



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E SCIENTIA HOMINIS SALUS "

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

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

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

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

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

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE MODELOS DE DESCARGADORES
PARA ESTUDIOS DE SOBREVOLTAJES UTILIZANDO
EL PROGRAMA ALTERNATIVE TRANSIENTS
PROGRAM - ATP**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA ELÉCTRICA**

**EVELEEN ELIZABETH CUENCA NICOLALDE
eveleenpilis@hotmail.com**

**DIRECTOR: ING. LUIS EDMUNDO RUALES CORRALES
luis.ruales@epn.edu.ec**

Quito, noviembre 2013

DECLARACIÓN

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

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

Eveleen Elizabeth Cuenca Nicolalde

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Eveleen Elizabeth Cuenca Nicolalde, bajo nuestra supervisión.

Ing. Luis Ruales Corrales
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Luis Dután Amay
CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Politécnica Nacional y a sus docentes por la sabiduría que me transmitieron.

A CELEC EP – TRANSELECTRIC, en especial al Ing. Hugo Villacís, por brindarme la oportunidad de realizar mi proyecto de titulación y de esta manera ayudar a mi desarrollo profesional.

Quiero agradecer de manera muy especial y sincera al Ing. Luis Ruales, por sus sabios conocimientos, por su invaluable respaldo y aporte técnico; porque siempre estuvo dispuesto a ayudarme, a descartar las dudas que surgieron a lo largo de este proyecto.

Al Ing. Luis Dután, por ofrecerme este tema de tesis y por su oportuna colaboración, que son partes esenciales de este logro.

Al Ing. Paúl Ayora, por su tiempo y ayuda.

Al Ing. Edmundo Terán, por su atenta y efectiva colaboración que fue de mucho provecho, y sobre todo por motivarme a seguir adelante.

Al grupo de trabajadores de la Gerencia de Ingeniería y Construcción, por su amistad y valiosos aportes.

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme llegar a esta ocasión tan especial en mi vida.

A mis padres Juan y Eduví, por sus consejos, amor, cariño, comprensión, y apoyo que me brindaron a lo largo de mi carrera profesional. Por haberme enseñado a enfrentar las adversidades sin perder la cordura ni desfallecer en el intento. Por darme todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con gran amor y sin pedir nada a cambio. Aquí les entrego el fruto de lo que algún día soñaron para mí.

A mis hermanos, porque siempre he contado con ellos, por la confianza que nos hemos tenido, por el apoyo y amistad.

A Juanes y Juanes Jr., por ser mi inspiración y el motor que me impulsa a salir adelante, por enseñarme que todo es posible con amor. Doy gracias a Dios por darme tan hermoso regalo. Simplemente los amo.

A mis sobrinos, abuelitos, y demás familiares que me impulsaron para llegar hasta este lugar.

A mis amigos queridos, que han sido un pilar importante para que mis sueños se hagan realidad.

“Cuando lo creas todo perdido, no olvides que aún te queda el futuro, tu cerebro, tu voluntad y dos manos para cambiar tu destino”

Wernher von Braun

CONTENIDO

DECLARACIÓN	ii
CERTIFICACIÓN	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	v
CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	xiv
RESUMEN.....	xvi

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ALCANCE DEL ESTUDIO	2
1.4. JUSTIFICACIÓN	2
CAPÍTULO 2	4
2.1. DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES	4
2.1.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES	4
2.1.2. PARTES CONSTITUTIVAS DE LOS DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES DE ÓXIDO METÁLICO	6
CAPÍTULO 3	10
3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES DE ÓXIDO METÁLICO	10
3.1.1. VOLTAJE ASIGNADO O NOMINAL	10
3.1.2. VOLTAJE DE OPERACIÓN CONTINUA	11
3.1.3. CAPACIDAD PARA SOPORTAR SOBREVOLTAJES TEMPORALES ..	11
3.1.4. CORRIENTE NOMINAL DE DESCARGA DE UN DESCARGADOR	12
3.1.5. CLASE DE DESCARGA DE LÍNEA	13
3.1.6. VOLTAJE RESIDUAL O DE DESCARGA	15
3.1.7. CLASE DE ALIVIO DE PRESIÓN	16
3.1.8. LÍNEA DE FUGA	16
3.1.9. TIPO DE AISLAMIENTO	17
3.1.10. FRECUENCIA ASIGNADA	18
3.2. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES DE ÓXIDO METÁLICO	18
3.2.1. ELECCIÓN DE LA CORRIENTE NOMINAL Y LA CLASE DE DESCARGA DE LÍNEA	19
3.2.2. CRITERIO DE ELECCIÓN DEL VOLTAJE DE OPERACIÓN CONTINUA (U_c)	20
3.2.3. CRITERIO DE ELECCIÓN DE LOS SOBREVOLTAJES TEMPORALES (TOV_c) ..	20
3.2.4. ELECCIÓN DE LA LÍNEA DE FUGA	21
3.2.5. OTRAS CONSIDERACIONES	22

3.3. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LAS NORMAS APLICABLES	22
CAPÍTULO 4	24
4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES	24
4.1.1. MODELO PROPUESTO POR LA IEEE	24
4.1.2. MODELO SIMPLIFICADO PROPUESTO POR PINCETI Y GIANNETTONI	27
4.1.3. RESISTENCIA NO LINEAL “MOV TYPE 92”	28
4.2. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DE DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES EN EL PROGRAMA ATP	29
4.2.1. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DE DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES PARA SISTEMAS DE 230 kV	29
4.2.2. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DE DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES PARA SISTEMAS DE 500 kV	38
4.3. CASOS DE ESTUDIO	47
4.3.1. SISTEMA DE 230 kV	47
4.3.2. SISTEMA DE 500 kV	48
CAPÍTULO 5	50
5.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DE DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES EN EL PROGRAMA ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM – ATP	50
5.2. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DE DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES EN EL PROGRAMA ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM – ATP	69
CAPÍTULO 6	71
6.1. CONCLUSIONES	71
6.2. RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
ANEXOS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. Protección de un transformador mediante un descargador de Óxido Metálico [21].....	1
FIGURA 2.1. Característica no lineal de V-I de los descargadores de ZnO y SiC [2].....	5
FIGURA 2.2. Partes constitutivas de los descargadores de sobrevoltajes [5, 6].....	6
FIGURA 2.3. Resistores de Óxido Metálico [5, 6].....	7
FIGURA 2.4. Estructura interna del material MO en forma ampliada [6].....	8
FIGURA 4.1. Modelo dependiente de la frecuencia propuesto por la IEEE [18].....	25
FIGURA 4.2. Característica de V-I en p.u. para las dos secciones de resistencias no lineales A0 y A1 [18].....	25
FIGURA 4.3. Modelo simplificado de un descargador de Óxido Metálico propuesto por Pinceti y Giannettoni [19].....	28
FIGURA 4.4. Modelo basado en una resistencia no lineal.....	28
FIGURA 4.5. Modelo dependiente de la frecuencia, implementado en el programa ATP, para sistemas de 230 kV.....	31
FIGURA 4.6. a) Impulso con corriente de maniobra 30/60 μ s; b) Voltaje Vss del modelo del descargador según la IEEE simulado en kV para sistemas de 230 kV.....	33
FIGURA 4.7. a) Impulso atmosférico de corriente 8/20 μ s; b) Voltaje V10 del modelo del descargador según la IEEE simulado en kV para sistemas de 230 kV.....	33
FIGURA 4.9. a) Impulso con corriente de maniobra 30/60 μ s; b) Voltaje Vss del modelo del descargador propuesto por Pinceti y Giannettoni simulado en kV para sistemas de 230 kV.....	35
FIGURA 4.10. a) Impulso atmosférico de corriente 8/20 μ s; b) Voltaje V10 del modelo del descargador propuesto por Pinceti y Giannettoni simulado en kV para sistemas de 230 kV.....	35
FIGURA 4.11. Modelo basado en una resistencia no lineal, implementado en el programa ATP, para sistemas de 230 kV.....	36
FIGURA 4.12. a) Impulso con corriente de maniobra 30/60 μ s; b) Voltaje Vss del modelo de la resistencia no lineal MOV Type 92 simulado en kV para sistemas de 230 kV.....	37
FIGURA 4.13. a) Impulso atmosférico de corriente 8/20 μ s; b) Voltaje V10 modelo de la resistencia no lineal MOV Type 92 simulado en kV para sistemas de 230 kV.....	37
FIGURA 4.14. Modelo dependiente de la frecuencia, implementado en el programa ATP, para sistemas de 500 kV.....	40
FIGURA 4.15. a) Impulso con corriente de maniobra 30/60 μ s; b) Voltaje Vss del modelo del descargador según la IEEE simulado en kV para sistemas de 500 kV.....	42
FIGURA 4.16. a) Impulso atmosférico de corriente 8/20 μ s; b) Voltaje V10 del modelo del descargador según la IEEE simulado en kV para sistemas de 500 kV.....	42

FIGURA 4.17. Modelo simplificado de un descargador de Óxido Metálico, implementado en el programa ATP, para sistemas de 500 kV.....	43
FIGURA 4.18. a) Impulso con corriente de maniobra 30/60 μ s; b) Voltaje Vss del modelo del descargador propuesto por Pinceti y Giannettoni simulado en kV para sistemas de 500 kV	44
FIGURA 4.19. a) Impulso atmosférico de corriente 8/20 μ s; b) Voltaje V10 del modelo del descargador propuesto por Pinceti y Giannettoni simulado en kV para sistemas de 500 kV	44
FIGURA 4.20. Modelo basado en una resistencia no lineal, implementado en el programa ATP, para sistemas de 500 kV.....	45
FIGURA 4.21. a) Impulso con corriente de maniobra 30/60 μ s; b) Voltaje Vss del modelo de la resistencia no lineal MOV Type 92 simulado en kV para sistemas de 500 kV.....	46
FIGURA 4.22. a) Impulso atmosférico de corriente 8/20 μ s; b) Voltaje V10 modelo de la resistencia no lineal MOV Type 92 simulado en kV para sistemas de 500 kV.....	46
FIGURA 5.1. Voltajes en el lado de Paute sin emplear descargadores.....	51
FIGURA 5.2. Voltajes en el lado de Paute empleando el modelo IEEE.....	51
FIGURA 5.3. Voltajes en el lado de Paute empleando el modelo Pinceti y Giannettoni..	52
FIGURA 5.4. Voltajes en el lado de Paute empleando el modelo MOV Type 92	52
FIGURA 5.5. Voltajes en el lado de 230 kV del transformador Pascuales sin emplear descargadores	53
FIGURA 5.6. Corriente de Inrush en el lado de 230 kV al energizar el transformador Pascuales sin emplear descargadores	53
FIGURA 5.7. Voltajes en el lado de 230 kV del transformador Pascuales empleando el modelo IEEE	54
FIGURA 5.8. Corriente de Inrush en el lado de 230 kV al energizar el transformador Pascuales empleando el modelo IEEE.....	54
FIGURA 5.9. Voltajes en el lado de 230 kV del transformador Pascuales empleando el modelo Pinceti y Giannettoni.....	54
FIGURA 5.10. Corriente de Inrush en el lado de 230 kV al energizar el transformador Pascuales empleando el modelo Pinceti y Giannettoni	55
FIGURA 5.11. Voltajes en el lado de 230 kV del transformador Pascuales empleando el modelo MOV Type 92.....	55
FIGURA 5.12. Corriente de Inrush en el lado de 230 kV al energizar el transformador Pascuales empleando el modelo MOV Type 92	55
FIGURA 5.13. Voltajes en el lado de Pascuales sin emplear descargadores.....	56
FIGURA 5.14. Voltajes en el lado de Pascuales empleando el modelo IEEE	56
FIGURA 5.15. Voltajes en el lado de Pascuales empleando el modelo Pinceti y Giannettoni.....	57

FIGURA 5.16. Voltajes en el lado de Pascuales empleando el modelo MOV Type 92.....	57
FIGURA 5.17. Voltajes en el lado de Paute sin emplear descargadores.....	58
FIGURA 5.18. Voltajes en el lado de Paute empleando el modelo IEEE	58
FIGURA 5.19. Voltajes en el lado de Paute empleando el modelo Pinceti y Giannettoni.	59
FIGURA 5.20. Voltajes en el lado de Paute empleando el modelo MOV Type 92.....	59
FIGURA 5.21. Voltajes en el lado de Coca Codo Sinclair sin emplear descargadores....	60
FIGURA 5.22. Voltajes en el lado de Coca Codo Sinclair empleando el modelo IEEE ...	60
FIGURA 5.23. Voltajes en el lado de Coca Codo Sinclair empleando el modelo Pinceti y Giannettoni	61
FIGURA 5.24. Voltajes en el lado de Coca Codo Sinclair empleando el modelo MOV Type 92	61
FIGURA 5.25. Voltajes en el lado de 500 kV del transformador El Inga sin emplear descargadores	62
FIGURA 5.26. Corriente de Inrush en el lado de 500 kV al energizar el transformador El Inga sin emplear descargadores.....	62
FIGURA 5.27. Voltajes en el lado de 500 kV del transformador El Inga empleando el modelo IEEE	63
FIGURA 5.28. Corriente de Inrush en el lado de 500 kV al energizar el transformador El Inga empleando el modelo IEEE.....	63
FIGURA 5.29. Voltajes en el lado de 500 kV del transformador El Inga empleando el modelo Pinceti y Giannettoni.....	63
FIGURA 5.30. Corriente de Inrush en el lado de 500 kV al energizar el transformador El Inga empleando el modelo Pinceti y Giannettoni.....	64
FIGURA 5.31. Voltajes en el lado de 500 kV del transformador El Inga empleando el modelo MOV Type 92.....	64
FIGURA 5.33. Voltajes en el lado de El Inga sin emplear descargadores.....	65
FIGURA 5.34. Voltajes en el lado de El Inga empleando el modelo IEEE	66
FIGURA 5.35. Voltajes en el lado de El Inga empleando el modelo Pinceti y Giannettoni	66
FIGURA 5.36. Voltajes en el lado de El Inga empleando el modelo MOV Type 92.....	66
FIGURA 5.37. Voltajes en el lado de El Inga sin emplear descargadores.....	67
FIGURA 5.38. Voltajes en el lado de El Inga empleando el modelo IEEE	68
FIGURA 5.39. Voltajes en el lado de El Inga empleando el modelo Pinceti y Giannettoni	68
FIGURA 5.40. Voltajes en el lado de El Inga empleando el modelo MOV Type 92.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1. Valores normalizados del voltaje nominal de los descargadores.....	11
TABLA 3.2. Valores de corriente nominal de descarga normalizados en función del voltaje nominal del descargador	13
TABLA 3.3. Parámetros para el ensayo de descarga de línea en descargadores de 10 kA y 20 kA para determinar la clase de descarga de línea [11].....	14
TABLA 3.4. Valores de cresta de la corriente para determinar el voltaje residual en el ensayo de impulso tipo maniobra utilizado para el cálculo de energía.....	15
TABLA 3.5. Valores de formas de onda y magnitud de la corriente de descarga sobre los que los fabricantes deben realizar ensayos para obtener voltajes residuales	15
TABLA 3.6. Línea de fuga específica nominal en función del nivel de contaminación	17
TABLA 3.7. Valores característicos de la corriente nominal de descarga (I_n) en función del voltaje máximo del sistema [13].....	19
TABLA 3.8. Valores habituales de corrientes nominales de descarga (I_n) y clase de descarga de línea [2]	19
TABLA 3.9. Valores normalizados del máximo voltaje de operación continua de los descargadores según ANSI C62.11-1999 [16].....	23
TABLA 4.1. Especificaciones de los descargadores de sobrevoltajes para voltajes máximos de red de 245 kV, proporcionados por el fabricante ABB [5].....	30
TABLA 4.2. Especificaciones del descargador de sobrevoltajes con revestimiento de silicona HS PEXLIM P-T [5].....	31
TABLA 4.3. Característica de V-I de las dos secciones de resistencias no lineales A0 y A1 para sistemas de 230 kV, según Figura 4.2.	32
TABLA 4.4. Ajuste de la inductancia L1 para que coincidan los voltajes máximos de descarga V10.....	33
TABLA 4.5. Característica de V-I de las dos secciones de resistencias no lineales A0 y A1 para sistemas de 230 kV, según Figura 4.2.	35
TABLA 4.6. Característica de V-I de la resistencia no lineal A para sistemas de 230 kV.....	36
TABLA 4.7. Resultados de los voltajes residuales del descargador para el sistema de 230 kV.....	38
TABLA 4.8. Especificaciones de los descargadores de sobrevoltajes para voltajes máximos de red de 550 kV, proporcionados por el fabricante ABB [5].....	39
TABLA 4.9. Especificaciones del descargador de sobrevoltajes con revestimiento de silicona HS PEXLIM P-T seleccionado [5].....	40
TABLA 4.10. Característica de V-I de las dos secciones de resistencias no lineales A0 y A1 para sistemas de 500 kV, según Figura 4.2.	41

TABLA 4.11. Ajuste de la inductancia L_1 para que coincidan los voltajes máximos de descarga V_{10}	42
TABLA 4.12. Característica de $V-I$ de las dos secciones de resistencias no lineales A_0 y A_1 para sistemas de 500 kV, según Figura 4.2.	44
TABLA 4.13. Característica de $V-I$ de la resistencia no lineal A para sistemas de 500 kV	45
TABLA 4.14. Resultados de los voltajes residuales del descargador para el sistema de 500 kV	47
TABLA 5.1. Resultados de los estudios de sobrevoltajes y errores relativos para sistemas de 230 kV.....	69
TABLA 5.2. Resultados de los estudios de sobrevoltajes y errores relativos para sistemas de 500 kV.....	70

GLOSARIO DE TÉRMINOS

α	Coeficiente de no-linealidad
A, A0, A1	Resistencias no lineales del descargador de sobrevoltajes
ACAR	Aluminium Conductor Alloy Reinforced
ACSR	Aluminum Conductors Steel Reinforced
ATP	Alternative Transient Program
C	Capacitancia de terminal a terminal del descargador de sobrevoltajes
d	Longitud del descargador en metros
i	Corriente en el descargador de la característica no lineal V - I
In	Corriente nominal de descarga
K	Constante que depende de las características y geometría del material
k	Factor de falla a tierra
kA	Kilo Amperios
kJ	Kilo Joule
kTOV	Factor de sobrevoltaje temporal
kV	Kilo Voltios
L0	Inductancia asociada con los campos magnéticos en las cercanías del descargador de sobrevoltajes
L1	Inductancia del filtro pasa bajos del descargador de sobrevoltajes
m	Exponente que describe la característica del voltaje a frecuencia industrial versus el tiempo del descargador
ms	Milisegundos
n	Número de columnas de varistores
p	Constante del descargador de sobrevoltajes
q	Constante del descargador de sobrevoltajes
R	Resistencia colocada entre los terminales del modelo para evitar problemas numéricos
R0	Resistencia para estabilizar la integración numérica

R1	Resistencia del filtro pasa bajos del descargador de sobrevoltajes
SiC	Carburo de Silicio
SNI	Sistema Nacional Interconectado
T	Duración virtual de la corriente de pico
tf	Tiempo de frente
TOV	Sobrevoltaje Temporal
TOVc	Capacidad del descargador frente a sobrevoltajes temporales
Tt	Duración del sobrevoltaje temporal en segundos
Uc	Voltaje de operación continua
Ueq	Amplitud del sobrevoltaje temporal equivalente para 10 segundos
UL	Voltaje de carga
Ur	Voltaje asignado o nominal (IEC)
Ures	Voltaje residual o de descarga
Us	Voltaje máximo del sistema
μs	Microsegundos
V	Voltaje aplicado en los terminales del descargador
V10	Voltaje máximo de descarga en kV para 10 kA, cuando se le aplica un impulso de corriente de 8/20 μs
Vn	Voltaje nominal (ANSI)
Vref	Voltaje de referencia
Vrese	Valor experimental del voltaje residual del descargador (datos del fabricante)
Vrest	Valor teórico del voltaje residual del descargador (datos de las simulaciones)
Vss	Voltaje de descarga tipo maniobra para una onda de corriente tipo maniobra asociada
W	Energía inyectada
Z	Impedancia de onda de la línea
ZnO	Óxido de Zinc

RESUMEN

El presente proyecto de titulación presenta el desarrollo e implementación de tres modelos de descargadores de sobrevoltajes en el paquete computacional para análisis de transitorios electromagnéticos ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM - ATP, en base a los datos proporcionados por los fabricantes, el primero propuesto por la IEEE, formado por dos resistencias no lineales (A0 y A1), un filtro pasa bajos (R1 y L1), una inductancia asociada con los campos magnéticos (L0), una resistencia para estabilizar la integración numérica (R0) y una capacitancia de terminal a terminal del descargador (C), el segundo presentado por Pinceti y Giannettoni, que es una simplificación del modelo IEEE, y el tercero un modelo que consiste en una resistencia no lineal.

Se aplican los modelos de descargadores a sistemas eléctricos de potencia de 230 y 500 kV y se analizan los transitorios ocasionados por sobrevoltajes temporales, de maniobra y descargas atmosféricas.

Con los resultados obtenidos en las simulaciones se hace la comparación de los modelos detallados y simplificados de descargadores de sobrevoltajes.

Este estudio ha sido dividido en seis capítulos, en los cuales se desarrollan los siguientes temas:

El Capítulo 1 abarca la introducción, alcance, objetivos y justificación del estudio del proyecto.

En el Capítulo 2, se revisa la teoría de funcionamiento de los descargadores de sobrevoltajes y el análisis de las normas IEC y ANSI aplicables.

En el Capítulo 3, se analizan los criterios de selección de descargadores de sobrevoltajes en base a las normas antes descritas.

En el Capítulo 4, se realiza la descripción y modelación detallada de los descargadores de sobrevoltajes utilizando elementos básicos existentes en el programa ATP.

En el Capítulo 5, se realiza una aplicación de los modelos antes descritos en estudios de sobrevoltajes temporales, de maniobra y debido a descargas atmosféricas, se muestra los resultados de las simulaciones, se analiza las discrepancias al usar modelos detallados y simplificados de descargadores en estudios de sobrevoltajes.

En el Capítulo 6, se exponen las conclusiones y recomendaciones, producto del trabajo desarrollado.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

A los descargadores de sobrevoltajes también se los denomina apartarrayos porque en un principio su única misión era la de limitar los sobrevoltajes ocasionados por descargas atmosféricas. Posteriormente se ampliaron sus funciones, utilizándose para otro tipo de sobrevoltajes, como los de maniobra y temporales, por lo que es más adecuada la nomenclatura de *descargadores de sobrevoltajes*.

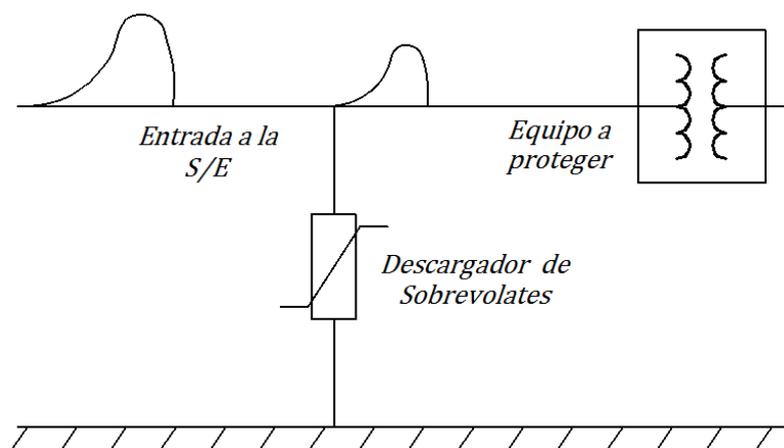


FIGURA 1.1. Protección de un transformador mediante un descargador de Óxido Metálico [21]

Los descargadores de sobrevoltajes han sufrido una evolución importante, pasando de los apartarrayos de cuernos de arco, en los que la descarga de sobrevoltaje se realizaba sobre dos cuernos metálicos separados por una capa de aire, a los actuales descargadores de sobrevoltajes, cuyo principio de funcionamiento se basa en la descarga del sobrevoltaje sobre unas válvulas o resistencias variables con el valor del voltaje al que fueron diseñados [21].

Debido a que el paquete computacional ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM - ATP, con el que se realizan estudios de sobrevoltajes en sistemas eléctricos de potencia, no cuenta con modelos detallados de descargadores de sobrevoltajes, se implementarán en este programa modelos más precisos.

1.2. OBJETIVOS

Analizar e implementar los modelos detallados y simplificados de descargadores de sobrevoltajes presentados según las normas IEC 60099-4 (1998), IEC 60099-4 (2001), IEC 60099-5 (2000), IEC 60071-1 (1993), IEC 60071-2 (1996), ANSI C62.11-1999 e IEEE Std 1313.2-1999, en el programa ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM - ATP. Estos modelos se aplicarán a estudios de sobrevoltajes temporales, de maniobra y debido a descargas atmosféricas en sistemas de 230 y 500 kV.

- Analizar el funcionamiento y las normas IEC e IEEE antes detalladas de los descargadores de sobrevoltajes.
- Analizar los criterios de selección de descargadores de sobrevoltajes.
- Crear en el programa ATP modelos detallados y simplificados de descargadores de sobrevoltajes.
- Aplicar los modelos en sistemas representativos del sistema de 230 kV y posteriormente 500 kV en los cuales se analizarán los modelos desarrollados.

