

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

Análisis de los sobre voltajes en sistemas de transmisión con discontinuidades determinadas por líneas aéreas, cables y subestaciones aisladas en SF6, usando ATP-EMTP.

Análisis de los sobre voltajes de frente lento (maniobra) en sistemas de transmisión con discontinuidades determinadas por líneas aéreas y cables aislados, usando ATP-EMTP.

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

PABLO SEBASTIÁN GRANJA DE LA TORRE

pablo.granja@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. LUIS EDMUNDO RAULES CORRALES

luis.ruales@epn.edu.ec

Quito, abril 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Pablo Sebastián Granja De La Torre declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.


PABLO SEBASTIÁN GRANJA DE LA TORRE

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Pablo Sebastián Granja De La Torre, bajo mi supervisión.


Ing. LUIS RUALES
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

PABLO SEBASTIÁN GRANJA DE LA TORRE

Ing. LUIS EDMUNDO RUALES CORRALES

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedicó a mi madre y a mi hermano, que siempre han estado para mí. Los amo con todo el corazón. Y a mí, por haber llegado tan lejos.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mi madre, por darme todo lo que siempre necesite, pero lo más importante, su amor y apoyo incondicional.

Quiero agradecer a mi hermano, por ser la persona que más quiero en este mundo, que sé que siempre está apoyándome de igual manera que yo estoy ahí para él.

A mis tíos, tías y abuelitos que siempre estuvieron allí, apoyándome de manera constante y siempre esperando lo mejor de mí.

A mis amigos del colegio que, si bien hemos tenido diferencias, saben que forman una parte de mi vida que es irremplazable.

Quiero agradecer a mis compañeros por siempre creer en mí, aunque yo a veces haya palidecido. Gracias Luis, Josua, Jordin y Ricardo, saben que los aprecio de sobremanera y espero podamos coincidir en un futuro.

Y finalmente, agradecer a la vida por permitirme llegar a este punto tan crucial, que es un paso gigante que me ha costado dar, pero aquí estoy y estoy orgulloso de lo que he logrado.

ÍNDICE

1	DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.1	Objetivo general	1
1.2	Objetivos específicos	1
1.3	Alcance	2
1.4	Marco teórico	2
1.4.1	Parámetros Distribuidos	2
1.4.2	Ondas Viajeras	4
1.4.2.1	Reflexión y refracción de ondas viajeras	6
1.4.3	Diferenciación de sobrevoltajes temporales y transitorios	9
1.4.4	Sobrevoltajes transitorios	9
1.4.4.1	Sobrevoltajes transitorios de frente lento	10
1.4.5	Cables aislados	11
1.4.5.1	Conductor	12
1.4.5.2	Aislamiento eléctrico	12
1.4.5.3	Cubierta metálica	13
1.4.5.4	Sobrevoltajes transitorios de frente lento en discontinuidades definidas por líneas aéreas y cables aislados	14
1.4.6	Pararrayos	14
2	METODOLOGÍA	15
2.1	Programa digital ATP	16
2.1.1	Componentes empleados	17
2.1.1.1	Módulo de fuente AC	17
2.1.1.2	Módulo de redes de secuencia trifásicas de línea	17
2.1.1.3	Módulo saturable, transformador trifásico	17
2.1.1.4	Módulo ICC, Parámetros de líneas de transmisión y cables	17
2.1.1.5	Módulo MOV Type 92, pararrayos	18
2.1.1.6	Módulo inductancia	18
2.1.1.7	Módulo interruptor estadístico	18
2.1.2	Planteamiento del sistema de prueba	18
2.1.2.1	Modelo del generador	20
2.1.2.2	Modelo del transformador	22
2.1.2.3	Modelo de la línea aérea	24
2.1.2.4	Modelo del cable aislado	26
2.1.2.5	Modelo del pararrayos	28
2.1.2.6	Módulo del interruptor estadístico	29
2.1.3	Estudio de casos	31
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	32
3.1	Resultados	32
3.1.1.1	CASO I: Influencia del uso de reactores	33
3.1.1.2	CASO II: Variación en la proporción línea aérea/cable aislado	34
3.1.1.3	CASO III: Intercambio de segmentos	35
3.1.1.4	CASO IV: Aumento en la longitud del cable aislado	35
3.1.1.5	CASO V: Aumento de una porción de línea aérea al final del cable aislado	36
3.1.1.6	CASO VI: Influencia del uso de pararrayos	37

3.2	Conclusiones	38
3.3	Recomendaciones	39
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
5	ANEXOS	42

RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular se basa en el análisis de sobrevoltajes transitorios de frente lento en sistemas eléctricos de potencia con discontinuidades definidas por líneas de transmisión aéreas y cables aislados para entender la problemática que esto conlleva y así, poder encontrar nuevas formas de implementar estas configuraciones a corto plazo.

El análisis se realiza para distintos casos sobre un sistema de prueba que se implementó en el software ATP, para el cual se modela cada una de las partes de la red para poder parametrizar los distintos módulos que se utilizaron.

Se seleccionaron casos de estudio con el fin de evaluar el comportamiento de cada una de las características de interés de los cables aislados, para así poder comprender de mejor manera como estos pueden llegar a influir sobre los sobrevoltajes transitorios de frente lento y prever métodos de mitigación con anterioridad.

Los resultados de cada prueba fueron presentados de manera individual, comparando los valores de sobrevoltajes obtenidos con respecto a los del caso base, evaluando el comportamiento de los sobrevoltajes, dando un sentido en base a teoría de cables e identificando las peores situaciones en que pueden ocurrir estos fenómenos en la práctica real.

PALABRAS CLAVE: Sobrevoltajes transitorios de frente lento, Ondas viajeras, Cable aislado, Línea aérea, Simulación estadística, Pararrayos.

ABSTRACT

This curricular curricular integration work is based on the analysis of slow front transient overvoltages when there are discontinuities defined by overhead lines and insulated cables, in order to understand the problems that this involves and thus, to be able to find new ways to implement these configurations in the short term.

The analysis is carried out for different cases on a test system that was implemented in the ATP software, for which each of the parts of the network was modeled in order to parameterize the different modules that were used.

Study cases were selected in order to evaluate the behavior of each of the characteristics of interest of the insulated cables, to better understand how these can influence slow-front transient overvoltages and anticipate mitigation methods on time.

The results of each test were presented individually, comparing the overvoltage values obtained with respect to the base case ones, evaluating the behavior of overvoltages, giving a sense based on cable theory and identifying the worst situations in which these phenomena can occur in real practice.

KEYWORDS: Slow front transient overvoltages, Traveling waves, Insulated cable, Overhead line, Statistical simulation, Surge arresters.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Debido a restricciones para las construcciones de líneas de transmisión aéreas tanto por aspectos ambientales en áreas protegidas o por regulaciones establecidas por los Gobiernos Autónomos Descentralizados en áreas urbanas es necesario recurrir al uso de sistemas de transmisión conformados por secciones de cables aislados de alto voltaje, usualmente instalados en forma subterránea, conjuntamente con secciones de líneas aéreas de transmisión. No obstante, al contar con este tipo de configuraciones en sistemas de transmisión es importante investigar el comportamiento de dichas configuraciones ante sobrevoltajes de frente lento, particularmente en los cables aislados. En este componente del trabajo de integración curricular se realizará el análisis de los sobrevoltajes de frente lento (energización) en sistemas de transmisión que presentan discontinuidades conformadas por líneas de transmisión aéreas y cables de aislados de alto voltaje, usando la herramienta computacional ATP-EMTP. El análisis se efectuará en un sistema eléctrico de prueba, en el cual se modelarán sus componentes para la simulación de las maniobras de energización para determinar las magnitudes de voltajes producidos en los puntos de transición (discontinuidad) entre la línea aérea y el cable aislado.

1.1 Objetivo general

Analizar mediante el uso del software ATP (Alternative Transient Program) los sobrevoltajes de frente lento, originados por la energización de sistemas de transmisión con secciones de líneas aéreas y de cables aislados

1.2 Objetivos específicos

- Realizar una investigación bibliográfica sobre los sobrevoltajes producidos por la energización de sistemas de transmisión compuestos por secciones de líneas aéreas y cables aislados.
- Determinar los modelos para cada uno de los componentes del sistema de transmisión de prueba y sus parámetros asociados.
- Familiarizarse sobre la operación de la herramienta digital ATP y realizar las simulaciones correspondientes en el sistema de transmisión de prueba, para determinar los sobrevoltajes de energización (maniobra) del sistema de transmisión.
- Realizar el análisis de los resultados obtenidos, en base a los cuales se establecerán las conclusiones.

1.3 Alcance

Como punto inicial se efectuará la investigación bibliográfica características de cables aislados de alto voltaje y energización de líneas de transmisión, considerando las discontinuidades producidas por secciones de líneas de transmisión aéreas y secciones de cables aislados como parte de una misma línea de transmisión, particularmente en cuanto al comportamiento de las ondas viajeras.

Considerando que el análisis será efectuado haciendo uso del ATP (Alternative Transient Program), se analizarán las prestaciones, modelos de componentes, modos de simulación y operación de esta herramienta computacional.

En un sistema de transmisión de prueba, se determinarán los modelos de los componentes teniendo en consideración la frecuencia del fenómeno a ser analizado. De ser necesario el uso de elementos de control de los sobrevoltajes, estos serán modelados e incluidos en las simulaciones. Se ejecutarán las simulaciones de los diferentes casos, con el análisis correspondiente de los resultados obtenidos.

Finalmente, se procederá a la redacción del documento en el que se presentarán las conclusiones, recomendaciones y bibliografía utilizada.

1.4 Marco teórico

Para un correcto entendimiento de los análisis que se realizan en tema de sobrevoltajes transitorios es necesario plantear de manera clara y concisa los principales fundamentos teóricos que se usarán en el presente trabajo.

Se empezará por plantear conceptos de impedancia característica y parámetros distribuidos para líneas de transmisión, necesarios para la introducción a ondas viajeras y sus coeficientes de reflexión y refracción. Luego, se tratará el tema de los sobrevoltajes y su clasificación de manera simplificada, centrándose en los sobrevoltajes de frente lento (maniobra) que son los concernientes al análisis que se realizará. Finalmente, se adentrará en los métodos de mitigación de estos fenómenos, más específicamente el pararrayos.

1.4.1 Parámetros Distribuidos

Se dice que un sistema tiene parámetros concentrados cuando al momento de producirse un disturbio en cualquier lugar, este se propaga de manera instantánea a cualquier otro punto del sistema, es decir, todo el sistema “siente” la perturbación al mismo tiempo. Esto

ocurre cuando la mayor dimensión física del sistema es considerablemente menor que la longitud de onda de la mayor frecuencia significativa. Los sistemas con este tipo de parámetros concentrados pueden ser modelados por ecuaciones diferenciales ordinarias.

Sin embargo, cuando el sistema ya tiene una extensión mucho mayor, se habla de parámetros distribuidos, ya que en caso de ocurrir un disturbio existe un tiempo finito en el que dicha perturbación es transmitida desde un punto hasta otro del sistema, haciendo que la variable del espacio tenga una interacción directa con la variable independiente tiempo. La modelación de estos sistemas con parámetros distribuidos se representa con ecuaciones diferenciales parciales.

En este sentido, se puede decir que todos los sistemas tienen parámetros distribuidos, los cuales influyen más o menos en las ondas de voltaje y corriente dependiendo de la extensión del sistema. Para los modelos de líneas de transmisión, cada segmento infinitesimal de la línea posee sus respectivas características de inductancia, resistencia y capacitancia. En líneas cortas con parámetros concentrados, se ignora la capacitancia en paralelo por su valor despreciable, en líneas medias se usa el modelo con parámetros concentrados, que puede ser en configuración T o π , y para las líneas largas se usan modelos con parámetros distribuidos.

Para aclarar las diferencias entre ambos modelos se plantea la Figura 1, en la que muestra una línea de transmisión con parámetros distribuidos, mientras que la Figura 1.b muestra su equivalente con parámetros concentrados.

