito franco al transformador de 500kVA, cabe mencionar que la línea de alimentación suministra una magnitud de corriente de 169.28A, la cual está por debajo de la condición de no sobrepasar los 200A.

A continuación se implementa en la herramienta computacional el transformador trifásico de 500kVA.

Figura 29. Simulación prueba monofásica de cortocircuito franco al transformador trifásico

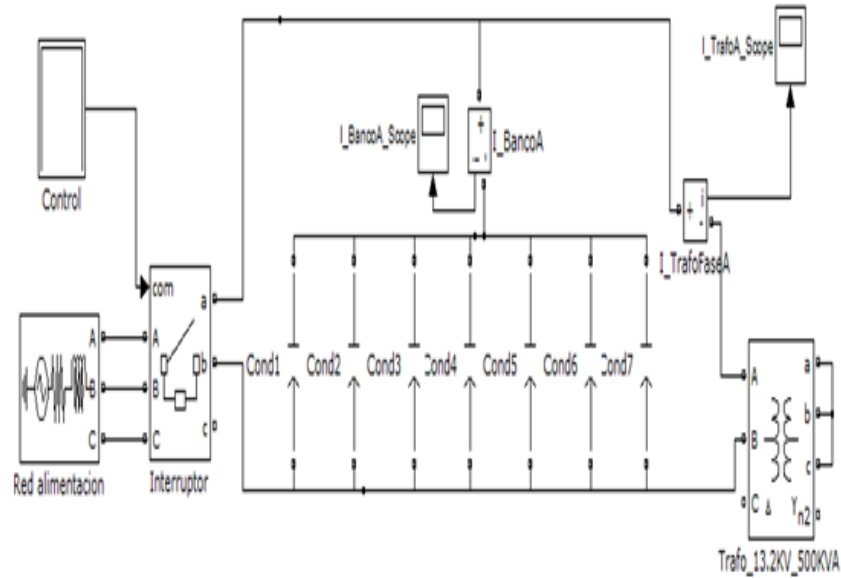


Figura 30. Corriente de los equipos asociados a la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos

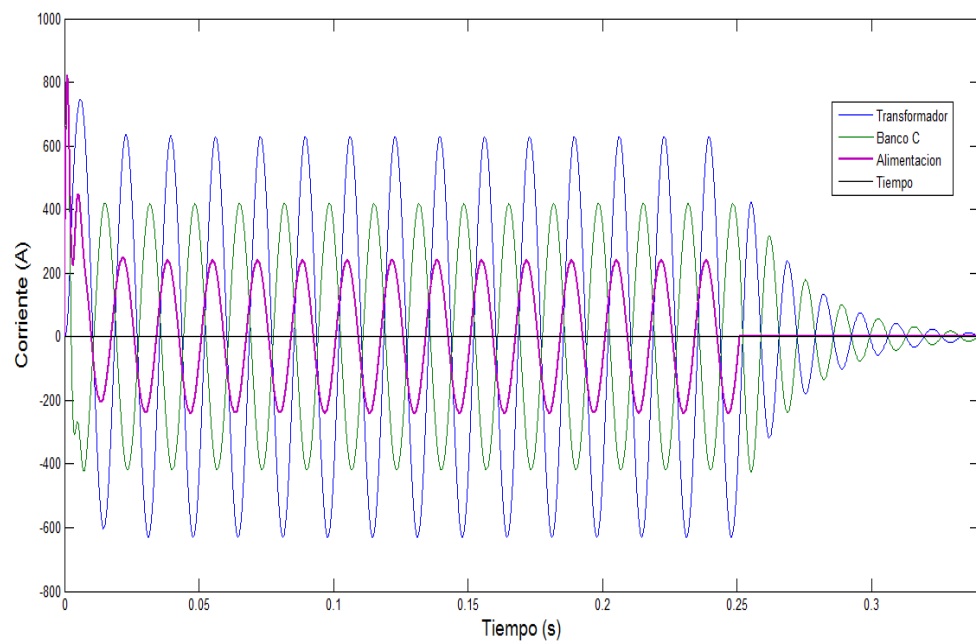


Tabla 25. Validación resultados de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos

RESULTADOS TEORICOS				
Corriente del transformador (A)	Corriente Fuente(A)	I Banco C (A)	I Inrush (A)	Compensación (%)
465.62	182.28	305	830	60.27
RESULTADOS SIMULADOS				
Corriente del transformador (A)	Corriente Fuente(A)	I Banco C (A)	I Inrush (A)	Compensación (%)
455.81	189	318.18	800	58.46
PORCENTAJE DE ERROR EN LOS RESULTADOS				
Corriente del transformador (%)	Corriente Fuente (%)	I Banco C (%)	I Inrush (%)	Compensación (%)
1.9	3.7	4.08	3.61	3.33

De los resultados en la Tabla 25 se observa que los datos teóricos son similares a los obtenidos por medio de la simulación; en el periodo transitorio se presenta un pico de corriente en el banco de condensadores el cual es dos veces el amperaje del dispositivo en la etapa estable. Con base en esta información se concluye que al realizar el ensayo de cortocircuito franco con estas características no presenta inconvenientes con respecto a los parámetros exigidos por la norma que rige la prueba.

A continuación se halla el tiempo de estabilización por medio de la función de transferencia, la cual se grafica en la herramienta computacional, ver Figura 31, cabe resaltar que el periodo que tarda el circuito en estabilizarse es menor al tiempo que dura la prueba tal y como sucedió en los casos anteriores.

$$Hc2(s) = \frac{115639.6S + 5840.4e3}{S^2 + 52.028S + 2679086} \quad (39)$$

Figura 31. Tiempo de estabilización de la prueba de cortocircuito franco compensación de reactivos

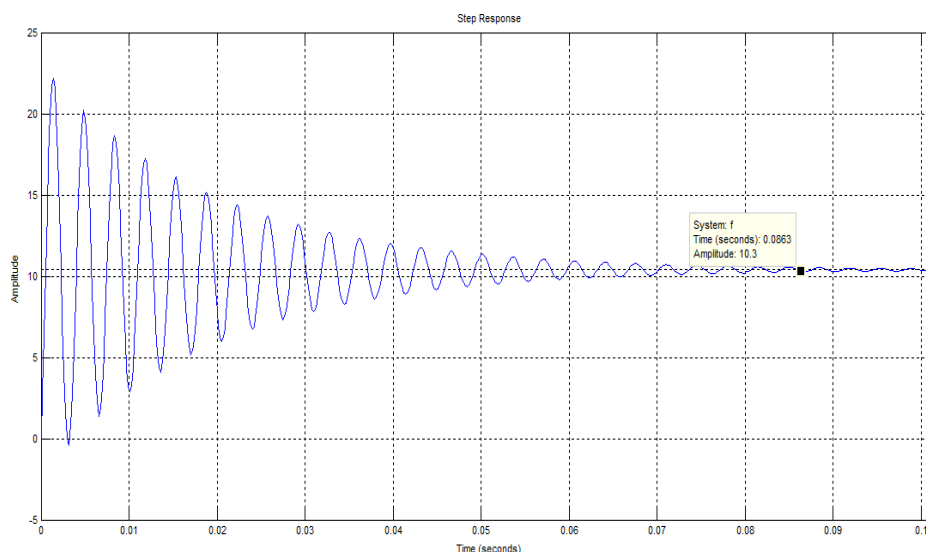


Tabla 26. Tiempo de estabilización de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos

TIEMPOS DE ESTABILIZACION		
Transformador (kva)	Con Compensación (s)	Duración del ensayo (s)
167.5	0.08	0.25

Teniendo en cuenta la información anterior, se concluye que al implementar la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos en el laboratorio de alta tensión de manera monofásica a los transformadores trifásicos, es una excelente alternativa, ya que permite reducir el número de condensadores y cumple con los criterios exigidos por [5].

A continuación se analiza el otro tipo de compensación establecida en los objetivos del proyecto, la cual consiste en implementar el banco de condensadores en serie al transformador; este tipo de montaje se realiza con el fin de poder realizar la prueba a transformadores con tensiones superiores a 13.2kV.

2.3 Prueba de cortocircuito franco a transformadores de distribución empleando banco de condensadores en serie

El campo de pruebas de la universidad del valle está restringido a un solo nivel de tensión 13.2kV, producto de una línea de alimentación que proviene de la subestación de Meléndez. Esto genera una limitante, ya que existe una variedad de transformadores que trabajan por encima de este nivel de voltaje. Con base en lo anterior surge la necesidad de aumentar el alcance de la prueba por medio de la compensación de reactivos.

Para realizar el estudio se trabaja con quince transformadores de diferentes capacidades y tensiones las cuales están en un rango de 13.8kV - 19,9kV y 34,5kV; esta variación de voltaje permite visualizar con claridad el comportamiento del ensayo a diferentes niveles de tensión.

2.3.1 Transformador con nivel de tensión de 13.8kV

En esta etapa del proyecto por cuestión de análisis, se aborda el fenómeno desde tres diferentes puntos de vista, en primer lugar están las condiciones necesarias para poder realizar la prueba (análisis técnico); en segunda instancia está la parte teórica, la cual básicamente es una comparación que se realiza entre las ondas obtenidas de la simulación con respecto a las teóricas y determinar si cumple o no con los criterios de aceptación [5], y en tercer lugar está la viabilidad económica.

A partir de la tabla 27 se observa el número de condensadores de 600kVAR a 13.2kV requeridos para cubrir la gama de transformadores que se desean probar en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle.

Tabla 27. Capacitores 13.2kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco

Transformador Monofásico (kVA)	Zcc (%)	C teórico (F)	C real (kVAR)	Variación Voltaje (%)	Condensad Requeridos
15	2.0	210.89	209.99	0.01	23
	2.5	179.81	173.47	0.16	19
	3.0	153.68	155.21	0.04	17
25	2.0	365.57	365.20	0.01	40
	2.5	304.96	301.29	0.05	33
	3.0	258.72	255.64	0.05	28
37.5	2.0	557.78	556.93	0.01	61
	2.5	461.18	465.63	0.04	51
	3.0	389.96	392.59	0.03	43
50	2.0	751.81	748.66	0.02	82
	2.5	618.23	620.84	0.02	68
	3.0	521.66	520.41	0.01	57
75	2.0	1140.62	1141.25	0.01	125
	2.5	932.79	931.26	0.01	102
	3.0	798.04	785.18	0.08	86
100	2.0	1530.46	1533.84	0.01	168
	2.5	1247.89	1250.81	0.01	137
	3.0	1049.31	1049.95	0.01	115

De acuerdo a la Tabla 27, se observa que para cubrir toda la gama de transformadores que se desean probar en el laboratorio de alta tensión, se requieren ciento sesenta y ocho condensadores, y en caso de realizar el ensayo al de menor capacidad 15kVA, se necesitan diecisiete capacitores; por tanto se concluye que los parámetros de este banco de condensadores no se ajustan para ser implementados en el campo de pruebas.

A continuación se plantea la compensación de reactivos utilizando condensadores de diferentes características; para ello se emplea la información obtenida de listados de catálogos de fabricantes y de normas asociadas, donde se elige el capacitor de menor tensión con la mayor capacidad, ver Tabla 28.

Tabla 28. Parámetros del capacitor a implementar en el simulador

VOLTAJE (kV)	POTENCIA (kVAR)	C (μF)	Xc (Ω)	I Nominal (A)
2.4	50	23	115.3	20.81
2.4	75	34.5	76.8	31.25
2.4	100	46	57.6	41.67
2.4	150	69	38.4	62.50
2.4	200	92.1	28.8	83.33
2.4	300	138.1	19.2	125
2.4	400	184.2	14.4	166.67

Tabla 29. Capacitores 2.4kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco

Transformador Monofásico (kVA)	Zcc (%)	C teórico (F)	C real (kVAR)	Variación Voltaje (%)	Condensad Requeridos
15	2.0	210.89	184.20	0.65	1
	2.5	179.81	184.20	0.11	1
	3.0	153.68	184.20	0.75	1
25	2.0	365.57	368.40	0.03	2
	2.5	304.96	368.40	0.77	2
	3.0	258.72	258.72	0.00	2
37.5	2.0	557.78	552.60	0.04	3
	2.5	461.18	552.60	0.74	3
	3.0	389.96	389.96	0.00	2

50	2.0	751.81	736.80	0.09	4
	2.5	618.23	552.60	0.54	3
	3.0	521.66	521.66	0.00	3
75	2.0	1140.62	1105.20	0.15	6
	2.5	932.79	921.00	0.06	5
	3.0	798.04	736.80	0.38	4
100	2.0	1530.46	1473.60	0.35	8
	2.5	1247.89	1289.40	0.15	7
	3.0	1049.31	1049.31	0.00	6

De la Tabla 29, se observa que para cubrir toda la gama de transformadores a 13.8kV, se requieren ocho capacitores de 400kVAR a 2.4kV. Es importante destacar que el porcentaje de error no supera el 1% lo cual establece que el voltaje al que se quiere llegar no difiere en gran magnitud con el que se desea alcanzar durante el ensayo.

