



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL USO DEL REACTOR DE LÍNEA Y/O
REACTOR EN BARRA BASADO EN SIMULACIÓN, DESDE EL PUNTO DE VISTA
OPERATIVO, CONTINGENCIAS, Y SEGURIDAD
EN UN SISTEMA DE 400 KV**

Que para obtener el grado de
Maestro en ingeniería Eléctrica

Presenta

Ing. Juan Carlos Florentino Hernández
G13071680
No. CVU de CONACyT: 1004477

Director de tesis

Dr. Gastón Hernández Martínez
No. CVU de CONACyT: 63296

Co-director de tesis

M.C. Hermenegildo Cisneros Villegas

Ciudad Madero, Tamaulipas.

Diciembre 2021



Cd. Madero, Tam. **06 de diciembre de 2021**

OFICIO No. : U.171/21
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

C. JUAN CARLOS FLORENTINO HERNÁNDEZ
No. DE CONTROL G13071680
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

“ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL USO DEL REACTOR DE LÍNEA Y/O REACTOR EN BARRA BASADO EN SIMULACIÓN, DESDE EL PUNTO DE VISTA OPERATIVO, CONTINGENCIAS, Y SEGURIDAD EN UN SISTEMA DE 400 KV”

El Jurado está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE:	DR.	GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
SECRETARIO:	MTRO.	HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS
VOCAL:	DR.	PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE
SUPLENTE:	MTRO.	AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
DIRECTOR DE TESIS:	DR.	GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
CO-DIRECTOR:	MTRO.	HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica

"Por mi patria y por mi bien"

MARCO ANTONIO CORONEL GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



c.c.p.- Archivo
MACG 'aacr'



Dedicatoria

A mis padres que me han brindado apoyo y cariño a través de todos estos años de formación académica.

Agradecimientos

Agradezco la oportunidad de haber cursado la maestría en ingeniería eléctrica en el Instituto Tecnológico De Ciudad Madero en la División de Estudios de Posgrado e Investigación, también agradezco a cada uno de los maestros de la maestría que compartieron sus conocimientos conmigo y un especial agradecimiento a mi director de tesis el Doctor Gastón Hernandez Martínez que me guio y compartió su conocimiento para la realización de esta tesis, así como también agradecer al CONACYT que me brindo su apoyo económico durante 2 años para la conclusión de esta tesis.

ANÁLISIS DEL USO DE REACTOR ELÉCTRICO EN BUS Y/O LÍNEA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE 400 KV.

RESUMEN

En los sistemas eléctricos de potencia es necesario tener valores de voltaje y frecuencia dentro de parámetros estables para que no perturben el sistema. Sin embargo, esto no siempre es así debido a que existen fenómenos transitorios y de sobrevoltaje que provocan niveles de sobretensión.

Estos fenómenos someten a los sistemas eléctricos a esfuerzos que en muchas ocasiones pueden afectar la vida útil de los equipos e inclusive dañar el aislamiento eléctrico, debido a la gran disipación energética que se produce en estos eventos. Cuando se presenta un escenario de sobrevoltaje en un sistema eléctrico se debe buscar limitar estos niveles de sobretensión.

Uno de los esquemas para limitar los niveles sobretensión es el uso de reactores eléctricos de potencia conectados directamente al bus o a la línea de alta tensión. Sus funciones más importantes son regular el exceso de potencia reactiva en las líneas de transmisión, y de esta manera lograr niveles de tensión y de frecuencia aceptables para el sistema. Estos reactores de potencia son el medio más compacto para compensar las sobretensiones que puedan ocurrir en las líneas de alta tensión de transmisión o en sistemas de cables de gran longitud.

Este trabajo de investigación desarrollará un escenario de sobrevoltaje por medio de simulación para analizar el comportamiento de un sistema eléctrico de 400 Kv. Con esquema de reactores eléctricos de potencia conectados directamente al bus o en la línea. De esta manera se analizará la manera en la que influye en la estabilidad del sistema, el uso de este esquema de compensación. Se utilizará como herramienta de simulación el software ATPdraw.

ANALYSIS OF THE USE OF ELECTRIC REACTOR IN BUS AND / OR LINE IN A 400 KV ELECTRICAL SYSTEM.

ABSTRACT

In electrical power systems, it is necessary to have voltage and frequency values within stable parameters so that they do not disturb the system. However, this is not always the case because there are transient and overvoltage phenomena that cause overvoltage levels.

These phenomena subject electrical systems to stresses that in many cases can affect the useful life of the equipment and even damage the electrical insulation, due to the great energy dissipation that occurs in these events. When a scenario of overvoltage occurs in an electrical system, one should seek to limit these levels of overvoltage.

One of the schemes to limit overvoltage levels is the use of electric power reactors connected directly to the bus or to the high voltage line. Its most important functions are to regulate excess reactive power in transmission lines, and thus achieve acceptable voltage and frequency levels for the system. These power reactors are the most compact means of compensating for overvoltages that may occur in high voltage transmission lines or in long cable systems.

This research work will develop an overvoltage scenario through simulation to analyze the behavior of a 400 Kv. electrical system. With scheme of power electric reactors connected directly to the bus or on the line. In this way, the way in which the use of this compensation scheme influences the stability of the system is analyzed. The ATPdraw software will be used as a simulation tool.

Contenido

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCION	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.4 OBJETIVO GENERAL	2
1.5 OBJETIVO ESPECIFICOS	3
1.6 HIPOTESIS.....	3
1.7 ALCANCES.....	3
1.8 LIMITACIONES	3
CAPITULO 2: MARCO TEORICO	4
2.1 REACTORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA	4
2.2 SITIOS DE UBICACIÓN DE REACTORES EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA	5
2.3 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE UN REACTOR	7
2.4 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS REACTORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA	8
2.5 APLICACIÓN DE LOS REACTORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA	8
2.6 CONSTRUCCIÓN DE LOS REACTORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA	9
2.6.1 REACTORES TIPO SECO CON NÚCLEO DE AIRE:	9
2.6.2 REACTORES TIPO CON NÚCLEO DE HIERRO SUMERGIDO EN ACEITE.....	10
2.7 SOBRETENSIONES EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA	11
2.7.1 TENSIONES CONTINUAS	12
2.7.2 SOBRE TENSIONES TEMPORALES	12
2.7.3 SOBRETENSIONES DE FRENTE LENTO.....	12
2.7.4 SOBRETENSIONES DE FRENTE RÁPIDO	12
2.7.5 SOBRETENSIONES DE FRENTE MUY RÁPIDO.....	13
CAPITULO 3: METODOLOGIA	14
3.1 SOFTWARE	14
3.2 SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE 400 KV.....	16
3.3 CARACTERISTICAS DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN A SIMULAR	17
3.3.1 UBICACIÓN GEOGRAFICA DE LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN	17
3.3.2 PARAMETROS DE LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN	18
3.4 DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO	23
3.4.1 MODELADO DE LINEA DE TRANSMISIÓN EN SOFTWARE ATP.....	23
3.4.2 MODELADO DE TRANSPUESTAS EN SOFTWARE ATP	24

3.4.3 MODELADO DE FUENTE DE VOLTAJE EN SOFTWARE ATP	25
3.5 SISTEMA ELÉCTRICO A SIMULAR EN SOFTWARE ATP.....	26
3.6 MODELADO DE ESCENARIOS EN SOFTWARE ATP.....	29
3.6.1 FENOMENOS TRANSITORIOS.....	29
3.6.2 EFECTO FERRANTI	30
3.6.3 FALLA MONOFASICA.....	31
3.6.4 FALLA BIFÁSICA.....	32
3.6.5 SOBRETENSIÓN POR MANIOBRA	33
3.7 DISEÑO DE REACTORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA EN ATPDRAW	34
3.7.1 CÁLCULO DE LA REACTANCIA DEL REACTOR POR MEDIO DE MATLAB	36
3.7.2 CÁLCULO DE LA INDUCTANCIA DEL REACTOR POR MEDIO DE MATLAB ..	39
CAPITULO 4: ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	42
4.1 EFECTO FERRANTI	42
4.1.1 EFECTO FERRANTI EN LÍNEA EDO A3U00	42
4.1.2 EFECTO FERRANTI EN LÍNEA MMT A3140.....	46
4.2 FALLA MONOFÁSICA.....	50
4.2.1 FALLA MONOFÁSICA EN LÍNEA TMT A3340	50
4.2.2 FALLA MONOFÁSICA EN LÍNEA MMT A3T90.....	53
4.3 FALLA BIFÁSICA.....	55
4.3.1 FALLA BIFÁSICA EN LÍNEA EDO A3U00.....	55
4.4.2 FALLA BIFÁSICA EN LÍNEA MMT A3040	57
4.4 SOBRETENSIÓN POR MANIOBRA	59
4.4.1 ENERGIZACIÓN DE LÍNEA TMT A3340 EN VACÍO.....	59
4.4.2 ENERGIZACIÓN DE LÍNEA EDO A3T70 EN VACÍO	62
CAPITULO 5: ANALISIS Y DETERMINACIÓN DE REACTOR IDEAL	64
5.1 EFECTO FERRANTI EN L.T. EDO A3U00	64
5.2 EFECTO FERRANTI EN L.T. MMT A3140.....	65
5.3 FALLA MONOFÁSICA EN L.T. TMT A3340	66
5.4 FALLA MONOFASICA EN L.T. MMT A3T90.....	67
5.5 FALLA BIFÁSICA EN L.T. EDO A3U00.....	69
5.6 FALLA BIFASICA EN L.T. MMT A3040	70
5.7 SOBRETENSIÓN POR MANIOBRA EN L.T. TMT A3340.....	72
5.8 SOBRETENSION POR MANIOBRA EN L.T. EDO A3T70.....	73
5.9 CONCLUSIÓN GLOBAL.....	75
APENDICE A	76
APENDICE B	80
REFERENCIAS	82

Lista de figuras

Figura 2.1.- Reactores eléctricos de potencia.....	4
Figura 2.2.- Reactor eléctrico de potencia conectado al bus de la subestación.....	5
Figura 2.3.-Reactor eléctrico de potencia conectado en la línea de transmisión.....	6
Figura 2.4.- Reactor eléctrico de potencia conectado al terciario del transformador.....	6
Figura 2.5.- Reactor eléctrico de potencia tipo seco con núcleo de aire.....	9
Figura 2.6.- Reactor eléctrico tipo núcleo de hierro sumergido en aceite.....	10
Figura 2.7.- Tipos de sobretensiones.....	11
Figura 3.1.- Módulos del software ATP.....	15
Figura 3.2.- Programas de apoyo y extensiones del software ATP.....	15
Figura 3.3.- Sistema eléctrico nacional.....	16
Figura 3.4.- Región geográfica de las líneas de transmisión a simular.....	17
Figura 3.5.- Ejemplo de estructura de torre de transmisión.....	23
Figura 3.6.- Icono LCC en software ATP.....	23
Figura 3.7.- Función Line/Cable en software ATP.....	23
Figura 3.8.-Ingreso de datos de la línea de transmisión EDO A3U10.....	24
Figura 3.9.- Esquema de una transpuesta en una línea de transmisión.....	24
Figura 3.10.- Función Transp1 ABC-BCA en software ATP.....	25
Figura 3.11.- Función ACSOURCE en software ATP.....	25
Figura 3.12.- Primera parte de la red modelada en ATP.....	26
Figura 3.13.- Segunda parte de la red modelada en ATP.....	27
Figura 3.14.- Tercera parte de la red modelada en ATP.....	28
Figura 3.15.-Ocurrencia de fallas de cortocircuito.....	29
Figura 3.16.-Diagrama de flujo del modelo del efecto Ferranti en ATP.....	30
Figura 3.17.-Diagrama de flujo del modelo de falla monofásica en ATP.....	31
Figura 3.18.-Diagrama de flujo del modelo de falla bifásica en ATP.....	32
Figura 3.19.-Diagrama de flujo del modelo de sobretensión por maniobra en ATP.....	33
Figura 3.20.-Icono de reactor eléctrico en software ATP.....	35
Figura 3.21.-Ingreso de parámetros del reactor eléctrico.....	35
Figura 3.22.-Interfaz gráfica para el cálculo de la reactancia del reactor eléctrico en MATLAB.....	36
Figura 3.23.-Introducción de parámetros solicitados para el cálculo de la reactancia del reactor eléctrico de potencia.....	37
Figura 3.24.-Resultado obtenido de la reactancia en ohm.....	38
Figura 3.25.-Interfaz gráfica para el cálculo de la inductancia del reactor eléctrico en MATLAB.....	39
Figura 3.26.-Introducción de parámetros solicitados para el cálculo de la inductancia del reactor eléctrico de potencia.....	40
Figura 3.27.-Resultado obtenido de la inductancia en mH.....	41
Figura 4.1.-Grafica de Efecto Ferranti en L.T. EDO A3U00 por medio de MATLAB.....	42
Figura 4.2.-Voltaje en el nodo emisor L.T. EDO A3U00 por medio de ATP.....	43
Figura 4.3.-Voltaje en el nodo receptor L.T. EDO A3U00 por medio de ATP.....	44
Figura 4.4.-Voltaje en el nodo receptor con reactores en la línea de 25 MVAR.....	44
Figura 4.5.-Voltaje en el nodo receptor con reactor en barra de 100 MVAR.....	45
Figura 4.6.-Grafica del Efecto Ferranti en L.T. MMT A3140 por medio de MATLAB.....	46
Figura 4.7.-Voltaje en el nodo emisor L.T. MMT A3140 por medio de ATP.....	47
Figura 4.8.-Voltaje en el nodo receptor L.T. MMT A3140 por medio de ATP.....	47
Figura 4.9.-Voltaje en el nodo receptor con reactores en la línea de 75 MVAR.....	48
Figura 4.10.-Voltaje en el nodo receptor con reactor en barra de 150 MVAR.....	48
Figura 4.11.-Falla monofásica sin compensación en LT TMT A3340.....	50

Figura 4.12.-Falla monofásica con reactores en línea de 75MVAR.	51
Figura 4.13.-Falla monofásica con reactor en barra de 100 MVAR.	51
Figura 4.14.-Falla monofásica sin compensación en LT MMT A3T90.....	53
Figura 4.15.-Falla monofásica con reactores en línea de 100 MVAR.	53
Figura 4.16.-Falla monofásica con reactor en barra 150 MVAR.	54
Figura 4.17.-Falla bifásica sin compensación en LT EDO A3U00.....	55
Figura 4.18.-Falla bifásica con reactores en línea de 25 MVAR.	55
Figura 4.19.-Falla bifásica con reactor en barra de 100 MVAR.	56
Figura 4.20.-Falla bifásica sin compensación en LT MMT A3040.	57
Figura 4.21.-Falla bifásica con reactores en línea de 100 MVAR.	57
Figura 4.22.-Falla bifásica con reactor en barra de 150 MVAR.	58
Figura 4.23.-Energización de línea en vacío sin compensación en LT TMT A3340.....	59
Figura 4.24.-Energización de línea con reactores en línea de 75 MVAR.	60
Figura 4.25.-Energización de línea con reactor en barra de 100 MVAR.	60
Figura 4.26.-Energización de línea en vacío sin compensación en LT EDO A3T70.....	62
Figura 4.27.-Energización de línea con reactores en línea de 25 MVAR.	62
Figura 4.28.-Energización de línea con reactor en barra de 100 MVAR.	63
Figura 5.1.-Simulaciones del Efecto Ferranti en LT EDO A3U00.	64
Figura 5.2.-Simulaciones del Efecto Ferranti en LT MMT A3140.....	65
Figura 5.3.-Simulaciones de Falla monofásica en LT TMT A3340.....	66
Figura 5.4.-Simulaciones de Falla monofásica en LT MMT A3T90.....	67
Figura 5.5.-Simulaciones de Falla bifásica en LT EDO A3U00.....	69
Figura 5.6.-Simulaciones de Falla bifásica en LT MMT A3040.	70
Figura 5.7.-Simulaciones de Sobretensión por maniobra en LT TMT A3340.....	72
Figura 5.8.-Simulaciones de Sobretensión por maniobra en LT EDO A3T70	73
Figura 5.9.-Voltaje en p.u. de las Simulaciones.....	75

Lista de tablas

Tabla 2.1.- Determinación de parámetros de un reactor eléctrico de potencia.	7
Tabla 3.1.- Parámetros de línea de transmisión TMT A3340	18
Tabla 3.2.- Parámetros de línea de transmisión EDO A3U10.....	18
Tabla 3.3.- Parámetros de línea de transmisión EDO A3T70	19
Tabla 3.4.- Parámetros de línea de transmisión EDO A3U00.....	19
Tabla 3.5.- Parámetros de línea de transmisión IPO A3V30	20
Tabla 3.6.- Parámetros de línea de transmisión IPO A3V40	20
Tabla 3.7.- Parámetros de línea de transmisión MMT A3140	21
Tabla 3.8.- Parámetros de línea de transmisión MMT A3040	21
Tabla 3.9.-Parámetros de línea de transmisión MMT A3T90.....	22
Tabla 3.10.-Reactores eléctricos de potencia conectados en la línea.	34
Tabla 3.11.-Reactores eléctricos de potencia conectados en el bus de la subestación.	34
Tabla 4.1.-Voltaje en L.T. EDO A3U00.	43
Tabla 4.2.-Voltajes obtenidos en L.T. EDO A3U00 mediante la simulación.	45
Tabla 4.3.-Voltajes en LT MMT A3140.	46
Tabla 4.4.-Voltajes obtenidos en L.T. MMT A3140 mediante la simulación.....	49
Tabla 4.5.-Voltajes obtenidos en LT TMT A3340 mediante la simulación.....	52
Tabla 4.6.-Voltajes obtenidos en LT MMT A3T90 mediante la simulación.	54
Tabla 4.7.-Voltajes obtenidos en LT EDO A3U00 mediante la simulación.	56
Tabla 4.8.-Voltajes obtenidos en LT MMT A3040 mediante la simulación.....	58
Tabla 4.9.-Voltajes obtenidos en LT TMT A3340 mediante la simulación.....	61
Tabla 4.10.-Voltajes obtenidos en LT EDO A3T70 mediante la simulación.	63

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCION

En los sistemas eléctricos de potencia siempre se busca la mayor fiabilidad con respecto al mismo, para ello es necesario mantener algunos parámetros dentro de sus rangos nominales aceptables tales como el voltaje y la frecuencia y así de esta manera evitar perturbaciones en el sistema y lograr la mejor continuidad posible en el mismo. Sin embargo, hay situaciones y factores secundarios al mismo sistema eléctrico de potencia que pueden poner en riesgo la estabilidad del sistema, como ejemplo son las sobretensiones transitorias que se pueden originar.

Los fenómenos transitorios afectan a los sistemas eléctricos, debido a que provocan sobrevoltajes afectando de esta manera a los equipos eléctricos sometiéndolos a esfuerzos que afectan la vida útil de estos.

Cuando se presenta un escenario de sobrevoltaje en un sistema eléctrico de potencia se debe actuar tratando de limitar estos niveles de sobretensión. En líneas de transmisión y particularmente en líneas largas de alta y extra alta tensión, se generan grandes cantidades de potencia reactiva cuando estas operan en vacío o en condiciones de baja carga.

La potencia reactiva debe ser controlada para evitar sobrevoltajes en el sistema de potencia y como consecuencia los generadores y las líneas de transmisión se convierten en un sistema inestable, en el cual los niveles de tensiones y frecuencias varían de acuerdo con la sobre velocidad de la máquina.

Para limitar y controlar los niveles de tensión se colocan reactores eléctricos de potencia conectados directamente al bus o la línea de transmisión debe regular el exceso de potencia reactiva en las líneas de transmisión para lograr niveles de tensión y de frecuencia aceptables para el sistema.

En el presente trabajo se busca analizar por medio de simulación en el software ATPdraw el comportamiento de un sistema eléctrico de 400 Kv. Con los diferentes esquemas de reactores eléctricos de potencia y determinar de qué manera influye en la estabilidad del sistema con los diferentes esquemas de compensación y cuál podría ser más eficiente ante los escenarios propuestos.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La calidad de energía suministrada a los usuarios en el sector energético debe ser de manera confiable, segura y rápida, con el menor número de interrupciones. Los reactores eléctricos de potencia desempeñan un papel fundamental en el control de parámetros en líneas de transmisión, corrientes de corto circuito y estabilidad.

Una de sus funciones más importantes es regular el exceso de potencia reactiva en las líneas de transmisión y de esta manera lograr niveles de tensión y de frecuencia aceptables para los usuarios. Sin embargo, como todo sistema eléctrico de potencia, es propenso a perturbaciones que podrían afectar el sistema.

Cuando se presenta un escenario de sobrevoltaje en el sistema se debe buscar limitar estos niveles de sobretensión. Para evitar esto existen dos arreglos de esquemas típicos de reactores, los reactores que se encuentran en la línea, y los reactores que se encuentran en barra, desde el punto de vista operativo existen diferencias entre ambos esquemas.

Para ello se buscará hacer un análisis en base a la simulación por medio de software, de los diferentes esquemas de reactores, en diferentes escenarios para de esta manera determinar el más adecuado para una línea larga de extra alto voltaje.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Este análisis buscará identificar las problemáticas o situaciones transitorias derivadas en el uso de los diferentes esquemas de reactores eléctricos de potencia ya sea en bus o en línea en el sistema eléctrico de potencia. Esto con la finalidad de que la calidad de energía del sistema eléctrico de potencia sea confiable y seguro, y de esta manera lograr continuidad en el sistema.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Se busca analizar por medio de software diferentes escenarios con sobretensiones y los esquemas de reactores eléctricos de potencia en barra y en línea, para determinar sus ventajas y desventajas operativas en cada uno de ellos, y determinar cuál es el más conveniente para líneas largas de alta tensión.

1.5 OBJETIVO ESPECIFICOS

- Aprender el software ATPdraw.
- Modelado de la línea de transmisión de 400 Kv. Definida con sus características.
- Modelado del reactor eléctrico de potencia en línea.
- Modelado del reactor eléctrico de potencia en barra.
- Modelado de los escenarios específicos.
- Simulación de los escenarios y condiciones operativas.
- Analizar y establecer ventajas y desventajas operativas con los diferentes esquemas.