Si se aplica la ley de voltaje de Kirchoff en el segmento entre los nodos P y Q se obtiene la siguiente ecuación:

$$v - (v + \Delta v) = R \cdot \Delta x \cdot i + L \cdot \Delta x \cdot \frac{di}{dt} \quad (1.1)$$

Simplificando la ecuación (1.1) y reordenándola se obtiene:

$$-\frac{\Delta v}{\Delta x} = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} \quad (1.2)$$

Obteniendo el límite de Δx cuando tiende a cero, se obtiene la siguiente ecuación diferencial parcial:

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = R \cdot i + L \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad (1.3)$$

Haciendo el mismo análisis, se aplica la ley de corrientes de Kirchoff al nodo P, para obtener la ecuación:

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = G \cdot v + C \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1.4)$$

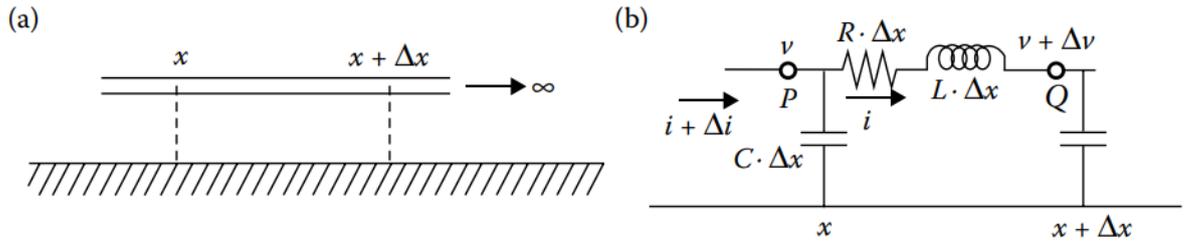


Figura 1. Representación de una línea de transmisión a) con parámetros distribuidos, b) con parámetros concentrados [1]

1.4.2 Ondas Viajeras

Si se asume una línea sin pérdidas ($R = G = 0$) y se derivan las ecuaciones (1.3) y (1.4) con respecto a x se tiene que:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -L \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} = -C \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (1.6)$$

Reemplazando la ecuación (2.2) en la ecuación (2.1) se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (1.7)$$

Resolviendo las ecuaciones (1.3) y (1.4) para i en lugar de para v se obtiene el mismo resultado para la corriente:

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (1.8)$$

Las ecuaciones (1.7) y (1.8) son las llamadas ecuaciones de onda de una línea de transmisión. Las soluciones generales para estas ecuaciones son:

$$\begin{aligned} v &= e_f(x - c_0t) + e_b(x + c_0t) \\ i &= Y_0[e_f(x - c_0t) - e_b(x + c_0t)] \end{aligned} \quad (1.9)$$

En función de la distancia

$$\begin{aligned} v &= E_f \left(t - \left(\frac{x}{c_0} \right) \right) + E_b \left(t + \left(\frac{x}{c_0} \right) \right) \\ i &= Y_0 \left(E_f \left(t - \left(\frac{x}{c_0} \right) \right) - E_b \left(t + \left(\frac{x}{c_0} \right) \right) \right) \end{aligned} \quad (1.10)$$

En función del tiempo, donde:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \left(\frac{m}{s} \right) \text{ es la velocidad de la luz en vacío}$$

$$c_0 C = \frac{1}{\sqrt{LC}} C = \sqrt{\frac{C}{L}} = Y_0 \text{ es la admitancia característica [S]} \quad (1.11)$$

$$Z_0 = \frac{1}{Y_0} = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ es la impedancia característica } [\Omega]$$

El comportamiento de las ecuaciones se describe, en un sentido físico, como ondas que viajan a lo largo del eje x a una velocidad c_0 . Los valores de e_b, e_f, E_b y E_f no varían si $x - c_0t$ o $x + c_0t$ son constantes, por lo que e_f y E_f son consideradas ondas viajeras hacia adelante, ya que tienen velocidad positiva $c_0 = \frac{x}{t}$, mientras que e_b y E_b son ondas viajeras hacia atrás, lo que significa que viajan en dirección $-x$, con velocidad negativa $c_0 = -\frac{x}{t}$. Cuando estas ondas viajan a velocidad constante se las denomina ondas viajeras.

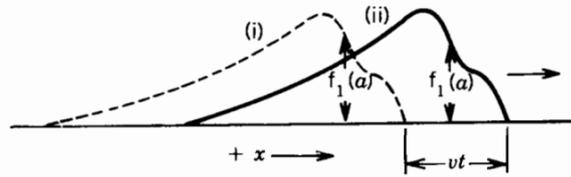


Figura 2. Representación del comportamiento de una onda viajera i) en $t = 0$, ii) en $t = \tau$
[2]

Habiendo hecho la convención de la dirección de viaje de las ondas, se pueden reescribir las ecuaciones (2.5) de la siguiente manera:

$$v = e_f + e_b \quad (1.12)$$

$$i = Y_0(e_f - e_b) = i_f - i_b$$

Donde:

e_f, e_b son los valores pico de voltaje de las ondas viajeras.

i_f, i_b son los valores pico de corriente de las ondas viajeras.

Las ecuaciones (1.12) son las ecuaciones más importantes y básicas a partir de las cuales se realiza el análisis de ondas viajeras y las ondas viajeras deben ser determinadas por una condición límite.

1.4.2.1 Reflexión y refracción de ondas viajeras

Las ecuaciones (1.12) demuestran que en líneas de transmisión hay una proporcionalidad clara entre las ondas de voltaje con sus respectivas ondas de corriente, la cual está definida por la impedancia característica de la línea Z_0 . Por esta razón, cuando aparece una discontinuidad en la red, es decir, existe un cambio en la impedancia característica por la que atraviesan las ondas, como puede ser el caso de una discontinuidad entre una línea de transmisión aérea y un cable subterráneo, ocurre un fenómeno cuyo fin es el de obligar a que está proporción entre las ondas de voltaje y corriente se mantenga. Este fenómeno provoca el apareamiento de dos nuevos pares de ondas, la onda reflejada de voltaje que regresa por la línea superponiéndose a la onda de voltaje incidente, y la onda transmitida de voltaje que continúa viajando a través de la discontinuidad. Cada una de estas ondas de voltaje viaja con su respectiva onda de corriente. Las magnitudes de estas ondas

reflejadas y transmitidas es tal que mantiene la proporcionalidad entre el voltaje y la corriente, impuesta por las impedancias características del medio por el que las ondas están viajando. Tanto el voltaje como la corriente en la discontinuidad de la línea son continuos y la energía se mantiene constante.

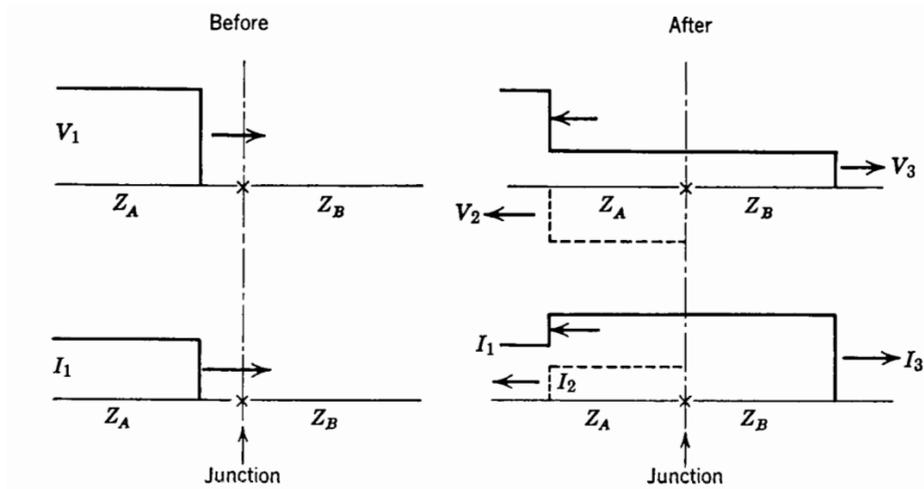


Figura 3. Ondas de voltaje y corrientes transmitidas y reflejadas en una discontinuidad [2]

Para el siguiente análisis se considera dos impedancias características Z_A y Z_B , donde cada una corresponde a dos tramos distintos de la línea de transmisión y, además $Z_A > Z_B$. Para mejor entendimiento véase la Figura 3. Supóngase que una onda de voltaje función paso y amplitud V_1 se aproxima a la intersección por la línea aérea, la onda de corriente tendrá la misma forma de la función paso y con una amplitud:

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_A} \quad (1.13)$$

Se define la onda reflejada de voltaje V_2 y la onda transmitida de voltaje V_3 , así como sus respectivas corrientes son:

$$I_2 = -\frac{V_2}{Z_A} \quad (1.14)$$

$$I_3 = \frac{V_3}{Z_B} \quad (1.15)$$

Por conveniencia, se define la dirección positiva del eje x como la dirección en la que viaja la onda incidente. Por lo tanto, se evidencia que la corriente I_2 está viajando en dirección

opuesta al voltaje V_2 , en dirección $-x$. Como ya se mencionó, la corriente y el voltaje en la intersección debe ser continuos, por lo que se afirma:

$$V_1 + V_2 = V_3 \quad (1.16)$$

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1.17)$$

Substituyendo las ecuaciones (1.13), (1.14) y (1.15) en la ecuación (3.5):

$$\frac{V_1}{Z_A} - \frac{V_2}{Z_A} = \frac{V_3}{Z_B} \quad (1.18)$$

Se reescriben a partir de las ecuaciones (1.16) y (1.18) las ecuaciones de las ondas reflejada y transmitida de voltaje en función de la onda incidente:

$$V_2 \left(\frac{Z_B + Z_A}{Z_B Z_A} \right) = V_1 \left(\frac{Z_B - Z_A}{Z_A Z_B} \right) \quad (1.19)$$

$$V_2 = \left(\frac{Z_B - Z_A}{Z_A + Z_B} \right) V_1$$

El valor encerrado en paréntesis de la ecuación (1.19) se denomina el coeficiente de reflexión y se lo suele denotar con la letra a . Como es evidente, el valor de a puede ser positivo o negativo dependiendo de las magnitudes de Z_A y Z_B , y se encuentra entre -1 y 1. En este caso en particular, se definió $Z_A > Z_B$, por lo tanto, el valor de a es negativo.

De la misma manera, si se despeja V_2 de las ecuaciones (1.16) y (1.18):

$$V_3 \left(\frac{Z_B + Z_A}{Z_B Z_A} \right) = \frac{2V_1}{Z_A} \quad (1.20)$$

$$V_3 = \left(\frac{2Z_B}{Z_B + Z_A} \right) V_1$$

El valor encerrado en paréntesis de la ecuación (1.20) es llamado el coeficiente de transmisión y se lo suele denotar con la letra b . b se puede encontrar entre 0 y 2, dependiendo los valores relativos de Z_A y Z_B

1.4.3 Diferenciación de sobrevoltajes temporales y transitorios

Es importante diferenciar entre los sobrevoltajes temporales y transitorios. Un sobrevoltaje temporal es ocasionado por una condición atípica en el sistema eléctrico como puede ser una falla en la línea, en algún punto de la red, y es evaluado por la solución en estado estable del sistema en condición de falla. Un ejemplo de sobrevoltaje por una falla línea a tierra se presenta en la Figura 4. Inmediatamente después de la ocurrencia de la falla línea a tierra, aparece un sobrevoltaje transitorio que decae a los pocos milisegundos. Luego de este tiempo, se observa el aparecimiento del sobrevoltaje temporal.

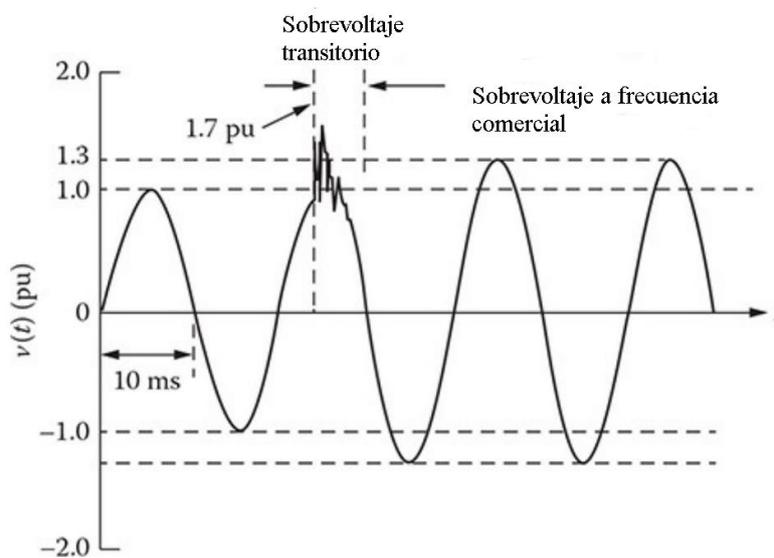


Figura 4. Sobrevoltajes transitorios y temporales por falla línea – tierra [1]

Un sobrevoltaje transitorio en una línea de parámetros distribuidos es producido por el aparecimiento de ondas viajeras ocasionadas por circunstancias internas o externas al sistema. El valor de este sobrevoltaje suele ser considerablemente mayor que el del sobrevoltaje temporal, por lo que el aislamiento del sistema debe ser diseñado para resistir los sobrevoltajes transitorios que se pueden presentar, haciendo que su determinación sea de suma importancia para garantizar la seguridad y confiabilidad de la red.