A continuación se realiza un análisis teórico de los resultados obtenidos del ensayo de cortocircuito franco con compensación de reactivos.

2.3.1.1 Análisis Teórico

Cabe resaltar que la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos debe cumplir ciertos parámetros dados por [9]; entre las características que se mencionan, está la forma y magnitud de las ondas de voltaje y corriente del transformador, por tanto se implementó en la herramienta computacional toda la gama de transformadores mencionados en la Tabla 29, en las simulaciones se obtuvieron resultados semejantes entre sí; por tanto se seleccionó el transformador de 75kVA para documentar el proceso de simulación, cabe destacar que para efectos de validez se simuló el ensayo con y sin compensación de reactivos, este último alimentando el circuito con una tensión de 13.8kV.

Figura 32. Simulación de la prueba de cortocircuito franco a 13.8kV

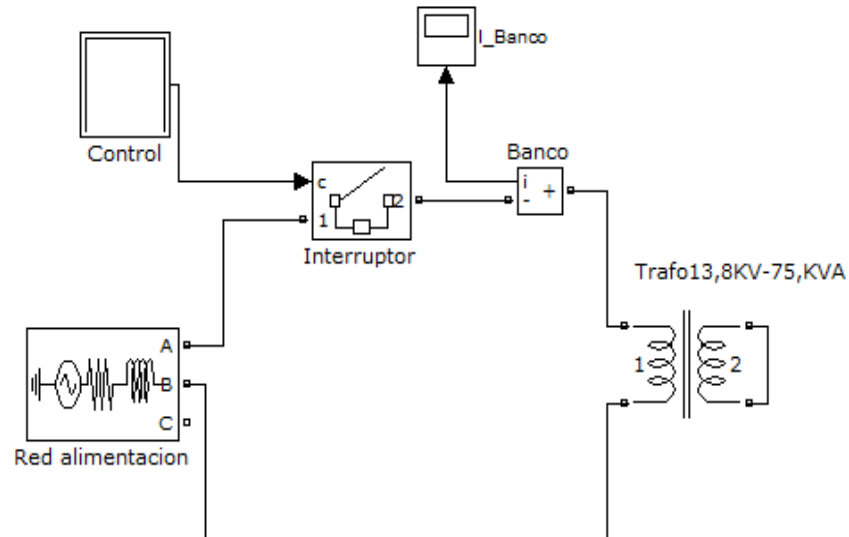


Figura 33. Simulación de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos

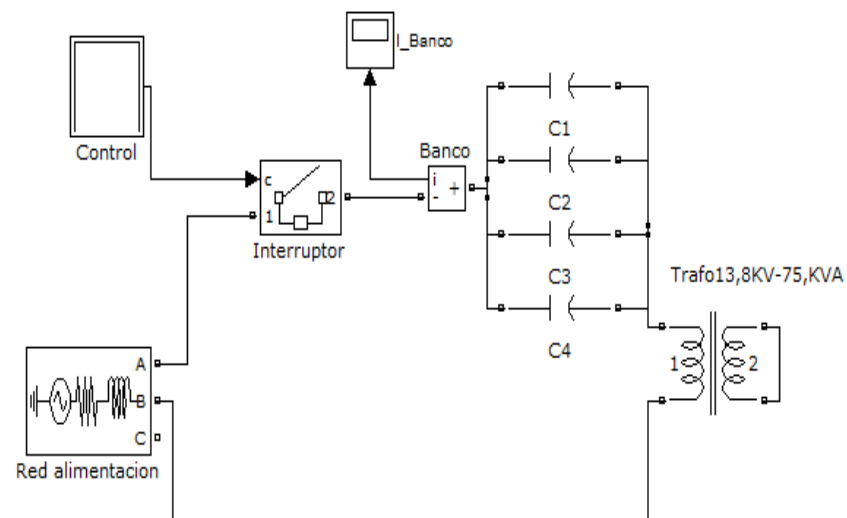


Figura 34. Corriente en el transformador con y sin compensación de reactivos

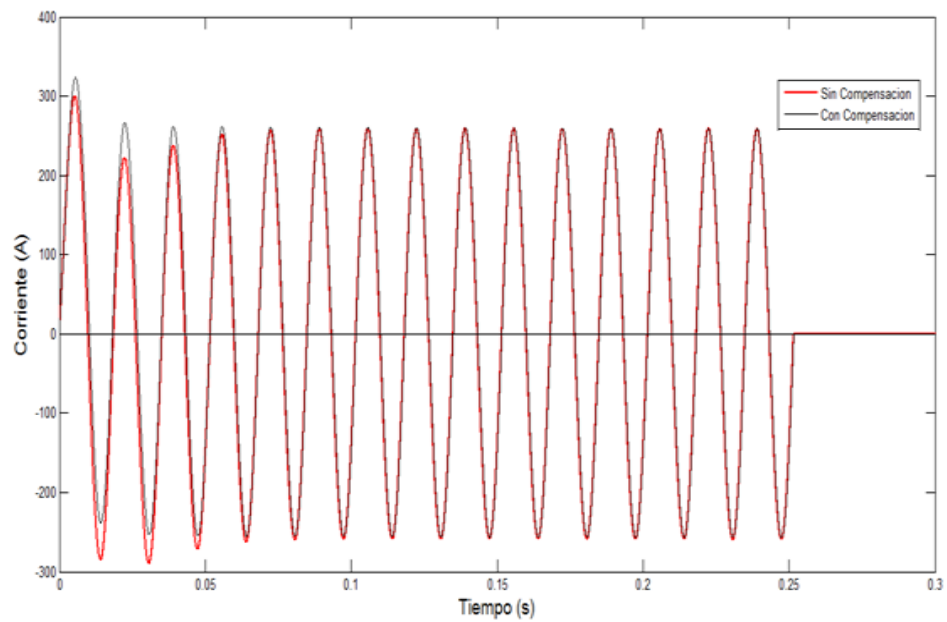


Figura 35. Voltaje en el transformador con y sin compensación de reactivos

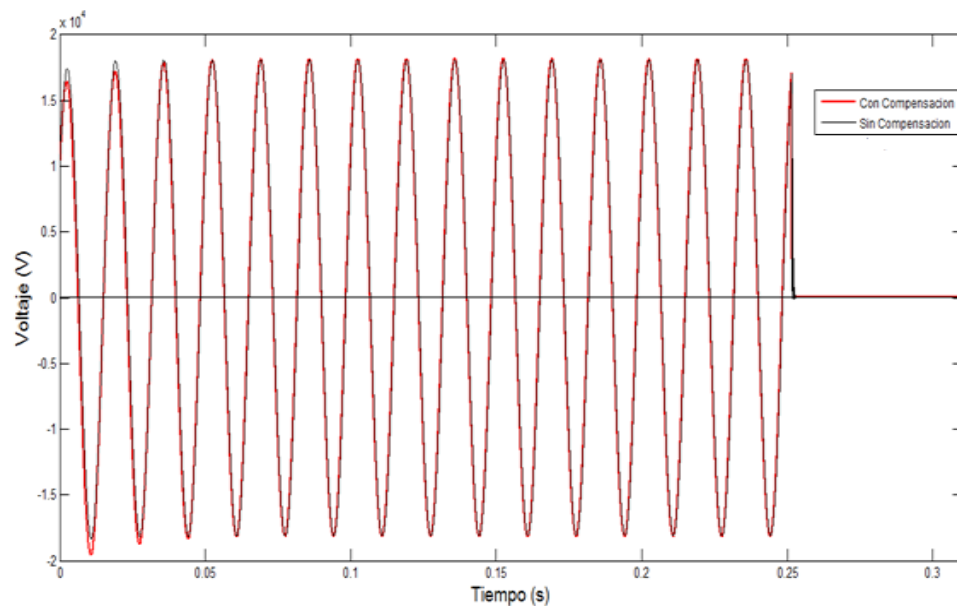


Tabla 30. Validación resultados de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos serie

RESULTADOS TEORICOS				
Corriente Transformador (A)	Voltaje Transformador (kV)	I Banco (A)	I Inrush (A)	Voltaje Banco (V)
187.55	13.8	187.55	317.21	623.82
RESULTADOS SIMULADOS CON COMPENSACION DE REACTIVOS				
Corriente Transformador (A)	Voltaje Transformador (kV)	I Banco (A)	I Inrush (A)	Voltaje Banco (V)
182.43	13.79	182.43	302.4	597.01
PORCENTAJE DE ERROR EN LOS RESULTADOS				
Corriente Transformador (%)	Voltaje Transformador (%)	I Banco (%)	I Inrush (%)	Voltaje Banco (%)
2.67	0.07	0	4.73	4.17

En las Figuras 34 y 35 se observa que las ondas de voltaje y corriente del transformador presentan similar forma de onda con y sin compensación de reactivos; cabe destacar que existe una pequeña variación en la parte asimétrica de la corriente con respecto a la obtenida teóricamente, sin embargo la discrepancia no sobrepasa el 5%.

A continuación se procede a determinar el tiempo de estabilización de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos, a través de la función de transferencia, la cual se grafica por medio de la herramienta computacional tal y como se observa en la Figura 36.

$$Hc(s) = \frac{1253.07s + 129974}{s^2 + 103.72s + 6658.53} \quad (40)$$

Figura 36. Tiempo de estabilización de la prueba de cortocircuito franco con compensación

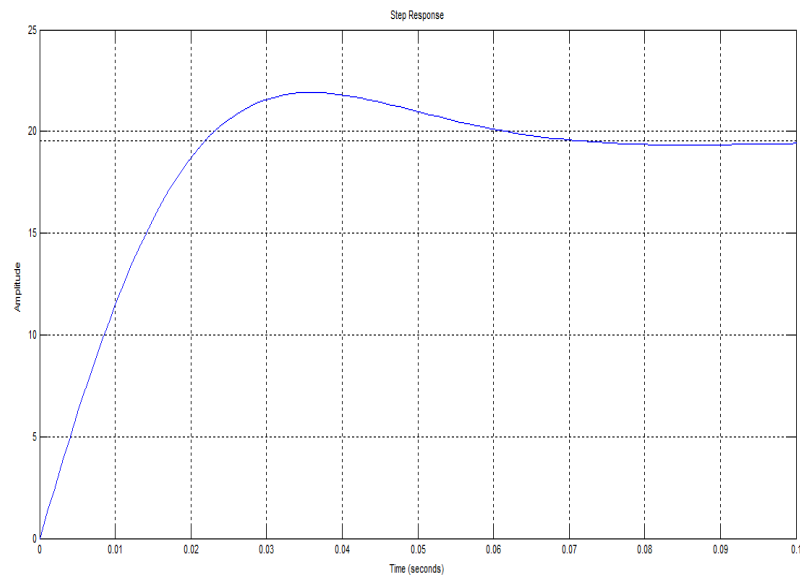


Tabla 31. Tiempo de estabilización de la prueba de cortocircuito franco

TIEMPOS DE ESTABILIZACION		
Transformador (kVA)	Con Compensación (s)	Duración del ensayo (s)
75	0.06	0.25

Se observa en la Figura 36, que el tiempo de estabilización es aproximadamente 0.06 (s), el cual es menor al que dura el ensayo, con base en esta información se deduce que la inestabilidad del periodo transitorio no afecta los resultados finales de la prueba.

Para finalizar el análisis de viabilidad de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos a este nivel de tensión, bajo estas condiciones se procede a analizar los costos asociados al ensayo.

2.3.1.2 Análisis Económico

En esta etapa se observa la inversión económica que se tendría que realizar para llevar a cabo la prueba de cortocircuito franco a este nivel de tensión. A continuación y de acuerdo a catálogos de fabricantes de condensadores, se estimó el precio del ensayo [13].

Tabla 32. Costo de implementación de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos en serie

COSTO DE IMPLEMENTAR LA PRUEBA	
Valor Condensador Unitario	3.000.000
Condensadores Requeridos	8
Costo implementación del ensayo	24.000.000

Con base en el análisis económico realizado acerca de la viabilidad de implementar la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos en el laboratorio de alta tensión a transformadores de 13.8kV, se concluye que el proyecto no es viable, ya que se requiere de una elevada inversión económica para un aumento en la tensión de 600V, sin embargo el proyecto podría alcanzar validez siempre y cuando este tipo de capacitores sean adecuados para ser implementados en los ensayos a otros niveles de tensión.