1.6 HIPOTESIS

Cuando se habla técnicamente de la operación de un reactor eléctrico de potencia en barra o directamente conectada al potencial de la línea, se cree que el reactor conectado a la línea de transmisión es mejor para la compensación desde el punto de vista operativo, comparado al reactor en barra situados en el sistema eléctrico de potencia ya que su objetivo es minimizar las salidas transitorias de la línea de transmisión de extra alto voltaje larga. Con este análisis se pretende determinar qué reactor es más eficiente desde el punto de vista operativo, basado en varios escenarios de simulación.

1.7 ALCANCES

Este análisis es basado en simulación con la ayuda del software ATPdraw en una línea de 400 Kv. Con escenarios de sobretensión que puedan perturbar el sistema eléctrico de potencia, y de esta manera analizar su comportamiento basado en los esquemas de reactores eléctricos de potencia en línea o en barra.

1.8 LIMITACIONES

Este análisis es basado en simulación por medio de software y es únicamente para líneas de transmisión con un nivel de tensión de 400 Kv. Con características específicas.

CAPITULO 2: MARCO TEORICO

2.1 REACTORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Los sistemas eléctricos de potencia con reactores son comúnmente utilizados en dichos sistemas eléctricos para regular el equilibrio de potencia reactiva y controlar los niveles de tensión y frecuencia a valores definidos en las líneas de transmisión.

Un ejemplo es cuando se energiza una determinada línea de transmisión, la capacitancia propia de la línea entrega reactivos al sistema de manera proporcional al cuadrado del voltaje y en función de la longitud de la línea, causando un gradual incremento de la tensión en las barras. Esto sucede particularmente en condiciones de baja carga en el sistema, cuando las líneas de transmisión están ligeramente cargadas, siendo necesario implementar un esquema de control que mediante una señal (voltaje, corriente, o vars) ordene la entrada del reactor al sistema, esto con la finalidad de consumir los reactivos.

A medida que aumenta la demanda en el sistema, la necesidad de reactores presentes en el sistema disminuye, y al contrario a través del esquema de control se debe ordenar la salida del reactor o la entrada de elementos que generen reactivos, tales como capacitores, etc.

Cuando en un sistema de transmisión ocurre una falla, una pérdida súbita de carga, o si tiene lugar una operación de maniobra (conmutación), generalmente se presentan sobretensiones de frecuencia fundamental que pueden ser controlados mediante consumo de potencia reactiva y para ello en dicho caso la aplicación de reactores son una buena solución.



Figura 2.1.- Reactores eléctricos de potencia.

2.2 SITIOS DE UBICACIÓN DE REACTORES EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

Normalmente los reactores eléctricos de potencia van conectados al devanado terciario de un banco de transformadores, o directamente al potencial de la línea. Para definir su conexión es necesario tomar consideraciones de tipo económico y técnico; es decir, un reactor conectado al potencial de la línea es más costoso que uno de igual capacidad conectado al devanado terciario debido al mayor nivel de aislamiento requerido cuando dicho elemento se conecta a la línea.

Sin embargo, en determinadas circunstancias, el reactor se conecta directamente al potencial de línea en lugar de instalarlo al devanado terciario de un banco de transformadores.

Dentro de las consideraciones técnicas se conoce que los reactores conectados al potencial de la línea permiten mejores perfiles de voltaje durante períodos de carga máxima en el sistema, cuando se requiere una cantidad fija de compensación de reactivos no separable de la línea, mientras que los reactores conectados al devanado terciario permiten ajustar convenientemente la regulación de voltaje y flujo de reactivos para condiciones de carga media y mínima del sistema, mediante bancos conmutados que actúan según los requerimientos de carga.

El cálculo de la potencia nominal y los puntos de conexión de un reactor eléctrico de potencia es resultado de diversos estudios análisis de flujos de potencia del sistema considerando todas las posibles configuraciones de este. Dependiendo del voltaje del sistema, los reactores pueden colocarse en el barraje dentro de las subestaciones como se muestra en la figura número 2.2.



Figura 2.2.- Reactor eléctrico de potencia conectado al bus de la subestación.

Directamente conectadas al potencial de las líneas de transmisión como se muestra en la figura número 2.3 o en el terciario de un transformador de un transformador de potencia para ejemplo se muestra la figura número 2.4. La colocación del reactor en la línea de transmisión depende del perfil de voltaje deseado en la línea.

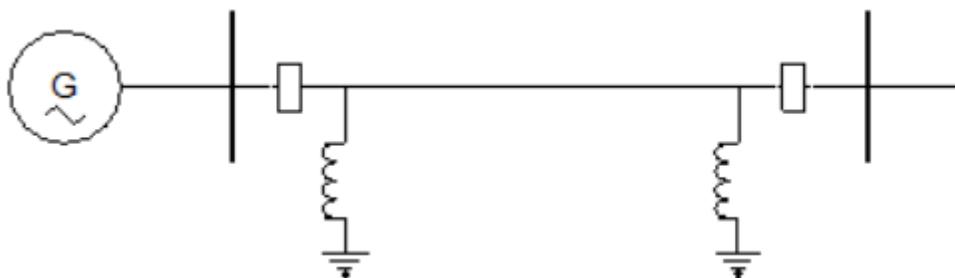


Figura 2.3.-Reactor eléctrico de potencia conectado en la línea de transmisión.

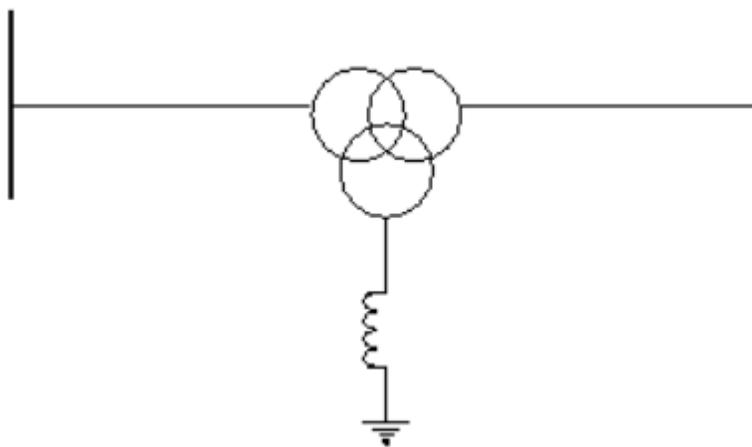


Figura 2.4.- Reactor eléctrico de potencia conectado al terciario del transformador.

2.3 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE UN REACTOR

La selección de la capacidad de un reactor eléctrico de potencia y el lugar donde será colocado es el resultado de un exhaustivo estudio de múltiples variables. Sin embargo, esta suele ser sencilla si conocemos el nivel de tensión al cual estará operando y el arreglo en el que se conectara el reactor.

Existen reactores trifásicos en el mercado eléctrico, así como también es una opción conectar en arreglo de estrella o delta para la conexión de 3 reactores monofásicos. De acuerdo con la conexión que se tendrá de estos los parámetros del reactor eléctrico de potencia para el sistema son determinados de la siguiente manera [6]:

Tabla 2.1.- Determinación de parámetros de un reactor eléctrico de potencia.

PARAMETROS DE UN REACTOR ELECTRICO DE POTENCIA		
VARIABLE	EN ESTRELLA	EN DELTA
REACTANCIA	$XL = \frac{VLL^2}{S3\phi} = \frac{VLL^2}{3 * S1\phi}$	$XL = 3 * \frac{VLL^2}{S3\phi} = \frac{VLL^2}{S1\phi}$
CORRIENTE NOMINAL	$In = \frac{S3\phi}{\sqrt{3} * VLL} = \frac{S1\phi}{VLL/\sqrt{3}}$ $= \frac{VLL}{\sqrt{3} * XL}$	$In = \frac{S3\phi}{3 * VLL} = \frac{S1\phi}{VLL} = \frac{VLL}{XL}$
CORRIENTE MAXIMA	$Imax = \frac{Vmax}{VLL} * In$	$Imax = \frac{Vmax}{VLL} * In$

2.4 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS REACTORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Un reactor eléctrico de potencia funciona como absorbedor de la potencia reactiva que se genera en exceso en el sistema de transmisión debido a condiciones de poca carga o disturbios. Se puede comprender de manera inversa a las instalaciones de los capacitores en las líneas de transmisión. La corriente en atraso consumida por el reactor reduce la corriente capacitiva adelantada de carga en la línea y de esa manera reduce el aumento de voltaje.

En condiciones de excesiva carga, el voltaje en la barra del sistema disminuye, de modo que se instalan capacitores para aumentar el voltaje y mantenerlo dentro de los parámetros establecidos. Así como también bajo condiciones de carga ligera, el voltaje de la barra del sistema puede aumentar a niveles excesivos, de modo que un inductor de gran capacidad como lo suele ser el reactor eléctrico hace que estos niveles de tensión disminuyan a valores deseados.

Una de las características más notorias en un reactor es que su diseño contempla un gran entrehierro, contrario a los transformadores donde éste se evita a toda costa. La función de este entrehierro es mantener una linealidad en el comportamiento magnético del reactor, evitando que su núcleo se sature y mantenga una inductancia constante frente a las variaciones de voltaje en la línea.[4]

2.5 APLICACIÓN DE LOS REACTORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Usualmente los reactores de potencia son aplicados al sistema eléctrico de potencia para compensar la corriente capacitiva de líneas, cables, capacitores, para limitar y controlar los niveles de tensión a valores definidos.

Al energizar una determinada línea de transmisión, la capacitancia propia de la línea entrega reactivos al sistema de manera proporcional al cuadrado del voltaje y en función de la longitud de la línea, causando un gradual incremento de la tensión en las barras. Esto sucede particularmente en condiciones de baja carga en el sistema, cuando las líneas de transmisión están ligeramente cargadas, siendo necesario implementar un esquema de control que mediante una señal (voltaje, corriente, o vars) ordene la entrada del reactor al sistema, esto con la finalidad de consumir los reactivos.

A medida que aumenta la demanda en el sistema, la necesidad de reactores presentes en el sistema disminuye, y al contrario a través del esquema de control se debe ordenar la salida del reactor o la entrada de elementos que generen reactivos, tales como capacitores, etc.

Cuando en un sistema de transmisión ocurre una falla, una pérdida súbita de carga, o si tiene lugar una operación de maniobra (conmutación), generalmente se presentan sobretensiones de frecuencia fundamental que pueden ser controlados mediante consumo de potencia reactiva y para ello en dicho caso la aplicación de reactores son una buena solución.[6]

2.6 CONSTRUCCIÓN DE LOS REACTORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Existen dos tipos de reactores eléctricos de potencia en cuanto a su construcción, pueden ser del tipo seco o sumergido en aceite. Los del tipo seco pueden tener su núcleo de aire o de acero. Los reactores sumergidos en aceite tienen un núcleo de hierro.[6]

2.6.1 REACTORES TIPO SECO CON NÚCLEO DE AIRE:

Anteriormente los reactores del tipo seco con núcleo de aire se colocaban en niveles de voltaje de distribución, pero hoy en día se utilizan en la mayoría de los rangos de voltajes en un sistema eléctrico de potencia. Estos se utilizan principalmente en aplicaciones de baja potencia tales como filtros de armónicas.[6]

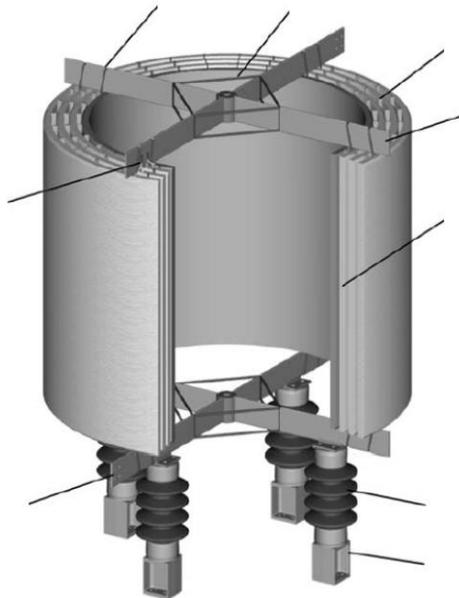


Figura 2.5.- Reactor eléctrico de potencia tipo seco con núcleo de aire.

2.6.2 REACTORES TIPO CON NÚCLEO DE HIERRO SUMERGIDO EN ACEITE

Estos reactores son principalmente utilizados en sistemas eléctricos de potencia con líneas de extra alto voltaje. Sus devanados son conductores típicamente de solera de cobre o aluminio por donde circula la corriente del reactor. El núcleo de hierro está compuesto por varias laminaciones de material ferroso en este núcleo se centra la mayor cantidad de flujo magnético en el reactor, como medio aislante se usa el aceite, además de que funciona como un mejor conductor de calor que el aire para mantener una temperatura adecuada en las bobinas del reactor. Su entrehierro sirve para dar linealidad al circuito magnético y de esta manera evitar la saturación del núcleo.[5]

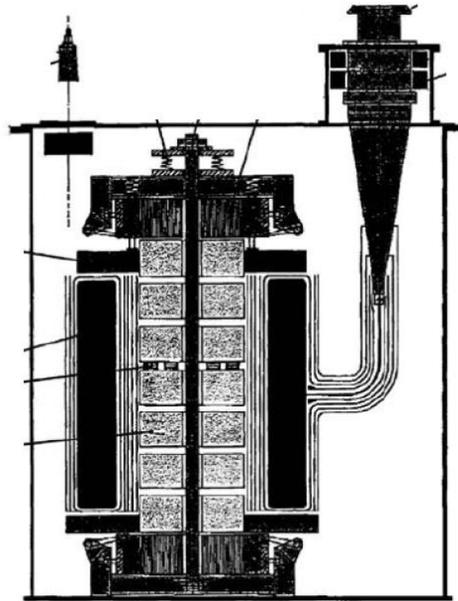


Figura 2.6.- Reactor eléctrico tipo núcleo de hierro sumergido en aceite.

A continuación, se enlistan los componentes básicos de un reactor:

- Núcleo
- Arrollamientos
- Armadura
- Aislamiento
- Tanque
- Refrigerante
- Accesorios

2.7 SOBRETENSIONES EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

La norma IEC 60071-1 clasifica los esfuerzos a los cuales serán sometidos los equipos por parámetros apropiados tales como la duración de las tensiones a frecuencia industrial o la forma de onda de una sobretensión, en función de su efecto sobre el aislamiento o sobre el equipo de protección. Estos esfuerzos, clasificados de esta manera, tienen diferentes orígenes como se ilustra en la figura :

Tipo	Baja frecuencia		Transitorio		
	Continua	Temporal	Frente lento	Frente rapido	Frente muy rapido
Forma de onda de tensiones y sobretensiones					
Gama de formas de ondas de tensiones y sobretensiones	f=50 HZ or 60 HZ Tt ≥ 3,600 s	10 HZ < f < 500 HZ 0.02 s ≤ Tt ≤ 3,600 s	20 us < Tp ≤ 5,000 us T2 ≤ 20 ms	0.1 us < T1 ≤ 20 us T2 ≤ 300 us	Tf ≤ 100 ns 0.3 MHz < f1 < 100 MHz 30 KHZ < f2 < 300 KHZ
Forma de onda de tensión normalizada					a
	f=50 HZ or 60 HZ Tt a	48 HZ ≤ f ≤ 62 HZ Tt= 60 s	Tp= 250 us T2= 2,500 us	T1=1.2 us T2=50 us	
Ensayo de tensión soportada normalizada	a	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo impulso tipo maniobra	Ensayo impulso tipo rayo	a

a Ser especificado para cada equipo en particular.

Figura 2.7.- Tipos de sobretensiones.

2.7.1 TENSIONES CONTINUAS

Bajo condiciones de operación normal, la tensión a frecuencia industrial puede variar en el tiempo y ser diferente de un punto a otro del sistema. Sin embargo, para propósitos de diseño y coordinación de aislamiento, la tensión representativa a frecuencia industrial será considerada como constante e igual a la tensión máxima del sistema.[8]

2.7.2 SOBRE TENSIONES TEMPORALES

Este tipo de sobretensiones son caracterizadas por su amplitud. Su forma de onda y su duración. Todos los parámetros dependen del origen de las sobretensiones y sus amplitudes y sus formas de onda pueden cambiar inclusive, mientras exista la sobretensión.

Entre otros eventos que pueden ocasionar sobretensiones temporales, son los siguientes:

- Fallas a tierra.
- Rechazo de carga.
- Resonancia y ferorrresonancia.
- Sobretensiones longitudinales durante sincronización.
- Combinaciones de sobretensiones temporales.

2.7.3 SOBRETENSIONES DE FRENTE LENTO

Estas tienen frentes de duración desde algunas decenas de microsegundos hasta miles de microsegundos y duraciones de cola del mismo orden y son oscilatorias por naturaleza. Ellas son ocasionadas generalmente por [8]:

- Energización y recierres de línea.
- Fallas y despeje de fallas.
- Rechazo de carga.
- Interrupción de corrientes capacitivas o inductivas.
- Descargas atmosféricas distantes sobre un conductor de una línea aérea.

2.7.4 SOBRETENSIONES DE FRENTE RÁPIDO

Este tipo de sobretensiones son principalmente ocasionadas por descargas atmosféricas, las cuales son de carácter aleatorio y de muy corta duración. Pudiendo ocasionar fallas y desconexión de líneas de transmisión. La onda viajera producida por este fenómeno es de alta frecuencia pudiendo ocasionar sobretensiones de hasta 6 p.u.

La descarga atmosférica puede impactar tanto en el conductor de fase, en el cable guardia o muy cercana a la línea de transmisión induciendo sobretensiones. La situación más severa es cuando ocurre falla del apantallamiento y la descarga impacta directamente en el conductor de fase.

Tanto una descarga directa en el conductor de fase o en el cable guardia puede ocasionar flameo en las cadenas de aisladores, pudiendo dejar fuera de servicio la línea de transmisión.[8]

2.7.5 SOBRETENSIONES DE FRENTE MUY RÁPIDO

Estas se originan por la operación de los seccionadores o por fallas internas en las subestaciones tipo GIS, debido al rápido flameo del gas y a la posterior propagación poco amortiguada en el interior de la GIS. Su amplitud es rápidamente amortiguada una vez sale de la GIS.

Las sobretensiones originadas dentro de una GIS son comúnmente producidas por la apertura o cierre de un desconectador o interruptor de poder, pudiendo ocasionar niveles de sobretensión entre 2.0 p.u. y 2.5 p.u, Son de corta duración en el rango de los 4 a 100 ns a una frecuencia de hasta 50 MHz en el peor de los casos.

A pesar de que estas sobretensiones se encuentran por debajo del nivel básico de aislación (BIL) de la subestación. La onda de sobretensión producida por este tipo de transitorio puede afectar de manera interna o externa, donde de manera interna la preocupación radica entre el centro del conductor y la encapsulación y el daño externo puede ocurrir si la onda viaja a los equipos aéreos de la GIS o su conexión GIS-Aire la cual es por cable subterráneo.

La mayor probabilidad de ocurrencia ocurre en subestaciones de niveles de tensión superiores a los 500 kV, donde el radio entre el BIL y la tensión nominal del sistema se reduce.[8]

CAPITULO 3: METODOLOGIA

3.1 SOFTWARE

ATPdraw (Alternative Transient Program) es un preprocesador gráfico donde el usuario puede construir un circuito eléctrico, seleccionando los componentes predeterminados en los menús. El preprocesador gráfico de ATP contiene lo siguiente:

- Programa de transitorios electromagnéticos
- Análisis en el dominio del tiempo
- Análisis de escaneo de la frecuencia en estado estable
- Estudios de cambios
- Análisis de armónicos
- Coordinación de aislamiento
- electrónica de potencia y HVDC
- Máquinas eléctricas
- Sistemas de control
- Parámetros complejos de línea y cable

Las rutinas de apoyo son utilidades integradas dentro del programa que ayudan a los usuarios en conversión entre el formato de datos del fabricante y el requerido por el programa, o para calcular los parámetros eléctricos de líneas y cables a partir de datos geométricos y de materiales. Secundario

Los módulos en ATP son:

- Cálculo de parámetros eléctricos de líneas aéreas y cables utilizando módulos de programa.
- Constantes de línea, constantes de cable y parámetros de cable.
- Generación de datos de entrada del modelo de línea dependiente de la frecuencia (Semlyen, J. Marti, Noda line models).
- Cálculo de datos de modelo para transformadores (XFORMER, BCTRAN).
- Conversión de curvas de saturación e histéresis.
- Base de datos.

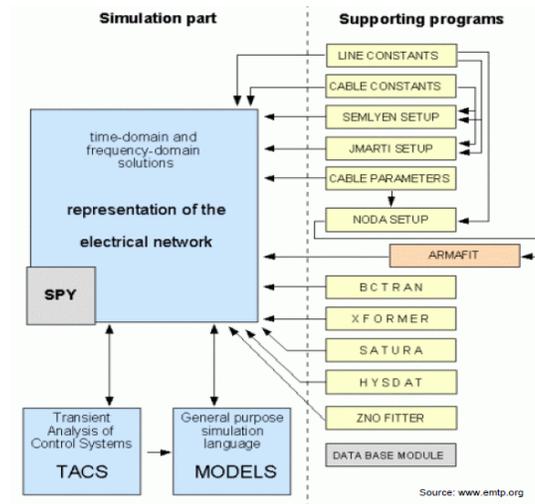


Figura 3.1.- Módulos del software ATP.

La entrada de datos y la visualización de resultados utilizan programas externos, para la generación del archivo plano y la gestión de las subrutinas internas se utiliza el programa ATPdraw, para la visualización se utilizan programas como el PLOTXY. La figura 3.2 describe los programas de apoyo y las extensiones de los archivos relacionados.