1.4.4 Sobrevoltajes transitorios

Los transitorios tienen tres principales fuentes de aparecimiento:

- Sobrevoltajes temporales.
- Sobrevoltajes de frente lento (maniobra)

- Sobrevoltajes de frente muy rápido (usualmente producidos por maniobras de seccionadores en subestaciones aisladas en SF6)

Cada tipo de sobrevoltaje está caracterizado por su frecuencia, tiempo de frente de onda y tiempo hasta la cola, en los términos definidos por las normas correspondientes tanto IEC como ANSI – IEEE.

1.4.4.1 Sobrevoltajes transitorios de frente lento

Para el desarrollo del presente trabajo son de interés los sobrevoltajes de frente lento originados por la energización de líneas de transmisión, sean líneas aéreas o cables de alto voltaje.

Menos del 1% de los cortocircuitos que ocurren en un sistema eléctrico de potencia son producidos por sobrevoltajes de maniobra. [3] Estos van cobrando relevancia a medida que aumenta la magnitud del sistema y sus voltajes nominales. Por sobre un voltaje nominal de 230 kV, el aislamiento del sistema está determinado, esencialmente, por sobrevoltajes de frente lento (maniobras)

Mientras que los sobrevoltajes de origen atmosférico definen el aislamiento de los sistemas hasta 230 kV.

Los sobrevoltajes de maniobra de mayor magnitud ocurren durante eventos de energización y re-energización de líneas de transmisión de alto voltaje en condiciones de circuito abierto. En la Figura 5.a se muestra la energización de una línea con impedancia característica Z_0 y de longitud l , a circuito abierto. Antes del cierre del interruptor que alimenta a la línea, el voltaje en terminales de la fuente es igual al voltaje del sistema y, evidentemente, el voltaje en la línea es cero. Una vez que se cierra el interruptor, el voltaje en terminales de la alimentación se incrementa rápidamente desde cero hasta el valor del voltaje del sistema de potencia. Este voltaje se representa a través de una onda viajera cuyo valor pico transitorio se representa con U_m , que interactúa con los parámetros de la fuente y de la línea.

La determinación del voltaje transitorio tiene cierta complejidad, además depende del ángulo por el que se encuentre pasando la onda de voltaje en el momento del cierre del interruptor. En el instante $t = t_1$, ocurre la máxima superposición entre el voltaje transitorio y el voltaje de nominal del sistema, como se aprecia en la Figura 5.

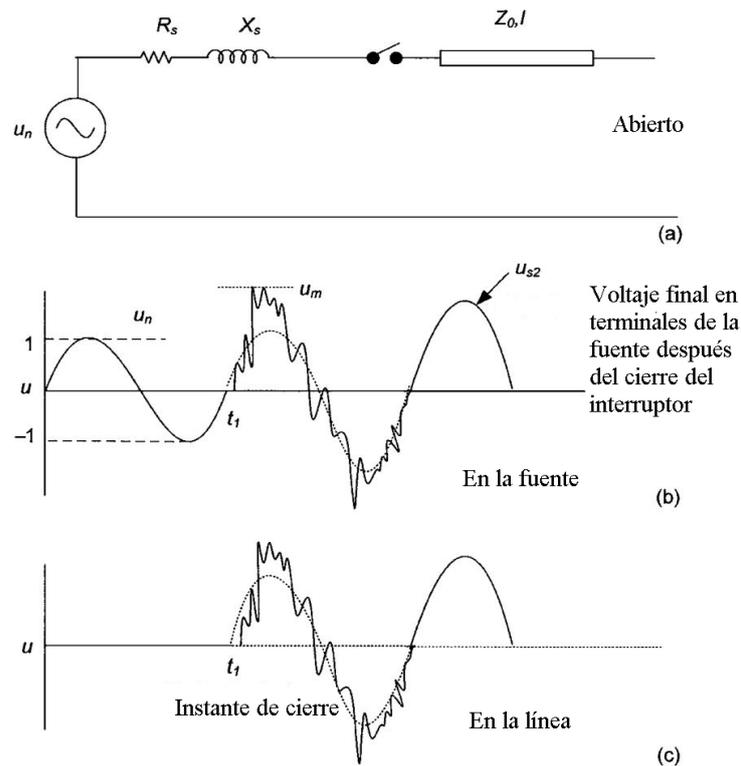


Figura 5. a) Maniobra de cierre de una línea en condiciones de circuito abierto b) Perfil de voltaje después de la energización, en terminales de alimentación c) Perfil de voltaje después de la energización, al final de la línea [3]

La magnitud de los ángulos de cierre de interruptores en líneas de transmisión da lugar a sobrevoltajes transitorios de alta frecuencia y sus respectivas corrientes de excitación transitoria, causando a su vez posibles daños en los aislamientos de los equipos, reduciendo su vida útil o provocando daños irreversibles.

1.4.5 Cables aislados

Los cables aislados poseen dos componentes principales: el conductor de corriente y el aislamiento que le permite soportar el voltaje fase – tierra. En su mayoría son cables de núcleo simple con una armadura.

Los cables poseen dos posibles configuraciones, de 4 o 6 capas:

- **Primera configuración:** conductor, aislamiento eléctrico, cubierta metálica, cubierta externa.
- **Segunda configuración:** conductor, aislamiento eléctrico, cubierta metálica, aislamiento eléctrico, armadura, cubierta externa.

1.4.5.1 Conductor

Los conductores del cable están hechos normalmente de aluminio (Al) o cobre (Cu), siendo el aluminio el predilecto para la construcción de cables debido a su baja densidad, logrando que el cable pese menos. Distintos tipos de diseño de conductores para cables se presentan en la Figura 6.

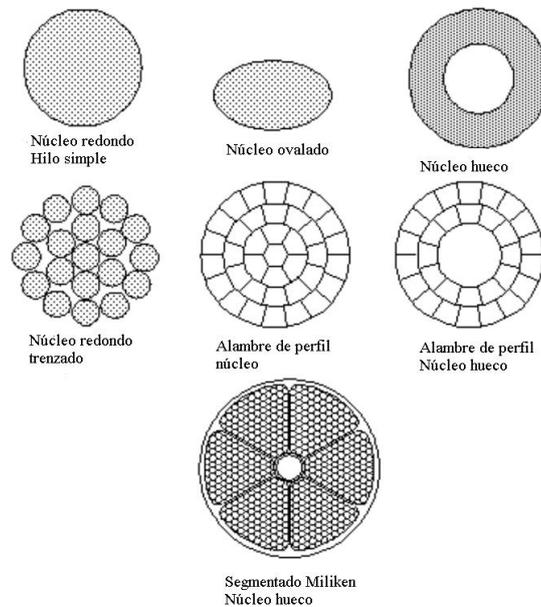


Figura 6. Tipos de conductores para cables de alto voltaje [4]

1.4.5.2 Aislamiento eléctrico

Existen 3 tipos de aislamientos comunes para cables de alto voltaje: impregnados con láminas multi-capas, papel lleno de aceite aislante y polímero extruido como XLPE o EPR, siendo estos últimos más ampliamente utilizados por sobre los otros dos tipos de aislamiento debido a sus ventajas:

- Menor capacitancia.
- Mayor capacidad de conducción de corriente.
- Menores pérdidas.
- Ausencia de fluidos aislantes.
- Menores costos de mantenimiento.

El propósito del aislamiento es proteger al conductor de factores externos y evitar la posible descarga entre los dos conductores que componen el cable: el núcleo y la cubierta metálica.

Debido a este aislamiento, se puede decir que los cables aislados de alto voltaje se asemejan mucho a largos capacitores cilíndricos, cuya corriente capacitiva I_c por fase será proporcional a la permitividad del dieléctrico ϵ_r y la sección transversal del mismo. Por esta razón, la longitud del cable debe ser limitada o controlada debido a la carga capacitiva que posee el cable.

1.4.5.3 Cubierta metálica

La cubierta metálica es una capa de metal que sirve como pantalla electrostática y como camino de regreso de la corriente de carga capacitiva. También sirve como la conducción a tierra de las corrientes de falla en caso de ocurrencia.

Para minimizar los posibles sobrevoltajes que se puedan producir en la cubierta metálica, se realiza la conexión llamada *screen bonding* que, básicamente, es la puesta a tierra de la cubierta metálica. El más común es el llamado *solid bonding* (véase Figura 7), donde ambos extremos de la cubierta se conectan a tierra. Este método se traduce en pérdidas en estado estable debido a la corriente inducida que circula por la cubierta metálica. El voltaje en la cubierta metálica es cercano a cero (potencial de tierra).

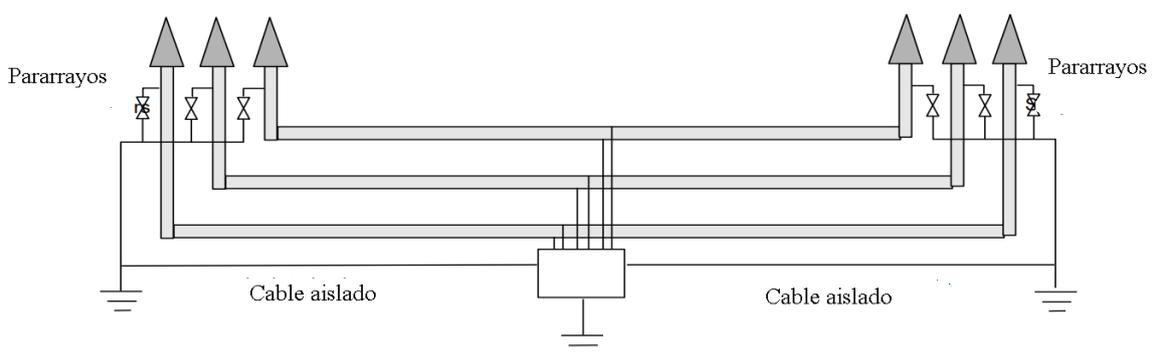


Figura 7. Método *solid bonding* para cubierta eléctrica del cable aislado [4]

1.4.5.4 Sobrevoltajes transitorios de frente lento en discontinuidades definidas por líneas aéreas y cables aislados

Se puede destacar algunas diferencias a consideración entre líneas de transmisión aéreas y cables aislados:

- La impedancia de la línea de transmisión aérea es menor que la impedancia del cable.
- La relación X/R del cable es mucho menos que el de una línea de transmisión aérea.
- La inductancia en serie de cables es de 30 a 50% menor que el de una línea de transmisión aérea.
- La secuencia cero del cable es variable y depende de algunos factores.
- La capacitancia en paralelo del cable es de 30 a 40 veces mayor que la capacitancia de la línea de transmisión aérea.
- Elevadas corrientes de carga producidas por maniobras de energización y desenergización en el momento de ocurrencia de una falla.

1.4.6 Pararrayos

El pararrayos es un elemento indispensable para la coordinación del aislamiento de sistemas eléctricos de potencia. Estos se encargan de proteger tanto la red como los equipos conectados, reduciendo el valor de los sobrevoltajes hasta un valor soportable por los aislamientos de los mismos. Están conformados por una resistencia variable en función del voltaje, cuya función es lograr que el pararrayos se comporte como una resistencia muy elevada en condiciones de operación normal y una resistencia muy pequeña en condiciones de conducción del pararrayos.

Estos se ubican entre una fase y tierra, lo más cerca posible a los elementos a proteger como transformadores, enviando la corriente asociada al sobrevoltaje a tierra.

La Figura 8 ilustra la coordinación de aislamiento, al presentar los posibles sobrevoltajes en el sistema, los sobrevoltajes soportados por los equipos y los voltajes limitados por los pararrayos para cada uno de los sobrevoltajes susceptibles de que ocurran en el sistema.