1.3. ALCANCE DEL ESTUDIO

En el presente proyecto se implementan modelos de descargadores de sobrevoltajes en el programa ATP, aplicado a sistemas de 230 y 500 kV.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Los descargadores de sobrevoltajes son equipos destinados a proteger los equipos que forman parte de una instalación eléctrica, de manera especial a transformadores, y que están expuestos a sobrevoltajes.

Debido a que se requiere que el sistema opere bajo altos índices de calidad y confiabilidad es necesario garantizar la adecuada protección ante sobrevoltajes de elementos tales como transformadores de potencia, transformadores de corriente y transformadores de potencial, por esta razón surge la necesidad de

contar con modelos detallados y confiables de descargadores de sobrevoltajes para estudios de protección contra sobrevoltajes en los equipos de un sistema eléctrico de potencia.

CAPÍTULO 2

FUNCIONAMIENTO Y NORMAS APLICABLES A DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES

2.1. DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES

2.1.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES

Los descargadores de sobrevoltajes, sin tener en cuenta sus características constructivas, deben limitar los sobrevoltajes peligrosos para el equipo a proteger a unos valores perfectamente soportables y que no exponga riesgos para el mismo. Esta misión la cumplen los descargadores de Carburo de Silicio (también llamados convencionales) y los de Óxido Metálico.

Los descargadores de Carburo de Silicio, utilizan válvulas de resistencias no lineales de Carburo de Silicio en serie con una estructura de explosores para limitar la corriente, y llevar a tierra las cargas eléctricas asociadas a los sobrevoltajes. Cuando los descargadores de sobrevoltajes son alcanzados por una onda de sobrevoltaje estos no conducen corriente a tierra hasta que el voltaje en los explosores es lo suficientemente elevado para ionizar el espacio de aire o dieléctrico existente entre los electrodos de los explosores. Una vez que se han cebado los explosores (al voltaje de cebado de choque), las válvulas o resistencias no lineales comienzan a conducir la corriente de la falla a tierra. Transcurrido el sobrevoltaje, la corriente de descarga disminuye hasta alcanzar valores de corriente subsiguiente, la cual es la corriente suministrada por la red y fácilmente extingible por los propios explosores, cortando así el flujo a tierra.

Los descargadores de sobrevoltajes de Óxidos Metálicos disponen de unos elementos valvulares extremadamente no lineales. En condiciones normales de los voltajes de línea con respecto a tierra conducen unos pocos de miliamperios de corriente de fuga, que pueden ser perfectamente tolerados de forma continua, por lo que existe una mínima pérdida de corriente asociada a su funcionamiento.

Cuando se presenta un sobrevoltaje y la corriente que circula por el descargador de sobrevoltajes aumenta, la resistencia de las válvulas disminuye drásticamente, por lo que absorben perfectamente la corriente de descarga sin que aumente el voltaje entre bornes de los descargadores de sobrevoltajes. Cuando la corriente de descarga disminuye hasta los valores de corriente subsiguiente, las resistencias de Óxido Metálico aumentan su valor, volviendo a conducir a tierra unos pocos miliamperios, por lo que se puede decir en ese momento que el sobrevoltaje se ha extinguido. De esta manera queda patente la innecesaria utilización de explosores en serie u otro dispositivo que aisle las resistencias de la red cuando se trabaja en condiciones normales de operación [21].

En la Figura 2.1 se muestra que el coeficiente de no-linealidad del *descargador de ZnO* es muy superior al del SiC.

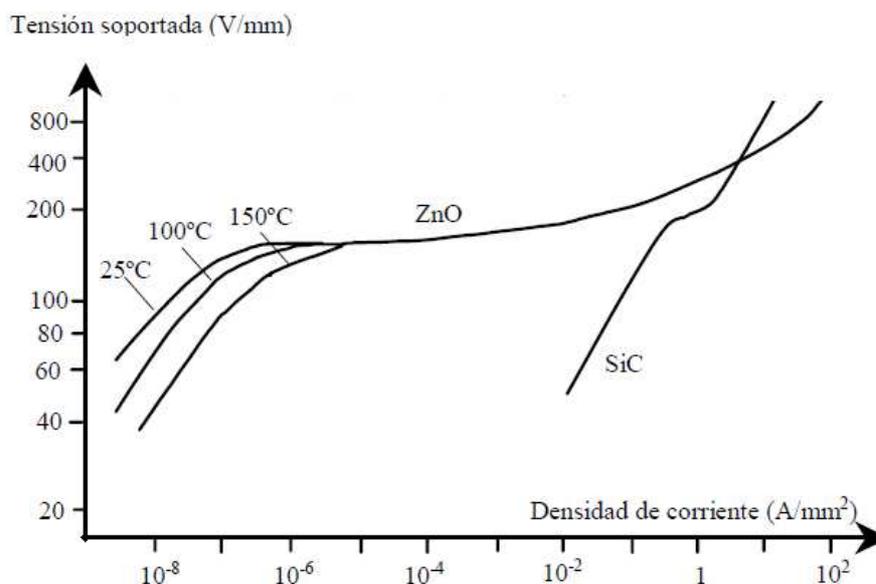


FIGURA 2.1. Característica no lineal de V-I de los descargadores de ZnO y SiC [2]

La característica no lineal de V-I de un descargador tipo válvula (ZnO o SiC) está dada por

$$I = KV^\alpha \quad (2.1)$$

donde:

I = corriente en el descargador

V = voltaje aplicado en los terminales

K = constante que depende de las características y geometría del material, como es el Óxido Metálico.

α = coeficiente de no-linealidad

Esta corriente puede alcanzar varios kA, debiendo los descargadores ser capaces de interrumpir la corriente posterior y permanecer sin conducir.

2.1.2. PARTES CONSTITUTIVAS DE LOS DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES DE ÓXIDO METÁLICO

Los descargadores de sobrevoltajes han evolucionado, desde dispositivos con un gran número de varistores y múltiples accesorios, hasta los nuevos dispositivos que soportan un alto gradiente de voltaje, con elementos adicionales de alta absorción de energía, esto ha permitido reducir el número de partes y el volumen con obvias implicaciones económicas. Cada desarrollo ha sido un paso para la optimización de la característica de protección del descargador.

En la Figura 2.2 se presentan las partes de los descargadores de sobrevoltajes PEXLIM y HS PEXLIM del fabricante ABB [6].

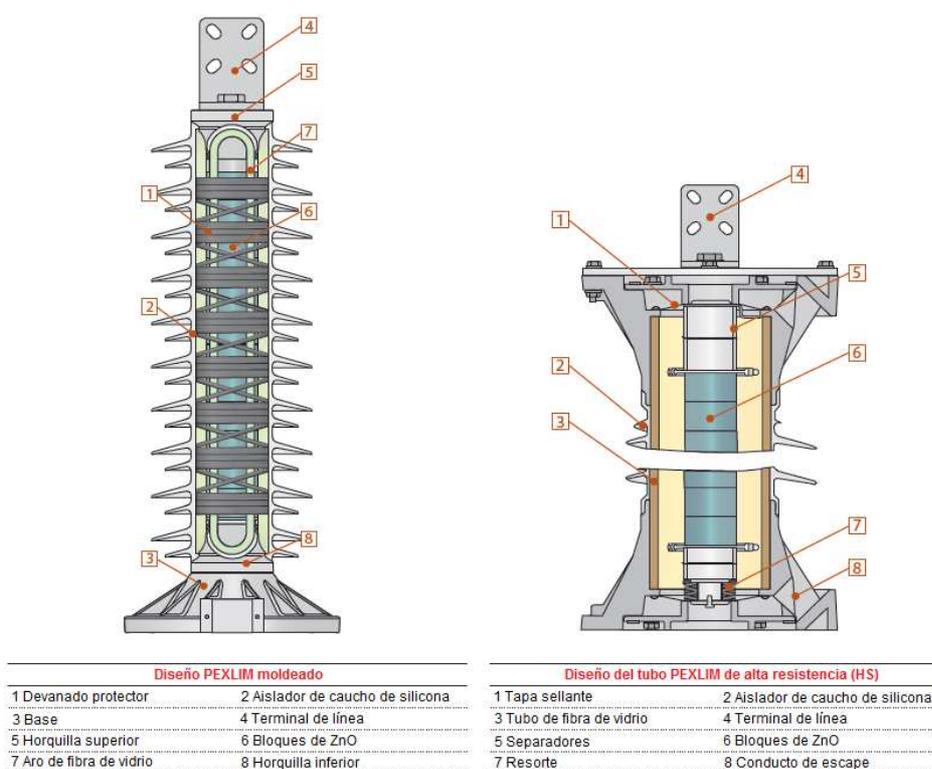


FIGURA 2.2. Partes constitutivas de los descargadores de sobrevoltajes [5, 6]

2.1.2.1. Cubierta

Fabricada de material cerámico (porcelana) o polimérico (silicona) resistente al choque eléctrico y térmico, ya que su diseño debe proveer máxima distancia de fuga y máximo desempeño por contaminación. En la actualidad se está usando la cubierta de silicona ya que sirve como almohadilla y posición de seguridad a los discos de Óxido de Zinc, el efecto hidrofóbico de la silicona, que es la repelencia de las gotas de agua que terminan por unirse y escurrir cuando se expone a la humedad, evita que se formen depósitos semiconductores, de modo que la corriente eléctrica no es conducida fácilmente [4].

2.1.2.2. Varistores (bloques de Óxido de Zinc)

Constituyen el elemento principal de los descargadores de sobrevoltajes, poseen características eléctricas no lineales.

Es absolutamente necesario obtener una estructura muy homogénea del material con el fin de llegar a la alta capacidad de manejo de energía específica de la resistencia de Óxido Metálico.

La Figura 2.3 presenta las resistencias no lineales de Óxido Metálico, estas tienen un coeficiente de no linealidad mucho más elevado que las resistencias de Carburo de Silicio.

La Figura 2.4 muestra claramente la imagen microscópica de los granos de Óxido Metálico y los límites entre cada grano por separado.



FIGURA 2.3. Resistores de Óxido Metálico [5, 6]

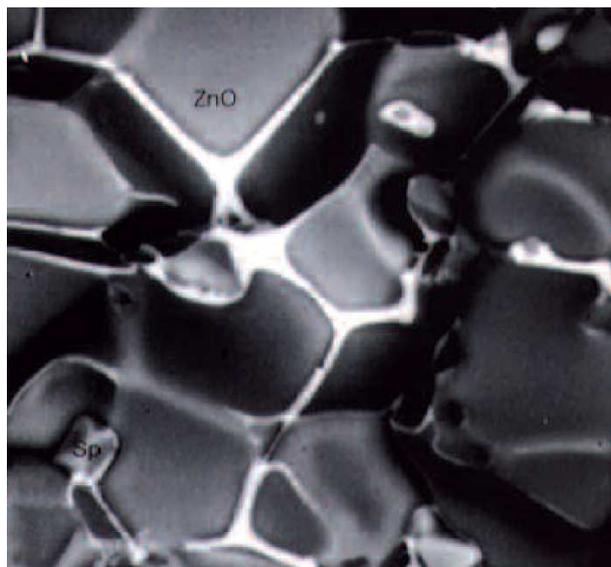


FIGURA 2.4. Estructura interna del material MO en forma ampliada [6]

2.1.2.3. Cubierta interna (tubo de fibra de vidrio)

El cilindro que aloja las pastillas de Óxido Metálico debe ser un buen aislante eléctrico y poseer suficiente capacidad para soportar las altas temperaturas causadas por las corrientes que son drenadas a tierra en condiciones de sobrevoltaje; dicho requerimiento es crítico debido a que este es el componente que mantiene contacto directo con el elemento generador de calor del descargador de sobrevoltajes, varistor de Óxido Metálico. Uno de los materiales que cumple con estas condiciones es la fibra de vidrio, por lo que es usada en la fabricación de la cubierta interna [22].

2.1.2.4. Tapas de encapsulado

Los extremos longitudinales del descargador de sobrevoltajes están herméticamente cerrados mediante tapas presurizadas de encapsulado; de esta forma se trata de evitar que la humedad ingrese al interior del descargador. Estas tapas están hechas de metal, por lo que constituyen una parte viva en la estructura del descargador de sobrevoltajes [22].

2.1.2.5. Terminal de línea

Son el medio que une eléctricamente el varistor de Óxido Metálico del descargador de sobrevoltajes con la instalación que se protege. Con el fin de

reducir la resistencia de contacto los terminales de conexión poseen un baño de Plata, mejorándose de esa forma su conductividad. La unión mecánica y eléctrica de los terminales y demás componentes del descargador de sobrevoltajes se realiza mediante procesos industriales especiales de soldadura [22].

CAPÍTULO 3

SELECCIÓN DE DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES DE ÓXIDO METÁLICO

Las características necesarias para definir y seleccionar un descargador de sobrevoltajes son:

- Voltaje asignado o nominal: U_r
- Voltaje de operación continua: U_c
- Capacidad del descargador frente a sobrevoltajes temporales: TOV_c
- Corriente nominal de descarga: I_n
 - Clase de descarga de la línea
- Voltaje residual o de descarga: U_{res}
- Clase de alivio de presión
- Línea de fuga
- Tipo de aislamiento
- Frecuencia asignada

3.1.1. VOLTAJE ASIGNADO O NOMINAL

El voltaje asignado o nominal (U_r) de un descargador es el valor eficaz (rms) máximo de voltaje a frecuencia industrial permisible entre sus terminales para el cual está previsto un funcionamiento correcto en condiciones de sobrevoltajes temporales establecidos en los ensayos de funcionamiento según la norma internacional IEC 60099-4 [11].

Según estos ensayos, el voltaje nominal corresponde al valor eficaz máximo de voltaje a frecuencia industrial que es capaz de soportar durante 10s, después de haber sometido al descargador a los impulsos de corriente de gran amplitud o de larga duración.

Una vez realizado dicho ensayo, el valor del voltaje nominal del descargador corresponde a un valor normalizado inferior al obtenido (normalmente el inmediato inferior).

Los valores normalizados del voltaje asignado de los descargadores (en kV rms) son establecidos por IEC 60099-4 [11, 12]. Véase la Tabla 3.1.

TABLA 3.1. Valores normalizados del voltaje nominal de los descargadores

Rangos de voltaje nominal (kV r.m.s.)	Escalones de voltaje nominal (kV r.m.s.)
<3	Bajo consideraciones
3-30	1
30-54	3
54-96	6
96-288	12
288-396	18
396-756	24

3.1.2. VOLTAJE DE OPERACIÓN CONTINUA

El voltaje de operación continua (U_c) de un descargador es el valor máximo permisible de voltaje eficaz a frecuencia industrial que puede aplicarse de forma permanente en los terminales de un descargador según la norma IEC 60099-4 [11, 12].

Representa el voltaje eficaz máximo que puede soportar el descargador entre sus terminales de forma permanente, y corresponde al voltaje máximo que el descargador es capaz de soportar cuando está trabajando en la zona de pre-descarga.

La Tabla 3.2 presenta los valores normalizados *del máximo voltaje de operación continua* de los descargadores (en kV rms) según ANSI C62.11-1999 [16].

3.1.3. CAPACIDAD PARA SOPORTAR SOBREVOLTAJES TEMPORALES

La capacidad del descargador para soportar sobrevoltajes temporales (Temporary Overvoltage Capability - TOVc) es el valor eficaz del máximo sobrevoltaje temporal a frecuencia industrial que es capaz de soportar entre sus terminales durante un tiempo determinado.

Generalmente los fabricantes proporcionan gráficas con la variación del TOV_c para distintos valores de tiempo.

Suelen presentarse como referencia los valores de TOV_c para 1s y 10s.

El valor de TOV_c para 10s suele ser algo superior al valor del voltaje asignado del descargador (U_r), ya que U_r es el voltaje a frecuencia industrial durante 10s usada para verificar la estabilidad después de aplicar los impulsos indicados en IEC 60099-4 [12].

El voltaje nominal del pararrayos U_r será a lo mucho el valor de TOV_c para 10 s.

$$U_r \leq TOV_c(10s) \quad (3.1)$$

El valor de TOV_c representa, por tanto, la capacidad del descargador para soportar los sobrevoltajes temporales que pueden aparecer en la red. Este valor va asociado a la destrucción del aislamiento debido a las sollicitaciones energéticas.

El principal efecto de los TOV_c en los descargadores de sobrevoltajes es el incremento de corriente y disipación de energía, y una creciente temperatura en el descargador.

La capacidad de absorción de energía de un descargador es de gran importancia especialmente en los sistemas de extra alto voltaje, donde la energía es muy elevada, debido a la poca posibilidad de repartición de energía entre los descargadores de una subestación [20].

3.1.4. CORRIENTE NOMINAL DE DESCARGA DE UN DESCARGADOR

Se denomina corriente de descarga a la onda de corriente que circula por el descargador cuando se encuentra en la zona de descarga o alta descarga.

La corriente nominal de descarga (I_n) de un descargador es el valor de cresta del impulso de corriente tipo rayo (onda 8/20 μ s) que se usa para designar el descargador.

La Tabla 3.2 muestra los valores normalizados en función del voltaje nominal del descargador según IEC 60099-4 [11].

TABLA 3.2. Valores de corriente nominal de descarga normalizados en función del voltaje nominal del descargador

Rangos de voltaje nominal kV r.m.s.	Corriente nominal de descarga				
	1,5 kA	2,5 kA	5 kA	10 kA	20 kA
$U_r < 3\text{kV}$					
$3\text{kV} \leq U_r \leq 29\text{kV}$					
$30\text{kV} \leq U_r \leq 132\text{kV}$					
$144\text{kV} \leq U_r \leq 756\text{kV}$					

3.1.5. CLASE DE DESCARGA DE LÍNEA

La norma IEC 60099-5 (2000) [13] ha definido la clase de descarga de línea como el valor relacionado con la capacidad de absorción de energía de los descargadores de 10kA y 20kA para la descarga de línea de gran longitud.

De acuerdo con la norma IEC 60099-4 [12] existen cinco clases de descarga de línea normalizada, para cada una de las clases se define una amplitud y una duración del impulso de corriente de larga duración que debe ser capaz de soportar el descargador [12, 13, 20].

La normativa define los parámetros de ensayo que determinan la clase de descarga de línea del descargador. Estos parámetros se muestran en la Tabla 3.3, donde U_r es la tensión asignada del descargador [2].

Para descargadores de una misma clase de descarga de línea y diferente fabricante el valor de la energía en kJ-kV (U_r) puede ser distinto ya que la energía a inyectar en el ensayo que determina la clase de descarga de línea depende de características del propio descargador: U_{res} .

Para poder comparar las capacidades energéticas de diferentes fabricantes, es habitual presentar la corriente de cresta que es capaz de soportar el descargador cuando se le somete a un impulso de 4 ms (independientemente de la clase).

Por lo tanto, la forma de clasificar a los descargadores es por su corriente nominal de descarga y su clase de descarga de línea (en caso de tratarse de 10 o 20 kA).

Al aumentar la clase de descarga aumenta la capacidad de disipación de energía, pero también el precio del equipo.

TABLA 3.3. *Parámetros para el ensayo de descarga de línea en descargadores de 10 kA y 20 kA para determinar la clase de descarga de línea [11]*

Corriente de descarga I_n	Clase de descarga de línea	Impedancia de onda de la línea $Z(\Omega)$	Duración convencional de la cresta $T(\mu s)$	Voltaje de carga U_L (kV de voltaje continuo)
10 kA	1	$4,9 \cdot U_r$	2000	$3,2 \cdot U_r$
	2	$2,4 \cdot U_r$	2000	$3,2 \cdot U_r$
	3	$1,3 \cdot U_r$	2400	$2,8 \cdot U_r$
20 kA	4	$0,8 \cdot U_r$	2800	$2,8 \cdot U_r$
	5	$0,5 \cdot U_r$	3200	$2,4 \cdot U_r$

Para determinar la energía inyectada en el ensayo, se define un voltaje residual (U_{res}) que corresponde a la que presenta el descargador al inyectar la corriente del ensayo con impulso tipo maniobra (onda 30/60 μs) con las corrientes de cresta indicadas en la Tabla 3.4 [1].

A partir de los parámetros de la línea pre-cargada según la Tabla 3.3, y del voltaje residual del descargador para el ensayo de impulso tipo maniobra (U_{res}) según Tabla 3.4, es posible obtener la energía inyectada (W) utilizando la siguiente ecuación:

$$W = U_{res} * (U_L - U_{res} * \frac{1}{Z} * T) \quad (3.2)$$

donde:

W = energía inyectada

U_{res} = voltaje residual

U_L = voltaje de carga

Z = impedancia de onda de la línea

T = duración virtual de la corriente de pico

TABLA 3.4. Valores de cresta de la corriente para determinar el voltaje residual en el ensayo de impulso tipo maniobra utilizado para el cálculo de energía

Corriente de descarga I_n	Clase de descarga de línea	Corriente de cresta
10 kA	1	125 A
	2	125 A
	3	250 A
20 kA	4	500 A
	5	500 A

3.1.6. VOLTAJE RESIDUAL O DE DESCARGA

El voltaje residual (U_{res}) de un descargador es el valor de cresta del voltaje que aparece entre los terminales de este durante el paso de la corriente de descarga. Su valor depende de la forma de onda y la magnitud de la corriente de descarga.

Los voltajes residuales se obtienen para impulsos de corriente tipo maniobra (30/60 μ s para descargadores de 10 kA y 20 kA) y tipo rayo (8/20 μ s para todos los descargadores, independientemente de su corriente nominal).

TABLA 3.5. Valores de formas de onda y magnitud de la corriente de descarga sobre los que los fabricantes deben realizar ensayos para obtener voltajes residuales

Clasificación de descargadores	Impulso de maniobra (30/60 μ s)	Impulso tipo rayo (8/20 μ s)	
1,5 kA	---	1,5 kA	
2,5 kA	---	2,5 kA	
5 kA	---	5 kA	
10 kA	1	125 A y 500 A	10 kA
	2	125 A y 500 A	10 kA
	3	250 A y 1000 A	10 kA
20 kA	4	500 A y 2000 A	20 kA
	5	500 A y 2000 A	20 kA

Los valores de cresta de las corrientes para los ensayos de voltaje residual vienen definidos en IEC 60099-4 [12], y son valores mínimos que el fabricante debe

presentar en función de la corriente nominal de descarga y clase de descarga de línea del descargador, véase la Tabla 3.5.

3.1.7. CLASE DE ALIVIO DE PRESIÓN

En caso de defecto interno de un descargador de sobrevoltajes, conviene que la corriente que lo atraviesa no cause destrucción violenta de su envolvente. En consecuencia, se recomienda que la corriente de defecto (cortocircuito) soportada por el descargador sea igual o superior a la corriente de defecto máximo en el lugar en donde está instalado. Tienen mayor riesgo los descargadores de porcelana (mayor riesgo de daño en caso de explosión) y de elevado voltaje nominal (mayor tamaño).

Una medida de seguridad para el equipo y el personal que pueda estar cerca en caso de fallo del descargador es la instalación de un dispositivo limitador de presión.

La normativa europea establece, como referencia para la realización de ensayos, IEC 60099-4 [12] para determinar la clase de limitador de presión (expresada en kA) que debe soportar el equipo en caso de cortocircuito trifásico en terminales del descargador [2].

3.1.8. LÍNEA DE FUGA

La línea de fuga es la distancia medida a lo largo del aislamiento exterior del equipo, y es una medida de la capacidad del equipo respecto al riesgo de contorneo exterior en entornos contaminados.

Se definen 4 niveles de contaminación, con una línea de fuga específica nominal mínima para cada uno de ellos, como muestra la Tabla 3.6.

La línea de fuga mínima para un nivel de contaminación determinada se obtiene a partir de la línea de fuga especificada y del voltaje máximo del sistema (U_s) [2,15].

$$\text{Línea de fuga (mm)} = U_s(\text{kV}) * \text{línea de fuga específica nominal mínima} \left(\frac{\text{mm}}{\text{kV}} \right) \quad (3.3)$$

TABLA 3.6. Línea de fuga específica nominal en función del nivel de contaminación

Nivel de contaminación	Descripción	Línea de fuga específica nominal mínima mm/kV
I Ligero (L)	Zonas sin industrias y baja densidad de viviendas con calefacción.	16 mm/kV
	Zonas de baja densidad de industrias o viviendas, sometidas a viento o lluvias frecuentes.	
	Zonas agrícolas (sin quemado de residuos).	
	Zonas montañosas.	
II Medio (M)	Zonas con industrias que no producen humo especialmente contaminante, y/o con densidad media de viviendas con calefacción	20 mm/kV
	Zonas con elevada densidad de industrias y/o viviendas, sometidas a viento o lluvias frecuentes.	
	Zonas expuestas a vientos desde el mar, pero no muy próximas a la costa (nunca menos de 1 km).	
III Fuerte (H)	Zonas con elevada densidad de industrias y suburbios de grandes ciudades, con elevada densidad de calefacción generando contaminación	25 mm/kV
	Zonas cercanas al mar o en cualquier caso expuestas a vientos relativamente fuertes provenientes del mar	
IV Muy Fuerte (V)	Zonas (extensión moderada) sometidas a polvos conductores y a humo industrial que produce depósitos conductores particularmente espesos.	31 mm/kV
	Zonas (extensión moderada) muy próximas a la costa y expuestas a pulverización salina o a vientos muy fuertes y contaminantes desde el mar.	
	Zonas desérticas caracterizadas por no tener lluvia durante largos periodos, expuestas a fuertes vientos que transportan arena y sal, y sometidas a condensación regular.	

3.1.9. TIPO DE AISLAMIENTO

El material que se puede utilizar como envoltorio de las pastillas de ZnO y que le sirve de aislamiento externo es fundamental para el correcto funcionamiento del descargador.