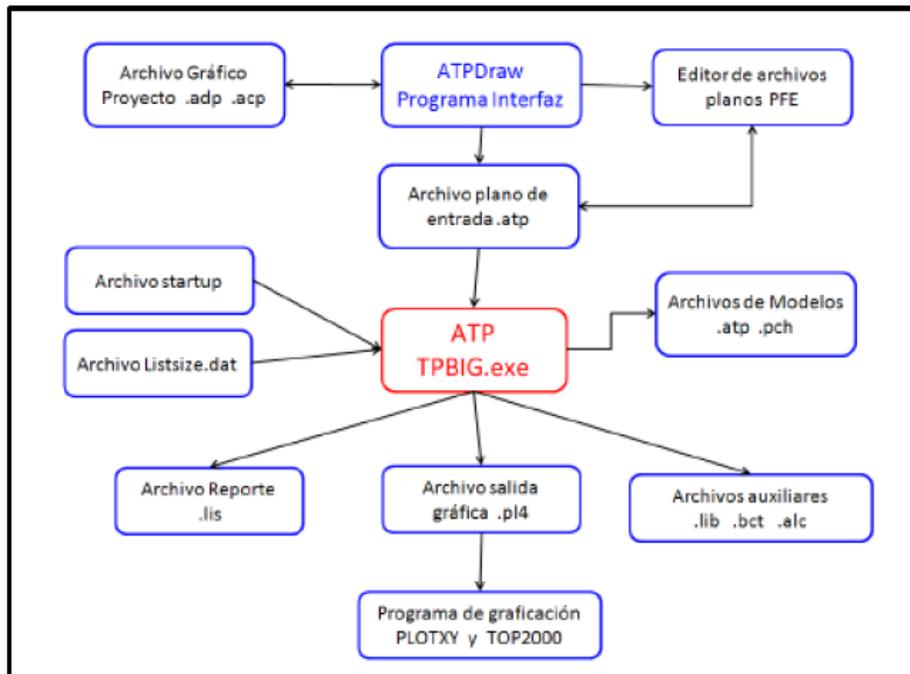


Figura 3.2.- Programas de apoyo y extensiones del software ATP.

El ATPdraw además de generar el archivo plano se encarga de cargar el ATP y hacer que procese el archivo plano correspondiente a la simulación, toda esta labor requiere que también se encargue de la gestión de archivos y por ello necesita una configuración de directorios además de la configuración para cargar el ATP.[10]

3.2 SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE 400 KV.

El sistema eléctrico nacional es uno de los mayores y más complejos del mundo. Es un sistema integrado que da servicio a 128 millones de mexicanos, que habitan en dos millones de kilómetros cuadrados. Dicho sistema eléctrico nacional, se conforma de las siguientes regiones como se ilustra en la figura 3.3:



Figura 3.3.- Sistema eléctrico nacional.

3.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN A SIMULAR

3.3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN

A continuación, se ubica geográficamente la región donde se realizarán las simulaciones con las siguientes líneas de transmisión todas ellas tienen un nivel de tensión de 400 Kv.

- TMT A3340
- EDO A3U10
- EDO A3T70
- EDO A3U00
- IPO A3V30
- IPO A3V40
- MMT A3140
- MMT A3040
- MMT A3T90



Figura 3.4.- Región geográfica de las líneas de transmisión a simular.

3.3.2 PARÁMETROS DE LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN

Mediante las siguientes tablas se muestra las características de cada línea de transmisión, consideradas para su simulación en el software ATPdraw.

Tabla 3.1.- Parámetros de línea de transmisión TMT A3340

TMT A3340		
Nivel de tensión	400	Kv.
Longitud	155	Km.
Número de conductores	2	Por fase
Tipo de cable (ACSR)	1113	KCM
Resistencia eléctrica a cd.	0.052392	Ohm/Km
Radio interior	0.5985	Cm.
Radio exterior	1.5976	Cm.
separación entre ternas	45	Cm.
Radio exterior del hilo de guarda	0.4889	Cm.

Tabla 3.2.- Parámetros de línea de transmisión EDO A3U10

EDO A3U10		
Nivel de tensión	400	Kv.
Longitud	150	Km.
Número de conductores	2	Por fase
Tipo de cable (ACSR)	1113	KCM
Resistencia eléctrica a cd.	0.052392	Ohm/Km
Radio interior	0.5985	Cm.
Radio exterior	1.5976	Cm.
separación entre ternas	45	Cm.
Radio exterior del hilo de guarda	0.4889	Cm.

Tabla 3.3.- Parámetros de línea de transmisión EDO A3T70

EDO A3T70		
Nivel de tensión	400	Kv.
Longitud	150	Km.
Número de conductores	2	Por fase
Tipo de cable (ACSR)	1113	KCM
Resistencia eléctrica a cd.	0.052392	Ohm/Km
Radio interior	0.5985	Cm.
Radio exterior	1.5976	Cm.
separación entre ternas	45	Cm.
Radio exterior del hilo de guarda	0.4889	Cm.

Tabla 3.4.- Parámetros de línea de transmisión EDO A3U00

EDO A3U00		
Nivel de tensión	400	Kv.
Longitud	150	Km.
Número de conductores	2	Por fase
Tipo de cable (ACSR)	1113	KCM
Resistencia eléctrica a cd.	0.052392	Ohm/Km
Radio interior	0.5985	Cm.
Radio exterior	1.5976	Cm.
separación entre ternas	45	Cm.
Radio exterior del hilo de guarda	0.4889	Cm.

Tabla 3.5.- Parámetros de línea de transmisión IPO A3V30

IPO A3V30		
Nivel de tensión	400	Kv.
Longitud	135.8	Km.
Número de conductores	3	Por fase
Tipo de cable (ACSR)	1113	KCM
Resistencia eléctrica a cd.	0.052392	Ohm/Km
Radio interior	0.5985	Cm.
Radio exterior	1.5976	Cm.
separación entre ternas	45	Cm.
Radio exterior del hilo de guarda	0.4889	Cm.

Tabla 3.6.- Parámetros de línea de transmisión IPO A3V40

IPO A3V40		
Nivel de tensión	400	Kv.
Longitud	135.8	Km.
Número de conductores	3	Por fase
Tipo de cable (ACSR)	1113	KCM
Resistencia eléctrica a cd.	0.052392	Ohm/Km
Radio interior	0.5985	Cm.
Radio exterior	1.5976	Cm.
separación entre ternas	45	Cm.
Radio exterior del hilo de guarda	0.4889	Cm.

Tabla 3.7.- Parámetros de línea de transmisión MMT A3140

MMT A3140		
Nivel de tensión	400	Kv.
Longitud	243	Km.
Número de conductores	2	Por fase
Tipo de cable (ACSR)	1113	KCM
Resistencia eléctrica a cd.	0.052392	Ohm/Km
Radio interior	0.5985	Cm.
Radio exterior	1.5976	Cm.
separación entre ternas	45	Cm.
Radio exterior del hilo de guarda	0.4889	Cm.

Tabla 3.8.- Parámetros de línea de transmisión MMT A3040

MMT A3040		
Nivel de tensión	400	Kv.
Longitud	243	Km.
Número de conductores	2	Por fase
Tipo de cable (ACSR)	1113	KCM
Resistencia eléctrica a cd.	0.052392	Ohm/Km
Radio interior	0.5985	Cm.
Radio exterior	1.5976	Cm.
separación entre ternas	45	Cm.
Radio exterior del hilo de guarda	0.4889	Cm.

Tabla 3.9.-Parámetros de línea de transmisión MMT A3T90

MMT A3T90		
Nivel de tensión	400	Kv.
Longitud	243	Km.
Número de conductores	2	Por fase
Tipo de cable (ACSR)	1113	KCM
Resistencia eléctrica a cd.	0.052392	Ohm/Km
Radio interior	0.5985	Cm.
Radio exterior	1.5976	Cm.
separación entre ternas	45	Cm.
Radio exterior del hilo de guarda	0.4889	Cm.

3.4 DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO

3.4.1 MODELADO DE LINEA DE TRANSMISIÓN EN SOFTWARE ATP.

Para el diseño de las líneas de transmisión de nuestro sistema eléctrico de potencia en cuestión se utiliza la rutina LCC del ATPdraw, después elegiremos el modelo de la línea e ingresamos las características específicas de nuestras líneas de transmisión y de esta manera lograr el diseño adecuado para obtener la simulación. A continuación, se muestra un ejemplo de la estructura de la torre utilizada.

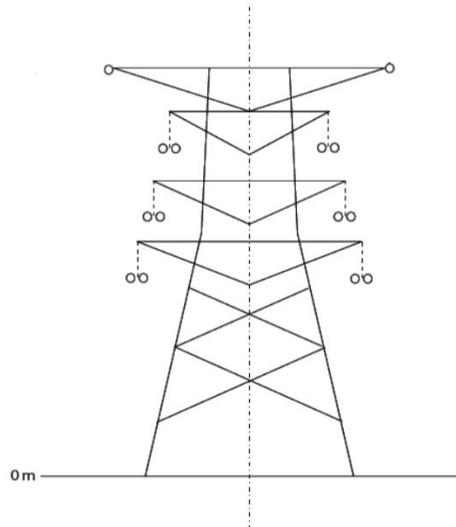


Figura 3.5.- Ejemplo de estructura de torre de transmisión.

Para modelar la línea de transmisión en el software ATPdraw se utiliza la función Line/Cables y posteriormente despliega un par de opciones más, se elegirá la opción LCC template.

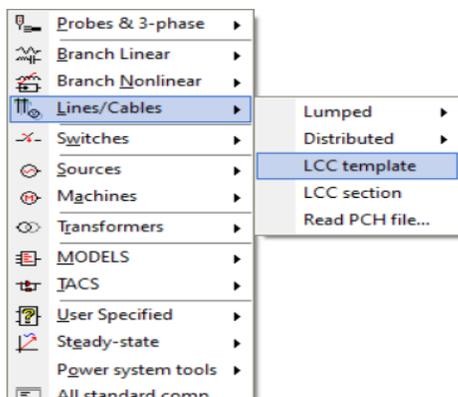


Figura 3.6.- Función Line/Cable en software ATP.

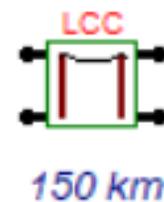


Figura 3.7.- Icono LCC en software ATP.

Como ejemplo del ingreso de datos de las características específicas del diseño de la línea de transmisión se adjunta la siguiente imagen que contiene los parámetros específicos de la línea de transmisión EDO A3U10.

Line/Cable Data: LT400

Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
#	[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	0.5985	1.59766	0.052392	0	32.7	22.7	45	0	2
2	0.5985	1.59766	0.052392	0.3	43.6	33.6	45	0	2
3	0.5985	1.59766	0.052392	0.3	54.4	44.4	45	0	2
4	0.5985	1.59766	0.052392	13.6	32.7	22.7	45	0	2
5	0.5985	1.59766	0.052392	13.3	43.6	33.6	45	0	2
6	0.5985	1.59766	0.052392	13.3	54.4	44.4	45	0	2

Buttons: Add row, Delete last row, Insert row copy, Move (up/down), OK, Cancel, Import, Export, Run ATP, View, Verify, Edit defin., Help

Figura 3.8.-Ingreso de datos de la línea de transmisión EDO A3U10.

3.4.2 MODELADO DE TRANSPUESTAS EN SOFTWARE ATP

Debido al voltaje de la línea de transmisión, sus características y sus grandes longitudes se requiere la colocación de transposiciones a lo largo de la línea de transmisión, esto consiste en invertir la posición de dos fases entre si cada tercio del recorrido de no colocar las transposiciones se originarían factores que provocarían pérdidas de potencia en las líneas de alta tensión y por consecuencia un déficit de rendimiento de la transmisión de energía en el sistema eléctrico de potencia.

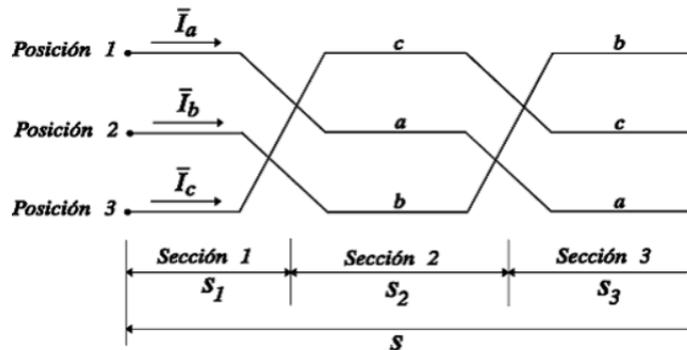


Figura 3.9.- Esquema de una transpuesta en una línea de transmisión.

Para fines de la simulación y características de las líneas de transmisión se utiliza la función de transpuesta del software ATPdraw. A continuación, se muestra la ubicación de la función, así como su icono.

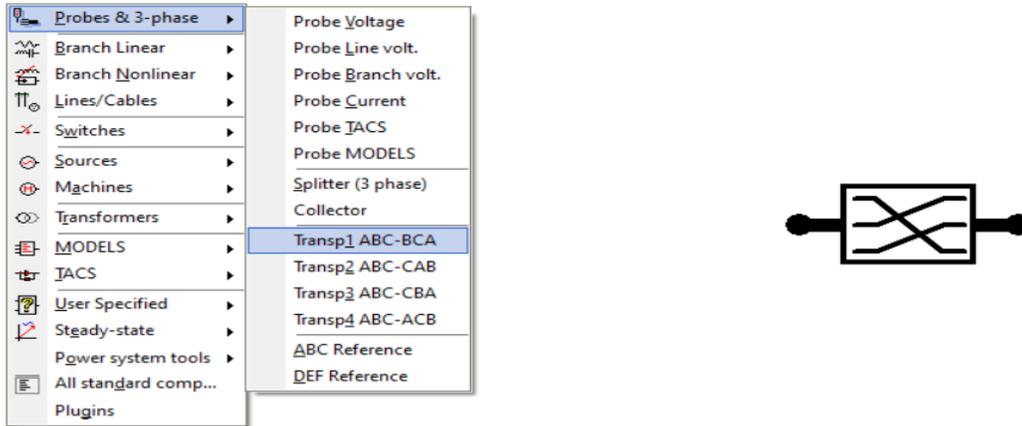


Figura 3.10.- Función Transp1 ABC-BCA en software ATP.

3.4.3 MODELADO DE FUENTE DE VOLTAJE EN SOFTWARE ATP.

Para la alimentación alterna de nuestro sistema eléctrico de potencia en cuestión se utilizará la función ACSOURCE con las siguientes características

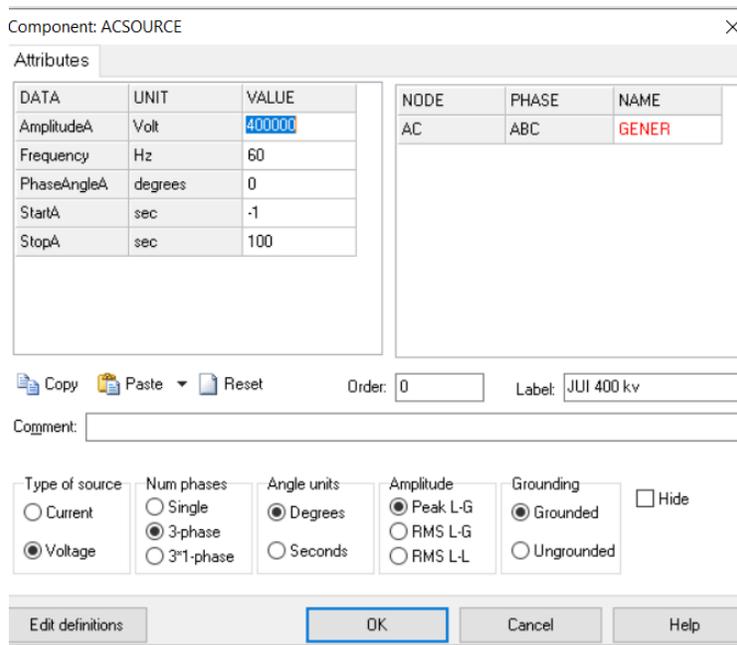


Figura 3.11.- Función ACSOURCE en software ATP.

3.5 SISTEMA ELÉCTRICO A SIMULAR EN SOFTWARE ATP

A continuación, se anexa la red modelada en el software de ATP para las distintas simulaciones.

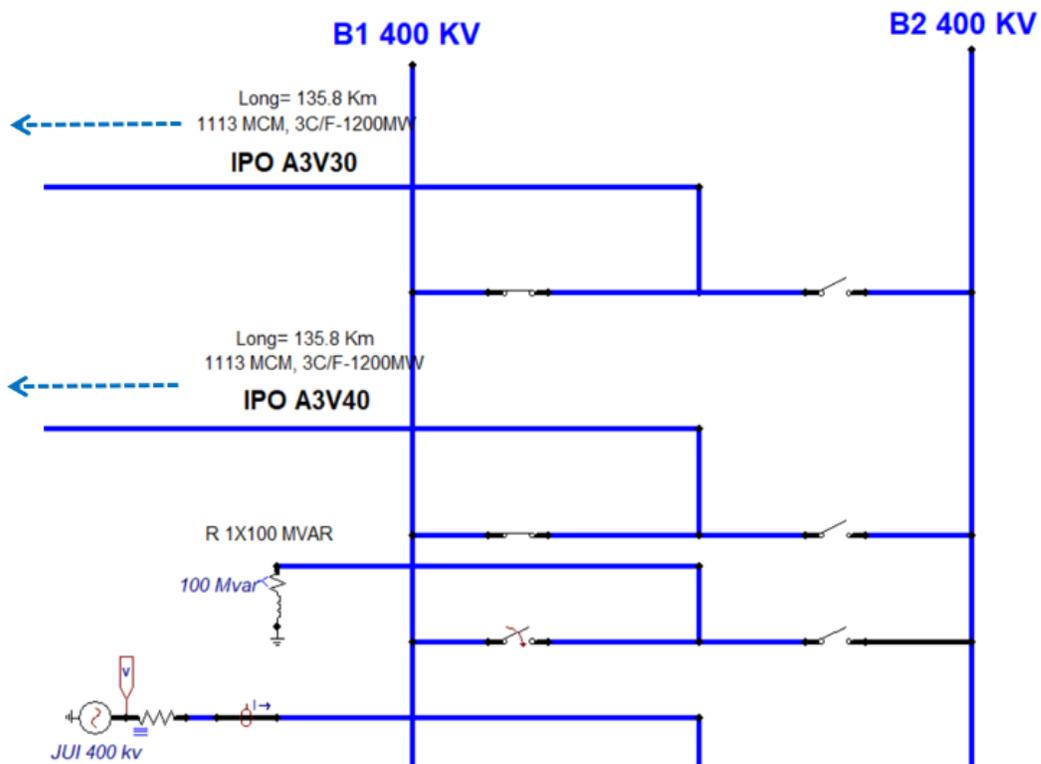


Figura 3.12.- Primera parte de la red modelada en ATP.

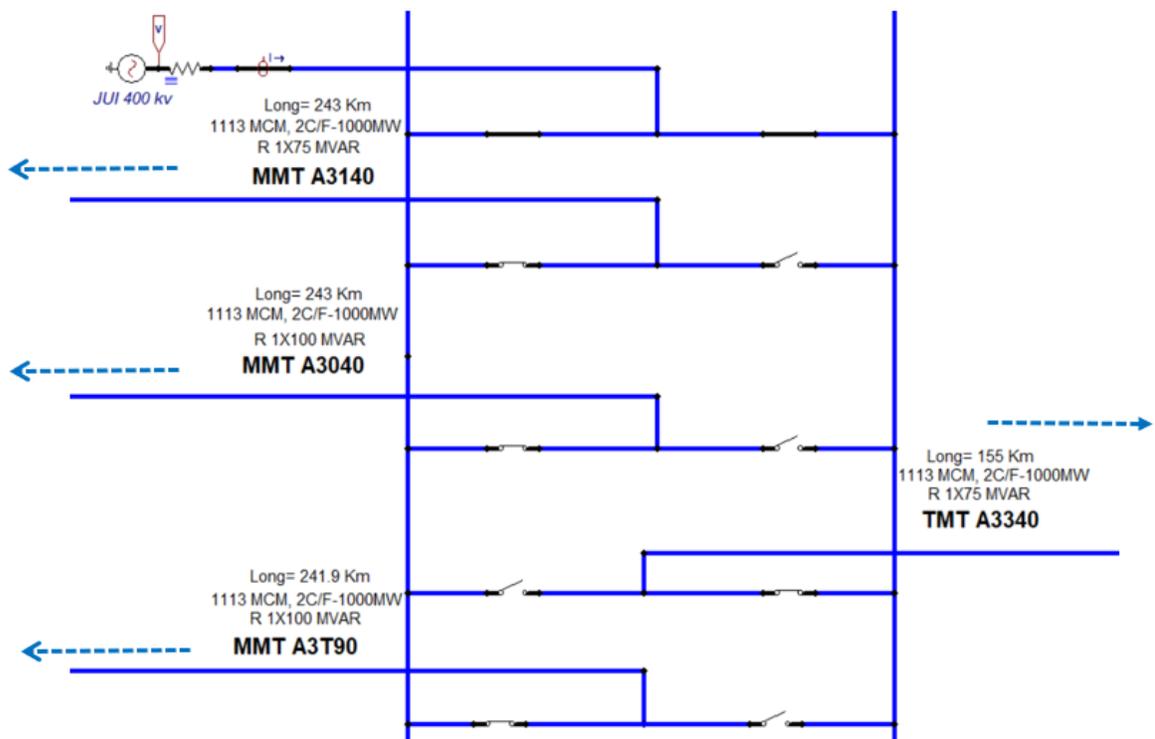


Figura 3.13.- Segunda parte de la red modelada en ATP.

