

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

PROCEDIMIENTO PARA EL ESTUDIO DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS DE MANIOBRA A NIVEL DE SUBTRANSMISIÓN APLICADO AL SISTEMA DE SUBTRANSMISIÓN DE LA EEASA UTILIZANDO EL PROGRAMA ATP-EMTP

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

JHON ALEXANDER HERNÁNDEZ YÉPEZ

jhon.hernandez@epn.edu.ec

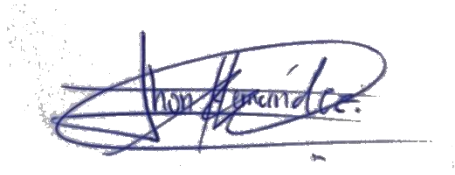
HUGO ARCOS

hugo.arcos@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2022

CERTIFICACIONES

Yo, JHON HERNÁNDEZ 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.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Jhon Hernández", with a horizontal line drawn underneath it.

JHON HERNÁNDEZ

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JHON ALEXANDER HERNÁNDEZ YÉPEZ, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Hugo Arcos", with a horizontal line drawn underneath it.

HUGO ARCOS
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.

JHON HERNÁNDEZ

HUGO ARCOS

DEDICATORIA

Este trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios por la oportunidad de existir, inspirarme y darme fuerza para cumplir el propósito que me tenga reservado.

A mis padres por ser ejemplo de sacrificio, paciencia y perseverancia durante todos estos años.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitir seguir con vida y salud, por bendecir a mis padres, por guiarme por el camino correcto durante todo este tiempo, por ser mi fortaleza y apoyo durante los momentos de dolor y debilidad.

Gracias a mis padres Norma y Adelmo por ser los promotores para cumplir este objetivo, por sus consejos y valores inculcados, por su apoyo económico y moral durante esta jornada.

Agradezco a los docentes de la Escuela Politécnica Nacional por haber compartido sus conocimientos y sus experiencias a lo largo de mi preparación profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.1 Objetivo general	1
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	2
1.4.1 Transitorios en Sistemas Eléctricos de Potencia	2
1.4.2 Sobrevoltajes	3
1.4.3 Ondas Viajeras.....	8
1.4.4 Parámetros Fundamentales en Circuitos Eléctricos	12
1.4.5 Importancia del estudio de transitorios electromagnéticos	14
2 METODOLOGÍA PARA LA SIMULACION DE TRANSITORIOS POR MANIOBRAS CON LA AYUDA DE ATPDraw.	14
2.1 Modelación de Componentes de Sistemas Eléctricos	14
2.2.1 Elementos Fundamentales del Sistema	14
2.2.2 Líneas de Transmisión.....	17
2.2.3 Transformador.....	21
2.2.4 Modelos ATPDraw para estructuración de redes eléctricas.....	23
3 APLICACIÓN - ESTUDIO EN LA RED ELECTRICA EEASA.....	33
3.1 Información Básica del Sistema	33
3.2 Casos de estudio	38
3.2.1 Energización de Líneas	39
3.2.2 Energización del Transformador.....	44
3.2.3 Energización de compensadores capacitivos.....	49
3.3 Procedimiento para el estudio de transitorios electromagnéticos.....	52
3.4 Conclusiones	53
3.5 Recomendaciones	53
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
5 ANEXOS	55

RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular está compuesto de tres capítulos los cuales han sido desarrollados de la siguiente forma:

En el capítulo uno se hace una introducción a los sobrevoltajes producidos por los transitorios electromagnéticos, definición, clasificación, causas, efectos y la importancia que tiene su estudio. También se hace una breve revisión del modelo matemático de la onda viajera, base fundamental para el estudio de transitorios electromagnéticos.

En el capítulo dos se describen los componentes fundamentales de un sistema eléctrico y los modelos matemáticos del software ATPDraw adecuados para la realización de estudios de transitorios electromagnéticos en sistemas eléctricos de potencia. También se establecen los lineamientos a seguir en el ingreso de parámetros de cada uno de los modelos en ATPDraw.

En el capítulo tres se hace una descripción de la red eléctrica de la Empresa Eléctrica Ambato S.A. (EEASA), se considera que los alimentadores de distribución se modelan como cargas mientras que a nivel de subtransmisión la red se modela completamente. Una vez modelada la red se establecen casos de estudio para realizar simulaciones de transitorios electromagnéticos producidos por maniobra de energización de líneas de transmisión, transformadores y compensadores que forman parte de la red de la EEASA.

Se evalúa los resultados y se propone un procedimiento para el estudio de transitorios electromagnéticos de maniobra a nivel de subtransmisión cuya finalidad es disminuir el impacto de fenómenos electromagnéticos en equipos.

PALABRAS CLAVE: transitorios electromagnéticos, red de subtransmisión, energización.

ABSTRACT

The present work of curricular integration is composed of three chapters which have been developed as follows:

In chapter one there is an introduction to the overvoltages produced by electromagnetic transients, definition, classification, causes, effects and the importance of their study. There is also a brief review of the mathematical model of the traveling wave, which is the fundamental basis for the study of electromagnetic transients.

Chapter two describes the fundamental components of an electrical system and the mathematical models of the ATPDraw software suitable for the realization of electromagnetic transient studies in electrical power systems. It also establishes the guidelines to be followed when entering the parameters of each of the models in ATPDraw.

In chapter three, a description of the electrical network of Empresa Eléctrica Ambato S.A. (EEASA) is made, it is considered that the distribution feeders are modeled as loads, while at the subtransmission level the network is completely modeled. Once the network is modeled, case studies are established to simulate electromagnetic transients produced by the energizing maneuver of transmission lines, transformers and compensators that are part of EEASA's network.

The results are evaluated and a procedure is proposed for the study of electromagnetic transients of maneuvering at subtransmission level with the purpose of reducing the impact of electromagnetic phenomena on equipment.

KEY WORDS: Electromagnetic transients, subtransmission network, energization.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En todo sistema eléctrico de potencia se producen valores picos de voltaje y corriente debido al cierre o apertura de circuitos por medio de los interruptores ya sea por maniobra o por fallas, por descargas atmosféricas, conexión y desconexión de cargas, etc. Estos picos que se presentan en intervalos de tiempos que van desde los microsegundos a los milisegundos son los transitorios electromagnéticos, que deben ser debidamente estudiados y analizados dada su potencial capacidad de causar daños considerables en los equipos como los transformadores, capacitores, reactores y líneas de transmisión. Es entonces necesario realizar un análisis de transitorios electromagnéticos y desarrollar un procedimiento para la adecuada operación de equipos con fin de disminuir al máximo el impacto de estos fenómenos. La mayor parte de las empresas distribuidoras en el Ecuador no realizan estudios de transitorios electromagnéticos debido al desconocimiento del tema o a la falta de herramientas computacionales apropiadas; sin embargo, estos estudios son útiles en etapas de planificación de proyectos eléctricos dada la necesidad de prever los esfuerzos que plantean los transitorios electromagnéticos de cara a la especificación de las capacidades de interrupción y niveles de aislamiento de los equipos. La complejidad de este tipo de estudios implica la necesidad de que su realización se sustenta en simulaciones computacionales, siendo la herramienta de análisis de simulación de transitorios ATP-EMTP, el software de acceso libre más utilizado ya que permite modelar matemáticamente los diferentes elementos que constituyen un sistema eléctrico.

Un análisis de transitorios electromagnéticos es fundamental en todo sistema de potencia ya que contribuye a mejorar la confiabilidad en la operación de los sistemas de transmisión y subtransmisión, permitiendo la energización de sus elementos sin llegar a niveles de voltajes y corrientes perjudiciales. Este proyecto permitirá contar con un procedimiento para la realización de estudios sobre las posibles causas y efectos de los transitorios electromagnéticos en sistemas de subtransmisión de empresas de distribución. Los estudios se fundamentarán en el uso del software computacional ATP que utiliza un programa complementario para el pre procesamiento de información (ATPDraw), mismo que permite acoplar los distintos elementos de un sistema en un ambiente gráfico.

1.1 Objetivo general

Desarrollar un procedimiento para la realización de análisis de transitorios electromagnéticos para sistemas de subtransmisión, tomando en consideración maniobras de energización de líneas de transmisión, transformadores y compensadores.

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar una descripción teórica de los transitorios electromagnéticos de maniobra presentes en los sistemas de potencia, como se originan y el efecto que producen.
2. Implementar el modelo de la red de la EEASA en el simulador ATPDraw.
3. Simular transitorios electromagnéticos para el sistema modelado considerando la energización de líneas de transmisión, transformadores y compensadores.
4. Analizar los posibles efectos de los transitorios electromagnéticos y estructurar una propuesta de procedimiento para la realización de este tipo de estudios.

1.3 Alcance

La modelación en ATPDraw parte de la información proporcionada por la EEASA en un archivo en formato DlgSILENT, este modelo de red considerará los alimentadores de distribución como cargas mientras que la red a nivel de subtransmisión será modelada completamente.

Una vez modelada la red de la EEASA, se establecerán distintos casos de estudio para la realización de simulaciones de transitorios electromagnéticos producidos por maniobra de energización de líneas de transmisión, transformadores y compensadores que forman parte de la red de la EEASA.

En base a las simulaciones realizadas se evaluarán los resultados y se propondrá un procedimiento para el estudio de transitorios electromagnéticos de maniobra a nivel de subtransmisión cuya finalidad es disminuir el impacto de fenómenos electromagnéticos en los equipos mediante el establecimiento de especificaciones adecuadas en etapas de planificación de nuevas instalaciones.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Transitorios en Sistemas Eléctricos de Potencia

Un fenómeno transitorio en un Sistema Eléctrico de Potencia puede ser el resultado de un cambio inesperado o planeado con anticipación en la operación o configuración del mismo. Estos fenómenos someten a los equipos que pertenecen al sistema eléctrico a esfuerzos mecánicos que en muchas ocasiones pueden afectar la vida útil de los equipos [1].

Basados en su origen los transitorios se identifican dos grandes grupos:

- De origen atmosférico; y,
- De origen conmutado, es decir, todas las operaciones de conmutación, el rechazo de carga y fallas.

Otra clasificación puede hacerse en función del modo en que se generación de los transitorios.

- Transitorios electromagnéticos, generados por la interacción de los campos eléctricos de capacitancias y campos magnéticos de inductancias.
- Transitorios electromecánicos, generados por la interacción entre la energía eléctrica almacenada en el sistema y la energía mecánica almacenada en la inercia de las máquinas rotativas.

El término transitorio abarca sobretensiones de diversos orígenes, transitorios en sistemas de control, estabilidad transitoria de los sistemas de potencia, arranque de motores, sistemas de puesta a tierra, etc. Los eventos de conmutación y fallo dan lugar a sobretensiones de hasta tres veces el valor nominal en transitorios fase-tierra y de hasta cuatro veces para los transitorios de fase-fase [2].

Los fenómenos transitorios objeto del presente Trabajo de Integración Curricular son los transitorios electromagnéticos que se originan por la apertura y cierre de interruptores en maniobras de conexión y desconexión, estos fenómenos son de naturaleza completamente eléctrica debido a la interacción entre la energía eléctrica almacenada en los inductores y la energía eléctrica almacenada en capacitores.

Estos eventos generan un desplazamiento de las ondas electromagnéticas a través de las líneas de transmisión, aunque se van atenuando a medida que aumenta su recorrido la superposición de las ondas incidentes y ondas reflejadas provocan elevaciones temporales de tensión. Por esta razón todo sistema eléctrico debe ser diseñado considerando los esfuerzos más severos que pueden presentarse durante su operación, de forma que se garantice la protección de los equipos y del sistema.

1.4.2 Sobrevoltajes

Los sobrevoltajes se presentan como una elevación de voltaje en cualquier punto del sistema, estos pueden ser fase-fase o fase-tierra y aparecen con un voltaje pico mayor al voltaje máximo del sistema, poniendo en riesgo a los equipos, reduciendo su desempeño o causando un daño permanente en los mismos [3].

Los sobrevoltajes son fenómenos transitorios que pueden ser de origen externo ocasionados por condiciones ajenas al sistema eléctrico, por ejemplo, las descargas atmosféricas, y de origen interno ocasionados por la propia red eléctrica, por ejemplo, maniobras o fallas en la operación continua del sistema eléctrico.

Según la norma IEC 60071-4 los sobrevoltajes pueden clasificarse, de acuerdo con una forma de onda y con una duración normalizadas en:

- **Sobrevoltajes Temporales**

Son de larga duración y tienen una frecuencia igual o cercana a la de operación. Son importantes para determinar la capacidad del descargador de sobretensiones de óxido metálico.

- **Sobrevoltajes de Frente Lento**

Su característica es oscilatoria, muy amortiguados y de corta duración, tiene frentes de onda y tiempos de cola que van de los cientos de μs hasta los milisegundos respectivamente.

La forma de onda característica es el impulso tipo maniobra estandarizado 250/2500 μs como se indica en la Tabla 1. Los sobrevoltajes de frente lento son importantes para determinar la capacidad de los descargadores y para la especificación de equipos, así como determinar el aislamiento del entrehierro para torres de líneas de transmisión [4].

La principal causa del apareamiento de estos sobrevoltajes en el sistema eléctrico son los eventos de maniobras de energización y recierre en líneas de transmisión, aparición y eliminación de fallas, introducción de corrientes capacitivas e inductivas.

- **Maniobras de energización y recierre en líneas de transmisión:** son muy frecuentes en los sistemas de potencia y su análisis se lo puede realizar en tres periodos.
 - a) **Periodo transitorio:** En este periodo prevalece el efecto de las ondas viajeras asociadas a este fenómeno, la duración está en el orden de los milisegundos y depende de la longitud de la línea [3]. Aparecen como una sucesión de picos transitorios amortiguados, superpuestos a la componente de frecuencia industrial. Las componentes transitorias se atenúan por las pérdidas en la línea hasta extinguirse.
 - b) **Periodo dinámico:** Representa la transición entre el periodo transitorio y el de régimen permanente, caracterizado por un voltaje periódico con una importante

componente de frecuencia industrial a la que se superponen componentes armónicas de bajo orden producidas por la saturación de núcleos ferromagnéticos, los cuales pueden distorsionar fuertemente la forma de onda con una atenuación lenta, alrededor de los cientos de milisegundos [3].

- c) **Régimen permanente:** En este periodo el voltaje es completamente periódico pudiendo ser bastante distorsionado como consecuencia de las saturaciones de los núcleos ferromagnéticos [3].

Las maniobras tanto de conexión como de recierre, es decir conexión con voltaje residual, de una línea de transmisión producen sobretensiones en cualquiera de las tres fases, no necesariamente de forma simultánea, estas sobretensiones serán fase-tierra y entre fases y dependiendo de diferentes parámetros como:

- Potencia de cortocircuito del sistema en el punto de maniobra
- Punto de la onda de voltaje en que opera el interruptor
- Grado de compensación de la línea de transmisión
- Longitud de la línea de transmisión
- Transposición de la línea de transmisión
- Geometría de la línea de transmisión
- Pérdidas a lo largo de la línea de transmisión
- Disponibilidad de equipos de protección
- Grado de puesta a tierra del sistema
- Valor de la resistencia de preinserción en los interruptores
- Disparidad de los polos del interruptor
- Voltaje residual (en caso de recierre)

Las sobretensiones de frente lento en líneas aéreas de transmisión pueden ser limitadas usando resistencias de preinserción en los interruptores, interruptores con mando sincronizado o descargadores de sobretensiones a lo largo de toda la línea.

- **Aparición y eliminación de fallas:** Este tipo de perturbaciones únicamente pueden producir sobretensiones fase-tierra. Los factores que tienen mayor influencia en estos sobrevoltajes son:

- Naturaleza de la falla
 - Longitud de la línea de transmisión
 - Grado de compensación de la línea
 - Localización de la falla
- **Introducción de corrientes capacitivas e inductivas:** En la energización y desenergización de bancos de capacitores y reactores, las sobretensiones son originadas debido a que las corrientes capacitivas e inductivas están desfasadas con respecto al voltaje, para el caso de una carga capacitiva la corriente adelanta al voltaje en 90° y para una carga inductiva la corriente retrasa al voltaje en 90° .

Al momento de interrumpir la corriente en el cruce por cero, la onda de voltaje estará en su máximo valor, lo que ocasiona la elevación de voltaje en los terminales del interruptor [3].

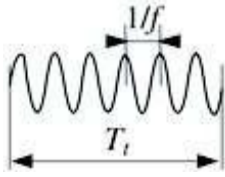
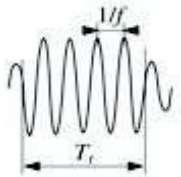
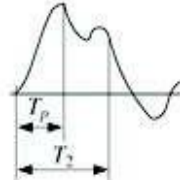
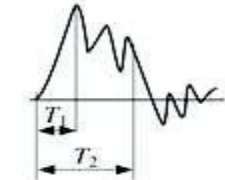
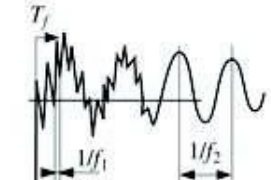
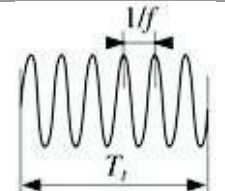
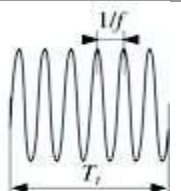
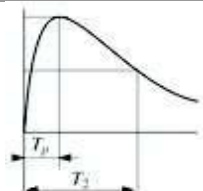
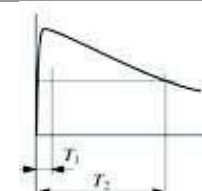
Los elementos capacitivos e inductivos son muy utilizados en una red eléctrica y la mayoría de los casos son utilizados como elementos de compensación.

- **Sobrevoltajes de Frente Rápido**

El origen de las sobretensiones de frente rápido son las descargas atmosféricas conocidas también como rayos, tienen una amplitud muy superior al voltaje pico nominal del sistema, son unidireccionales y son de muy corta duración. Presentan frentes de onda comprendidos entre $(0.1 - 20) \mu\text{s}$ y tiempos de cola que llegan a los $300 \mu\text{s}$. La onda de voltaje normalizada es un impulso de voltaje tipo rayo $1,2/50 \mu\text{s}$, tal como se muestra en la Tabla 1.

Las sobretensiones de frente rápido se estudian para determinar el riesgo de fallo de los equipos y, por tanto, para seleccionar su nivel de resistencia necesario en relación con la configuración de los dispositivos de protección y la puesta a tierra de la torre, también para evaluar el rendimiento de la línea y de la estación [4].

Tabla 1. Clasificación de los sobrevoltajes, forma de onda y duración normalizada [4]

Tipo	Baja Frecuencia		Transitorio		
	Continuo	Temporal	Frente lento	Frente rápido	Frente muy rápido
Formas de onda					
Tiempos y frecuencias	$f = 50 \text{ Hz}/60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ NS}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Formas de onda normalizadas de voltaje					(*)
	$f = 50 \text{ Hz o } 60 \text{ Hz}$ $T_t(*)$	$48 \text{ kHz} \leq f \leq 62 \text{ kHz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1.2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	

- **Sobrevoltajes de Frente muy Rápido**

Las sobretensiones de frente muy rápido se originan debido a maniobras o fallas internas en subestaciones blindadas (GIS), estas sobretensiones son oscilatorias, con tiempos de subida hasta el valor cresta, inferiores a $0.1 \mu\text{s}$ y una duración total menor a 3 ms, y con oscilaciones superpuestas de frecuencia comprendidas entre 30 kHz y 60 MHz.

Normalmente estos transitorios de frente muy rápido pueden evitarse mediante la conmutación en un punto del ciclo, pero es necesario un análisis para tener en cuenta el mal funcionamiento del relé de control [4].

