



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

Análisis transitorio en el Sistema Nacional Interconectado

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad
mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Autor:

Ing. Vilcasana Bravo Byron Jefferson

Tutor:

Ing. Pazuña Naranjo William Paul MSc.

LATACUNGA –ECUADOR

2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “**Análisis transitorio en el Sistema Nacional Interconectado**” presentado por el **Ing. Vilcasana Bravo Byron Jefferson** para optar por el título magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, abril, 22, 2025



.....
MSc. William Paul Pazuña Naranjo

CC. 050333859-2

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “Análisis Transitorio en el Sistema Nacional Interconectado”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, abril, 22, 2025



.....
PhD. Secundino Marrero Ramírez
CC: 175710790-7
Presidente del tribunal



.....
MSc. Ing. Vaca González Jimmy Roberto
CC: 055002153-9
Lector 2



.....
MSc. Ing. Cayo Pallasco Iván Paul
CC: 055036004-4
Lector 3

DEDICATORIA

Les dedico este artículo a mis queridos padres, hermanos, sobrinos, familiares y amigos con todo mi agradecimiento y cariño. En primer lugar, este logro se lo dedico a mis padres no sería posible sin su apoyo incondicional que continúa animándome y enseñándome el valor del trabajo duro y la perseverancia. Además, a mis hermanos que son mi inspiración para trabajar por las metas y a mis sobrinos que son como mis hijos. Finalmente, a esa persona que encontré en el transcurso del camino y que siempre creyó en mí y se volvió un pilar fundamental en cada paso gracias Liss. Su apoyo y aliento me dan una base sólida para afrontar cualquier desafío.

Este artículo no es sólo un testimonio de mi dedicación y perseverancia, sino también de su ayuda incondicional y apoyo constante. Gracias por estar ahí para mí y creer en mí cuando más lo necesitaba. Su presencia en mi vida es un regalo invaluable por el cual siempre estaré agradecido.

Ing. Byron Jefferson Vilcasana Bravo

AGRADECIMIENTO

Gracias a mis padres por apoyarme de manera incondicional, a mis hermanos, sobrinos por todo el apoyo brindado para poder concluir con mi trabajo de titulación.

Agradezco de manera especial al MSc. William Pazuña tutor del artículo científico, quien me ha brindado las facilidades para culminar con el desarrollo del trabajo de titulación.

Ing. Byron Jefferson Vilcasana Bravo

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, abril, 22, 2025

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned above a dotted line.

.....
Ing. Byron Jefferson Vilcasana Bravo

CC: 050445254-1

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, abril, 22, 2025

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Byron Jefferson Vilcasana Bravo', written over a dotted line.

Ing. Byron Jefferson Vilcasana Bravo

CC: 050445254-1

AVAL DEL PRESIDENTE

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: Análisis transitorio en el Sistema Nacional Interconectado, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, abril, 22, 2025



.....

PhD. Secundino Marrero Ramírez

CC: 175710790-7

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Título: Análisis transitorio en el Sistema Nacional Interconectado

Autor: Vilcasana Bravo Byron Jefferson, Ing.

Tutor: Pazuña Naranjo William Paul, M.Sc.

RESUMEN

Este estudio se enfoca en garantizar la estabilidad y operatividad del Sistema Nacional Interconectado de Ecuador, mediante el análisis de los transitorios electromagnéticos y el diseño eficiente de la red para la operación de bancos de capacitores a niveles de tensión de 138 y 230 kV en la subestación Esclusa-Trinitaria y Trinitaria - Caraguay. Se uso la herramienta ATP Draw para el modelamiento de escenarios críticos en el que se contempla la energización de los bancos de capacitores (energización de primer paso, energización "back-to-back", cortocircuitos cercanos y apertura de banco de condensadores). Se analizaron estrategias que disminuyan los transitorios como resistencias de preinserción y maniobras sincronizadas mostrando que las resistencias de preinserción ayudan a mitigar las corrientes de energización en un 76.45% mientras que la maniobra de mando sincronizado disminuyo las oscilaciones de frecuencia en un 73.92%. Además, se demostró que los interruptores de potencia son capaces de soportar los transitorios sin ser necesario la implementación de reactores de choque adicionales. En conclusión, se destaca que la importancia del diseño y evaluación del sistema eléctrico de potencia permitirá evitar sobrecargas y así garantizar la seguridad y vida útil prolonga los equipos; aportando importantes recomendaciones para una gestión eficiente del sistema.

PALABRAS CLAVE: Transitorios electromagnéticos; Banco de condensadores; Frecuencia de amplitud; Resistencias de preinserción; Interruptores.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
POSTGRADUATE DIRECTION
MASTER'S DEGREE IN ELECTRICITY
SPECIALIZATION IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS

Title: Transient Analysis in the Ecuadorian National Interconnected System

Author: Vilcasana Bravo Byron Jefferson, Eng.

Advisor: Pazuña Naranjo William Paúl, M.Sc.

ABSTRACT

This study focuses on ensuring the stability and operability of Ecuador's National Interconnected System through the analysis of electromagnetic transients and the efficient design of the network for the operation of capacitor banks at voltage levels of 138 and 230 kV in the Esclusas-Trinitaria and Trinitaria-Caraguay substations. The ATP Draw tool was used to model critical scenarios involving the energization of capacitor banks (first-step energization, back-to-back energization, nearby short circuits, and capacitor bank disconnection). Strategies to reduce transients were analyzed, such as pre-insertion resistors and synchronized switching, showing that pre-insertion resistors help mitigate energization currents by 76.45%, while synchronized switching reduced frequency oscillations by 73.92%. Additionally, it was demonstrated that power circuit breakers are capable of withstanding these transients without the need for additional surge reactors. In conclusion, the importance of proper design and evaluation of the power system is highlighted, as it helps prevent overloads and ensures both safety and extended equipment lifespan, offering key recommendations for the efficient management of the system.

KEY WORDS: Electromagnetic transients; Capacitor bank; Frequency amplitude; Pre-insertion resistors; Circuit breakers.

AVAL DE TRADUCCIÓN

Yo, Nelson Wilfrido Guagchinga Chicaiza con cédula de identidad número: 0503246415 Magíster la enseñanza del Idioma Inglés como Lengua Extranjera con número de registro de la SENESCYT : 1010-2019-2041252; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: "Análisis transitorio en el Sistema Nacional Interconectado" de: Byron Jefferson Vilcasana Bravo, aspirante a Magíster en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.



Latacunga, abril, 22, 2025

.....
Mg. Nelson Wilfrido Guagchinga Chicaiza
ID. 050324641-5

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INFORMACIÓN GENERAL	5
2. INTRODUCCIÓN	5
3. MATERIALES Y MÉTODOS	7
3.1 Metodología para el análisis de transitorios electromagnéticos	7
3.2 Línea de transmisión Trinitaria- Esclusas	8
3.3 Línea de transmisión Esclusas - Caraguay	9
3.4 Transformador de potencia.....	10
3.5 Banco de condensadores.....	11
3.6 Interruptores de potencia	11
3.7 Configuraciones adicionales.....	13
4. RESULTADO Y DISCUSIÓN	14
4.1 Energización de primer paso L/T Trinitaria de 230 kV	15
4.1.1 Energización de banco de condensadores con resistencias de preinserción.....	16
4.1.2 Energización de banco de condensadores mediante mando sincronizado	17
4.2 Energización de primer paso L/T Esclusas de 138 kV.....	18
4.2.1 Energización de banco de condensadores 138 kV aplicando resistencias de preinserción	19
4.2.2 Energización de banco de condensadores de 138 kV mediante mando sincronizado	20
4.3 Energización “back to back” en condensadores de 230 kV	21
4.3.1 Energización “back to back” aplicando resistencias de preinserción .	21
4.3.2 Energización “back to back” con mando sincronizado	22
4.4 Falla a tierra en la proximidad de banco de condensador de 230 kV	23
4.5 Falla a tierra en la proximidad de banco de condensadores de 138 kV .	24

4.6	Apertura de banco de condensadores	26
4.6.1	Apertura de banco de condensadores de primer paso a 230 kV	26
4.6.1	Apertura de último paso de banco de condensadores de 230 kV	27
4.7	Apertura de banco de condensadores de primer paso a 138 kV	28
5.	CONCLUSIONES	29
6.	REFERENCIAS	30

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Curvas de rigidez dieléctrica en interruptores de 138 y 230 kV.....	12
FIGURA 2. Diagrama de caso de estudio en ATP Draw.....	14
FIGURA 3. Tensión y corriente <i>Inrush</i> en el interruptor con tiempo de cierre de 30ms.....	16
FIGURA 4. Corrientes <i>Inrush</i> con resistencias de preinserción.....	17
FIGURA 5. Tensiones en el interruptor con cierre de mando sincronizado.....	17
FIGURA 6. Corrientes <i>Inrush</i> con cierre de mando sincronizado en L/T Trinitaria.	18
FIGURA 7. Tensión y corriente <i>Inrush</i> el interruptor con tiempo de cierre de 30 ms.	19
FIGURA 8. Corriente <i>Inrush</i> con resistencias de preinserción.....	19
FIGURA 9. Corrientes <i>Inrush</i> con cierre de mando sincronizado en L/T Esclusas.	20
FIGURA 10. Corriente <i>Inrush</i> con cierre tripolar y curva de tensión en bornes del condensador sin control.	21
FIGURA 11. Corriente <i>Inrush</i> con cierre tripolar y curva de tensión en bornes del condensador con resistencias de preinserción.....	22
FIGURA 12. Corriente <i>Inrush</i> con cierre tripolar y curva de tensión en bornes del condensador con mando sincronizado.	22
FIGURA 13. Corriente <i>outrush</i> con reactores de choque de 1 uH y 3.9 mH respectivamente.....	24
FIGURA 14. Corriente pico de cortocircuito generada por falla monofásica.	24
FIGURA 15. Corriente <i>outrush</i> con reactor de choque de $L= 1\mu\text{H}$	25
FIGURA 16. Curva de rigidez dieléctrica de tensión transitoria de recuperación TRV 138 kV y tensión en el interruptor al momento de la falla.....	26
FIGURA 17. Tensión en el interruptor sin control con apertura tripolar.....	26
FIGURA 18. Momento del corte con control de corriente en cruce por cero.....	27
FIGURA 19. Tensión transitoria de recuperación óptima con control de corriente.	27
FIGURA 20. Tensión en el interruptor sin control y con cruce por cero.....	28