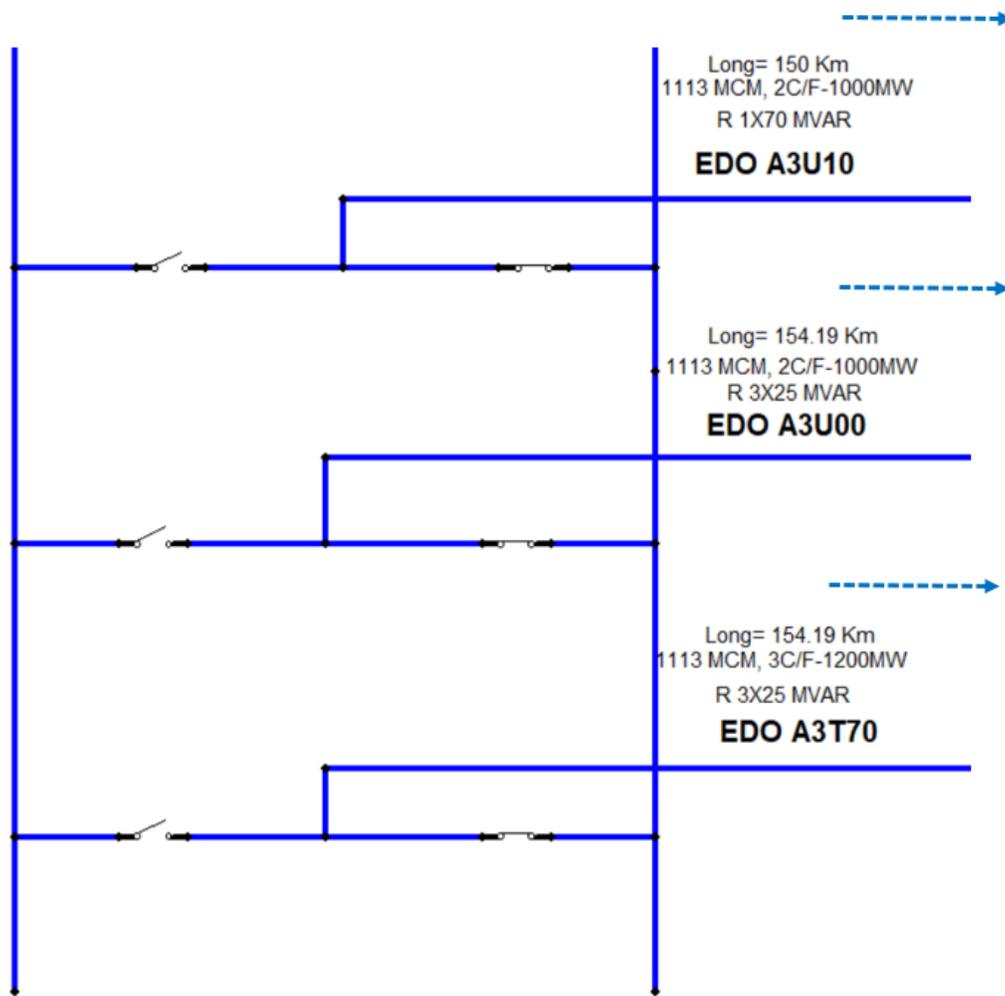


Figura 3.14.- Tercera parte de la red modelada en ATP.

3.6 MODELADO DE ESCENARIOS EN SOFTWARE ATP

3.6.1 FENOMENOS TRANSITORIOS

Las problemáticas presentadas en las líneas de alta tensión de larga longitud ocurren por diferentes factores a veces hasta ajenos al sistema eléctrico de potencia e incluso por error humano, sin embargo, el sistema eléctrico de potencia debe ser confiable y seguro para el usuario final.

Con la finalidad de mostrar el comportamiento de los fenómenos transitorios en las líneas de transmisión ya antes mencionadas, se procede a la elaboración de estos, teniendo en cuenta los escenarios más presentados que son las fallas de cortocircuito (abordaremos la falla monofásica y la falla bifásica) como se muestra en la siguiente gráfica, así como también el efecto Ferranti que es debido a la larga longitud de la línea, y por último sobretensiones en el sistema eléctrico de potencia debido a maniobras, como por ejemplo la energización de la línea. En resumen, los fenómenos abarcados serán;

- Efecto Ferranti
- Falla monofásica
- Falla bifásica
- sobretensión por maniobra



Figura 3.15.-Ocurrencia de fallas de cortocircuito.

3.6.2 EFECTO FERRANTI

Para este fenómeno transitorio solo se elegirá una línea de transmisión que satisfaga las cualidades para crear este fenómeno que implica un aumento de voltaje entre los nodos emisor y receptor debido a la capacitancia de la línea, para ello de momento se usará una línea de transmisión sin ningún tipo de compensación para provocar dicho fenómeno. A continuación, se muestra el diagrama de flujo de la creación del modelo en ATPdraw.

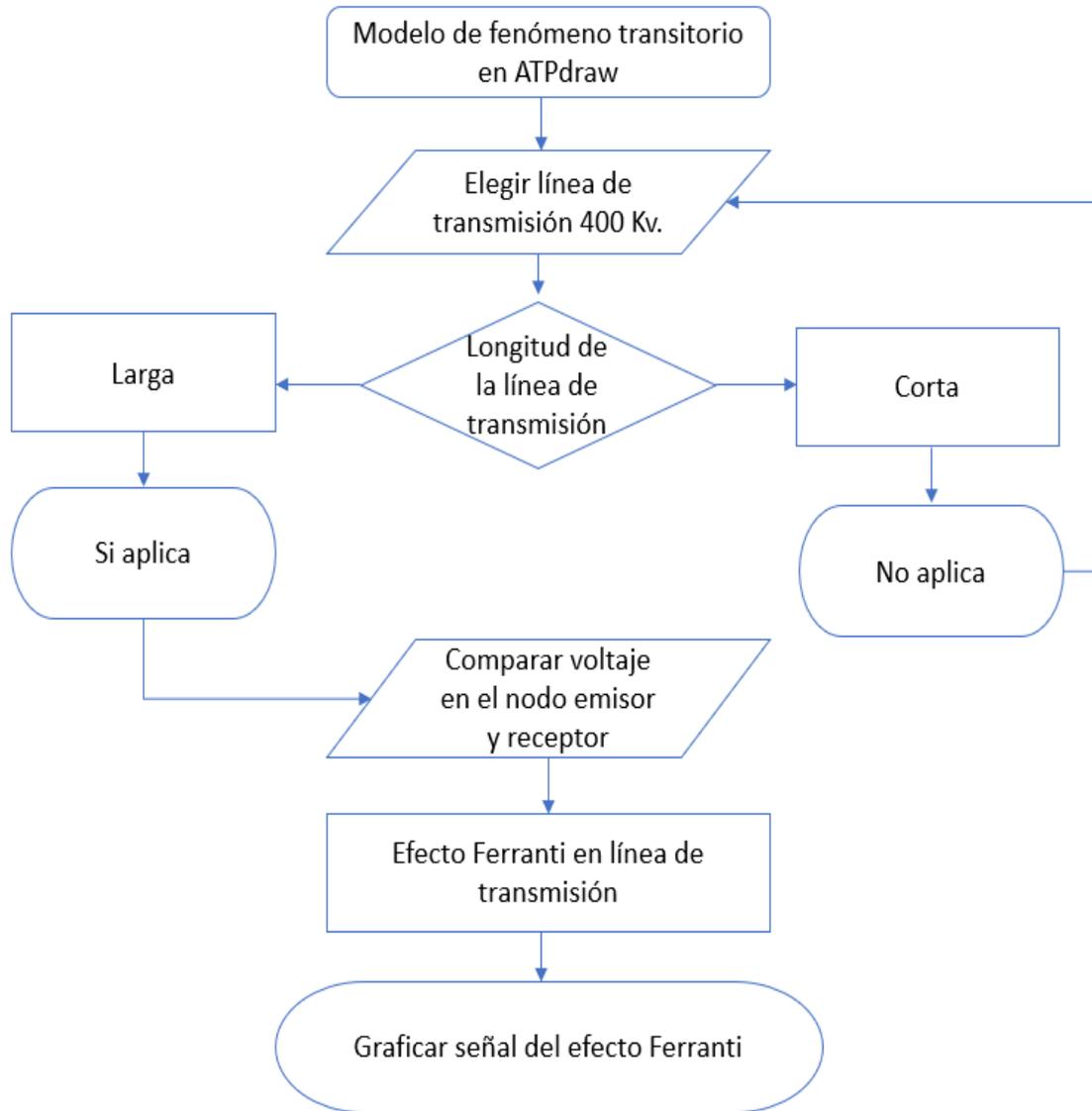


Figura 3.16.-Diagrama de flujo del modelo del efecto Ferranti en ATP.

3.6.3 FALLA MONOFASICA

Para la simulación de la falla monofásica en dicho sistema eléctrico de potencia se creará un modelo que simule el corto circuito de una de sus fases de las líneas de transmisión del sistema ya mencionado con anterioridad.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo de la creación del modelo en ATPdraw.

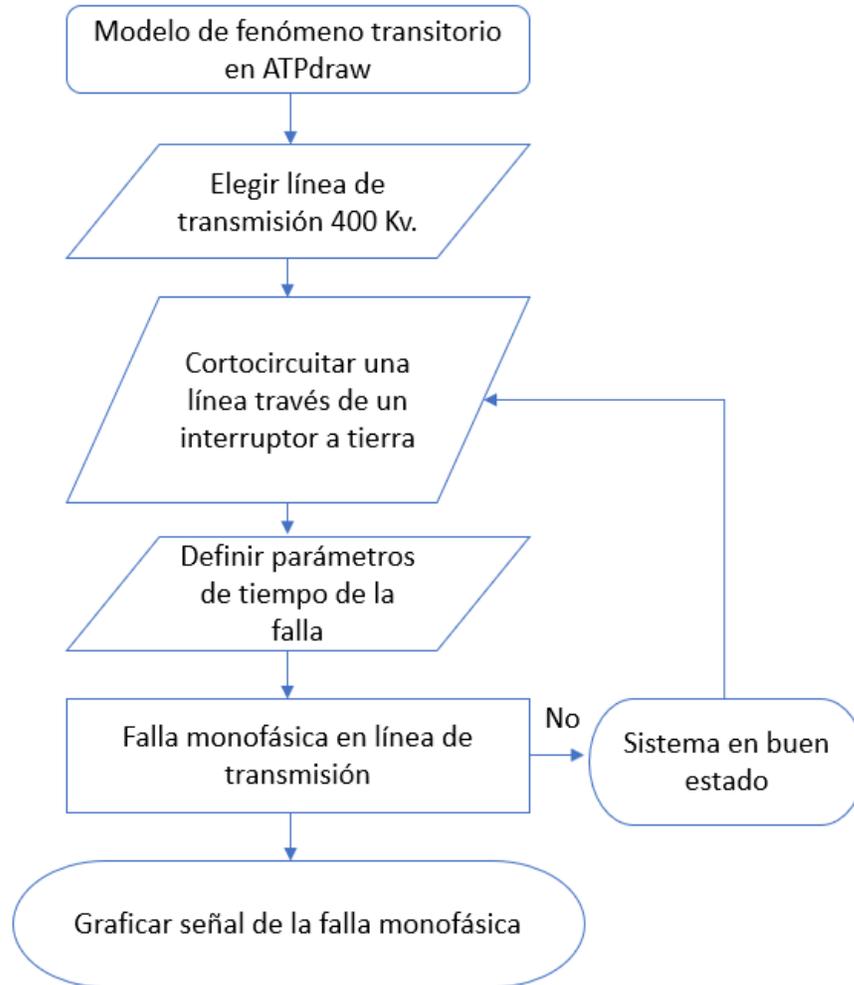


Figura 3.17.-Diagrama de flujo del modelo de falla monofásica en ATP.

3.6.4 FALLA BIFÁSICA

Para la simulación de la falla bifásica en dicho sistema eléctrico de potencia se creará un modelo que simule el corto circuito de dos de sus fases de las líneas de transmisión del sistema ya mencionado con anterioridad.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo de la creación del modelo en ATPdraw.

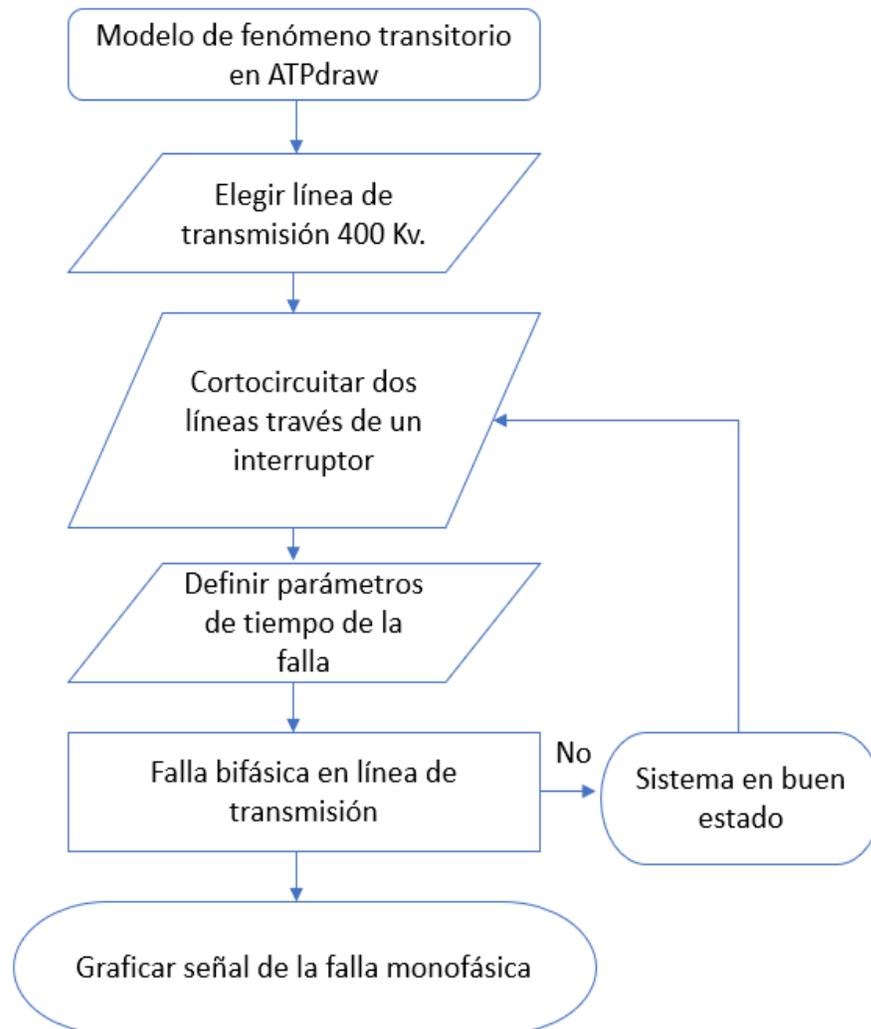


Figura 3.18.-Diagrama de flujo del modelo de falla bifásica en ATP.

3.6.5 SOBRETENSIÓN POR MANIOBRA

En el caso de la sobretensión por maniobra se creará un modelo en ATPdraw en base a la energización de una línea de transmisión con parámetros de tiempo específico para poder observar el aumento de voltaje al cierre de los interruptores.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo de la creación del modelo en ATPdraw.

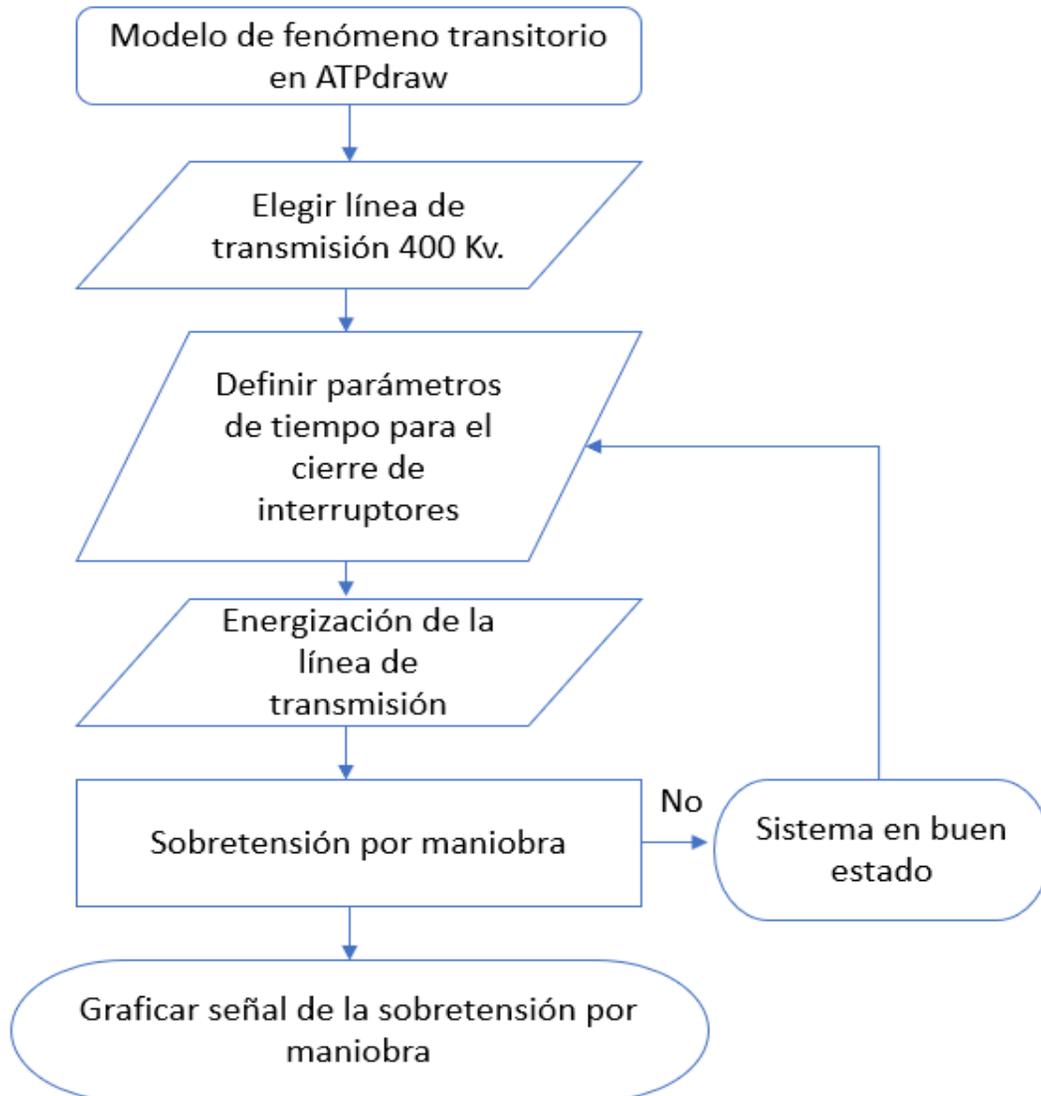


Figura 3.19.-Diagrama de flujo del modelo de sobretensión por maniobra en ATP.

3.7 DISEÑO DE REACTORES ELÉCTRICOS DE POTENCIA EN ATPDRAW

El sistema eléctrico de potencia constara de 7 reactores eléctricos, tanto como reactores conectados en los extremos de las líneas, así como reactores conectados en la barra de la subestación los que son detallados a continuación:

Tabla 3.10.-Reactores eléctricos de potencia conectados en la línea.

Reactores eléctricos de potencia conectados en la línea		
L.T. TMT A3340	Reactor monofásico	75 Mvar
L.T. EDO A3U10	Reactor monofásico	70 Mvar
L.T. EDO A3T70	Reactor trifásico	25 Mvar
L.T. EDO A3U10	Reactor trifásico	25 Mvar
L.T. MMT A3140	Reactor monofásico	75 Mvar
L.T. MMT A3040	Reactor monofásico	100 Mvar
L.T. MMT A3T90	Reactor monofásico	100 Mvar

Tabla 3.11.-Reactores eléctricos de potencia conectados en el bus de la subestación.

Reactores eléctricos de potencia conectados en el bus de la subestación		
S.E. JUL	Reactor monofásico	100 Mvar
S.E. EDO	Reactor monofásico	100 Mvar
S.E. MMT	Reactor monofásico	150 Mvar

Para la modelación del reactor se utiliza el siguiente componente RLC en el software ATPdraw a continuación se muestra un ejemplo del modelo implementado para la simulación.

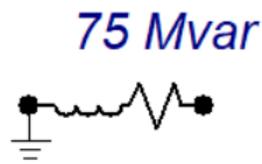


Figura 3.20.-Icono de reactor eléctrico en software ATP.

En el diseño del reactor eléctrico de potencia en el software ATPdraw solicita la reactancia en ohm y la inductancia en mH del reactor eléctrico de potencia como lo muestra la siguiente figura de ejemplo.

Component: RLC

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R	Ohm	2133.33
L	mH	5.6588
C	μ F	0

NODE	PHASE	NAME
From	1	
To	1	

Copy Paste Reset Order: 0 Label: 75 Mvar

Comment:

Output: 0 - No Hide \$Vintage.1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 3.21.-Ingreso de parámetros del reactor eléctrico.

3.7.1 CÁLCULO DE LA REACTANCIA DEL REACTOR POR MEDIO DE MATLAB

Para el cálculo de estos dos parámetros mencionados utilizaremos las siguientes ecuaciones:

$$X = \frac{Kv^2}{Mvar} \quad (3.1)$$

$$L = \frac{X}{2\pi f} \quad (3.2)$$

Por consiguiente, para facilitar la manera de obtener los cálculos de los parámetros para el reactor eléctrico de potencia se utilizará el software Matlab como medio de apoyo para calcular los parámetros de cada reactor eléctrico que se usará en este sistema eléctrico de potencia para después de ello introducir estos parámetros en el software ATPdraw para la utilización de los reactores como medio de compensación en nuestro sistema.

Por medio de la función GUIDE de Matlab se crea una interfaz gráfica para calcular la reactancia del reactor eléctrico de potencia y de esta manera sea más preciso la obtención de los resultados que se introducirán en el software ATPdraw para el diseño del reactor. En la siguiente imagen se muestra la interfaz gráfica para el cálculo de la reactancia del reactor.