1.4.3 Ondas Viajeras

Cuando se presentan perturbaciones energéticas como descargas atmosféricas o maniobras de conexión o desconexión de elementos en una línea de transmisión, se generan ondas de tensión y corriente que en las líneas aéreas se propagan a una velocidad aproximada a la de la luz. Cuando estas ondas llegan al extremo de la línea o en su recorrido encuentran discontinuidades por efectos de apertura o desconexión de alguno de los elementos del sistema, se da lugar a la aparición de ondas incidentes, reflejadas y refractadas que pueden superponerse con las ondas iniciales y producir sobretensiones dañinas. Estas ondas, debido a las pérdidas en la línea, van desapareciendo a medida que transcurre el tiempo [1].

- **Ecuación de la Onda Viajera**

Una línea de transmisión en operación puede ser analizada considerando un pequeño tramo de su longitud que tiene asociado una impedancia z por unidad de longitud $z = r_x + j\omega L$, y una admitancia y por unidad de longitud. En este sentido, r_x y $j\omega L$ representan la resistencia y la reactancia serie por unidad de longitud de ese pequeño tramo. La impedancia para ese pequeño tramo de longitud dx es zdx y la admitancia es ydx [1].

Para obtener el modelo matemático de la onda viajera, se considera una línea de transmisión sin pérdidas, es decir, sólo se considera $z = j\omega L$, debido a que el tratamiento del modelo al incluir las pérdidas por resistencia se torna más complejo, ver Figura 1.

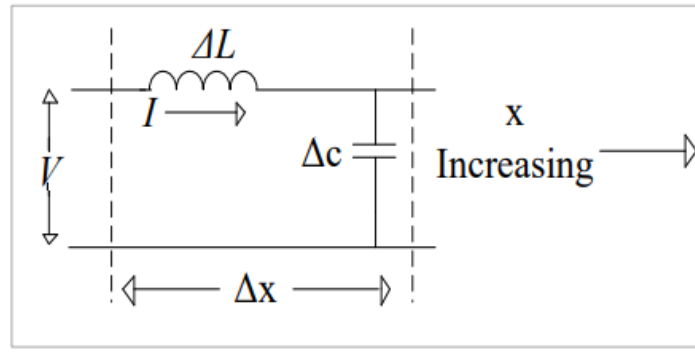


Figura 1. Representación de un pequeño tramo de una línea de transmisión [1].

De la Figura 1, el voltaje en el inductor está determinado por:

$$-\Delta V = L \Delta x \frac{\partial I}{\partial t} \quad (1)$$

$$-\Delta I = C \Delta x \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2)$$

El tramo de longitud Δx puede expresarse como un tramo longitud infinitesimal dx , por lo que la ecuación (1) y la ecuación (2) quedan :

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -L \frac{\partial I}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = -C \frac{\partial V}{\partial t} \quad (4)$$

Se usan derivadas parciales dado que la tensión V y la corriente I , son función ambas de la posición y del tiempo. La Figura 1 muestra el incremento de x hacia la derecha. Con la dirección de la corriente en la dirección indicada, V e I disminuirán con el incremento de x . Por diferenciación, I puede ser eliminada de la ecuación (3) y la ecuación (4). Se deriva la ecuación (3) con respecto a x y la ecuación (4) con respecto a t [1].

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -L \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = -C \frac{\partial^2 V}{\partial t \partial x} \quad (6)$$

Eliminando $\frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x}$:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (7)$$

Ahora, resolviendo para I en lugar de V , se obtiene una ecuación idéntica para la corriente:

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} \quad (8)$$

La ecuación (7) y la ecuación (8) constituyen la ecuación de onda viajera en una línea de transmisión. Considerando la ecuación para la corriente, D' Alembert mostró que esta cumple con la solución general [1]:

$$I = f \left[x \mp \frac{t}{(LC)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (9)$$

El término $(LC)^{-\frac{1}{2}}$, es la velocidad v de la onda, por eso, la ecuación (9) puede ser escrita:

$$I(x, t) = f_1(x - vt) + f_2(x + vt) \quad (10)$$

La ecuación (9) es solución de la ecuación (8). La solución para el voltaje puede ser obtenida de la ecuación (3):

$$= Lv[f_1'(x - vt) - f_2'(x + vt)] \quad (11)$$

Integrando ambos lados de la ecuación con respecto a x se tiene:

$$V(x, t) = Lv[f_1(x - vt) - f_2(x + vt)] \quad (12)$$

$$V(x, t) = Z_0 f_1(x - vt) - Z_0 f_2(x + vt) \quad (13)$$

De la ecuación (10) y la ecuación (12) se puede observar la directa proporcionalidad que existe entre la corriente y el voltaje, siendo ese factor de proporcionalidad la impedancia característica, Z_0 .

Como solución a la ecuación de onda, la única condición es que las funciones sean diferenciables.

Las funciones $f_1(x - vt)$ y $f_2(x + vt)$ son funciones de distancia en tanto que x y vt tengan dimensiones de longitud. En un instante de tiempo $t = t_1$, es posible obtener una ubicación espacial instantánea de la corriente o el voltaje en la línea. Una solución igualmente válida para la ecuación de onda es [1]:

$$I(x, t) = f_1\left(\frac{x}{v} - t\right) + f_2\left(\frac{x}{v} + t\right) \quad (14)$$

$$V(x, t) = Z_0 f_1\left(\frac{x}{v} - t\right) + Z_0 f_2\left(\frac{x}{v} + t\right) \quad (15)$$

La ecuación (13) y la ecuación (14) permiten concentrarse en una localización particular de la línea y observar lo que pasa como función del tiempo.

- **Reflexión y refracción de ondas viajeras en una línea de transmisión**

La proporcionalidad existente entre las ondas de tensión y corriente definidas por el parámetro Z_0 sufre modificaciones cuando las ondas se encuentran con discontinuidades en la línea. La onda reflejada de tensión y su compañera la corriente, viajan en sentido opuesto al de la onda incidente. La onda refractada penetra la discontinuidad. Las amplitudes de las ondas reflejadas y refractadas, al igual que la proporcionalidad existente entre la tensión y la corriente incidentes, dependen de la impedancia característica del medio. Las ondas viajeras cumplen con las ecuaciones de continuidad en una línea, es decir, se cumple la ley de conservación de energía [1].

Considere la unión entre dos líneas de impedancias características diferentes, Z_A y Z_B , y suponga que $Z_A > Z_B$. Esta podría ser por ejemplo la unión entre una línea aérea y un cable. Suponga que una onda de tensión con una amplitud V , viaja desde la fuente a través de la línea aérea acercándose a la unión con el cable. La corriente tendrá la misma forma y una amplitud.

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_A} \quad (16)$$

Las ondas de tensión reflejadas y refractadas son V_2 y V_3 respectivamente. Ahora, las corrientes asociadas a esas ondas serán.

$$I_2 = -\frac{V_2}{Z_A} \quad (17)$$

$$I_3 = \frac{V_3}{Z_B} \quad (18)$$

Se asignan los subíndices 1, 2 y 3 para las ondas incidente, reflejada y refractada respectivamente, y por definición, la dirección positiva de x es la dirección de la onda incidente. Note que I_2 , dado que está viajando en la dirección de menos x , tiene signo opuesto a V_2 . Si el voltaje y la corriente son continuas en una frontera, se deduce que:

$$V_1 = V_2 + V_3 \quad (19)$$

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (20)$$

Sustituyendo la ecuación (15), ecuación (16) y ecuación (17) en la ecuación (19):

$$\frac{V_1}{Z_A} - \frac{V_2}{Z_A} = \frac{V_3}{Z_B} \quad (21)$$

De la ecuación (18) y la ecuación (20) es posible escribir la onda reflejada en términos de la onda incidente:

$$V_2 = \left(\frac{Z_B - Z_A}{Z_B + Z_A} \right) V_1 \quad (22)$$

El término $\left(\frac{Z_B - Z_A}{Z_B + Z_A} \right)$ es llamado coeficiente de reflexión y puede ser positivo o negativo dependiendo de los valores de Z_A y Z_B al sustituir la ecuación (21) en la ecuación (20) se obtiene la onda refractada en términos de la onda incidente:

$$V_3 = \left(\frac{2Z_B}{Z_B + Z_A} \right) V_1 \quad (23)$$

El término $\left(\frac{2Z_B}{Z_B + Z_A} \right)$ es llamado coeficiente de refracción y puede variar entre 0 y 2 dependiendo de los valores de Z_A y Z_B . En la Figura 2 se muestra un caso de reflexión y refracción de ondas incidentes de tensión y corriente al encontrarse con una discontinuidad [1].

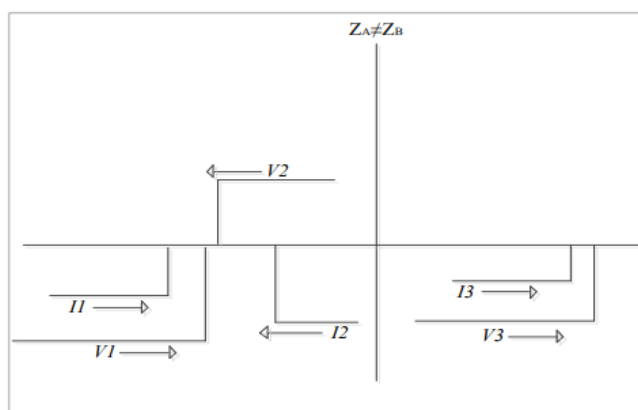


Figura 2. Reflexión y Refracción de la onda incidente [1].

1.4.4 Parámetros Fundamentales en Circuitos Eléctricos

Los diferentes parámetros que están presentes en cada elemento del sistema eléctrico, y se consideran para el análisis de transitorios electromagnéticos son: la resistencia R , inductancia L y capacitancia C . Cada uno de estos parámetros están presentes en cada elemento del sistema eléctrico en porcentajes diferentes, por ejemplo, para un transformador y un motor la parte inductiva predomina, para un banco de capacitores predomina la parte capacitiva, en el caso de una carga lineal la parte resistiva predomina sobre las demás.

En general la modelación considera que los tres parámetros están distribuidos a lo largo del circuito, en ocasiones se las puede representar como parámetros concentrados sin afectar seriamente la precisión de los cálculos. En algunos casos no es conveniente utilizar

esta aproximación como el caso de una línea de transmisión larga donde el análisis se lo debe realizar con los parámetros distribuidos [5].

Los parámetros L y C se caracterizan por su capacidad de almacenar energía, la inductancia L en forma de campo magnético y la capacitancia C en forma de campo eléctrico. La energía almacenada es función de la corriente I y función del voltaje instantáneo V respectivamente, que se puede expresar de la siguiente forma en las ecuaciones (24) y (25).

$$E = \frac{1}{2}LI^2 \quad (24)$$

$$E = \frac{1}{2}CV^2 \quad (25)$$

El parámetro R hace el papel contrario a los dos anteriores, es disipador de energía. La tasa de disipación será RI^2 en cualquier instante que se realice el análisis.

Cuando ocurre un cambio repentino de estado, hay generalmente una redistribución de energía que trae consigo nuevas condiciones al sistema eléctrico. Estos efectos se estudian en los transitorios electromagnéticos. Es muy importante que esta redistribución de energía no ocurra rápidamente por dos razones.

- 1) Para que haya variación de energía magnética se requiere un cambio de corriente. Pero en una inductancia al cambio de corriente se le opone una fuerza electromotriz de magnitud $L \frac{di}{dt}$. Un cambio instantáneo de corriente por tanto requerirá un voltaje infinito para hacerlo, sin embargo, las corrientes en circuitos inductivos no cambian abruptamente y consecuentemente no habrá cambio abrupto de energía magnética almacenada [5].
- 2) Para que haya variación de energía eléctrica se requiere un cambio de voltaje. El voltaje a través del capacitor está dado por $V = \frac{Q}{C}$, donde Q es la carga y su tasa de cambio es [5]:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{C} i \quad (26)$$

Para un cambio de voltaje instantáneo debe ocurrir un flujo de corriente infinito, esto no es factible, consecuentemente el voltaje a través del capacitor no puede cambiar instantáneamente.

La redistribución de energía después de un cambio de estado del circuito toma un cierto tiempo. El proceso durante este intervalo está regido por el principio de conservación de

energía. La resistencia, la inductancia y capacitancia influye en la corriente y son los parámetros fundamentales para entender los transitorios electromagnéticos.

1.4.5 Importancia del estudio de transitorios electromagnéticos

Los transitorios electromagnéticos deben ser tomados en cuenta para su estudio, con la misma importancia del análisis en estado estacionario, a pesar de que el estado transitorio es de corta duración en comparación con el estado estacionario, su impacto sobre los equipos es mucho más perjudicial debido a los altos voltajes y corrientes a los cuales son sometidos. Las consecuencias son proporcionales a los equipos involucrados en la red eléctrica.

Esta es una de las razones por las cuales es necesario tener clara la idea de los eventos que ocurren durante los periodos transitorios para poder estructurar el procedimiento más adecuado en el manejo de los elementos que constituyen la red eléctrica, tanto en estado estacionario como en estado transitorio, con la finalidad de disminuir al máximo los efectos nocivos de estos fenómenos.

La simulación de estos fenómenos es indispensable ya que permite elaborar un diseño y dimensionamiento apropiado de los componentes de un sistema eléctrico, la coordinación de aislamiento, coordinación de protecciones, la elaboración de un procedimiento adecuado que permite ejecutar las maniobras de modo que sean lo menos dañinas posibles.

2 METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DE TRANSITORIOS POR MANIOBRAS CON LA AYUDA DE ATPDraw.

2.1 Modelación de Componentes de Sistemas Eléctricos

2.2.1 Elementos Fundamentales del Sistema

Los elementos que se encuentran presentes en todo sistema eléctrico como la resistencia, inductancia y capacitancia se consideran para el análisis de transitorios electromagnéticos. La modelación de redes eléctricas considera necesariamente a estos tres elementos y su distribución a lo largo del sistema.

- **Inductancia**

La Figura 3 muestra una inductancia L entre los nodos k y m , la ecuación básica para este elemento es:

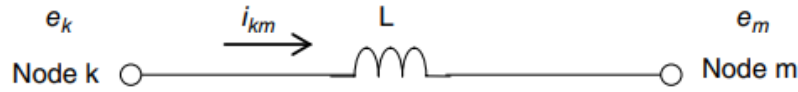


Figura 3. Inductancia

$$e_k - e_m = L \frac{di_{km}}{\partial t} \quad (27)$$

$$i_{km}(t) = i_{km}(t - \Delta t) + \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t (e_k - e_m) dt \quad (28)$$

La regla trapezoidal se aplica a una función temporal de t para obtener el área ΔS como se muestra en la Figura 4, obteniéndose la ecuación.

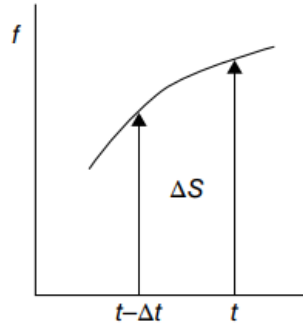


Figura 4. Función f y área ΔS .

$$\Delta S = \int_{t-\Delta t}^t f(t) dt \quad (29)$$

$$\Delta S = \frac{\Delta t}{2} (f(t) + f(t - \Delta t)) \quad (30)$$

Aquí $f(t) = e_k(t) - e_m(t)$ se sustituye y se reemplaza la ecuación (28) por las ecuaciones (29) y (30).

$$i_{km}(t) = \frac{\Delta t}{2L} (e_k(t) - e_m(t)) + I_{km}(t - \Delta t) \quad (31)$$

$$I_{km}(t - \Delta t) = i_{km} + \frac{\Delta t}{2L} (e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t)) \quad (32)$$

La ecuación (31) se representa en la Figura 5 y muestra que la inductancia está representada por la conexión en paralelo de una resistencia equivalente y la fuente de corriente conocida. La resistencia R se calcula una vez antes del paso de tiempo [6].

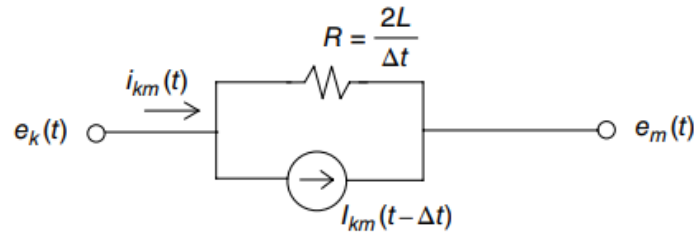


Figura 5. Circuito equivalente de una inductancia.

- **Capacitancia**

La Figura 6 muestra la capacitancia C entre los nodos k y m , la ecuación básica de este circuito es la siguiente.

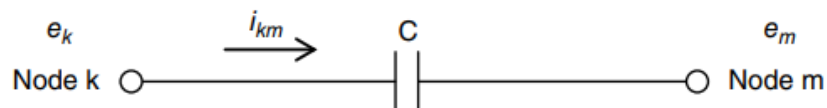


Figura 6. Capacitancia

$$i_{km} = C \frac{d(e_k - e_m)}{dt} \quad (33)$$

Aplicando la regla trapezoidal a la ecuación (33) se obtiene las ecuaciones y el circuito equivalente se muestra en la Figura 7, es decir, la capacitancia está representada por una resistencia equivalente R y una fuente de corriente conocida [6].

$$i_{km}(t) = \frac{2C}{\Delta t} (e_k(t) - e_m(t)) + I_{km}(t - \Delta t) \quad (34)$$

$$I_{km}(t - \Delta t) = -i_{km}(t - \Delta t) - \frac{2C}{\Delta t} (e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t)) \quad (35)$$

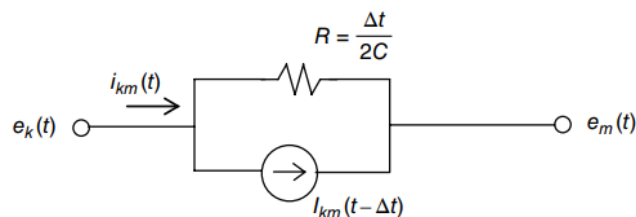


Figura 7. Circuito equivalente de la Capacitancia.

- **Resistencia**

La resistencia se muestra en la Figura 8 y es representada tal y como aparece.

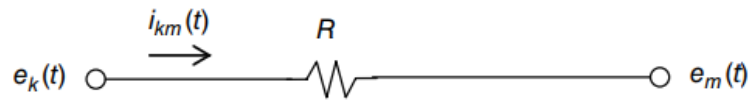


Figura 8. Resistencia

2.2.2 Líneas de Transmisión

Las líneas de transmisión son las encargadas de transmitir la energía de las subestaciones de generación hacia las subestaciones distribuidoras.

El modelo de una línea de transmisión representa el comportamiento de sus parámetros frente a los fenómenos electromagnéticos que se desea estudiar.

Para resultados en estado estable basta con modelar las líneas de transmisión con parámetros agrupados. Mientras que para soluciones de estado transitorio se usan modelos con parámetros distribuidos constantes o dependientes de la frecuencia.

En el presente documento se analizan los transitorios electromagnéticos de frente lento, por lo es adecuado representar las líneas de transmisión con el modelo de parámetros distribuidos dependientes de la frecuencia (modelo J. Martí).

➤ **Modelo con Parámetros Distribuidos Constantes.**

En el modelo de la línea de transmisión con parámetros distribuidos constantes la frecuencia es constante, la línea no tiene pérdidas y los parámetros L y C son constantes y distribuidos por toda su extensión. La Figura 9 muestra el modelo de la línea con parámetros distribuidos constantes.