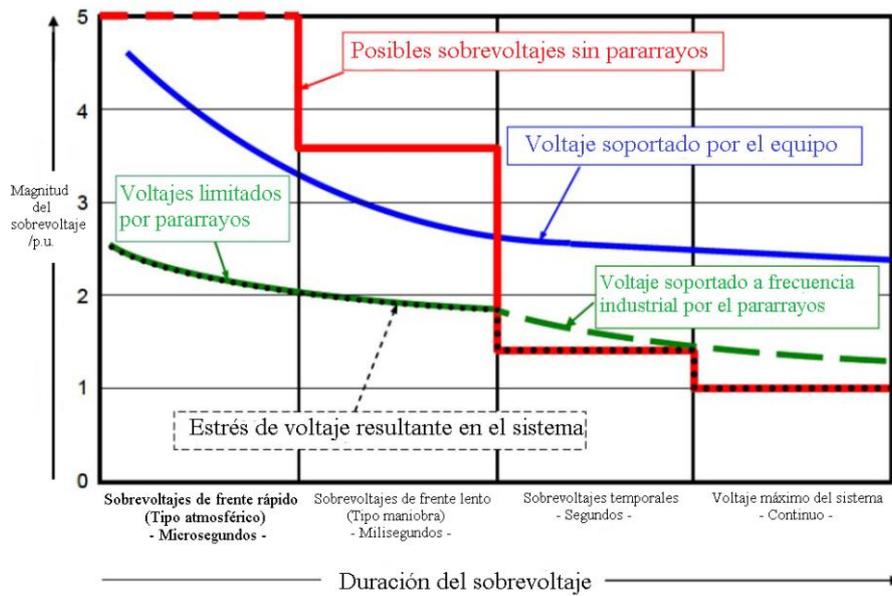


Figura 8. Magnitud de voltajes que se pueden presentar en un sistema eléctrico de potencia en relación con su duración [4]

En las conjunciones entre línea aérea y cables aislados tiene vital importancia la implementación de pararrayos, esto debido a la sensibilidad de los cables a los sobrevoltajes, que pueden llegar a dañar el aislamiento no autorrecuperante del cable.

Los pararrayos que se fabrican en la actualidad son de Óxido de Zinc (ZnO) que se caracterizan por no tener “gaps” o explosores y tienen una gran capacidad de disipación de energía.

2 METODOLOGÍA

El enfoque que se ha querido presentar en el trabajo es tanto cualitativo como cuantitativo, de tal manera que al presentar los datos obtenidos de las distintas pruebas (casos analizados), se pueda tener claro las condiciones en que estos se presentan, pudiendo entender, analizar y trabajar de mejor manera con sistemas de líneas de transmisión mixtas, haciendo que un tópico tan poco explorado como es el de los transitorios con estas configuraciones sea una alternativa más atractiva para la ingeniería del diseño en alto voltaje a corto plazo.

Para el desarrollo del trabajo, una vez teniéndose claros los conceptos básicos para el entendimiento del mismo, se procede a adentrarse en el programa ATP y sus componentes

que serán utilizados para la implementación del sistema y las pruebas simuladas. Luego se dará paso a la simulación de los casos en el sistema de prueba, presentando las características individuales de cada parte del sistema explicadas a detalle, de tal manera que se pueda replicar sin complicaciones.

2.1 Programa digital ATP

ATP (Alternative Transients Program) es un software utilizado para simulación de circuitos eléctricos, permite al usuario la modelación de sistemas eléctricos, mecánicos y de control, ya sea monofásicos o polifásicos, de manera más específica para análisis de transitorios electromagnéticos. Estudios típicos que se realizan con ATP son:

- Estudios de sobrevoltajes de origen atmosférico
- Transitorios producidos por maniobras y fallas
- Estudios de transitorios estadísticos y sistemáticos
- Modelación de máquinas
- Estudios de estabilidad transitoria, arranque de motores
- Oscilaciones por torción del eje
- Maniobras de transformadores y reactores y capacitores en paralelo
- Resonancia y ferresonancia
- Aplicaciones a electrónica de potencia
- Operación de interruptores (arco eléctrico)
- Modelación de dispositivos FACTS como STATCOM, SV, UPFC, TCSC.
- Análisis de armónicos
- Prueba de elementos de protección

El programa es, en esencia, el mismo que el conocido EMTP, surgiendo a partir de la negativa de DGC (EMTP Development Coordination Group) y EPRI (Electric Power Research Institute) de comercializar EMTP. Ante esta decisión, los doctores Scott Meyer y Tsui-huei Liu empezaron a desarrollar ATP, basándose en una copia de dominio público de EMTP para su comercialización, volviéndolo mucho más accesible.

Este programa funciona a partir de la implementación de un sistema eléctrico en la interfaz de usuario ATPDraw, en la cual se encuentran una lista de componentes los cuales se pueden utilizar para la creación de los circuitos, además de existir de posibilidad de programar nuevos o importar componentes de programas compatibles. Cada elemento puede ser editado de tal manera que se pueden introducir los parámetros y características que se requiera por el usuario. Entre los más importantes se tienen máquinas eléctricas,

fuentes de voltaje y corriente, interruptores, modelos de líneas y cables, ramas y sondas monofásicas y trifásicas, elementos lineales y no lineales, transformadores, sistemas de control (TACS), subrutinas MODELS, entre otra gran variedad.

A continuación, se muestran los componentes utilizados en el presente trabajo.

2.1.1 Componentes empleados

2.1.1.1 Módulo de fuente AC

Se usa una fuente de corriente alterna sinusoidal, de 60 Hz, registrada en ATP como tipo 14.

2.1.1.2 Módulo de redes de secuencia trifásicas de línea

Corresponde al modelo denominado en ATP a los parámetros de secuencia positiva y cero del generador. Asume que la impedancia de secuencia negativa es igual a la impedancia de secuencia positiva. Al tratarse de un evento transitorio, la reactancia de secuencia positiva corresponde a la reactancia subtransitoria del generador. La modelación se realiza como parámetros concentrados.

2.1.1.3 Módulo saturable, transformador trifásico

El módulo de transformador saturable permite ingresar datos del devanado primario y secundario del transformador como son voltaje nominal, resistencia e inductancia. Considera la característica de saturación del núcleo del transformador: resistencia de magnetización R_m , corriente de magnetización I_o en la parte lineal y flujo de magnetización F_o .

2.1.1.4 Módulo ICC, Parámetros de líneas de transmisión y cables

El módulo LCC es una subrutina para la modelación de líneas aéreas, cables aislados y tubo envolvente. Este módulo permite una gran variedad de alternativas de modelos de líneas de transmisión aéreas y cables aislados, dependiendo la frecuencia del fenómeno a ser analizado. Entre las más importantes se encuentran:

- Tipo de modelo de la línea: Bergeron, PI, JMarti, Noda, Semlyen.

2.1.1.5 Módulo MOV Type 92, pararrayos

Es un modelo tipo exponencial que considera la resistencia no lineal del pararrayos. La parte más relevante del módulo es la posibilidad de modelar la característica de operación, que permite introducir un número indefinido de puntos que relacionan voltaje y corriente. Estos valores dependen del pararrayos y el voltaje nominal del pararrayos, información generalmente suministrada por fabricantes.

2.1.1.6 Módulo inductancia

El modelo corresponde a una inductancia con parámetros concentrados, comportamiento lineal, no se considera saturación, para simulación de reactores en paralelo.

2.1.1.7 Módulo interruptor estadístico

Para la energización de líneas de transmisión se utiliza interruptor estadístico, que siga una distribución establecida de tal manera que se logre cerrar o abrir el circuito para cubrir una gama de valores de tiempo.

El interruptor estadístico da la posibilidad de seleccionar el tipo de interruptor (si es independiente, maestro o esclavo) y el tipo de distribución que deben seguir los valores estadísticos. El interruptor tipo esclavo es dependiente del tipo maestro, es decir, este actuará luego de un tiempo determinado de la actuación del interruptor maestro.

2.1.2 Planteamiento del sistema de prueba

Para este apartado, se dará explicación a las especificaciones y consideraciones tomadas al momento de plantear el sistema de potencia que será utilizado para el análisis a ser realizado en este trabajo. Cabe mencionar que al no tratarse del caso de un sistema de potencia real, sino de un sistema de prueba con fines meramente académicos, se utilizarán en su gran mayoría parámetros genéricos para los elementos de la red, ya que el objetivo es ver las repercusiones que tiene la discontinuidad definida por línea de transmisión aérea

y cable aislado de alto voltaje en los sobrevoltajes de frente lento, con sus respectivos análisis de casos, más no su aplicación directa en algún sistema preexistente.

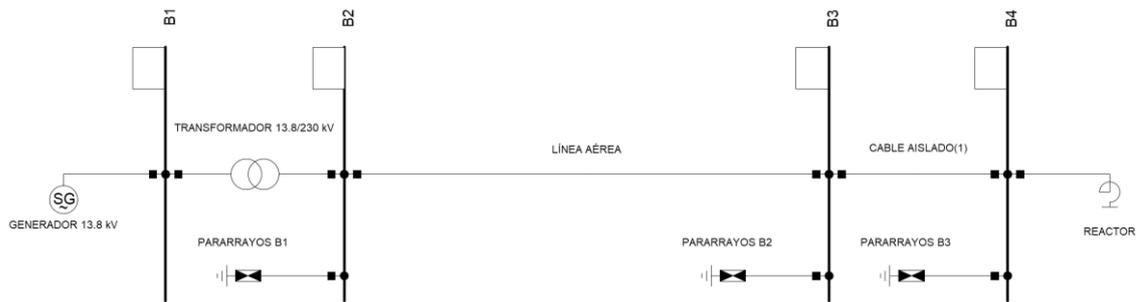


Figura 9. Diagrama unifilar del sistema de prueba

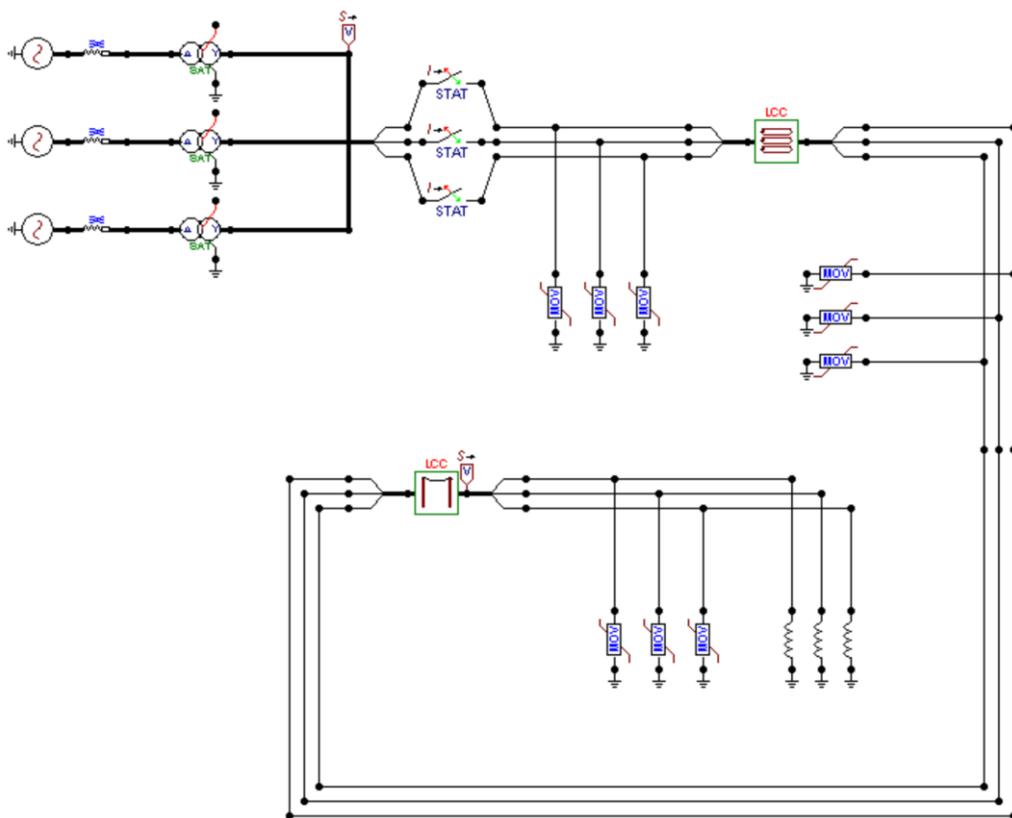


Figura 10. Sistema de prueba implementado en ATPDraw

El sistema de prueba tiene la configuración que se indica en la Figura 10, con los siguientes componentes:

- Tres generadores de corriente alterna, trifásicos aterrizados, voltaje nominal de 13.8 kV y frecuencia de 60 Hz.
- Tres transformadores de elevación trifásicos de 13.8/230 kV, conexión Δ/Y
- Interruptor de apertura y cierre del sistema de transmisión.
- Línea aérea trifásica de 50 kilómetros de longitud.
- Cable aislado trifásico de 5 kilómetros de longitud.
- Pararrayos: al inicio de la línea aérea, en la unión línea de transmisión aérea y cable aislado y al final del cable aislado.