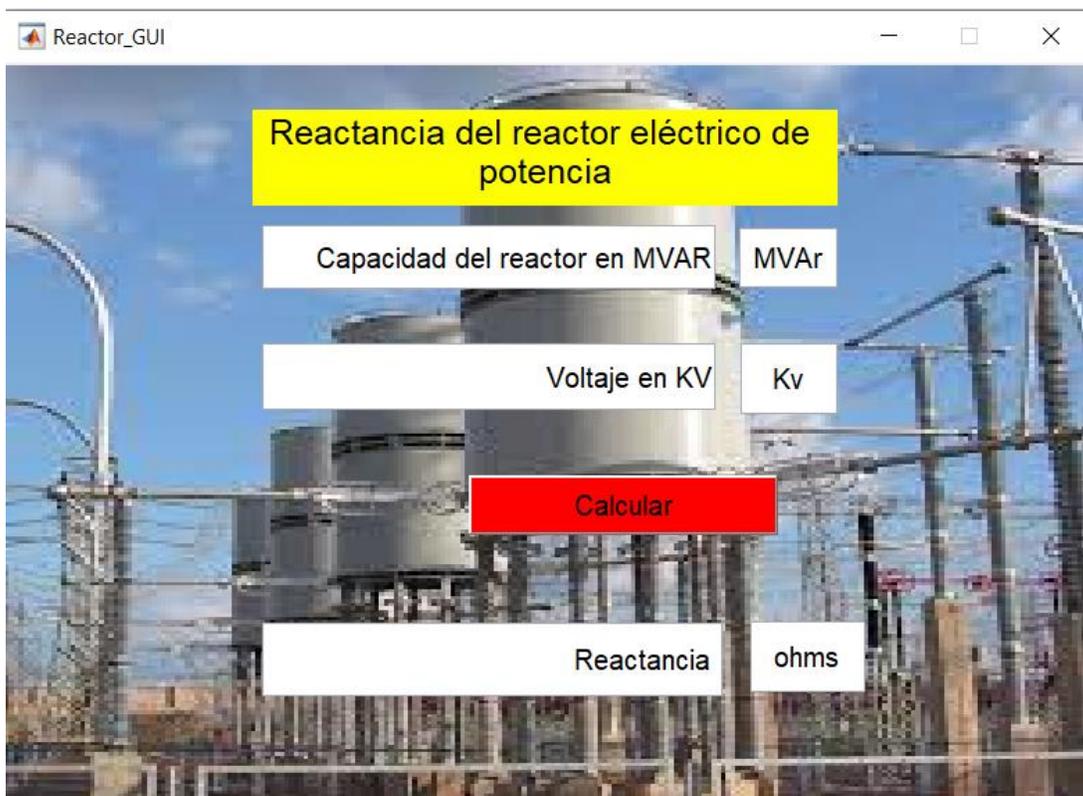


Figura 3.22.-Interfaz gráfica para el cálculo de la reactancia del reactor eléctrico en MATLAB.

La interfaz gráfica diseñada para el cálculo de la reactancia nos solicita introducir dos parámetros del reactor, los cuales son la capacidad en Mvar del reactor eléctrico y su voltaje de operación en Kv. Tomamos como ejemplo el reactor colocado en la L.T. TMT A3340. Introduciendo los parámetros solicitados para la obtención de la reactancia del reactor.

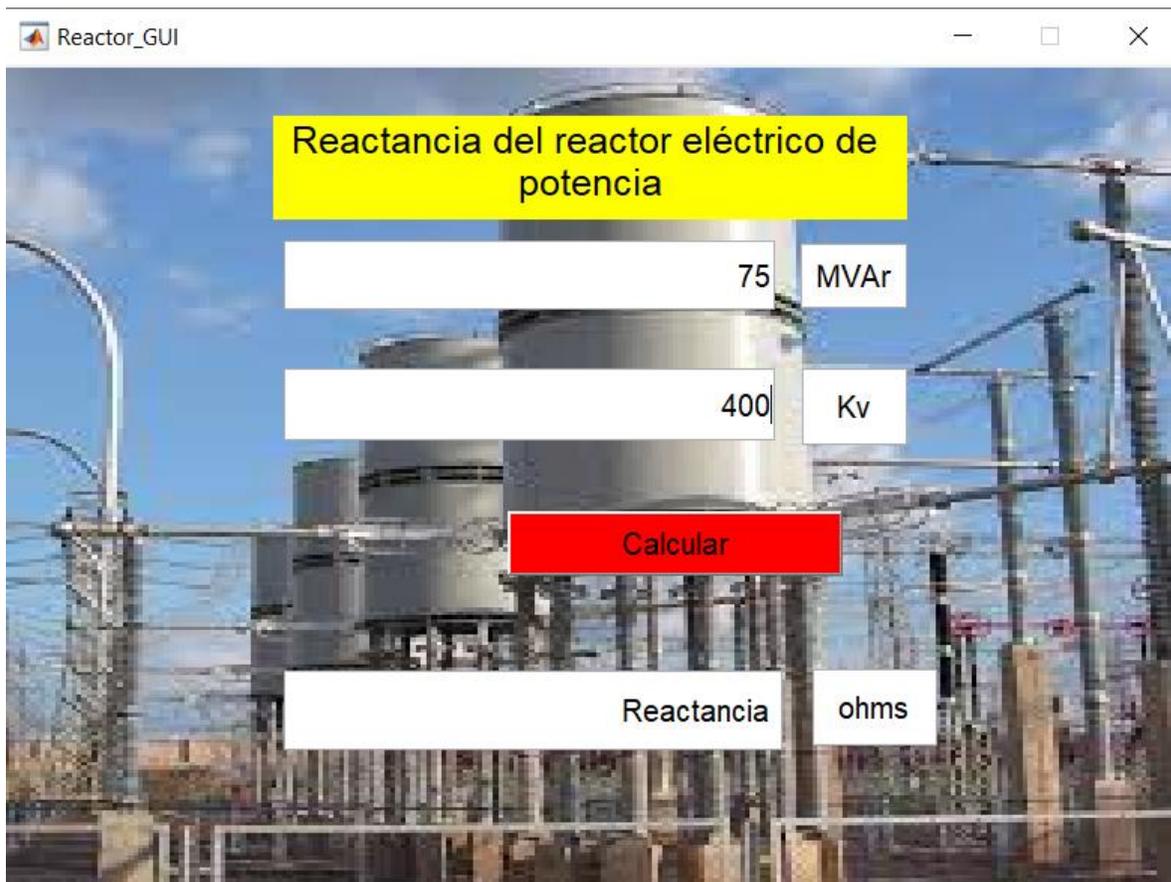


Figura 3.23.-Introducción de parámetros solicitados para el cálculo de la reactancia del reactor eléctrico de potencia.

Después de la introducción de los parámetros del reactor eléctrico de potencia se obtiene el resultado de la reactancia en ohm como lo muestra la siguiente figura y después de ello introducir el valor de la reactancia en el software ATPdraw.

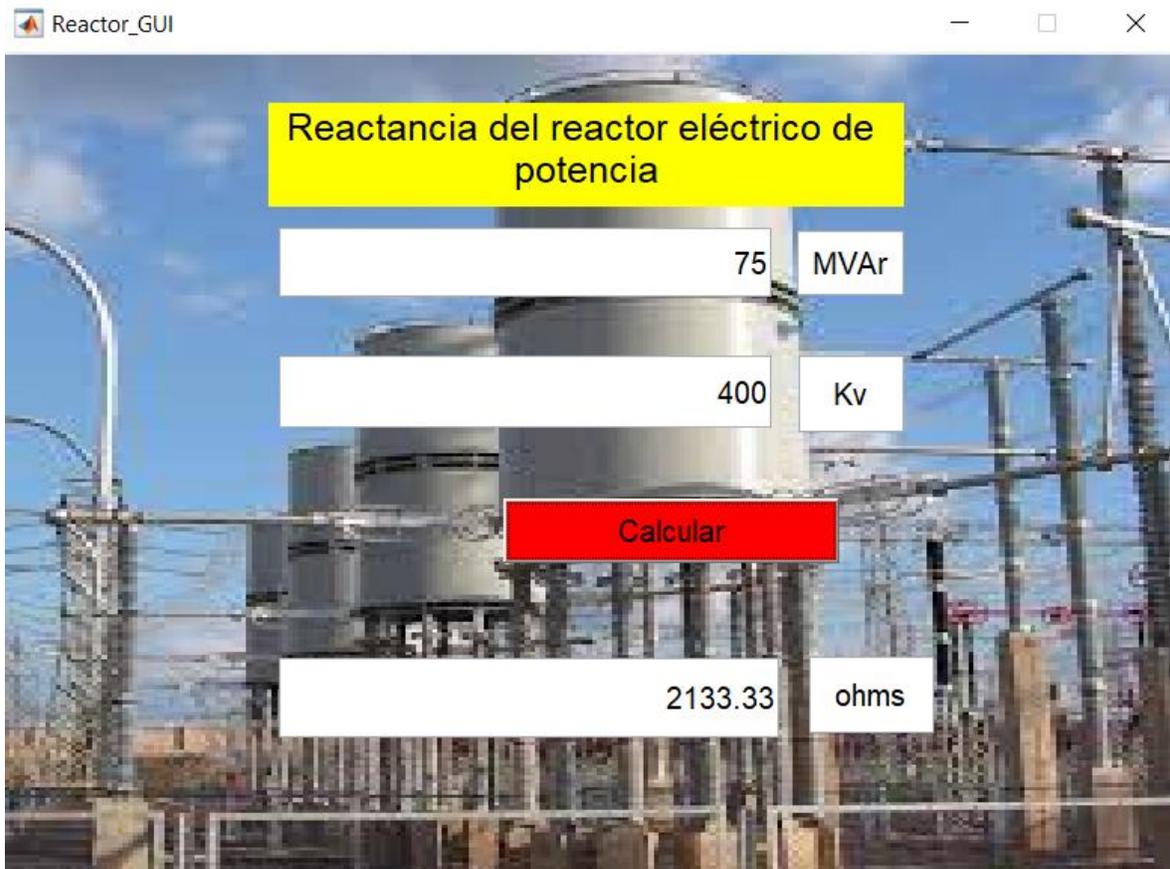


Figura 3.24.-Resultado obtenido de la reactancia en ohm.

3.7.2 CÁLCULO DE LA INDUCTANCIA DEL REACTOR POR MEDIO DE MATLAB

Para el cálculo de la inductancia se utiliza la siguiente interfaz gráfica la cual nos solicita la reactancia en ohm previamente obtenida y la velocidad angular que se define por la ecuación 3.3:

$$\omega = 2\pi f = 2 * \pi * 60Hz \quad (3.3)$$

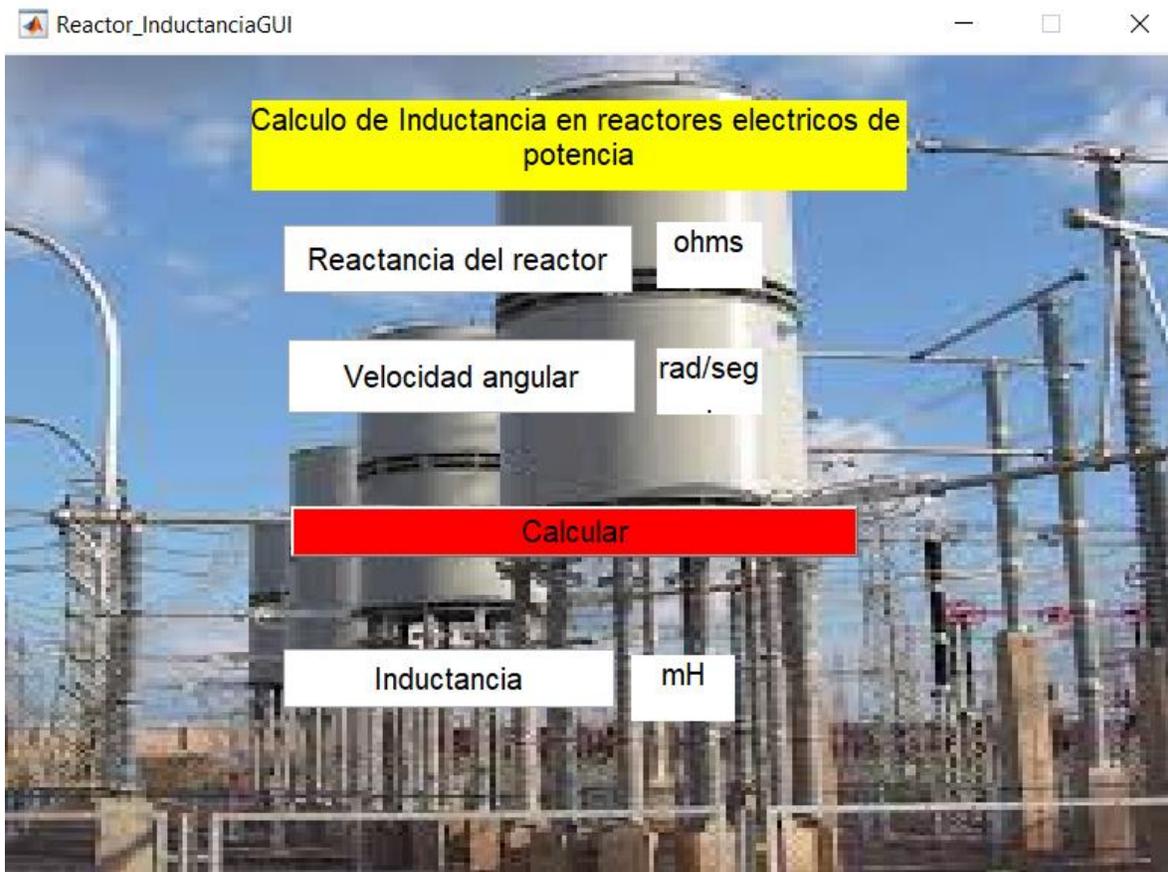


Figura 3.25.-Interfaz gráfica para el cálculo de la inductancia del reactor eléctrico en MATLAB.

De la ecuación 3.3 se obtiene que:

$$\omega = 2\pi f = 2 * \pi * 60\text{Hz} = 376.99 \text{ rad/seg}$$

Posteriormente se introducen los parámetros en la interfaz gráfica para obtener el valor de la inductancia en mH del reactor.

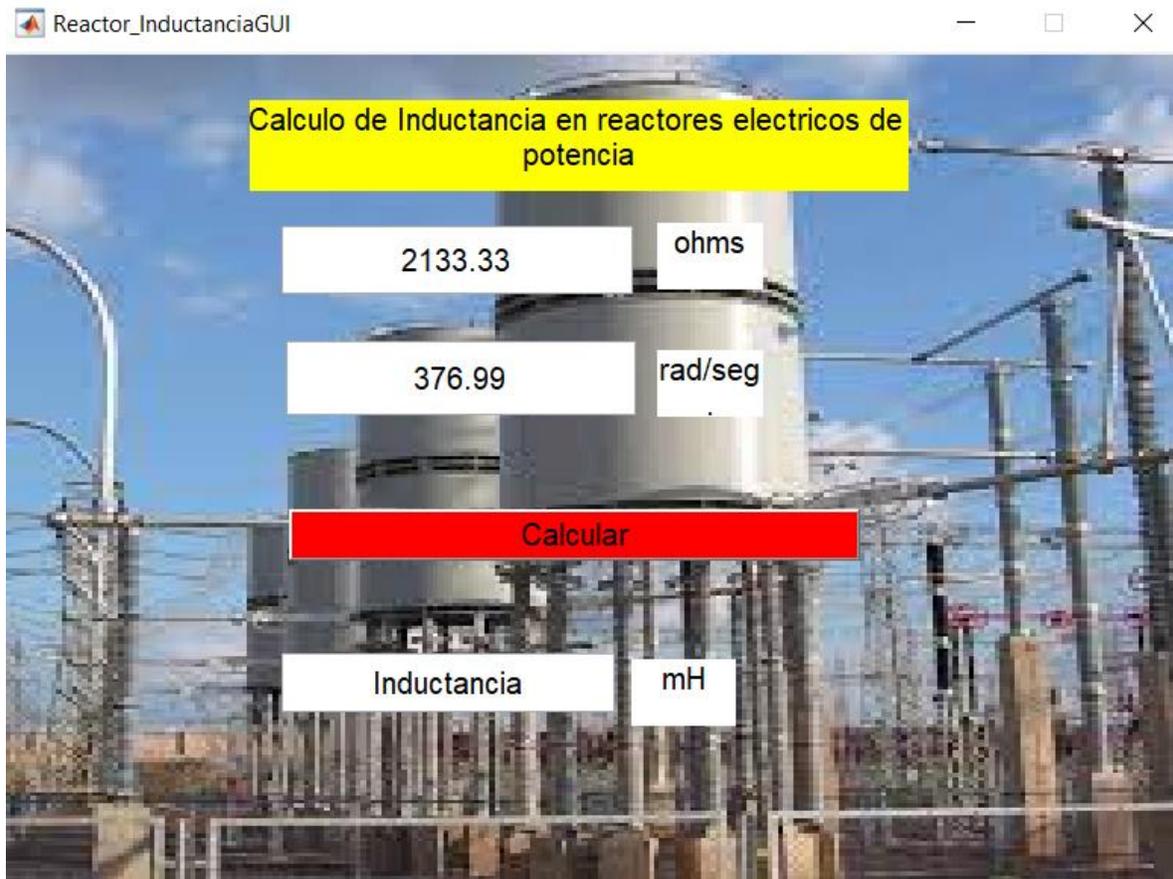


Figura 3.26.-Introducción de parámetros solicitados para el cálculo de la inductancia del reactor eléctrico de potencia

Después de ello se obtiene el valor de la inductancia en mH del reactor como lo muestra la siguiente figura y después de ello introducir el valor de la reactancia en el software ATPdraw para completar los parámetros solicitados en ATPdraw para el diseño del reactor eléctrico de potencia.

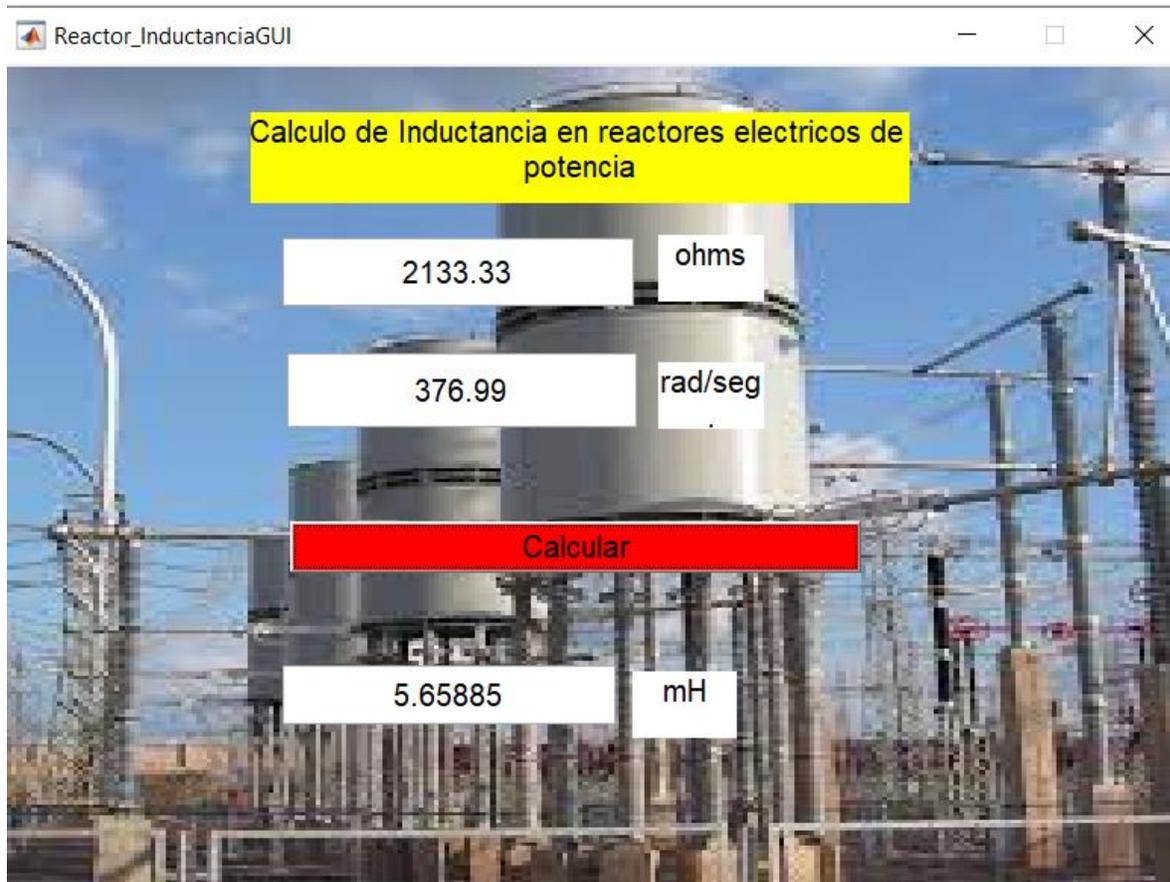


Figura 3.27.-Resultado obtenido de la inductancia en mH.

El diseño de la interfaz gráfica permite ahorrar tiempo ya que el sistema simulado cuenta con 10 reactores eléctricos de esta manera solo se introducen los parámetros y se obtiene el resultado que se introduce en ATPdraw para el diseño de los reactores. Al final se adjunta el código en Matlab de los cálculos de cada uno de los parámetros de los reactores eléctricos de potencia.

CAPITULO 4: ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

4.1 EFECTO FERRANTI

El efecto Ferranti es una sobretensión producida en una larga línea de transmisión, relativa a la tensión al final de esta, que ocurre cuando está desconectada de la carga, o bien con una carga muy pequeña.

Este efecto es debido a la capacitancia distribuida de la línea. El efecto Ferranti será más acentuado cuanto más larga sea la línea, y mayor el voltaje aplicado. La sobretensión es proporcional al cuadrado de la longitud de la línea.

4.1.1 EFECTO FERRANTI EN LÍNEA EDO A3U00

En el caso de dicho fenómeno presentado en la línea EDO A3U00 de 154 Km de longitud, se utilizó el software MATLAB para representar gráficamente el aumento de voltaje en comparación al nodo emisor con el nodo receptor mediante código.