2.3.2 Transformador con nivel de tensión de 19.9kV

De manera análoga al caso anterior se procede a determinar la viabilidad de implementar en el campo de pruebas el ensayo a este nivel de tensión, para ello se determina el número de capacitores requeridos a 13.2kV para elevar la tensión tal que se pueda realizar la prueba de cortocircuito franco a los transformadores de 19.9kV.

De acuerdo a la información observada en la Tabla 33 se requieren doce condensadores de 600kVAR a 13.28kV para cubrir toda la gama de transformadores que van desde 25 hasta 100kVA. Es importante tener en cuenta, el valor de la impedancia de cortocircuito ya que cualquier variación, cambia la magnitud de la capacitancia requerida para la compensación de reactivos, generando situaciones donde la diferencia entre el voltaje nominal del transformador con respecto a la tensión medida en sus terminales durante el ensayo, supera al 5% establecida por la norma [5].

Tabla 33. Capacitores 13.2kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco

Transformador Monofásico (kVA)	Zcc (%)	C teórico (F)	C real (kVAR)	Variación Voltaje (%)	Condensad Requeridos
25	2.5	16.53	18.26	3.99	2
	3	14.87	13.70	4.11	6
	4	11.78	12.17	1.58	12
37.5	2.5	26.01	27.39	2.25	3
	2.5	22.85	22.83	0.05	10
	3.0	17.84	18.26	1.11	2
50	2.5	35.60	36.52	1.15	4
	2.5	30.90	27.39	6.51	3
	3.0	23.95	22.83	2.49	10
75	2.5	54.79	54.78	0.01	6
	2.5	47.03	45.65	1.50	5
	3.0	36.17	36.52	0.48	4
100	2.5	74.02	73.04	0.65	8
	2.5	63.20	63.91	0.54	7
	3.0	48.40	45.65	3.11	5

Del análisis planteado con respecto a implementar la prueba de cortocircuito franco con compensación de voltaje en el laboratorio de alta tensión para transformadores a 19.9kV, se observa que hay viabilidad para ciertos casos en cuestión de numero de condensadores requeridos, sin embargo hay que tener presente los factores que pueden perjudicar los resultados al momento de realizar el ensayo, los cuales se describen más adelante.

A continuación se estudia la viabilidad del banco de condensadores de 400kVAR a 2.4kV, el cual permitió superar la dificultad técnica en el caso de los transformadores de 13.8kV; el objetivo es observar los efectos de esta nueva capacitancia a este nivel de tensión.

Tabla 34. Capacitores 2.4kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco

Transformador Monofásico (kVA)	Zcc (%)	C teórico (μF)	C real (kVAR)	Variación Voltaje (%)	Condensad Requeridos
25	3	14.87	15.35	1.43	12
	4	11.78	11.51	1.12	16
37.5	2.5	26.01	26.31	0.52	7
	3	22.85	23.03	0.36	8
	4	17.84	18.42	1.51	10
50	2.5	35.60	36.84	1.54	5
	3	30.90	30.70	0.31	6
	4	23.95	23.03	2.02	8
75	2.5	54.79	61.40	4.92	3
	3	47.03	46.05	1.04	4
	4	36.17	36.84	0.90	5
100	2.5	74.02	92.01	8.75	2
	3	63.20	61.40	1.46	3
	4	48.40	46.05	2.61	4

Analizando los resultados de la Tabla 34 se observa que para cubrir toda la gama de transformadores, se requieren dieciséis condensadores de 2.4kV, Sin embargo suceden casos donde el error es mayor al 5%.

Cabe mencionar que la primera opción requiere menos condensadores para cubrir toda la gama de transformadores, además los errores son similares en ambas situaciones, por lo cual presenta más viabilidad realizar el ensayo con los bancos de condensadores de 600kVAR a 13.2kV.

2.3.2.1 Análisis Teórico

En esta etapa se implementa en la herramienta computacional la prueba con el transformador de 100kVA que es el equipo disponible de más capacidad: debido a las características del ensayo, la simulación se realiza utilizando la capacitancia teórica y se comparan los resultados simulados con los teóricos, ver Tabla 35.

Figura 37. Corriente en el transformador con y sin compensación de reactivos

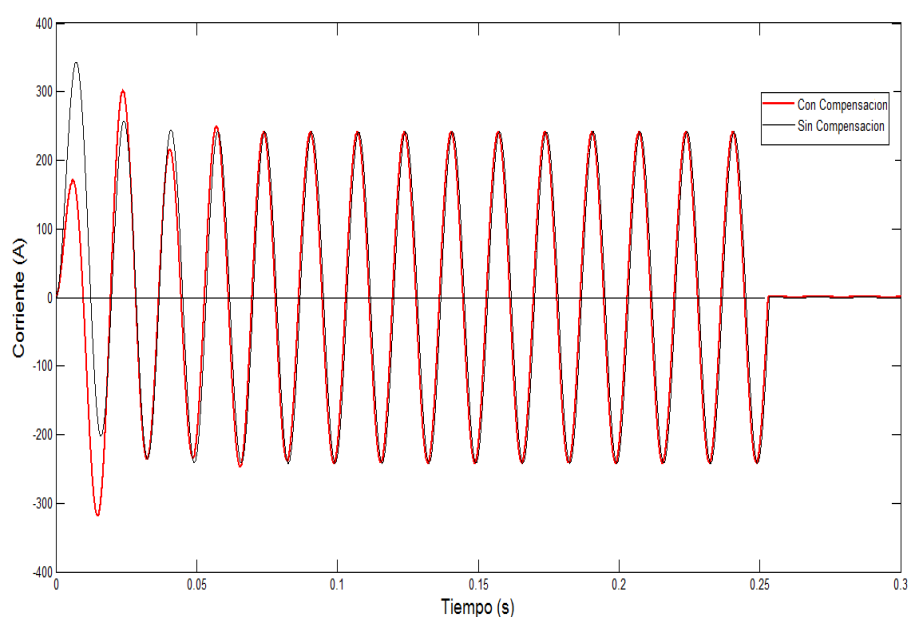


Figura 38. Voltaje en el transformador con y sin compensación de reactivos

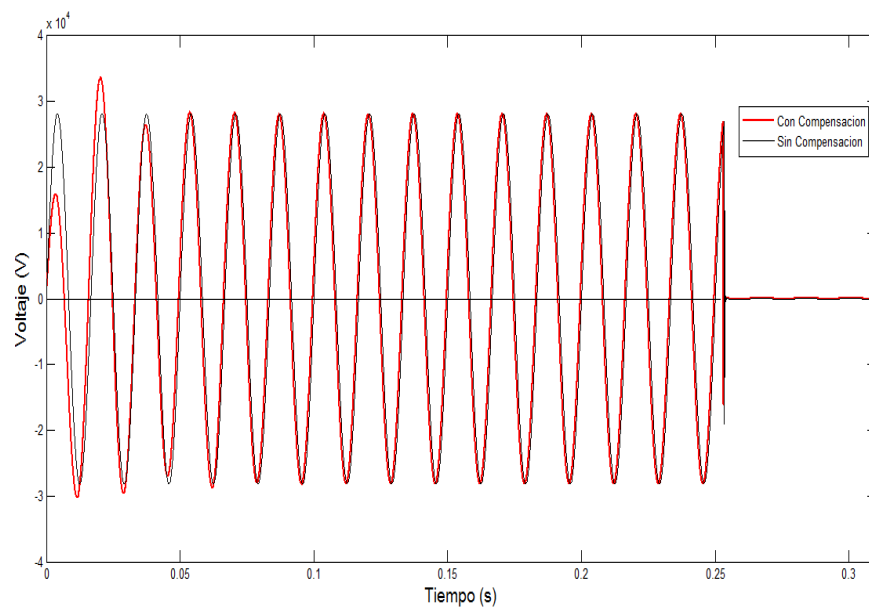
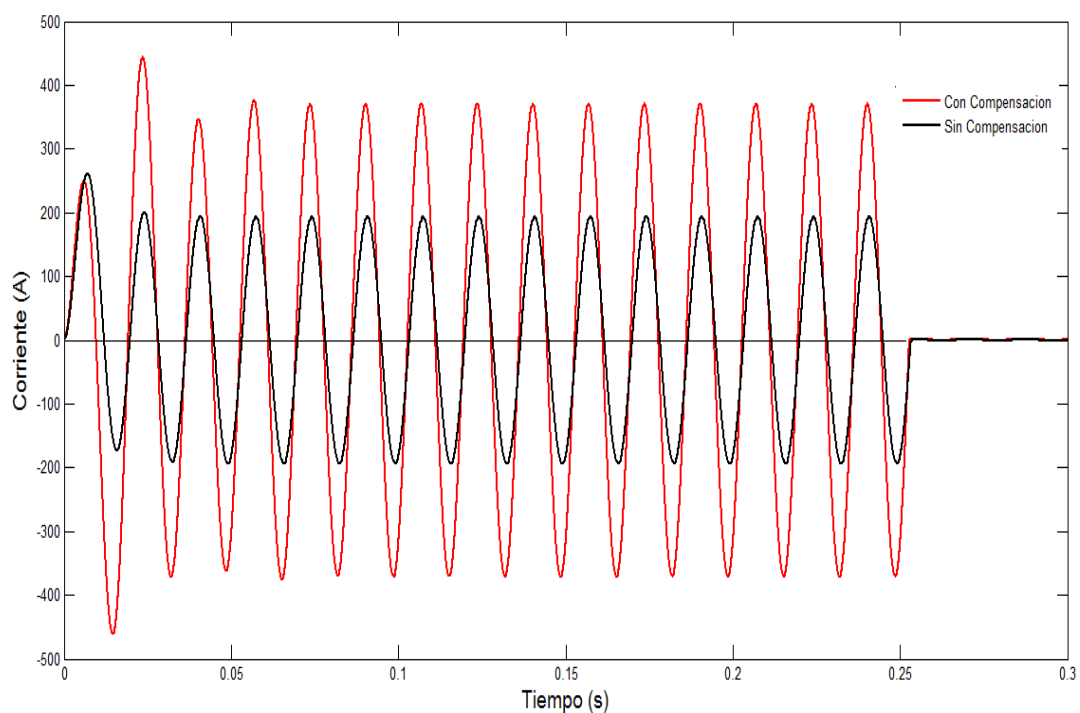


Tabla 35. Validación resultados de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos

RESULTADOS TEORICOS			
Corriente Transformador (A)	Voltaje Transformador (kV)	Voltaje banco (kV)	I Inrush (A)
185	19.9	6.2	350
RESULTADOS SIMULADOS CON COMPENSACION DE REACTIVOS			
Corriente Transformador (A)	Voltaje Transformador (kV)	Voltaje banco (kV)	I Inrush (A)
188	19.7	6.7	180
PORCENTAJE DE ERROR EN LOS RESULTADOS			
Corriente Transformador (%)	Voltaje Transformador (%)	Voltaje banco (%)	I Inrush (%)
1.62	0.1	8.06	94.4

A partir de la Figura 38, se observa una gran diferencia en magnitud y forma en la parte asimétrica de la corriente de falla, esto es debido al estado inicial del condensador (cortocircuito), el cual provoca que el ensayo se comporte como si no hubiera compensación tal y como se observa en la Figura 39, donde se compara la corriente de falla alimentando el transformador con tensión de 13.2kV con y sin compensación de reactivos.

Figura 39. Pico asimétrico en la prueba de reactivos con y sin compensación de reactivos



Cabe mencionar que la norma, exige que dos de los seis ensayos, deben cumplir con la forma asimétrica de la onda de corriente del transformador para ser válida. Por tanto la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos no tiene viabilidad a este nivel de voltaje ya que no cumple con los criterios de aceptación dados por [8]. Teniendo en cuenta lo anterior, esta opción no debe implementarse en el campo de pruebas del laboratorio de alta tensión de la universidad del valle.