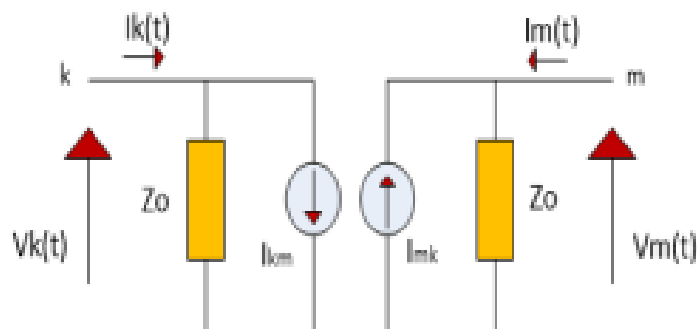


Figura 9. Modelo de la línea con parámetros distribuidos contantes.

Las ecuaciones de voltajes y corrientes en los extremos de la línea están representadas por las siguientes ecuaciones [3].

$$i_k(t) = \frac{1}{Z_0} v_k(t) + i_{kh}(t) \quad (36)$$

$$i_m(t) = \frac{1}{Z_0} v_m(t) + i_{mh}(t) \quad (37)$$

Donde:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (38)$$

$$i_{kh}(t) = -\frac{1}{Z_0} v_m(t - \tau) - i_m(t - \tau) \quad (39)$$

$$i_{mh}(t) = -\frac{1}{Z_0} v_k(t - \tau) - i_k(t - \tau) \quad (40)$$

➤ **Modelo con Parámetros Distribuidos Dependiente de la Frecuencia (J. Martí)**

El modelo de la línea de transmisión con parámetros distribuidos dependiente de la frecuencia (J. Martí) es el más utilizado para la simulación de fenómenos transitorios por su alta eficiencia y precisión, uno de los softwares que utiliza este modelo es EMTP obtiene resultados satisfactorios en el análisis de transitorios. Este modelo aproxima la impedancia característica y la constante de propagación por medio de funciones racionales utilizando una matriz de transformación constante para realizar la conversión de valores que están en el dominio modal al dominio de la frecuencia [7].

El modelo con parámetros distribuidos dependiente de la frecuencia utiliza el mismo circuito equivalente con la diferencia de que la impedancia característica Z_0 , en cada uno de los extremos de la línea, es sustituida por equivalentes de red que tienen aproximadamente el mismo espectro de frecuencia que el de Z_0 .

Una vez se obtenga la exactitud requerida de las funciones de ajuste, respuestas de la frecuencia de Z_0 y funciones de propagación, el modelo se puede emplear en análisis de transitorios para sistemas monofásicos.

En conductores multifásicos, existe una carga adicional que se la encuentra al descomponer las ecuaciones lineales a través de una matriz de transformación modal.

El modelo J. Martí incluye pérdidas en el circuito por lo que se vuelve complicado escribir la solución de las ecuaciones en el dominio del tiempo, es por ello que la solución se establece en el dominio de la frecuencia. La Figura 10 muestra el circuito equivalente del modelo J. Martí [7].

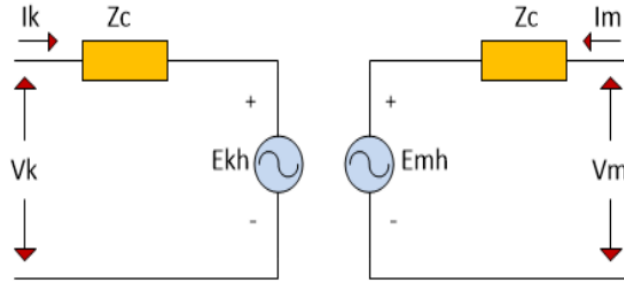


Figura 10. Circuito Equivalente del modelo J. Martí

$$V_k(\omega) = \cosh(\gamma(\omega)l) V_m - Z_c(\omega) \sinh(\gamma(\omega)l) I_m(\omega) \quad (41)$$

$$V_m(\omega) = \cosh(\gamma(\omega)l) V_k - Z_c(\omega) \sinh(\gamma(\omega)l) I_k(\omega) \quad (42)$$

$$I_k(\omega) = \frac{1}{Z_c(\omega)} \sinh(\gamma(\omega)l) V_m(\omega) - \cosh(\gamma(\omega)l) I_m(\omega) \quad (43)$$

$$I_m(\omega) = \frac{1}{Z_c(\omega)} \sinh(\gamma(\omega)l) V_k(\omega) - \cosh(\gamma(\omega)l) I_k(\omega) \quad (44)$$

La impedancia característica Z_c y la constante de propagación γ , se muestran en las siguientes ecuaciones.

$$Z_c(\omega) = \sqrt{\frac{R'(\omega) + j\omega L'(\omega)}{G'(\omega) + j\omega C'(\omega)}} \quad (45)$$

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R'(\omega) + j\omega L'(\omega))(G'(\omega) + j\omega C'(\omega))} \quad (46)$$

Para representar el modelo matemático se procede con la separación en dos componentes, conocidas como: funciones de onda viajera.

Funciones de onda viajera que va hacia adelante.

$$F_k(\omega) = V_k(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_k(\omega) \quad (47)$$

$$F_m(\omega) = V_m(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_m(\omega) \quad (48)$$

Funciones de onda viajera que va hacia atrás.

$$B_k(\omega) = V_k(\omega) - Z_{eq}(\omega) I_k(\omega) \quad (49)$$

$$B_m(\omega) = V_m(\omega) - Z_{eq}(\omega) I_m(\omega) \quad (50)$$

Donde la Z_{eq} es la impedancia de la red y es aproximadamente la impedancia de la línea Z_c .

Comparando las ecuaciones (47) a (50) con las ecuaciones básicas de la línea en frecuencia (41) a (44) se obtiene.

$$B_k(\omega) = A_1(\omega) F_m(\omega) \quad (51)$$

$$B_m(\omega) = A_1(\omega) F_k(\omega) \quad (52)$$

Donde:

$$A_1(\omega) = e^{-\gamma(\omega)l} = \frac{1}{\cosh(\gamma(\omega)l) + \sinh(\gamma(\omega)l)} \quad (53)$$

De las relaciones dadas anteriormente, la tensión y corriente que caracterizan el modelo (J. Martí) tanto en el nodo emisor como en el nodo receptor son:

$$V_k(\omega) = Z_c(\omega) I_k(\omega) + E_{mh}(\omega) \quad (54)$$

$$V_m(\omega) = Z_c(\omega) I_m(\omega) + E_{kh}(\omega) \quad (55)$$

Donde el voltaje en los nodos k y m son:

$$E_{mh} = A(\omega)F_{pk} = [V_k(\omega) + Z_c(\omega)I_k(\omega)]e^{-\gamma(\omega)l} \quad (56)$$

$$E_{kh} = A(\omega)F_{pm} = [V_m(\omega) + Z_c(\omega)I_m(\omega)]e^{-\gamma(\omega)l} \quad (57)$$

Por tanto, las ecuaciones (54) y (55) transformadas al dominio del tiempo son expresadas de la siguiente manera:

$$v_k(t) = Z_c * i_k(t) + [v_m(t) + Z_c * i_m(t)] * a(t) \quad (58)$$

$$v_m(t) = Z_c * i_m(t) + [v_k(t) + Z_c * i_k(t)] * a(t) \quad (59)$$

2.2.3 Transformador

El transformador es el principal elemento que forma parte de la red eléctrica y es el encargado de aumentar o disminuir el nivel de voltaje mediante circuitos eléctricos acoplados magnéticamente en los cuales la energía se transfieren mediante inducción [3].

- **Parámetros del transformador**

Para el cálculo de los parámetros se utiliza el modelo de un transformador de tres devanados como lo muestra la Figura 11. La rama de magnetización puede asignarse a cualquiera de los tres devanados, los demás devanados están acoplados por el núcleo [3].

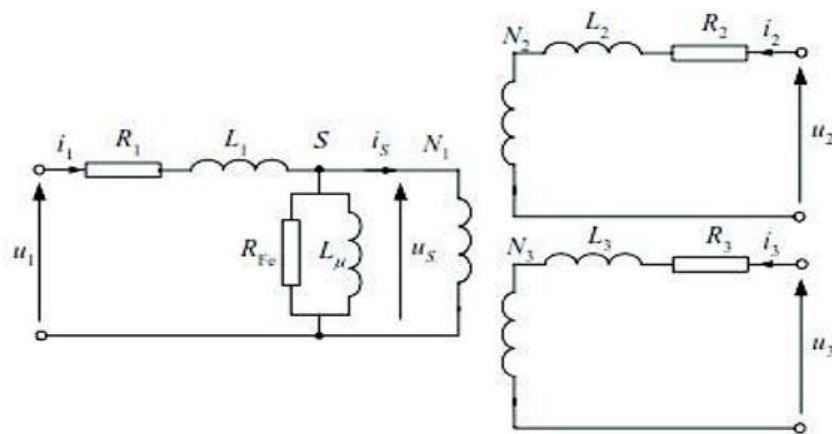


Figura 11. Transformador de tres devanados.

Mediante las pruebas de corto circuito y vacío se determinan los parámetros del circuito equivalente del transformador. En la Figura 12 se muestra el arreglo Delta y arreglo Estrella del circuito equivalente del transformador.

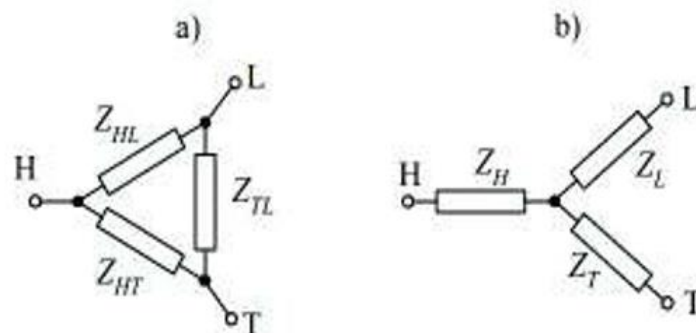


Figura 12. Transformador de tres devanados, a) arreglo delta y b) arreglo en estrella.

Las impedancias se calculan con las ecuaciones siguientes.

$$Z_{HL} = \frac{u_{KHL} U_{rH}^2}{100 \cdot S_T} \quad (60)$$

$$Z_{HT} = \frac{u_{KHT} U_{rH}^2}{100 \cdot S_T} \quad (62)$$

$$Z_{LT} = \frac{u_{KLT} U_{rL}^2}{100 \cdot S_T} \quad (63)$$

Donde u_{KHL} , u_{KHT} , u_{KLT} , son los respectivos voltajes de corto circuito, U_{rH} , U_{rL} , U_{rT} , voltajes nominales de los respectivos devanados y la potencia base S_T .

De igual manera, las resistencias se calculan con la potencia disipada por los devanados del transformador con las siguientes ecuaciones.

$$R_{HL} = \frac{\Delta P_{cuHL} U_{rH}^2}{S_r^2} \quad (64)$$

$$R_{HT} = \frac{\Delta P_{cuHT} U_{rH}^2}{S_r^2} \quad (65)$$

$$R_{LT} = \frac{\Delta P_{cuLT} U_{rL}^2}{S_r^2} \quad (66)$$

Usando las ecuaciones anteriores se calcula Z_{LT} y R_{LT} referidas al lado de bajo voltaje con la relación de transformación.

$$Z_{HT} = \vartheta Z_{LT} \quad (67)$$

Donde ϑ es la relación de transformación.

Po lo tanto, las impedancias de los devanados de la Figura 12 b), están determinadas por las siguientes ecuaciones.

$$Z_H = 0.5(Z_{HL} + Z_{HT} - Z'_{LT}) \quad (68)$$

$$Z_L = 0.5(Z_{HL} + Z'_{LT} - Z'_{HT}) \quad (69)$$

$$Z_T = 0.5(Z_{HT} + Z'_{LT} - Z'_{HL}) \quad (70)$$

Una vez conocido los valores de la resistencia calcula la reactancia para cada devanado con la siguiente ecuación [3].

$$X_H = \sqrt{Z_H^2 - R_H^2} \quad (71)$$

De la prueba en vacío del transformador se calcula los parámetros de la rama de magnetización conectada al lado de alto voltaje y se obtiene las siguientes ecuaciones.

$$R_{Fe} = \frac{U_{rH}^2}{\Delta P_{Fe}} \quad (72)$$

$$Z_p = \frac{100 * U_{rH}^2}{i_0 * S_r} \quad (73)$$

$$X_u = \frac{R_{Fe} Z_p}{\sqrt{R_{Fe}^2 - Z_p^2}} \quad (74)$$

Donde:

R_{Fe} : Resistencia por pérdidas de histéresis y corrientes de Eddy.

ΔP_{Fe} : Pérdidas en el núcleo.

i_0 : Corriente de excitación.

2.2.4 Modelos ATPDraw para estructuración de redes eléctricas.

Los modelos de ATPDraw utilizados en la estructuración de la red sobre la cual se hacen las simulaciones para el estudio de fenómenos transitorios de frente lento se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Modelos utilizados en ATPDraw.

Elemento	Modelo en ATP
Líneas de Transmisión	LCC Template
Equivalente de Red	Fuente Type 14 y RL Coupled Line sequence
Transformador	Hybrid Model
Interruptor	Switch Time 3ph
Compensación capacitiva	Branch RCL-Y 3-ph
Capacitancia	Branch RCL 3ph
Barras y carga	Bus

- Modelo de la línea.

ATPDraw posee varios modelos que permiten representar las líneas de transmisión. Los sobrevoltajes originados por maniobras se basan en la refracción de ondas viajeras, por tal motivo es conveniente representar las líneas de transmisión con el modelo de parámetros

distribuidos dependientes de la frecuencia (J. Martí). En la Figuras 24 se muestra el ícono LCC Template mediante el cual se representa a una línea de transmisión.

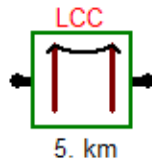


Figura 24. Modelo de la línea en ATPDraw

Para realizar los ajustes necesarios se hace doble clic en el icono y se abre una ventana donde se puede seleccionar e ingresar las características respectivas de la línea de transmisión. En la pestaña model se selecciona el modelo J. Martí, efecto piel, transposición, nombre, longitud, línea aérea, trifásica, matriz de transformación, resistividad del suelo. Ver Figura 25.

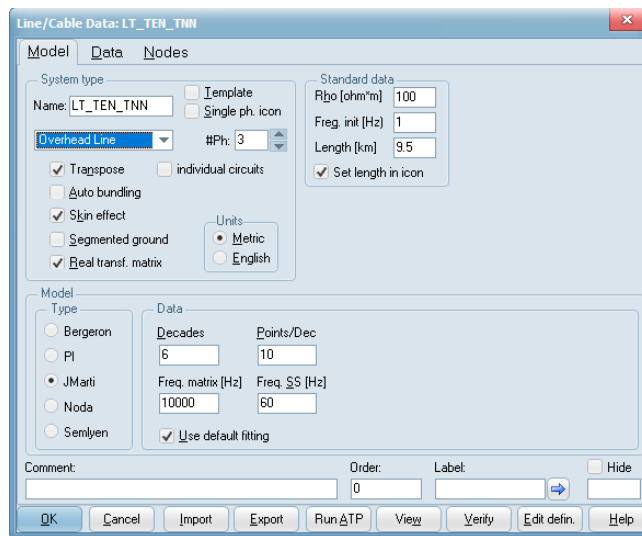


Figura 25. Ajuste del modelo de línea.

En la pestaña de data ingresamos la configuración de la torre, la resistencia del conductor, radio interno y externo del conductor, flecha. Ver Figura 26.

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0.436	0.798	0.199	0.9	16	16
2	2	0.436	0.798	0.199	0.9	17.4	17.4
3	3	0.436	0.798	0.199	0.9	18.8	18.8
4	3	0	0.53	0.413	0	20.2	20.2

Figura 26. Ajuste de los datos de la línea.

- **Modelo del transformador.**

El ATPDraw tiene varios modelos de transformadores el más adecuado para representar la red es el modelo XFMR (modelo híbrido), fue desarrollado con la finalidad de resolver análisis transitorio.

El modelo Híbrido se ha desarrollado con la finalidad de simular con precisión los efectos que producen los transitorios electromagnéticos tanto en el circuito eléctrico y en el circuito magnético [8].

El modelo se basa en la transformación del circuito magnético a un circuito equivalente eléctrico para facilitar el estudio. Este modelo aprovecha la información de los modelos antes desarrollados y toma algunas consideraciones fundamentales como:

- La inductancia de dispersión relacionada directamente con el flujo de dispersión. Se soluciona utilizando una bobina muy delgada sobre el núcleo [8].
- No linealidad del núcleo [8].
- Las resistencias consideran el efecto piel y efecto de proximidad. El efecto piel causado por la distribución no uniforme del campo magnético, el efecto proximidad se debe a la cercanía de los campos magnéticos por bobina que al superponerse causan una variación significativa en la resistencia [8].
- En transformadores de muy alta tensión los efectos capacitivos son muy importantes y deben incluidos como condensadores entre bobinados y condensadores entre las bobina y el tanque [8].

La Figura 27 muestra el ícono del modelo híbrido mediante el cual se representa a un transformador. Para los ajustes necesarios se hace doble clic en el icono y se abre una ventana donde se ingresa los datos del transformador como frecuencia, devanados, potencia, voltajes, disposición, reporte de pruebas y valores típicos (Figura 28).



Figura 27. Modelo XFMR (Híbrido) del transformador.

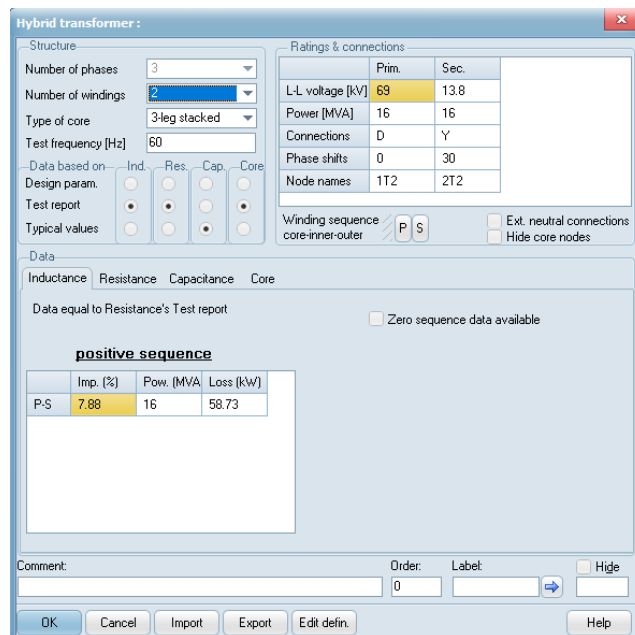


Figura 28. Ajuste del transformador XFMR.

- **Equivalente de red.**

El equivalente de red es la manera de representar en forma reducida determinado fragmento del sistema, que no es importante para el estudio pero influye directamente en el sistema [1]. Los parámetros eléctricos que se deben tener en cuenta para el modelo del equivalente de red son R_0 , X_0 , R_1 , X_1 , parámetros que pueden obtenerse del software DlgSILENT realizando cortocircuitos, monofásicos y trifásicos en el lugar donde se quiere obtener el equivalente.

Para modelar el equivalente de red ATPDraw dispone de una fuente *Type 14* y *Symmetric RL coupled line* que en conjunto representan a la red equivalente. La Figura 29 muestra

los íconos de los modelos Type 14 y *Symmetric RL coupled line* mediante los cuales se representan el equivalente de red.



Figura 29. Modelos para representar el equivalente de red. a) Fuente Type 14. b) Symmetric RL coupled line.

En la Figura 30 se muestra el cuadro de dialogo para el ajuste del modelo de la Fuente Type 14 donde se configura el voltaje, frecuencia, ángulo de desfase, inicialización.