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de conductor eléctrico de la L/T Trinitaria - Esclusas [12].	9
Tabla 2. Parámetros concentrados de la línea de transmisión Trinitaria-Esclusas.	9
Tabla 3. Características de conductor eléctrico de la L/T Esclusas - Caraguay [12] [13]......	10
Tabla 4. Características de transformadores de potencia [2].	10
Tabla 5. Características de interruptores de potencia para L/T 138 - 230 kV [16].	12
Tabla 6. Tensiones en estado estable en las barras de estudio.	15
Tabla 7. Resultados de energización de primer paso barra de 230 kV.	18
Tabla 8. Resultados de energización de primer paso barra de 138 kV.	20
Tabla 9 Resultados de energización “back to back” barra de 230 kV.	23
Tabla 10. Falla monofásica en banco de condensadores de 138 kV.....	25
Tabla 11. Apertura de último paso de banco de condensadores de 230 kV.....	28
Tabla 12. Apertura de último paso de banco de condensadores de 138 kV.....	29

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:	Análisis transitorio en el Sistema Nacional Interconectado
Línea de investigación:	Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.
Proyecto de investigación asociado:	Desarrollo de sistemas eficientes para el abastecimiento y uso de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional.
Grupo de Investigación:	Sistemas Eléctricos de Potencia
Red nacional o internacional:	Springer series

2. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el Sistema Nacional Interconectado se encuentra afrontando grandes desafíos, entre los que se encuentra el crecimiento de la demanda de energía eléctrica. Por tal motivo el Plan Maestro de Electricidad (PME) se ha visto en la necesidad de expandir el sistema eléctrico; como parte de la expansión del sistema de transmisión, surge la necesidad de simular y modelar la red ante distintos escenarios de operación introduciendo tecnologías nuevas y así encontrar la mejor situación para operarlos, optimizando recursos disponibles para la generación y consumo de energía eléctrica [1] [2]. El enfoque de esta investigación estará en un análisis adecuado que permita prevenir fallas en los equipos, mejorar la confiabilidad del sistema y optimizar recursos.

En esta investigación se analizó cuatro pasos para la energización de banco de condensadores en dos líneas de transmisión con niveles de tensión distintas (230/138 kV). Por un lado, la energización de primer paso se realiza en los bancos de mayor potencia de compensación, el cual permite evaluar la corriente Inrush, frecuencia de oscilación sin control y estrategias de mitigación. Por otra parte, la energización “back to back” se realiza en banco de condensadores de 230 kV debido a que cuenta con dos pasos de compensación capacitiva, observándose la corriente de energización, frecuencia de oscilación, y tensión en bornes del interruptor de

potencia. Además, las corrientes outrush se ejecutan un cortocircuito asimétrico a la cual está conectado los bancos de condensadores y permiten analizar esta corriente mencionada, la frecuencia de oscilación, entre otros [3]. Finalmente, la apertura de banco de condensadores, esta maniobra se la realiza en bancos de condensadores de mayor capacidad conjuntamente con estrategia de mitigación de transitorios y evaluando con curvas de rigidez de los interruptores para analizar parámetros del reencendido del arco. La finalidad de estos casos de estudio es evaluar la curva rigidez dieléctrica optima de interruptores para aplicarlas al diseño del equipo [4].

Actualmente la ubicación de banco de condensadores se considera un recurso fundamental para la reducción de pérdidas y ayudan aumentar la capacidad del Sistema Nacional Interconectado. En la presente investigación, estudiar los fenómenos de transitorios electromagnéticos resulta importante debido a que se logra conocer parámetros de energización y desenergización de bancos de condensadores. Con el objetivo de prever la vida útil de los equipos de conmutación y la estabilidad transitoria del sistema eléctrico, cada vez el Plan Maestro de Electrificación impulsando proyectos de repotenciación de las líneas de transmisión, por lo que resulta importante el diseño de interruptores al momento de seleccionar el banco de condensador óptimo. Se han realizado investigaciones y desarrollado metodologías como la de [5] [6] en donde analizan sobrevoltajes de frente lento por maniobras de energización de líneas de transmisión. Estos autores realizan estudios en tiempo real, la cual les permite proveer información relevante para realizar estudios de calibración de relés, diseño de esquema de protección y prueba de controladores.

Una de las herramientas más empleadas para el modelamiento de fenómenos electromagnéticos en las redes eléctricas es ATP Draw, una de las opciones de este software es el análisis de la maniobra de bancos de condensadores en distintos escenarios de operación, esto incluye el análisis de energización de pasos múltiples, así como implementación de estrategias para la reducción de transitorios como resistencias de preinserción, maniobras de operación al cruce por cero [7], [8], [9].

EL objetivo de este estudio es evaluar y analizar los transitorios electromagnéticos en el Sistema Nacional Interconectado mediante la energización de banco de condensadores para identificar que tipos de voltajes, corrientes y frecuencia de amplitud y oscilación puede soportar los interruptores de potencia. Para ello, se simulará cuatro escenarios distintos en las líneas de transmisión Trinitaria – Esclusas y Esclusas – Caraguay. Estos datos obtenidos serán validados y contrastados utilizando la Regulación No. CONELEC – 003/08 y normativa IEC 60071-2 con el fin de determinar su efectividad [10], [11].

Este artículo está relacionado de la siguiente manera, la primera sección expone las investigaciones realizadas referentes al análisis de transitorios electromagnéticos mediante la energización de banco de condensadores. En la segunda sección se presenta la metodología utilizada para energizar banco de condensadores en las subestaciones, incluyendo elementos que ayuden a mitigar efectos de los transitorios en el Sistema Nacional Interconectado. La tercera sección se realiza un análisis de los resultados obtenidos a partir de las maniobras sin control, resistencias de preinserción y mando sincronizado. Finalmente, en la cuarta sección se presentan las conclusiones del estudio.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Metodología para el análisis de transitorios electromagnéticos

El proyecto se basa en el análisis de transitorios electromagnéticos en el Sistema Nacional Interconectado del Ecuador mediante la energización de banco de condensadores, para esto se ha tomado como referencia las subestaciones de transmisión (Trinitaria-Esclusas-Caraguay) de 238/138/69 kV respectivamente [2].

Se utilizó el equivalente de red del SNI debido a que presenta una reducción de la red por medio de elementos circunstanciales que tiene como objetivo compilar el comportamiento del sistema en un punto específico. Con lo mencionado anteriormente se busca conocer niveles de tensión, impedancia de secuencia en estado estable, conexión del sistema (Y&D) o combinaciones que provoquen circulación de corriente a tierra. Para identificar el nivel de tensión y su ángulo se

lo realiza mediante la simulación de flujos de potencia y las impedancias de secuencia mediante estudios de cortocircuito. El equivalente de Thévenin de la red actual en las barras seleccionadas se obtuvo mediante la simulación a través del programa DigSilent Power Factory 15 (Base de Datos SNI 2016).

En las siguientes ecuaciones se muestra, la impedancia de cortocircuito $Z = (R + jXl)$ de secuencia positiva y secuencia cero de una línea de transmisión se lo expresa de la siguiente manera:

$$R1 = \frac{V_L}{\sqrt{3} \cdot I_{cc3\phi} \cdot \sqrt{1 + (X/R)^2_{3\phi}}} \quad 1$$

$$X1 = \frac{(X/R)_{3\phi} \cdot V_L}{\sqrt{3} \cdot I_{cc3\phi} \cdot \sqrt{1 + (X/R)^2_{3\phi}}} \quad 2$$

$$R_0 = \frac{\sqrt{3} \cdot V_L}{I_{cc1\phi} \cdot \sqrt{1 + (X/R)^2_{1\phi}}} - \frac{2 \cdot V_L}{\sqrt{3} \cdot I_{cc3\phi} \cdot \sqrt{1 + (X/R)^2_{3\phi}}} \quad 3$$

$$X_0 = \frac{(X/R)_{1\phi} \cdot \sqrt{3} \cdot V_L}{I_{cc1\phi} \cdot \sqrt{1 + (X/R)^2_{1\phi}}} - \frac{2 \cdot (X/R)_{3\phi} \cdot V_L}{\sqrt{3} \cdot I_{cc3\phi} \cdot \sqrt{1 + (X/R)^2_{3\phi}}} \quad 4$$

3.2 Línea de transmisión Trinitaria- Esclusas

Para el análisis de transitorios electromagnéticos se usa el modelo de línea con parámetros dependientes de la frecuencia, debido a que permiten evaluar de una manera más precisa la contribución natural distribuida de las pérdidas en una línea de transmisión. En modelos de líneas de transmisión con parámetros concentrados las variaciones de resistencia, inductancia y capacitancia (R, L y C) se desprecian en el análisis, mientras que al utilizar un modelo dependiente de la frecuencia utiliza el mismo principio del circuito equivalente (Parámetros Constantes) [5].