A continuación se procede a determinar el tiempo de estabilización de la prueba a través de la función de transferencia.

$$Hc2(s) = \frac{15.82e3s + 1.277e6}{s^2 + 110,7s + 4698.6} \quad (41)$$

Figura 40. Tiempo de estabilización de la prueba de cortocircuito franco con compensación

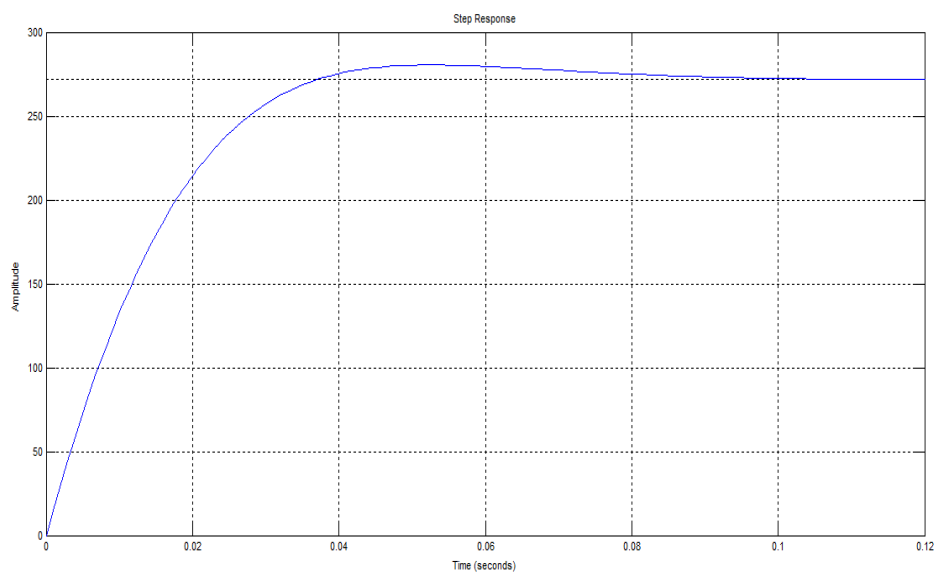


Tabla 36. Tiempo de estabilización del circuito de prueba de cortocircuito franco

TIEMPOS DE ESTABILIZACION		
Transformador (kVA)	Con Compensación (s)	Duración del Ensayo (s)
75	0.06	0.25

Se observa que la prueba tarda muy poco en estabilizarse 0.06 (s) con respecto a la duración del ensayo, por tanto se concluye que el tiempo transitorio no afecta las magnitudes de los resultados finales. A continuación y en modo de investigación se procede al análisis económico del ensayo.

2.3.2.2 Análisis Económico

Teniendo en cuenta la viabilidad técnica de la prueba utilizando los condensadores de 13.2kV, se concluye que para este nivel de tensión, la compensación de reactivos resulta una gran opción en cuestión económica; ya que las características del banco se ajustan a las requeridas para la compensación de reactivos en paralelo. En el caso de los capacitores de 2.4kVAR a 400V, se requieren dieciséis, lo cual es un costo relativamente alto, ver Tabla 37, por tanto no se justifica implementarlos en el ensayo de cortocircuito franco con compensación de reactivos en serie a 19.9kV.

Tabla 37. Costo de implementación de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos en serie

COSTO DE IMPLEMENTAR LA PRUEBA	
Valor Condensador Unitario	3.000.000
Condensadores Requeridos	16
Costo implementación del ensayo	48.000.000

A continuación se estudia la viabilidad de implementar la prueba de cortocircuito franco a transformadores de 34.5kV con compensación de reactivos.

2.3.3 Transformador con nivel de tensión de 34.5kV

De manera análoga a los casos analizados con anterioridad; se procede a determinar la viabilidad de implementar en el campo de pruebas el ensayo a este nivel de tensión, para ello se determina el número de condensadores de 600kVAR a 13.2kV requeridos para elevar el voltaje, tal que se pueda realizar la prueba de cortocircuito franco a los transformadores de 34.5kV.

Tabla 38. Capacitores 13.2kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco

Transformador Monofásico (kVA)	Zcc (%)	C teórico (F)	C real (kVAR)	Variación Voltaje (%)	Condensad Requeridos
37.5	3.0	3.98	4.565	10.58	10
	3.5	3.56	3.043	3.22	10
	4.0	3.19	3.043	7.10	3
50	3.0	5.41	6.087	23.41	2
	3.5	4.80	4.565	7.42	2
	4.0	4.28	4.565	8.27	2
75	3.0	8.27	9.130	11.45	4
	3.5	7.29	9.130	33.58	6
	4.0	6.48	6.087	10.21	6
100	3.0	11.14	12.173	33.98	4
	3.5	9.78	9.130	11.09	4
	4.0	8.68	9.130	6.90	4

Se observa en la Tabla 38, que se requieren diez capacitores para cubrir toda la gama de transformadores. Es importante destacar que la diferencia del voltaje nominal del transformador con respecto al medido en sus terminales supera el 5%. Teniendo en cuenta lo anterior se plantea utilizar la compensación de reactivos con el condensador de 400kVAR a 2.4kV.

Tabla 39. Capacitores 2.4kV requeridos en la prueba de cortocircuito franco

Transformador Monofásico (kVA)	Zcc (%)	C teórico (F)	C real (kVAR)	Variación Voltaje (%)	Condensad Requeridos
37.5	3.0	3.98	4.005	0.66	46
	3.5	3.56	3.542	0.72	52
	4.0	3.19	3.176	0.58	58
50	3.0	5.41	5.418	0.21	34
	3.5	4.80	4.848	1.30	38
	4.0	4.28	4.284	0.01	43
75	3.0	8.27	8.373	1.60	22
	3.5	7.29	7.368	1.54	25
	4.0	6.48	6.579	2.20	28
100	3.0	11.14	10.836	3.92	17
	3.5	9.78	9.695	1.29	19
	4.0	8.68	8.772	1.56	21

Analizando los resultados de la Tabla 39 se observa que para cubrir toda la gama de transformadores, se requieren cincuenta y ocho condensadores de 400kVAR a 2.4V, de lo cual se concluye que la compensación de reactivos para este nivel de tensión utilizando este tipo de capacitores no se ajusta a las características del sitio a donde se desea implementar la prueba. Cabe resaltar que la capacitancia necesaria para llegar a este nivel de tensión 34.5kV es relativamente baja, lo cual no permite que haya gran discrepancia entre los reactivos inyectados teóricamente y los reales implementados durante el ensayo.

A continuación se analizan las ondas obtenidas de la simulación y determinar por medio de la norma si cumplen o no con los criterios de aceptación.

2.3.3.1 Análisis teórico

Siguiendo con los criterios que se han venido utilizando para determinar la viabilidad del ensayo de cortocircuito franco con compensación de reactivos se procede a comparar los resultados teóricos con respecto a los simulados de la prueba. Cabe destacar que se implementó en la herramienta computacional el transformador de mayor capacidad de 100kVA disponible, empleando el banco de condensadores de 600kVAR a 13.2kV.

Figura 41. Simulación de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos

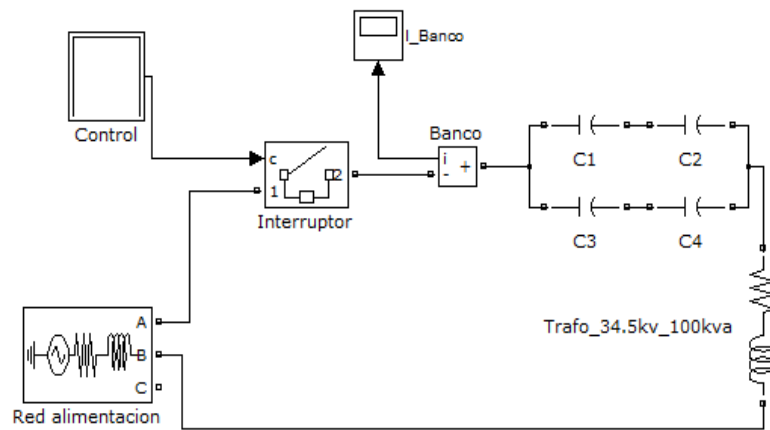


Figura 42. Corriente en el transformador con y sin compensación de reactivos

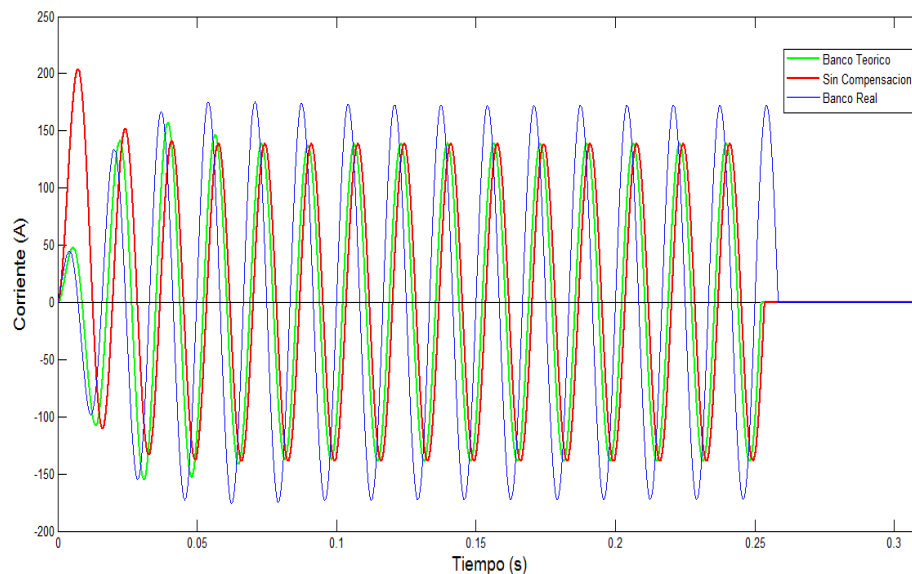
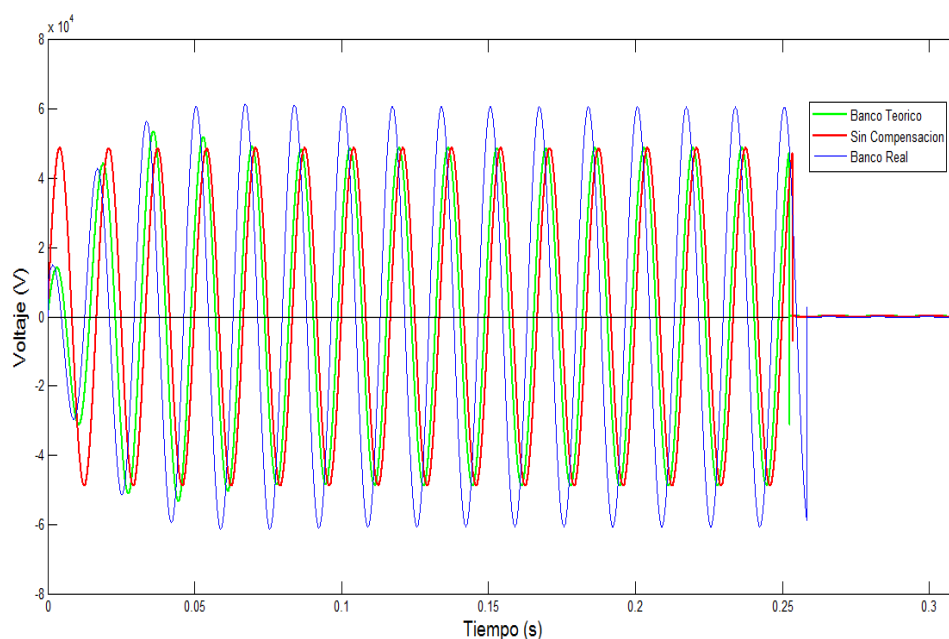


Figura 43. Voltaje en el transformador con y sin compensación de reactivos

Se observa que la forma de la onda de corriente del transformador no presenta forma asimétrica cuando se utiliza la compensación de reactivos, y de acuerdo a [8], se requiere que dos de los seis ensayos cumplan con este requisito; además la diferencia entre el voltaje nominal del transformador con respecto a la tensión medida en sus terminales supera el 5%. Con base en esta información se concluye que el ensayo no es válido para este nivel de tensión [8].

Tabla 40. Validación resultados teóricos vs simulados del ensayo

RESULTADOS TEORICOS			
Corriente Transformador (A)	Voltaje Transformador (kV)	Voltaje banco (kV)	I Inrush (A)
98	34.5	22	203
RESULTADOS SIMULADOS			
Corriente Transformador (A)	Voltaje Transformador (kV)	Voltaje banco (kV)	I Inrush (A)
122	43	35.39	44

PORCENTAJE DE ERROR EN LOS RESULTADOS			
Corriente Transformador (%)	Voltaje Transformador (%)	Voltaje banco (%)	I Inrush (%)
19.67	19.76	37.8	361

De acuerdo a la Tabla 40, se observa que los valores teóricos presentan gran discrepancia con respecto a los datos reales simulados en el software computacional, lo cual confirma lo dicho con anterioridad, donde se mencionó que a este nivel de tensión cualquier variación en las magnitudes eléctricas, va a reflejarse en los resultados finales del ensayo.