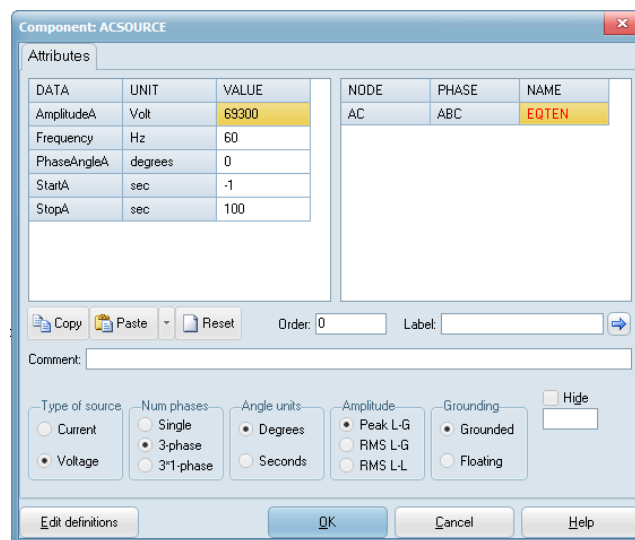


Figura 30. Ajustes de la fuente Type 14.

En la Figura 31 se muestra el cuadro de dialogo para el ajuste del modelo *Symmetric RL coupled line* donde se ingresa los valores de los parámetros de secuencia positiva y secuencia cero obtenidos del análisis de cortocircuitos monofásicos y trifásicos en DlgSILENT.

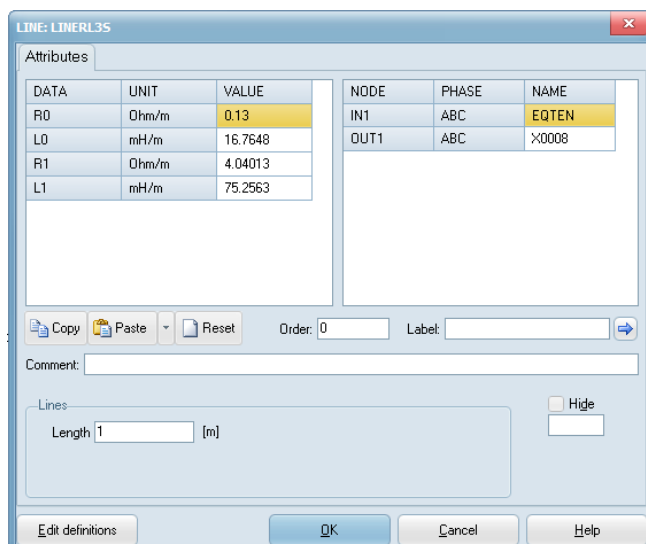


Figura 31. Ajustes de la Symmetric RL coupled line.

- Interruptor convencional.

ATP proporciona varios tipos de interruptores y según el objetivo deseado se utiliza el más conveniente. Los interruptores convencionales abrirán al primer paso por cero posterior al tiempo de apertura escogido por el usuario y se cerrarán sin condiciones relativas al tiempo elegido. Los interruptores controlados por tensión, inicialmente abiertos, se cerrarán para un tiempo mayor al tiempo de cierre cuando la tensión supere el valor especificado y permanecerán cerrados durante el tiempo escogido. Para los interruptores estadísticos, el tiempo de cierre es aleatorio permaneciendo cerrado el resto de la simulación. En los Interruptores sistemáticos el tiempo de cierre esta espaciado entre valores escogidos. Finalmente, los interruptores para medición permanecen siempre cerrados y sirven para medir los parámetros eléctricos.

En la Figura 32 se muestra el ícono del modelo *Switch Time 3ph* mediante el cual se representa el interruptor convencional.

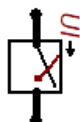


Figura 32. Modelo del interruptor convencional.

En la Figura 33 se muestra el cuadro de dialogo para el ajuste del modelo del interruptor convencional donde se ingresa los tiempos de cierre y apertura.

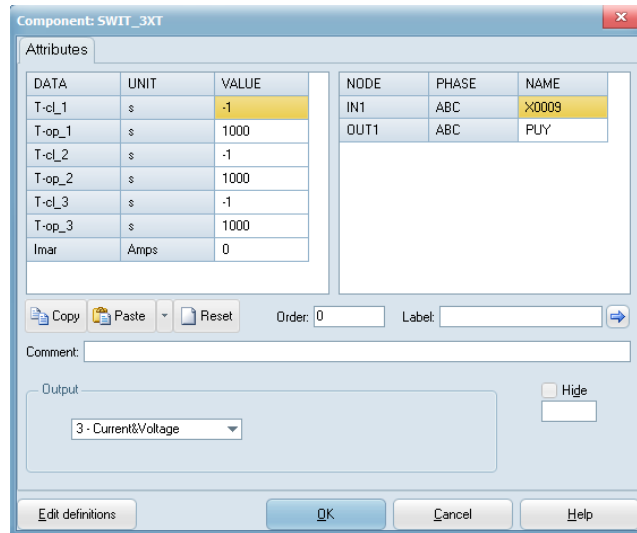


Figura 33. Ajuste del interruptor convencional.

- **Compensación capacitiva.**

A bajos niveles de voltaje y con líneas de subtransmisión relativamente cortas la compensación capacitiva se realiza para mejorar los bajos voltajes que se presentan en la zona debido a la demanda. Para niveles de voltajes elevados y líneas de transmisión relativamente largas, la compensación capacitiva puede ser de dos tipos: serie y paralelo.

- La capacitancia en la línea produce un efecto en la línea conocido como efecto Ferranti que no es más que el incremento del voltaje en la misma en estado de carga vacía. Por tal motivo se utiliza la compensación paralela que disminuye estos sobrevoltajes [9].
- La introducción de capacitores en serie con la línea hace que la reactancia negativa compense la reactancia inductiva de la línea y permite mejorar la estabilidad del sistema en estado estable y del estado transitorio [9].

En la Figura 34 se muestra el ícono del modelo *Branch RCL-Y 3-ph* mediante el cual se representa el compensador capacitivo.

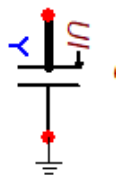


Figura 34. Modelo del compensador capacitivo.

En la Figura 35 se muestra el cuadro de diálogo para el ajuste del modelo del compensador capacitivo donde se ingresa el valor de la capacitancia.

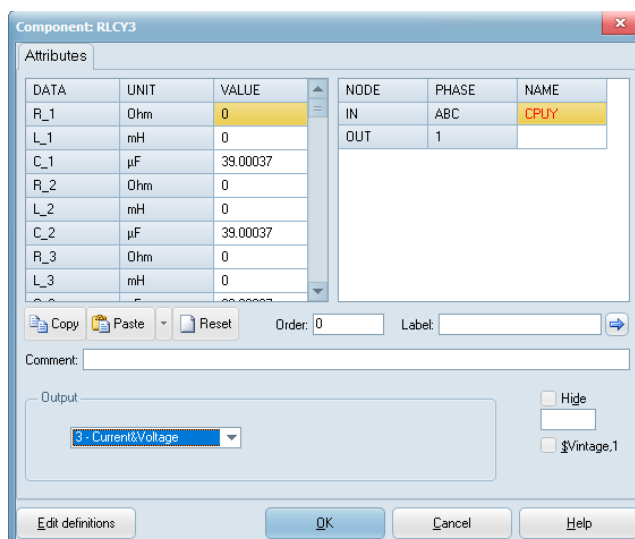


Figura 35. Cuadro de diálogo para el ajuste de la compensación capacitiva.

- **Capacitancia.**

En el estudio de transitorios electromagnéticos el cierre de los interruptores en la energización produce un acoplamiento capacitivo entre los polos y entre cada polo y tierra, este acoplamiento se representa con el uso de capacitores. ATPDraw dispone del modelo *Branch RCL-3ph* que simula la capacitancia del acoplamiento.

En la Figura 36 se muestra el ícono del modelo *Branch RCL- 3-ph* mediante el cual se representa la capacitancia.

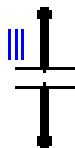


Figura 36. Modelo de la capacitancia.

En la Figura 37 se muestra el cuadro de dialogo para el ajuste del modelo del capacitor donde se ingresa el valor de la capacitancia.

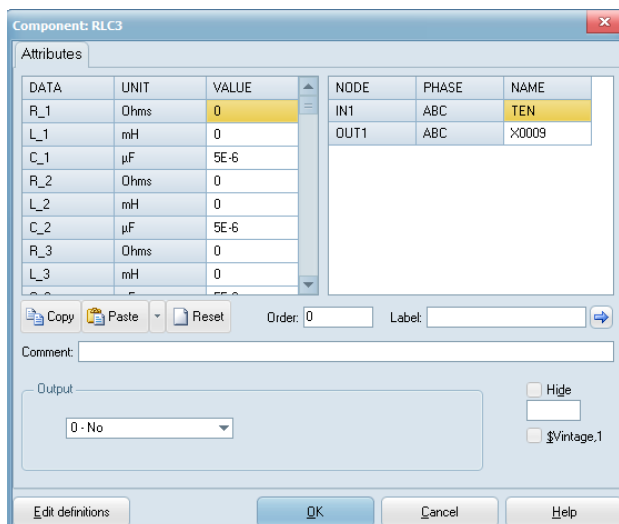


Figura 37. Cuadro de diálogo para el ajuste del capacitor.

- **Barras.**

En estudios de transitorios electromagnéticos las barras no se modelan debido a que sus parámetros eléctricos en comparación con los demás elementos del sistema son despreciables y no influyen en el comportamiento del sistema. En la Figura 38 se muestra el ícono del modelo *Bus* mediante el cual se representan las barras de las subestaciones.



Figura 38. Modelo de las barras.

En la Figura 39 se muestra el cuadro de dialogo para el ajuste del modelo de barras donde se ingresa el número de nodos, el voltaje, la potencia activa, potencia reactiva.

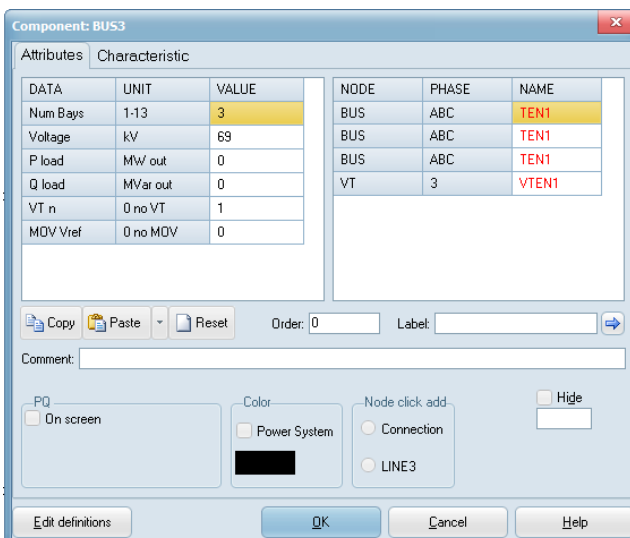


Figura 39. Cuadro de dialogo para el ajuste de las barras.

- Descargadores.

Los descargadores de sobrevoltajes son componentes destinados a proteger los equipos que forman parte de una instalación eléctrica, de manera especial a transformadores. Los descargadores de óxido metálico disponen de unos elementos no lineales que en condiciones normales los voltajes de línea conducen unos pocos miliamperios de corriente de fuga, que pueden ser tolerados de forma continua. Cuando se presenta un sobrevoltaje y la corriente que circula por el descargador aumenta, la resistencia de los elementos no lineales disminuye drásticamente para absorber la corriente de descarga sin que aumente el voltaje entre bornes de los descargadores.

ATPDraw contiene en su librería el modelo $R(i)$ Type 92 que representa la característica de no linealidad que tienen los descargadores de Óxido de Zinc.

En la Figura 40 se muestra el ícono del modelo $R(i)$ Type 92 mediante el cual se representan los descargadores.

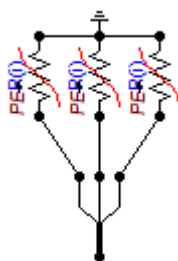


Figura 40. Modelo de las resistencias con características no lineales.

En la Figura 41 se muestra el cuadro de dialogo para el ajuste del modelo $R(i)$ Type 92 donde se ingresa la característica no lineal $V-I$ 30/60 μs ya que este frente corresponde a transitorios por maniobra, la característica $V-I$ es extraída de los catálogos proporcionados por los fabricantes. En este modelo se toma valores aproximados de la característica $V-I$ resultado de muchos ensayos aplicados a los descargadores de Óxido de Metálico.

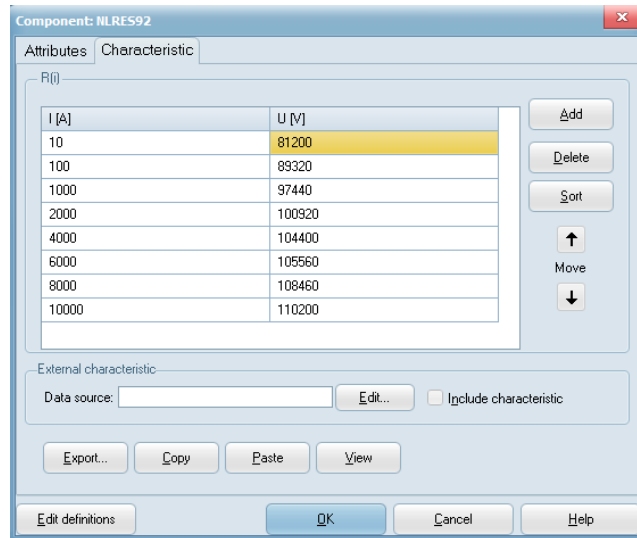


Figura 41. Ajuste de las resistencias con características no lineales.

3 APLICACIÓN - ESTUDIO EN LA RED ELÉCTRICA DE LA EEASA

3.1 Información Básica del Sistema

La EEASA en la actualidad cubre la mayor parte del centro del país con una superficie de aproximada de 40.805 Km^2 y brinda sus servicios a más de 700.000 habitantes en las provincias de Tungurahua, Pastaza, Napo y parte de Morona Santiago llegando a un nivel de cobertura del 98.5 %.

La EEASA dispone de cinco puntos de conexión con el Sistema Nacional Interconectado (SNI), tres en la provincia de Tungurahua, uno en Napo y el restante entre Pastaza y Morona Santiago. Todos los puntos de entrega se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Puntos de conexión EEASA - SNI

Nombre de la subestación	Nivel de Voltaje [kV]
Ambato Transelectric	138/69
Totoras Transelectric	230/138/69
Baños Transelectric	138/69
Puyo Transelectric	138/69
Tena Transelectric	138/69

La red de subtransmisión de la EEASA se compone por subestaciones y líneas que unen el sistema de transmisión con el sistema de distribución, esta red en condiciones normales se encuentra operando de forma radial. En la Figura 42 se puede apreciar el sistema de subtransmisión.

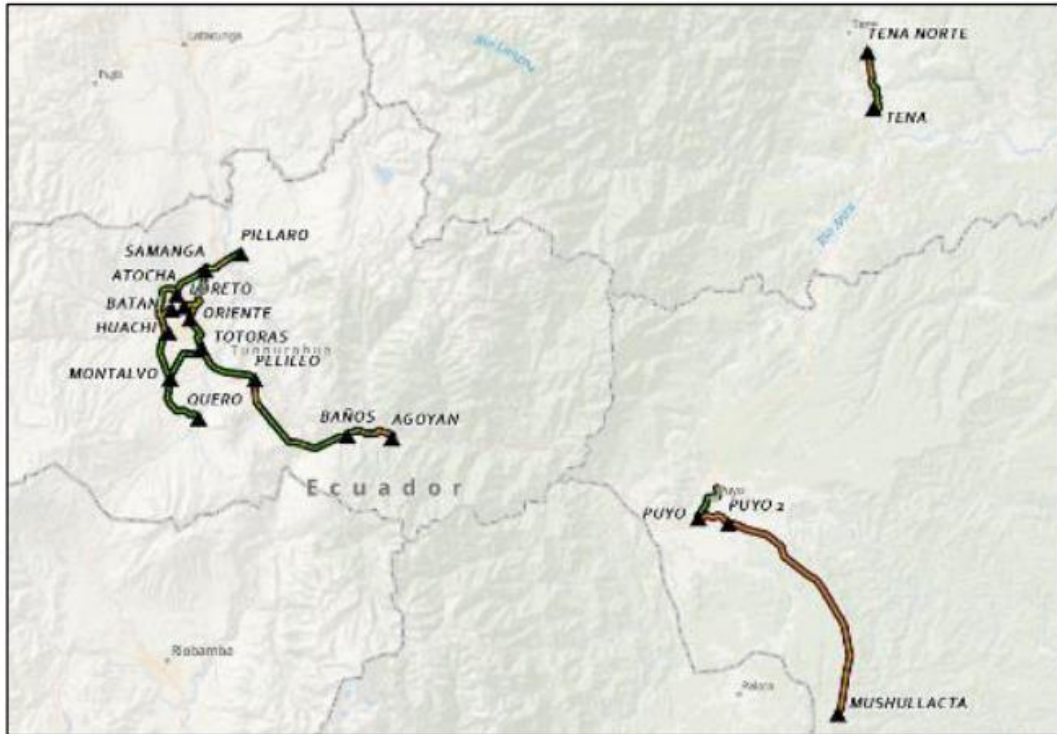


Figura 42. Ubicación espacial del sistema de subtransmisión EEASA.

El sistema de subtransmisión brinda servicio a 19 subestaciones de distribución, todas de tipo reductoras con niveles de voltaje de 69 kV en el lado de subtransmisión y 13,8 kV en distribución. En la Tabla 4 se indican las subestaciones pertenecientes a la EEASA y su capacidad instalada.

Tabla 4. Subestaciones de la EEASA [10].

Nombre de la Subestación	Voltaje [kV]		Capacidad [MVA]	
	Entrada	Salida	OA	FA
AGOYAN	69	13,8	5	6,25
ATOCHA	69	13,8	20	25
BAÑOS	69	13,8	10	12,5
BATAN	69	13,8	15	18,75
HUACHI	69	13,8	32	40
LORETO	69	13,8	32	40

MONTALVO	69	13,8	10	12,5
MUSHULLACTA	69	13,8	5	6,25
ORIENTE	69	13,8	24	30
PELILEO	69	13,8	16	20
PILLARO	69	13,8	10	12,5
PUYO 1	69	13,8	15	18,75
PUYO 2	69	13,8	16	20
QUERO	69	13,8	10	12,5
SAMANGA	69	13,8	24	33
TENA	69	13,8	10	12,5
TENA NORTE	69	13,8	16	20
TOTORAS	69	13,8	16	20

La EEASA cuenta con 23 líneas de subtransmisión a nivel de 69 kV que enlazan las subestaciones con los puntos de entrega del SNI y forman redes de subtransmisión, sus características se encuentran en la Tabla 5. Gracias a la disponibilidad y localización de tres puntos de alimentación por parte del SNI, la configuración topológica de las subestaciones Huachi, Totoras, Oriente, Samanga y Atocha forma un anillo alrededor del casco urbano de la ciudad de Ambato que en complemento con la disposición radial de Batán, Loreto, Píllaro, Quero, Pelileo, Baños y Agoyán es posible brindar el suministro de energía a toda la provincia de Tungurahua [10].

En la zona oriental las líneas se encuentran configuradas de tal forma que se logra conectar las subestaciones Puyo 1, Puyo 2 y Mushullacta con el fin de atender la demanda en las provincias de Pastaza y parte de Morona Santiago. En la provincia de Napo se encuentra con un solo punto de interconexión con el SNI y la red de subtransmisión interconecta a las subestaciones Tena y Tena Norte.

Tabla 5. Líneas de subtransmisión EEASA [10].