Por lo tanto, la línea de transmisión Trinitaria- Esclusas de modela mediante el modelo de línea dependiente de la frecuencia. Sin embargo, debido a la corta longitud de las líneas de transmisión Esclusas-Caraguay se ha optado por considerar un modelo de parámetros concentrados, incluir la dependencia de parámetros con la frecuencia se traduce en un mayor amortiguamiento en la representación de las oscilaciones, pero no se aprecia un cambio en los valores máximos de las sobretensiones y en las frecuencias de oscilación naturales.

La línea de transmisión Trinitaria - Esclusas cuenta con un circuito simple a nivel de 230 kV de 7.4 km de longitud, con un haz de dos conductores ACAR 750 MCM. En la Tabla 1 se indica los parámetros del conductor desnudo de aluminio utilizado:

Tabla 1. Características de conductor eléctrico de la L/T Trinitaria - Esclusas [12].

Calibre (AWG o kcmil)	Sección transversal (mm ²)	Diámetro del conductor (mm)	Peso Total (kg/km)	Carga de rotura (kg ²)	Resistencia a C.C a 20 (ohm/km)	Capacidad de corriente (A)
750	380.0300	25.3100	1045.3900	8673	0.0815	823

Además, en la Tabla 2 se muestra los parámetros eléctricos de resistencia, inductancia y capacitancia de la línea de transmisión Trinitaria – Esclusas:

Tabla 2. Parámetros concentrados de la línea de transmisión Trinitaria-Esclusas.

Impedancia de secuencia positiva	Impedancia de secuencia zero	Admitancia de secuencia positiva	Admitancia de secuencia zero
0.3069+2.5608 j	1.5997 + 12.0720j	4.5e-8+0.0928j	5.3e-8+ 0.0459j

3.3 Línea de transmisión Esclusas - Caraguay

Según [13] la norma de proyectos de 138 kV de INELEC la línea de transmisión Esclusas – Caraguay cuenta con estructuras tipo P2-21 para trayectorias rectas y estructuras tipo RB90 para realizar giro. En cuanto a las cadenas de aisladores, en cada fase se utilizan once aisladores de disco tipo suspensión con acoplamiento bola-casquillo de 146 mm de espaciamiento. En la Tabla 3 se presenta información de los conductores proporcionada por el catálogo de electrocables y la disposición geométrica de las torres de transmisión.

Tabla 3. Características de conductor eléctrico de la L/T Esclusas - Caraguay [12] [13].

Fase	Radio externo (cm)	Resistencia C.C a 20°C (ohm/km)	Distancia Horizontal (m)	Distancia Vertical (m)	Vmid (m)
1	2.5340	0.0777	1.9000	11.9000	11.2700
2	2.5340	0.0777	-1.9000	13.5000	12.3300
3	2.5340	0.0777	1.9000	15.1000	13.4000

3.4 Transformador de potencia

Se considero un modelo de transformador trifásico saturable que incluye el valor de las perdidas en vacío y ofrece la posibilidad de observar el fenómeno de ferresonancia que puede ocurrir en estudios de este tipo. A continuación, en la Tabla 4 se presentan los datos para el modelado de la curva de magnetización del núcleo y demás parámetros eléctricos de los transformadores (Base de Datos SNI 2016) [2].

Tabla 4. Características de transformadores de potencia [2].

Transformador 230/138/13.8 kV 225MVA						
Resistencia prim. (ohms)	Inductancia prim. (ohms)	Resistencia sec. (ohms)	Inductancia sec. (ohms)	Resistencia tert. (ohms)	Inductancia tert. (ohms)	Configuración
0.3190	29.3910	0.1141	-1.1548	0.0241	0.8523	YYD
Transformador 230/69 /13.8 kV 225 MVA						
0.3170	28.9999	0.0285	0.2228	0.0241	0.2078	YYD
Transformador 138 / 69 /13.8 kV 225 MVA						
0.1141	7.0010	0.0285	-0.0796	0.0248	0.5688	YYD

3.5 Banco de condensadores

Los bancos de condensadores instalados en el SNI se encuentran a nivel de 69, 138 y 230 kV y se modelan en el programa ATP Draw en base la capacidad eléctrica en la unidad microfaradios (uF), dada la frecuencia de los fenómenos involucrados en este análisis no es necesario incluir un modelo preciso de las conexiones internas del banco y se suele representar por un elemento de parámetros concentrados, para calcular la capacidad del banco se utiliza la siguiente formula:

$$C_Y = \frac{Q_{Mvar}}{(V_{rms\ l-l})^2 \cdot 2\pi \cdot f} \quad (5)$$

El banco de condensadores conectado a la Barra de la subestación Esclusas de 230 kV con capacidad de 120 MVAR, este banco de condensadores de múltiples pasos se divide en dos y se ingresan de acuerdo a la necesidad de compensación capacitiva del SNI [14], esta acción es realizada para evitar someter al sistema a saltos de tensión excesivos cada vez que se realice alguna maniobra en el banco de condensadores.

Generalmente los bancos de capacitores van acompañados de la instalación en serie de inductancias de amortiguamiento de 1 mH para bancos de 69 kV y 1.5 mH para bancos de 138 kV, estas inductancias se denominan “reactor de choque” y son esenciales para mitigar las excesivas amplitudes de corriente capacitiva [6], [15].

3.6 Interruptores de potencia

Los interruptores instalados en la Subestación Esclusas son de tecnología SF6 – Clase 1 con un valor de corriente de descarga capacitiva de diseño de 84 kA [14]. Sin embargo, para el análisis se toman interruptores controlados por tiempo para uso general en ATP y con curvas de rigidez normalizadas propuestas en IEC 62271-100 [16]. La magnitud de la corriente transitoria no deberá exceder el menor valor de:

$$1,41 \times I_{rms_cc} \text{ o } 50 \text{ kA} \quad (6)$$

Los interruptores utilizados son acordes a niveles de tensiones evaluadas, estas características se obtienen del catálogo de fabricante de interruptores ABB, siendo LTB 245E1 para tensiones de 230 kV y LTB 145D1/B para tensiones de 138 kV, en la Tabla 4 se muestra las características eléctricas de los interruptores:

Tabla 5. Características de interruptores de potencia para L/T 138 - 230 kV [16].
Características técnicas de interruptores de potencia ABB

Características	LTB 145D1/B	LTB 245E1
Número de cámaras de corte por polo.	1.000	1.0000
Tensión nominal (kV)	145.0000	245.0000
Frecuencia nominal (Hz)	60.0000	60.000
Nivel soportado a la frecuencia Industrial		
A tierra y entre fases (kV)	275.0000	460.0000
A través de polo abierto (kV)	275.0000	460.0000
Nivel soportado a impulso tipo atmosférico (LIWL)		
A tierra y entre fases (kV)	650.0000	1050.000
A través de polo abierto (kV)	650.0000	1050.000
Nivel soportado a impulso tipo atmosférico (SIWL)		
A tierra y entre fases (kV)	-	-
A través de polo abierto (kV)	-	-
Distancia de fuga (mm/kV)	25.0000	25.0000
Corriente nominal de servicio (A)	3150.000	4000.000

En cuanto a la representación de rigidez de los interruptores se utilizaron las curvas de rigidez dieléctrica normalizadas de IEC 62271-100 para la verificación se arco secundario al momento de las maniobras de los bancos de condensadores [17], [18].

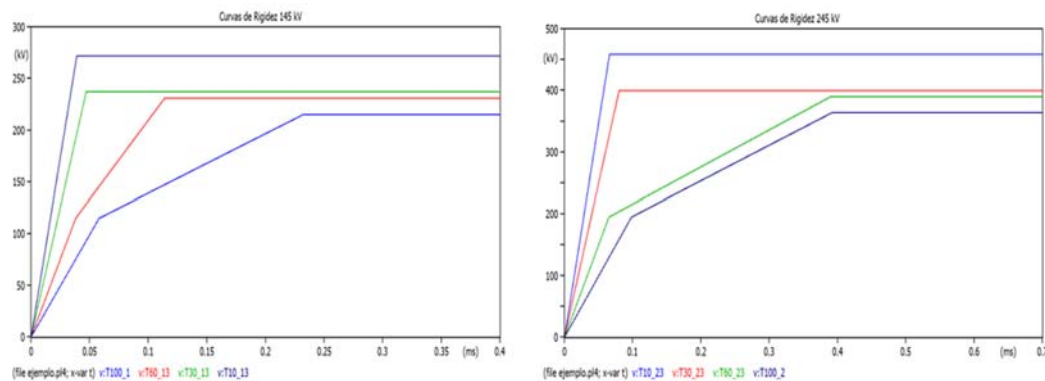


FIGURA 1. Curvas de rigidez dieléctrica en interruptores de 138 y 230 kV.

Se debe determinar la curva de rigidez dieléctrica mínima para evitar que se produzcan daños por maniobras con cargas capacitivas en los equipos del patio de

transformación. Se utilizó la siguiente ecuación para determinar la tensión transitoria de restablecimiento para sistemas y condiciones de conmutación.

$$u_c = \frac{V_r \cdot k_c \cdot 2 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Donde:

u_c : tensión transitoria de restablecimiento (kV/pico).

V_r : tensión nominal V_{rms} expresado en (kV).

k_c : factor de tensión capacitivo.

En cuanto a maniobras de conmutación por fallas asimétricas se utilizó la siguiente ecuación:

$$u_c = \frac{V_r \cdot k_{pp} \cdot \sqrt{2} \cdot k_{af}}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

Donde:

V_r : tensión nominal V_{rms} L-L (kV).

k_{pp} : factor de primer polo.

k_{af} : factor de amplitud.

El factor k_c se utiliza para definir la tensión monofásica de restablecimiento para diferentes conmutaciones de tensión capacitiva, toma el valor de 1 para bancos de capacitores con neutro aterrizado y de 1 hasta 4 para bancos con neutro aislado.