A continuación se procede a determinar el tiempo de estabilización de la prueba a través de la función de transferencia con la capacitancia teórica.

$$Hc2(s) = \frac{9.78e6s + 8.33e6}{s^2 + 87.48s + 95.7e3} \quad (42)$$

Figura 44. Tiempo de estabilización del ensayo con compensación de reactivos

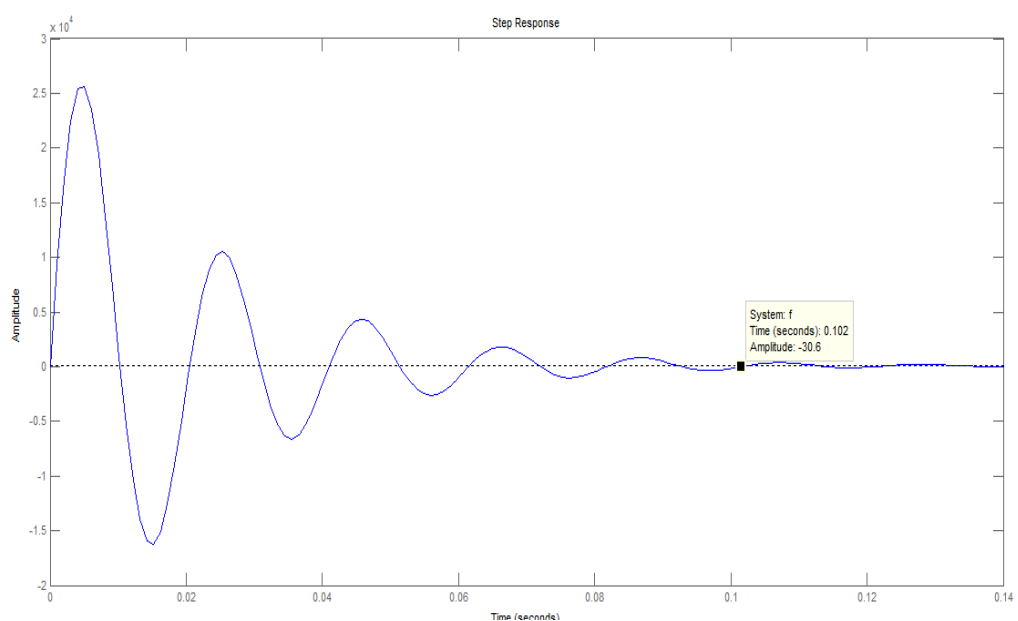


Tabla 41. Tiempo de estabilización de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos

TIEMPOS DE ESTABILIZACION		
Transformador (kVA)	Con Compensación (s)	Duración Prueba (s)
75	0.1	0.25

A partir de la Figura 44 se observa que el tiempo de estabilización del ensayo es 0.1 (s) el cual es menor al tiempo que dura la prueba, con base en esta información se concluye que el periodo transitorio no afecta las magnitudes de los resultados finales del ensayo.

2.3.3.2 Análisis Económico

Teniendo en cuenta la viabilidad técnica de la prueba utilizando los condensadores de 600kVAR a 13.2kV, se concluye que para este nivel de tensión, la compensación de reactivos resulta una gran opción en cuestión económica, sin embargo no se cumple con los criterios de aceptación [8]. Para el caso de los condensadores a 2.4kV resulta excesivamente costosa.

Tabla 42. Costo de implementación de la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos en serie

COSTO DE IMPLEMENTAR LA PRUEBA	
Valor Condensador Unitario	3.000.000
Numero de condensadores	59
Costo implementación del ensayo	177.000.000

A continuación en el siguiente capítulo se procede a la etapa de investigación de los efectos asociados a la prueba de cortocircuito franco utilizando la compensación de reactivos, cabe destacar que el estudio se basa a partir de implementar el ensayo en el software de simulación.

3. EFECTOS ASOCIADOS A LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO CON COMPENSACION DE REACTIVOS

3.1 Efectos Asociados a la Compensación de reactivos en paralelo

En la investigación acerca de la prueba de cortocircuito con compensación, se presentaron algunos efectos, los cuales deben tenerse en cuenta durante la realización del ensayo en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle. En el caso de la compensación de reactivos en paralelo, se plantean efectos tales como la variación de la capacitancia, situación que podría presentarse en el caso de un cortocircuito interno o apertura de los capacitores.

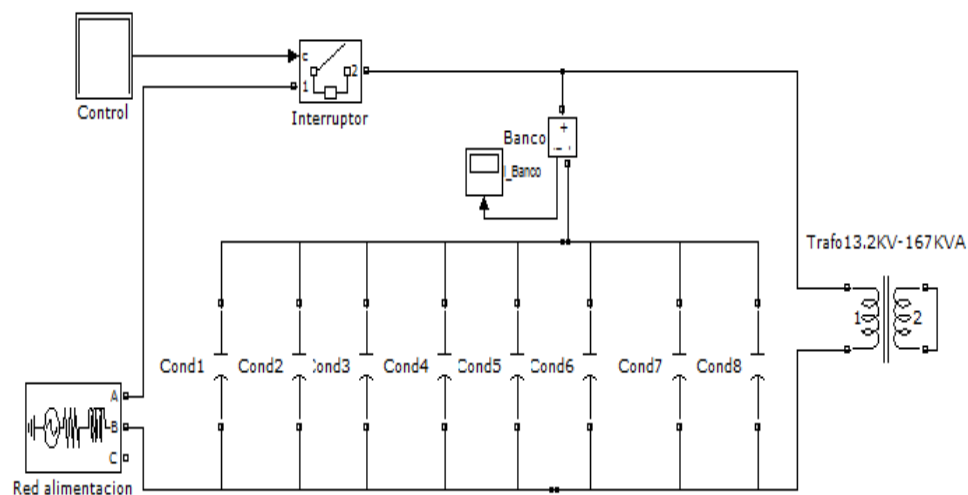
Tabla 43. Variación de la capacitancia en el ensayo de cortocircuito franco

Variación Q (kVAR)	Potencia Q (kVAR)	Capacitancia (μ F)	I banco (A)	I Fuente (A)	I Trafo (A)
0	5511	83.90	418	96	428
1.1	6062	92.29	459	104	428
1.2	6613	100.68	501	127	428
1.3	7164	109.06	543	158	428
1.4	7715	117.45	585	192	428
0.9	4960	75.51	376	104	428
0.8	4409	67.12	334	127	428
0.7	3858	58.73	292	158	428
0.6	3307	50.34	251	193	428
0.5	2756	41.95	209	230	428

En la tabla 43 se observa como la capacitancia fluctúa por encima y por debajo en un 50% del valor ideal para el estado de máxima compensación, además la corriente suministrada por la línea de alimentación varía entre 96A y 230A, lo cual va a generar que actúen las protecciones.

A continuación se ilustra el circuito base para simular las fallas que se podrían presentar durante la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos, cabe resaltar que se utilizó el transformador 167.5kVA que es el de mayor capacidad.

Figura 45. Circuito para el análisis de los efectos asociados a la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos



En el primer caso se implementa en la herramienta computacional el ensayo con el condensador número 1 en cortocircuito, cabe resaltar que ante la falla se genera un corto entre fases en el circuito, es importante que en el capacitor y en la línea de alimentación actúen las protecciones para que no estén sometidos a la sobrecorriente, cabe destacar que el transformador no sufre riesgos ante la falla ya que de manera instantánea queda sin alimentación, ver Figura 46.

En el segundo caso se desconecta el condensador número 1, con el fin de observar el comportamiento del ensayo cuando se reducen los reactivos inyectados. De acuerdo a la Tabla 35 al variar la capacitancia, la corriente del transformador no sufre alteración, sin embargo hay que tener cuidado con la línea de alimentación en no exceder su capacidad; con respecto al capacitor no existe inconvenientes ya que el amperaje que circula por el dispositivo es de menor magnitud que con la cual inicio tal y como se observa en la Figura 45.

En el tercer caso se intenta determinar el comportamiento del ensayo cuando el devanado primario del transformador presenta un cortocircuito. Para este tipo de falla, el transformador queda desenergizado de manera instantánea, sin embargo antes de que actúen las protecciones de la línea, el bobinado queda sometido a una sobrecorriente, causando graves daños en la maquina; en el caso del banco de condensadores se genera un pico de corriente transitorio del orden de kiloamperios con una duración aproximada de un milisegundos.

Figura 46. Condensador # 1 en cortocircuito durante el ensayo

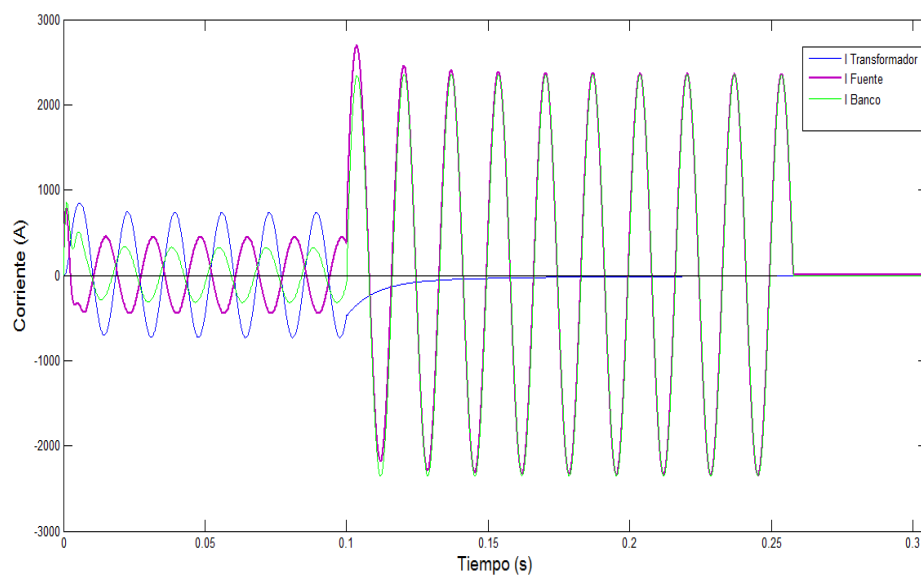
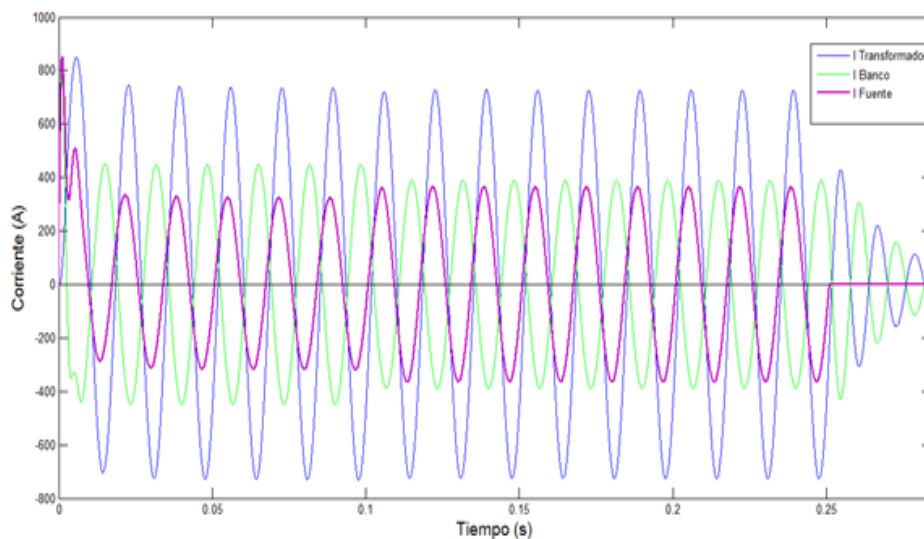


Figura 47. Apertura del condensador # 1 durante el ensayo



Teniendo en cuenta los posibles eventos que se podrían presentar durante el ensayo de cortocircuito franco con compensación de corriente es importante tomar medidas correctivas tales como conocer el estado previo de los elementos asociados a la prueba y tener en cuenta la capacidad de sobrecarga que pueden soportar los equipos.

3.2 Efectos Asociados a la Compensación de reactivos en serie

En esta situación se presentan magnitudes elevadas de voltaje y corriente en los elementos asociados al ensayo; generando riesgos tanto para los equipos eléctricos como para las personas que los manipulan. Cabe mencionar que el efecto es más notorio a medida que se aumenta la tensión en la prueba, situación que obliga a estudiar la compensación de reactivos en serie a 19.9kV y 34.5 kV.