Nombre de la línea	Voltaje [kV]	Material del conductor	Calibre del conductor [MCM]	Longitud [Km]
Totoras SNI – Montalvo	69	ACSR	477	5,63
Montalvo – Huachi	69	ACSR	477	8
Samanga – Ambato SNI	69	AAAC	559,5	4,8

Atocha – Samanga	69	ACSR	477	4,5
Ambato SNI – Península	69	ACAR	500	0,5
Totoras SNI – Pelileo	69	ACSR	266,8	10,2
Pelileo – Baños	69	ACSR	266,8	20,4
Península – Loreto	69	ACSR	300	3,406
Samanga - Píllaro	69	ACSR	266,8	5,68
Río Verde Chico – Agoyán	69	ACSR	266,8	3,15
Puyo SNI – Puyo 1	69	ACSR	266,8	5
Montalvo – Quero	69	ACAR	300	8,35
Totoras SNI – Totoras	69	ACSR	266,8	1,2
Puyo 1 – Puyo 2	69	ACSR	300	5
Tena SNI – Tena	69	ACAR	300	0,05
Tena SNI – Tena Norte	69	ACAR	300	9,5
Baños SNI – Agoyán	69	ACSR	266,8	0,5
Puyo 2 – Mushullacta	69	ACSR	300	32,84
Atocha – Batán	69	ACSR	477	7,12
Totoras – Oriente	69	ACSR	266,8	5,03
Oriente – Península	69	ACAR	300	2.65
Huachi – Batán	69	ACSR	477	3.38
Baños – Río Verde Chico	69	ACSR	266,8	4.40

La modelación en ATPDraw parte de la información proporcionada por la EEASA en un archivo en formato DIgSILENT. La red eléctrica de la EEASA a nivel de Subtransmisión es modelada completamente mientras que los alimentadores de distribución son modelados como cargas.

La operación normal de la EEASA es de forma radial, por tanto, las líneas Oriente – Península, Huachi – Batán, Baños – Río Verde Chico, que interconectan el anillo, permanecen normalmente abiertas, lo que permite considerar que, en relación a los puntos de interconexión con el SNI, los subsistemas pueden ser analizados de forma independiente.

- Subsistema Tena

Consta de dos subestaciones Tena y Tena Norte que se interconectan a la subestación Tena del SNI mediante las líneas de subtransmisión Tena SNI – Tena y Tena SNI – Tena Norte, cada subestación cuenta con un transformador y la

subestación Tena tiene un compensador capacitivo en su barra de bajo voltaje. El diagrama se muestra en el Anexo I.

- Subsistema Puyo

Consta de las subestaciones Puyo 1, Puyo 2 y Mushullacta, que se interconectan a la subestación Puyo SNI mediante las líneas de subtransmisión Puyo SNI – Puyo1, Puyo 1 - Puyo 2 y Puyo 2 – Mushullacta. La subestación Puyo1 consta de dos transformadores y un compensador capacitivo en su barra de bajo voltaje, las subestaciones Puyo 2 y Mushullacta cuentan con un transformador cada una. El diagrama se muestra Anexo II.

- Subsistema Ambato

Consta de las subestaciones Samanga, Píllaro, Península, Loreto, Atocha y Batán que se interconectan a la subestación Ambato SNI mediante las líneas de subtransmisión Ambato SNI – Samanga, Ambato SNI – Península, Samanga-Píllaro, Samanga – Atocha, Atocha – Batán y Península – Loreto. Todas las subestaciones cuentan con dos transformadores y en la subestación Península se ubican 4 unidades de generación, representadas con un equivalente de red. Las subestaciones Samanga y Atocha tiene compensadores capacitivos en su barra de bajo voltaje. El diagrama se muestra Anexo III.

- Subsistema Totoras

Consta de las subestaciones Baños, Pelileo, Totoras, Oriente, Montalvo, Quero y Huachi que se interconectan con la Subestación Totoras SNI mediante las líneas de subtransmisión Totoras SNI – Pelileo, Totoras SNI – Totoras, Pelileo – Baños, Totoras – Oriente, Totoras SNI – Montalvo, Montalvo – Huachi y Montalvo – Quero. Las subestaciones Huachi y Orienten tienen dos transformadores mientras que las demás subestaciones tienen un transformador; y, en las subestaciones Huachi, Oriente y Montalvo se cuenta con compensadores capacitivos en sus barras de bajo voltaje. El diagrama se muestra Anexo IV.

- Subsistema Baños

Consta de la subestacion Agoyán y de la central de generación Rio Verde Chico; estos elementos se interconectan a la subestación Baños SNI mediante las líneas de subtransmisión Baños SNI – Agoyán, Agoyán – Rio Verde Chico. La subestación Agoyán tiene un transformador reductor y la Central Rio Verde Chico tiene un transformador elevador. El diagrama se muestra Anexo V.

3.2 Casos de estudio

Una vez modelada la red de la EEASA en ATPDraw, se realiza el análisis de sobrevoltajes por maniobras de energización de líneas de transmisión, transformadores y compensadores, cada caso de energización se lo realiza de forma independiente.

En los subsistemas modelados anteriormente, el estudio de sobrevoltajes se puede realizar en cualquier punto y considerando a cualquier elemento del subsistema. Para cada subsistema se escoge una línea de subtransmisión, un transformador y un compensador capacitivo para la realización de las simulaciones de transitorios de energización tal como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Elementos escogidos como casos de estudio.

Subsistema	Línea de subtransmisión	Transformador	Compensador capacitivo
Tena	Tena SNI – Tena Norte	Tena Norte	Tena
Puyo	Puyo 2 – Mushullacta	Puyo 2	Puyo 1
Ambato	Ambato SNI – Península	Batán (T1)	Samanga
Totoras	Totoras SNI – Montalvo	Huachi (T1)	Oriente
Baños	Baños SNI – Agoyán	Agoyán	No hay

Las simulaciones a realizarse en los casos de estudio de líneas de subtransmisión son:

- Energización en vacío sin descargadores.
- Energización en vacío con descargadores.
- Energización con carga sin descargadores.
- Energización con carga con descargadores.
- Desconexión.

Las simulaciones a realizarse en los casos de estudio de transformadores son:

- Energización en vacío sin descargadores.
- Energización en vacío con descargadores
- Energización con carga sin descargadores.
- Energización con carga con descargadores.

- Desconexión.

Las simulaciones a realizarse en los casos de estudio de compensadores capacitivos son:

- Energización sin descargadores.
- Energización con descargadores.
- Desconexión.

A continuación, y con fines didácticos, se presenta como ejemplo la aplicación al subsistema Tena. El análisis de los demás subsistemas se detalla en el Anexo Digital.

3.2.1 Energización de Líneas

La línea de subtransmisión correspondiente al subsistema Tena es la línea Tena SNI – Tena Norte, los interruptores de la línea en las subestaciones son de control tripolar, lo que significa que el cierre de las tres fases se realiza al mismo tiempo. En ATPDraw los interruptores que simulan estos elementos del sistema son los interruptores controlados por tiempo, para los cuales el usuario puede ingresar el tiempo de cierre.

En este estudio se realiza simulaciones para los tiempos donde la onda de voltaje de la fase A son más representativos (cruces por cero, valores medios, máximos positivos y negativos). La onda de voltaje de la fase A necesaria para obtener los voltajes representativos y los instantes respectivos para el cierre de los interruptores, se la obtiene del estado estable del sistema. La Figura 39 muestra la onda de voltaje de la fase A en estado estable.

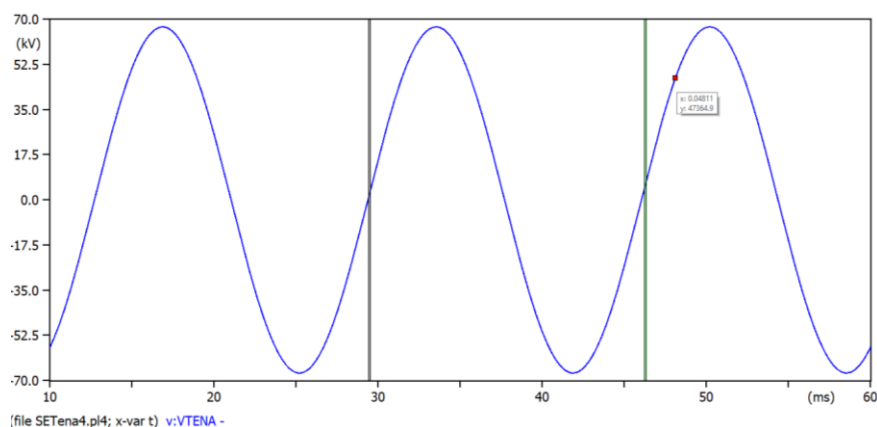


Figura 43. Onda de voltaje de la fase A en estado estable.

De la Figura 43 se observa que un ciclo de la onda se encuentra comprendido entre 0.029 y 0.047 segundos, intervalo de tiempo donde se hallan los voltajes representativos con sus tiempos respectivos.

En la Tabla 7 se indica los tiempos mínimos que el software proporciona para que la onda de voltaje de la fase A se aproxime a los voltajes representativos, el error existente entre los voltajes representativos y los voltajes aproximados que entrega ATP es propio del software de simulación.

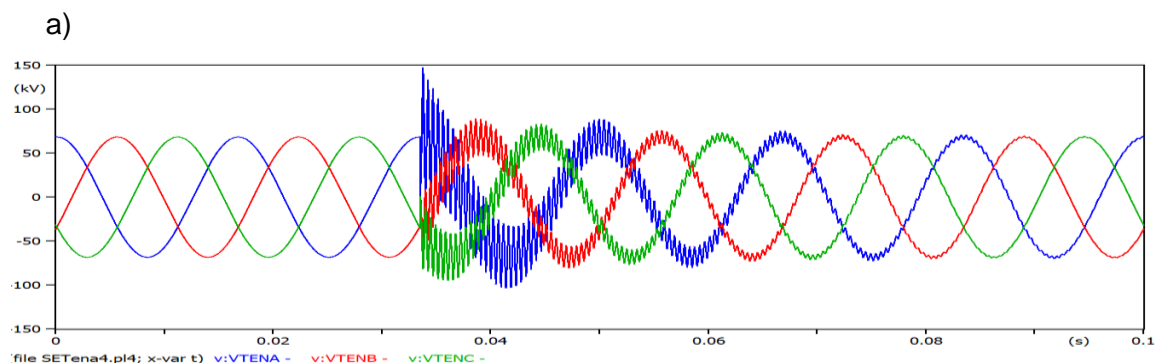
Tabla 7. Instantes donde los voltajes de la fase A se aproximan a los representativos.

Tiempos [s]	Voltajes representativos [V]	Voltajes aproximados que muestra ATP [V]	Sobrevoltajes [V]
0,029363	0,00	6,62	-132.070,00
0,030751	33.500,00	33.514,00	-147.110,00
0,033521	69.000,00	67.057,00	-147.130,00
0,036308	33.500,00	33.509,00	-147.010,00
0,037696	0,00	1,80	132.070,00
0,039085	-33.500,00	-33.528,00	147.110,00
0,041864	-69.000,00	-67.053,00	-147.100,00
0,044641	-33.500,00	-33.516,00	147.010,00
0,046029	0,00	-10,22	132.060,00

La Tabla 7 muestra que el menor sobrevoltaje se produce cuando la onda sinusoidal de la fase A pasa por valores cercanos a cero. Los mayores sobrevoltajes se producen cuando la onda sinusoidal de la fase A pasa por los valores medios y máximos, para la simulación se elige el tiempo donde el sobrevoltaje es mayor (0,033521s).

- **Energización en vacío de la línea de subtransmisión Tena SNI – Tena Norte.**

Para la energización en vacío de la línea de subtransmisión es necesario hacer los ajustes de los interruptores tanto en la subestación de salida como en la subestación de llegada, para lograr el caso planteado. Los resultados se muestran en la Figura 44 y Figura 45.



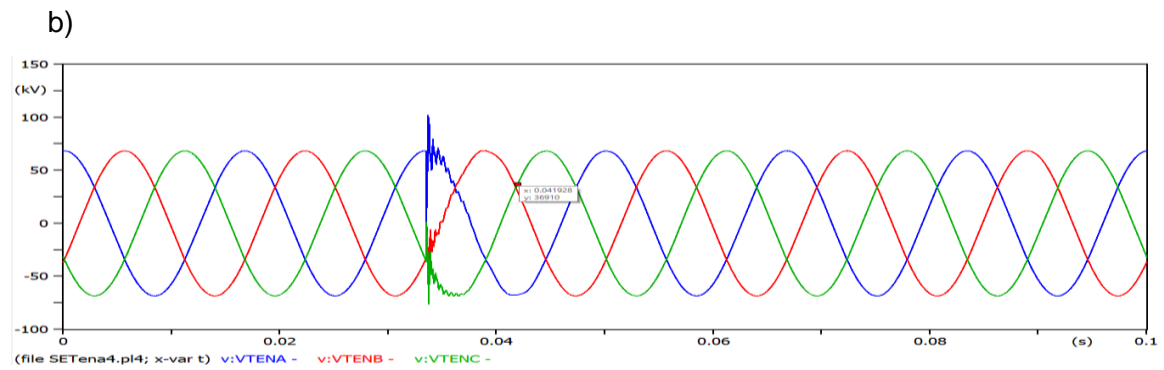


Figura 44. Tensión en la subestación Tena SNI durante la energización en vacío de la línea de subtransmisión. a) sin descargadores. b) con descargadores.

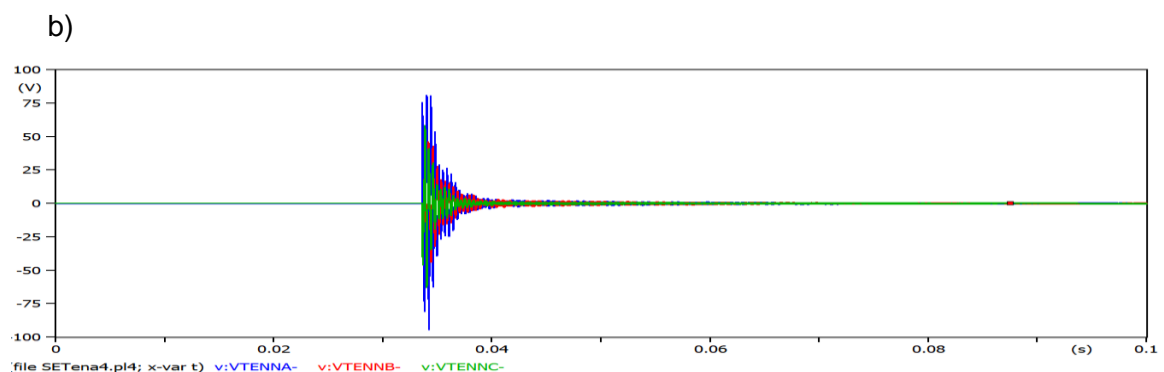
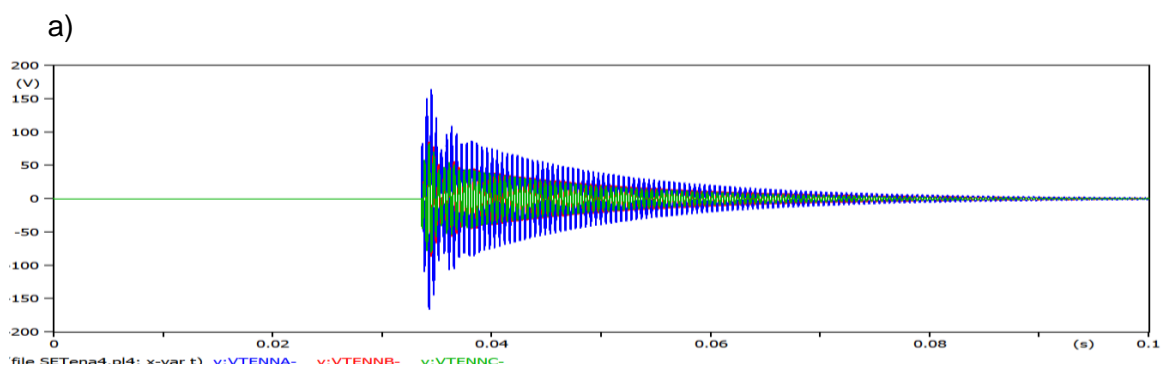


Figura 45. Tensión en la subestación Tena Norte durante la energización en vacío de la línea de subtransmisión. a) sin descargadores. b) con descargadores.

- **Energización con carga de la línea de subtransmisión Tena SNI – Tena Norte.**

Para la energización con carga de la línea de subtransmisión es necesario hacer los ajustes de los interruptores tanto en la subestación de salida como en la subestación de llegada, para lograr el caso planteado. Los resultados se muestran en la Figura 46 y Figura 47.

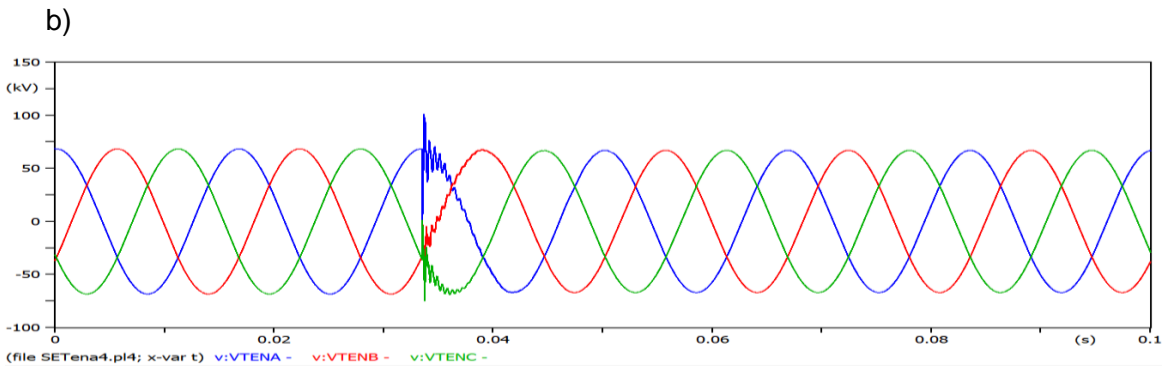
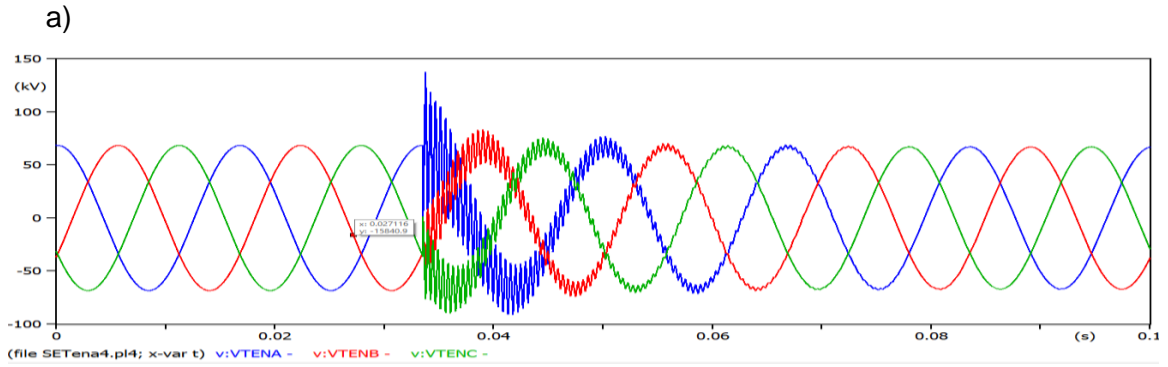


Figura 46. Tensión en la subestación Tena SNI durante la energización con carga de la línea de subtransmisión. a) sin descargadores. b) con descargadores.