3.7 Configuraciones adicionales

En la Figura 2 se muestra el sistema eléctrico de potencia simulado en ATPDraw, en donde se modelo transformadores, interruptores, banco de condensadores, líneas de transmisión y barras de 230 y 138 kV en la Subestación Esclusas, Trinitaria y Caraguay con la ayuda DigSilent Power Factory 15 (Base de Datos SNI 2016). del

Ecuador. Para estudios de computación de condensadores se configuro los tiempos de 1^{-5} segundos de simulación para representación de eventos de maniobras; por lo general este tiempo se usa para realizar estudio de sobretensiones de frente rápido de descarga atmosférica, pero con los rangos de frecuencia que se manejan en este tipo de estudio del orden de (kHz) se opta por dicho valor. El tiempo máximo “Tmax” dependerá del intervalo de tiempo requerido para analizar los eventos que ocurran en la red y también influye en las gráficas de simulación; por lo tanto, para los eventos que se analizan en este trabajo de investigación se usaron tiempo de un rango entre 0.003 y 2 s. Finalmente, los parámetros “Xopt” y “Copt” se configuraron con el valor de la frecuencia fundamental que se analiza que es 60 Hz.

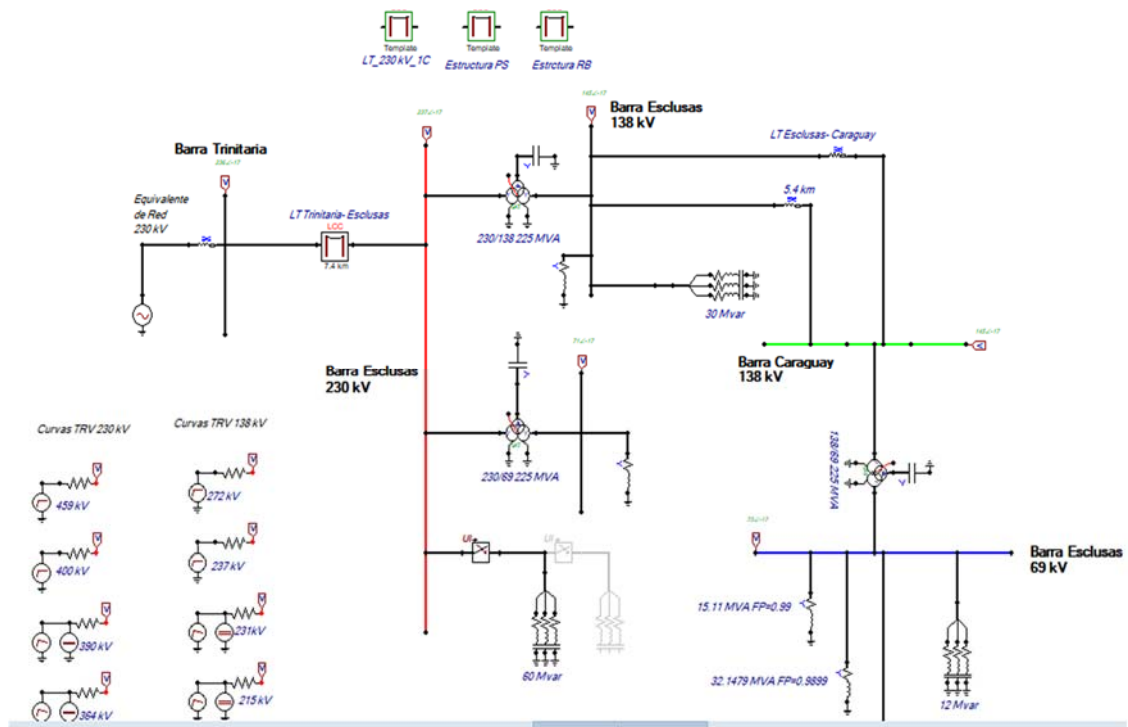


FIGURA 2. Diagrama de caso de estudio en ATP Draw.

4. RESULTADO Y DISCUSIÓN

El resultado de problema de energización de banco de condensadores tomando en cuenta diferentes niveles de tensión en las líneas de transmisión, los datos de la simulación de la Base de datos del SNI 2016. El sistema de estudio será sometido

a eventos de maniobras en los bancos de condensadores existente en el SNI en base a los siguientes 4 escenarios:

- Energización de primer paso
- Energización “back-to-back”
- Corto circuitos cercanos “corrientes outrush”
- Apertura de bancos de condensadores

A estos escenarios de operación se les aplicara estrategias normalizadas en cada caso para reducir o amortiguar las oscilaciones de corriente verificando las magnitudes de corriente y voltaje. Para el análisis de la evaluación se sobretensiones se utilizará el método caso-pico propuesto en la normativa IEC 60071-2 [10]. Las tensiones previas a los eventos de maniobra se evalúan bajo el criterio de $\pm 5\%$ de la tensión nominal que permite el Sistema Nacional Interconectado [11]. En la Tabla 6 se muestra que los voltajes nominales no sobrepasan el $\pm 5\%$ como lo establece la Regulación No. CONELEC -003/08.

Tabla 6. Tensiones en estado estable en las barras de estudio.

Barra	Tensiones sin compensación capacitiva (kV)	Tensiones con compensación capacitiva (kV)
Esclusas - 230 kV	228.213 kV	236.09 kV
Esclusas - 138 kV	137.79 kV	144.75 kV
Caraguay - 69 kV	68.92 kV	71.56 kV

4.1 Energización de primer paso L/T Trinitaria de 230 kV

El tiempo de cierre del interruptor para la energización primer banco de condensadores en la barra Esclusas de 230 kV, se considera un cierre tripolar con tiempo de maniobra de cierre en $T = 30$ ms. Se puede apreciar en la Figura 3, que en el tiempo de ejecución seleccionados; la tensión en la fase A es mínima y la tensión en la Fase C es máxima, esta diferencia se hace más notable en la corriente pico de energización en las Fases B y C. En cuanto a la corriente de energización

mostrada en la Figura 3, se registra un valor elevado de 1.818 kA y una frecuencia de oscilación de 534.75 Hz. Obteniéndose así el valor de las ondas de choque en 0.97 kAkHz.

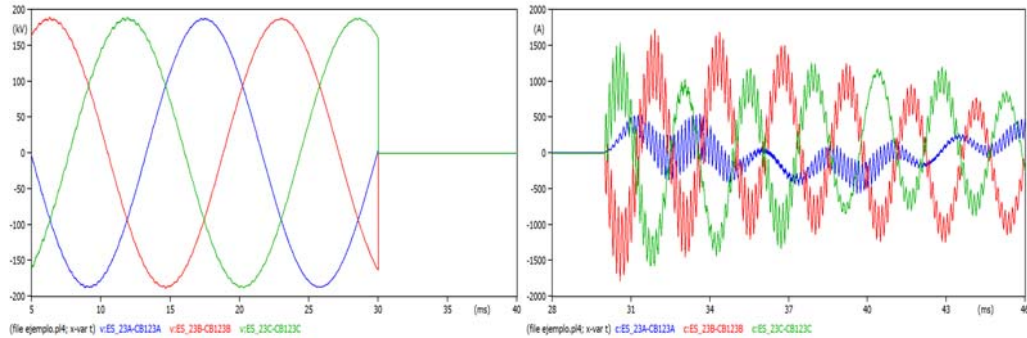


FIGURA 3. Tensión y corriente linrush en el interruptor con tiempo de cierre de 30ms.

Después del cierre del interruptor se presentan sobretensiones en bornes del banco de condensadores, obteniéndose el voltaje pico alto en la Fase C producidos por el efecto overshoot de tensión, este voltaje del capacitor trata de igualarse con la tensión de la red.

4.1.1 Energización de banco de condensadores con resistencias de preinserción

Según [3], [8] plantea como primera estrategia para el control de los eventos transitorios se utilizan resistencias de pre inserción, los cuales según los cálculos la resistencia óptima para controlar la etapa transitoria de la energización de bancos de condensadores es de 103 ohms, por lo tanto, se incluye este elemento conjuntamente con un interruptor que ejecuta la maniobra de cierre $T = 20$ ms antes que el interruptor principal encargado de la energización. En la Figura 4 se indica que las corrientes de energización se redujeron en un 77.8% y un 43% en cuanto a las frecuencias de oscilación como lo indica la norma [10].

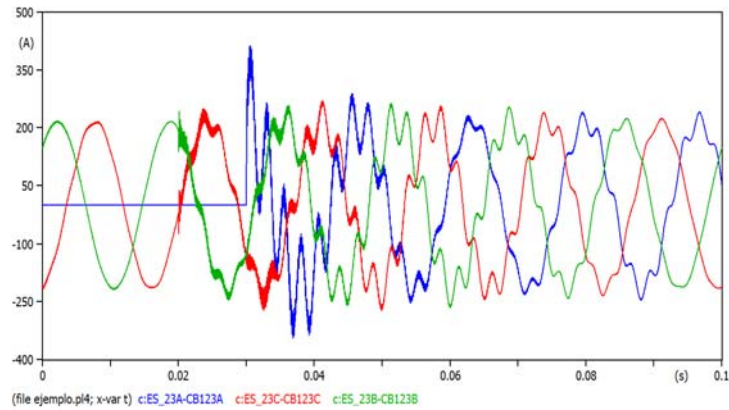


FIGURA 4. Corrientes I_{inrush} con resistencias de preinserción.