3.2.1 Efectos Asociados a la Compensación de Voltaje a transformadores de 19.9 kV

El ensayo se realiza al transformador de mayor capacidad de 100kVA a 19.9kV disponible, en primera instancia se observa en la Tabla 44 magnitudes elevadas de tensión y corriente tanto en el equipo inductivo como en el capacitor; situación que se puede presentar al reducir los reactivos inyectados para la compensación o en caso de falla interna del capacitor. Para visualizar las consecuencias de los efectos a este nivel de tensión, se grafican los resultados obtenidos en los elementos utilizados durante la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos.

Tabla 44. Variación de la capacitancia en el ensayo de cortocircuito franco

Variación Capacitor	Capacitor Real (μF)	Voltaje Transformador (V)	Error (%)	Corriente Simétrica (A)	Voltaje Banco (V)
0.4	25.28	45815	130	393	41201
0.5	31.60	35660	79	306	25655
0.6	37.92	28875	45	247	17312
0.7	44.24	25037	26	215	12866
0.8	50.56	22660	14	194	10189
0.9	56.88	21062	6	181	8418
0	63.20	19919	0	171	7165
1.1	69.52	19064	4	163	6234
1.2	75.84	18400	8	158	5516
1.3	82.16	17870	10	153	4945
1.4	88.48	17438	12	149	4481
1.5	94.80	17079	14	146	4096
1.6	101.12	16776	16	144	3771

Figura 48. Voltaje y corriente en el capacitor variando la capacitancia

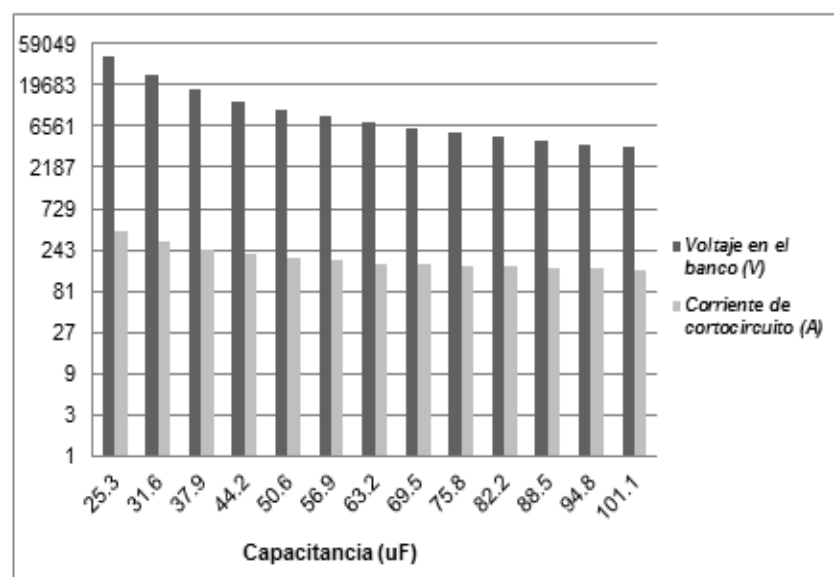


Figura 49. Voltaje en el transformador variando la capacitancia del condensador

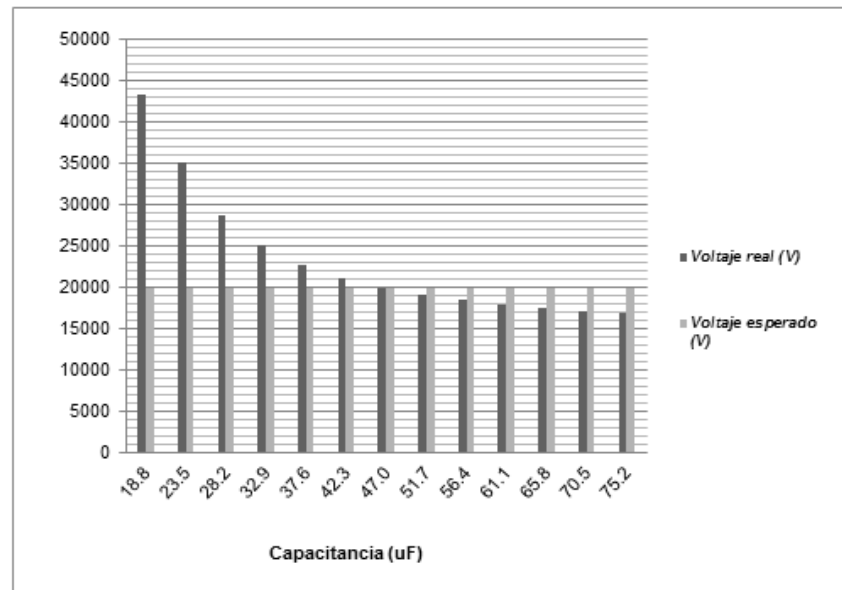
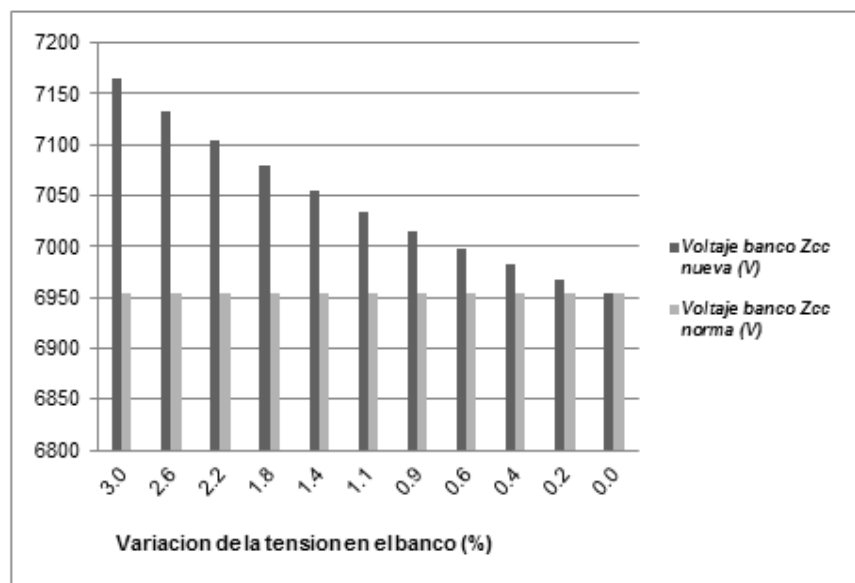


Figura 50. Tensión en el capacitor variando la impedancia de cortocircuito



De acuerdo a las Figuras anteriores donde se visualiza la respuesta de los elementos asociados a la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos, se observan las magnitudes elevadas de corriente y voltaje a los cuales serían sometidos los equipos en caso de presentarse variaciones en los reactivos suministrados por los capacitores.

A continuación se procede a analizar los efectos asociados al ensayo de cortocircuito franco utilizando compensación de reactivos a un nivel de tensión de 34.5kV.

3.2.2 Efectos Asociados a la Compensación de Voltaje a transformadores de 34.5kV

Para el estudio de la prueba a este nivel de tensión, se utiliza el transformador de mayor capacidad disponible en la base de datos, el cual es de 100kVA, y de manera similar al caso de 19.9kV se varía la capacitancia en un 60% por debajo y por encima del requerido para llegar a la tensión 34.5kV, cabe mencionar que en la Tabla 45 se observan las magnitudes eléctricas tales como el voltaje y la corriente que se presentaron en los elementos asociados al ensayo.

Es importante mencionar que al emplear capacitancias de magnitudes relativamente bajas, tal y como se observa en la Tabla 45, el ensayo es muy sensible, por tal motivo se debe tener cuidado al obtener la impedancia de cortocircuito del transformador, ya que este parámetro es fundamental para el cálculo de los reactivos para la compensación.

Tabla 45. Variación de la capacitancia en el ensayo de cortocircuito franco

Variación Capacitor	Capacitor Real (μF)	Voltaje Transformador (V)	Error (%)	Corriente Simétrica (A)	Voltaje Banco (V)
0.4	4.46	17246	50	49	29201
0.5	5.57	28807	17	82	39021
0.6	6.68	44801	30	127	50571
0.7	7.80	53337	55	152	51605
0.8	8.91	47816	39	136	40481
0.9	10.03	40154	16	114	30217
0	11.14	34511	0	98	23374

1.1	12.25	30607	11	87	18845
1.2	13.37	27836	19	79	15710
1.3	14.48	25794	25	73	13438
1.4	15.60	24237	30	69	11725
1.5	16.71	23015	33	65	10392
1.6	17.82	22032	36	63	9326