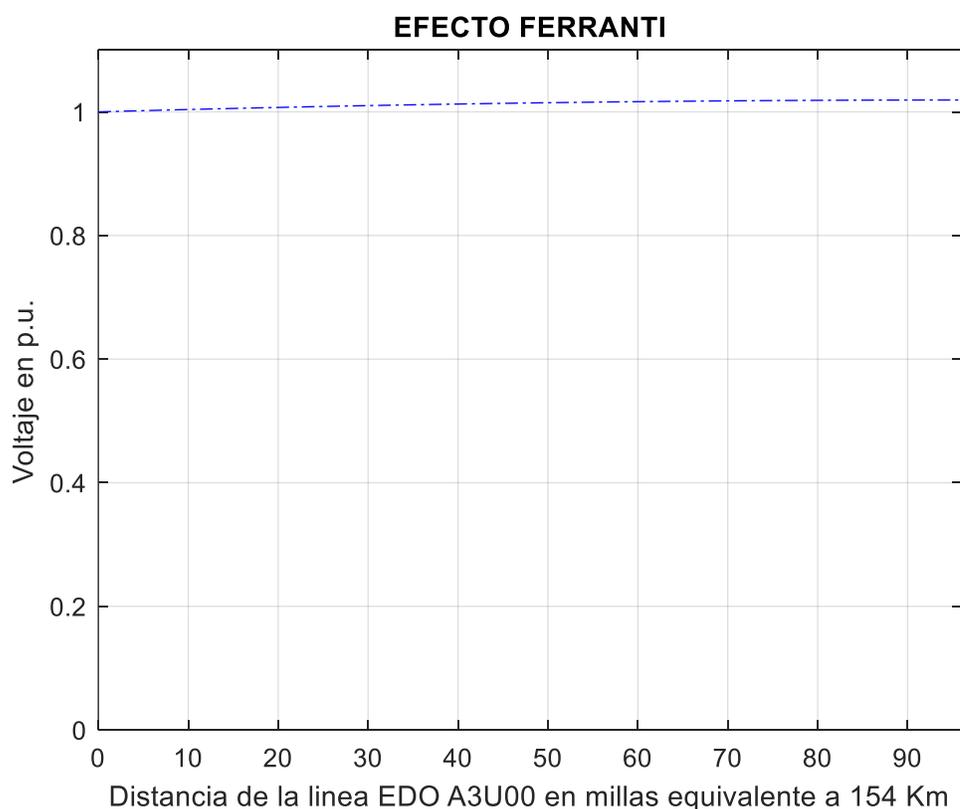


Figura 4.1.-Grafica de Efecto Ferranti en L.T. EDO A3U00 por medio de MATLAB.

Se obtienen los siguientes valores mediante MATLAB:

Tabla 4.1.-Voltaje en L.T. EDO A3U00.

Efecto Ferranti LT A3U00			
Nodo emisor		Nodo receptor	
400	Kv	407.98	Kv

$$V_{p.u.} = \frac{V_{barra}}{V_{base}}$$

$$V_{p.u.} = \frac{407.98 \text{ Kv}}{400 \text{ Kv}} = 1.01 \text{ p.u.}$$

La simulación en ATP nos reafirma los valores obtenidos en MATLAB con la comparación de sus nodos emisor y receptor obteniendo un aumento debido al efecto capacitivo de la línea de transmisión larga teniendo un voltaje de 400 Kv en el nodo emisor y un aumento de voltaje a 407 Kv en el nodo receptor.

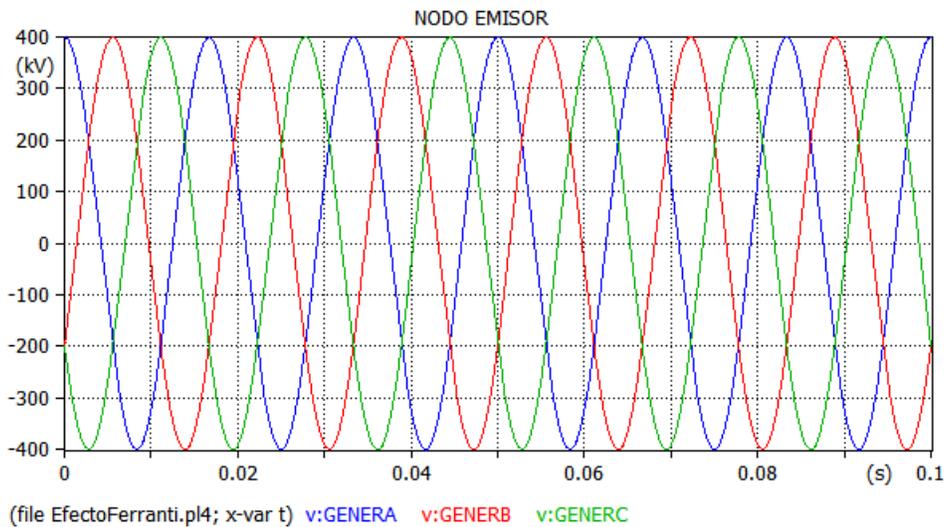


Figura 4.2.-Voltaje en el nodo emisor L.T. EDO A3U00 por medio de ATP.

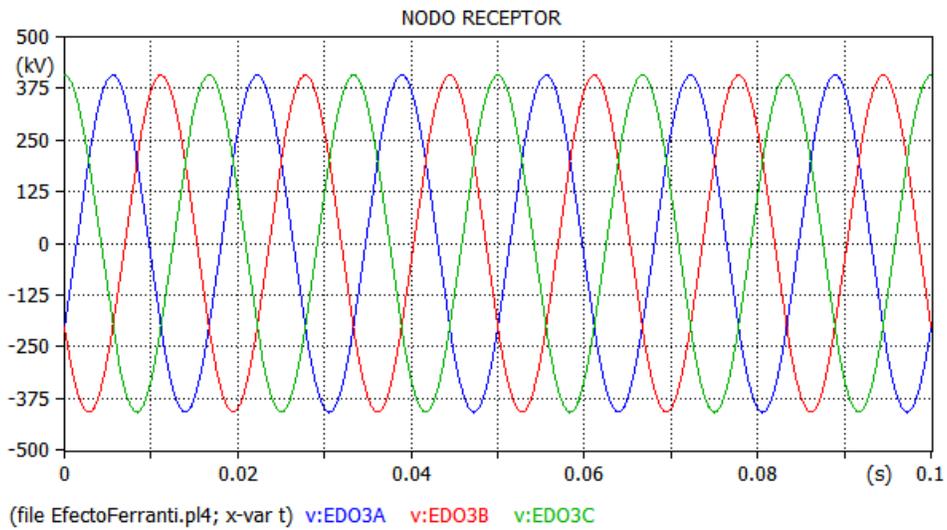


Figura 4.3.-Voltaje en el nodo receptor L.T. EDO A3U00 por medio de ATP.

Debido al aumento de voltaje en el nodo receptor, se utiliza como medio de compensación los reactores con los que cuenta la línea con capacidad de 25 MVAR trifásico logrando un decremento en el voltaje receptor con un valor de 403.36 Kv.

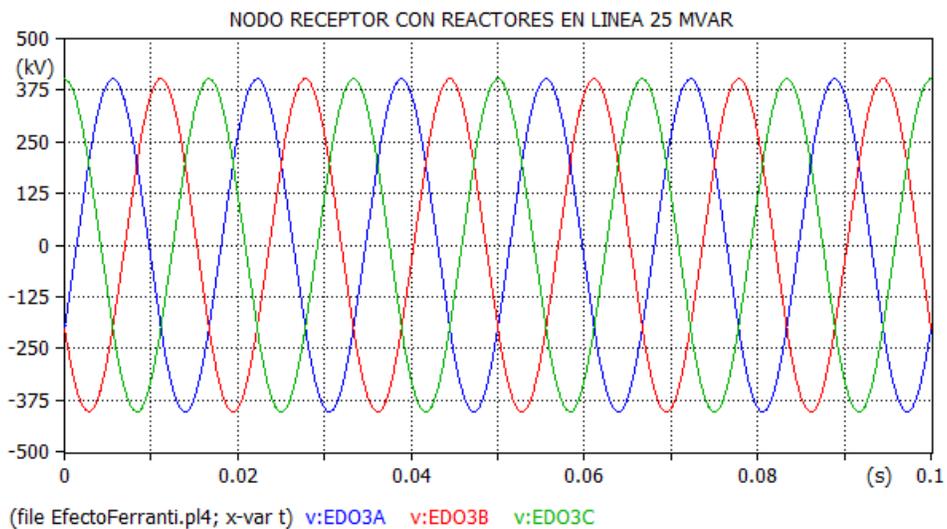


Figura 4.4.-Voltaje en el nodo receptor con reactores en la línea de 25 MVAR.

Otro medio y esquema de compensación es utilizar el reactor en barra al final de la línea dicho reactor se encuentra en la subestación y tiene una capacidad de 100 MVAR. Con el fin de mitigar el efecto Ferranti provocado debido a la longitud de dicha línea. Se obtiene un voltaje de 402.00 Kv

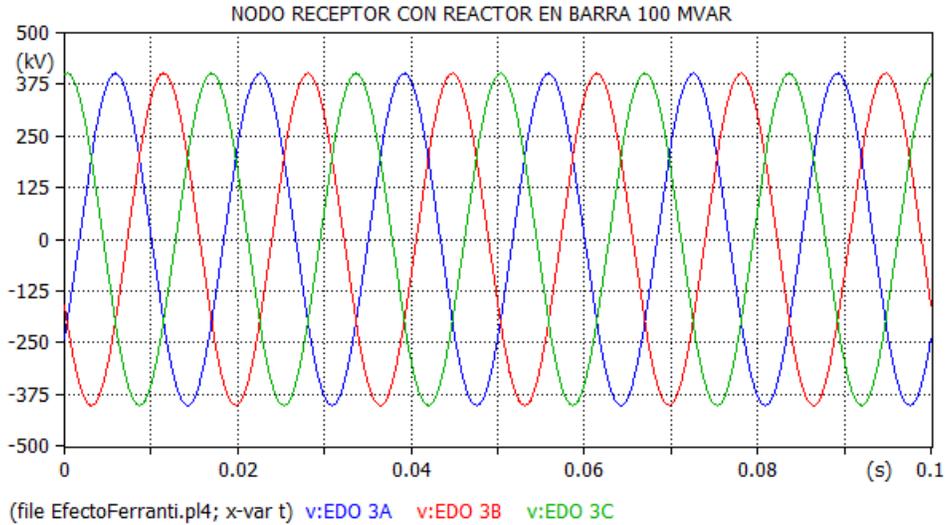


Figura 4.5.-Voltaje en el nodo receptor con reactor en barra de 100 MVAR.

En la tabla 4.2 se observan los diferentes valores obtenidos mediante la simulación antes y después de la compensación con reactores.

Tabla 4.2.-Voltajes obtenidos en L.T. EDO A3U00 mediante la simulación.

Efecto Ferranti LT A3U00	
Nodo emisor	Nodo receptor
400 Kv	407.98 Kv
Con Reactores en línea 25 MVAR (Nodo receptor)	
403.36 Kv	
Con Reactores en barra 100 MVAR (Nodo receptor)	
402.00 Kv	

4.1.2 EFECTO FERRANTI EN LÍNEA MMT A3140

Utilizamos el código anterior para representar el efecto Ferranti en la línea MMT A3140 con una longitud de 243 Km. En la siguiente imagen se puede apreciar gráficamente el aumento de voltaje en comparación al nodo emisor con el nodo receptor.

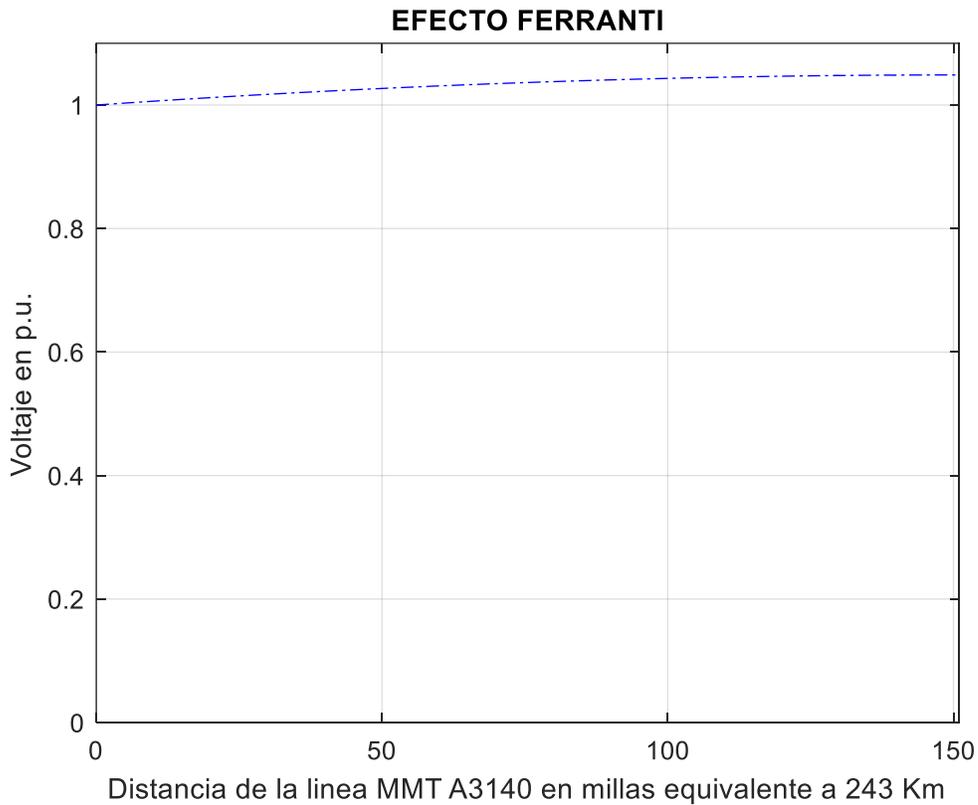


Figura 4.6.-Grafica del Efecto Ferranti en L.T. MMT A3140 por medio de MATLAB.

Se obtienen los siguientes valores mediante MATLAB:

Tabla 4.3.-Voltajes en LT MMT A3140.

Efecto Ferranti LT A3140	
Nodo emisor	Nodo receptor
400 Kv	420.34 Kv

$$V_{p.u.} = \frac{V_{barra}}{V_{base}} \quad (3.4)$$

$$V_{p.u.} = \frac{420.34 \text{ Kv}}{400 \text{ Kv}} = 1.05 \text{ p.u.}$$

Mediante los datos obtenidos por medio de MATLAB se procede a la simulación en ATP para verificar dichos valores del fenómeno, tanto como el valor en el nodo emisor y receptor. Los cuales tienen un valor de 400 Kv y 420.34 Kv. Un aumento del 5% del voltaje base del sistema, esto a causa de la longitud de la línea de transmisión.

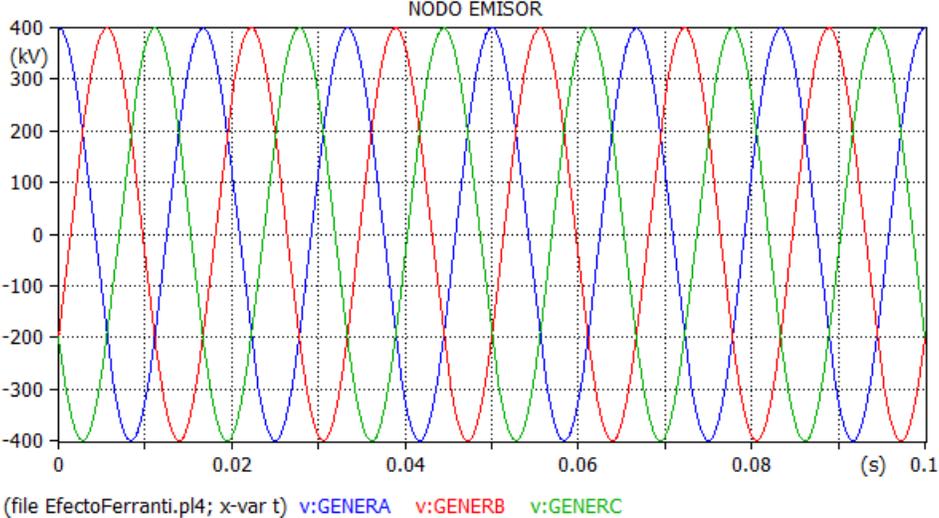


Figura 4.7.-Voltaje en el nodo emisor L.T. MMT A3140 por medio de ATP.

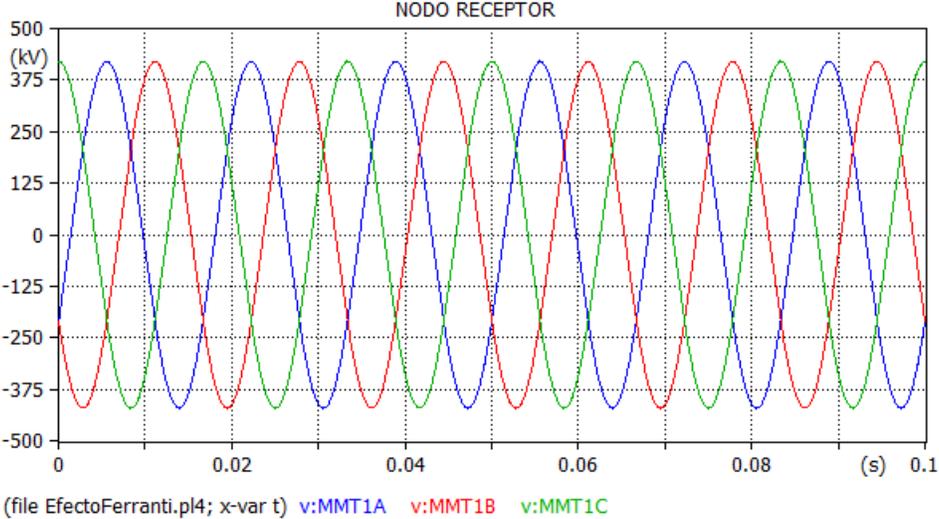


Figura 4.8.-Voltaje en el nodo receptor L.T. MMT A3140 por medio de ATP.

Para mitigar dicho efecto en la línea de transmisión se usan los reactores colocados a través de la línea de transmisión con una capacidad de 75 MVAR logrando obtener un voltaje de 412.36 Kv.

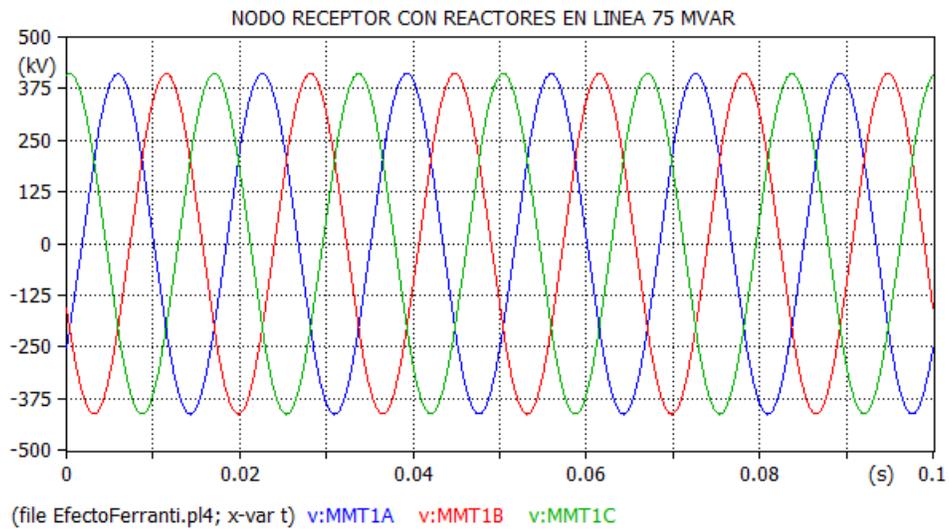


Figura 4.9.-Voltaje en el nodo receptor con reactores en la línea de 75 MVAR.

El nodo receptor también cuenta con un reactor en barra de 150 MVAR el cual logra disminuir considerablemente el voltaje mitigando el efecto ocasionado por dicha longitud de la línea de 243 Km.

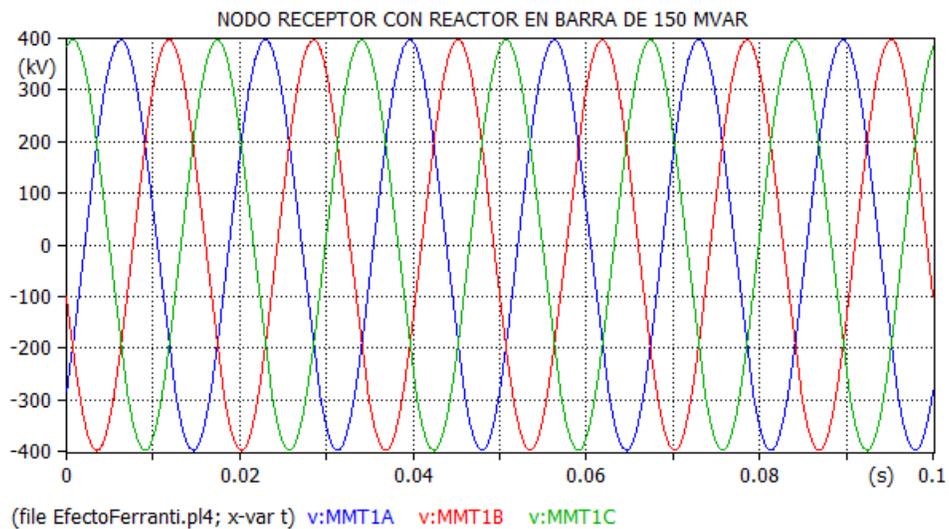


Figura 4.10.-Voltaje en el nodo receptor con reactor en barra de 150 MVAR.

En la tabla 4.4 se observan los diferentes valores obtenidos mediante la simulación antes y después de la compensación con reactores.