El efecto hidrofóbico de la silicona evita que se formen depósitos semiconductores, de modo que la corriente eléctrica no es conducida fácilmente, por esta razón las corrientes de fuga superficiales sobre los aislantes de silicona son extremadamente bajas.

Ventajas de la goma de silicona:

- Vida útil elevada: es un material elástico, sólido y compacto.
- Peso reducido: es mucho más ligera que la porcelana
- Más adecuada para el medio ambiente: no contiene ningún material perjudicial para el medio ambiente, y puede ser reciclado.

Desventajas de la goma de silicona:

- Sólo pueden usarse a temperaturas moderadas, a bajas temperaturas resultan ser frágiles.
- La humectación continua del aislador, las descargas atmosféricas, las descargas parciales y los rayos ultravioletas, son elementos que hacen disminuir las propiedades de hidrofobicidad, e incluso llegan a destruir la superficie hidrofóbica [28].
- Análogo a los aisladores de porcelana, están sujetos a defectos latentes que surgen a causa de su diseño y de los materiales internos usados, pero más a menudo, durante su fabricación [29].

3.1.10. FRECUENCIA ASIGNADA

La frecuencia asignada corresponde a la de la red en la que va a estar instalado el descargador. Las frecuencias normalizadas son 50 y 60 Hz.

3.2. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES DE ÓXIDO METÁLICO

Los criterios de selección de los descargadores que se describen a continuación, hacen referencia a aspectos eléctricos, mecánicos y ambientales, todos ellos importantes para garantizar la correcta operación y seguridad en la protección

contra sobrevoltajes transitorios mediante esquemas de protección con descargadores.

3.2.1. ELECCIÓN DE LA CORRIENTE NOMINAL Y LA CLASE DE DESCARGA DE LÍNEA

La corriente nominal se escoge en función de los rangos de voltaje nominal como se presenta en la Tabla 3.2 [11], también se recomienda los valores de corriente nominal en función del voltaje máximo del sistema U_s como se muestra en la Tabla 3.7 [13].

En la práctica, los valores utilizados de corrientes nominales y clase de descarga de línea son los mostrados en la Tabla 3.8 [2].

TABLA 3.7. Valores característicos de la corriente nominal de descarga (I_n) en función del voltaje máximo del sistema [13]

Voltaje máximo del sistema (kV r.m.s.)	Corriente nominal de descarga I_n
$U_s \leq 72.5$ kV	5 kA
72.5 kV < $U_s \leq 245$ kV	10 kA
245 kV $\leq U_s \leq 420$ kV	10 kA
$U_s \geq 420$ kV	20 kA

TABLA 3.8. Valores habituales de corrientes nominales de descarga (I_n) y clase de descarga de línea [2]

Voltaje nominal del sistema	Voltaje máximo del sistema	Corriente nominal de descarga					
		5 kA	10 kA			20 kA	
			Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
$U_r \leq 66$ kV	$U_s \leq 72.5$ kV						
66 kV < $U_r \leq 220$ kV	72.5 kV < $U_s \leq 245$ kV						
220 kV $\leq U_r \leq 380$ kV	245 kV $\leq U_s \leq 420$ kV						
$U_r > 380$ kV	$U_s \geq 420$ kV						

3.2.2. CRITERIO DE ELECCIÓN DEL VOLTAJE DE OPERACIÓN CONTINUA (U_c)

Para que el descargador pueda soportar un voltaje máximo cuando está trabajando en la zona de pre-descarga, su voltaje de operación continua debe ser mayor que el valor del voltaje máximo del sistema (U_s).

Si está conectado el descargador entre fase y tierra, su voltaje de operación continua debe ser tan elevada como el voltaje fase tierra del sistema:

$$U_c \geq \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (3.4)$$

3.2.3. CRITERIO DE ELECCIÓN DE LOS SOBREVOLTAJES TEMPORALES (TOV_c)

Los sobrevoltajes temporales, a diferencia de los sobrevoltajes instantáneos, son sobrevoltajes de frecuencia industrial oscilantes de duración relativamente larga (entre algunos ciclos y varias horas) [13, 16].

En algunos sistemas las siguientes causas de sobrevoltajes temporales necesitan ser considerados.

- Efectos de resonancia
- Efecto Ferranti
- Armónicos
- Retroalimentación a través de la interconexión de las bobinas del transformador.

Los sobrevoltajes temporales debido a ferro-resonancia no debe servir de base para la selección de descargadores y debe ser eliminado, a pesar de que los sobrevoltajes temporales debido a estos fenómenos pueden alcanzar valores muy altos en un sistema eléctrico de potencia se los debe prevenir y limitar.

Es necesario considerar la secuencia de eventos de sobrevoltajes temporales, por ejemplo, el rechazo de carga causada por una falla a tierra, cuando ambos sobrevoltajes tienen gravedad similar. En tales casos, sin embargo, la cantidad de

carga rechazada depende de la localización de la falla y de la ubicación del descargador de sobrevoltajes.

La combinación de eventos, tales como fallas a tierra y el rechazo de carga pueden dar como resultado valores más altos de sobrevoltajes temporales que de los eventos individuales. Cuando tales combinaciones se consideran suficientemente probables, los sobrevoltajes para cada evento tienen que ser compuestos teniendo en cuenta la configuración real del sistema.

El voltaje de frecuencia industrial versus la característica de tiempo del descargador debe exceder la amplitud del sobrevoltaje temporal frente a la duración del sistema.

Como una aproximación, amplitud y duración de sobrevoltajes temporales, cuya duración está entre 0,1 s y 100 s, se puede convertir en una amplitud equivalente, U_{eq} , con una duración de 10 s

$$U_{eq} = \frac{kU_s}{\sqrt{3}} \left(\frac{T_t}{10} \right)^m \quad (3.5)$$

U_s = voltaje máximo del sistema

k = es el factor de falla a tierra

T_t = duración del sobrevoltaje temporal en segundos

U_{eq} = amplitud del sobrevoltaje temporal equivalente para 10 segundos

m = exponente que describe la característica del voltaje a frecuencia industrial versus el tiempo del descargador.

Para descargadores de diferentes diseños el exponente m varía entre 0,022 y 0,018; se puede utilizar un valor promedio de 0,02.

3.2.4. ELECCIÓN DE LA LÍNEA DE FUGA

La línea de fuga mínima debe ser al menos la exigida según el nivel de contaminación de la zona donde se instale según la Tabla 3.6, y según la Ecuación 3.3. Si los requisitos de fuga son superiores a 31 mm/kV, en ambientes con alto grado de contaminación, se debe consultar con los fabricantes para un

diseño especial que cumpla con el revestimiento necesario para la fuga deseada [2, 16].

3.2.5. OTRAS CONSIDERACIONES

Existen otros factores que no son de carácter técnico sino comercial y que deben ser tomados en cuenta al momento de seleccionar un descargador, algunos de ellos son: calidad respaldada por la marca del fabricante, soporte técnico, disponibilidad de información.

3.3. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LAS NORMAS APLICABLES

Según la norma IEC, 60099-4 y 60099-5, las condiciones principales para ser seleccionados los descargadores de sobrevoltajes son:

- Voltaje de funcionamiento continuo
- Voltaje nominal
- Corriente nominal
- Clase de descarga de línea
- Clase de alivio de presión

El U_c se selecciona de la misma forma que la norma ANSI, como indica la Tabla 3.9. El Voltaje nominal, que es la capacidad de TOV_c a los 10 segundos, se selecciona en comparación con el TOV del sistema requerido. La clase de descarga de la línea se selecciona mediante la comparación de la capacidad de energía del pararrayos con la descarga de energía requerida.

La corriente nominal de descarga de un descargador se selecciona mediante el cálculo o estimación de la corriente de descarga debido a descargas atmosféricas que circula por el descargador. La clase de alivio de presión se selecciona en comparación con la corriente de falla del sistema.

Así, la selección de los descargadores es prácticamente idéntica a la de la ANSI [9].

TABLA 3.9. Valores normalizados del máximo voltaje de operación continua de los descargadores según ANSI C62.11-1999 [16]

Voltaje nominal (kV rms)	Máximo voltaje de operación continua (kV rms)
3	2,55
6	5,1
9	7,65
10	8,4
12	10,2
15	12,7
18	15,3
21	17
24	19,5
27	22
30	24,4
36	29
39	31,5
45	36,5
48	39
54	42
60	48
72	57
90	70
96	76
108	84
120	98
132	106

Voltaje nominal (kV rms)	Máximo voltaje de operación continua (kV rms)
144	115
168	131
172	140
180	144
192	152
228	180
240	190
258	209
264	212
276	220
288	230
294	235
312	245
396	318
420	335
444	353
468	372
492	392
540	428
564	448
576	462
588	470
612	485

CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DE DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES EN EL PROGRAMA ATP Y CASOS DE ESTUDIO

4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES

4.1.1. MODELO PROPUESTO POR LA IEEE

El grupo de investigación en la modelación de descargadores de la IEEE Working Group 3.4.11 [18] presenta un modelo dependiente de la frecuencia. Para este modelo, la característica no lineal $V-I$ está representada por medio de dos secciones de resistencias no lineales designadas $A0$ y $A1$ como se puede apreciar en la Figura 4.1. Las dos secciones son separadas por un filtro pasa bajos $R1-L1$. Para sobrevoltajes de frente lento, este filtro $R1-L1$ posee una impedancia muy pequeña y las dos secciones de resistencias no lineales están en paralelo. Para sobrevoltajes de frente rápido, la impedancia del filtro $R1-L1$ llega a ser más significativa, por lo cual a través de $A0$ circula más corriente que a través de $A1$. Además la característica de $V-I$ propia de $A0$ presenta un voltaje más alto a una corriente I que la característica de $V-I$ de $A1$, como se muestra en la Figura 4.2. $L0$ representa la inductancia asociada con los campos magnéticos en las cercanías del descargador de sobrevoltajes. La resistencia $R0$ se utiliza para estabilizar la integración numérica, su valor es menor a $1k\Omega$. C representa la capacitancia de terminal a terminal del descargador [27].

El objetivo de este modelo es estudiar el comportamiento de un descargador ante sobrevoltajes de maniobra y debido a descargas atmosféricas, en cada uno de los cuales se tiene una frecuencia diferente. Para sobrevoltajes temporales el comportamiento del descargador es analizado a partir de pruebas realizadas a bajas frecuencias, con ondas semi-sinusoidales de 1 ms de frente.

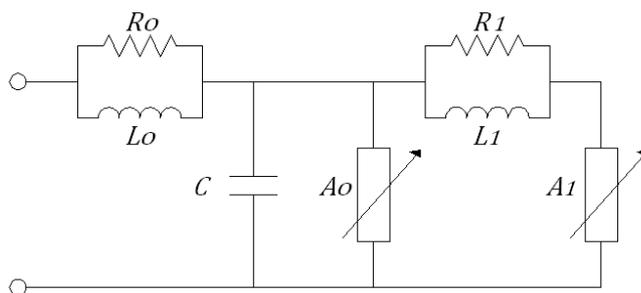


FIGURA 4.1. Modelo dependiente de la frecuencia propuesto por la IEEE [18]

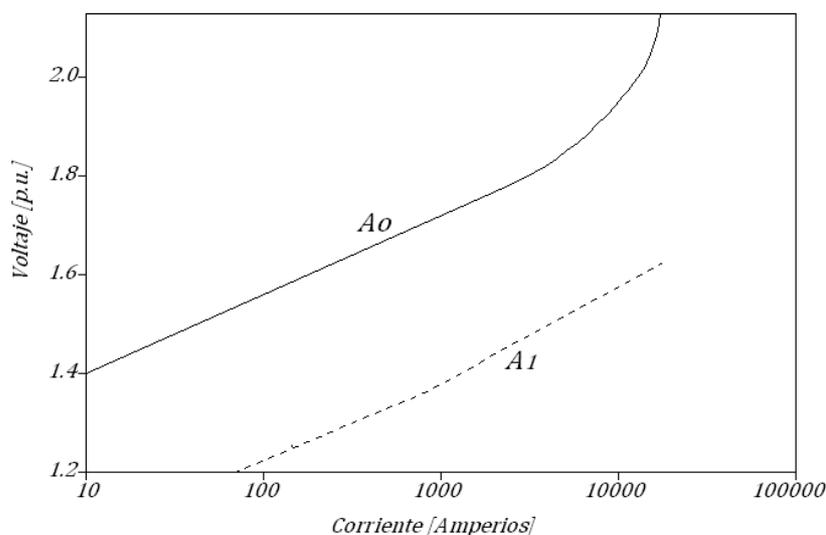


FIGURA 4.2. Característica de V-I en p.u. para las dos secciones de resistencias no lineales \$A_0\$ y \$A_1\$ [18]

4.1.1.1. Información requerida para simular al descargador

d = longitud del descargador en metros

n = número de columnas de varistores

V_{10} = voltaje residual en kV para 10 kA, cuando se le aplica un impulso de corriente de 8/20 μ s

V_{ss} = voltaje de descarga tipo maniobra para una onda de corriente tipo maniobra asociada

4.1.1.2. Determinación de parámetros iniciales del circuito equivalente

$$L_1 = 15 \frac{d}{n} [\mu H] \quad (4.1)$$

$$R_1 = 65 \frac{d}{n} [\Omega] \quad (4.2)$$

$$L_0 = 0.2 \frac{d}{n} [\mu H] \quad (4.3)$$

$$R_0 = 100 \frac{d}{n} [\Omega] \quad (4.4)$$

$$C = 100 \frac{n}{d} [pF] \quad (4.5)$$

4.1.1.3. Resistencias no lineales A0 y A1

Para encontrar cada uno de los puntos de las características $V-I$ de las resistencias no lineales $A0$ y $A1$ se emplean las siguientes ecuaciones:

$$A0 = \left[I * R \text{ relativo en p.u. para } A0(i) * V_{10}^{1/1.6} \right] \quad (4.6)$$

$$A1 = \left[I * R \text{ relativo en p.u. para } A1(i) * V_{10}^{1/1.6} \right] \quad (4.7)$$

En donde los $I * R$ relativos en p.u. para $A0$ y $A1$ pueden ser estimados de las curvas por unidad de la Figura 4.2.

De esta manera se calcula el voltaje del descargador para cada punto de corriente de la resistencia no lineal buscada.

4.1.1.4. Ajuste de las resistencias no lineales A0 y A1 para que coincidan los sobrevoltajes de maniobra del descargador

Las resistencias no lineales, $A0$ y $A1$, se usan para ajustar el modelo para un correcto valor pico de la onda de voltaje de maniobra. En la mayoría de los casos no es necesario realizar este ajuste, debido a que los valores iniciales tienen una buena aproximación con respecto a las medidas obtenidas por los fabricantes para una onda de corriente tipo maniobra.

4.1.1.5. Ajuste de la inductancia L1 para que coincidan los voltajes máximos de descarga V10

El modelo con las correctas resistencias no lineales, $A0$ y $A1$, ahora se prueba para obtener un buen ajuste entre los datos del fabricante y el modelo de

descarga de voltaje para una forma de onda de corriente de 8/20 μ s. Este ajuste se lo hace modificando el parámetro LI a partir de su valor inicial por tanteo y error (generalmente multiplicando o dividiendo por dos la magnitud de la inductancia, según sea el caso), hasta encontrar el valor pico en la forma de onda del voltaje del descargador, el cual debe tener una magnitud igual o cercana al valor encontrado por el fabricante y consignado en los catálogos [25].

4.1.2. MODELO SIMPLIFICADO PROPUESTO POR PINCETI Y GIANNETTONI

Una versión simplificada del modelo de la IEEE fue propuesto por PINCETI P. y GIANNETTONI M [19], en dónde la capacitancia C en el modelo que se muestra en la Figura 4.2 se puede eliminar, ya que su efecto es insignificante, y las dos resistencias en paralelo con la inductancia puede ser sustituida por una sola resistencia R , de alrededor de 1 $M\Omega$, colocada entre los terminales del modelo para evitar problemas numéricos, el modelo simplificado se muestra en la Figura 4.3.

Se debe poner atención en que este modelo no tiene en cuenta ninguna característica física de los descargadores y su principio de funcionamiento es similar al del modelo IEEE:

- La definición de las características de las resistencias *no lineales* $A0$ y $A1$ es la misma que para el modelo de IEEE.
- Las dos inductancias se calculan por medio de las siguientes ecuaciones:

$$L_0 = 0,01V_n [\mu H] \quad (4.8)$$

$$L_1 = 0,03V_n [\mu H] \quad (4.9)$$

donde:

V_n = voltaje nominal del pararrayos (kV)

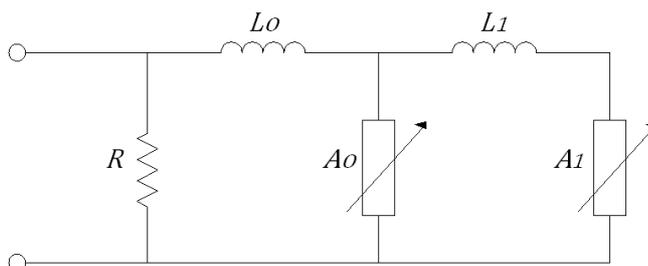


FIGURA 4.3. Modelo simplificado de un descargador de Óxido Metálico propuesto por Pinceti y Giannettoni [19]

4.1.3. RESISTENCIA NO LINEAL “MOV TYPE 92”

Este modelo, consiste en una resistencia no lineal que representa la característica dinámica o dependiente de la frecuencia, explicada anteriormente.

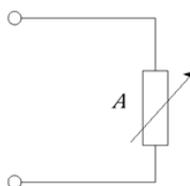


FIGURA 4.4. Modelo basado en una resistencia no lineal

Este modelo incluye una verdadera representación no lineal de un número arbitrario de descargador de ZnO.

La ecuación de restricción de base para el modelado del descargador de ZnO es resistiva, y es altamente no lineal

$$i = p * \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)^q [A] \quad (4.10)$$

donde:

i = corriente del descargador

V = voltaje del descargador

$p, V_{ref}, y q$ = constantes del equipo

Normalmente, se selecciona el voltaje de referencia V_{ref} como el doble del voltaje nominal, o algo parecido a este. En teoría, la elección es arbitraria. Los valores típicos de q son de 20 a 30.

4.2. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DE DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES EN EL PROGRAMA ATP

El Ecuador cuenta con sistemas eléctricos de potencia de 230 kV y posteriormente 500 kV, los cuales deben operar bajo altos índices de calidad y confiabilidad, para esto es necesario garantizar la adecuada protección ante sobrevoltajes.

Con la finalidad de tener resultados más acertados, en el programa ATP al realizar los estudios de sobrevoltajes en sistemas de potencia, se implementan modelos detallados, confiables y precisos de descargadores de sobrevoltajes aplicados a sistemas de 230 y 500 kV.

4.2.1. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DE DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES PARA SISTEMAS DE 230 kV

4.2.1.1. Selección del descargador de sobrevoltajes para sistemas de 230 kV

- **Voltaje continuo de operación**

El máximo voltaje de red para 230 kV, según IEC, es igual a 245 kV y debido a que el descargador se instala entre fase y tierra se obtiene por lo tanto:

$$U_c = \frac{245}{\sqrt{3}} = 141,45 \text{ kV}$$

- **Capacidad para soportar sobretensiones temporales**

Tomando en cuenta que hay una baja impedancia a tierra del sistema con un factor k igual a 1,4 y la duración del TOV de 1 s, usando como el máximo voltaje el de la norma IEC, Ecuación 3.5, se obtienen los siguientes resultados:

$$TOV_{10} = 1,4 \frac{245}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{10} \right)^{0.02} = 189,1 \text{ kV}$$

- **Elección de la corriente nominal I_n y de la clase de descarga de línea.**

De acuerdo a la norma IEC 60099-4 [11] para rangos de voltaje nominal del descargador entre 144 y 756 kV se tienen corrientes nominales de 10 y 20 kA, y clase de descarga de línea 3 o 4. Con el objetivo de que el descargador soporte impulsos de corriente más severos se escogen los siguientes valores:

- Corriente nominal de descarga del descargador: $I_n = 20 \text{ kA}$
- Clase de descarga de línea: *Clase 4*

- **Elección de la línea de fuga**

La línea de fuga específica nominal mínima en función del nivel de contaminación es de 25 mm/kV según la Tabla 3.6, y para un U_s igual a 245 kV, el descargador debe cumplir:

$$\text{Línea de fuga del descargador} \geq 6125 \text{ mm}$$

La Tabla 4.1 presenta las especificaciones de los descargadores de sobrevoltajes, para voltajes máximos de red de 245 kV.

TABLA 4.1. Especificaciones de los descargadores de sobrevoltajes para voltajes máximos de red de 245 kV, proporcionados por el fabricante ABB [5]

	Criterio	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Corriente nominal	20 kA	20 kA	20 kA	20 kA
Clase de descarga	4	4	4	4
Voltaje nominal		180 kV	192 kV	228 kV
Voltaje continuo de operación	$\geq 141,45 \text{ kV}$	144 kV	154 kV	156 kV
TOV (10 s)	$\geq 189,1 \text{ kV}$	198 kV	211 kV	250 kV
Línea de Fuga	$\geq 6125 \text{ mm}$	7595 mm	7595 mm	7595 mm

El descargador de la opción 1, voltaje nominal de 180 kV, es el que menores sobrevoltajes temporales soporta (a pesar de que cumple con todos los criterios mínimos); el descargador de la opción 2, voltaje nominal de 192 kV, cumple con todos los criterios mínimos y tiene mayor capacidad para soportar los sobrevoltajes temporales. En este caso se escoge el descargador de la opción 2

TABLA 4.2. Especificaciones del descargador de sobrevoltajes con revestimiento de silicona HS PEXLIM P-T [5]

Voltaje máximo de la red U_s [kV]	Voltaje nominal U_r [kV]	Máximo voltaje de operación continua MCOV [kV]		Capacidad de sobrevoltajes temporales TOV [kV]		Voltaje residual máximo con onda de corriente V10 y Vss [kV]		Longitud total d [m]
		IEC	ANSI	1 s	10 s	30/60 μ s	8/20 μ s	
245	192	154	154	222	211	398	437	2,31

4.2.1.2. Modelación del descargador de sobrevoltajes para sistemas de 230 kV

El procedimiento para calcular los parámetros de los modelos será aplicado a una columna de discos del descargador, con una altura total de 2,31 m, siendo V10 igual a 437 kV, y Vss igual a 398 kV para una corriente de 3 kA, con forma de onda 30/60 μ s.

4.2.1.2.1. Modelación del descargador de sobrevoltajes según la IEEE

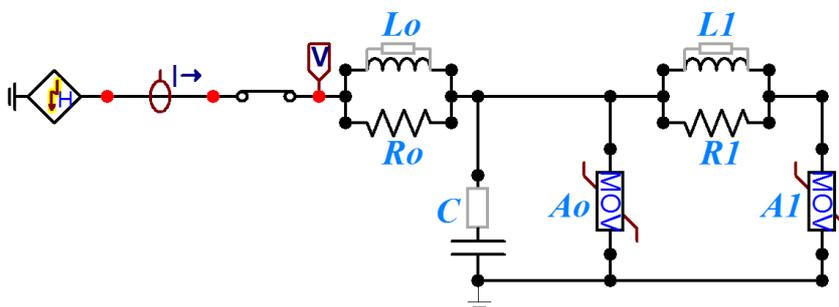


FIGURA 4.5. Modelo dependiente de la frecuencia, implementado en el programa ATP, para sistemas de 230 kV

- **Parámetros iniciales**

Usando las Ecuaciones 4.1 a 4.5 se tiene:

$$L_1 = 15 \frac{2,31}{1} = 0,03465 [mH]$$

$$R_1 = 65 \frac{2,31}{1} = 150,15 [\Omega]$$

$$L_0 = 0,2 \frac{2,31}{1} = 0,000462 [mH]$$

$$R_0 = 100 \frac{2,31}{1} = 231 [\Omega]$$

$$C = 100 \frac{1}{2,31} = 43,29 [pF]$$

- **Resistencias no lineales A0 y A1**

Para encontrar cada uno de los puntos de las características V-I de las resistencias no lineales A0 y A1, se emplean las siguientes ecuaciones:

$$A0 = \left[I * R \text{ relativo en p.u. para } A0(i) * V_{10}^{10/1.6} \right]$$

$$A1 = \left[I * R \text{ relativo en p.u. para } A1(i) * V_{10}^{10/1.6} \right]$$

TABLA 4.3. Característica de V-I de las dos secciones de resistencias no lineales A0 y A1 para sistemas de 230 kV, según Figura 4.2.

Característica V-I para A0			Característica V-I para A1		
I [A]	V [pu]	V para A0 [V]	I [A]	V [pu]	V para A1 [V]
De la curva V-I			De la curva V-I		
10	1,4	382375	100	1,23	335943,75
100	1,54	420612,5	1000	1,36	371450
1000	1,68	458850	2000	1,43	390568,75
2000	1,74	475237,5	4000	1,48	404225
4000	1,8	491625	6000	1,5	409687,5
6000	1,82	497087,5	8000	1,53	417881,25
8000	1,87	510743,75	10000	1,55	423343,75
10000	1,9	518937,5	12000	1,56	426075
12000	1,93	527131,25	14000	1,58	431537,5
14000	1,97	538056,25	16000	1,59	434268,75
16000	2	546250	18000	1,6	437000
18000	2,05	559906,25	20000	1,61	439731,25
20000	2,1	573562,5			

- **Ajuste de la inductancia L1**

TABLA 4.4. Ajuste de la inductancia L1 para que coincidan los voltajes máximos de descarga V10

# Simulación	L1 [μH]	V10 simulado [kV]	Error relativo	Siguiente L1
1	34,65	467,46	6,97	34,65/2
2	17,33	444,47	1,71	17,33/2
3	8,66	429,64	1,68	---
4	13,09	437,00	0,00	---

El modelo se prueba con impulsos de corriente de 3 kA 30/60 μs para sobrevoltajes de maniobra y 10 kA, 8/20 μs para sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas. El resultado es Vss igual a 398,55 kV que comparado con los datos del fabricante se obtiene un error de 0,14%, y V10 igual a 437 kV con una L1 de 13,09 [μH]. Ver Figuras 4.6 y 4.7.