4.1.2 Energización de banco de condensadores mediante mando sincronizado

En base a lo que establece [3], [9] el cierre con mando sincronizado se dará en el llamado cruce por cero de las 3 fases, los tiempos de ajuste para el interruptor de maniobra son los siguientes: $t_a = 30 \text{ ms}$, $t_b = 27.7 \text{ ms}$, $t_c = 32.68 \text{ ms}$. Por lo tanto, en la Figura 5 se puede evidenciar que el cierre se da en el cruce por cero.

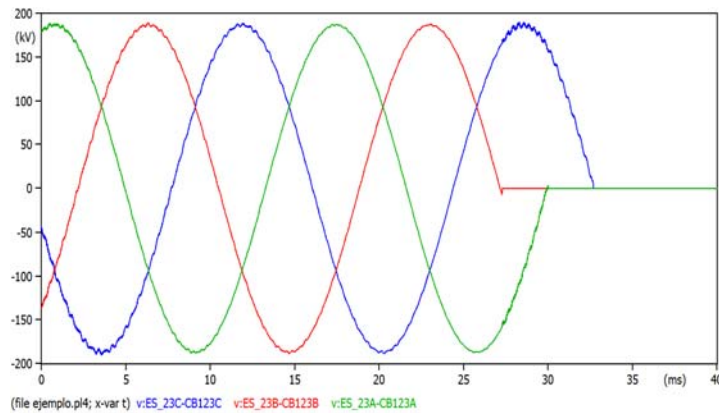


FIGURA 5. Tensiones en el interruptor con cierre de mando sincronizado.

En la Figura 6 se muestra como la corriente de energización se reduce en un 79.4% y las frecuencias oscilatorias se reducen en un 25.39 %, lo que permite evidenciar que el cierre con mando sincronizado es una estrategia viable para mitigar transitorios.

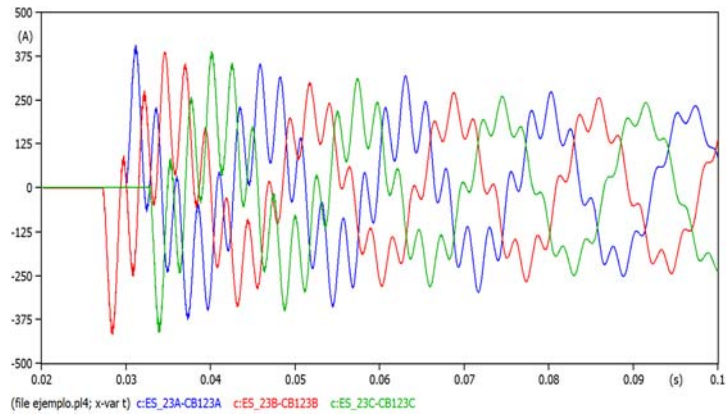


FIGURA 6. Corrientes Inrush con cierre de mando sincronizado en L/T Trinitaria.

En la Tabla 7 se muestra una comparación de resultados obtenidos en la energización de primer paso en la subestación Esclusas de 230 kV, sin ningún tipo de control y aplicando estrategias de mitigación para reducir los fenómenos transitorios, evidenciando que las resistencias de preinserción ayudan a disminuir la frecuencia de oscilación y el tiempo de estabilización mientras el mando sincronizado en voltaje mínimo ayuda reducir las corrientes inrush.

Tabla 7. Resultados de energización de primer paso barra de 230 kV.

Tipo de maniobra de cierre	Corriente de energización I_{inrush} (A)	Tiempo de estabilización de transitorio (s)	Pico de Tensión en bornes del banco (kV)	Frecuencia de oscilación (Hz)
Sin control	1834.0000	0.1693	422.4500	534.7500
Resistencias de reinsertión	407.7800	0.0773	210.4700	303.8500
Mando sincronizado en voltaje mínimo	378.2000	0.0939	210.4500	398.8700

4.2 Energización de primer paso L/T Esclusas de 138 kV

En la Figura 7 se puede apreciar que en el tiempo de ejecución de la maniobra la tensión en la fase A es mínima y en la Fase B es máxima respectivamente, esta diferencia se hace más notable en la corriente pico de energización en las Fases B y C, debido a que es más elevada en comparación de la fase A. En cuanto a la corriente de energización mostrada en la Figura 7 se registra un valor elevado de

1.270 kA, y una frecuencia de oscilación de 816.32 Hz. Obteniéndose así el valor de las ondas de choque en 1.0367 kAkHz.

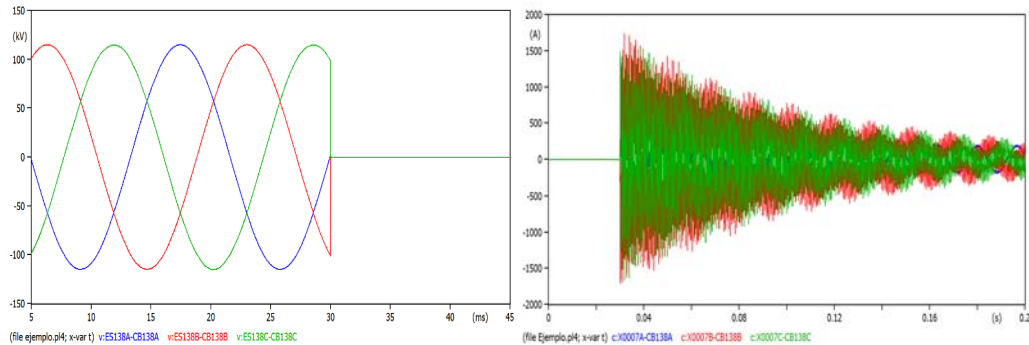


FIGURA 7. Tensión y corriente I_{inrush} el interruptor con tiempo de cierre de 30 ms.

A continuación, del cierre del interruptor se presentan sobretensiones en bornes del banco de condensadores, obteniéndose el voltaje pico alto en la Fase B con un valor de fase tierra de 149 kV valor admisible según [11].

4.2.1 Energización de banco de condensadores 138 kV aplicando resistencias de preinserción

Se incluyó la resistencia de preinserción óptima de $100\ \Omega$ conjuntamente con un interruptor que ejecuta la maniobra de cierre $10\ ms$ antes que el interruptor principal encargado de la energización. En la Figura 8 se muestra las corrientes de energización se redujeron en un 79.06 % y un 51.82 % las frecuencias de oscilación.

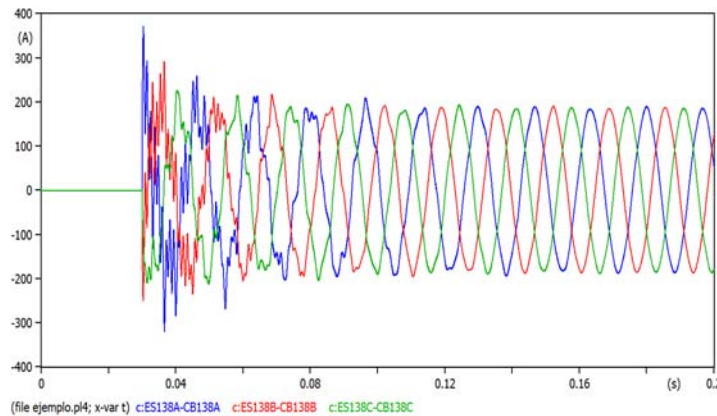


FIGURA 8. Corriente I_{inrush} con resistencias de preinserción.

4.2.2 Energización de banco de condensadores de 138 kV mediante mando sincronizado

En la Figura 9 se evidencia como la corriente de energización se reduce en un 71.64 % y las frecuencias oscilatorias se reducen en un 80.48 %, la diferencia de frecuencias más grande detectada hasta ahora, debido a las configuraciones propias del sistema alrededor que ofrecen mayor amortiguamiento ante altas frecuencias.

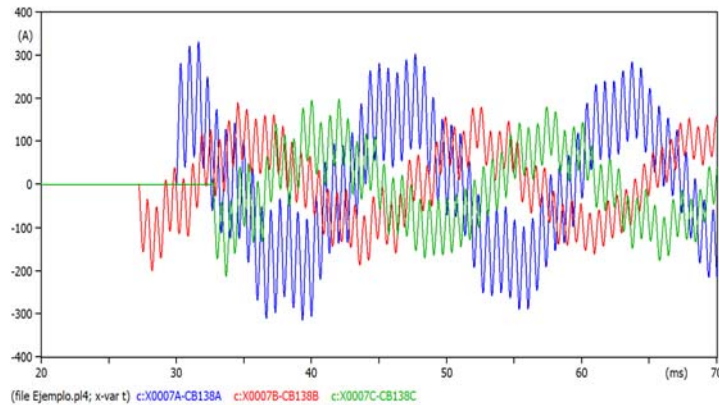


FIGURA 9. Corrientes I_{inrush} con cierre de mando sincronizado en L/T Esclusas.

El cierre de bancos de condensadores de primer paso en la Subestación Esclusas a 138 kV, sin ningún tipo de control y aplicando estrategias para reducir los fenómenos transitorios se muestra en la Tabla 8, en donde se evidencia la importancia de estrategias de mitigación.

Tabla 8. Resultados de energización de primer paso barra de 138 kV.

Tipo de maniobra	Corriente de energización I_{inrush} (A)	Tiempo de estabilización de transitorio (s)	Pico de Tensión en bornes del banco (kV)	Frecuencia de oscilación (Hz)
Cierre tripolar	1770.0000	0.1160	422.4500	1470.0000
Cierre con resistencias de preinserción	370.4900	0.0910	123.0500	707.7100
Cierre con mando sincronizado (cruce por cero)	360.0500	0.1190	127.8600	159.3300

4.3 Energización “back to back” en condensadores de 230 kV

En la Figura 10 se observa cómo se producen mayores corrientes de energización con frecuencias elevadas en comparación a la maniobra de conmutación de banco de condensadores aislados. Estas corrientes de energización se encuentran a 40.25 % de la corriente de operación normal de operación de un interruptor típico de tanque vivo sumergido en aceite, por lo que al ser una corriente transitoria con una magnitud por debajo del límite normal de operación no representa una amenaza al momento de la operación del interruptor tomando como base el interruptor LTB 24E1.