Figura 51. Voltaje y corriente en el capacitor variando la capacitancia

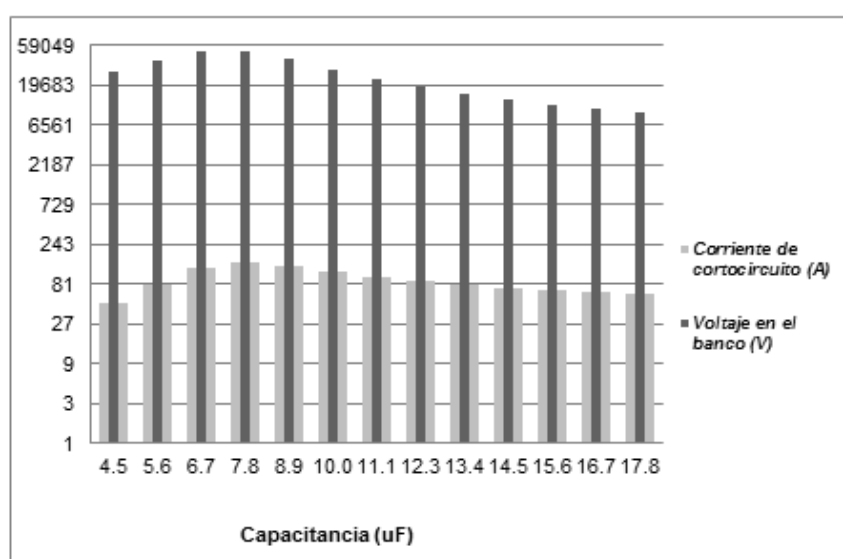


Figura 52. Voltaje en el transformador variando los reactivos compensados

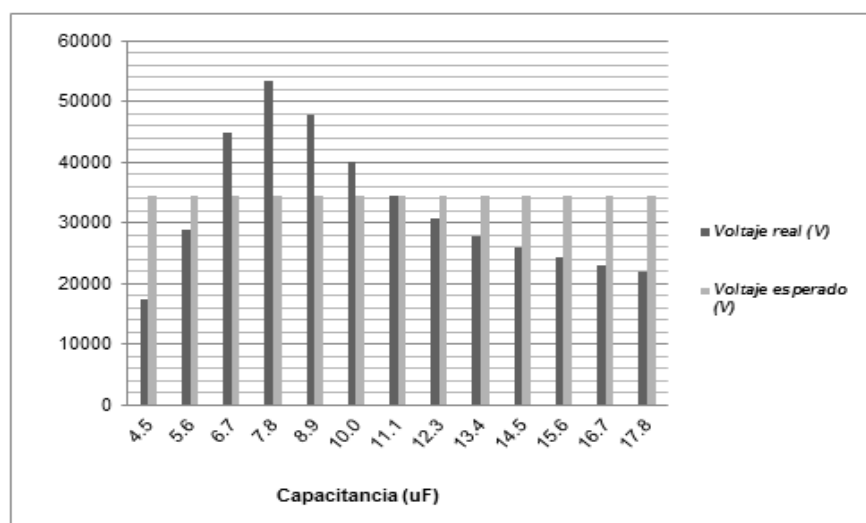
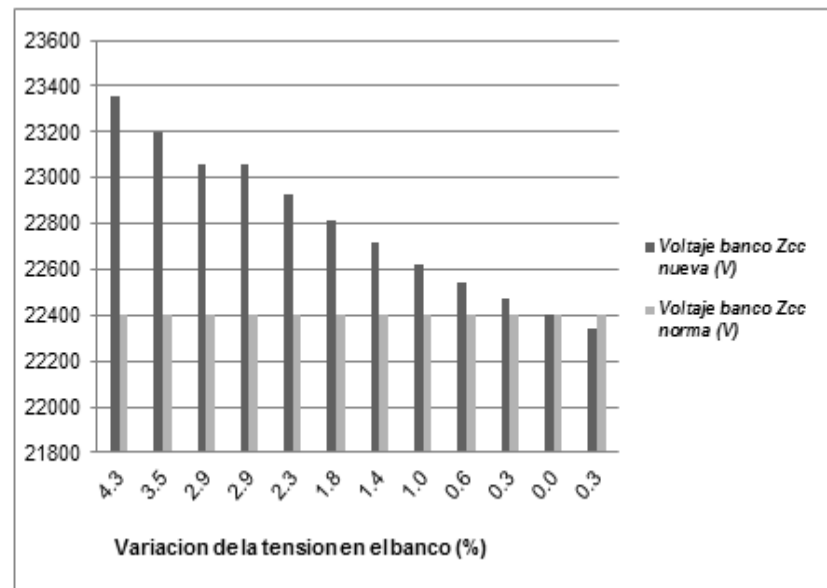
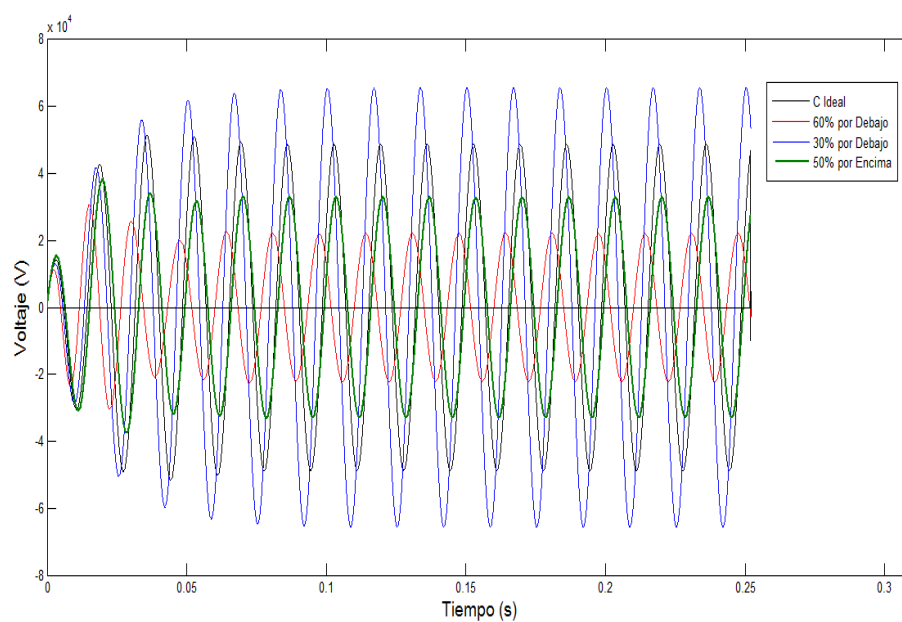


Figura 53. Tensión en el capacitor variando la impedancia de cortocircuito



Para visualizar el cambio de tensión al que se somete el transformador de 100kVA a 34.5kV en el ensayo de cortocircuito franco con compensación de reactivos en serie, se implementa la prueba en el software computacional, variando la capacitancia.

Figura 54. Variación de la capacitancia en el transformador de 100kVA



Teniendo en cuenta la información y figuras mostradas con anterioridad, se observa una gran sensibilidad en la prueba, ya que cualquier variación por mínima que sea, aumenta las magnitudes eléctricas en los equipos asociados al ensayo.

A continuación y en forma de validación se implementa en el campo de pruebas de la universidad del valle, una prueba piloto de cortocircuito a tensión nominal con y sin compensación de reactivos.

3.3 Prueba de cortocircuito a tensión nominal con compensación de reactivos implementada en el campo de pruebas

Para la prueba se utilizó un transformador de 15kVA con una tensión nominal de 13.2kV, el cual previamente se le han realizado las pruebas de rutina. Para la compensación de reactivos se utilizaron condensadores de 50kVAR a 7.6kV, donde se midieron magnitudes eléctricas tales como la corriente de falla, la de alimentación y la del capacitor. Para tener una excelente visualización de las formas de ondas, se utiliza un osciloscopio (INSTEK 00S-3354).

Figura 55. Osciloscopio implementado durante el ensayo de cortocircuito franco



Para determinar los efectos que conlleva el implementar los capacitores durante el ensayo de cortocircuito a tensión nominal con compensación de reactivos, se realiza la prueba sin los condensadores.

3.3.1 Prueba de cortocircuito a tensión nominal sin compensación de reactivos

A continuación se ilustran los datos del transformador al cual se le ha realizado la prueba de cortocircuito a tensión nominal; y por medio de la Figura 49 y 50, se observan las formas de onda de las magnitudes eléctricas presentadas durante el ensayo en el campo de pruebas del laboratorio de alta tensión de la universidad del valle.

Tabla 46. Transformador 15kVA implementando para la prueba real

DATOS TEORICOS DEL TRANSFORMADOR			
Capacidad (kVA)	15	Voltaje secundario (V)	240
Voltaje Primario (kV)	13.2	Corriente Primaria (A)	1.13
Corriente secundaria (A)	62.5	Zcc (%)	2.95
PRUEBA DE CORTOCIRCUITO A TENSION NOMINAL (TEORICOS)			
Corriente Simétrica (A)	38.3	Corriente Asimétrica (A)	72.8
Corriente de la Fuente (A)	38.3	Voltaje Alimentación (kV)	13.2
PRUEBA DE CORTOCIRCUITO A TENSION NOMINAL (SIMULACION)			
Corriente Simétrica (A)	40.55	Corriente Asimétrica (A)	73.6
Corriente de la Fuente (A)	40.55	Voltaje Alimentación (kV)	13.2
PRUEBA DE CORTOCIRCUITO A TENSION NOMINAL (REAL)			
Corriente Simétrica (A)	39.19	Corriente Asimétrica (A)	74.2
Corriente de la Fuente (A)	39.19	Voltaje Alimentación (kV)	13.18

Se observa que los datos reales se asemejan a los obtenidos por medio del software computacional y a los teóricos, lo cual da confiabilidad a la prueba, a continuación se grafican las magnitudes de corriente de falla con respecto al suministrado por la línea de alimentación, para determinar si las formas de ondas cumplen con los criterios de aceptación [8].

Figura 56. Corriente de corto obtenida en la prueba simulada sin compensación de reactivos

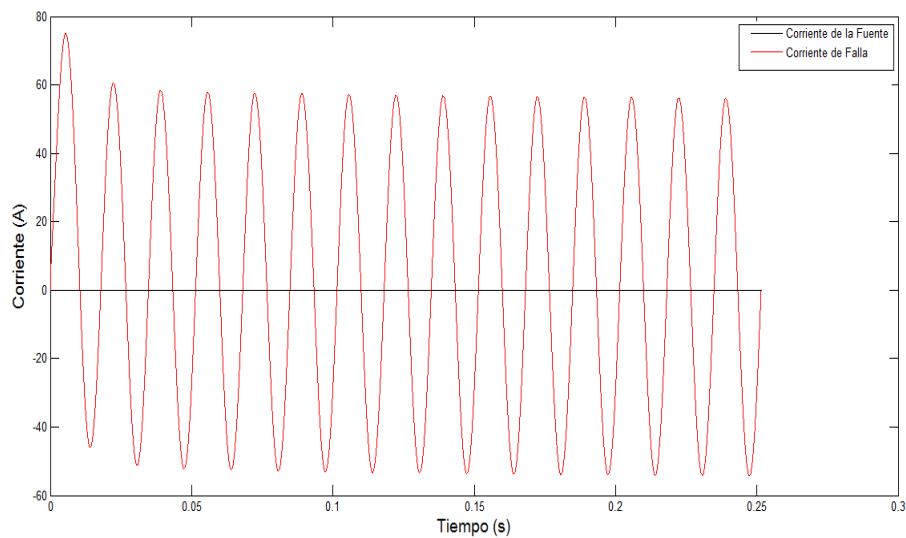
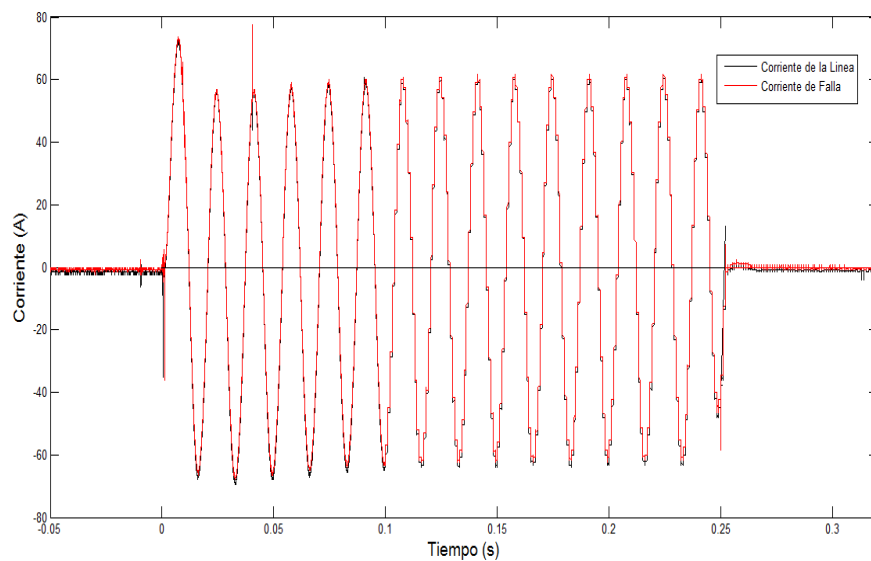


Figura 57. Corriente de falla obtenida del ensayo implementado en el campo de pruebas



Comparando las Figuras 56 y 57 se observa que la corriente de falla de la prueba simulada y la implementada en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle, presentan similar forma de onda; cabe mencionar que en el ensayo real hay presencia de armónicos, esto es debido a que la universidad está interconectada eléctricamente, situación que añade elementos reactivos al sistema, deformando la señal de la línea de alimentación; sin embargo, esto no afecta los resultados finales, los cuales cumplen con el criterio de aceptación [8].

Figura 58. Prueba de cortocircuito a tensión nominal al transformador 15kVA



A continuación se realiza la prueba de cortocircuito a voltaje nominal en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle, utilizando la compensación de reactivos.

3.3.2 Prueba de cortocircuito a tensión nominal con compensación de reactivos

El ensayo se realiza a 13.2kV situación que obliga a configurar el banco de condensadores para que soporte esta magnitud de voltaje, ya que sus parámetros constructivos presentan una tensión nominal de 7.6kV; para tal fin se conectan las capacitancias en serie obteniendo una magnitud de $2.08\mu\text{F}$, sin embargo para que ocurra la máxima compensación de reactivos se requieren $7.44\mu\text{F}$.

Figura 59. Conexión en serie del banco de condensadores 7.6kV



Tabla 47. Datos del Transformador 15kVA implementando para el ensayo

DATOS TEORICOS DEL TRANSFORMADOR			
Capacidad (kVA)	15	Voltaje secundario (V)	240
Voltaje Primario (kV)	13.2	Corriente Primaria (A)	1.13
Corriente secundaria (A)	62.5	Zcc (%)	2.95
PRUEBA DE CORTOCIRCUITO A TENSION NOMINAL (TEORICO)			
Corriente Simétrica (A)	38.3	Corriente Simétrica (A)	72.8
Corriente de la Fuente (A)	38.3	Voltaje Alimentación (V)	13200
DATOS TEORICOS DE LA PRUEBA (SIMULACION)			
Corriente Simétrica (A)	43.55	C. Resonancia (μ F)	7.44
Corriente Asimétrica (A)	73.6	I. Compensación (%)	31.11
Corriente de la Fuente (A)	31	C. Implementada (μ F)	2.08
I. banco (A)	14.23	V. Condensador (V)	13200
DATOS REALES DE LA PRUEBA			
Corriente Simétrica (A)	45.21	C. Implementada (μ F)	2.08
Corriente Asimétrica (A)	80	I. Compensación (%)	31.07
Corriente de la Fuente (A)	31.28	I. Banco (A)	14.14

De la Tabla 47 se observa que los resultados obtenidos a través de la herramienta computacional son similares al ensayo implementado en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle, cabe mencionar que el porcentaje de compensación no presenta gran variación en ambos casos, lo cual es importante para el proceso de validación de la prueba.

Se observa en las Figuras 58 y 59 que la corriente de alimentación y la de falla, presentan similar forma de onda, tanto en la simulación como en el evento real, sin embargo y al igual que en el caso anterior, hay presencia de armónicos en el ensayo implementado en el laboratorio de alta tensión, no obstante esta situación no afecta los resultados finales de la prueba.