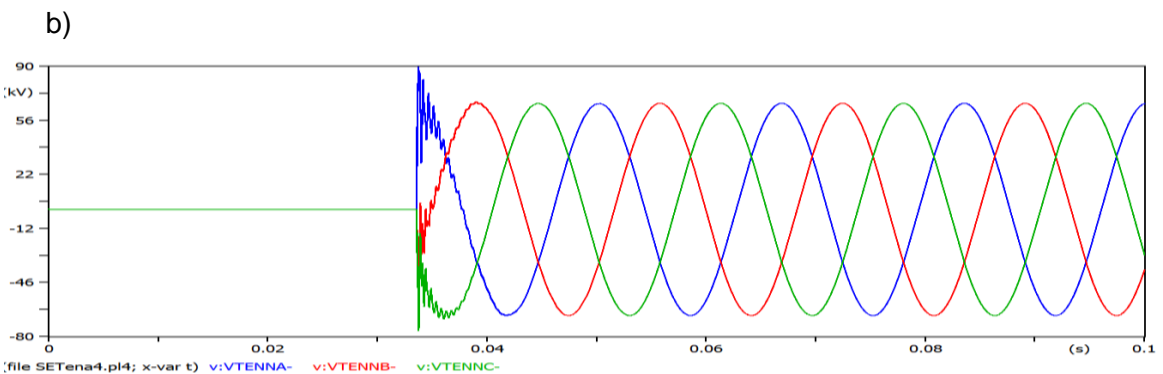
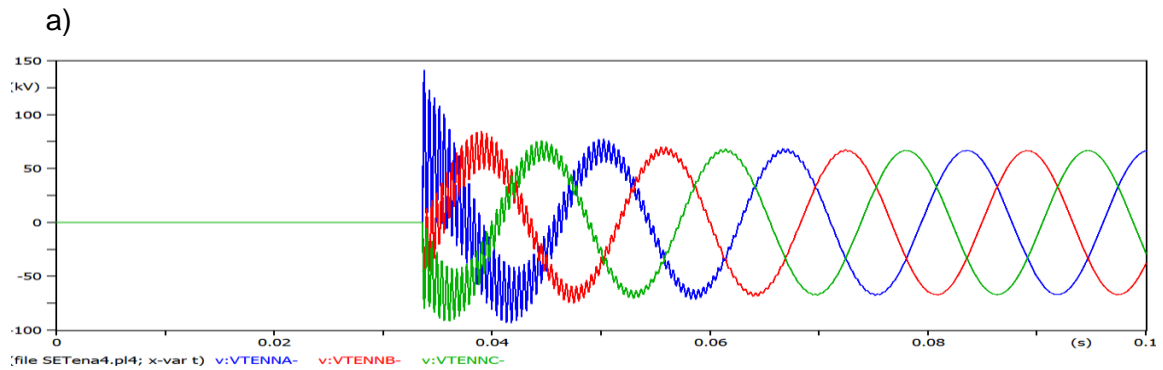


Figura 47. Tensión en la subestación Tena Norte durante la energización con carga de la línea de subtransmisión. a) sin descargadores. b) con descargadores.

- **Desconexión de la línea de subtransmisión Tena SNI – Tena Norte**

Para la desconexión de la línea de subtransmisión es necesario hacer el ajuste del interruptor para lograr el caso planteado. El instante en que se hace la desconexión es el mismo que en la energización. Los resultados se muestran en la Figura 48.

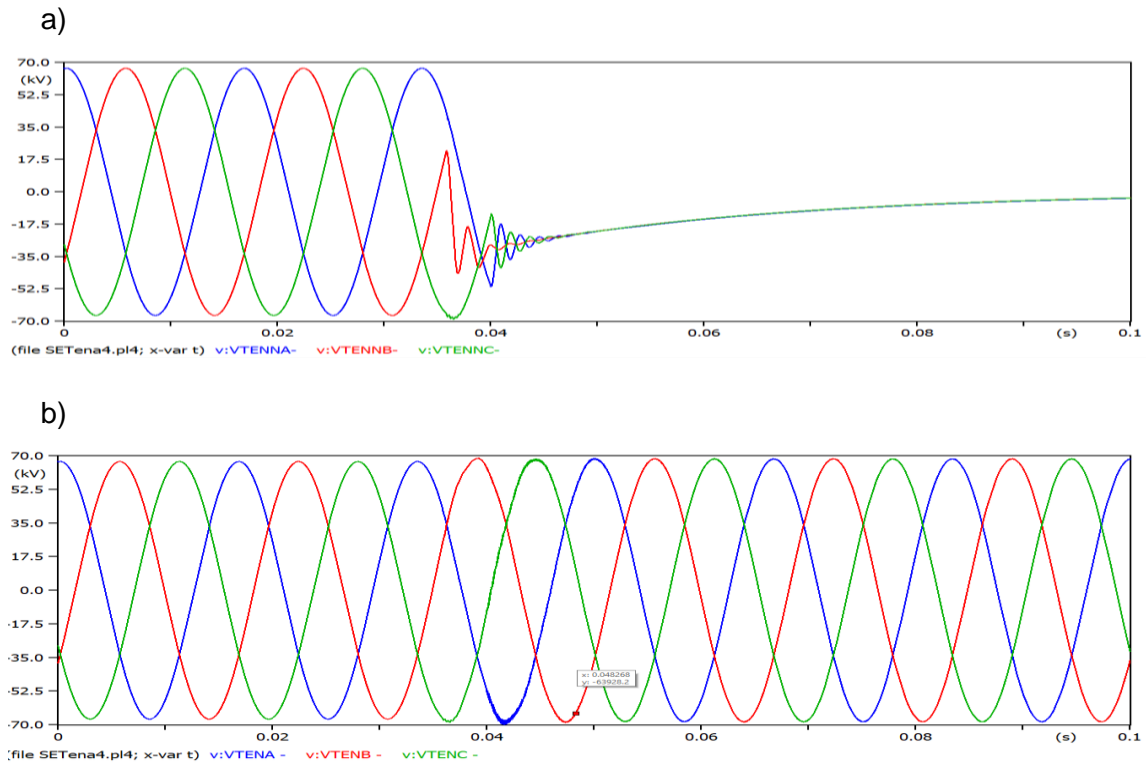


Figura 48. a) Tensión en la subestación Tena Norte durante la desconexión de la línea de subtransmisión. b) Tensión en la subestación Tena SNI durante la desconexión de la línea de subtransmisión.

Los resultados de las simulaciones muestran claramente que los niveles de sobrevoltajes y la distorsión de las ondas de voltajes son mayores cuando no se utilizan descargadores. Al incorporar los descargadores en el modelo, los niveles de sobrevoltajes y distorsiones de las ondas de voltaje disminuyen considerablemente.

En el momento de la energización en vacío de la línea de subtransmisión Tena SNI – Tena Norte, aparecen voltajes en la barra de la subestación Tena Norte debido a las capacitancias existentes entre sus elementos a pesar de que el interruptor se encuentra abierto.

En la desconexión de la línea de subtransmisión no hay sobrevoltajes ni distorsiones importantes que afecten la operación del sistema.

3.2.2 Energización del Transformador

En el análisis de energización del transformador se determina la corriente de energización y los sobrevoltajes originados durante la energización. Este análisis es independiente del análisis realizado en la energización de líneas.

El transformador que se energiza pertenece a la subestación Tena Norte, se energiza del lado de alto voltaje y al igual que en la energización de las líneas de subtransmisión, la energización de transformadores es en vacío y con carga.

Como ya se mencionó en la energización de líneas de subtransmisión los interruptores que manejan estas subestaciones tienen control tripolar, por tal motivo se realiza el mismo procedimiento para obtener el tiempo para las simulaciones respectivas.

En la energización de líneas de subtransmisión los mayores sobrevoltajes se producen cuando el interruptor cierra en el instante que la onda de voltaje de referencia (fase A) pasa por su valor máximo. Para la energización de transformadores se mantiene el mismo criterio, por tanto, el instante en el que se realiza el cierre del interruptor tripolar se lo obtiene buscando el máximo valor de voltaje de la fase de referencia (fase A) según se establece en la onda de voltaje para una simulación de estado estable, para esto se toma el mismo ciclo de la onda de referencia (0.029 s a 0.047 s). El valor encontrado se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Instante donde la onda de voltaje de referencia es máxima.

Tiempo [s]	Voltaje representativo [V]	Voltaje aproximado que muestra ATP [V]	Sobrevoltaje [V]
0,033542	69.000,00	66.864,00	84.517,00

- **Energización en vacío del transformador de la subestación Tena Norte.**

Para la energización en vacío del transformador es necesario hacer los ajustes de los interruptores tanto en el lado de alto voltaje como en el lado de bajo voltaje, para lograr el caso planteado. Los resultados se muestran en la Figura 49, Figura 50 y Figura 51.

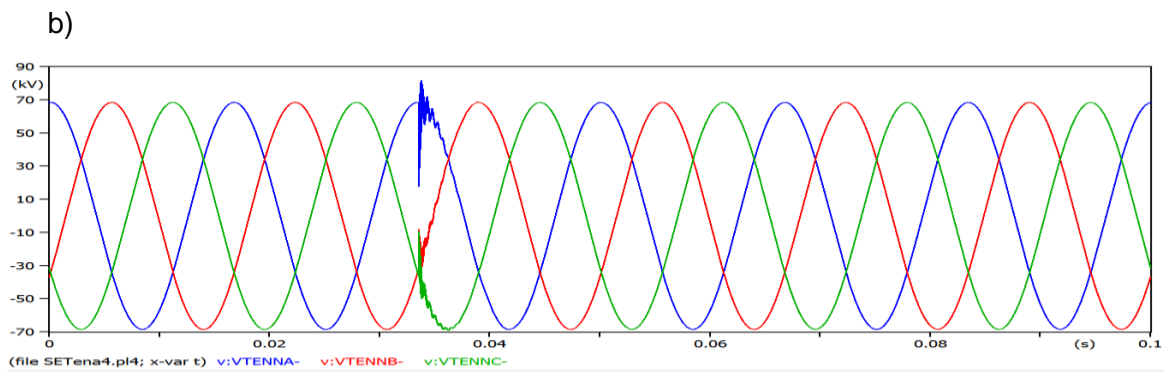
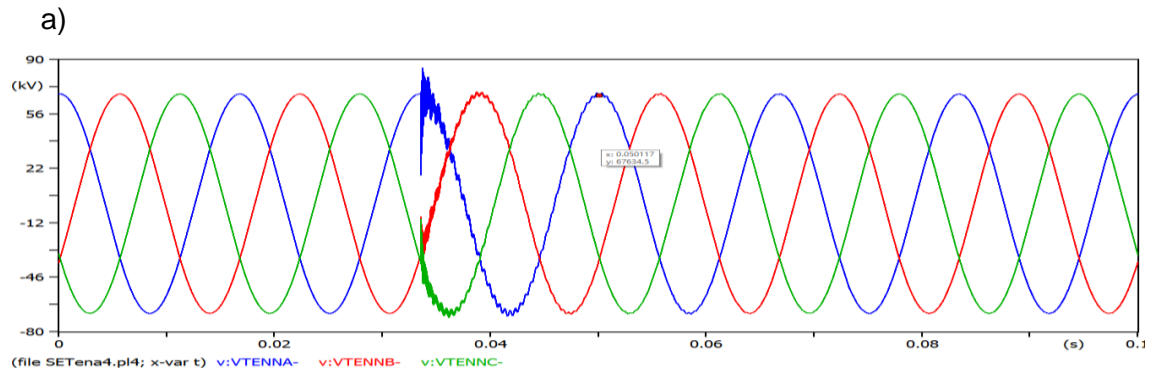


Figura 49. Tensión en el lado de alto voltaje del transformador durante su energización en vacío. a) sin descargadores. b) con descargadores.

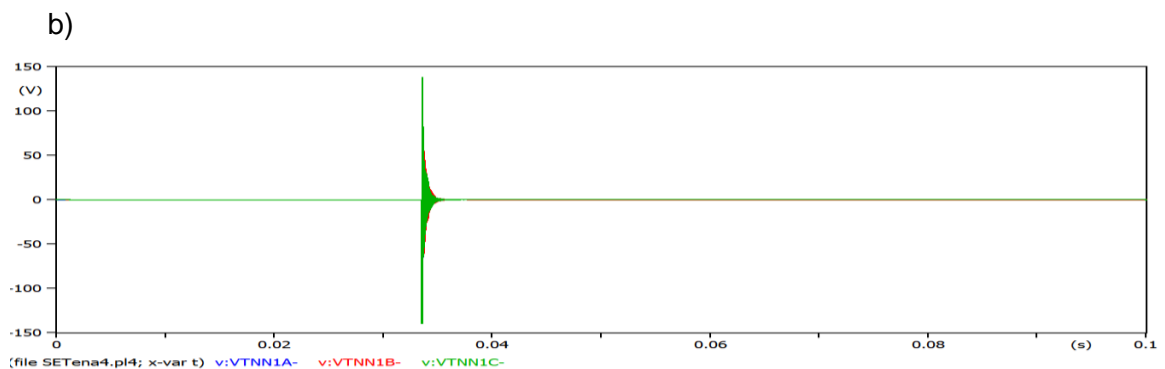
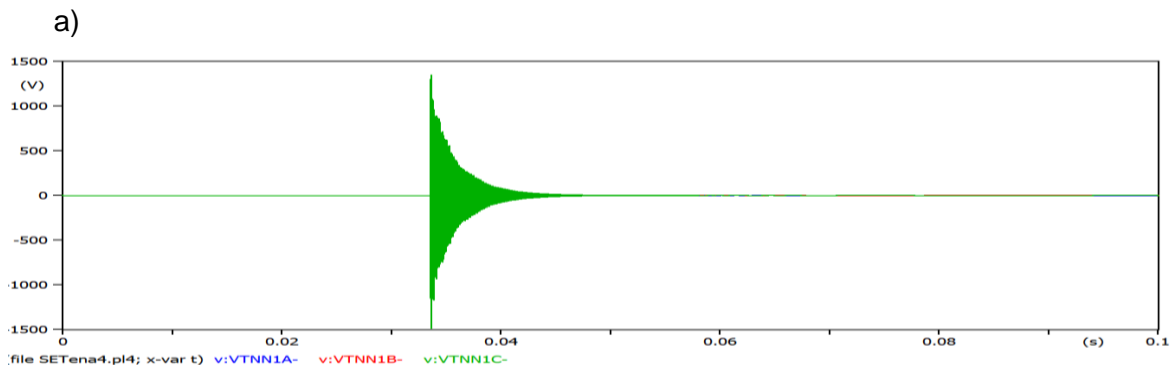


Figura 50. Tensión en el lado de bajo voltaje del transformador durante su energización en vacío. a) sin descargadores. b) con descargadores.

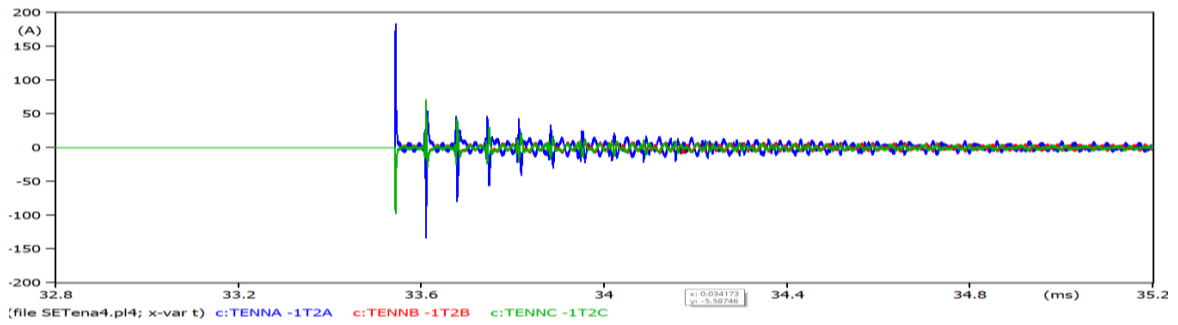


Figura 51. Corriente de energización del transformador sin carga.

- **Energización con carga del transformador de la subestación Tena Norte**

Para la energización con carga del transformador es necesario hacer los ajustes de los interruptores tanto en el lado de alto voltaje como en el lado de bajo voltaje, para lograr el caso planteado. Los resultados se muestran en la Figura 52, Figura 53, Figura 54.

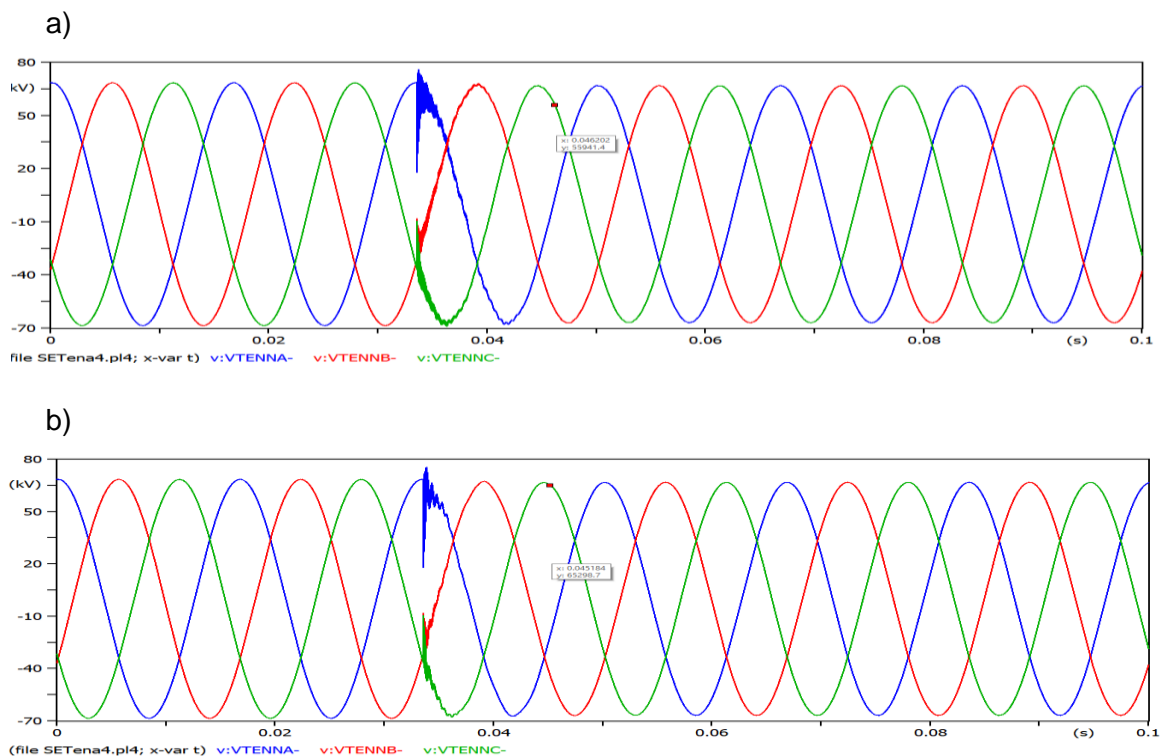


Figura 52. Tensión en el lado de alta del transformador en el momento de la energización con carga. a) sin descargadores. b) con descargadores.