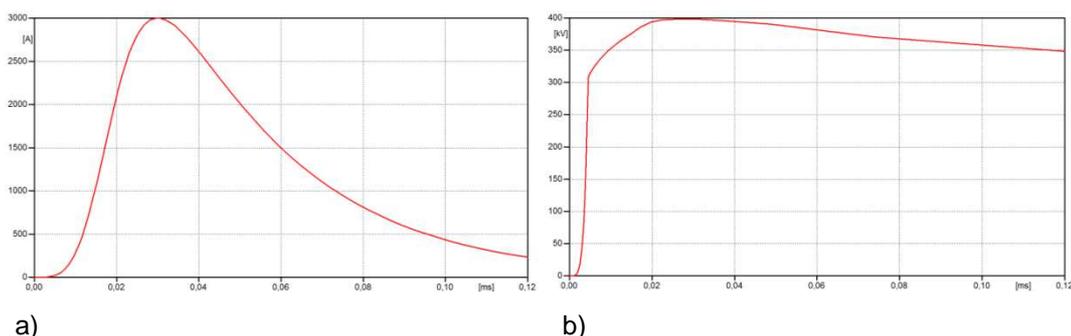


FIGURA 4.6. a) Impulso con corriente de maniobra 30/60 μs ; b) Voltaje Vss del modelo del descargador según la IEEE simulado en kV para sistemas de 230 kV

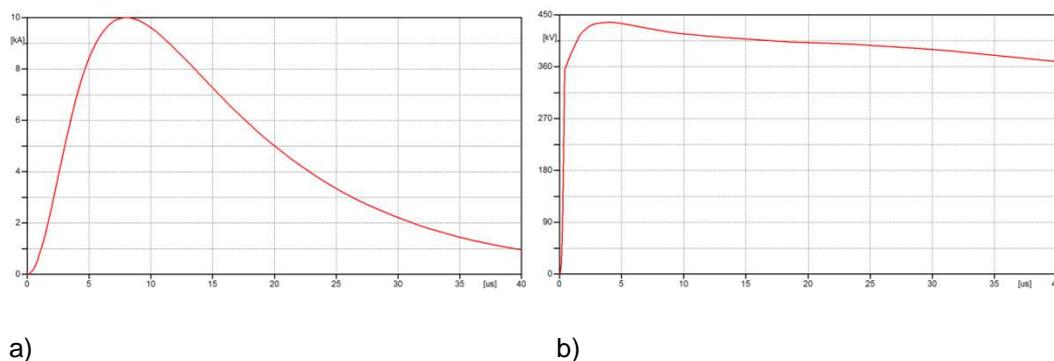


FIGURA 4.7. a) Impulso atmosférico de corriente 8/20 μs ; b) Voltaje V10 del modelo del descargador según la IEEE simulado en kV para sistemas de 230 kV

4.2.1.2.2. Modelación simplificada del descargador de sobrevoltajes propuesto por Pinceti y Giannettoni

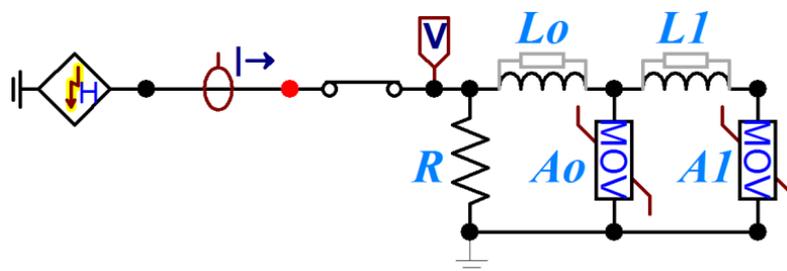


FIGURA 4.8. Modelo simplificado de un descargador de Óxido Metálico, implementado en el programa ATP, para sistemas de 230 kV

- **Parámetros iniciales**

Usando las ecuaciones 4.8 y 4.9 se tiene:

$$L_0 = 0.01 * 192 = 1,92 [\mu H]$$

$$L_1 = 0.03 * 192 = 5.76 [\mu H]$$

$$R = 1000000 [\Omega]$$

- **Resistencias no lineales A0 y A1**

Para encontrar cada uno de los puntos de las características V-I de las resistencias no lineales A0 y A1, se emplean las siguientes ecuaciones:

$$A0 = \left[I * R \text{ relativo en p.u. para } A0(i) * V_{10}^{1/1.6} \right]$$

$$A1 = \left[I * R \text{ relativo en p.u. para } A1(i) * V_{10}^{1/1.6} \right]$$

El modelo simplificado propuesto por Pinceti y Giannettoni se prueba con impulsos de corriente de 3 kA 30/60 μ s para sobrevoltajes de maniobra y 10 kA 8/20 μ s para sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas. El resultado es Vss alcanza el valor de 398,38 kV que comparado con los datos del fabricante se

obtiene un error de 0,1%, y V10 igual a 427,37 kV con un error de 2,2 %. Ver Figuras 4.9 y 4.10.

TABLA 4.5. Característica de V-I de las dos secciones de resistencias no lineales A0 y A1 para sistemas de 230 kV, según Figura 4.2.

Característica V-I para A0			Característica V-I para A1		
I [A]	V [pu]	V para A0 [V]	I [A]	V [pu]	V para A1 [V]
De la curva V-I			De la curva V-I		
10	1,4	382375	100	1,23	335943,75
100	1,54	420612,5	1000	1,36	371450
1000	1,68	458850	2000	1,43	390568,75
2000	1,74	475237,5	4000	1,48	404225
4000	1,8	491625	6000	1,5	409687,5
6000	1,82	497087,5	8000	1,53	417881,25
8000	1,87	510743,75	10000	1,55	423343,75
10000	1,9	518937,5	12000	1,56	426075
12000	1,93	527131,25	14000	1,58	431537,5
14000	1,97	538056,25	16000	1,59	434268,75
16000	2	546250	18000	1,6	437000
18000	2,05	559906,25	20000	1,61	439731,25
20000	2,1	573562,5			

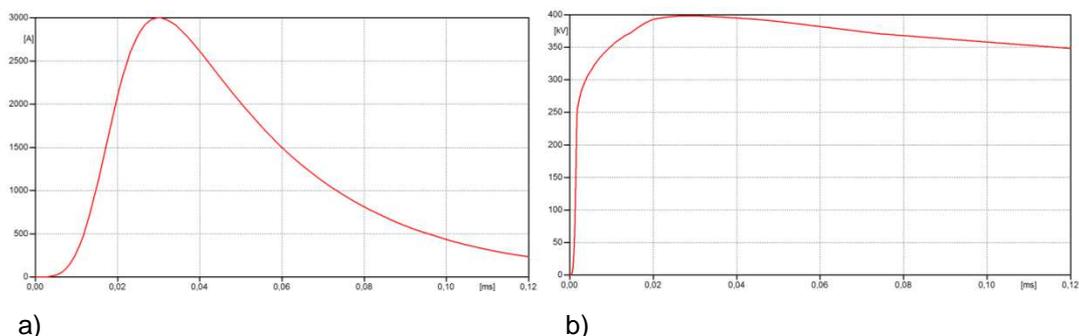


FIGURA 4.9. a) Impulso con corriente de maniobra 30/60 μ s; b) Voltaje Vss del modelo del descargador propuesto por Pinceti y Giannettoni simulado en kV para sistemas de 230 kV

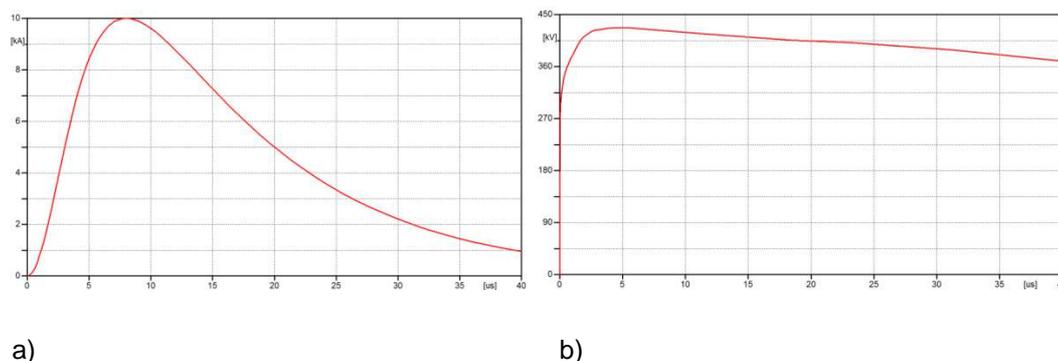


FIGURA 4.10. a) Impulso atmosférico de corriente 8/20 μ s; b) Voltaje V10 del modelo del descargador propuesto por Pinceti y Giannettoni simulado en kV para sistemas de 230 kV

4.2.1.2.3. Modelación de la resistencia no lineal “MOV Type 92”

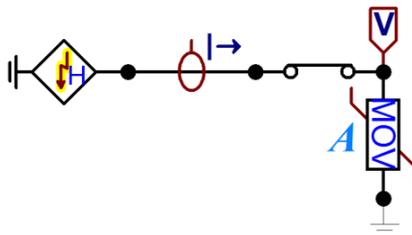


FIGURA 4.11. Modelo basado en una resistencia no lineal, implementado en el programa ATP, para sistemas de 230 kV

- **Resistencia no lineal A**

De acuerdo a la Ecuación 4.11 se encuentra cada uno de los puntos de la característica V-I de la resistencia no lineal para sistemas de 230 kV.

TABLA 4.6. Característica de V-I de la resistencia no lineal A para sistemas de 230 kV

Característica V-I	
I [A]	V [V]
10	299304,73
100	335825,43
1000	376802,33
2000	390090,24
3000	398079,35
4000	403846,74
6000	412117,58
8000	418088,36
10000	422779,17
12000	426650,88
14000	429952,01
16000	432832,22
18000	435388,75
20000	437688,44

El modelo se prueba con impulsos de corriente de 3 kA 30/60 μ s para sobrevoltajes de maniobra y 10 kA, 8/20 μ s para sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas. El resultado es Vss igual a 398,08 kV que comparado con los datos del fabricante se obtiene un error de 0,02%, y V10 igual a 422,78 kV con un error de 3,25 %. Ver Figuras 4.12 y 4.13.

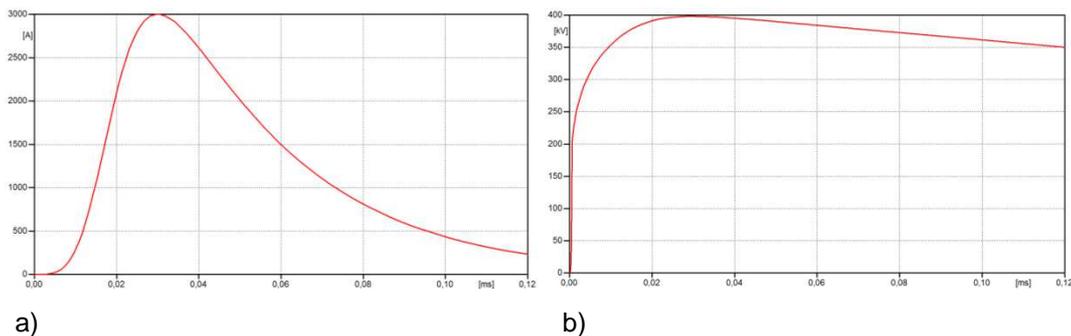


FIGURA 4.12. a) Impulso con corriente de maniobra 30/60 μ s; b) Voltaje Vss del modelo de la resistencia no lineal MOV Type 92 simulado en kV para sistemas de 230 kV

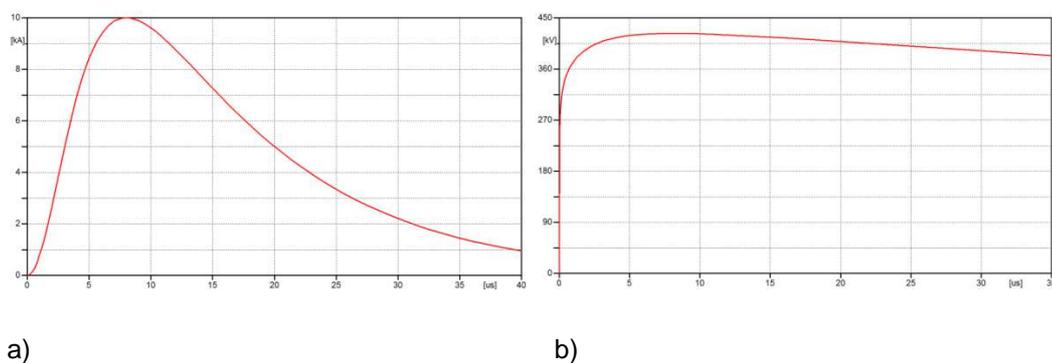


FIGURA 4.13. a) Impulso atmosférico de corriente 8/20 μ s; b) Voltaje V10 modelo de la resistencia no lineal MOV Type 92 simulado en kV para sistemas de 230 kV

4.2.1.3. Resultados de las simulaciones de los descargadores sobrevoltajes para sistemas de 230 kV

Una vez modelados los descargadores de sobrevoltajes se prueba con impulsos de corriente de 1, 2 y 3 kA y onda 30/60 μ s para sobrevoltajes de maniobra y corrientes de 5, 10, y 20 kA y onda 8/20 μ s para sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas. Las simulaciones se realizaron en el programa ATP. La Tabla 4.7 muestra los resultados de los sobrevoltajes residuales simulados en comparación con los datos del fabricante.

Los sobrevoltajes de maniobra simulados dan como resultado el más alto porcentaje de error de 0,96% (modelo IEEE), 0,97% (modelo Pinceti y Giannettoni) y 0,54% (R no lineal MOV).

Los sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas simulados dan como resultado el más alto porcentaje de error de 0,98% (modelo IEEE), 4,73% (modelo Pinceti y Giannettoni) y 8,62% (R no lineal MOV).

TABLA 4.7. Resultados de los voltajes residuales del descargador para el sistema de 230 kV

Datos del fabricante			Simulaciones			Error relativo		
			Modelo IEEE	Modelo Pinceti y Giannettoni	R No lineal	Modelo IEEE	Modelo Pinceti y Giannettoni	R no lineal MOV
30/60 μs	1 kA	375	371,40	371,37	376,80	0,96	0,97	0,48
	2 kA	388	390,41	390,35	390,09	0,62	0,61	0,54
	3 kA	398	398,55	398,38	398,08	0,14	0,10	0,02
8/20 μs	5 kA	415	413,60	409,39	408,38	0,34	1,35	1,60
	10 kA	437	437,00	427,37	422,78	0,00	2,20	3,25
	20 kA	479	474,32	456,34	437,69	0,98	4,73	8,62

Se calculan los errores de los voltajes residuales para determinar la precisión de las simulaciones de los modelos. Los errores se representan por:

$$error = \left| \frac{V_{rese} - V_{rest}}{V_{res}} \right| [A] \quad (4.11)$$

donde:

V_{rese} = voltaje residual experimental del descargador (datos del fabricante)

V_{rest} = voltaje residual teórico del descargador (datos de las simulaciones)

4.2.2. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DE DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES PARA SISTEMAS DE 500 kV

4.2.2.1. Selección del descargador de sobrevoltajes para sistemas de 500 kV

- **Voltaje continuo de operación**

El máximo voltaje de red para 500 kV según IEC es igual a 550 kV y debido a que el descargador se instala entre fase y tierra se obtiene por lo tanto:

$$U_c = \frac{550}{\sqrt{3}} = 317,54 \text{ kV}$$

- **Capacidad para soportar sobretensiones temporales**

Tomando en cuenta que hay una baja impedancia a tierra del sistema con un factor k igual a 1,4 y la duración del TOV de 1 s, usando como el máximo voltaje el de la norma IEC, se obtienen los siguientes resultados:

$$TOV_c = 1,4 \frac{550}{\sqrt{3}} = 444,56$$

$$TOV_{10} = 1,4 \frac{550}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{10}\right)^{0.02} = 424,55$$

- **Elección de la corriente nominal I_n y de la clase de descarga de línea.**

Para sistemas de 500 kV pueden utilizarse descargadores de clase de descarga de línea 4 o 5. En este caso se escogen los siguientes valores:

- Corriente nominal de descarga del descargador: $I_n = 20 \text{ kA}$
- Clase de descarga de línea: *Clase 4*

- **Elección de la línea de fuga**

Para un nivel de contaminación fuerte, la línea de fuga específica nominal mínima es de 25 mm/kV según la Tabla 3.6, y para un U_s igual a 550 kV, el descargador debe cumplir:

$$\text{Línea de fuga del descargador} \geq 13750 \text{ mm}$$

La Tabla 4.8, presenta las especificaciones de los descargadores de sobrevoltajes, para voltajes máximos de red de 550 kV.

TABLA 4.8. Especificaciones de los descargadores de sobrevoltajes para voltajes máximos de red de 550 kV, proporcionados por el fabricante ABB [5]

	Criterio	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Corriente nominal	20 kA	20 kA	20 kA	20 kA
Clase de descarga	4	4	4	4
Voltaje nominal		396 kV	420 kV	444 kV
Voltaje continuo de operación	$\geq 317,54 \text{ kV}$	317 kV	336 kV	349 kV
TOV (10 s)	$\geq 424,55 \text{ kV}$	435 kV	462 kV	488 kV
Línea de Fuga	$\geq 13750 \text{ mm}$	17050 mm	17050 mm	17050 mm

El descargador de la opción 1, voltaje nominal de 396 kV, no cumple con los criterios mínimos de selección, por lo que queda descartado.

Los descargadores de las opción 2 y 3, voltajes nominales de 420 kV y 444 kV, cumplen con los criterios mínimos de selección, en este caso se escoge el descargador de 420 kV que cuenta con una gran capacidad para soportar los sobrevoltajes temporales, que es de mucha importancia en sistemas de extra alto voltaje [20].

TABLA 4.9. Especificaciones del descargador de sobrevoltajes con revestimiento de silicona HS PEXLIM P-T seleccionado [5]

Voltaje máximo de la red U_s [kV]	Voltaje nominal U_r [kV]	Máximo voltaje de operación continua MCOV [kV]		Capacidad de sobretensiones temporales TOV [kV]		Voltaje residual máximo con onda de corriente V10 y V_{ss} [kV]		Longitud total d [m]
		IEC	ANSI	1 s	10 s	30/60 μ s	8/20 μ s	
						3 kA	10 kA	
550	420	336	336	487	462	870	956	4,89

4.2.2.2. Modelación del descargador de sobrevoltajes para sistemas de 500 kV

El procedimiento para calcular los parámetros de los modelos será aplicado a una columna de discos del descargador, con una altura total de 4,89 m, siendo V10 igual a 956 kV, y V_{ss} igual a 870 kV para una corriente de 3 kA, con forma de onda 30/60 μ s.

4.2.2.2.1. Modelación del descargador de sobrevoltajes según la IEEE

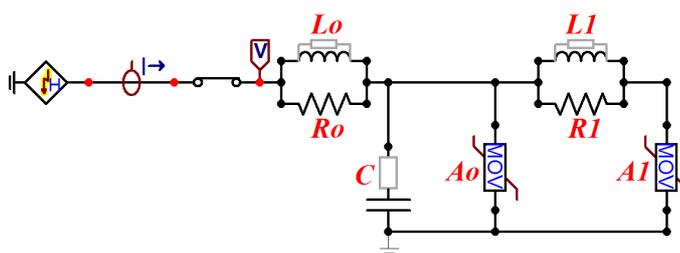


FIGURA 4.14. Modelo dependiente de la frecuencia, implementado en el programa ATP, para sistemas de 500 kV

- **Parámetros iniciales**

Usando las ecuaciones 4.1 a 4.5 se tiene:

$$L_1 = 15 \frac{4,89}{1} = 0,07335 \text{ [mH]}$$

$$R_1 = 65 \frac{4,89}{1} = 317,85 [\Omega]$$

$$L_0 = 0,2 \frac{4,89}{1} = 0,000978 [mH]$$

$$R_0 = 100 \frac{4,89}{1} = 489 [\Omega]$$

$$C = 100 \frac{1}{4,89} = 20,45 [pF]$$

- **Resistencias no lineales A0 y A1**

Para encontrar cada uno de los puntos de las características V-I de las resistencias no lineales A0 y A1, se emplean las siguientes ecuaciones:

$$A0 = \left[I * R \text{ relativo en p.u. para } A0(i) * V_{10}/1.6 \right]$$

$$A1 = \left[I * R \text{ relativo en p.u. para } A1(i) * V_{10}/1.6 \right]$$

TABLA 4.10. Característica de V-I de las dos secciones de resistencias no lineales A0 y A1 para sistemas de 500 kV, según Figura 4.2.

Característica V-I para A0			Característica V-I para A1		
I [A]	V [pu]	V para A0 [V]	I [A]	V [pu]	V para A1 [V]
De la curva V-I			De la curva V-I		
10	1,4	836500	100	1,23	734925
100	1,54	920150	1000	1,36	812600
1000	1,68	1003800	2000	1,43	854425
2000	1,74	1039650	4000	1,48	884300
4000	1,8	1075500	6000	1,5	896250
6000	1,82	1087450	8000	1,53	914175
8000	1,87	1117325	10000	1,55	926125
10000	1,9	1135250	12000	1,56	932100
12000	1,93	1153175	14000	1,58	944050
14000	1,97	1177075	16000	1,59	950025
16000	2	1195000	18000	1,6	956000
18000	2,05	1224875	20000	1,61	961975
20000	2,1	1254750			

- **Ajuste de la inductancia L1**

TABLA 4.11. Ajuste de la inductancia L1 para que coincidan los voltajes máximos de descarga V10

# Simulación	L1 [μ H]	V10 simulado [kV]	Error relativo	Siguiente L1
1	73,35	1020,00	6,69	73,35/2
2	36,68	970,18	1,48	36,68/2
3	18,34	938,95	1,78	---
4	28,65	956,01	0,00	---

El modelo se prueba con impulsos de corriente de 3 kA 30/60 μ s para sobrevoltajes de maniobra y 10 kA, 8/20 μ s para sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas. El resultado es Vss igual a 871,90 kV que comparado con los datos del fabricante se obtiene un error de 0,22%, y V10 igual a 956,01 kV con una L1 de 28,65 μ H. Ver Figuras 4.15 y 4.16.