2.1.2.1 Modelo del generador

Para el modelo de cada uno de los tres generadores se utilizarán los siguientes datos:

Tabla 1. Datos de los tres generadores trifásicos de 13.8 kV. [6]

Datos	Valor	Unidad
Voltaje nominal	13.8	kV
Frecuencia nominal	60	Hz
Resistencia de secuencia cero	0.0058	Ω
Resistencia de secuencia positiva	0.61778	Ω
Inductancia de secuencia cero	0.0061	mH
Inductancia de secuencia positiva	0.6472	mH

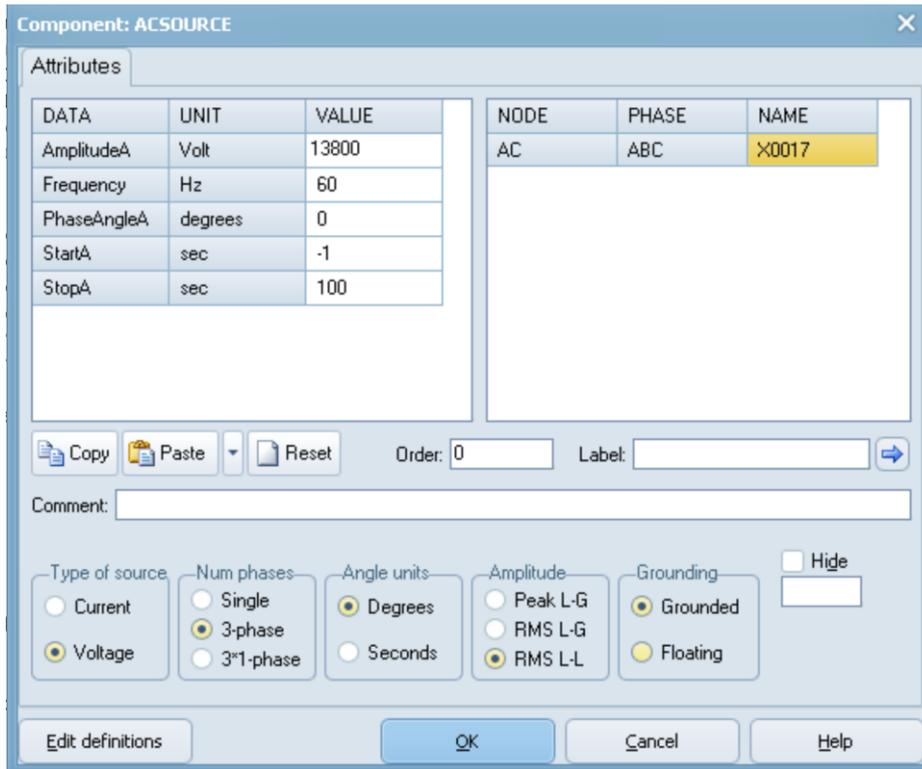


Figura 11. Ventana del módulo de fuente AC, tipo 14.

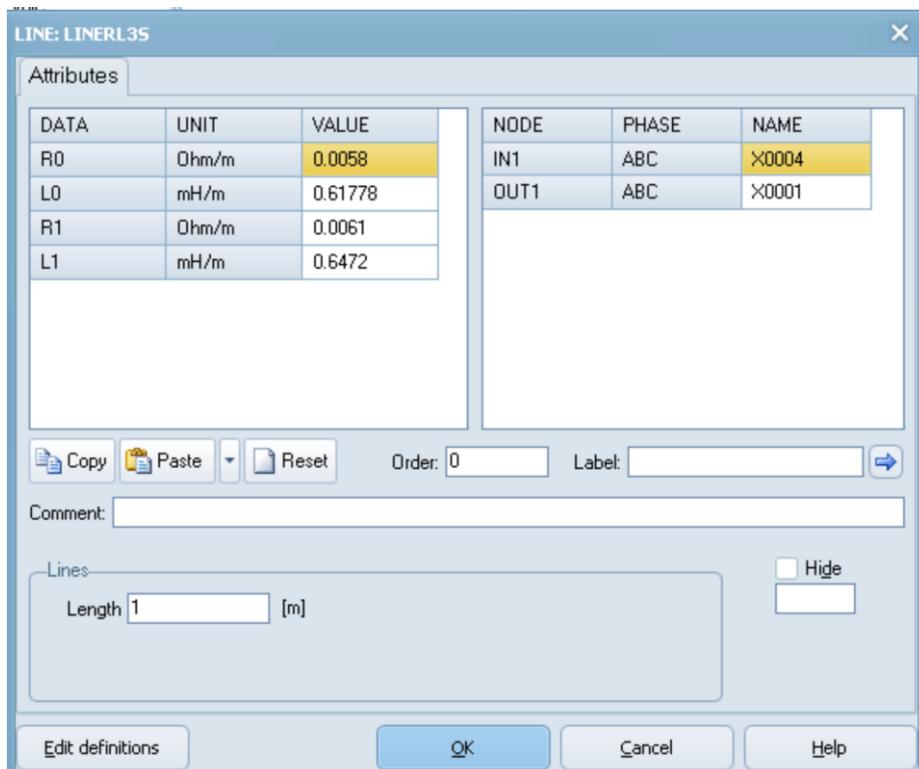


Figura 12. Parámetros de impedancias de secuencia del generador

2.1.2.2 Modelo del transformador

Para el modelo de los transformadores se usaron los siguientes datos [6]:

Tabla 2. Datos de los tres transformadores de elevación trifásicos de 13.8/230 kV. [6]

Datos	Devanado Primario	Devanado Secundario	Unidades
Voltaje nominal	230	13.8	kV
Resistencia	0.0094	0.8729	Ω
Inductancia	0.818321	75.7739	mH

Tabla 3. Curva de magnetización de los tres transformadores de elevación trifásicos de 13.8/230 kV. [6]

Corriente [A]	Flujo [Wb-T]
2.683	498.13
18.076	547.95
52.688	572.85
136.818	597.76

La implementación en ATPDraw se aprecia en la Figura 13 y Figura 14. Como la configuración que se tiene es una Δ/Y , el valor de voltaje que se debe ingresar en el devanado primario del módulo es:

$$V_p = \frac{230000}{\sqrt{3}} = 132790.56 [V]$$

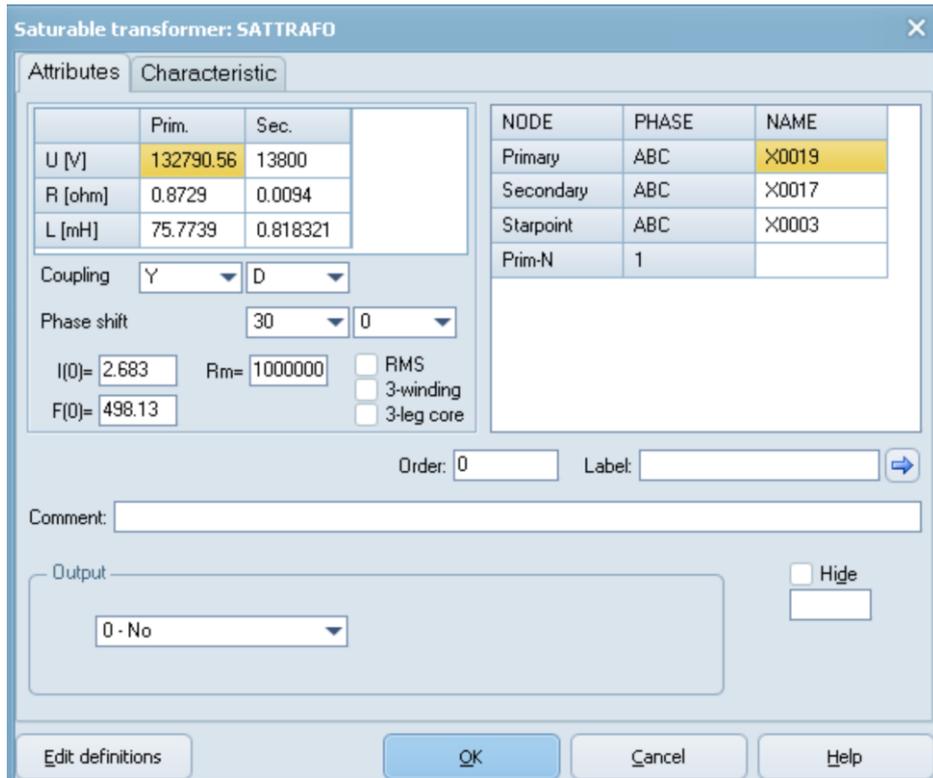


Figura 13. Ventana de parámetros del módulo de transformador saturable

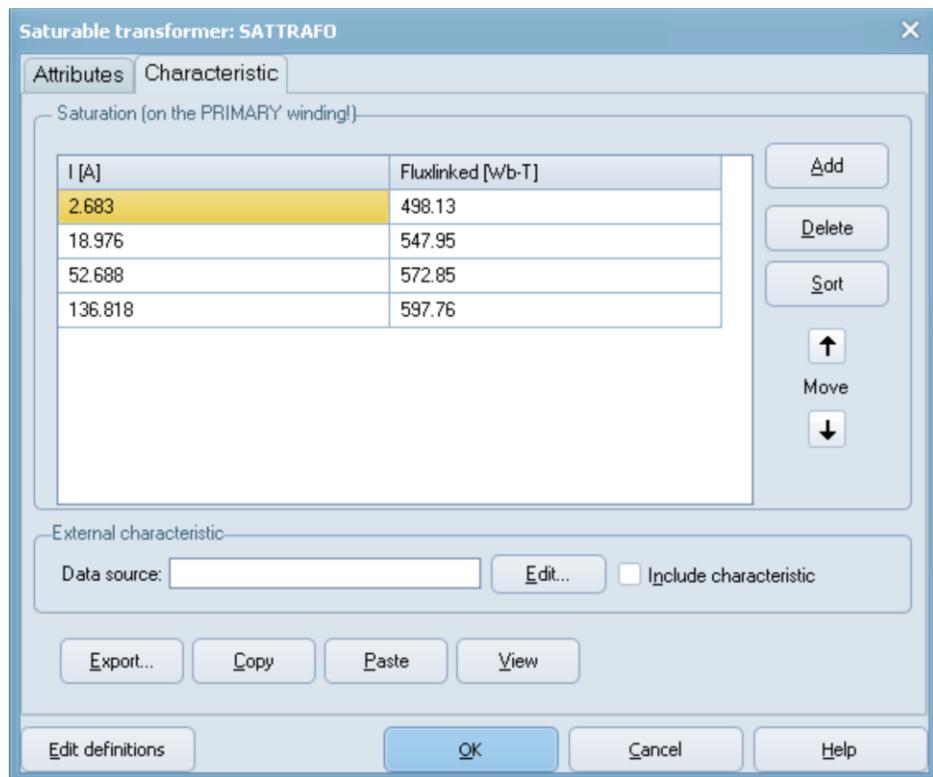


Figura 14. Curva de magnetización corriente – flujo, ingresada en el módulo de transformador saturado

2.1.2.3 Modelo de la línea aérea

Para el modelo de la línea aérea se utilizó la subrutina LCC de ATP. Dentro de esta sección, se especificaron algunos parámetros, como se puede ver en la Figura 15.