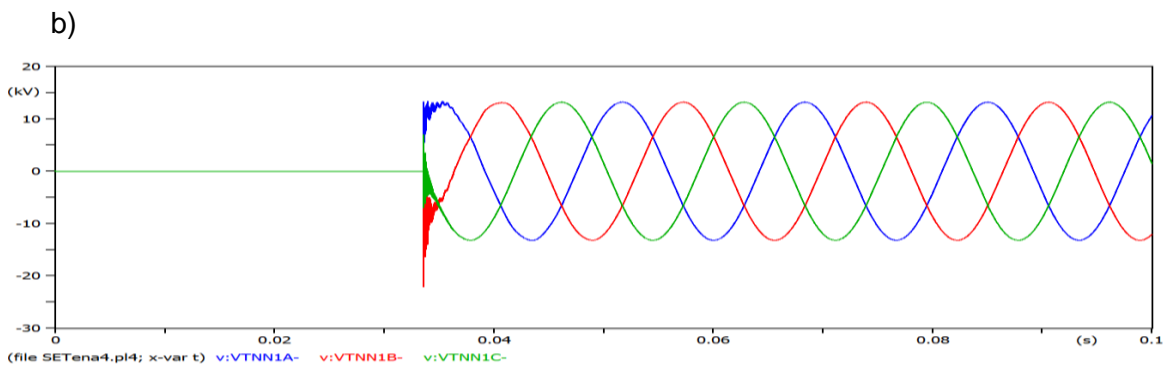
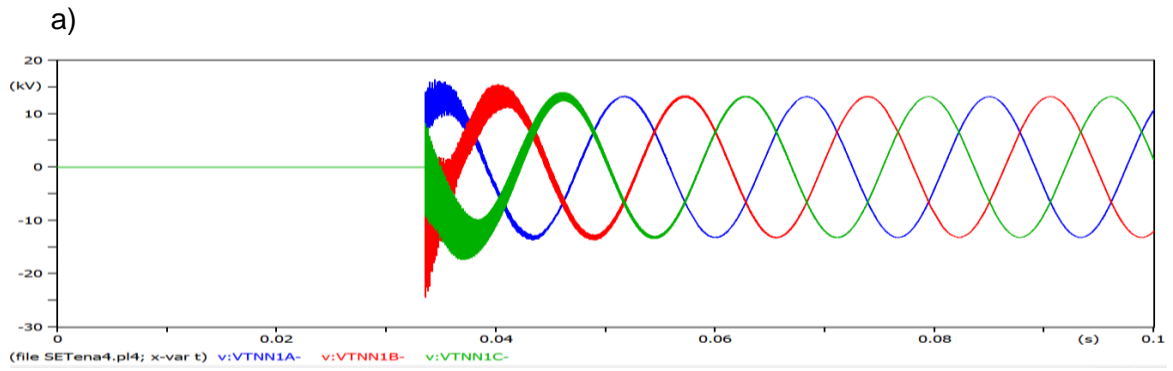


Figura 53. Tensión en el lado de baja del transformador en el momento de la energización con carga. a) sin descargadores. b) con descargadores.

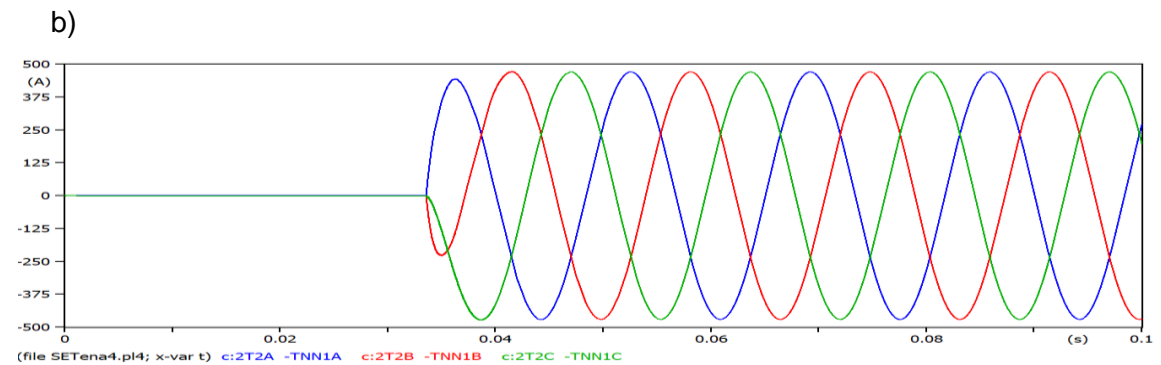
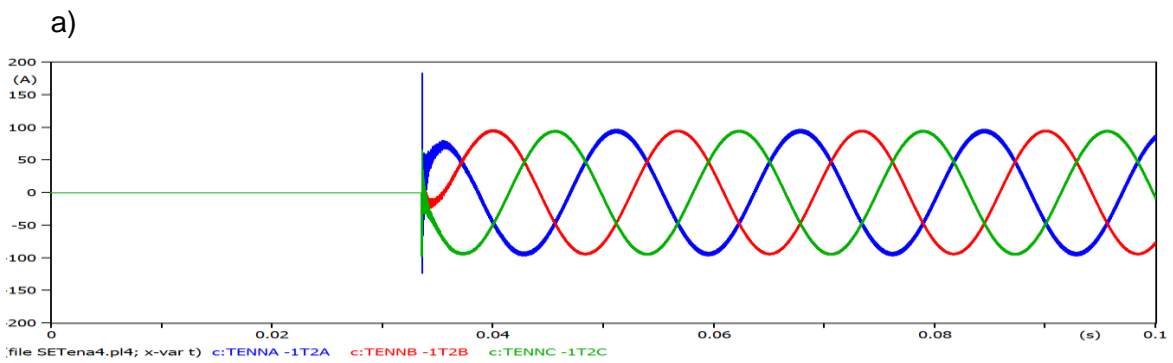


Figura 54. Corriente de energización del transformador con carga. a) Lado de 69kV. b) lado 13.8 kV.

- **Desconexión del transformador de la subestación Tena Norte**

Para la desconexión del transformador es necesario hacer el ajuste del interruptor para lograr el caso planteado. El instante en que se hace la desconexión es el mismo que en la energización. Los resultados se muestran en la Figura 55.

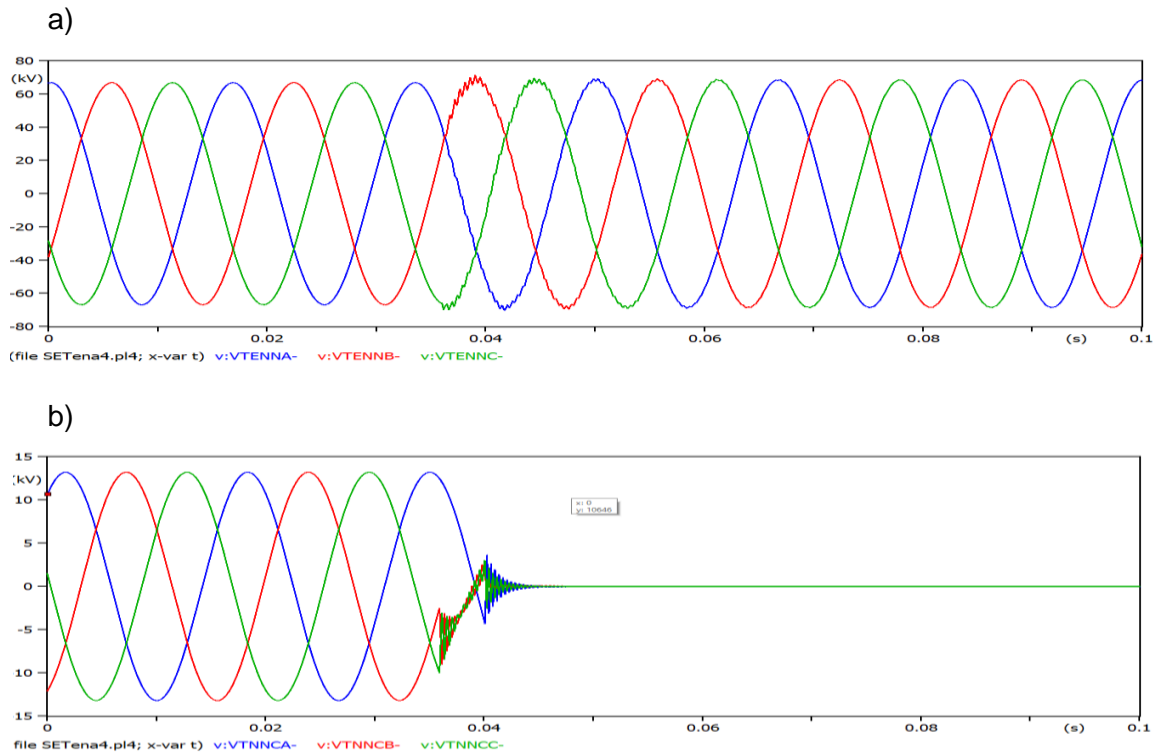


Figura 55. a) Tensión en el lado de alto voltaje del transformador durante su desconexión. b) Tensión en el lado de bajo voltaje del transformador durante su desconexión.

Los resultados de las simulaciones en la energización del transformador al igual que en la energización de la línea de subtransmisión muestran claramente que los niveles de sobrevoltajes y la distorsión de las ondas de voltaje son mayores cuando no se utilizan descargadores, al momento de incorporar los descargadores en el modelo los niveles de sobrevoltajes y distorsiones de las ondas de voltaje disminuyen considerablemente.

En el momento de la energización en vacío del transformador, perteneciente a la subestación Tena Norte, a pesar que el interruptor está abierto aparecen voltajes en el lado de bajo voltaje del transformador debido a las capacitancias existentes entre sus elementos.

La corriente de energización del transformador tanto en vacío como con carga alcanzan niveles cercanos al doble de la corriente nominal, picos que en poco tiempo van desapareciendo y llegan a niveles constantes.

En la desconexión del transformador no hay sobrevoltajes ni distorsiones importantes que afecten la operación del sistema.

3.2.3 Energización de compensadores capacitivos.

En el análisis de energización de compensadores capacitivos se determina los sobrevoltajes originados durante la energización. Este análisis es de forma independiente con el análisis realizado en la energización de líneas y transformadores.

La compensación capacitiva se realiza para mejorar posibles bajos voltajes que se presentan en la zona debido a la condición de demanda, razón por la cual la energización de los capacitores se realiza cuando la subestación está en operación. El capacitor que se energiza se encuentra en la subestación Tena a nivel de voltaje de 13.8 kV, los resultados que se presentan sin el uso de descargadores y con ellos.

En la energización de líneas de subtransmisión se observó que el mayor sobrevoltaje se produce cuando el interruptor cierra en el instante que la onda de voltaje de referencia (fase A) pasa por su valor máximo. Para la energización de compensadores se mantiene el mismo criterio, por tanto, el instante en el que se realiza el cierre del interruptor tripolar se lo obtiene buscando el máximo valor de voltaje de la fase de referencia (fase A) según se establece en la onda de voltaje para una simulación de estado estable, para esto se toma el mismo ciclo de la onda de referencia (0.029 s a 0.047 s). El valor encontrado se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Instante donde la onda de voltaje de la fase A se aproxima al máximo

Tiempo [s]	Voltaje representativo [V]	Voltaje aproximado que muestra ATP [V]	Sobrevoltaje [V]
0,035064	13.800,00	13.268,00	23.566,00

- **Energización de compensador capacitivo de la subestación Tena.**

Para la energización del compensador capacitivo es necesario hacer el ajuste del interruptor que se encuentra en la barra de 13.8 kV de la subestación Tena según los valores de la Tabla 9. Los resultados se muestran en la Figura 56, Figura 57 y Figura 58.

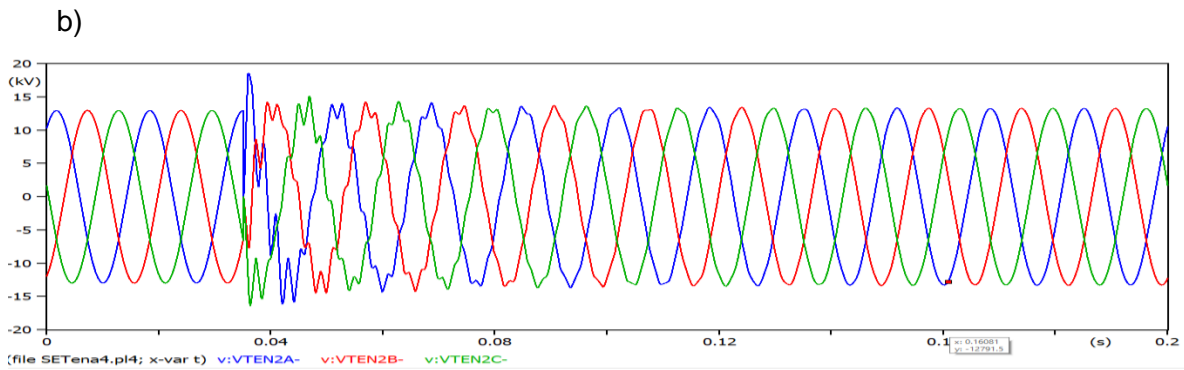
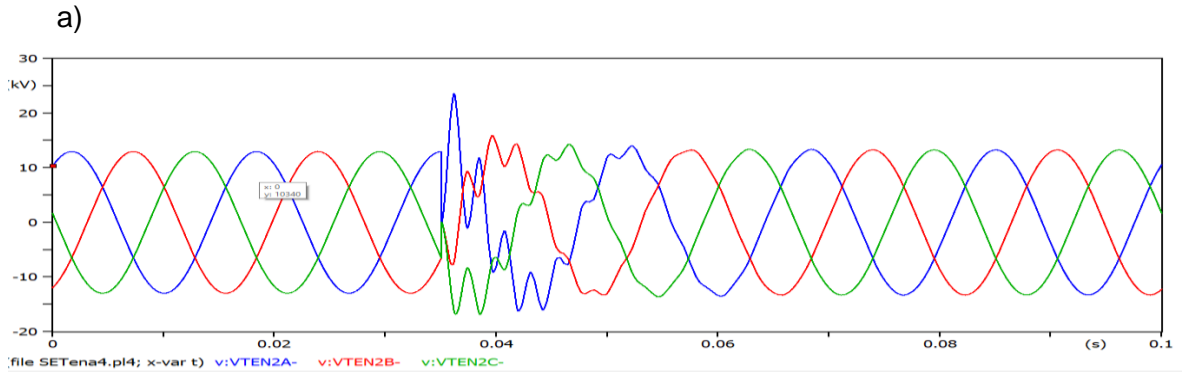


Figura 56. Voltaje en la barra de 13.8 kV de la subestación Tena en la energización del compensador capacitivo. a) sin descargadores. b) con descargadores.

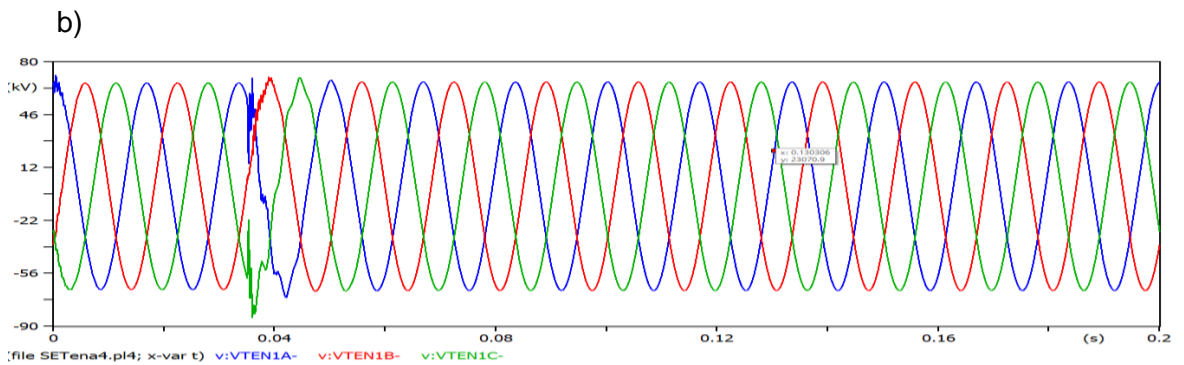
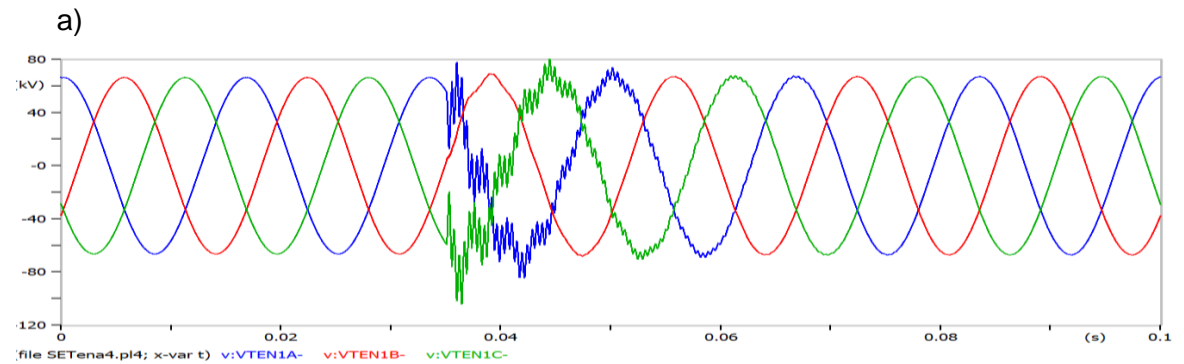


Figura 57. Voltaje en la barra de 69 kV de la subestación Tena en la energización del compensador capacitivo. a) sin descargadores. b) con descargadores.

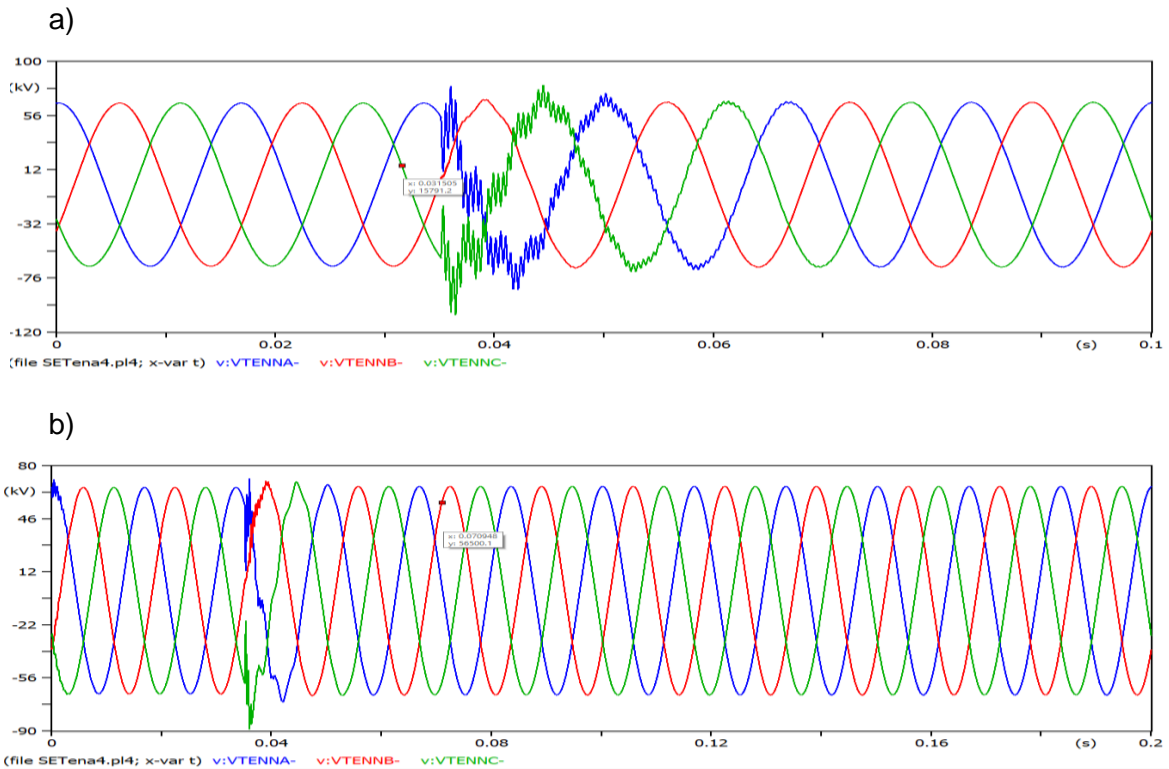


Figura 58. Voltaje en la barra de 69 kV de la subestación Tena Norte en la energización del compensador capacitivo. a) sin descargadores. b) con descargadores.

- **Desconexión de compensador capacitivo de la subestación Tena.**

Para la desconexión de compensadores capacitivos es necesario hacer el ajuste del interruptor para lograr el caso planteado. El instante en que se hace la desconexión es el mismo que en la energización. Los resultados se muestran en la Figura 59.