Tabla 4.4.-Voltajes obtenidos en L.T. MMT A3140 mediante la simulación.

Efecto Ferranti LT A3140	
Nodo emisor	Nodo receptor
400 Kv	420.34 Kv
Con Reactores en línea 75 MVAR (Nodo receptor)	
412.36 Kv	
Con Reactores en barra 150 MVAR (Nodo receptor)	
399.75 Kv	

4.2 FALLA MONOFÁSICA

Las fallas a tierra son una de las causas principales de sobretensiones temporales. Esta falla es la que produce normalmente las mayores sobretensiones. Una falla monofásica a tierra genera sobretensiones fase-tierra en las fases sanas, pero no origina sobretensiones entre fases o a través del aislamiento longitudinal.

La magnitud de las sobretensiones debidas a fallas a tierra depende del método de conexión a tierra del sistema (sólidamente a tierra, con resistencia a tierra, alta resistencia a tierra o sin conexión a tierra), las impedancias de secuencia equivalentes vistas desde la ubicación de la falla y la impedancia de la falla.

4.2.1 FALLA MONOFÁSICA EN LÍNEA TMT A3340

Mediante la simulación de una falla monofásica a tierra en la línea A3340 podremos observar las diferentes gráficas y los valores obtenidos con el uso de la compensación en los diferentes esquemas ya mencionados cuando ocurre dicha falla en un tiempo de 0.2 seg. Y despeje de 0.3 seg.

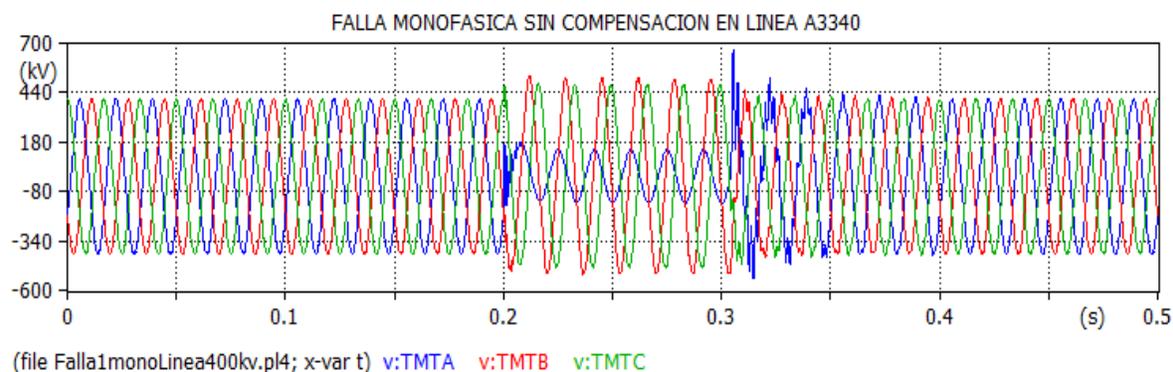


Figura 4.11.-Falla monofásica sin compensación en LT TMT A3340.

En la figura 4.11 se observa gráficamente la falla monofásica en la fase a y como afecta de igual manera a la fase b y c, aumentando el voltaje notablemente fuera de los límites establecidos. Dichos valores de voltaje en la línea A3340 son sin el uso de compensación por los diferentes esquemas de reactores, y de esta manera poder ver la falla en la línea.

Con el fin de disminuir la falla monofásica en la línea A3340 se hace el uso de los reactores en derivación conectados directamente al potencial de la línea, estos tienen una capacidad de 75 MVAR logrando disminuir el voltaje en las 3 fases del sistema. Con los reactores en uso se logra obtener un voltaje de 426.66 Kv en la fase A donde ocurre la falla que diferencia de la fig. anterior donde el voltaje sin compensación en la fase A fue de 659.35 Kv. Este disminuye considerablemente.

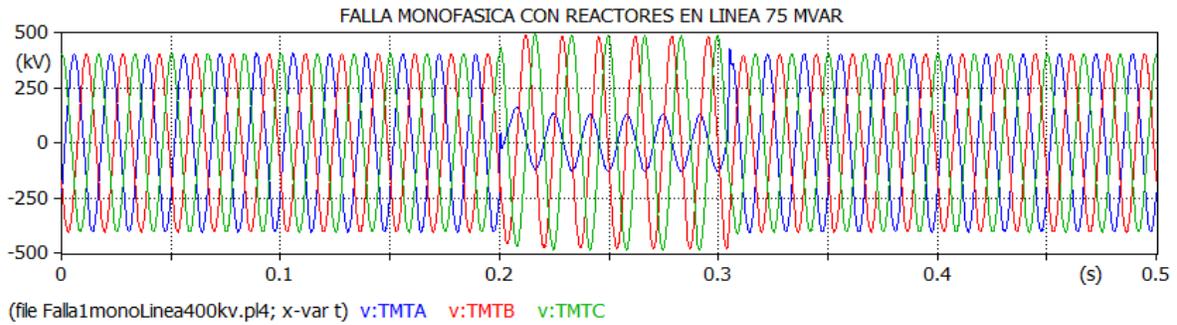


Figura 4.12.-Falla monofásica con reactores en línea de 75MVAR.

Al igual que en el caso anterior con el esquema de los reactores conectados en la línea, también se hace la misma simulación de la falla monofásica en la línea A3340 pero ahora con el reactor conectado directamente al bus del sistema, obteniendo de esta manera un voltaje en la fase A de 390.08 Kv y mejorando notablemente la señal senoidal después de que la falla es despejada. Este último punto también se logra con el uso de reactores en línea, ya que sin ellos colocados, nuestra señal senoidal después de despejada la falla no es aceptable ya que se distorsiona por dicha falla.

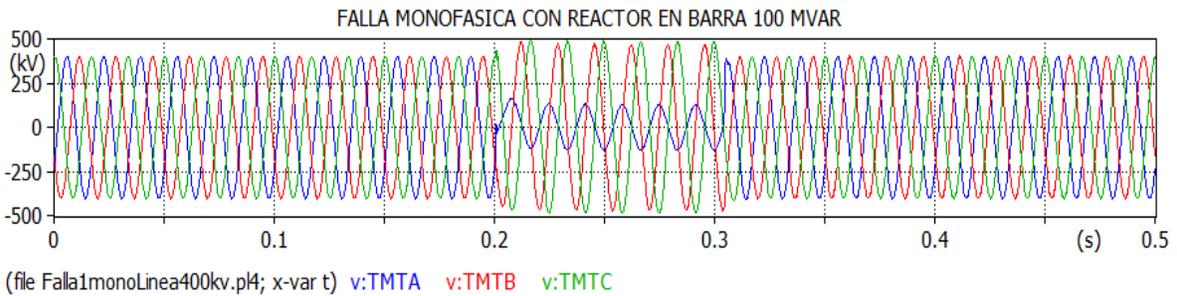


Figura 4.13.-Falla monofásica con reactor en barra de 100 MVAR.

En la tabla 4.5 se observan los diferentes valores obtenidos mediante la simulación antes y después de la compensación con reactores.

Tabla 4.5.-Voltajes obtenidos en LT TMT A3340 mediante la simulación.

Falla monofásica a tierra LT A3340
Sin Esquema de compensación
659.35 Kv
Con Esquema de Reactores en línea 75 MVAR
426.66 Kv
Con Esquema de Reactores en barra 100 MVAR
390.08 Kv

4.2.2 FALLA MONOFÁSICA EN LÍNEA MMT A3T90

Para el siguiente caso se tiene una falla monofásica a tierra en la línea A3T90. Se puede observar el fenómeno transitorio en la figura 4.14 la cual no tiene compensación con el fin de poder observar el transitorio en sus fases. En esta simulación se obtiene un sobrevoltaje de 690 Kv, muy por encima del rango permitido. Para poder amortiguar el sobrevoltaje obtenido en las figuras 49 y 50 se usan los esquemas de compensación de reactores conectados al potencial de la línea y el conectado en la barra.

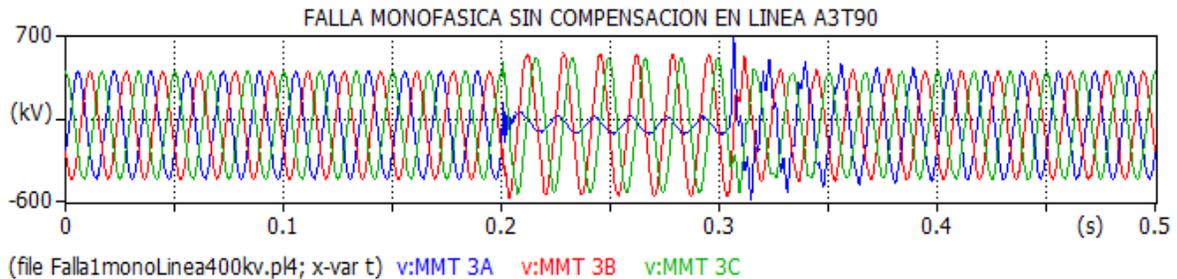


Figura 4.14.-Falla monofásica sin compensación en LT MMT A3T90.

Colocando los reactores de una capacidad de 100 MVAR al potencial de la línea durante la falla monofásica comenzando en 0.2 seg. Y terminando en 0.3 seg. se obtiene una disminución considerable del voltaje, logrando obtener un voltaje máximo de 394.46 Kv que, a diferencia de la simulación sin reactores, este voltaje aún se encuentra dentro del rango permitido. La onda senoidal regresa a ser estable al despejar la falla a comparación de la fig.4.14 donde la onda senoidal después de recuperarse de la falla se observa inestable.

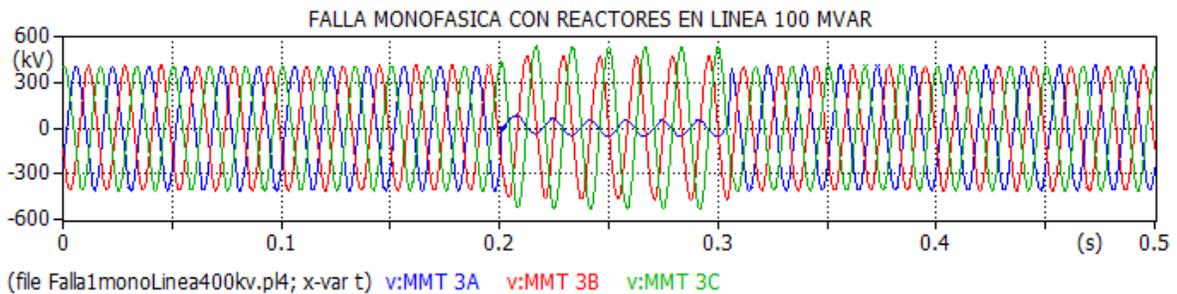


Figura 4.15.-Falla monofásica con reactores en línea de 100 MVAR.

Al igual que en el caso anterior con el esquema de los reactores conectados en la línea, se procede a la misma simulación de la falla monofásica en la línea AT390 pero ahora con el reactor conectado directamente a la barra del sistema, obteniendo de esta manera un voltaje de 352.67 Kv y mejorando notablemente la señal senoidal después de que la falla es despejada.

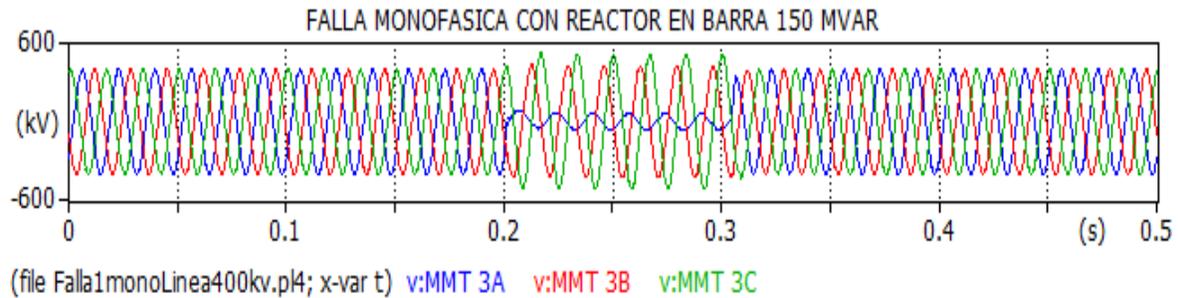


Figura 4.16.-Falla monofásica con reactor en barra 150 MVAR.

En la tabla 4.6 se observan los diferentes valores obtenidos mediante la simulación antes y después de la compensación con reactores.

Tabla 4.6.-Voltajes obtenidos en LT MMT A3T90 mediante la simulación.

Falla monofásica a tierra LT A3T90	
Sin Esquema de compensación	
	690.00 Kv
Con Esquema de Reactores en línea 100 MVAR	
	394.46 Kv
Con Esquema de Reactores en barra 150 MVAR	
	352.67 Kv

4.3 FALLA BIFÁSICA

Las fallas de línea a línea en un sistema eléctrico de transmisión ocurren cuando dos fases se cortocircuitan en un sistema trifásico. A este tipo de falla se considera como del tipo asimétrica provocando así un desequilibrio en las fases afectadas del sistema trifásico.

4.3.1 FALLA BIFÁSICA EN LÍNEA EDO A3U00

Para la simulación de una falla bifásica, se usa la línea A3U00 para poder desarrollar el fenómeno el cual comienza en un tiempo de 0.2 seg. y termina en 0.3 seg. Para fines prácticos de la simulación y poder observar su comportamiento se hace la simulación sin ningún tipo de compensación para de esta manera poder observar el sobrevoltaje que se presenta ante la falla en la línea de transmisión, la cual alcanza valores fuera de los parámetros establecidos. Logrando alcanzar un voltaje máximo de 647.03 Kv. Y una deformación considerable de la onda senoidal trifásica antes y después de la falla

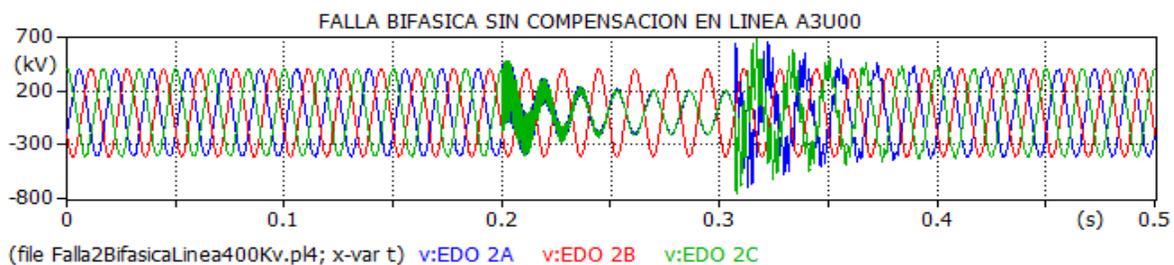


Figura 4.17.-Falla bifásica sin compensación en LT EDO A3U00.

Para disminuir el aumento de voltaje en la línea de transmisión debido a la falla bifásica, se colocan reactores eléctricos de potencia trifásicos con una capacidad de 25 MVAR en la línea de transmisión como modo de compensación con el fin de disminuir el voltaje y los riesgos que este mismo pueda ocasionar debido al aumento de tensión, obteniendo un valor de voltaje de 447.21 Kv. Después de la falla se logra recuperar el voltaje inmediatamente a valores aceptables dentro del rango $\pm 5\%$ y obteniendo una señal senoidal más pura y sin deformaciones debido a la falla.

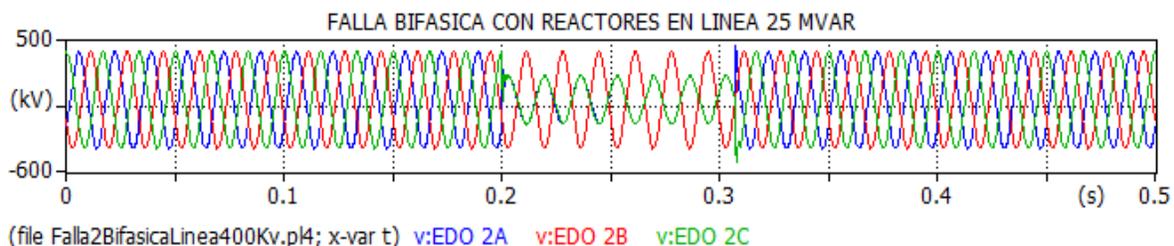


Figura 4.18.-Falla bifásica con reactores en línea de 25 MVAR.

Otra manera de poder disminuir el voltaje y como medio de compensación, es el reactor colocado en el bus del sistema de dicho nodo el cual tiene una capacidad de 100 MVAR. Cuando se hace el uso del reactor eléctrico de potencia se logran niveles aún más aceptables que a comparación de los reactores conectados en dicha línea, teniendo un voltaje de 410.88 Kv. Estando dentro del rango establecido al igual que se obtiene una mejora en la onda senoidal después de ocurrida la falla, logrando restablecer el sistema de una manera más confiable y segura.

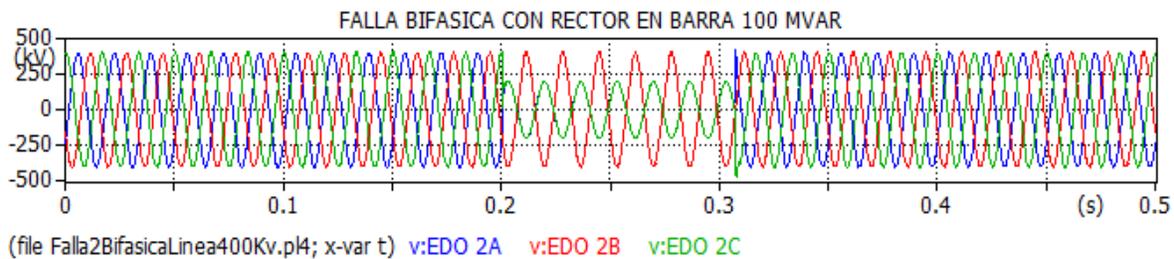


Figura 4.19.-Falla bifásica con reactor en barra de 100 MVAR.

En la tabla 4.7 se observan los diferentes valores obtenidos mediante la simulación antes y después de la compensación con reactores.

Tabla 4.7.-Voltajes obtenidos en LT EDO A3U00 mediante la simulación.

Falla bifásica a tierra LT A3U00	
Sin Esquema de compensación	
	647.03 Kv
Con Esquema de Reactores en línea 25 MVAR	
	447.21 Kv
Con Esquema de Reactores en barra 100 MVAR	
	410.88 Kv

4.4.2 FALLA BIFÁSICA EN LÍNEA MMT A3040

La segunda simulación de una falla bifásica ocurre en la línea A3040 los tiempos de la falla son los mismos a la anterior simulación, con fines prácticos de poder observar el fenómeno de sobrevoltaje cuando la falla comienza en 0.2 seg. Y termina en 0.3 seg. Sin ninguna compensación al sistema eléctrico de potencia. Logrando así de esta manera observar el fenómeno de sobretensión que presenta la línea ante dicha falla el cual logra tener un voltaje de 582.77 Kv y una deformación de la onda senoidal cuando ocurre la falla y al término de la falla la cual le toma varios segundos antes de regresar a su forma original no deformada. Provocando así un aumento de tensión considerable que podría dañar equipos en la subestación, líneas de transmisión, transformadores, interruptores, etc.

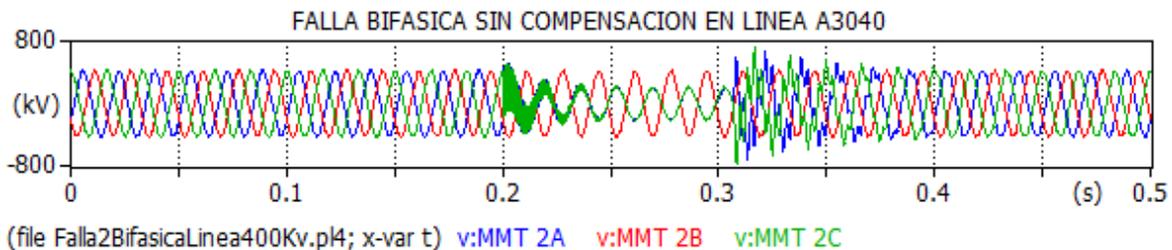


Figura 4.20.-Falla bifásica sin compensación en LT MMT A3040.

Con el fin de evitar correr riesgos que puedan causar interrupciones más prolongadas del servicio, se hace el uso de los reactores eléctricos de potencia con los que cuenta el sistema con el fin de disminuir los tiempos de interrupción y el fenómeno de sobrevoltaje, al usar los reactores conectados al potencial de la línea tenemos un voltaje mayormente aceptable que sin compensación con un valor de 391.17 Kv. No excediendo así el rango de operación establecido debido a la capacidad de los reactores de 100 MVAR. Una vez terminada la falla se obtiene una mejor onda senoidal sin deformaciones y el servicio puede ser restablecido en un menor tiempo, protegiendo así tanto los equipos del sistema como el usuario final del servicio.

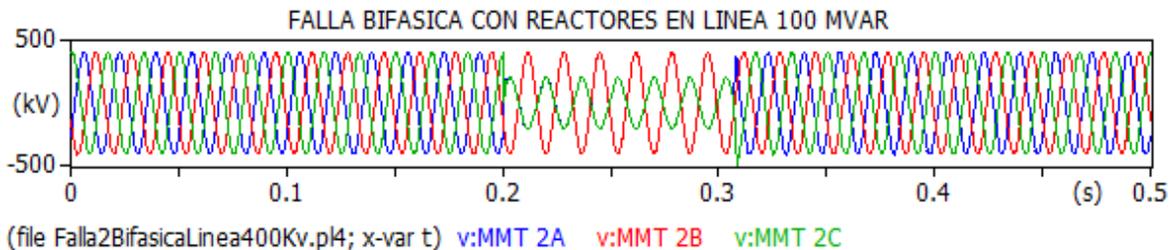


Figura 4.21.-Falla bifásica con reactores en línea de 100 MVAR.