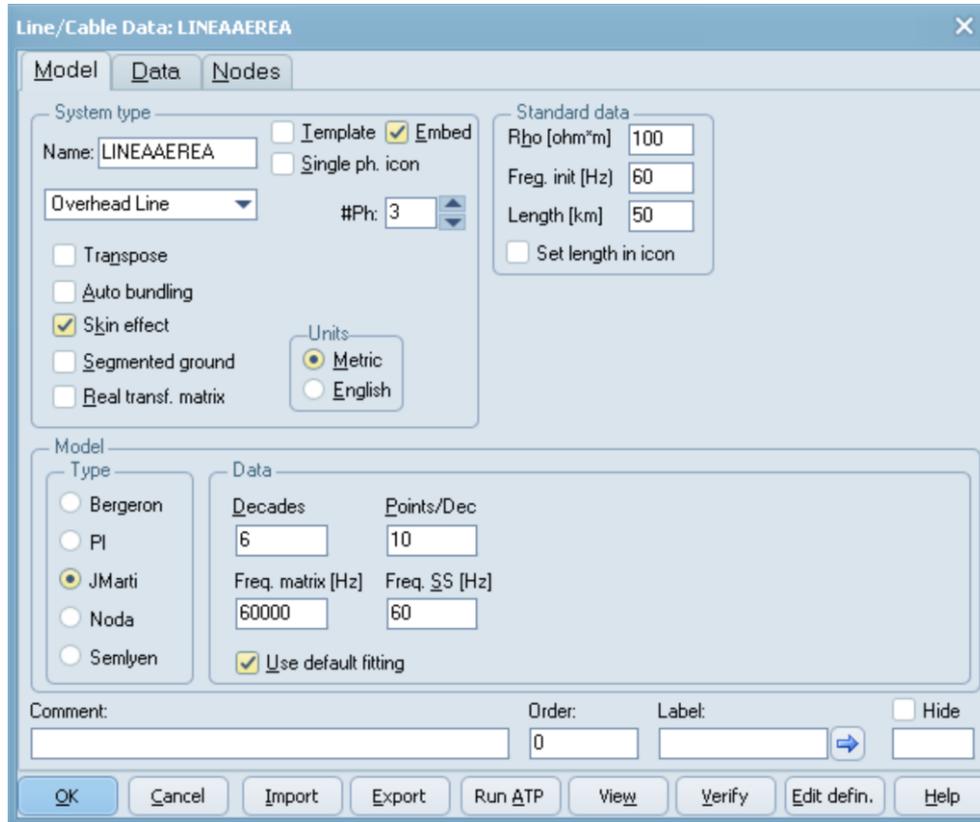


Figura 15. Ventana de modelo para la subrutina LCC para líneas aéreas

Para el tipo de modelo se eligió el Jmart, el cuál es un modelo dependiente de la frecuencia que es muy conveniente para simulaciones de transitorios. También se seleccionó la opción de efecto piel, para poder tomar datos típicos de catálogo de líneas aéreas.

Los datos de la torre corresponden a los que se indican en la la Figura 16, con una longitud de línea de 50 kilómetros.

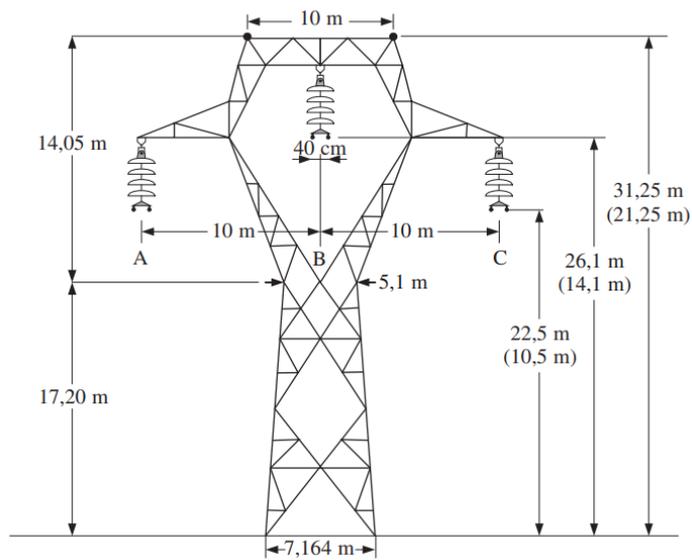


Figura 16. Modelo base de torre utilizado para el sistema de prueba [7]

Los datos finales ingresados de la línea se presentan en la Figura 17.

Line/Cable Data: LINEAAEREA

Model Data Nodes

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0	1.533	0.053	-4	22.5	10.5
2	2	0	1.533	0.053	0	26.1	14.1
3	3	0	1.533	0.053	4	22.5	10.5

Add row Insert copy row Delete last row Delete this row Move

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Figura 17. Datos ingresados en la subrutina LCC para la línea de transmisión aérea

2.1.2.4 Modelo del cable aislado

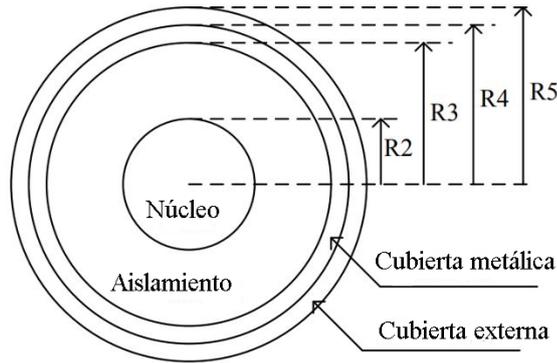
Para el modelo del cable aislado fue necesario hacer una búsqueda tanto bibliográfica como de catálogos de cables de alto voltaje, con aislamiento XLPE, de 230 kV, planteando un modelo genérico que servirá perfectamente para el planteamiento del sistema.

Los parámetros del cable se calculan con la subrutina LCC de ATP, con la opción “Single Core Cable”, para tres cables monofásicos enterrados con modelo de tipo JMarti, dependiente de la frecuencia, como se presenta en la Figura 18. La longitud del cable se la definió en 5 kilómetros.

The screenshot shows the 'Line/Cable Data: CABLESUB' dialog box. It has three tabs: 'Model', 'Data', and 'Nodes'. The 'Model' tab is active. Under 'System type', the 'Name' field contains 'CABLESUB'. There are checkboxes for 'Template' (unchecked) and 'Embed' (checked). Below that, 'Single ph. icon' is unchecked. A dropdown menu shows 'Single Core Cable'. To its right, '#Ph' is set to 3. Below that, 'Number of cables' is set to 3. There are radio buttons for 'Cables in': 'Air' (unchecked), 'Surface' (unchecked), and 'Ground' (checked). There are also checkboxes for 'Cable Constants' (unchecked), 'Matrix output' (checked), 'Spiking' (unchecked), 'Add G [S/m]' (unchecked), and 'Add C [E/m]' (unchecked). Under 'Standard data', 'Rho [ohm*m]' is 100, 'Freq. init [Hz]' is 60, and 'Length [m]' is 5000. There is a checkbox for 'Set length in icon' which is unchecked. Under 'Model', there are radio buttons for 'Type': 'Bergeron' (unchecked), 'PI' (unchecked), 'JMarti' (checked), 'Noda' (unchecked), and 'Semlyen' (unchecked). Under 'Data', there are input fields for 'Decades' (6) and 'Points/Dec' (10). Below that, 'Freq. matrix [Hz]' is 0 and 'Freq. SS [Hz]' is 0. There is a checkbox for 'Use default fitting' which is checked. At the bottom, there are fields for 'Comment', 'Order' (0), and 'Label'. There is a 'Hide' checkbox. At the very bottom are buttons: 'OK', 'Cancel', 'Import', 'Export', 'Run ATP', 'View', 'Verify', 'Edit defin.', and 'Help'.

Figura 18. Ventana de modelo para la subrutina LCC para cables aislados

Para el ingreso de los datos y la disposición del cable aislado se tomaron los valores correspondientes a la Figura 19.



R2 = 3.26cm, R3 = 6.14cm, R4 = 6.26 cm, R5 = 6.73cm

Radio interno del núcleo: 0.0cm, Resistividad del núcleo: $1.724 \times 10^{-8} \Omega m$,

Resistividad de la cubierta metálica: $2.84010^{-8} \Omega m$,

Permitividad relativa (XLPE, PE): 2.4

Figura 19. Modelo de cable aislado utilizado para el del sistema de prueba [8]

Se requiere ver plenamente la influencia del efecto capacitivo producido por la cubierta metálica, al ser la forma más común de presentación de los cables, por lo que solo se simulará el núcleo y la ya mencionada cubierta metálica, esta última conectada a tierra. Los datos finales pueden verse en la Figura 20.

	CORE	SHEATH
Rin [m]	0	0.0614
Rout [m]	0.0326	0.0626
Rho [ohm*m]	1.724E-8	2.84E-8
mu	1	1
mu (ins)	1	1
eps (ins)	2.4	2.4
semicon in [m]	0	0
semicon out [m]	0	0

Cable number: 1 # cables: 3
 Total radius: Rout [m] 0.0673
 Core: Qn Grounc
 Sheath: Qn Grounc
 Armor: Qn Grounc
 Position: Vertical [m] 1.3, Horizontal [m] 0

Figura 20. Datos ingresados en la subrutina LCC para el cable aislado

2.1.2.5 Modelo del pararrayos

Para la selección del pararrayos se utilizó un catálogo con datos, entre ellos la curva de operación $V - I$ para sobrevoltajes transitorios de maniobra, que dependen del voltaje nominal del pararrayos y de la forma de puesta a tierra del sistema.

Usando criterios de selección de pararrayos [7] se calcula el voltaje de operación continua del pararrayos U_c , que debe ser capaz de soportar el máximo voltaje en estado estable del sistema U_s , cuyos valores se presentan en la Tabla 4:

Tabla 4. Clasificación de pararrayos I_n por su tensión nominal [7]

Tensión nominal del sistema U_n	Tensión máxima del sistema U_s	Clasificación de pararrayos (I_n)					
		5 kA	10 kA			20 kA	
			Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
$U_n \leq 66 \text{ kV}$	$U_s \leq 72,5 \text{ kV}$	•	•	•			
$66 \text{ kV} < U_n \leq 220 \text{ kV}$	$72,5 \text{ kV} < U_s \leq 245 \text{ kV}$			•	•		
$220 \text{ kV} < U_n \leq 380 \text{ kV}$	$245 \text{ kV} < U_s \leq 420 \text{ kV}$			•	•		
$U_n > 380 \text{ kV}$	$U_s > 420 \text{ kV}$				•	•	

Para un valor nominal de voltaje del sistema de 230 kV, se tiene una clasificación de pararrayos de Clase 3 con corriente nominal de 10 kA y voltaje máximo $U_s = 245 \text{ kV}$.

Para el cálculo de la tensión continua de operación se realiza el siguiente cálculo:

$$U_c \geq \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (2.1)$$

$$U_c \geq \frac{245}{\sqrt{3}}$$

$$U_c \geq 139.43 \text{ kV}$$

Para el cálculo de la tensión nominal del pararrayos se utiliza la siguiente ecuación:

$$U_{eq} = k * \frac{U_s}{\sqrt{3}} * \left(\frac{T_t}{10}\right)^m \quad (2.2)$$

Donde los valores de las constantes son:

$k = 1.4$: Neutro rígido conectado a tierra.

$T_t = 1$: Duración del sobrevoltaje temporal representativo.

$m = 0.02$: Exponente que varía entre 0.018 y 0.022. [7]

Reemplazando los valores en la ecuación (2.2) se obtiene:

$$U_{eq} = 1.4 * \frac{245}{\sqrt{3}} * \left(\frac{1}{10}\right)^{0.02} = 189.118 \text{ kV}$$

Valiéndose de un catálogo [9], se selecciona un pararrayos de voltaje nominal 192 kV, cuya característica se incorporó en el módulo MOV Type 92 como en la Figura 21.

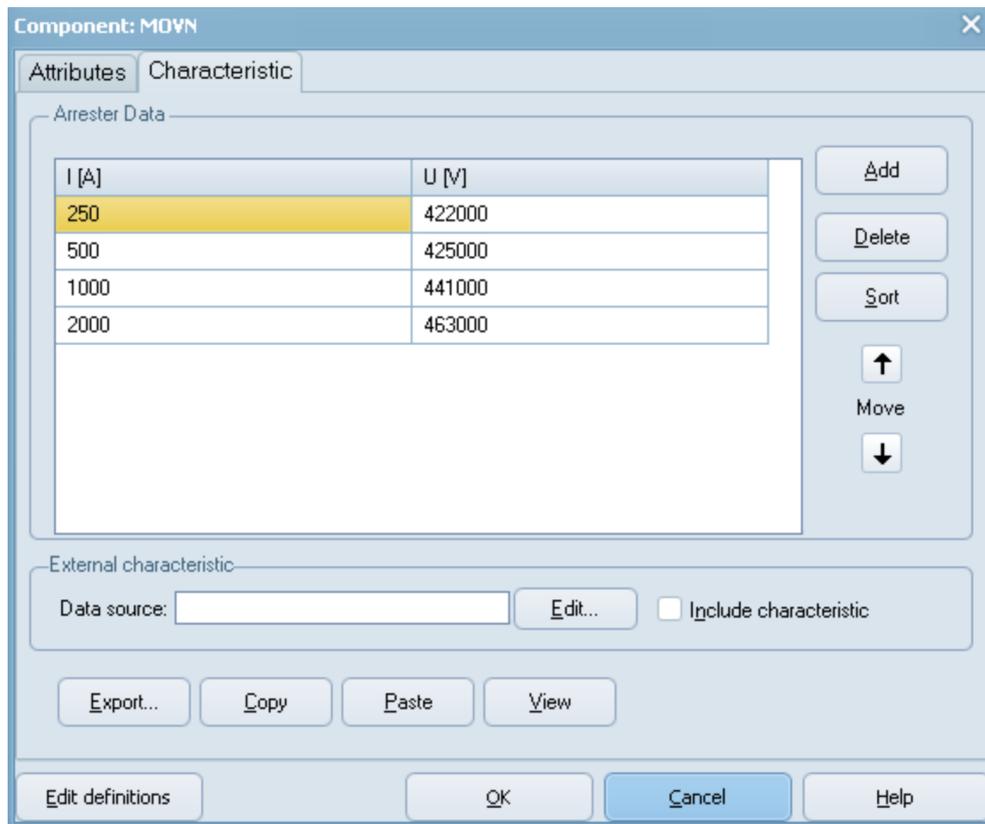


Figura 21. Datos de la característica V – I del pararrayos de 192 kV, implementado en el módulo MOV Type 92

2.1.2.6 Modelo del interruptor estadístico

La simulación estadística permite obtener estimaciones disminuyendo considerablemente los supuestos que los métodos analíticos, a cambio de un trabajo computacional más complejo. Sin embargo, como estos recursos computacionales cada vez son más

sofisticados y accesibles, las técnicas de simulación estadística se vuelven más atractivas para su utilización.