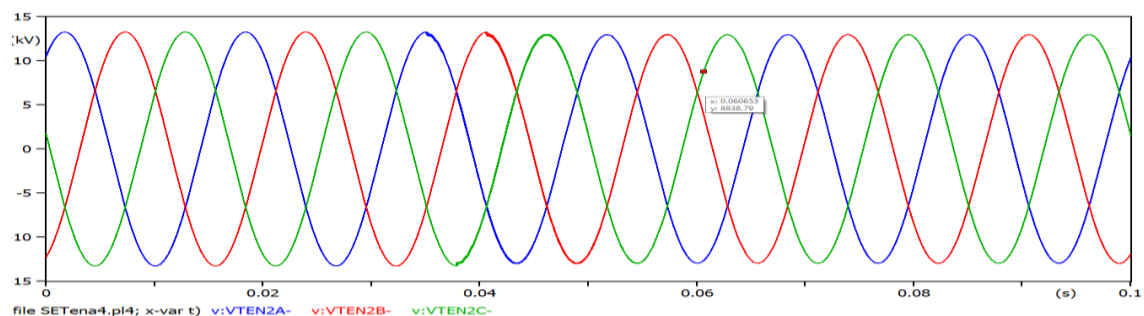


Figura 59 Voltaje en la barra de 13.8 kV de la subestación Tena en la desconexión del compensador capacitivo.

Los resultados de las simulaciones en la energización del compensador capacitivo muestran claramente que los niveles de sobrevoltajes son mayores cuando no se utilizan

descargadores, al momento de incorporar los descargadores en el modelo, los niveles de sobrevoltajes disminuyen considerablemente.

Al ingresar el modelo de descargadores, los niveles de sobrevoltajes disminuyen, pero causa una mayor distorsión de las ondas de voltaje, esta distorsión desaparece en un mayor tiempo.

La compensación capacitiva se realiza para mejorar los niveles de voltaje que se presentan en la zona debido a la alta demanda, en la gráfica se observa que hay un aumento de voltaje en la barra de 13.8 kV de la subestación Tena.

En la desconexión del compensador capacitivo no hay sobrevoltajes ni distorsiones importantes que afecten la operación del sistema.

3.3 Procedimiento para el estudio de transitorios electromagnéticos.

Una vez obtenidos las gráficas de los resultados de las simulaciones en el programa ATPDraw, a continuación, se presenta el procedimiento para un estudio de transitorios electromagnéticos por maniobras.

1. Obtener la mayor cantidad de información de la red eléctrica y las maniobras que van a ser ejecutadas para establecer el proceso de simulación.
2. Elegir los modelos matemáticos más adecuados para la representación de los elementos que componen la red eléctrica. En el capítulo dos se muestran algunos de los modelos que el programa ATPDraw proporciona para estudios de transitorios electromagnéticos.
3. Proporcionar los parámetros requeridos por cada uno de los modelos elegidos en ATPDraw, como se describe en la sección 2.2.4, en el caso de no tener disponibles datos se debe estimar su valor o ingresar valores típicos que proporciona la base de datos del software.
4. Designar el elemento de la red sobre el cual se le va a simular una maniobra de energización ya que el programa no realiza simulaciones simultáneas de eventos.
5. Determinar el instante de actuación de los interruptores, para la energización o apertura, valores que se los obtiene de la onda de voltaje de referencia en estado estable.

6. Una vez obtenido el instante de actuación de los interruptores, para la energización o apertura, se el software permite realizar una compilación de la información mediante la cual es posible verificar la existencia de errores.
7. Se realizan las simulaciones de los diferentes casos y se procede con el análisis de los resultados obtenidos.

3.4 Conclusiones

En sistemas eléctricos de potencia, el estudio de transitorios electromagnéticos debe tener la misma importancia que los análisis de estado estacionario, esto debido a que a pesar de su corta duración el impacto de los fenómenos transitorios sobre los equipos es altamente perjudicial debido a los sobrevoltajes y altos niveles de corrientes a los cuales se ven sometidos los elementos de una red eléctrica.

El uso de herramientas de software para la simulación de transitorios electromagnéticos es indispensable en procesos de planeamiento, diseño, dimensionamiento u operación de sistemas eléctricos.

La simulación de fenómenos transitorios de tipo electromagnético es necesario para el correcto diseño y dimensionamiento de los componentes de un sistema eléctrico, para la coordinación de aislamiento y en la elaboración de procedimientos de maniobras en las subestaciones de un sistema de potencia.

Los descargadores muestran ser elementos eficaces en la reducción del impacto de los sobrevoltajes producidos por maniobras en sistemas de subtransmisión. En tal sentido se sugiere su implementación con el objetivo de conservar la vida útil de los equipos.

Conforme a los resultados obtenidos en las simulaciones se puede establecer que la energización de líneas y transformadores con carga producen sobrevoltajes menores a los registrados en simulaciones de energización en vacío.

3.5 Recomendaciones

Antes de ejecutar cualquier tipo de simulación es necesario tener claros y definidos los parámetros eléctricos y geométricos de cada uno de los elementos del sistema, la frecuencia de operación y los fenómenos que van a ser estudiados, ya que, a partir de éstos parámetros, los resultados son congruentes y cercanos a la operación real.

La energización de líneas y transformadores se debe, en lo posible, realizar con carga conectada, esto hace que los sobrevoltajes disminuyan considerablemente. La impedancia de la carga atenúa la reflexión de la onda viajera causante de sobrevoltajes.

Como medida de disminución de sobrevoltajes se recomienda utilizar interruptores con mando sincronizado para que el instante de cierre sea en los niveles más bajos de las ondas de voltaje.

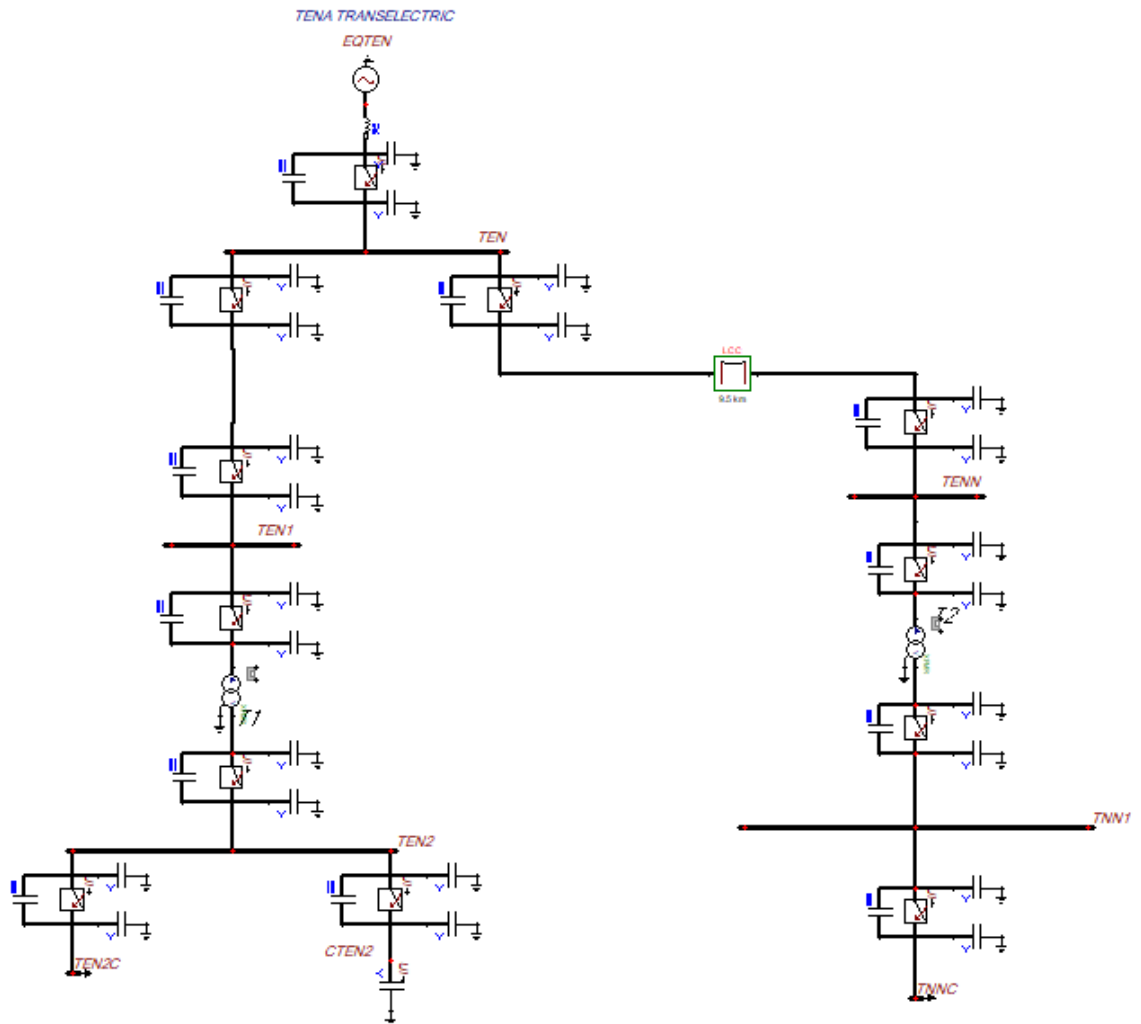
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. C. Arias y J. A. Sánchez, «Metodología para el análisis de transitorios electromagnéticos de maniobra en sistemas de alta tensión (230 kV/500 kV) con ayuda del EMTP/ATP Draw», p. 13, 2015.
- [2] J. C. Das, *Transients in Electrical Systems: Analysis, Recognition, and Mitigation*. New York, 2010.
- [3] P. Morillo y L. Andersson, «Análisis de transitorios electromagnéticos en el Sistema Nacional Interconectado (S.N.I.) a nivel de 230 kV y 500 kV usando el simulador digital en tiempo real HYPERsim», feb. 2018, Accedido: 23 de diciembre de 2020. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19199>
- [4] «Norma CEI Internacional IEC 60071 1 - NORMA CEI INTERNACIONAL IEC 60071- Séptima edición 1993- - StuDocu». <https://www.studocu.com/ec/document/escuela-politecnica-nacional/alto-voltaje/norma-cei-internacional-iec-60071-1/18376726> (accedido 23 de mayo de 2022).
- [5] L. F. M. Saá, «ANÁLISIS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LA ENERGIZACIÓN DE ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN UTILIZANDO EL PROGRAMA DIGSILENT POWER FACTORY», p. 233.
- [6] «Análisis de Transitorios de Sistemas de Potencia .pdf».
- [7] «UPS-KT01381.pdf». Accedido: 24 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14295/6/UPS-KT01381.pdf>
- [8] O. R. Vernet y F. G. Molina, «Modelización de transformadores; análisis de transitorios mediante ATP», p. 70.
- [9] «T90.pdf». Accedido: 7 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8269/4/T90.pdf>
- [10] K. P. L. Eugenio, «TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO», p. 106.

5 ANEXOS

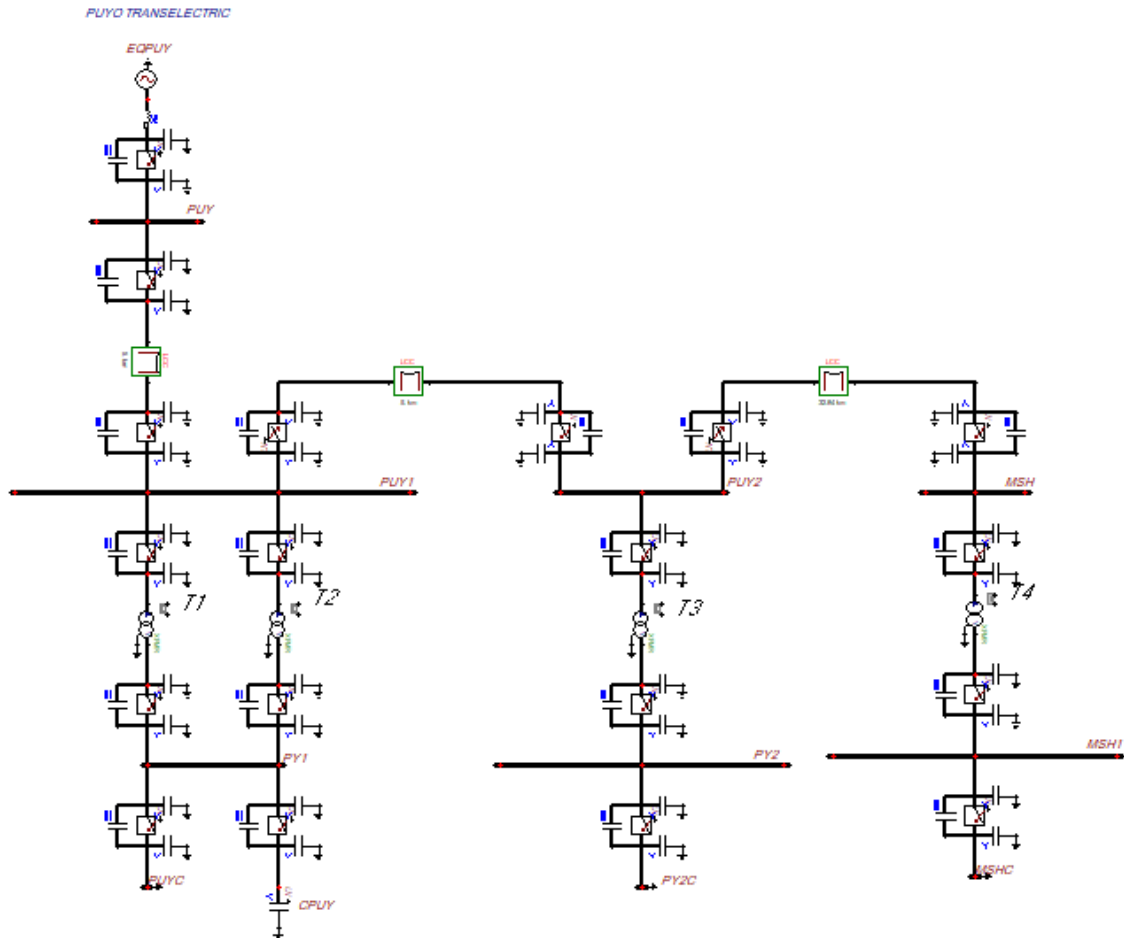
ANEXO I

- Modelo en ATPDraw del subsistema Tena.



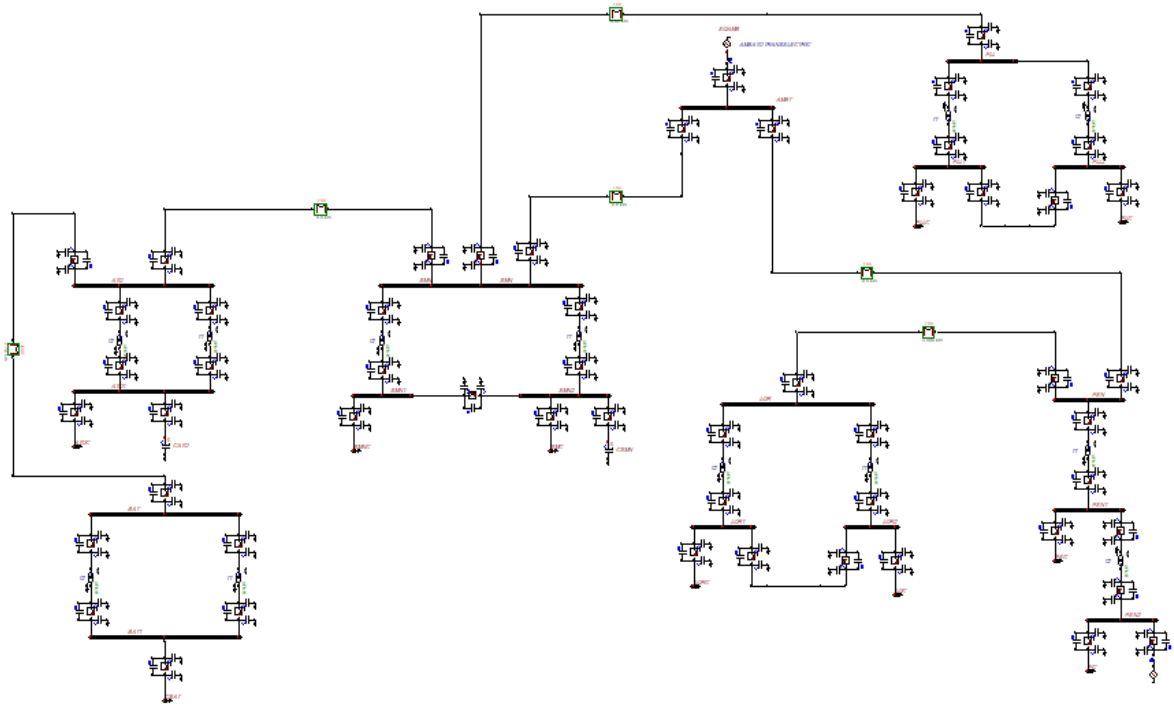
ANEXO II

- Modelo en ATPDraw del subsistema Puyo.



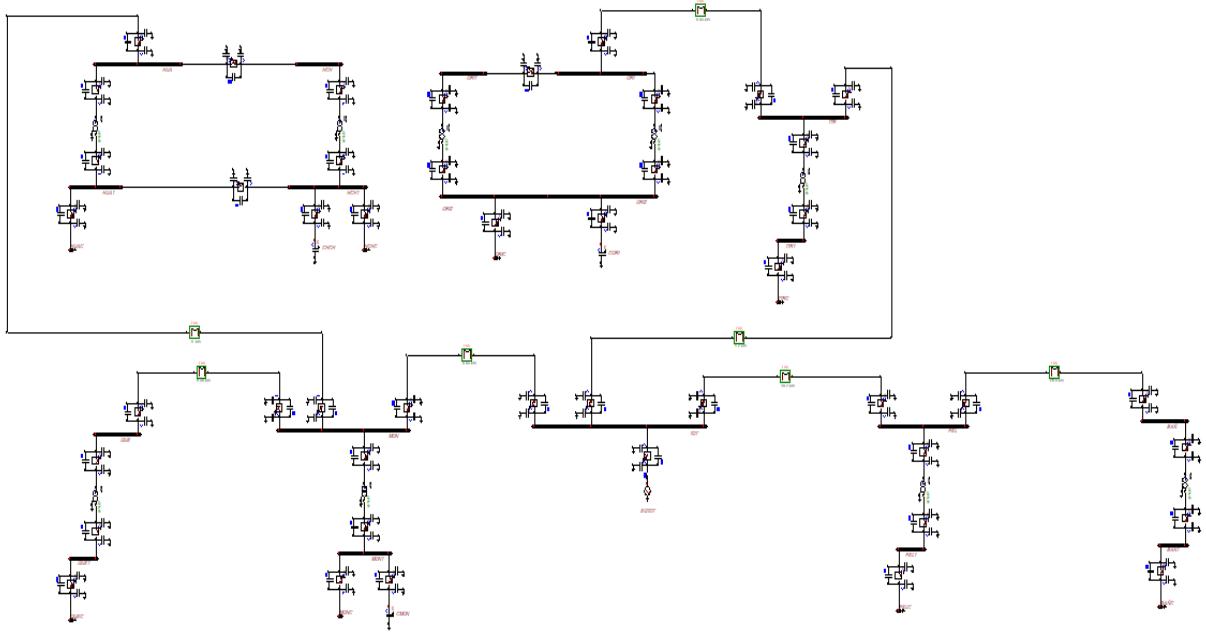
ANEXO III

- Modelo en ATPDraw del subsistema Ambato.



ANEXO IV

- Modelo en ATPDraw del subsistema Totoras.



ANEXO V

- Modelo en ATPDraw del subsistema Baños