Figura 60. Simulación con los datos teóricos de la prueba de cortocircuito a tensión nominal

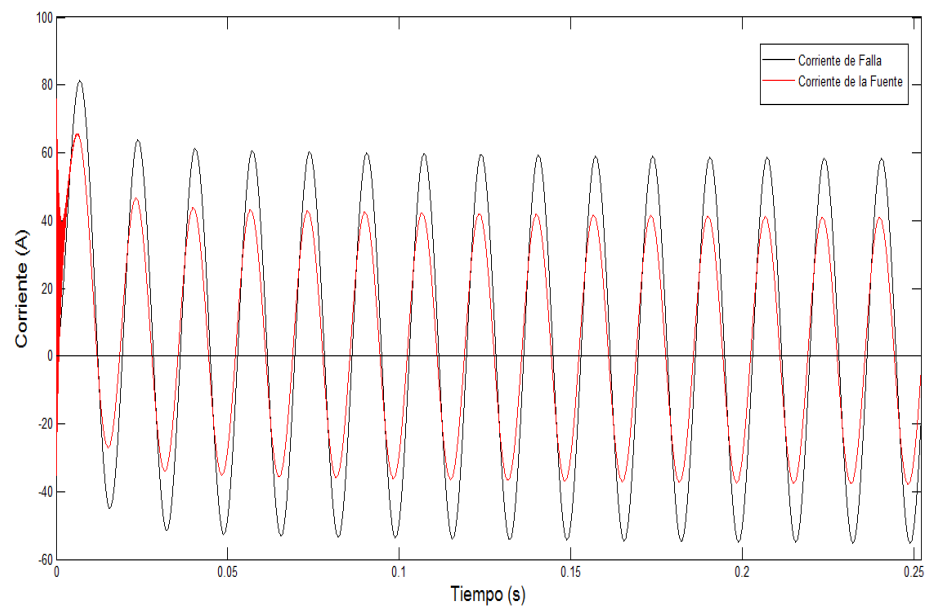


Figura 61. Prueba implementada en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle

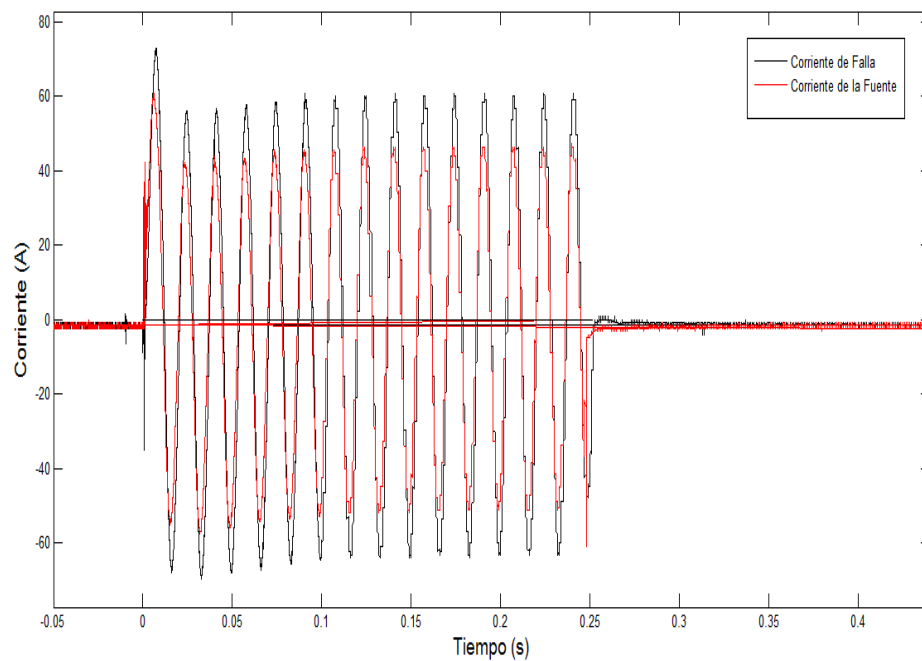


Figura 62. Prueba de cortocircuito a tensión nominal con compensación de reactivos



Teniendo en cuenta la información anterior se observa una gran reducción en la corriente suministrada por la línea de alimentación en el laboratorio de alta tensión durante el ensayo, además las ondas obtenidas cumplen con los criterios de aceptación [8], de esta forma se logró aumentar el alcance de la prueba a transformadores monofásicos de 167.5kVAR con voltaje de 13.2kV.

4. CONCLUSIONES

- La compensación de reactivos es un fenómeno que se implementó durante la prueba de cortocircuito franco con el fin de aumentar la gama de transformadores que se manejan en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle. En la investigación se observó una dependencia directa entre los reactivos requeridos y algunos parámetros del transformador tales como la capacidad, impedancia de cortocircuito y tensión nominal para el caso serie.
- Al emplear magnitudes elevadas de reactivos para la prueba de cortocircuito franco con compensación en paralelo, el ensayo presenta estabilidad frente a variaciones en la capacitancia producto de fallas en los bancos de condensadores, sin embargo y en caso de ocurrir una desconexión total del equipo capacitivo, la corriente puede superar la capacidad de la línea de alimentación, generando que las protecciones actúen para evitar daños severos en los dispositivos eléctricos.
- Una alternativa para aumentar la gama de transformadores trifásicos que se prueban en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle consiste en realizar el ensayo de cortocircuito franco con compensación de reactivos en paralelo, de tal forma que se alimenta el dispositivo por dos fases, con esto se logra reducir la magnitud de la corriente de falla, debido al aumento en la impedancia de cortocircuito del equipo.
- Durante la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos en paralelo, implementada en el campo de pruebas del laboratorio de alta tensión, se observó una gran distorsión en la forma de onda de la corriente suministrada por la línea de alimentación; esto es debido a la interconexión eléctrica de la universidad del valle, situación que agrega elementos reactivos al sistema.

- La compensación serie, presenta un comportamiento inversamente proporcional entre los reactivos requeridos y la magnitud del voltaje del transformador, con base en lo anterior se observa una gran inestabilidad, ya que al tener magnitudes reducidas de capacitancia en caso de realizar la prueba a 19.9kV y 34.5kV, cualquier discrepancia por mínima que se presente en el banco de condensadores produce elevadas magnitudes de tensión y corriente en los elementos eléctricos que intervienen en el ensayo de cortocircuito franco.
- Con base en investigaciones, simulaciones y en pruebas implementadas en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle se logró comprobar la viabilidad del ensayo de cortocircuito franco utilizando la compensación de reactivos en paralelo, ya que durante la prueba hubo una gran reducción de corriente suministrada por la línea de alimentación; cabe mencionar que entre más cerca se logró llegar al estado de máxima compensación, menores fueron los amperios exigidos a la fuente de alimentación.
- La prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos en serie no debe ser implementada en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle, ya que no cumple con los criterios de validez [8]; entre estos parámetros se encuentra la forma de onda de la corriente de falla la cual debe presentar en el inicio un pico asimétrico. Cabe mencionar que al estar descargado el condensador se asemeja a un cortocircuito por tanto el ensayo en un principio se comporta como si no existiera el capacitor.
- Al realizar la prueba de cortocircuito franco con compensación de reactivos a 13.8kV se observa que si se cumple con los criterios de validez [8], sin embargo se requieren condensadores con otras características diferentes a la utilizadas en el caso paralelo, por tanto se necesita de una elevada inversión económica para aumentar la tensión en 600V, por tanto el ensayo no debe ser implementado en el laboratorio de alta tensión de la universidad del valle.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. Guillermo Aponte, Héctor Cadavid, Ferley Castro, " Implementación de la prueba de Cortocircuito en Transformadores de Distribución". Primer Congreso Latinoamericano de Generación y Transmisión de Energía Eléctrica. Octubre 1993.

- [2]. Andrés Cerón, "Desarrollo de una herramienta computacional para el análisis cuantitativo de las variaciones de las ondas obtenidas en la prueba de respuesta en frecuencia." Santiago de Cali 2010. Trabajo de grado para optar por el Título de Ingeniería Eléctrica, Universidad del Valle, Facultad de ingenierías departamento de ingeniería eléctrica y electrónica.

- [3]. Eduardo Gómez, Juan Gómez, "Diseño de un sistema resonante para realizar pruebas de cortocircuito a transformadores monofásicos de distribución." Santiago de Cali 2010. Trabajo de grado para optar por el Título de Ingeniería Eléctrica, Universidad del Valle, Facultad de ingenierías departamento de ingenierías eléctrica y electrónica.

- [4]. Jesús Fraile Mora, "Maquinas Eléctricas". Cuarta edición corregida. Febrero 2002.

- [5]. Norma Técnica Colombiana NTC 532, 1999-12-17, Segunda actualización. "Transformadores. Aptitud para soportar el cortocircuito".

- [6]. Jairo Palomino de la Cruz, "Circuitos Eléctricos II". Universidad Del Valle, Facultad de ingenierías departamento de ingeniería eléctrica y electrónica.

- [7]. Diego García, Héctor Cadavid, Ferley Castro, José Nelson, " Efecto de la magnetización durante el cortocircuito en transformadores de distribución." Energía y Computación Volumen X No.2 Edición No18. Universidad del Valle 2001.

- [8]. Guillermo Aponte, Héctor Cadavid, Ferley Castro, Carlos Lozano, " La prueba de cortocircuito y la calidad de los transformadores en Colombia." Energía y Computación. Volumen VI No 1. Edición No 12. Universidad del Valle 1997.
- [9]. Gustavo Brunello, Bogdan Kasztenny, Craig Wester, "Shunt capacitor bank fundamentals and protection". Conference for protective relay engineers Texas University. April 2003.
- [10]. Peter Wodrich, "High speed reactive compensation systems for industrial applications. Article IEEE 2001.
- [11]. Guillermo Aponte, Héctor Cadavid, Eduardo Gómez, "Obtención por mediciones de los parámetros del modelo físico-circuital de un transformador". Artículo Investigación y Desarrollo Asocodis.
- [12]. Sixto Achuri, "Apuntes generales sobre redes de distribución." Medellín 1998. Trabajo de grado para optar por el Título de Ingeniería Eléctrica, Universidad Pontificia Bolivariana.
- [13]. ABB Unidades de Capacitores HiQ, SECAP B01.en Edición 5.1, 2007-05
- [14]. Mauricio Isaac, Guillermo Jaramillo, "Modelamiento y medición de esfuerzos mecánicos en un transformador de distribución sometido a cortocircuito franco." Santiago de Cali 2000. Tesis Universidad del Valle.
- [15]. Gustavo Gil, "Diseño de transformadores de distribución, efectos de la corriente de energización" Santiago de Cali 1999. Tesis Universidad del Valle.

- [16]. Edwin Arango, “Análisis del efecto de la disposición de los devanados del transformador de distribución ante el cortocircuito franco” Santiago de Cali 1999. Tesis Universidad del Valle.

- [17]. Allan Greenwood, “Electrical transients in power systems”. Segunda edición. March 1990.

- [18]. Juan Martinez Velasco, “Power System Transients Parameter Determination”. Imprint of Taylor and Francis Group. 2010

- [19]. James H. Harlow, “Electric Power Transformer Engineering” 2004, Pag 139.

- [20]. Norma Técnica Colombiana NTC 3421, 1992-12-17, “Condensadores de potencia en paralelo para tensiones alternas superiores a 1000 voltios. generalidades, desempeño, ensayo, y clasificación- requisito de seguridad guía para la instalación y la operación”.

- [21]. James H. Harlow, “Electric Power Transformer Engineering” 2004, Pagina 139.

- [22]. James H. Harlow, “Electric Power Transformer Engineering” 2004, Pag 139.

- [23]. IEEE PC57.12.00/D5, “IEEE draft standard for general requirements for liquid-immersed distribution, power and regulation transformers” March 2010.

- [24]. Jil Liu, “Design of high voltage, high power and high frequency transformer in lcc resonant converter”. Twenty-fourth annual IEEE applied power electronics conference and exposition, 2009.

- [25]. IEEE Std C57.12.01-2005, "IEEE Standard general requirements for dry-type distribution and power transformers, including those with soli-cast and/or resin encapsulated windings". 2005.

- [26]. Mikko Lehtonen, "A method for optimal sizing of reactive power compensation capacitors for industrial power system". Technical research centre of Finland, 2000.

- [27]. Norma Técnica Colombiana NTC 618, 1999-09-15. "Transformadores Eléctricos. Placa de Características".

- [28]. Norma Técnica Colombiana NTC 317, 1998-11-25. "Transformadores. Terminología".