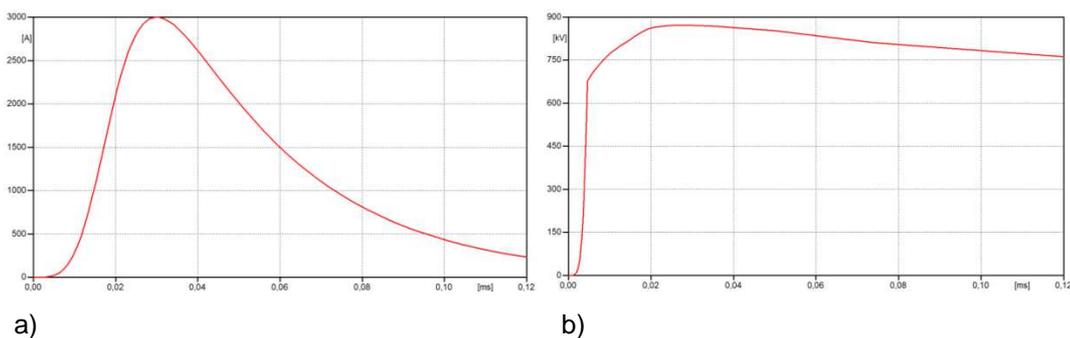


FIGURA 4.15. a) Impulso con corriente de maniobra 30/60 μ s; b) Voltaje Vss del modelo del descargador según la IEEE simulado en kV para sistemas de 500 kV

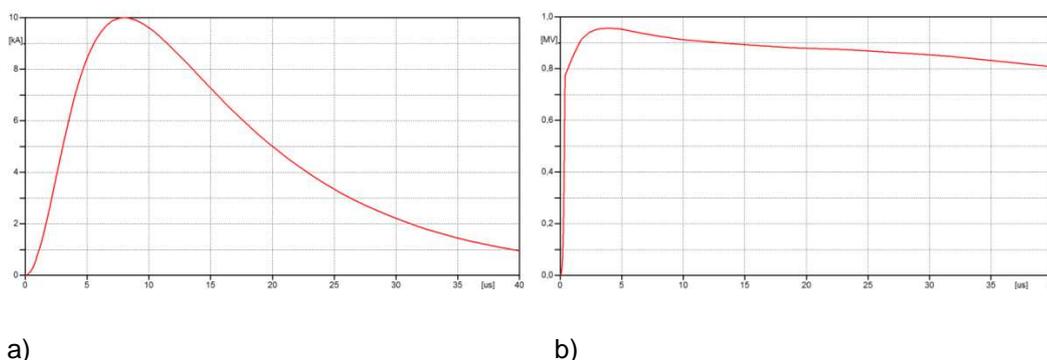


FIGURA 4.16. a) Impulso atmosférico de corriente 8/20 μ s; b) Voltaje V10 del modelo del descargador según la IEEE simulado en kV para sistemas de 500 kV

4.2.2.2. Modelación simplificada del descargador de sobrevoltajes propuesto por Pinceti y Giannettoni

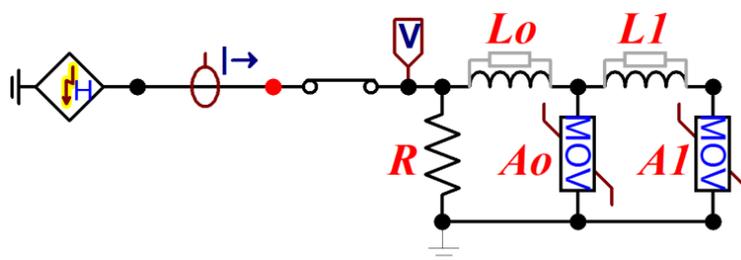


FIGURA 4.17. Modelo simplificado de un descargador de Óxido Metálico, implementado en el programa ATP, para sistemas de 500 kV

- **Parámetros iniciales**

Usando las ecuaciones 4.8 y 4.9 se tiene:

$$L_0 = 0,01 * 420 = 4,2 [\mu H]$$

$$L_1 = 0,03 * 420 = 12,6 [\mu H]$$

$$R = 1000000 [\Omega]$$

- **Resistencias no lineales A0 y A1**

Para encontrar cada uno de los puntos de las características V-I de las resistencias no lineales A0 y A1, se emplean las siguientes ecuaciones:

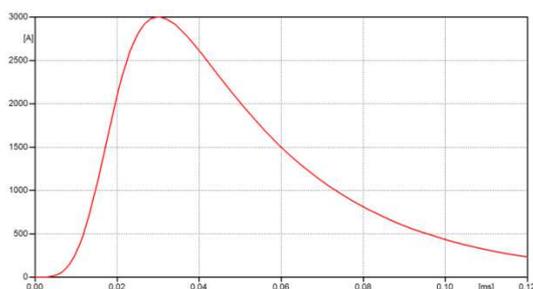
$$A0 = \left[I * R \text{ relativo en p.u. para } A0(i) * V_{10}^{1/1.6} \right]$$

$$A1 = \left[I * R \text{ relativo en p.u. para } A1(i) * V_{10}^{1/1.6} \right]$$

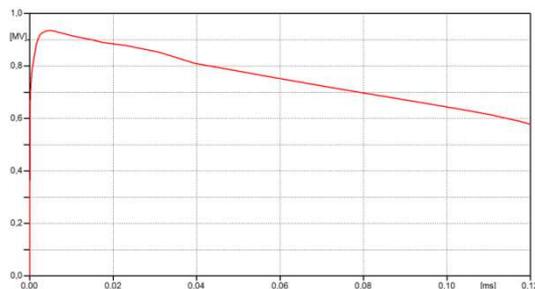
El modelo simplificado propuesto por Pinceti y Giannettoni se prueba con impulsos de corriente de 3 kA 30/60 μ s para sobrevoltajes de maniobra y 10 kA 8/20 μ s para sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas. El resultado es Vss igual a 871,51 kV que comparado con los datos del fabricante se obtiene un error de 0,17%, y V10 igual a 934,92 kV con un error de 2,21%. Ver Figuras 4.18 y 4.19

TABLA 4.12. Característica de V-I de las dos secciones de resistencias no lineales A0 y A1 para sistemas de 500 kV, según Figura 4.2.

Característica V-I para A0			Característica V-I para A1		
I [A]	V [pu]	V para A0 [V]	I [A]	V [pu]	V para A1 [V]
De la curva V-I			De la curva V-I		
10	1,4	836500	100	1,23	734925
100	1,54	920150	1000	1,36	812600
1000	1,68	1003800	2000	1,43	854425
2000	1,74	1039650	4000	1,48	884300
4000	1,8	1075500	6000	1,5	896250
6000	1,82	1087450	8000	1,53	914175
8000	1,87	1117325	10000	1,55	926125
10000	1,9	1135250	12000	1,56	932100
12000	1,93	1153175	14000	1,58	944050
14000	1,97	1177075	16000	1,59	950025
16000	2	1195000	18000	1,6	956000
18000	2,05	1224875	20000	1,61	961975
20000	2,1	1254750			

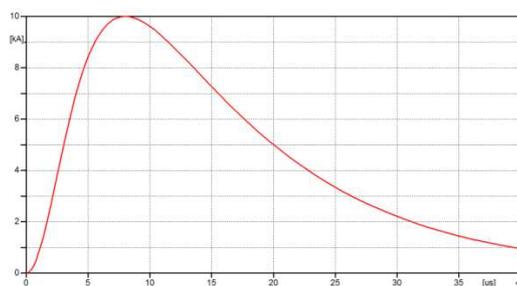


a)

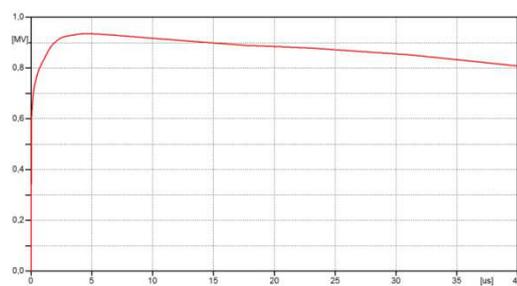


b)

FIGURA 4.18. a) Impulso con corriente de maniobra 30/60 μ s; b) Voltaje Vss del modelo del descargador propuesto por Pinceti y Giannettoni simulado en kV para sistemas de 500 kV



a)



b)

FIGURA 4.19. a) Impulso atmosférico de corriente 8/20 μ s; b) Voltaje V10 del modelo del descargador propuesto por Pinceti y Giannettoni simulado en kV para sistemas de 500 kV

4.2.2.2.3. Modelación de la resistencia no lineal “MOV Type 92”

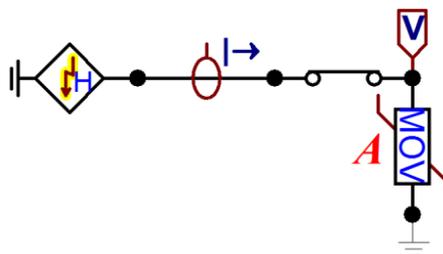


FIGURA 4.20. Modelo basado en una resistencia no lineal, implementado en el programa ATP, para sistemas de 500 kV

- **Resistencia no lineal A**

De acuerdo a la Ecuación 4.11 se encuentra cada uno de los puntos de la característica V-I de la resistencia no lineal para sistemas de 500 kV.

El modelo se prueba con impulsos de corriente de 3 kA 30/60 μ s para sobrevoltajes de maniobra y 10 kA, 8/20 μ s para sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas. El resultado es V_{ss} igual a 867,64 kV que comparado con los datos del fabricante se obtiene un error de 0,0012%, y V_{10} igual a 921,48 kV con un error de 4,67 %. Ver Figuras 4.21 y 4.22.

TABLA 4.13. Característica de V-I de la resistencia no lineal A para sistemas de 500 kV

Característica V-I	
I [A]	V [V]
10	652355,46
100	731954,87
1000	821266,87
2000	850228,78
3000	867641,60
4000	880212,04
6000	898238,91
8000	911252,65
10000	921476,58
12000	929915,24
14000	937110,29
16000	943387,90
18000	948960,05
20000	953972,39

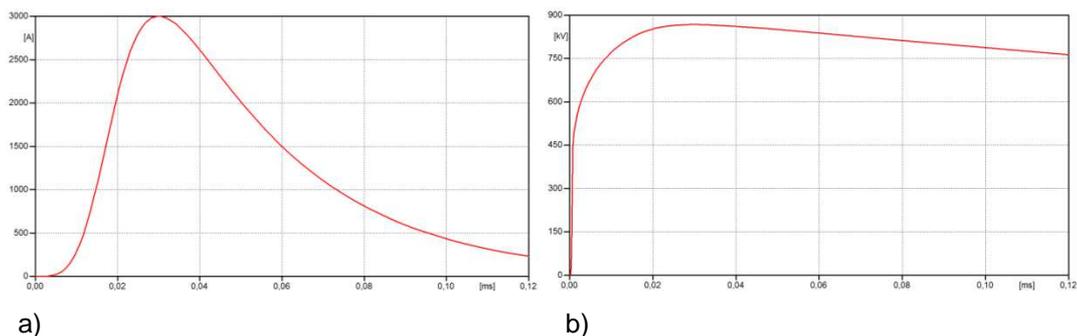


FIGURA 4.21. a) Impulso con corriente de maniobra 30/60 μ s; b) Voltaje Vss del modelo de la resistencia no lineal MOV Type 92 simulado en kV para sistemas de 500 kV

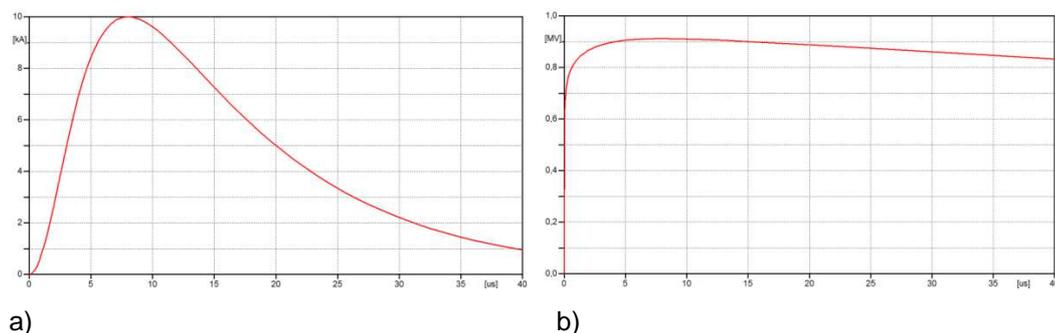


FIGURA 4.22. a) Impulso atmosférico de corriente 8/20 μ s; b) Voltaje V10 modelo de la resistencia no lineal MOV Type 92 simulado en kV para sistemas de 500 kV

4.2.2.3. Resultados de las simulaciones de los descargadores sobrevoltajes para sistemas de 500 kV

Una vez modelados los descargadores de sobrevoltajes se prueba con impulsos de corriente de 1, 2 y 3 kA y onda 30/60 μ s para sobrevoltajes de maniobra y corrientes de 5, 10, y 20 kA y onda 8/20 μ s para sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas. Las simulaciones se realizaron en el programa ATP. La Tabla 4.14 muestra los resultados de los sobrevoltajes residuales simulados en comparación con los datos del fabricante.

Los sobrevoltajes de maniobra simulados dan como resultado el más alto porcentaje de error de 0,79% (modelo IEEE), 0,81% (modelo Pinceti y Giannettoni) y 1,85% (R no lineal MOV).

Los sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas simulados dan como resultado el más alto porcentaje de error de 1,27% (modelo IEEE), 5,76% (modelo Pinceti y Giannettoni) y 9,23% (R no lineal MOV).

TABLA 4.14. Resultados de los voltajes residuales del descargador para el sistema de 500 kV

Datos del fabricante			Simulaciones			Error relativo		
			Modelo IEEE	Modelo Pinceti y Giannettoni	R No lineal	Modelo IEEE	Modelo Pinceti y Giannettoni	R no lineal MOV
30/60 μ s	1 kA	819,00	812,49	812,40	821,27	0,79	0,81	0,28
	2 kA	849,00	854,07	853,93	850,23	0,60	0,58	0,14
	3 kA	870,00	871,90	871,51	867,64	0,22	0,17	0,27
8/20 μ s	5 kA	908,00	904,81	960,30	890,09	0,35	5,76	1,97
	10 kA	956,00	956,01	934,92	921,48	0,00	2,21	3,61
	20 kA	1051,00	1037,6	998,30	953,97	1,27	5,01	9,23

Se calculan los errores de los voltajes residuales para determinar la precisión de las simulaciones de los modelos. Los errores se presentan según Ecuación 4.11.

4.3. CASOS DE ESTUDIO

Con la finalidad de atender a la creciente demanda energética ecuatoriana, se están desarrollando varios proyectos de expansión de la transmisión, como es el caso de 230 kV, e incorporación de sistemas de transmisión de extra alto voltaje a nivel de 500 kV, por tal motivo se requiere el funcionamiento satisfactorio del sistema eléctrico por esta razón se analizan los casos de estudio que se presentan a continuación.

4.3.1. SISTEMA DE 230 kV

- **Datos del sistema:**

Frecuencia: 60 Hz

Voltaje nominal: 230 kV

Voltaje máximo: 245 kV

- **Datos de la línea:**

Línea de transmisión Paute – Pascuales, 230 kV, 188,43 km, doble circuito, conductor 1113 ACSR.

- **Modelo de la línea de transmisión:**

El modelo utilizado para simular esta línea es el JMarti, debido a que se analizan sobrevoltajes de origen atmosférico, de maniobra y temporales, es apropiado utilizar un modelo de parámetros distribuidos y dependientes de la frecuencia.

- **Estudios de de sobrevoltajes temporales y de maniobra**

Montaje de descargadores en los terminales de línea.

- **Estudios de sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas**

En cuanto a la selección del rayo representativo a ser aplicado en las simulaciones se elige, según IEEE TF on Parameters of Lightning Strokes [30] e IEC 60071-1 [14], valor de corriente pico de 35 kA, tiempo de cresta igual a 1,2 μ s y tiempo a la mitad de la cola de 50 μ s.

4.3.2. SISTEMA DE 500 kV

- **Datos del sistema:**

Frecuencia: 60 Hz

Voltaje nominal: 500 kV

Voltaje máximo: 550 kV

- **Datos de la línea:**

Línea de transmisión Inga – Coca Codo Sinclair, 500 kV, 125 km, dos líneas de un circuito, conductor 4x750 ACAR.

- **Modelo de la línea de transmisión:**

El modelo utilizado para simular esta línea es el JMarti, debido a que se analizan sobrevoltajes de origen atmosférico, de maniobra y temporales, es apropiado utilizar un modelo de parámetros distribuidos y dependientes de la frecuencia.

- **Estudios de de sobrevoltajes temporales y de maniobra**

Montaje de descargadores en los terminales de línea.

- **Estudios de sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas**

En cuanto a la selección del rayo representativo a ser aplicado en las simulaciones, y teniendo en cuenta que los sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas no son muy representativos en el sistema de 500 kV, se elige el valor de corriente pico igual a 250 kA con una probabilidad de ocurrencia del 5%, el tiempo de cresta igual a 3,5 μ s y el tiempo a la mitad de la cola de 2000 μ s, según IEEE TF on Parameters of Lightning Strokes [30] y Lightning Direct Effects Handbook [31].

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROGRAMA ATP

En este capítulo se realiza una aplicación de los modelos antes descritos en estudios de sobrevoltajes temporales, de maniobra y debido a descargas atmosféricas, se muestra los resultados de las simulaciones, se analiza las discrepancias al usar modelos detallados y simplificados de descargadores.

5.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DE DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES EN EL PROGRAMA ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM – ATP

En los siguientes ejemplos se simulan y analizan los efectos que producen determinados eventos, como es la energización de la línea, la energización del transformador, el rechazo de carga y las descargas atmosféricas, en los voltajes e intensidades de sistemas eléctricos de 230 kV y 500 kV, utilizando los distintos modelos de descargadores, mediante el programa Alternative Transients Program – ATP.

5.1.1. Análisis de los resultados obtenidos en la energización de la línea de 230 kV

Se analiza la línea de transmisión Paute – Pascuales, cuando se cierra el interruptor del lado de la subestación Pascuales.

Se simula cuatro escenarios, uno sin emplear descargadores y los otros empleando los tres modelos de descargadores, en el instante en la onda de voltaje en el que se presentan los mayores sobrevoltajes.

Considerando que el valor nominal es de 1.0 p.u. en la base de 230 kV, se puede apreciar que sin emplear descargadores existe una gran distorsión de la onda con un voltaje que llega a valores de 1,85 p.u. Empleando los modelos de descargadores IEEE y Pinceti & Giannettoni, los sobrevoltajes llegan a valores de

1,7 p.u. Utilizando el modelo de descargador MOV Type 92 el valor que alcanzan los sobrevoltajes es de 1,69 p.u., dando como resultado un error menor al 1% con respecto al modelo IEEE.

Las Figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 muestran las simulaciones, en el lado de Paute, de las formas de onda de voltaje que sobrepasan los 300 kV para luego estabilizarse al valor nominal. Los tiempos de simulación son de 80 ms, tiempo suficiente para visualizar la transición.

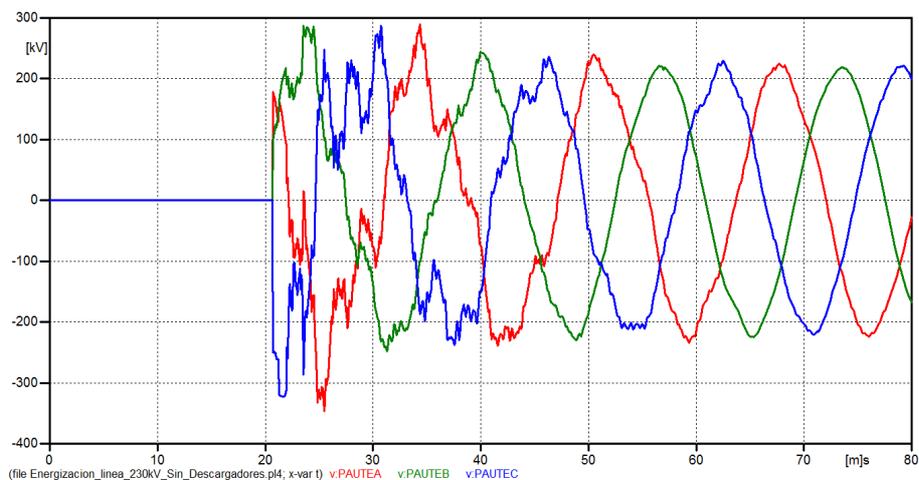


FIGURA 5.1. Voltajes en el lado de Paute sin emplear descargadores

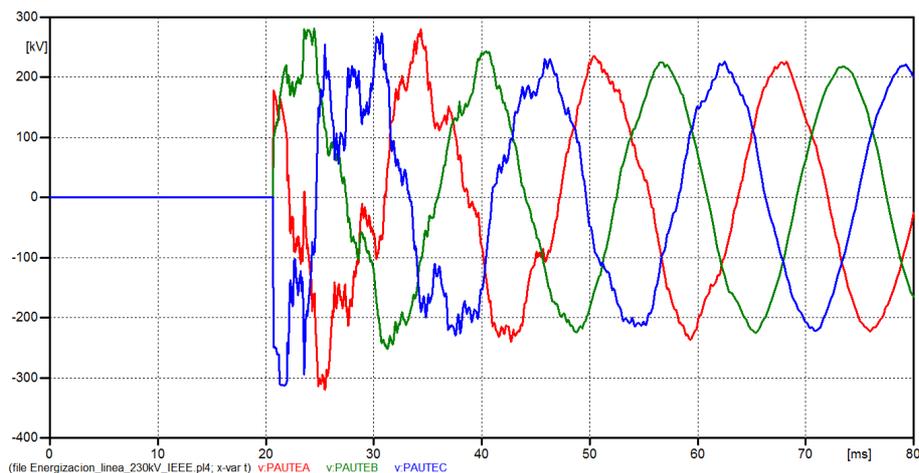


FIGURA 5.2. Voltajes en el lado de Paute empleando el modelo IEEE

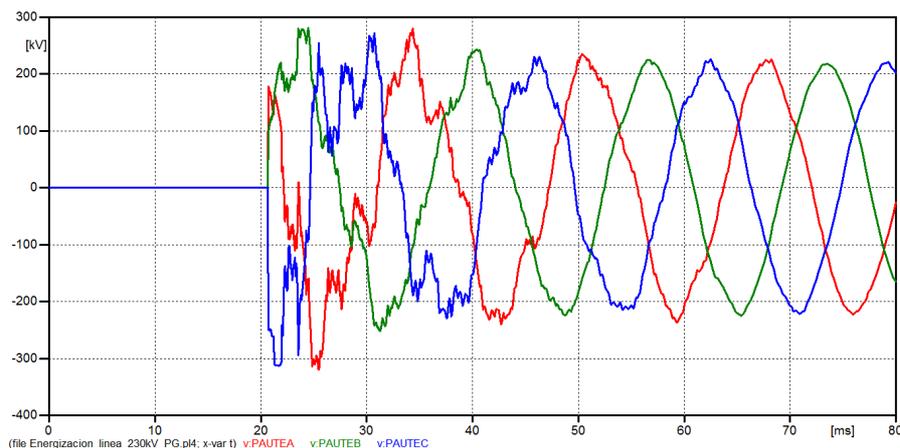


FIGURA 5.3. Voltajes en el lado de Paute empleando el modelo Pinceti y Giannettoni

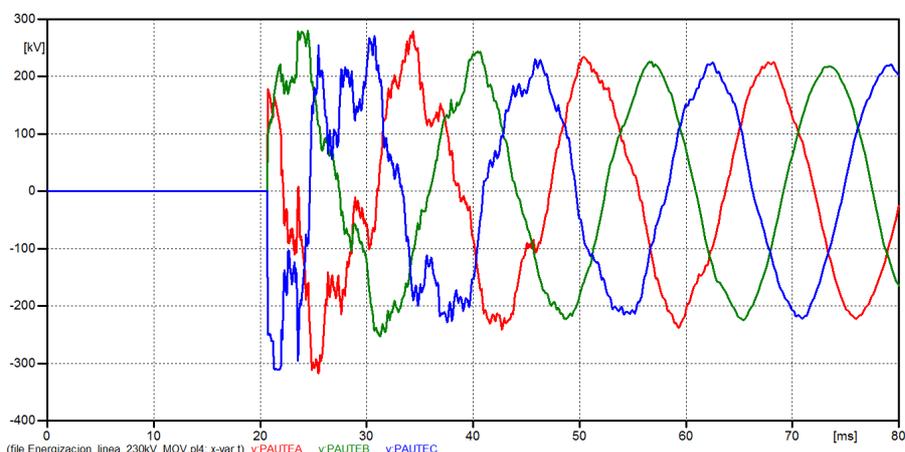


FIGURA 5.4. Voltajes en el lado de Paute empleando el modelo MOV Type 92

5.1.2. Análisis de los resultados obtenidos en la energización del transformador Pascuales desde el lado de 230 kV

Se analiza el transformador Pascuales, cuando se cierra el interruptor en los picos de voltaje de las fases A, B y C con referencia a la barra Pascuales de 230 kV.

Las simulaciones de la energización del transformador se realizan para cuatro casos, sin emplear descargadores y empleando los tres modelos de descargadores, en el instante en donde se presentan los mayores sobrevoltajes.

Tomando en cuenta que el valor nominal es de 1.0 p.u. en la base de 230 kV, se puede apreciar que sin emplear descargadores el voltaje llega a valores de 1,28 p.u. Empleando los modelos de descargadores IEEE y Pinceti & Giannettoni, los

sobrevoltajes llegan a valores de 1,12 p.u. Utilizando el modelo de descargador MOV Type 92 el valor que alcanzan los sobrevoltajes es de 1,18 p.u., dando como resultado un error menor al 5% con respecto al modelo IEEE.

La energización desde el lado de 230 kV dan como resultado los voltajes que se muestran en las Figuras 5.5, 5.7, 5.9 y 5.11. Los tiempos de simulación son de 0,5 s, en los que se visualiza la distorsión de la onda.

Las corrientes de magnetización de cada caso se muestran en las Figuras 5.6, 5.8, 5.10 y 5.12.