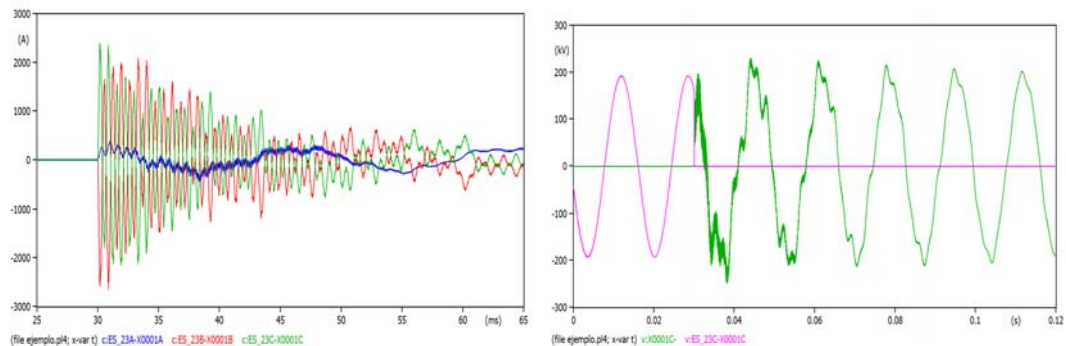


FIGURA 10. Corriente I_{inrush} con cierre tripolar y curva de tensión en bornes del condensador sin control.

4.3.1 Energización “back to back” aplicando resistencias de preinserción

La resistencia de preinserción óptima para controlar la etapa transitoria de la energización de bancos de condensadores es de 100 Ohm, por lo tanto, se incluyó este elemento junto con un interruptor que ejecuta la maniobra de cierre 20 ms antes que el interruptor principal encargado de la energización. En la Figura 11 se indica que las corrientes de energización se redujeron en un 76.45 % y un 39.51 % en la frecuencia de oscilación.

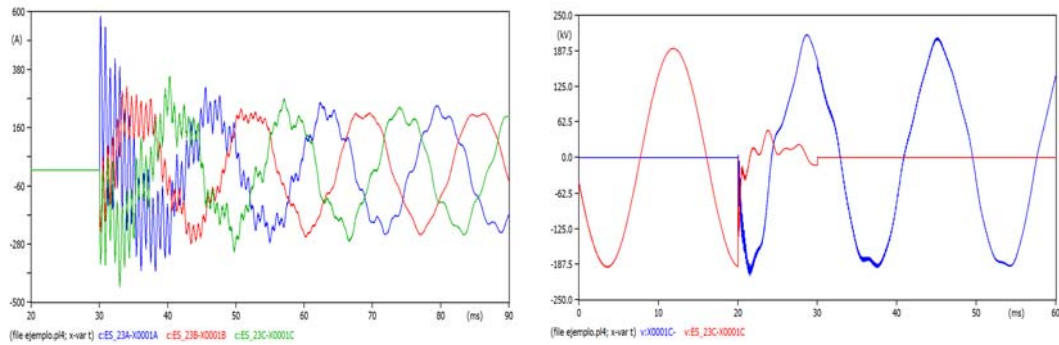


FIGURA 11. Corriente I_{inrush} con cierre tripolar y curva de tensión en bornes del condensador con resistencias de preinserción.

4.3.2 Energización “back to back” con mando sincronizado

El cierre con mando sincronizado se dará en el llamado cruce por cero de las 3 fases, los tiempos a los cuales se ajustó el interruptor para la maniobra son $t_a = 30$ ms, $t_b = 27.716$ ms, $t_c = 24.386$ ms. Los resultados de corriente y tensión en el banco se muestran en la Figura 12. La corriente de energización se reduce en un 84.47 % y las frecuencias oscilatorias se reducen en un 73.92 %. La notable mejora de las oscilaciones de corriente en la energización back to back se debe al diseño de los reactores de choque, con un valor de 4.24 mH, ya que ayudan a mejorar las corrientes máximas y reducir las oscilaciones de corriente.

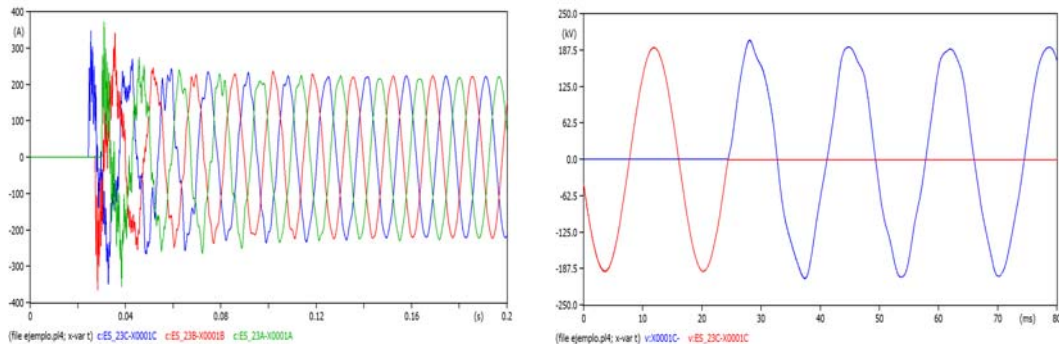


FIGURA 12. Corriente I_{inrush} con cierre tripolar y curva de tensión en bornes del condensador con mando sincronizado.

En la Tabla 9 se muestra el cierre de bancos de condensadores de primer paso en la Subestación Esclusas de 230 kV, sin ningún tipo de control y aplicando estrategias para reducir los fenómenos transitorios.

Tabla 9 Resultados de energización “back to back” barra de 230 kV.

Tipo de maniobra	Corriente de energización I inrush (A)	Tiempo de estabilización de transitorio (s)	Tensión pico fase-tierra en bornes del banco (kV)	Frecuencia de oscilación (Hz)
Cierre tripolar	2389.8000	0.1448	240.0900	1445.0800
Cierre con resistencias de preinserción	562.5600	0.07188	193.7600	874.1200
Cierre con mando sincronizado (cruce por cero)	371.1000	0.07219	204.1100	76.8600

4.4 Falla a tierra en la proximidad de banco de condensador de 230 kV

La falla monofásica se ejecutará en la barra Esclusas 230 kV, en $t = 0.03$ s y en un tiempo de apertura de 55 ms de tiempo de apertura) se realizará la maniobra de apertura del interruptor en $t = 0.085$ s. En la Tabla 9 se muestra los siguientes resultados obtenidos:

Tabla 9. Falla monofásica en banco de condensadores de 230 kV.

Reactor de choque (mH)	Pico de corriente Icc (A)	Pico de Corriente Icc de interruptor (A)	Frecuencias de oscilación (Hz)	Onda de choque (kA/kHz)
0.0010	15	7902.3000	3401.36000	26.87
2.6500	15	3692.3000	1414.4200	5.2204
3.9700	15	3131.6000	1386.9600	4.3425

Considerando que el valor de límite máximo de corriente transitoria debe ser la mitad de la capacidad outrush por falla de 52 kA para interruptores Clase 0, para un tiempo de 3 segundos y frente al valor de corriente del caso con menor inductancia (0.0010 mH) de choque se obtiene 7.9 kA; por lo que en la Figura 13 se muestra las corrientes de cortocircuito las cuales no provocan daños, por lo que no existe la necesidad de instalar reactores de choque en serie con los bancos de condensadores de 230 kV. En cuanto a la frecuencia de oscilación el interruptor clase 0, de acuerdo a su sensibilidad ante altas frecuencias 20 kHz, soporta adecuadamente el caso más crítico evaluado de 3.4 kHz.

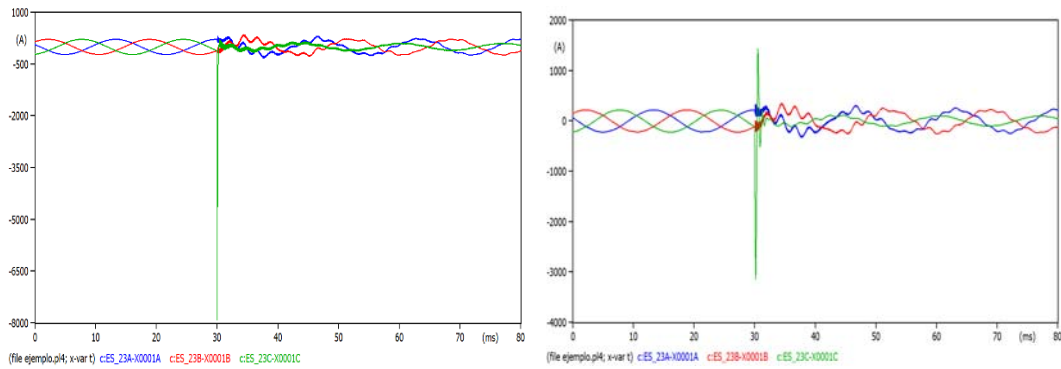


FIGURA 13. Corriente outrush con reactores de choque de 1 uH y 3.9 mH respectivamente.

En la Figura 14 se muestra la corriente de cortocircuito $I_{cc} = 15 \text{ kA}$, lo que presenta el 37.5 % de la corriente nominal de cortocircuito del interruptor a 60 Hz. La rigidez dieléctrica del interruptor de frente muerto evita que se produzca reencendido de arco en el interruptor evitando fallas en el aislamiento en los bancos de capacitores e interruptor al momento de ejecutar la maniobra de apertura, la corriente de falla mínima que representa un problema para el interruptor sería una corriente de falla de 37 kA.