En este caso en particular, se realiza el análisis estadístico por la posibilidad del cálculo de E_2 , que es el sobrevoltaje con una probabilidad de ser excedido del 2%, con la siguiente ecuación ():

$$E_2 = V_{medio}(1 + 2.05 * \sigma) \quad (2.3)$$

Donde σ es la desviación estándar y V_{medio} es el valor medio, valores obtenidos como resultados de la simulación realizada en ATP.

Para el modelo del interruptor estadístico, el cierre se ajustará a una distribución uniforme, para que todos los ángulos de cierre tengan la misma probabilidad de ocurrencia. El valor de la desviación estándar seleccionada cubre los ángulos posibles +/- 90 grados a partir del valor promedio. Se realizará un total de 200 energizaciones por caso.

En la Figura 22 se muestra las selecciones de parámetros para para el interruptor estadístico.

NODE	PHASE	NAME
SW_F	C	X0001
SW_T	C	X0002

Figura 22. Parámetros del interruptor estadístico

2.1.3 Estudio de casos

Con el sistema planteado, se evaluarán los casos de estudios que permitan ver la problemática de los sobrevoltajes cuando existe esta configuración línea aérea/cable aislado. Para esta selección se deben tener en cuenta algunos factores de interés:

- En el extremo receptor del cable aislado se ha puesto un reactor trifásico de 70 MVAR para controlar que el voltaje en estado estable (posterior al transitorio de energización) se mantenga entre 0.95 y 1.05 pu. El reactor se ha determinado en base a análisis en estado estable, verificando que no se produzca escenarios de resonancia.
- Al momento de la energización, se esperaría que varíen los sobrevoltajes transitorios si se modifica la longitud del cable, por el efecto capacitivo que posee la línea de transmisión, principalmente en la sección compuesta por cable aislado.
- La influencia de los pararrayos para la mitigación de los sobrevoltajes transitorios de frente lento cuando existen discontinuidad línea de transmisión aérea/cable aislado.
- No se toma en cuenta el recierre del sistema por el impacto que causaría en el cable, considerando que tiene un aislamiento no recuperable, equivaldría a realizar un recierre con un banco de capacitores.

Habiendo mencionado algunas características de interés para el análisis, se procede a plantear casos que provean resultados dirigidos a evaluar el comportamiento de las ondas de sobrevoltaje:

Caso I: Influencia del uso de reactores. - Retiro el reactor implementado al final del cable aislado. Se realiza la simulación estadística.

CASO II: Variación en la proporción línea aérea/cable aislado. - Variación de la proporción línea aérea/cable aislado de 50/5 a 54/1. Se mantiene la longitud total. Se realiza simulación estadística.

CASO III: Intercambio de segmentos. - Intercambio segmento de línea aérea por el cable aislado y viceversa. El cable aislado ahora está cercano a la generación y después continúa el tramo de línea aérea. Se realiza simulación estadística

CASO IV: Aumento en la longitud del cable aislado. - Variación en la longitud del cable de cinco kilómetros a 15 kilómetros. Se aumenta la longitud total de la línea original. Se realiza simulación estadística.

CASO V: Aumento de una porción de línea aérea al final del cable aislado. - Se añade una porción de línea aérea de 20 kilómetros al final del cable aislado. Se aumenta la longitud total de la línea original. Se realiza simulación estadística.

CASO VI: Influencia del uso de pararrayos. – Se retiran pararrayos. Se realiza simulación estadística.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

Para la simulación del caso base, correspondiente al sistema que consta en la figura 10, inicialmente se hace el análisis sin la implementación del interruptor estadístico, con un interruptor simple cerrado, con el objeto de verificar las magnitudes de voltaje en las diferentes barras del sistema propuesto, obteniéndose las siguientes formas de onda:

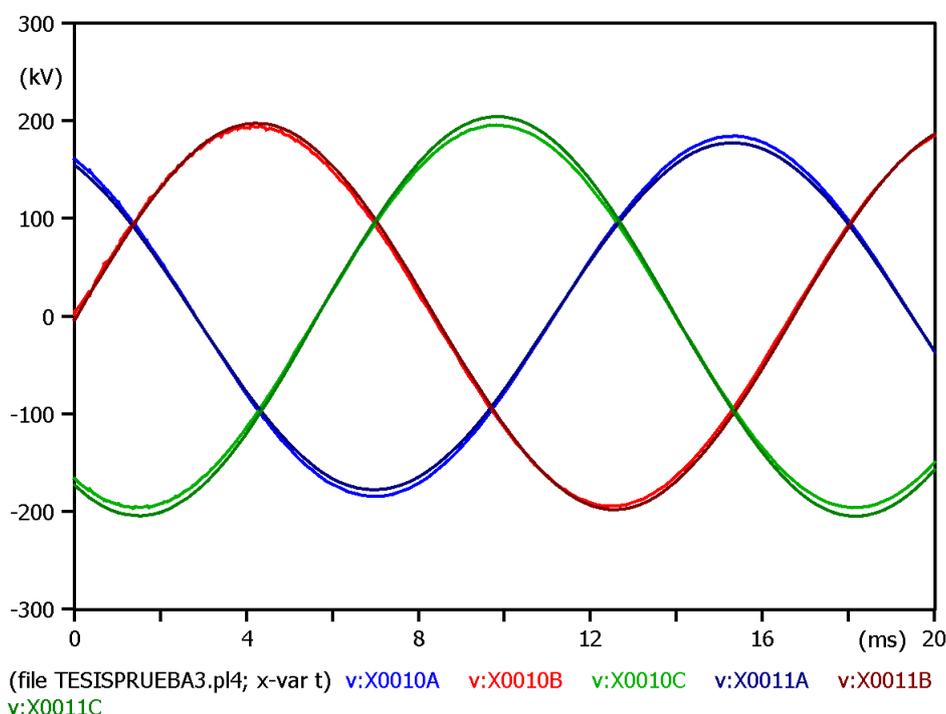


Figura 23. Voltajes trifásicos en estado estable del sistema base, al inicio de la línea de transmisión, al inicio y al final del cable

El voltaje obtenido al final del cable conforme aparece en la Figura 23 190 kV, pico que corresponde a un valor de 1.02 pu, con lo que se demuestra que el resultado está dentro del rango valores deseados.

Una vez comprobado que el sistema funcione correctamente en estado estable, se realiza la simulación del sistema base con el interruptor estadístico para la obtención de los sobrevoltajes, obteniéndose los resultados que se muestran en el ANEXO I. A continuación, en la Tabla 5 se presentan los resultados para el caso base, que serán utilizados para comparar con casos posteriores. Cabe aclarar que los voltajes expresados en “kV” son valores pico, no RMS. El valor de voltaje base para determinar las magnitudes de voltaje en pu (por unidad) es de 187.79 kV, pico.

$$V_b = \frac{\sqrt{2} * 230.000}{\sqrt{3}} = 187.7942 [kV]$$

Tabla 5. Sobrevoltajes resultantes para el caso del sistema base

	Fases	Mayor Sobrevoltaje Valor p.u.	Mayor Sobrevoltaje Valor Pico Real [kV]	Media en p.u.	Desviación Estándar en p.u.	E_2
B2	A	1.05	197.18	1.025	1.20E-08	1.03
	B	1.10	206.57	1.026	9.29E-03	1.05
	C	1.05	197.18	1.025	1.20E-08	1.03
B4	A	1.75	328.63	1.250	2.15E-01	1.80
	B	1.60	300.47	1.175	1.69E-01	1.58
	C	1.55	291.08	1.158	1.25E-01	1.45

Con los valores iniciales de sobrevoltajes, se procede a efectuar los casos de análisis y presentar los resultados obtenidos con las observaciones correspondientes. Los resultados que se presentan son los voltajes pico fase – tierra antes del interruptor estadístico y al final de la línea de cable.

3.1.1.1 CASO I: Influencia del uso de reactores

La implementación del reactor ayudó al voltaje a volver, después del transitorio, a los límites aceptables del valor nominal del voltaje del sistema en estado estable, por lo que se lo retirará para ver el efecto que se tiene en los sobrevoltajes por la pérdida de la compensación del reactor. Los resultados resumidos aparecen en la Tabla 6.

Tabla 6. Sobrevoltajes resultantes para el caso I

	Fases	Mayor Sobrevoltaje Valor p.u.	Mayor Sobrevoltaje Valor Pico Real [kV]	Media en p.u.	Desviación Estándar en p.u.	E_2
B2	A	1.05	197.18	1.025	1.20E-08	1.03
	B	1.10	206.57	1.026	8.55E-03	1.04
	C	1.05	197.18	1.025	1.20E-08	1.03
B4	A	1.80	338.03	1.306	2.24E-01	1.91
	B	1.65	309.86	1.224	1.77E-01	1.67
	C	1.60	300.47	1.209	1.25E-01	1.52

La corta longitud del cable hace que la carga capacitiva que este genera no sea excesivamente grande, por lo que al retirar la compensación del reactor los valores de sobrevoltajes no aumentaron de manera significativa. Este efecto también se aprecia en estado estable, donde el voltaje final no excedía en demasía al voltaje nominal, haciendo notar que el efecto capacitivo del cable tiene mucha relación con la longitud del mismo.

La influencia del reactor es realmente apreciable en estado estable, más no en el estado transitorio de la onda de sobrevoltaje. Esto también tiene que ver con la extensión del sistema de prueba, que al ser un sistema pequeño no requirió de una alta inductancia o de añadir más reactores para corregir el voltaje en estado estable.

3.1.1.2 CASO II: Variación en la proporción línea aérea/cable aislado

Se reduce la proporción del cable con respecto a la línea, pasando de 50/5 a 54/1, en sentido longitudinal. Un resumen de los valores de sobrevoltaje obtenidos se muestra en el Anexo III. En la Tabla 7 se muestra los valores de los sobrevoltajes obtenidos.

Tabla 7. Sobrevoltajes resultantes para el caso II

	Fases	Mayor Sobrevoltaje Valor p.u.	Mayor Sobrevoltaje Valor Pico Real [kV]	Media en p.u.	Desviación Estándar en p.u.	E_2
B2	A	1.05	197.18	1.025	1.20E-08	1.03
	B	1.10	206.57	1.026	8.55E-03	1.04
	C	1.05	197.18	1.025	1.20E-08	1.03
B4	A	1.95	366.20	1.363	3.01E-01	2.20
	B	1.80	338.03	1.261	2.78E-01	1.98
	C	1.75	328.64	1.268	2.52E-01	1.92

A partir de los resultados, mientras la proporción entre línea de transmisión aérea y cable aislado sea más diferenciada, los sobrevoltajes son de mayor magnitud con respecto a casos donde la proporción está más pareja.

3.1.1.3 CASO III: Intercambio de segmentos

Para este caso se cambia la topología y se coloca primero el cable aislado, junto al interruptor estadístico, para después situar a la línea aérea. Los resultados fueron muy holgados, por lo que se los colocó en el Anexo IV. En la Tabla 8 se muestra un resumen por fase de los resultados.