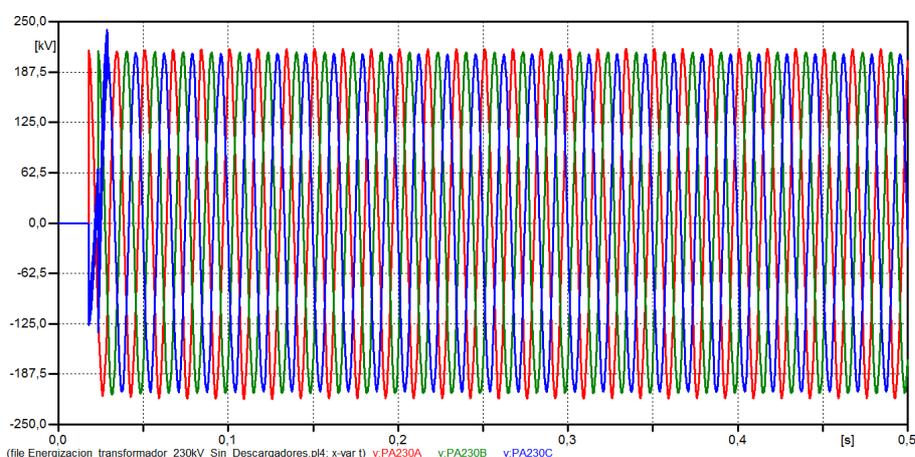


FIGURA 5.5. Voltajes en el lado de 230 kV del transformador Pascuales sin emplear descargadores

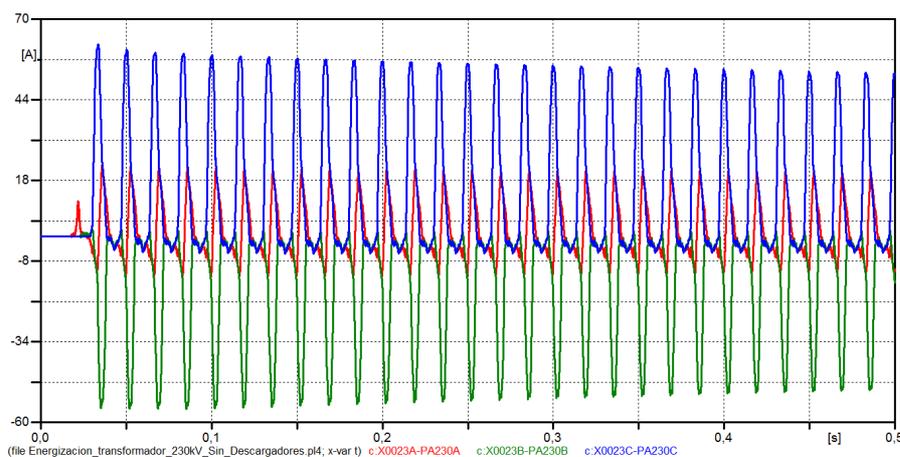


FIGURA 5.6. Corriente de Inrush en el lado de 230 kV al energizar el transformador Pascuales sin emplear descargadores

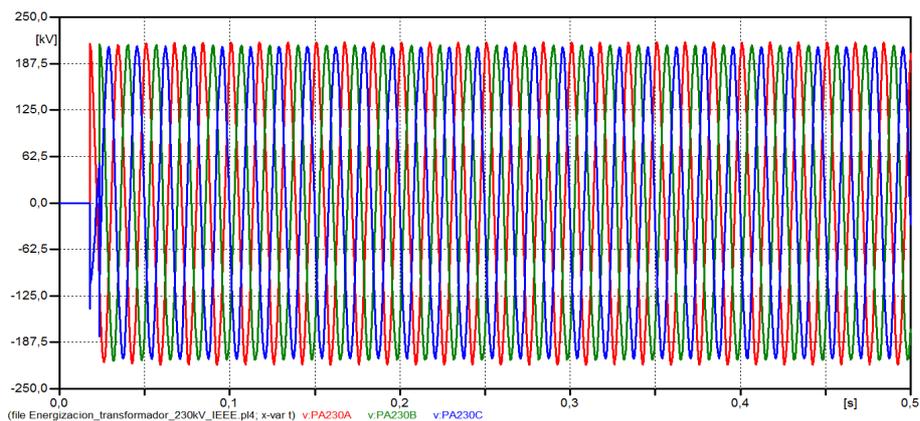


FIGURA 5.7. Voltajes en el lado de 230 kV del transformador Pascuales empleando el modelo IEEE

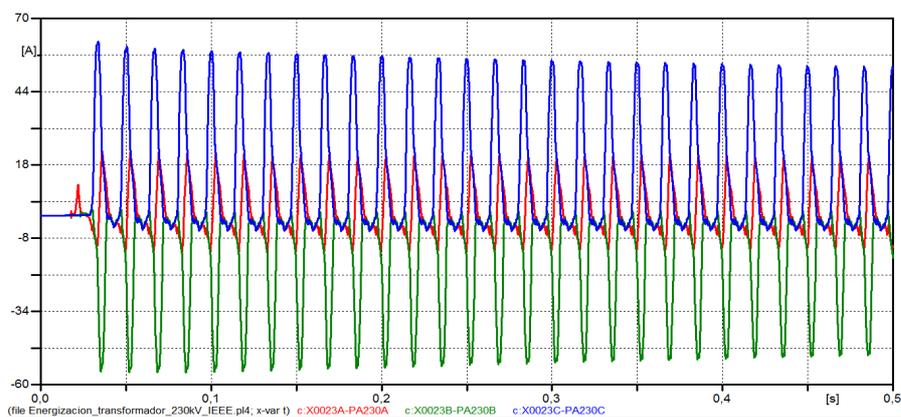


FIGURA 5.8. Corriente de Inrush en el lado de 230 kV al energizar el transformador Pascuales empleando el modelo IEEE

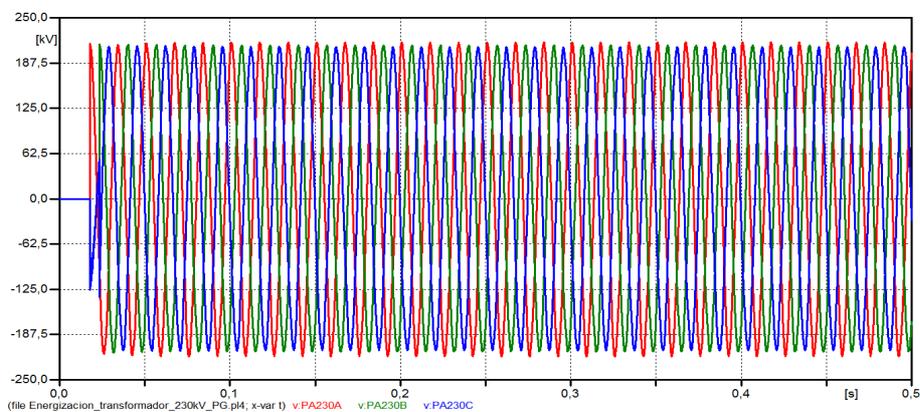


FIGURA 5.9. Voltajes en el lado de 230 kV del transformador Pascuales empleando el modelo Pinceti y Giannettoni

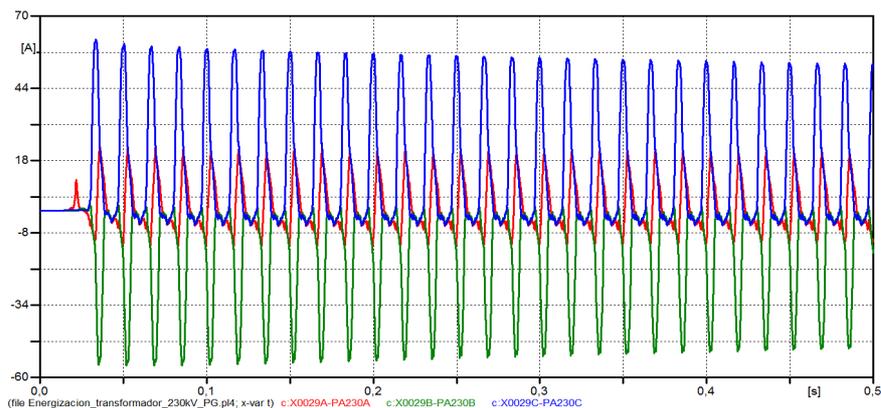


FIGURA 5.10. Corriente de Inrush en el lado de 230 kV al energizar el transformador Pascuales empleando el modelo Pinceti y Giannettoni

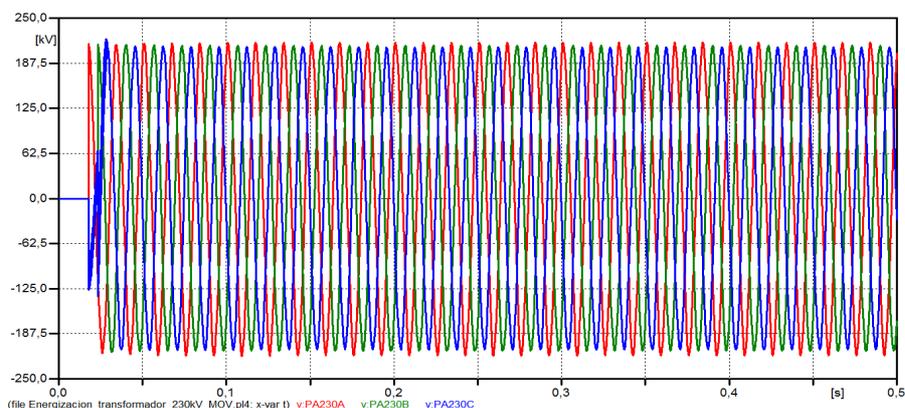


FIGURA 5.11. Voltajes en el lado de 230 kV del transformador Pascuales empleando el modelo MOV Type 92

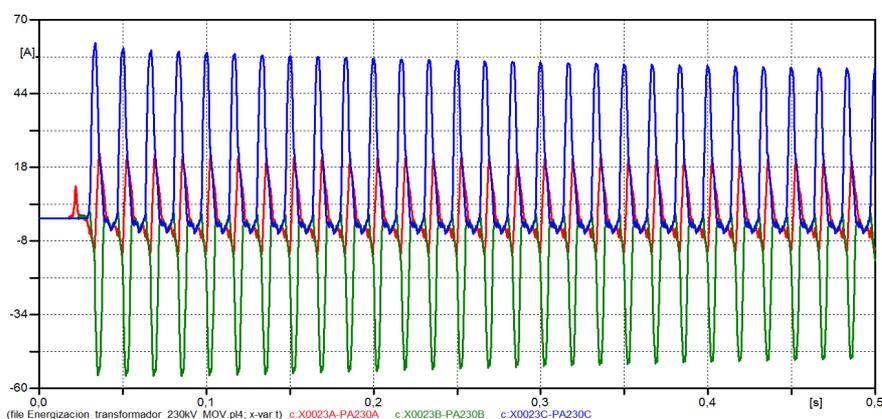


FIGURA 5.12. Corriente de Inrush en el lado de 230 kV al energizar el transformador Pascuales empleando el modelo MOV Type 92

5.1.3. Análisis de los resultados obtenidos en el rechazo de carga en 230 kV

Las simulaciones del rechazo de carga se lo realizan para cuatro escenarios, uno sin emplear descargadores y los otros empleando los tres modelos de descargadores, en el instante en donde se presentan los mayores sobrevoltajes. El interruptor se abre primero en el lado de Pascuales y luego en el lado de Paute.

Considerando que el valor nominal es de 1.0 p.u. en la base de 230 kV, se puede apreciar que sin emplear descargadores los sobrevoltajes llegan a valores de 2,06 p.u. Utilizando los tres modelos de descargadores IEEE, Pinceti & Giannettoni y MOV Type 92, los sobrevoltajes llegan a valores de 1,78 p.u.

Las Figuras 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16 muestran los voltajes transitorios en el lado de Pascuales resultantes de la salida de la línea en tiempos de simulación de 0,25 s.

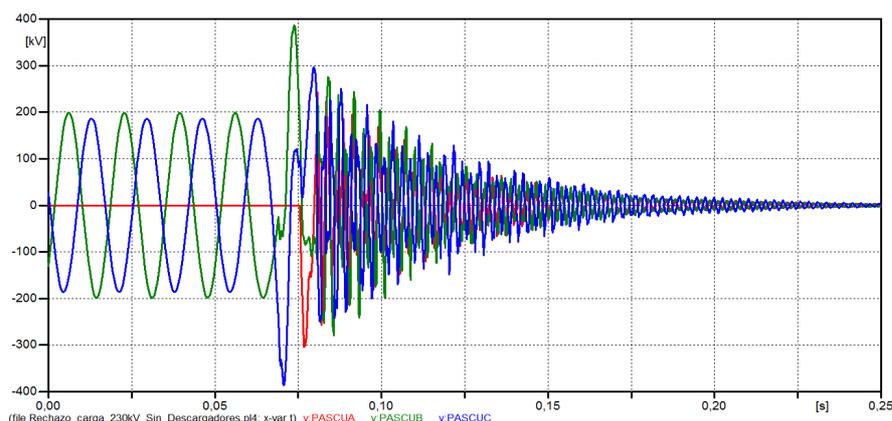


FIGURA 5.13. Voltajes en el lado de Pascuales sin emplear descargadores

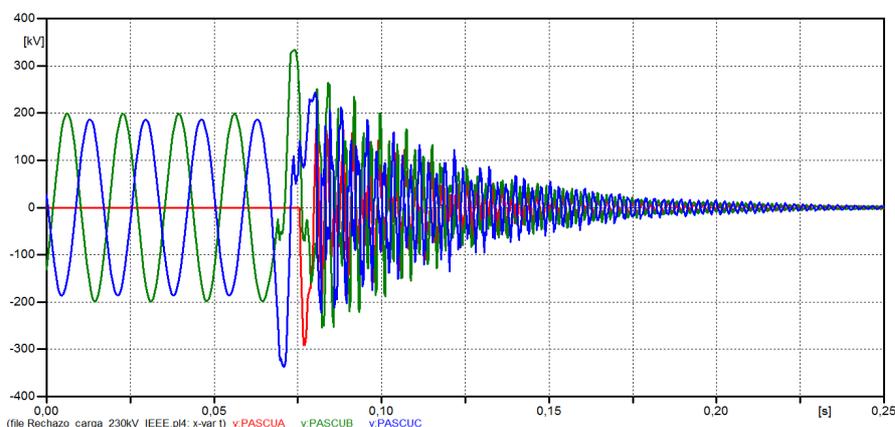


FIGURA 5.14. Voltajes en el lado de Pascuales empleando el modelo IEEE

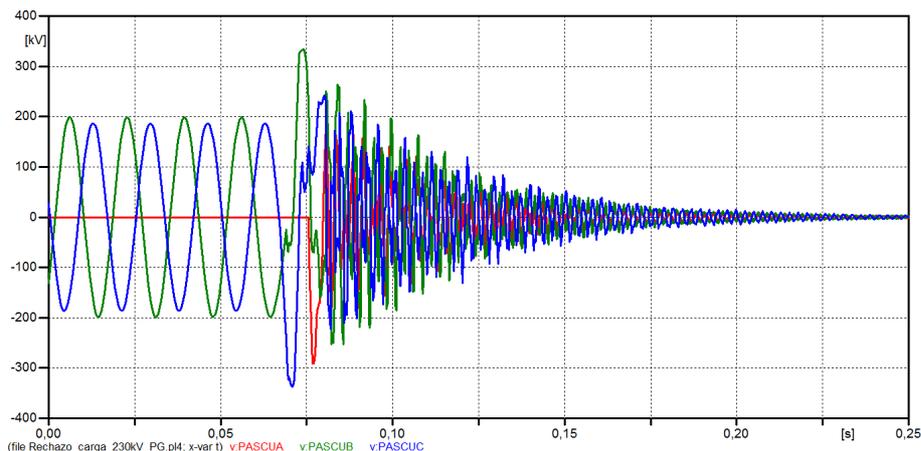


FIGURA 5.15. Voltajes en el lado de Pascuales empleando el modelo Pinceti y Giannettoni

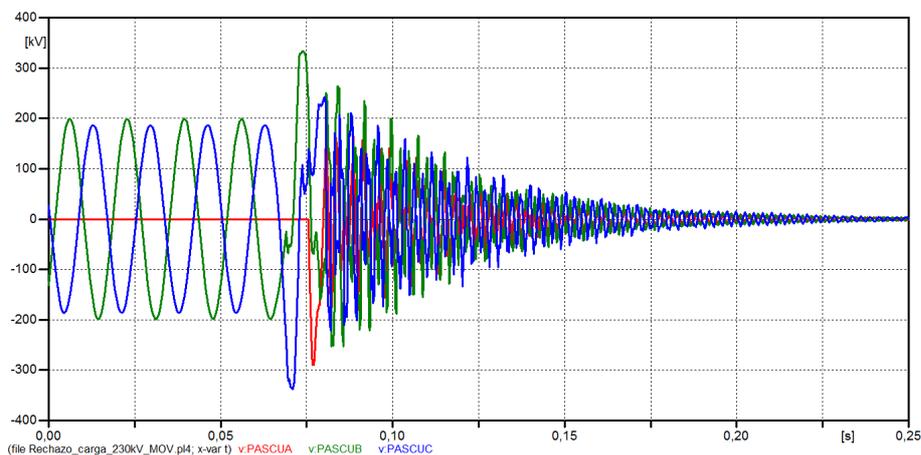


FIGURA 5.16. Voltajes en el lado de Pascuales empleando el modelo MOV Type 92

5.1.4. Análisis de los resultados obtenidos en descargas atmosféricas a nivel de 230 kV

Se analiza los transitorios que aparecen en la línea de transmisión Paute – Pascuales, cuando se produce una descarga atmosférica a lo largo de la línea. Se simula cuatro casos, sin emplear descargadores y empleando los tres modelos de descargadores, en el instante en donde se presentan los mayores sobrevoltajes.

Considerando que el valor nominal es de 1.0 p.u. en la base de 230 kV, se puede apreciar que sin emplear descargadores los voltajes son muy elevados respecto al valor nominal llegando a valores de 5,38 p.u. Aplicando el modelo de descargadores IEEE el valor que alcanzan los sobrevoltajes es de 2,84 p.u.

Utilizando el modelo de descargador Pinceti & Giannettoni, los sobrevoltajes llegan a valores de 2,78 p.u., obteniendo un error de 0,56% con respecto al modelo IEEE. Utilizando el modelo de descargador MOV Type 92 el valor que alcanzan los sobrevoltajes es de 2,33 p.u., consiguiendo un error de 19,31 % en relación al modelo IEEE.

Las Figuras 5.17, 5.18, 5.19 y 5.20 muestran las simulaciones, en el lado de Paute, de las formas de onda de voltaje. Los tiempos de simulación son de 0.8 ms.

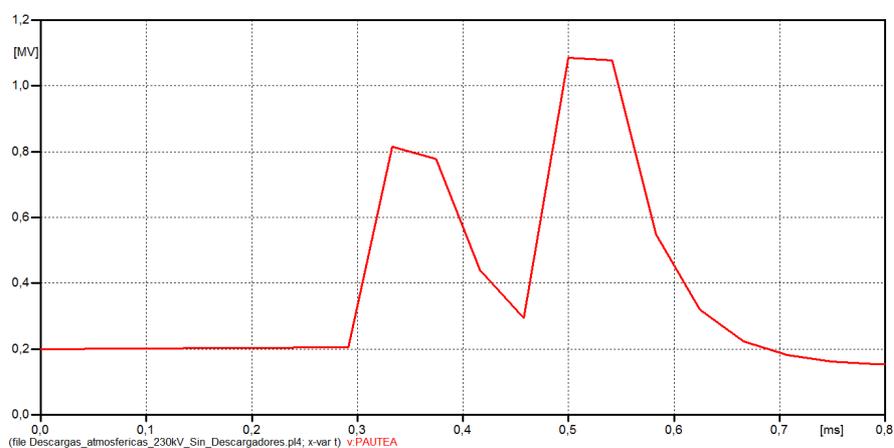


FIGURA 5.17. Voltajes en el lado de Paute sin emplear descargadores

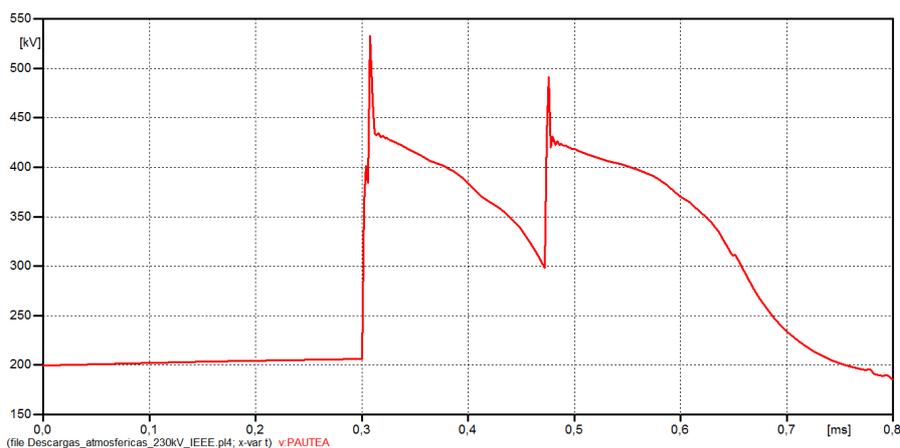


FIGURA 5.18. Voltajes en el lado de Paute empleando el modelo IEEE

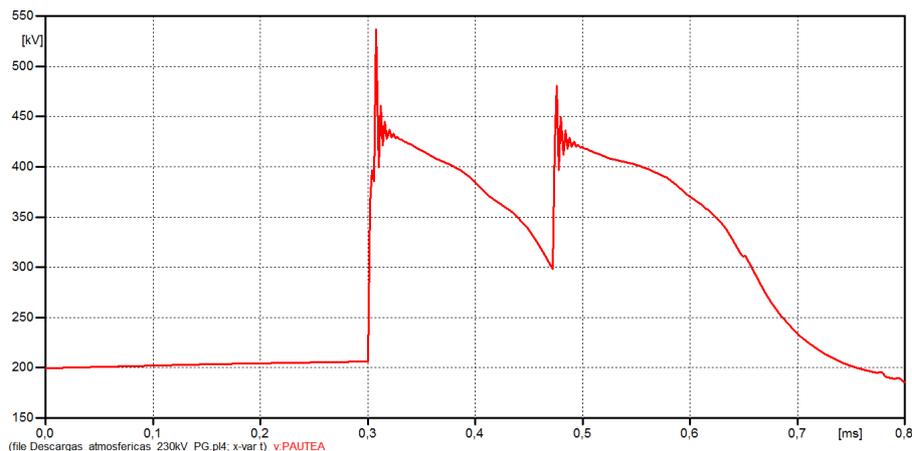


FIGURA 5.19. Voltajes en el lado de Paute empleando el modelo Pinceti y Giannettoni

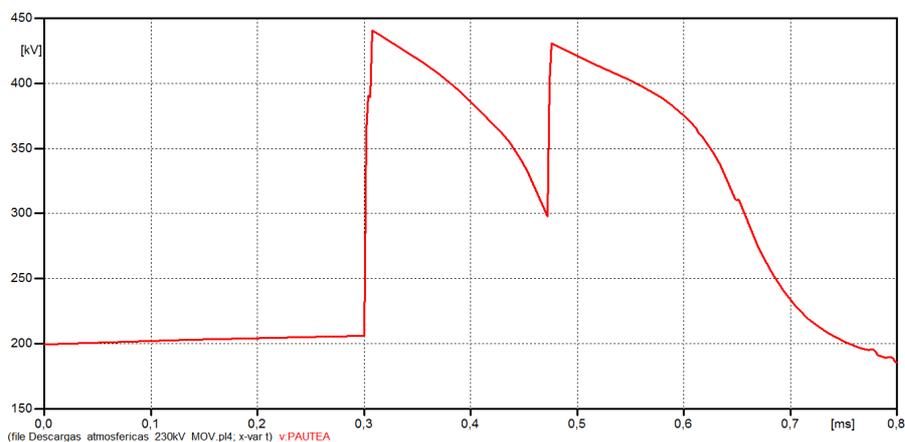


FIGURA 5.20. Voltajes en el lado de Paute empleando el modelo MOV Type 92

5.1.5. Análisis de los resultados obtenidos en la energización de la línea de 500 kV

Se realiza la simulación de la línea de transmisión Coca Codo Sinclair – El Inga, para cuatro escenarios, uno sin emplear descargadores y los otros empleando los tres modelos de descargadores, en el instante en donde se presentan los mayores sobrevoltajes.

Tomando en cuenta que el valor nominal es de 1.0 p.u. en la base de 500 kV, se visualiza que sin emplear descargadores existe una gran distorsión de la onda con un voltaje que llega a valores de 2,16 p.u. Utilizando los tres modelos de descargadores IEEE, Pinceti & Giannettoni y MOV Type 92, los sobrevoltajes llegan a valores de 1,84 p.u.

La energización se realiza al circuito 1 de la línea, mientras el circuito 2 está desenergizado. Las Figuras 5.21, 5.22, 5.23 y 5.24 muestran las simulaciones de los sobrevoltajes cuando se cierra el interruptor del lado de la subestación Coca Codo Sinclair en intervalos de tiempo de 80 ms.