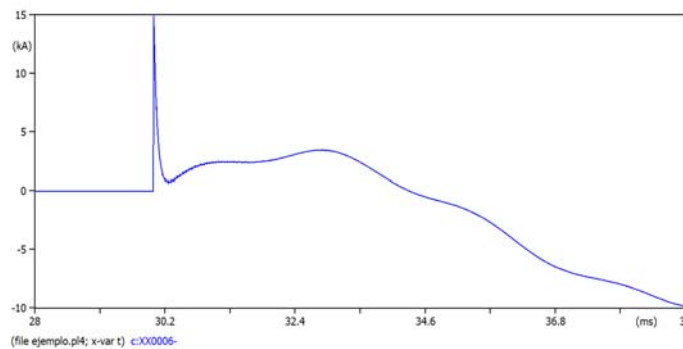


FIGURA 14. Corriente pico de cortocircuito generada por falla monofásica.

4.5 Falla a tierra en la proximidad de banco de condensadores de 138 kV

La falla monofásica se ejecutará en la barra Esclusas 138 kV, en $t=0.03 \text{ s}$ y en base a las especificaciones del interruptor (44 ms de tiempo de apertura) se realizará la maniobra de apertura del interruptor en $t= 0.054 \text{ s}$, en la Tabla 10 se muestra una comparación de picos de corrientes, frecuencias de oscilación y onda de choque con diferentes reactores de choque. Se puede evidenciar que con la reactancia de 1 mH los valores no cambian drásticamente; por lo que sería el valor adecuado para la utilización.

Tabla 10. Falla monofásica en banco de condensadores de 138 kV.

Reactor de choque (mH)	Pico de corriente Icc (kA)	Pico de Icc de interruptor (A)	Frecuencias de oscilación (Hz)	Onda de choque (kA/Hz)
0.0010	25.0000	1512.3000	15622.0000	23.610
1.0000	25.0000	192.5000	1298.7000	0.2590
2.6500	25.0000	165.3000	1277.6300	0.2110
3.9700	25.0000	163.2000	1265.8200	0.2060

En la Figura 15 considerando que el valor de límite máximo de corriente transitoria debe ser la mitad de la capacidad outrush por falla, se obtiene el valor de corriente outrush debe ser 40 kA para interruptores clase 0, en un tiempo de 3 s y frente al valor de corriente del caso con menor inductancia de choque se obtiene 1.15 kA y la diferencia de 42.5 kA. En cuanto a la frecuencia de oscilación el interruptor Clase 0, de acuerdo a su sensibilidad ante altas frecuencias 20 kHz, soporta adecuadamente el caso más crítico evaluado.

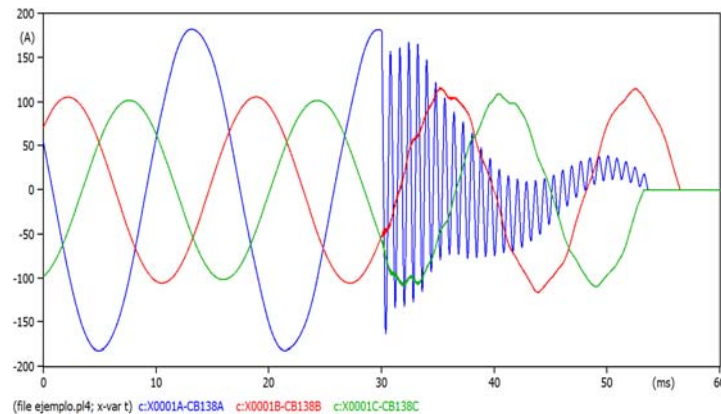


FIGURA 15. Corriente outrush con reactor de choque de $L=1\mu\text{H}$.

En la Figura 16 se muestra que la tensión nominal transitoria de establecimiento límite permitido es de 147.887 kV, del interruptor LTB 145D1/B y el valor pico de tensión en el interruptor para este escenario es de 134.78 kV; por lo que no se produce reencendido de arco al momento de realizar la apertura de la maniobra.

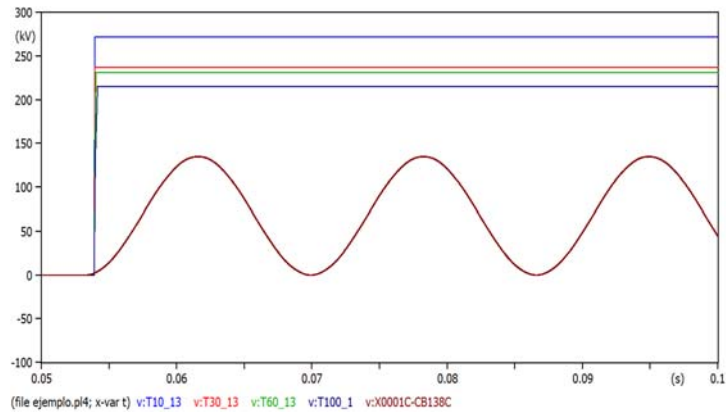


FIGURA 16. Curva de rigidez dieléctrica de tensión transitoria de recuperación TRV 138 kV y tensión en el interruptor al momento de la falla.

4.6 Apertura de banco de condensadores

Según [15] cuando el disyuntor abre el capacitor queda con una carga atrapada en los primeros instantes con una tensión al valor de la tensión de apertura, en este caso los disyuntores deben cortar idealmente la corriente cuando esta pasa por cero, si la carga es capacitiva el cero de corriente se da al máximo de la tensión y medio ciclo después la tensión de la fuente toma su máximo de polaridad opuesta del orden del doble de la tensión de apertura.

4.6.1 Apertura de banco de condensadores de primer paso a 230 kV

La apertura de primer paso se da en $T=85$ ms, en donde la Figura 17 muestra oscilaciones extremas del orden de 5 kHz, siendo el caso más crítico al aperturar el banco de condensadores de 230kV.

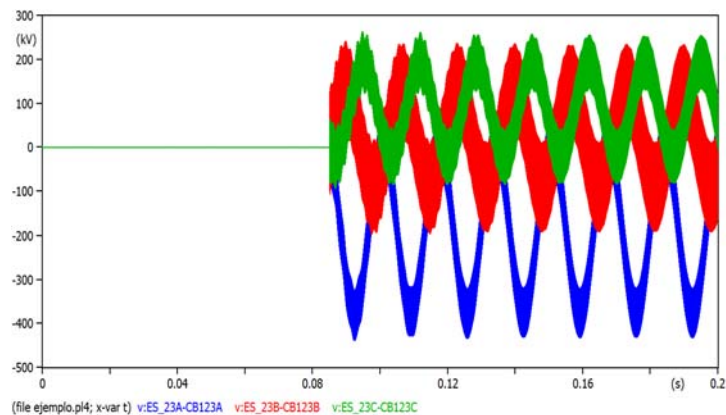


FIGURA 17. Tensión en el interruptor sin control con apertura tripolar.

En la Figura 18 se muestra que al momento de ejecutar el cruce por cero se aprecia que las magnitudes de tensión pico y las oscilaciones en el interruptor se reducen en comparación al primer escenario con cierre tripolar sin control.

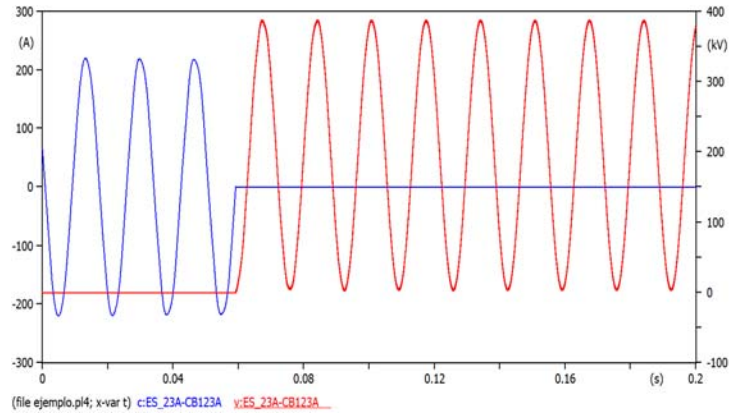


FIGURA 18. Momento del corte con control de corriente en cruce por cero.

En la Figura 19 se muestra la curva de voltaje transitorio de recuperación mínima en el caso de apertura de contactos, estos tiempos y amplitudes sirven para el diseño del interruptor el cual el fabricante debe ajustarse y garantizarlo en este tipo de eventos. La velocidad del tiempo de recuperación del dieléctrico entre contactos abierto o la curva de rigidez es lo suficientemente alta en el punto de la figura y se ejecuta aproximadamente a $\frac{1}{4}$ de ciclo de la apertura.

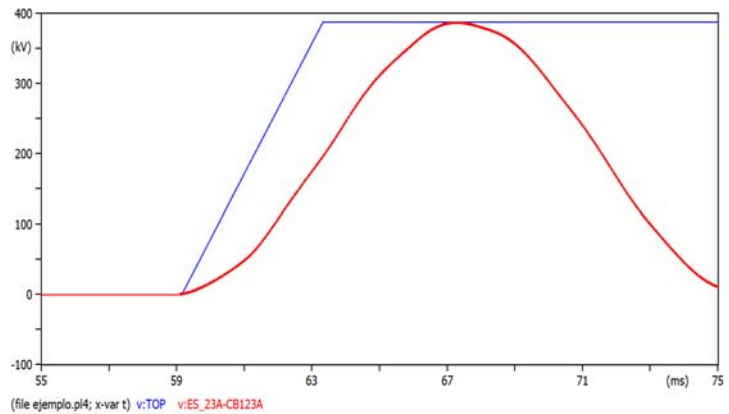


FIGURA 19. Tensión transitoria de recuperación óptima con control de corriente.