Tabla 8. Sobrevoltajes resultantes para el caso III

	Fases	Mayor Sobrevoltaje Valor p.u.	Mayor Sobrevoltaje Valor Pico Real [kV]	Media en p.u.	Desviación Estándar en p.u.	E_2
B2	A	1.65	309.86	1.247	2.21E-01	1.81
	B	1.65	309.86	1.225	2.29E-01	1.80
	C	1.65	309.86	1.240	2.23E-01	1.81
B4	A	2.3	431.93	2.047	3.18E-01	3.38
	B	1.8	431.93	1.982	3.72E-01	3.49
	C	1.75	431.93	1.974	3.61E-01	3.43

Analizando el voltaje medio, se puede deducir que la mayor parte de los sobrevoltajes están por encima de los 400 kV, esto para una distribución uniforme no cobra sentido a menos que se tome en cuenta la intervención del pararrayos. Recordando la curva característica V- I ingresada en los pararrayos utilizados, se puede apreciar cómo está limitando el sobrevoltaje de manera significativa. Estos valores son intolerables, pudiendo provocar la ruptura disruptiva de los aislamientos y daño en los elementos del sistema, forzando a incrementar el aislamiento para cumplir con el voltaje de protección.

Un resumen de la energía disipada por los pararrayos ubicados al final de la línea se presenta en el Anexo V.

3.1.1.4 CASO IV: Aumento en la longitud del cable aislado

Al aumentar la longitud del cable a 15 kilómetros se obtuvieron los resultados presentados en el ANEXO VI. La Tabla 9 muestra un resumen de estos.

Tabla 9. Sobrevoltajes resultantes para el caso IV

	Fases	Mayor Sobrevoltaje Valor p.u.	Mayor Sobrevoltaje Valor Pico Real [kV]	Media en p.u.	Desviación Estándar en p.u.	E_2
B2	A	1.05	197.18	1.025	1.20E-08	1.03
	B	1.05	197.18	1.025	1.20E-08	1.03
	C	1.05	197.18	1.025	1.20E-08	1.03
B4	A	1.90	356.81	1.373	2.09E-01	1.96
	B	1.75	328.64	1.306	1.88E-01	1.81
	C	1.55	291.08	1.289	1.04E-01	1.56

Al aumentar el tamaño del cable incrementa el efecto capacitivo que deriva en el incremento de los sobrevoltajes, sin embargo, la proporción del cable con respecto a la línea de transmisión aérea también aumento, por lo que los valores son relativamente más pequeños que en el caso II de variación de la proporción conservando la longitud total, pudiéndose observar que tanto la proporción de línea de transmisión aérea y cable aislado como la longitud total de la línea compuesta tienen efectos separados sobre los valores de sobrevoltajes que se presentan.

3.1.1.5 CASO V: Aumento de una porción de línea aérea al final del cable aislado

Para este caso se añade un tramo de línea aérea de 20 km de longitud en la terminación del cable aislado, aumentando la longitud de la línea y la proporción de línea en relación con la del cable. Sin embargo, en este apartado se tiene un intercalado. Los resultados para esta simulación se muestran en el Anexo VII. A continuación, la Tabla 10 presenta un resumen de los sobrevoltajes de mayor importancia.

Tabla 10. Sobrevoltajes resultantes para el caso V

	Fases	Mayor Sobrevoltaje Valor p.u.	Mayor Sobrevoltaje Valor Pico Real [kV]	Media en p.u.	Desviación Estándar en p.u.	E_2
B2	A	1.05	197.18	1.025	1.20E-08	1.03
	B	1.10	206.57	1.026	6.09E-03	1.04
	C	1.05	197.18	1.025	1.20E-08	1.03
B4	A	1.90	356.81	1.312	2.41E-01	1.96
	B	1.80	338.03	1.254	2.13E-01	1.80
	C	1.65	309.86	1.233	1.54E-01	1.62

Comparando los casos IV y V, los sobrevoltajes que aparecen son muy similares, por lo que se puede decir que la influencia a nivel transitorio del aumento de la longitud del cable, como el aumento de una porción de línea aérea es muy similar en ambos casos. Sin embargo, este es un dato de mucha importancia para el análisis, teniendo en consideración que la longitud que se aumentó de cable era menor que la que se aumentó de la línea aérea, pudiéndose concluir que la influencia del cable en los sobrevoltajes transitorios es mayor que la de la línea de transmisión aérea.

3.1.1.6 CASO VI: Influencia del uso de pararrayos

Para este caso en particular, se retirará todos los pararrayos del sistema para poder ver la influencia que tienen estos para la mitigación de sobrevoltajes y en que casos cobran relevancia estos equipos. El resumen de los sobrevoltajes se presenta en el ANEXO VIII.

Tabla 11. Sobrevoltajes resultantes para el caso VI

	Fases	Mayor Sobrevoltaje Valor p.u.	Mayor Sobrevoltaje Valor Pico Real [kV]	Media en p.u.	Desviación Estándar en p.u.	E_2
B2	A	1.05	197.18	1.025	1.20E-08	1.03
	B	1.10	206.57	1.026	9.29E-03	1.05
	C	1.05	197.18	1.025	1.20E-08	1.03
B4	A	1.75	328.63	1.250	2.15E-01	1.80
	B	1.60	300.47	1.175	1.69E-01	1.58
	C	1.55	291.08	1.158	1.25E-01	1.45

Los valores resultantes son los mismos que la simulación del caso del sistema base con pararrayos. Como los sobrevoltajes no entran dentro de curva característica $V - I$ preestablecida, no hay influencia de los pararrayos para limitar estos sobrevoltajes. El aislamiento eléctrico de los equipos debe ser diseñado para soportar estos sobrevoltajes.

En la mayoría de los casos vistos no se vio mayor influencia del pararrayos, ya que analizando la energía que disipa era casi nula. No siendo así para el caso III, donde los sobrevoltajes llegaban a tal magnitud que los pararrayos limitaban notablemente estos sobrevoltajes, pudiéndose corroborar de manera clara la necesidad de su implementación en cualquier sistema de potencia, con línea de transmisión aéreas, con cable aislado o mixtas para la mitigación de los fenómenos transitorios de frente lento.

3.2 Conclusiones

- Se realizó una revisión a la teoría de los sobrevoltajes que se producen por el efecto de maniobras de energización, cierre y re-energización de líneas de transmisión con discontinuidades, especialmente las definidas por líneas aéreas y cables aislados, pudiendo destacar que las características constructivas y eléctricas de ambos son muy distintas entre sí.
- Se investigó y planteó, a partir de múltiples referencias bibliográficas y catálogos de productos, los diferentes modelos utilizados para el diseño del sistema de prueba que se usó en el desarrollo del trabajo. En base a esto, se concluye que para el análisis de transitorios es necesario trabajar con modelos dependientes de la frecuencia.
- Se comprendió de manera detallada los módulos y subrutinas utilizados para la implementación del sistema de prueba dentro del software ATP entendiendo los principales parámetros y datos que se pueden ingresar para realizar diferentes tipos de simulaciones.
- Se comprobó la importancia del uso de reactores para llevar el voltaje en estado estable a límites de operación aceptables. En estado transitorio no se vio mayor influencia de la omisión de los reactores, por lo que se puede concluir que en un sistema pequeño como en el caso de análisis no afectan de manera significativa la presencia o no de estos equipos, teniendo en cuenta también la corta longitud del cable.
- Se aprendió sobre las características de los cables aislados que influyen directamente en los sobrevoltajes de energización como su alta capacitancia, el tipo de aislamiento, la conexión a tierra de la cubierta metálica, su longitud con respecto a la línea aérea y la topología que tenga la línea de transmisión.
- Se evidenció que mientras la proporción se mantenga relativamente igual entre los segmentos de cable aislado y línea aérea, se puede aumentar segmentos adicionales de línea o cable sin elevar los sobrevoltajes de manera desmesurada.
- Se verificó que el caso más severo en cuestión de las magnitudes de los sobrevoltajes ocurre cuando la línea de transmisión empieza con cable aislado y continúa con la línea aérea, donde se presentaron valores realmente altos de

sobrevoltajes, superando varias veces el voltaje nominal, por lo que sería recomendable evitar esta configuración en diseños de alto voltaje.

- Se comprobó la eficiencia del pararrayos en la mitigación de los sobrevoltajes de frente lento en estas configuraciones mixtas, pero depende de la magnitud del sobrevoltaje que se presente, ya que el pararrayos no actúa para cualquier valor de sobrevoltaje, sino el este dentro del rango de los valores de su curva característica $V - I$, como se vio no tuvo relevancia prácticamente en ninguno de los casos propuestos, solo en el caso III, donde si hubo una gran cantidad de energía disipada por los pararrayos.

3.3 Recomendaciones

- Se recomienda verificar las conexiones dentro del programa ATP cada vez que se añada un nuevo módulo, parte por parte, para verificar que el programa funcione correctamente y los resultados sean los esperados.
- Se recomienda tener cautela al trabajar con el interruptor estadístico, se tiene que definir el documento de ATP para que pueda trabajar con simulaciones estadísticas, ya que las sistemáticas vienen seleccionadas por defecto.
- Se recomienda simplificar lo más posible el trabajar con módulos de ATP, ya que algún dato o parámetro ingresado de manera errónea puede llevar a errores de compilación difíciles de identificar, siempre y cuando no se comprometa la integridad del sistema que se desee implementar.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Ametani, N. Magaoka, Y. Baba, T. Ohno y K. Yamabuki, Power System Transients: Theory and Application, Nueva York : Taylor & Francis Group, 2017.
- [2] A. Greenwood, Electrical Transients in Power Systems, Nueva York: John Wiley & Sons, Inc, 1991.
- [3] J. Das, Transients in Electric Systems: Analysis, Recognition and Mitigation, Estados Unidos : McGrawHill , 2010.
- [4] CIGRE , «CABLE SYSTEMS ELECTRICAL CHARACTERISTICS,» CIGRE Group , 2013.
- [5] Z. Abdul-Malel, N. Bashir y A. Sayuti, Condition Monitoring of Zinc Oxide Surge Arresters, 2011.
- [6] J. A. Martínez-Velasco, «Power System Transients: Parameter Determination,» Taylor and Francis Group , Estados Unidos , 2010.
- [7] M. P. Pereira y J. A. Filho, «Curso de EMTP-ATP, FURNAS - BRASIL para INECEL,» Furnas, 1988.
- [8] J. A. Martínez Velasco, Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión, Madrid: McGrawHill Education, 2013.
- [9] T. Ohno, A. Ametani, C. Bak, W. Wiechoswski y T. Sorensen, «Analysis of the statistical distribution of energization overvoltages of EHV cables and OHLs».
- [10] G. Energy, Arresters for AC and DC Applications.
- [11] L. Carvajal, Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.
- [12] A. Ametani, T. Ohno y N. Nagaoka, «CABLE SYSTEM TRANSIENTS,» IEEE, Wiley, Chennai, India, 2015.
- [13] M. Martínez Villalba, «Estudios de transitorios electromagnéticos en líneas de transmisión,» Madrid, España , 2016.
- [14] S. J. Chapman, Máquinas Eléctricas, México : McGrawHill, 2012.
- [15] M. Kizilcay, K. Teichmann, S. Papenheim y P. Malicki, «Analysis of Switching Transients of an EHV Transmission Line Consisting of Mixed Power Cable and Overhead Line Sections,» Alemania .
- [16] L. Prikler y H. K. Hoidalén, ATPDRAW: Users' Manual, Norway: SYSTRAN , 2009.
- [17] Electrocables, Catálogo de productos, 2018 .

- [18] V. D. Antonello, «Underground Power Cable Considerations: Alternatives to Overhead,» Electrical Consulting Engineers, P.C., Nueva York, 2011.
- [19] P. C. Vaz y P. Dos Santos, «TRANSITORIOS ELETRICOS e COORDINACAO DE ISOLAMENTO,» FURNAS Centrais Eletricas S.A., Furnas, Brasil , 1987.
- [20] Z. Xu, «Power Cable Protection in Transmission System».

5 ANEXOS

ANEXO I. Resumen de sobrevoltajes resultantes para el caso del sistema base

ANEXO II. Resumen de sobrevoltajes resultantes para el caso II

ANEXO III. Resumen de sobrevoltajes resultantes para el caso II

ANEXO IV. Resumen de sobrevoltajes resultantes para el caso III

ANEXO V. Resumen de energía absorbida por los pararrayos en el caso III

ANEXO VI. Resumen de sobrevoltajes resultantes para el caso IV

ANEXO VII. Resumen de sobrevoltajes resultantes para el caso V

ANEXO VIII. Resumen de sobrevoltajes resultantes para el caso VI