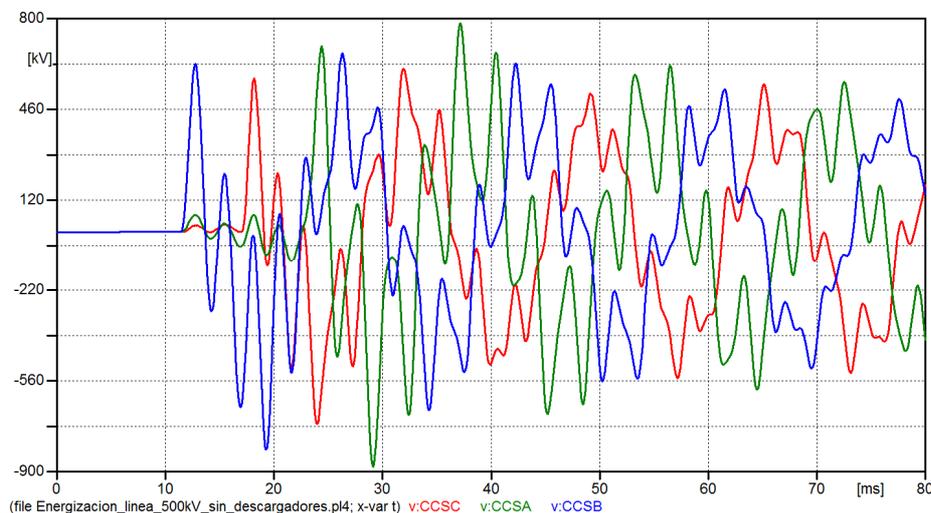


FIGURA 5.21. Voltajes en el lado de Coca Codo Sinclair sin emplear descargadores

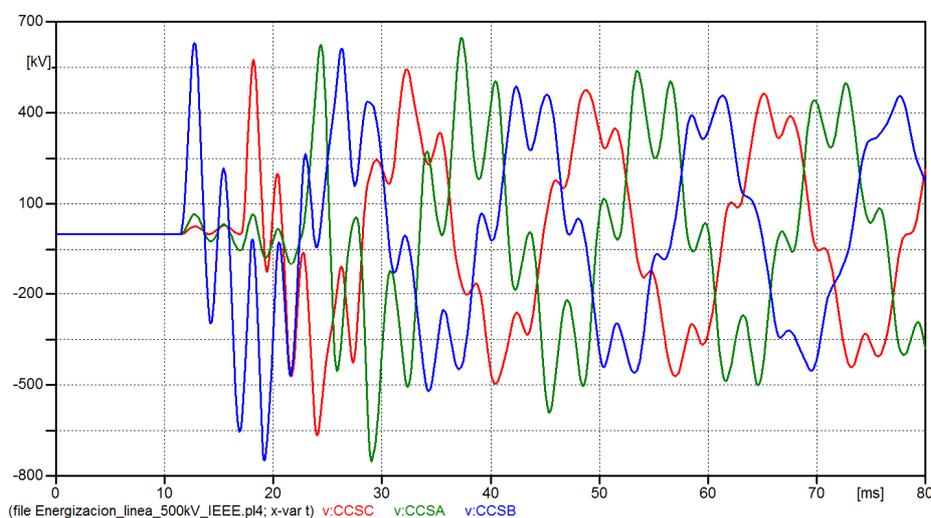


FIGURA 5.22. Voltajes en el lado de Coca Codo Sinclair empleando el modelo IEEE

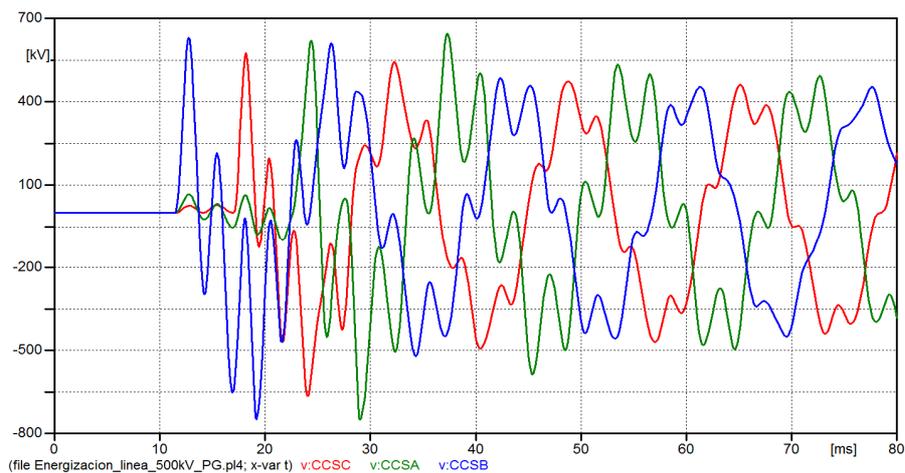


FIGURA 5.23. Voltajes en el lado de Coca Codo Sinclair empleando el modelo Pinceti y Giannettoni

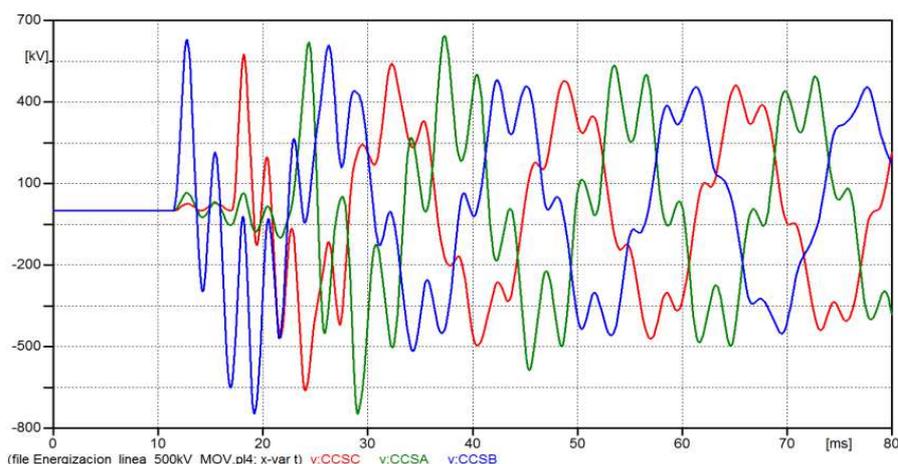


FIGURA 5.24. Voltajes en el lado de Coca Codo Sinclair empleando el modelo MOV Type 92

5.1.6. Análisis de los resultados obtenidos en la energización del transformador El Inga desde el lado de 500 kV

Las simulaciones de la energización del transformador El Inga se realizan para cuatro casos, sin emplear descargadores y empleando los tres modelos de descargadores, en el instante en donde se presentan los mayores sobrevoltajes. El interruptor se cierra en los picos de voltaje de las fases A, B y C con referencia a la barra El Inga de 500 kV.

Tomando en cuenta que el valor nominal es de 1.0 p.u. en la base de 500 kV, se puede apreciar que sin emplear descargadores el voltaje llega a valores de 1,57

p.u. Empleando los modelos de descargadores IEEE y Pinceti & Giannettoni, los sobrevoltajes llegan a valores de 1,01 p.u. Utilizando el modelo de descargador MOV Type 92 el valor que alcanzan los sobrevoltajes es de 1p.u., dando como resultado un error menor al 1% con respecto al modelo IEEE.

La energización desde el lado de 500 kV dan como resultado los voltajes que se muestran en las Figuras 5.25, 5.27, 5.29 y 5.31. Los tiempos de simulación son de 0,6 s, en los que se visualiza la distorsión de la onda.

Las corrientes de magnetización de cada caso se muestran en las Figuras 5.26, 5.28, 5.30 y 5.32.

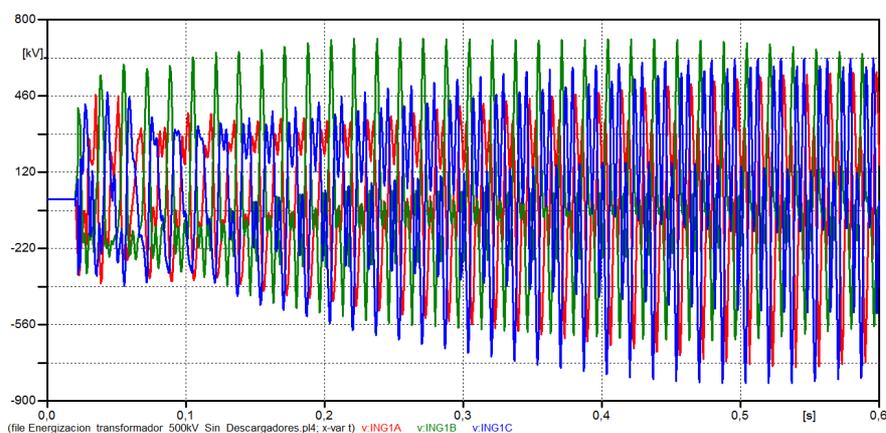


FIGURA 5.25. Voltajes en el lado de 500 kV del transformador El Inga sin emplear descargadores

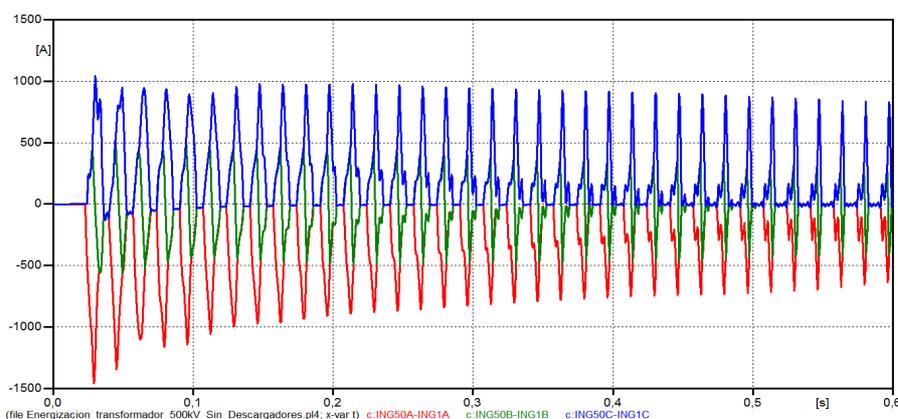


FIGURA 5.26. Corriente de Inrush en el lado de 500 kV al energizar el transformador El Inga sin emplear descargadores

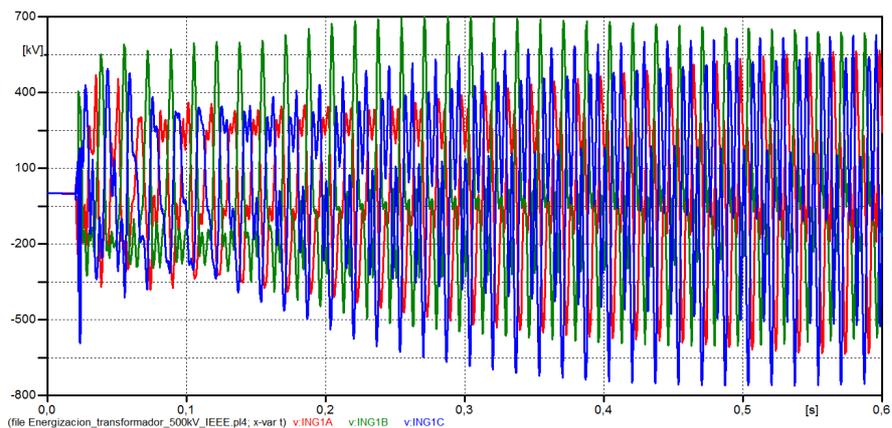


FIGURA 5.27. Voltajes en el lado de 500 kV del transformador El Inga empleando el modelo IEEE

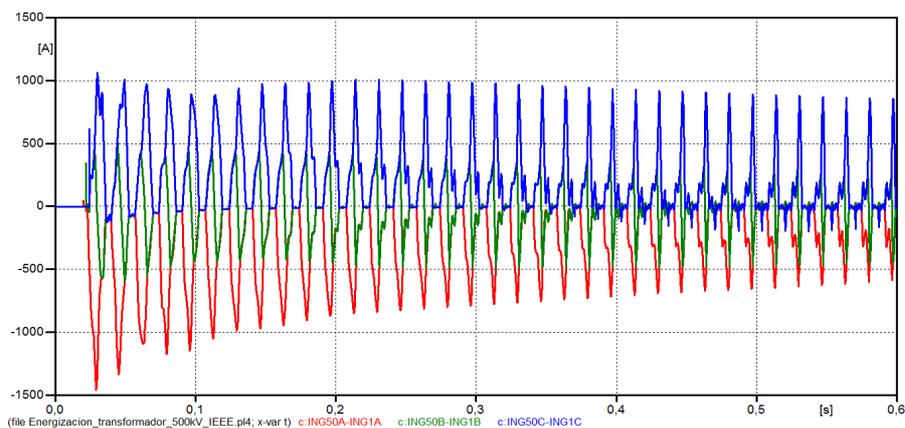


FIGURA 5.28. Corriente de Inrush en el lado de 500 kV al energizar el transformador El Inga empleando el modelo IEEE

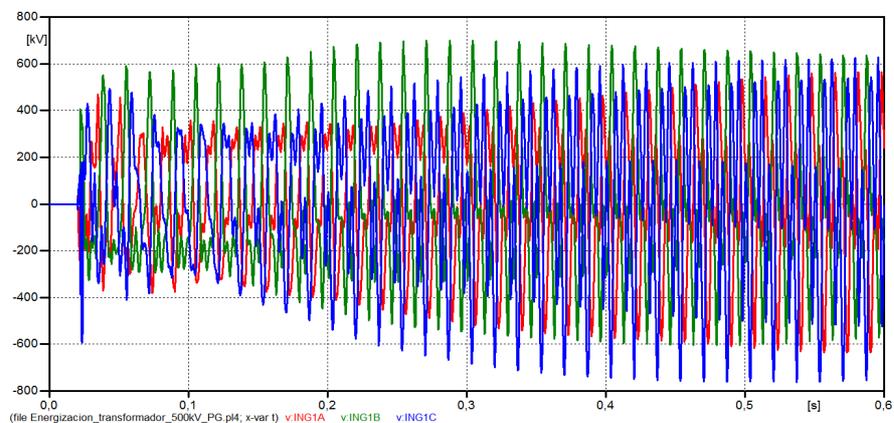


FIGURA 5.29. Voltajes en el lado de 500 kV del transformador El Inga empleando el modelo Pinceti y Giannettoni

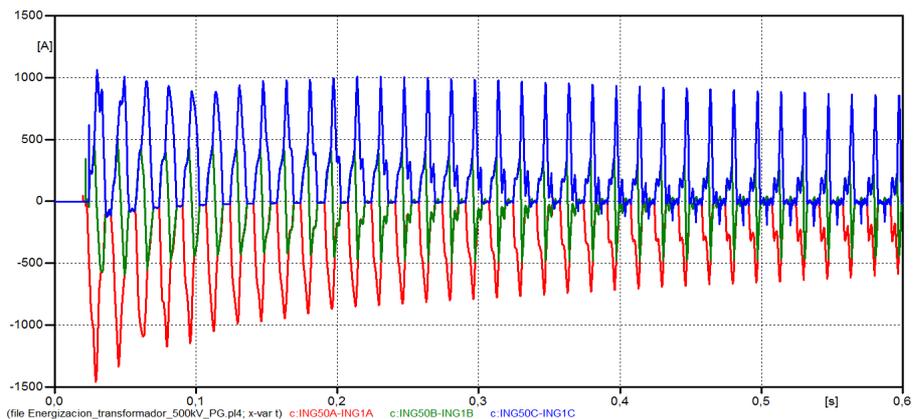


FIGURA 5.30. Corriente de Inrush en el lado de 500 kV al energizar el transformador El Inga empleando el modelo Pinceti y Giannettoni

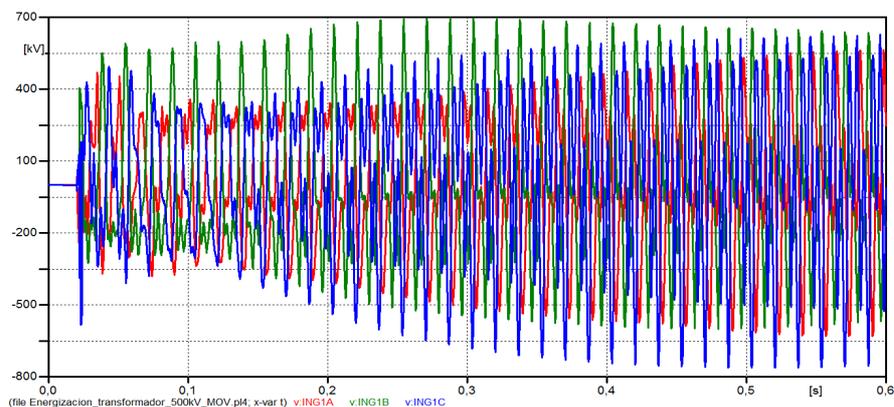


FIGURA 5.31. Voltajes en el lado de 500 kV del transformador El Inga empleando el modelo MOV Type 92

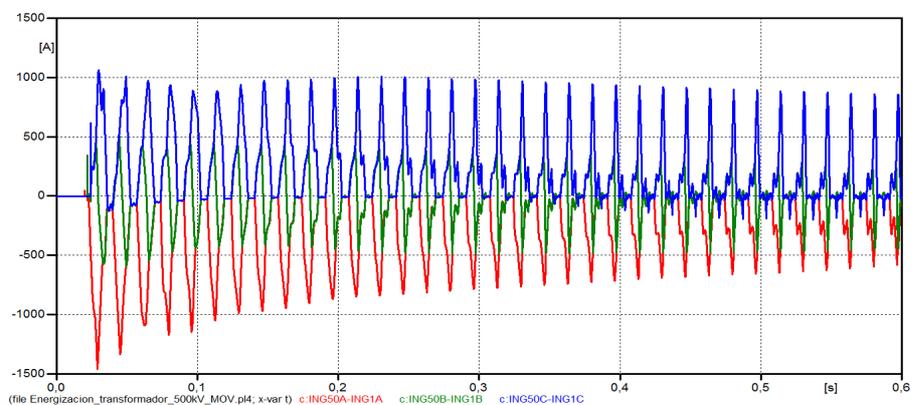


FIGURA 5.32. Corriente de Inrush en el lado de 500 kV al energizar el transformador El Inga empleando el modelo MOV Type 92

5.1.7. Análisis de los resultados obtenidos en el rechazo de carga en 500 kV

Las simulaciones del rechazo de carga se lo realizan para cuatro casos, sin emplear descargadores y empleando los tres modelos de descargadores, en el instante en donde se presentan los mayores sobrevoltajes.

El interruptor se abre primero en el lado de la subestación El Inga y luego en el lado de la subestación Coca Codo Sinclair.

Las Figuras 5.33, 5.34, 5.35 y 5.36 muestran los voltajes en el lado de la subestación El Inga resultantes de la salida de la línea en tiempos de simulación de 1 s.

Considerando que el valor nominal es de 1.0 p.u. en la base de 500 kV, se puede apreciar que sin emplear descargadores los sobrevoltajes llegan a valores de 2,36 p.u. Usando los modelos de descargadores IEEE y MOV Type 92, los sobrevoltajes llegan a valores de 1,9 p.u. Utilizando el modelo de descargador Pinceti y Giannettoni el valor que alcanzan los sobrevoltajes es de 1,89 p.u., dando como resultado un error menor al 1% con respecto al modelo IEEE.

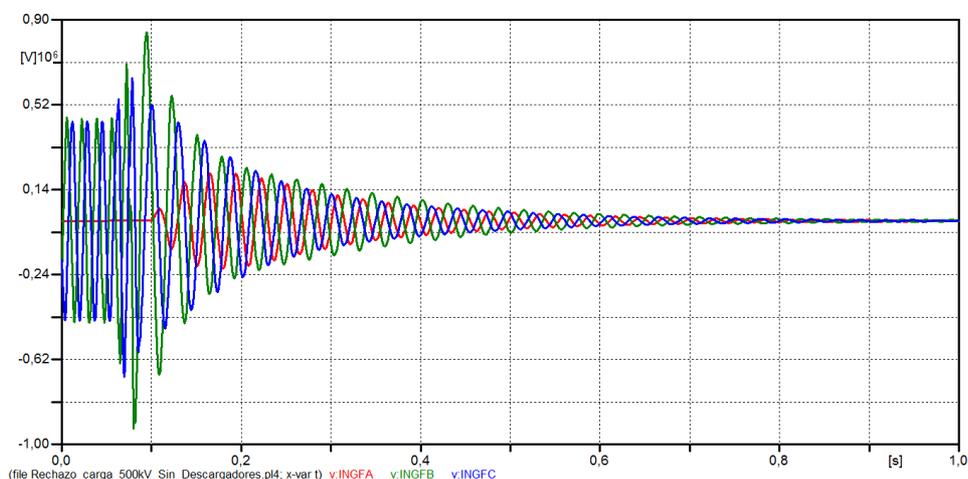


FIGURA 5.33. Voltajes en el lado de El Inga sin emplear descargadores

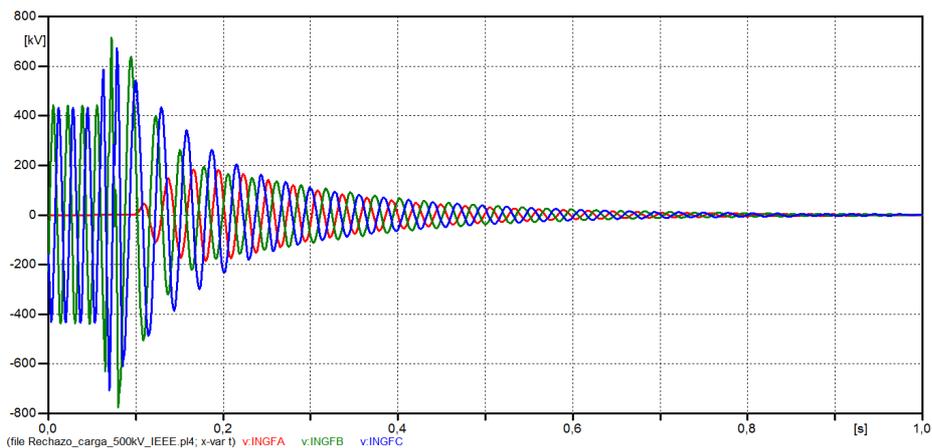


FIGURA 5.34. Voltajes en el lado de El Inga empleando el modelo IEEE

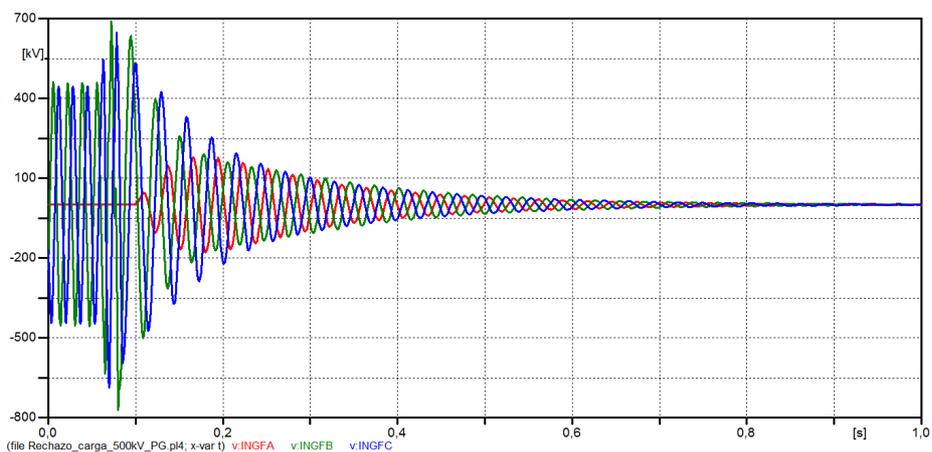


FIGURA 5.35. Voltajes en el lado de El Inga empleando el modelo Pinceti y Giannettoni

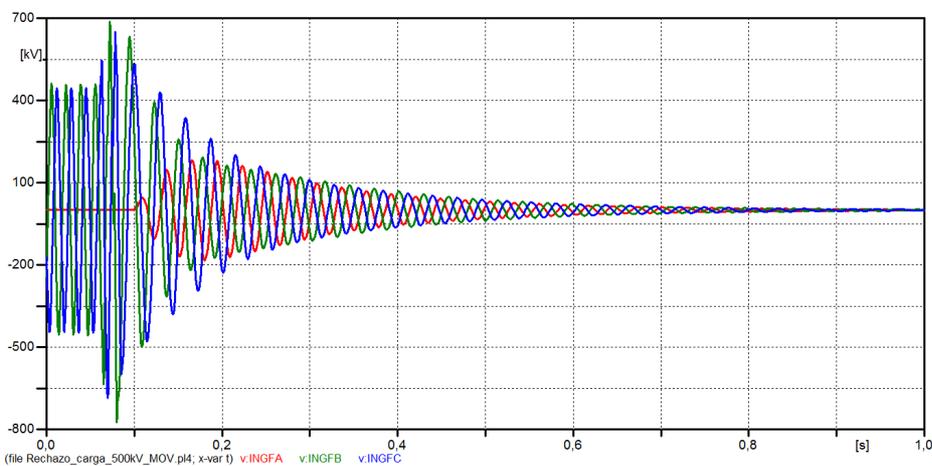


FIGURA 5.36. Voltajes en el lado de El Inga empleando el modelo MOV Type 92

5.1.8. Análisis de los resultados obtenidos en descargas atmosféricas a nivel de 500 kV

Se analiza los transitorios que aparecen en la subestación El Inga, cuando se produce una descarga atmosférica en la segunda torre de la línea de transmisión asociada.

Se simula cuatro casos, sin emplear descargadores y empleando los tres modelos de descargadores, en el instante en donde se presentan los mayores sobrevoltajes.

Considerando que el valor nominal es de 1.0 p.u. en la base de 500 kV, se puede apreciar que sin emplear descargadores los voltajes son muy elevados respecto al valor nominal llegando a valores de 5,27 p.u. Utilizando el modelo de descargador IEEE el valor que alcanzan los sobrevoltajes es de 3,17 p.u. Empleando el modelo de descargador Pinceti y Giannettoni, los sobrevoltajes llegan a valores de 3,26 p.u., obteniendo un error menor de 2,78% con respecto al modelo IEEE. Utilizando el modelo de descargador MOV Type 92 el valor que alcanzan los sobrevoltajes es de 3,03 p.u., consiguiendo un error de 4,65% en relación al modelo IEEE.

Las Figuras 5.37, 5.38, 5.39 y 5.40 muestran las simulaciones, en el lado de El Inga, de las formas de onda de voltaje. Los tiempos de simulación son de 20 μ s.