4.6.1 Apertura de último paso de banco de condensadores de 230 kV

En la Tabla 11 se aprecia que las magnitudes pico de tensión no varían de manera considerable como lo establece [11] siendo esta diferencia en 0.76 %, caso contrario a las frecuencias de oscilación que se reducen en un 98.79 %. El modelo de rigidez

dieléctrica conjuntamente con el inicio del proceso de apertura con control de corriente muestra que no existe reenciendo de arco exceptuando la curva T100 y T60.

Tabla 11. Apertura de último paso de banco de condensadores de 230 kV.

Tipo de maniobra	Tensión máxima de apertura Vrms L-L (kV)	Frecuencia de oscilación (Hz)
Sin control de apertura	488.9200	49751.0000
Control de cruce por cero	484.8300	59.9800

4.7 Apertura de banco de condensadores de primer paso a 138 kV

La apertura del primer paso se da en $T=85$ ms, en donde la Figura 20 muestra oscilaciones extremas del orden de 4.93 kHz, siendo el caso más extremo en la apertura de bancos de condensadores de 138 kV, pero estos picos de voltaje se encuentran por debajo de la curva de rigidez dieléctrica del interruptor de potencia.

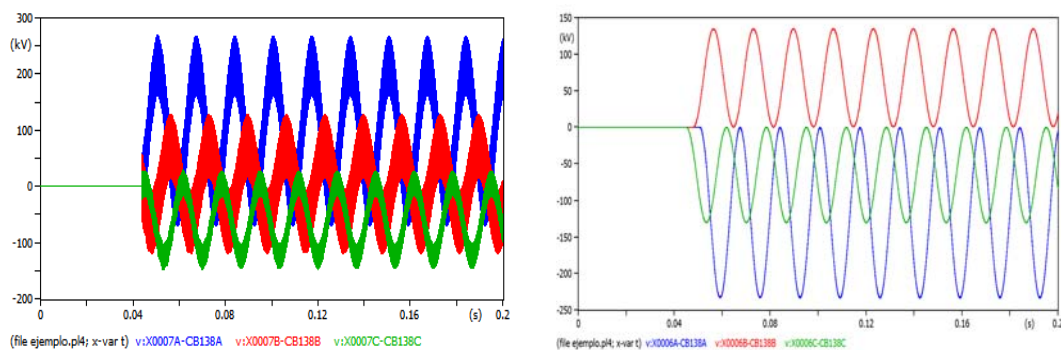


FIGURA 20. Tensión en el interruptor sin control y con cruce por cero.

Finalmente, para este caso se aprecia que las magnitudes pico de tensión no varían de manera considerable y están dentro de lo permitido como lo establece [11], [10] siendo esta diferencia en 0.76 %, caso contrario a las frecuencias de oscilación de que se reducen en un 98.79 % como se muestra en la Tabla 12. El modelo de rigidez dieléctrica conjuntamente con el inicio del proceso de apertura con control de corriente muestra que no existe reenciendo de arco exceptuando la curva T100 y T60.

Tabla 12. Apertura de último paso de banco de condensadores de 138 kV.

Tipo de maniobra	Tensión máxima de apertura Vrms L-L (kV)	Frecuencia de oscilación (Hz)
Sin control de apertura	268.5000	49751.0000
Control de cruce por cero	245.8000	59.9800

5. CONCLUSIONES

El análisis transitorio en el Sistema Nacional Interconectado aborda enfoques de estudio que permiten dimensionar la capacidad de estos bancos de condensadores, por lo que es importante evaluar los datos obtenidos en los diferentes casos de estudio, garantizando información relevante para proyectos futuros de líneas de transmisión de mayor capacidad, dicho esto se logra concluir que mediante esta investigación se evidencia la importancia de elementos de mitigación, es decir cuál es la más rápida para mitigar el arco eléctrico.

La implementación de estrategias de control, como resistencias de preinserción y maniobras sincronizadas, reduce significativamente las corrientes de energización y las oscilaciones de frecuencia, mejorando el comportamiento transitorio del sistema. En el escenario de primer paso, las corrientes de energización en condensadores de 230 y 138 kV se redujeron en más del 20% al usar resistencias de preinserción, y en un 22% con el mando sincronizado, evidenciando la efectividad de estas técnicas de mitigación de transitorios.

En la energización “back to back” para condensadores de 230 kV se lo realiza en dos pasos a diferencia de condensadores en 138kV que se lo realiza en un solo paso. La mejor estrategia para el cierre de múltiples pasos de conmutación de banco de condensadores es el cierre con mando sincronizado ya que ayuda a reducir las corrientes inrush en un 15.52%, sin embargo el tiempo de estabilización nos indica que las resistencias de preinserción son mucho más rápida para estabilizar el sistema. Por lo que, se concluye que la mejor estrategia para mitigar estos transitorios es el mando sincronizado en voltaje mínimo ya que ayuda a mejorar las frecuencias de oscilación en un 5.31%.

Por último, en la apertura de condensadores de 230 y 138 kV los picos de tensión no varían drásticamente, caso contrario sucede con las frecuencias de oscilación que ayudan a reducir en un 98.79%. Por lo que, estas magnitudes no sobrepasan el modelo de rigidez del interruptor de potencia y no existirá reencendido de arco eléctrico.

Se destaca que los interruptores seleccionados soportan adecuadamente las condiciones transitorias más críticas evaluadas, eliminando la necesidad de reactores de choque adicionales. Esta investigación refuerza la importancia de coordinar el diseño y la operación de equipos en sistemas eléctricos de alta tensión para evitar sobrecargas, garantizar la seguridad y prolongar la vida útil de los componentes.

6. REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Energías y Minas, “Plan Maestro de Electricidad”, Quito.
- [2] CELEC EP-TRANSELECTRIC, “Plan de expansión de la Transmisión”, 2018.
- [3] A. J. Guerrero Gallejo, “Proyecto de grado: Mitigación de sobretensiones por maniobras en Líneas de Transmisión de 500 kV”, La Universidad de los Andes, 2016. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uniandes.edu.co/static/pdf/aceptacion_uso_es.pdf
- [4] J. Molina, “Trabajo de grado: Estudio de sobretensiones por maniobra debido a energización de bancos de condensadores y transformadores en líneas de transmisión de 115kv”, Universidad Central de Venezuela, 2015. [En línea]. Disponible en: [http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/17712/1/TESIS DE GRADO LUIS DE GREGORIO.pdf](http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/17712/1/TESIS%20DE%20GRADO%20LUIS%20DE%20GREGORIO.pdf)
- [5] L. Pazmiño, D. Echeverría, y J. Cepeda, “Electromagnetic Transients Analysis in the Interconnected National System (S.N.I.) at 230 kV and 500 kV voltage level using the real-time digital simulator HYPERSim”, *Revista Técnica “energía”*, vol. 15, pp. 11–20, 2018, doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v15.n1.2018.319>.

- [6] J. Rocholl Martín, “Trabajo fin de grado: Estudio en ATP de transitorios de maniobra controlada de interruptores en bancos de condensadores y reactancias”, Universidad Carlos III De Madrid, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/2ea4e1a2-4734-4ffe-8245-f777a9120eee/content>
- [7] J. Grainger y W. Stevenson, *Libro: Análisis de Sistemas de Potencia*. Mc Graw Hill, 1996.
- [8] A. Greenwood, *Book: Electrical Transients in Power Systems*, Second edi. New York.
- [9] J. C. Das, *Book: Transients in Electrical Systems: Analysis, Recognition, and Mitigation*. Mc Graw Hill, 2010.
- [10] International Standard IEC 60071-2, “Insulation Coordination - Part 1: Definitions, principles, and rules. Ginebra: International Electrotechnical Comission”, Ginebra, 1993.
- [11] S. Vargas, P. Gavela, y L. Moncada, “Análisis de Indicadores de Calidad para la Actualización de la Regulación No. CONELEC – 003/08 Calidad del Transporte de Electricidad y del Servicio de Transmisión y Conexión en el Sistema Nacional Interconectado”, *Revista Técnica “energía”*, vol. 19, pp. 22–31, 2023, doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v19.n2.2023.551>.
- [12] Electrocables, “Catalogo ACAR Conductor desnudo de aluminio AA (1350-H19) reforzado en aleación de aluminio AA”, Guayaquil, 2018.
- [13] F. P. Flores Herrera, “Trabajo de grado: Diseño electromecánico para el ingreso de la generación térmica móvil de la compañía INTERVISATRADE a la Subestación Esclusas”, Escuela Politécnica Nacional, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/659/1/CD-1599%282008-07-15-01-34-02%29.pdf>
- [14] L. Dutan, “Estudios para la Determinación del Reactor de Amortiguamiento en Bancos de Capacitores a 230 kV. Aplicación a la Subestación Las Esclusas.”, *Revista técnica “energía”*, vol. 12, pp. 121–131, 2015, doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v12.n1.2016.34>.
- [15] UDELAR, “Sección de libro: Aplicación de los estudios transitorios para la especificación de equipos”, 2015, Capítulo 3, pp. 02–11.

- [16] ABB Power Technologies, “Guía para el comprador de Interruptores de tanque vivo”, LUDVIKA, Suecia.
- [17] K. N. Delgado Gómez, “Trabajo de pregrado: Análisis de la Tensión Transitoria de Recuperación en Sistemas de Potencia Utilizando una Herramienta de Simulación”, Universidad del Valle, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10893/16043>
- [18] IEC 62271-100, “Standar: High-voltage alternating-current circuit-breakers”, 2021, p. 600.