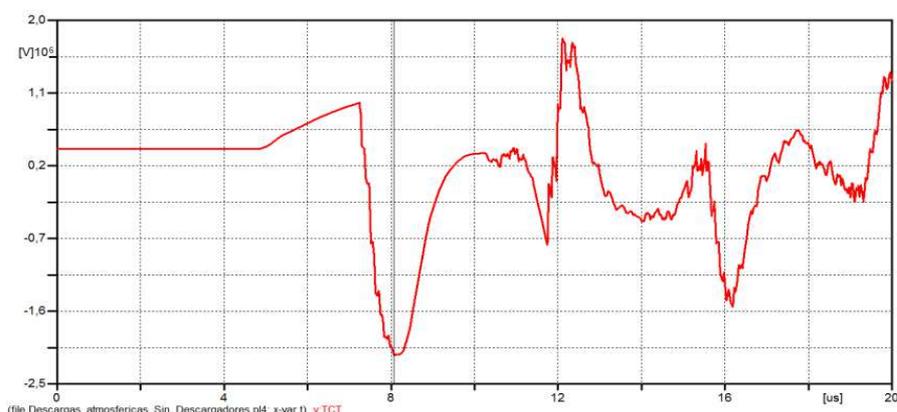


FIGURA 5.37. Voltajes en el lado de El Inga sin emplear descargadores

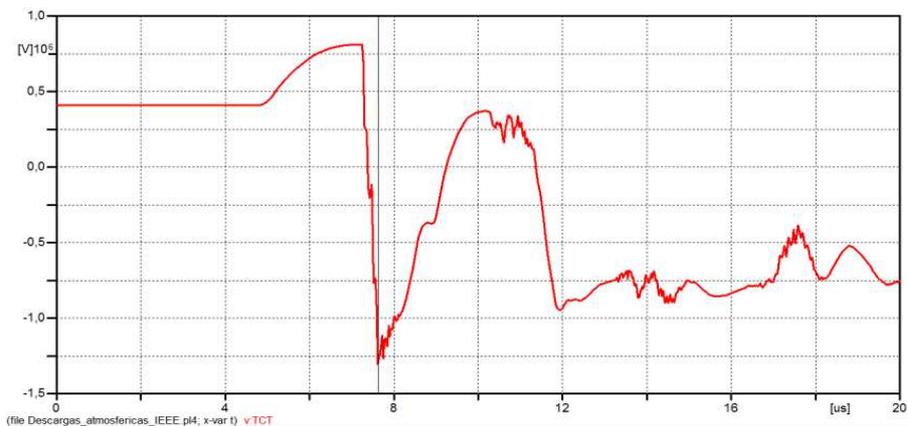


FIGURA 5.38. Voltajes en el lado de El Inga empleando el modelo IEEE

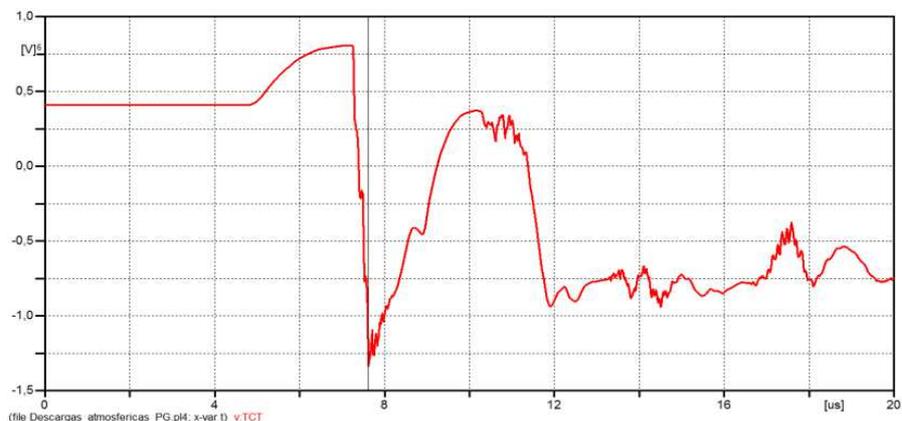


FIGURA 5.39. Voltajes en el lado de El Inga empleando el modelo Pinceti y Giannettoni

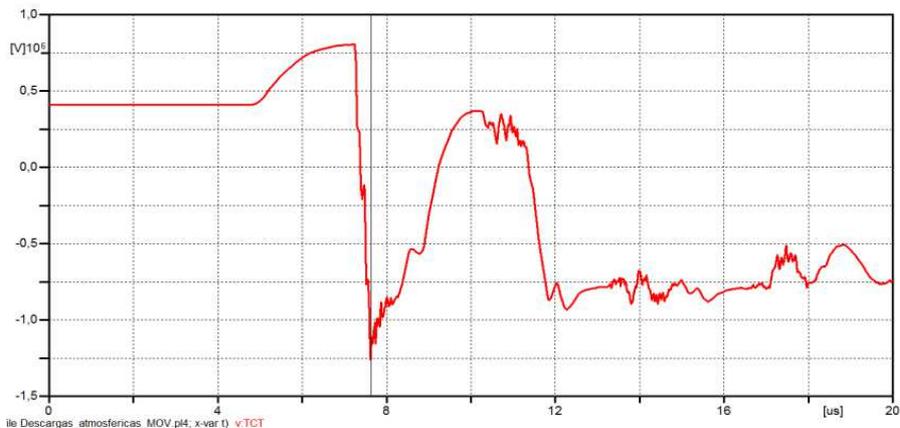


FIGURA 5.40. Voltajes en el lado de El Inga empleando el modelo MOV Type 92

5.2. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN DE DESCARGADORES DE SOBREVOLTAJES EN EL PROGRAMA ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM – ATP

En este trabajo, se compararon tres modelos con respecto a la exactitud de su aproximación de los datos del fabricante. La comparación se realizó en el programa Alternative Transients Program – ATP.

El modelo de la resistencia no lineal MOV type 92 se puede utilizar para estudios de sobrevoltajes temporales y de maniobra, seleccionando una adecuada característica no lineal V-I, no es necesario un modelo dependiente de la frecuencia.

Para estudios de sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas se necesita el modelo completo propuesto por la IEEE, principalmente en los sistemas en los que los sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas prevalecen, como es el caso de sistemas de 230 kV.

El modelo simplificado propuesto por Pinceti y Giannettoni produce resultados muy satisfactorios, especialmente tomando en cuenta que es mucho más fácil la implementación del modelo en el entorno ATP.

TABLA 5.1. Resultados de los estudios de sobrevoltajes y errores relativos para sistemas de 230 kV

Estudio	Simulaciones								Error relativo (modelo IEEE)	
	Sin descargas		Modelo IEEE		Modelo Pinceti y Giannettoni		R No lineal		Modelo Pinceti y Giannettoni	R No lineal
	kV	p.u	kV	p.u	kV	p.u	kV	p.u		
Energización de la L/T	346,76	1,85	320,05	1,70	320,00	1,70	318,17	1,69	0,02	0,59
Energización del Transformador	239,78	1,28	210,69	1,12	210,66	1,12	220,67	1,18	0,01	4,52
Rechazo de Carga	387,00	2,06	333,66	1,78	333,63	1,78	333,63	1,78	0,01	0,01
Descargas Atmosféricas	1011	5,38	521,66	2,78	524,6	2,79	437,24	2,33	0,56	19,31

TABLA 5.2. Resultados de los estudios de sobrevoltajes y errores relativos para sistemas de 500 kV

Estudio	Simulaciones								Error relativo (modelo IEEE)	
	Sin descargas		Modelo IEEE		Modelo Pinceti y Giannettoni		R No lineal		Modelo Pinceti y Giannettoni	R No lineal
	kV	p.u	kV	p.u	kV	p.u	kV	p.u		
Energización de la L/T	882,00	2,16	752,50	1,84	751,24	1,84	749,83	1,84	0,17	0,36
Energización del Transformador	641,82	1,57	411,33	1,01	411,35	1,01	410,26	1,00	0,00	0,26
Rechazo de Carga	963,26	2,36	777,21	1,90	772,87	1,89	774,59	1,90	0,56	0,34
Descargas Atmosféricas	2150,1	5,27	1292,4	3,17	1329,4	3,26	1235,0	3,03	2,78	4,65

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Se implementó tres modelos de descargadores de sobrevoltajes en el programa ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM – ATP, en base a los datos proporcionados por los fabricantes, el primero propuesto por la IEEE, formado por dos resistencias no lineales (A0 y A1), un filtro pasa bajos (R1 y L1), una inductancia asociada con los campos magnéticos (L0), una resistencia para estabilizar la integración numérica (R0) y una capacitancia de terminal a terminal del descargador (C), el segundo presentado por Pinceti y Giannettoni, que es una simplificación del modelo IEEE, y el tercero un modelo que consiste en una resistencia no lineal.
- Tomando en cuenta el comportamiento de los tres modelos simulados, tanto para sobrevoltajes temporales como de maniobra, se establece que el modelo de la resistencia no lineal MOV type 92 se puede utilizar para este tipo de eventos, seleccionando una adecuada característica no lineal V-I; de esta manera los resultados de los sobrevoltajes obtenidos en la simulación presentan errores menores al 5% con respecto al modelo IEEE.
- De acuerdo a las simulaciones se establece que para la realización de estudios de sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas se necesita el modelo completo propuesto por la IEEE, principalmente en redes eléctricas en las que los sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas prevalecen, como es el caso de sistemas de 230 kV. Los sobrevoltajes simulados con la resistencia no lineal MOV type 92 dan como resultado errores cercanos al 20%, por lo que no se recomienda la utilización de este modelo para este tipo de eventos.
- El modelo simplificado propuesto por Pinceti y Giannettoni produce resultados muy satisfactorios, considerando que su implementación es relativamente rápida en programas del tipo EMTP. Se observa que los errores de los

sobrevoltajes simulados con este modelo son menores al 5%, de tal manera que sus valores están dentro del rango que la práctica permite para este tipo de estudios.

- La diferencia principal en el comportamiento del descargador de sobrevoltajes de óxido metálico en sistemas de 500 y 230 kV está en la energía absorbida durante el período de descarga, la cual es mayor para el primer sistema, en donde las sobretensiones temporales tienen una duración relativamente larga.
- La utilización de estos modelos tienen como punto de partida los datos de los fabricantes, dichos datos deben ser: longitud del descargador, número de columnas de varistores, máximo voltaje de descarga para 10 kA cuando se le aplica un impulso de corriente de 8/20 μ s y voltaje de descarga tipo maniobra para una onda de corriente de 30/60 μ s. En caso de no poseer estos datos, para efectos de planificación de la red, se pueden tener datos típicos de acuerdo al voltaje máximo de la red.

6.2. RECOMENDACIONES

- Para asegurar un mejor rendimiento y garantizar una protección óptima contra sobrevoltajes, las pruebas de los descargadores de sobrevoltajes se las deben realizar en condiciones climáticas diferentes.
- Los modelos matemáticos de descargadores a nivel de alto y extra alto voltaje desarrollados en esta tesis pueden ser implementados como nuevas librerías del software ATP con el objeto de realizar los estudios que permitan una adecuada especificación en los procedimientos del proyecto y óptima explotación del sistema de energía eléctrica desde el punto de vista técnico y económico.
- El funcionamiento continuo de los descargadores de óxido de Zn añade una nueva serie de criterios de evaluación, como son la buena disipación de energía, el envejecimiento a largo plazo y la estabilidad térmica.
- Existen modelos más avanzados que toman en cuenta los aspectos térmicos del descargador, por lo que se recomienda esta tesis como punto de partida para el desarrollo de dichos modelos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MARTÍNEZ, Juan, "Power System Transients: Parameter Determination", CRC Press.
- [2] MARTÍNEZ, Juan, "Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión", Primera Edición, McGraw-Hill, España, 2008.
- [3] Siemens, HINRICHSEN, Volker, "Descargadores de Sobretensiones de Óxido Metálico: Fundamentos", Berlín, Septiembre de 2002.
- [4] ABB, High Voltage Technologies Ltd, "Dimensionamiento, ensayos y aplicación de los pararrayos de óxidos metálicos en redes de media tensión", Tercera edición, 1999.
- [5] ABB, "Descargadores de Sobretensiones de Alto Voltaje: Guía para el comprador", Edición 5, 2005-10.
- [6] ABB, "High Voltage Surge Arresters: Buyer's Guide", Edition 8, 2010-12.
- [7] GREENWOOD, Allan, "Electrical Transients in Power Systems", Second Edition, Mexico: Editorial John Wiley & Sons, Inc.
- [8] Alternative Transients Program Rule Book, K.U. Leuven EMTP Center.
- [9] HILEMAN, Andrew, "Insulation Coordination for Power Systems", CRC Press, 1999.
- [10] D'AJUZ, Ary; RESENDE, Fábio; SALGADO, Francisco; NUNES, Irapoan; FILHO, Jorge; NORA, Luiz; PEREIRA, Marco; FILHO, Oscar; MORAIS, Sergio; "Equipamentos Eléctricos: especificação e aplicação em subestações de alta tensão – FURNAS - Centrais Eléctricas S.A.", Brasil, 1985.
- [11] INTERNATIONAL STANDARD IEC 60099-4, "Surge arrester - Part 4: Metal-oxide surge arrester without gaps for a.c. systems", Edition 1.1, 1998-08.
- [12] INTERNATIONAL STANDARD IEC 60099-4, "Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arrester without gaps for a.c. systems", Edition 1.2, 2001-12.

- [13] INTERNATIONAL STANDARD IEC 60099-5, "Surge arresters - Part 5: Selection and application recommendations", Edition 1.1, 2000-03.
- [14] INTERNATIONAL STANDARD IEC 60071-1, "Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules", Seventh Edition, 1993-12.
- [15] INTERNATIONAL STANDARD IEC 60071-2, "Insulation co-ordination - Part 2: Application guide", Third Edition, 1996-12
- [16] ANSI C62.11-1999 "Metal-Oxide Surge Arrester for AC Power Circuits (>1 kV)", 1999.
- [17] IEEE Std 1313.2-1999 "Guide for the application of Insulation Coordination", 1999.
- [18] IEEE Working Group 3.4.11, "Modeling of metal oxide surge arresters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7 N° 1, 302–309, January 1992.
- [19] PINCETI P. and GIANNETTONI M, "A simplified model for zinc oxide surge arresters", IEEE Transactions on Power Delivery, 14(2), 393–398, April 1999.
- [20] RAMIREZ, Carlos, "Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión", Segunda edición, Bogotá: Mejía Villegas S.A.
- [21] MARGIL, AAnis, "Equipo Eléctrico 1: Iluminación y Alta Tensión", FIME División de Ingeniería eléctrica.
- [22] Juárez, Germán, "Pruebas predictivas a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo subestación", Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, Agosto 2005.
- [23] Fernández D, Cerdá S, "Espectroscopía de admitancias de banda ancha aplicada al control microestructural de propiedades eléctricas en varistores cerámicos", Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, ISSN 0366-3175, Vol. 43, N°. 3, 2004
- [24] Matsuoka, M, "Discovery of ZnO Varistor and their Progress for two Decades", pp. 3-9 en Ceramics Transactions, Vol 3: Advances in varistor Technology. Ohio.

- [25] EMC-UN, Grupo de investigación en Compatibilidad electromagnética, “Modelamiento de protecciones utilizando ATP”, Primera edición, Bogotá, 2008.
- [26] TRANSELECTRIC S.A., “Plan de Expansión de Transmisión 2010-2020”, Ecuador, Octubre 2009.
- [27] European EMTP-ATP, User Group Meeting ´97, Proceedings, November 9-11, 1997, Barcelona, Spain.
- [28] Méndez, David, “Fallas en una línea de transmisión provocadas por contaminación en el aislamiento”, Universidad Veracruzana, México, Febrero 2010.
- [29] Midsun Group, “Comparison Between Silicone Rubber Composite Insulators and RTV Coated Glass Insulator”, USA.
- [30] IEEE TF on Parameters of Lightning Strokes, “Parameters of lightning strokes: A review”, IEEE Transaction Power Delivery, Vol. 20 N° 1, 346-358, January 2005.
- [31] AGATE-WP3.1-031027-043-Design Guideline “Lightning Direct Effects Handbook”, March 1 2005.

ANEXOS

ANEXO 1: Características del descargador de sobrevoltajes con revestimiento de silicona del fabricante ABB utilizado en la modelación.

Descargador de óxido de cinc HS PEXLIM P-T

Para la protección contra sobretensiones atmosféricas y de funcionamiento de subestaciones de alta tensión, transformadores y otros equipos en redes de alta tensión.

- en zonas con intensidad de descargas atmosféricas muy alta
- en lugares donde las condiciones de puesta a tierra o apantallamiento son deficientes o incompletas
- para instalaciones importantes



- donde los requisitos energéticos son muy altos (por ejemplo, líneas muy largas, protección de condensadores, etc.).
- Ideales para aplicaciones con una gran actividad sísmica.

Excelentes para aplicaciones con requisitos de bajo peso, robustez y seguridad adicional del personal.

Sumario de datos de rendimiento

Tensiones de red (U_m) _m	245 -550 kV
Tensiones nominales (U_n)	180 -444 kV
Corriente de descarga nominal (IEC)	20 kA _{plca}
Corriente de clasificación (ANSI/IEEE)	10/15 kA _{plca}
Resistencia de corriente de descarga	
Corriente alta 4/10 μ s	100 kA _{plca}
Corriente baja 2000 μ s	1.350 A _{plca}
Capacidad de energía:	
Clase de descarga de línea (IEC)	Clase 4
[2 impulsos, (IEC Cl. 8.5.5)]	10,5 kJ/kV (U_n)
Cumple con/sobrepasa los requisitos de la prueba de descarga de líneas de transmisión ANSI para sistemas de 362 kV.	
Capacidad de cortocircuito/alivio de presión	65 kA _{sim}
Aislamiento externo	Cumple con/sobrepasa las normas
Resistencia mecánica:	
Carga de servicio estática admisible declarada (DPSSL)	19.000 Nm
Carga de servicio dinámica admisible máxima (MPDSL)	28.000 Nm
Condiciones de funcionamiento:	
Temperatura ambiente	-50 °C a +40 °C
Altitud de diseño (Mayores altitudes bajo pedido)	máx. 1.000 m
Frecuencia	15 - 62 Hz

Datos de protección garantizados

Tensión máxima de red	Tensión nominal	Tensión de trabajo continuo máxima 1)		Capacidad de sobretensiones temporales 2)		Tensión residual máxima con onda de corriente						
		según IEC	según ANSI/IEEE	1 s	10 s	30/60 µs			8/20 µs			
						U _C	MCOV	1 s	10 s	1 kA	2 kA	3 kA
U _m	U _r	U _C	MCOV	1 s	10 s	1 kA	2 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
kV _{rms}	kV _{rms}	kV _{rms}	kV _{rms}	kV _{rms}	kV _{rms}	kV _{pico}	kV _{pico}	kV _{pico}	kV _{pico}	kV _{pico}	kV _{pico}	kV _{pico}
245	180	144	144	208	198	351	364	373	390	410	449	492
	192	154	154	222	211	375	388	398	415	437	479	525
	228	156	180	264	250	445	461	473	493	519	568	623
300	228	182	182	264	250	445	461	473	493	519	568	623
	240	191	191	278	264	468	485	497	519	546	598	656
	264	191	212	306	290	515	534	547	571	601	658	721
362	258	206	209	299	283	504	522	535	558	587	643	705
	264	211	212	306	290	515	534	547	571	601	658	721
	276	221	221	320	303	539	558	572	597	628	688	754
380	288	230	230	334	316	562	582	597	623	656	718	787
400	300	240	240	348	330	585	607	622	649	683	748	819
420	330	264	267	382	363	644	667	684	714	751	823	901
	360	267	291	417	396	702	728	746	779	819	897	983
	390	267	315	452	429	761	788	808	843	888	972	1070
550	396	317	318	459	435	773	800	820	856	901	987	1086
	420	336	336	487	462	819	849	870	908	956	1051	1152
	444	349	353	515	488	866	897	920	960	1015	1111	1217

Para información más detallada sobre la capacidad de sobretensiones temporales (TOV) las características de protección, ver la publicación 1HSM 9543 13-01en.

1) Las tensiones de operación continua U_C (según IEC) y MCOV (según ANSI) sólo se diferencian debido a las desviaciones en los procedimientos de pruebas tipo.

U_C sólo debe considerarse cuando la tensión de red real es superior a la indicada.

Se puede seleccionar cualquier descargador con U_C superior o igual que la tensión de red real dividida por $\sqrt{3}$.

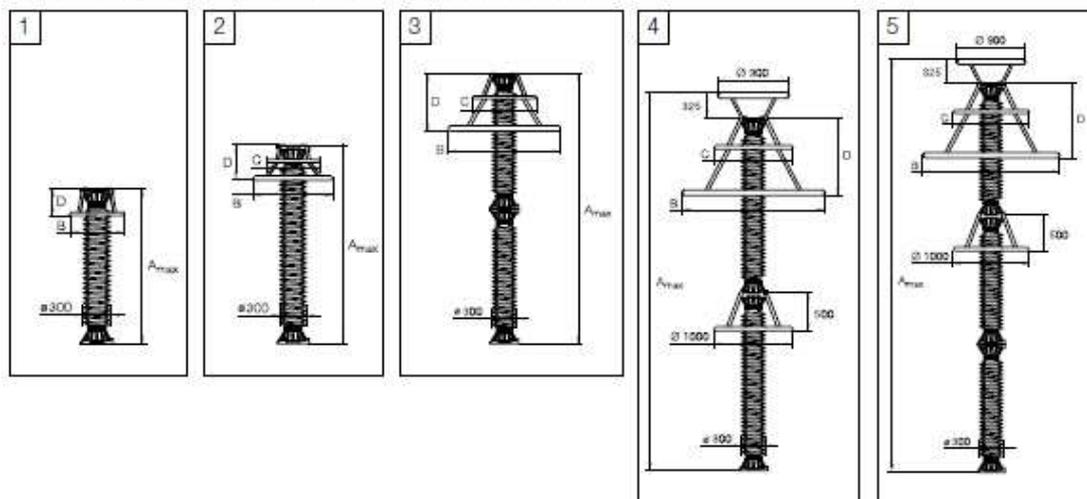
2) Con servicio anterior igual a la carga energética máxima de impulso simple (7,0 kJ/kV (U_r)).

A petición del cliente se pueden suministrar descargadores con tensiones inferiores o superiores para aplicaciones especiales.

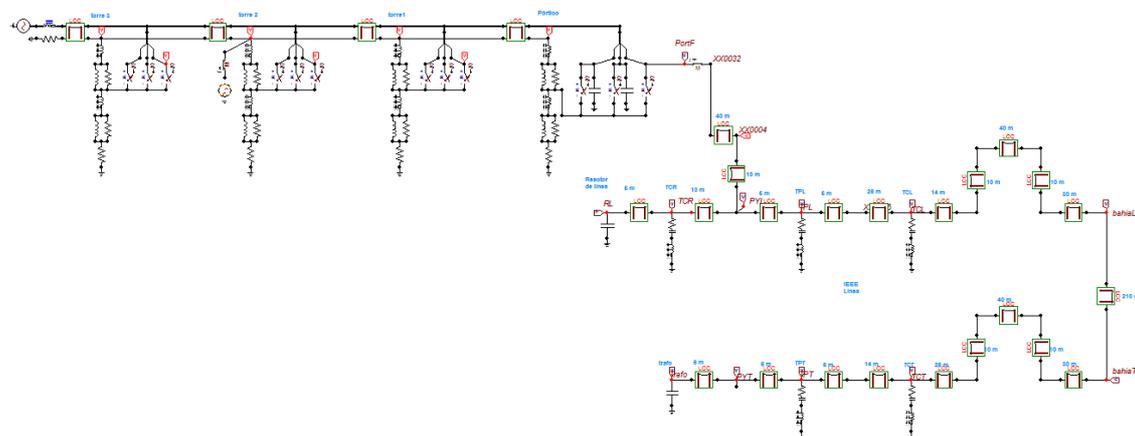
Datos técnicos de los revestimientos

Tensión máxima de red	Tensión nominal	Revestimiento	Distancia de fuga	Aislamiento externo *)				Dimensiones					
				1,2/50 μ s seco	50 Hz húmedo (60s)	60 Hz húmedo (10s)	250/2.500 μ s húmedo	Masa kg	A_{max}	B	C	D	Fig.
U_m kV _{rms}	U_f kV _{rms}		mm	kV _{pico}	kV _{rms}	kV _{rms}	kV _{pico}						
245	180-192	TM245	4950	750	350	350	525	115	1770	600	-	300	1
	180-192	TH245	6950	1081	524	510	750	150	2310	800	-	500	1
	228	TH245	6950	1081	524	510	750	150	2310	600	-	300	1
300	228-264	TM300	6950	1081	524	510	750	150	2310	900	600	400	2
	228	TV300	9900	1500	700	700	1050	245	3495	1400	800	700	3
	240	TV300	9900	1500	700	700	1050	245	3495	1200	800	600	3
	264	TV300	9900	1500	700	700	1050	235	3495	900	600	500	3
362	258-264	TH362	9900	1500	700	700	1050	245	3495	1600	800	1000	3
	276	TH362	9900	1500	700	700	1050	240	3495	1200	800	800	3
380	288	TH380	9900	1500	700	700	1050	240	3495	1400	800	700	3
400	300	TM400	9900	1500	700	700	1050	240	3495	1400	800	700	3
420	330-390	TH420	11900	1831	874	860	1275	270	4035	1200	800	800	3
550	396	TH550	13900	2162	1048	1020	1500	315	4890	1800	1000	1000	4
	420	TH550	13900	2162	1048	1020	1500	315	4890	1800	1000	800	4
	444	TH550	14850	2250	1050	1050	1575	365	5540	1800	1000	1000	5

*) Suma de las tensiones de resistencia para unidades vacías de descargador.



ANEXO 3: Esquema en ATPDraw utilizado para la simulación de sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas en el sistema eléctrico de 500 kV.



ANEXO 4: Esquema en ATPDraw utilizado para la simulación de sobrevoltajes en el sistema eléctrico de 230 kV.