La siguiente opción de compensación es el uso del reactor en barra con una capacidad de 150 MVAR colocado en el bus del sistema. Con este esquema de compensación se logra disminuir el fenómeno de sobretensión, pero se obtiene un valor muy por debajo del rango de operación de 325.71 Kv. el cual se recupera rápidamente obteniendo los niveles aceptables y una onda senoidal pura después de terminada la falla bifásica.

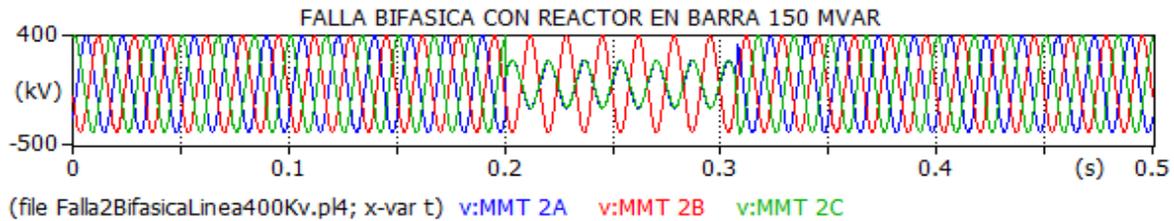


Figura 4.22.-Falla bifásica con reactor en barra de 150 MVAR.

En la tabla 4.8 se observan los diferentes valores obtenidos mediante la simulación antes y después de la compensación con reactores.

Tabla 4.8.-Voltajes obtenidos en LT MMT A3040 mediante la simulación.

Falla bifásica a tierra LT A3040	
Sin Esquema de compensación	
	578.77 Kv
Con Esquema de Reactores en línea 100 MVAR	
	391.17 Kv
Con Esquema de Reactores en barra 150 MVAR	
	325.71 Kv

4.4 SOBRETENSIÓN POR MANIOBRA

Las sobretensiones de maniobra son aquellas que pueden aparecer entre fases o entre fase a tierra y el cambio de configuración de la red o maniobra que las origina, puede en realidad deberse a causas diversas, tales como maniobras de conexión o desconexión de circuitos y aparatos, aparición de fallas o cortocircuitos, variaciones bruscas de carga, etc. Los parámetros que determinan o influyen sobre la naturaleza de un proceso transitorio que da lugar a la aparición de sobretensiones de maniobra, son numerosos y sus relaciones muy complejas, pero pueden distinguirse dos clases de parámetros:

- Los que caracterizan el circuito y sus componentes antes y después de la maniobra (cambio de configuración).
- Los que identifican el tipo, la forma y momento de la ejecución de la maniobra (características del interruptor, cortocircuito, etc., que ocasiono el cambio de configuración).

4.4.1 ENERGIZACIÓN DE LÍNEA TMT A3340 EN VACÍO

Simulando la energización de la línea de transmisión en vacío, originando un aumento de tensión en la línea A3340, al conectar dicha línea por medio de un interruptor con un tiempo de inicio de 0.2 seg. Sin compensación. Podemos observar el comportamiento de la señal, así como el aumento notable de tensión. Logrando valores de tensión en la fase A, B, y C de 583.57 Kv, 594.10 Kv, y 783.52 Kv. Para calcular su voltaje por unidad se utiliza el Factor por sobretensión.

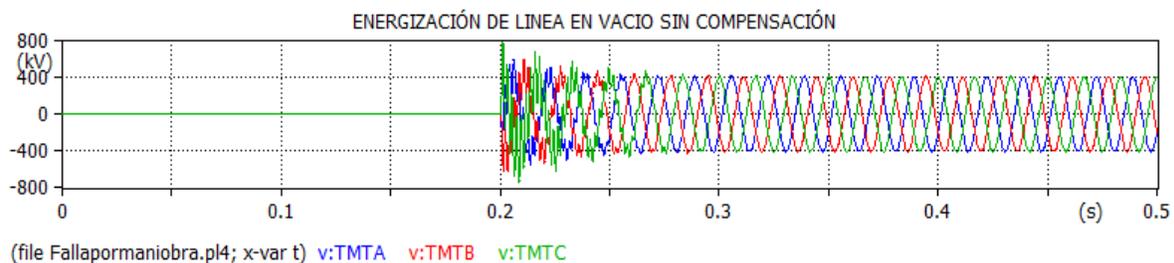


Figura 4.23.-Energización de línea en vacío sin compensación en LT TMT A3340.

Para una tensión nominal de 400 Kv en nuestro sistema, se conoce que su tensión máxima es de 420 Kv. El valor base para su cálculo en sistema por unidad es:

$$\text{Factor de Sobretension en p. u.} = \frac{\sqrt{2} * Vm}{\sqrt{3}} \quad (3.5)$$

Por lo tanto, el valor base será de:

$$\text{Valor base de Sobretension en p. u.} = \frac{\sqrt{2} * 420 \text{ Kv}}{\sqrt{3}} = 343 \text{ Kv}$$

Calculando con el valor máximo de sobretensión obtenido tendríamos un valor por unidad de:

$$V \text{ p. u.} = \frac{783.52 \text{ Kv}}{343 \text{ Kv}} = 2.2 \text{ p. u.}$$

Con el fin de disminuir el sobrevoltaje provocado por el cierre de interruptores para energizar la línea se usan los reactores conectados en la línea para su compensación reactiva teniendo una capacidad de 75 MVAR. Por medio de la simulación podemos obtener la señal del sistema, mostrando así que las sobretensiones obtenidas son menores a comparación de la simulación sin compensación. Obteniendo un valor máximo de voltaje por unidad de 1.59 p.u.

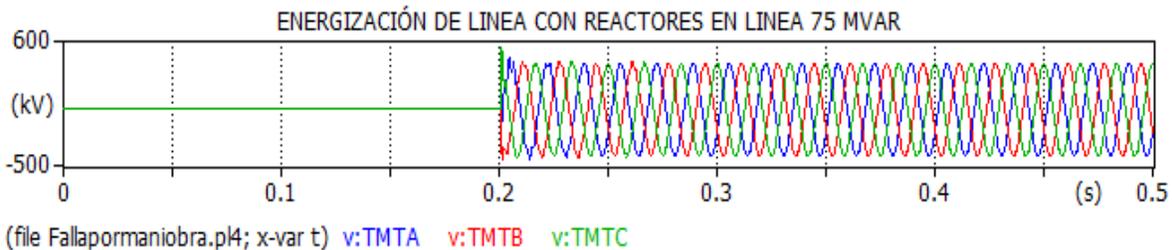


Figura 4.24.-Energización de línea con reactores en línea de 75 MVAR.

En el caso del uso de la compensación por medio del reactor conectado en el bus se logra disminuir la sobretensión provocada por la maniobra de energización de la línea de transmisión, con un reactor en barra de capacidad de 100 MVAR obtenemos un valor máximo de voltaje por unidad de 1.35 p.u. logrando así una mejor disminución de la sobretensión, además de que el sistema tiene una rápida recuperación al estado estable al ser comparada con la energización sin compensación reactiva, ya que esta tiene una componente de alta frecuencia de la tensión, logrando deformar la señal .

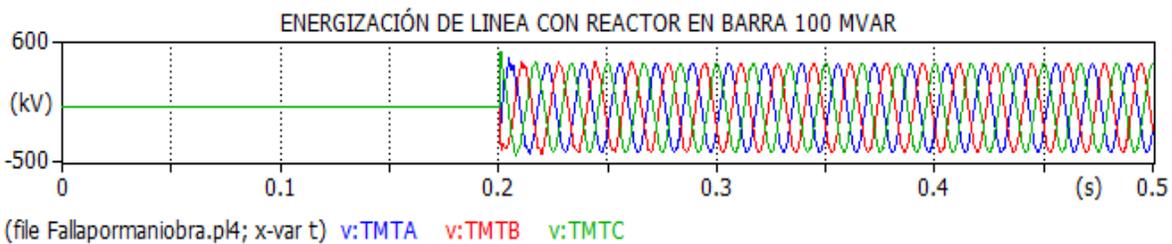


Figura 4.25.-Energización de línea con reactor en barra de 100 MVAR.

En la tabla 4.9 se observan los diferentes valores obtenidos mediante la simulación antes y después de la compensación con reactores en la energización de la línea en vacío.

Tabla 4.9.-Voltajes obtenidos en LT TMT A3340 mediante la simulación.

Energización de línea en vacío LT A3340
Sin Esquema de compensación
783.52 Kv
Con Esquema de Reactores en línea 75 MVAR
546 Kv
Con Esquema de Reactores en barra 100 MVAR
463.72 Kv

4.4.2 ENERGIZACIÓN DE LÍNEA EDO A3T70 EN VACÍO

La línea de transmisión A3T70 es energizada en vacío en un tiempo de 0.2 seg. Para fines prácticos de la simulación, logrando así un aumento de tensión por el cierre de los interruptores, dicha maniobra es sin el uso de compensación reactiva lo cual nos permite observar el comportamiento del sistema. Los voltajes obtenidos al momento de la energización en las fases A, B, y C son los siguientes respectivamente 590.19 Kv, 598.91, y 785.57 Kv. El cierre de los interruptores provoca una componente de alta frecuencia que deforma nuestra señal, y desestabiliza el sistema.

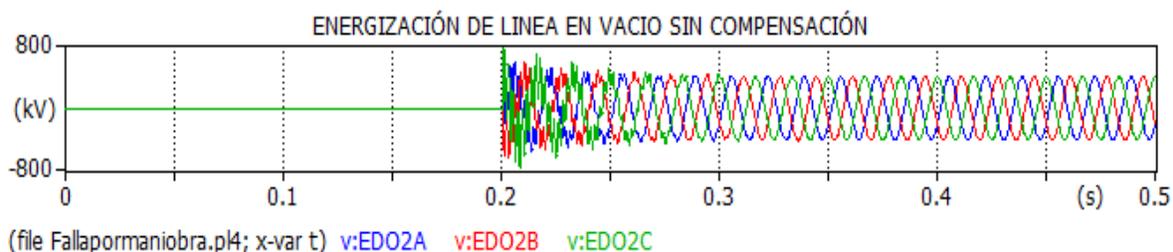


Figura 4.26.-Energización de línea en vacío sin compensación en LT EDO A3T70.

Al igual que en los casos anteriores se busca hacer una comparación del uso derivado de la compensación reactiva por medio de los reactores que son conectados directamente a la línea o los que se encuentran en la subestación.

Se realiza la simulación con los reactores conectados a través de la línea de transmisión de capacidad de 25 MVAR, disminuyendo así la sobretensión provocada por la energización de la línea en vacío y estabilizar el sistema en cuestión de segundos para así tener un estado de operación en óptimas condiciones para el usuario final. El valor máximo de sobretensión con la compensación en la línea es de 1.61 p.u.

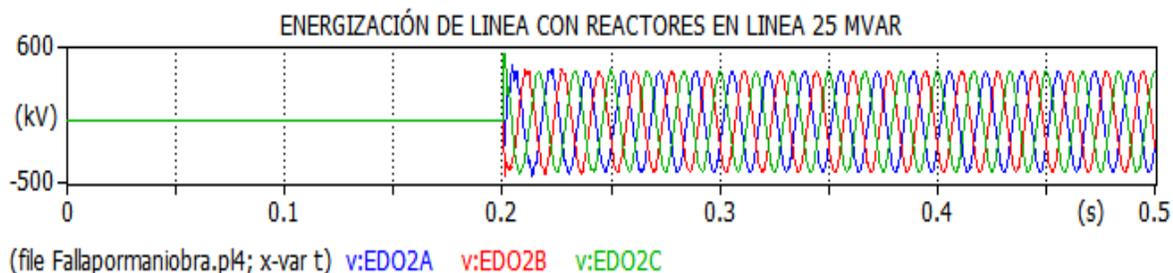


Figura 4.27.-Energización de línea con reactores en línea de 25 MVAR.

Usando el reactor conectado en la subestación con capacidad de 100 MVAR se obtienen mejores condiciones de operación ya que en cuestión de milisegundos se logra una óptima operación del sistema, disminuyendo así el sobrevoltaje ocasionado por el cierre de los interruptores, logrando obtener un valor máximo de voltaje en por unidad de 1.4 p.u. siendo este el valor más bajo a comparación del uso de reactores en la línea de transmisión.

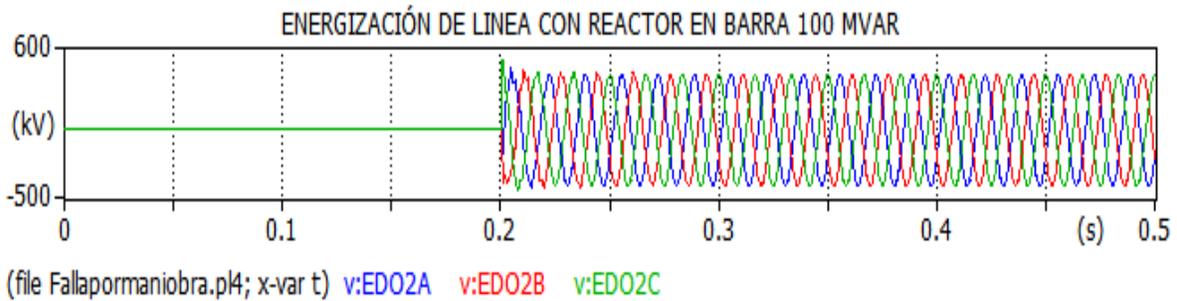


Figura 4.28.-Energización de línea con reactor en barra de 100 MVAR.

En la tabla 4.10 se observan los diferentes valores obtenidos mediante la simulación antes y después de la compensación con reactores en la energización de la línea en vacío.

Tabla 4.10.-Voltajes obtenidos en LT EDO A3T70 mediante la simulación.

Energización de línea en vacío LT A3T70	
Sin Esquema de compensación	
	785.57 Kv
Con Esquema de Reactores en línea 75 MVAR	
	552.66 Kv
Con Esquema de Reactores en barra 100 MVAR	
	503.54 Kv

CAPITULO 5: ANALISIS Y DETERMINACIÓN DE REACTOR IDEAL

5.1 EFECTO FERRANTI EN L.T. EDO A3U00

Mediante la simulación del efecto Ferranti en la línea EDO A3U00 que consta de 154 kilómetros de longitud pudimos observar las diferentes situaciones de escenarios ya que se hicieron 3 tipos de simulaciones, la primera fue la demostración del efecto Ferranti sin el uso de compensación de los reactores demostrando el aumento de voltaje, como segunda simulación se hizo uso de los reactores conectados directamente al potencial de la línea en la cual se pudo observar una ligera disminución del voltaje en comparación de la simulación sin uso de reactores por último se utilizó el reactor conectado en el bus del nodo receptor el cual consiguió los valores adecuados dentro del rango permitido de variaciones de voltaje logrando así ser el más conveniente ante el efecto Ferranti.

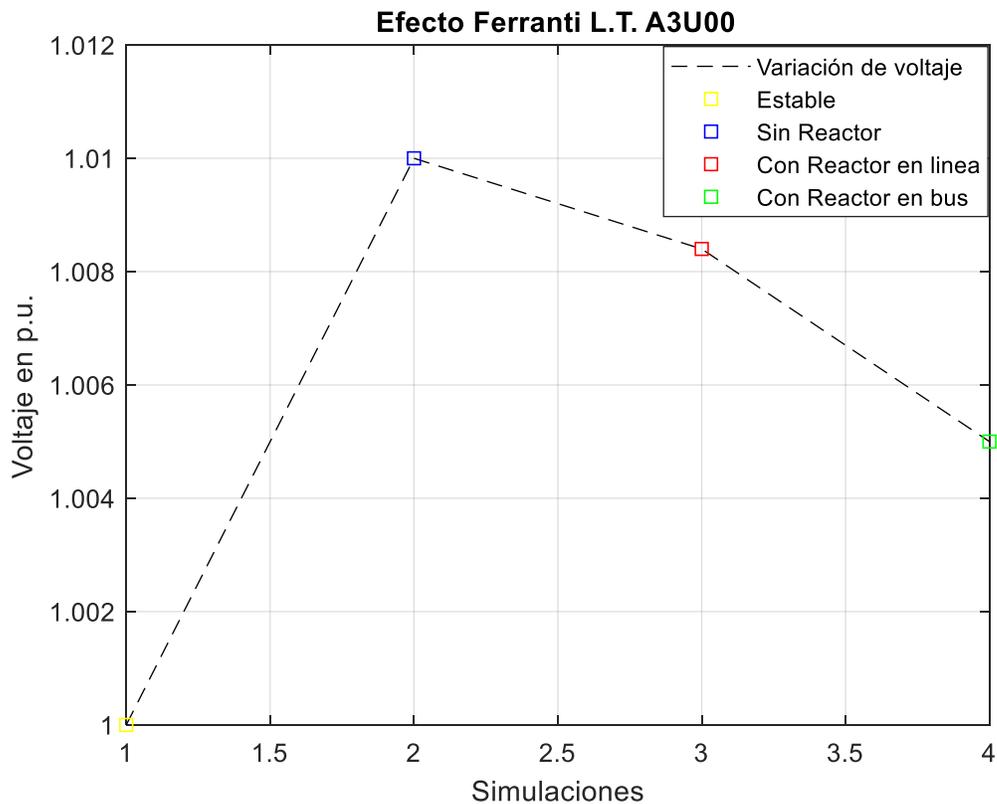


Figura 5.1.-Simulaciones del Efecto Ferranti en LT EDO A3U00.

5.2 EFECTO FERRANTI EN L.T. MMT A3140

A diferencia del ejemplo anterior en la línea A3U00 la línea MMT A3140 cuenta con 254 kilómetros de distancia siendo esta una longitud más considerable para el efecto Ferranti. Por ello en la primera simulación sin el uso de reactores se nota un aumento considerable del voltaje en el nodo receptor, en la siguiente simulación se utilizó el reactor conectado al potencial de la línea llegando así a una disminución del 2% del voltaje aumentado a causa del efecto capacitivo de la línea, y por último la conexión del reactor conectado en el bus logrando un voltaje casi ideal, y siendo este el más efectivo para mitigar los efectos causados por la capacitancia de la línea de transmisión.

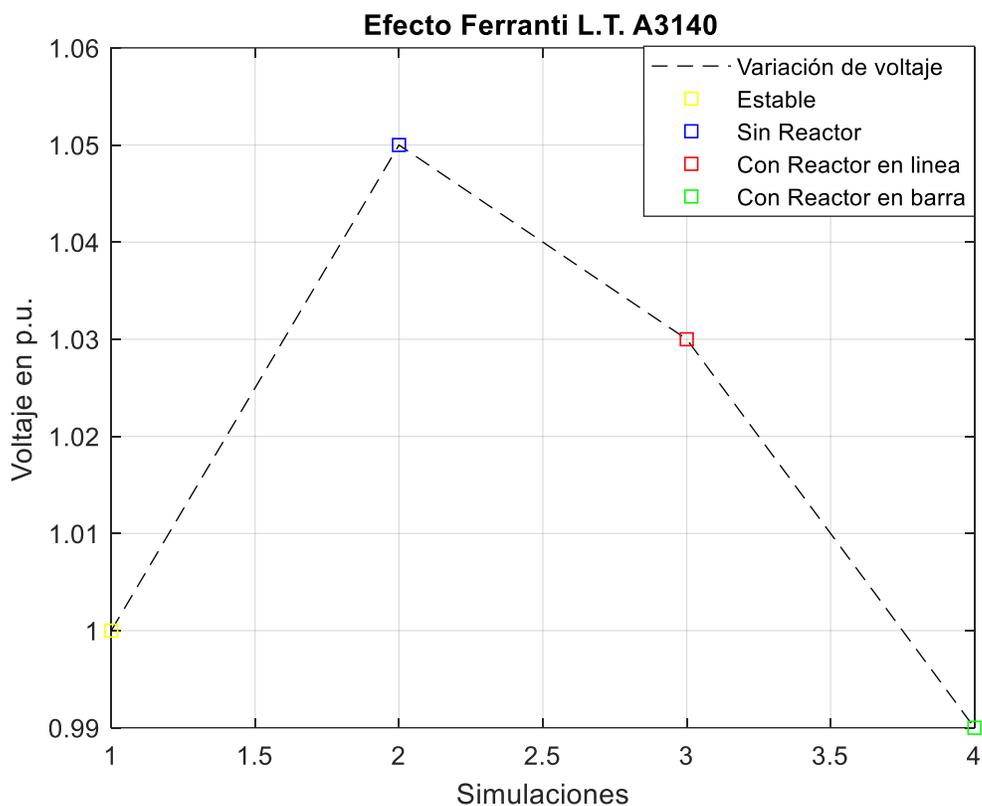


Figura 5.2.-Simulaciones del Efecto Ferranti en LT MMT A3140.

Conclusión

En conclusión, de los valores obtenidos por medio de las simulaciones, se puede observar que el uso de reactores eléctricos de potencia puede lograr la mitigación del efecto Ferranti que se origina debido a la capacitancia y longitud de la línea. Así como también nos podemos percatar que para nuestros casos de simulación se usaron las líneas más largas del sistema y al usar los dos tipos de esquemas de compensación pudimos obtener un mejor resultado al usar el reactor conectado a la barra de nuestro nodo receptor, obteniendo así valores más adecuados al sistema.

5.3 FALLA MONOFÁSICA EN L.T. TMT A3340

Para la falla monofásica igualmente se grafica sus diferentes escenarios para ver el comportamiento del voltaje ante una falla monofásica a mitad de la línea de transmisión, como se puede observar en la siguiente figura se muestra la variación de voltaje con respecto a las diferentes simulaciones, como principal se muestra el valor en estado estable del sistema, seguido del escenario de la falla monofásica sin compensación el cual aumenta a un voltaje de 1.64 p.u. totalmente fuera del rango de operación, para mitigar el aumento de voltaje usamos como método de compensación los reactores eléctricos conectados al potencial de la línea de transmisión, logrando la disminución del aumento de voltaje al momento de la falla. Por último, se simula la falla con el reactor conectado al bus obteniendo valores aceptables dentro del rango del sistema, teniendo en cuenta que los dos esquemas de reactores fueron eficientes al momento de la falla teniendo variaciones dentro del rango permitido $\pm 5\%$.

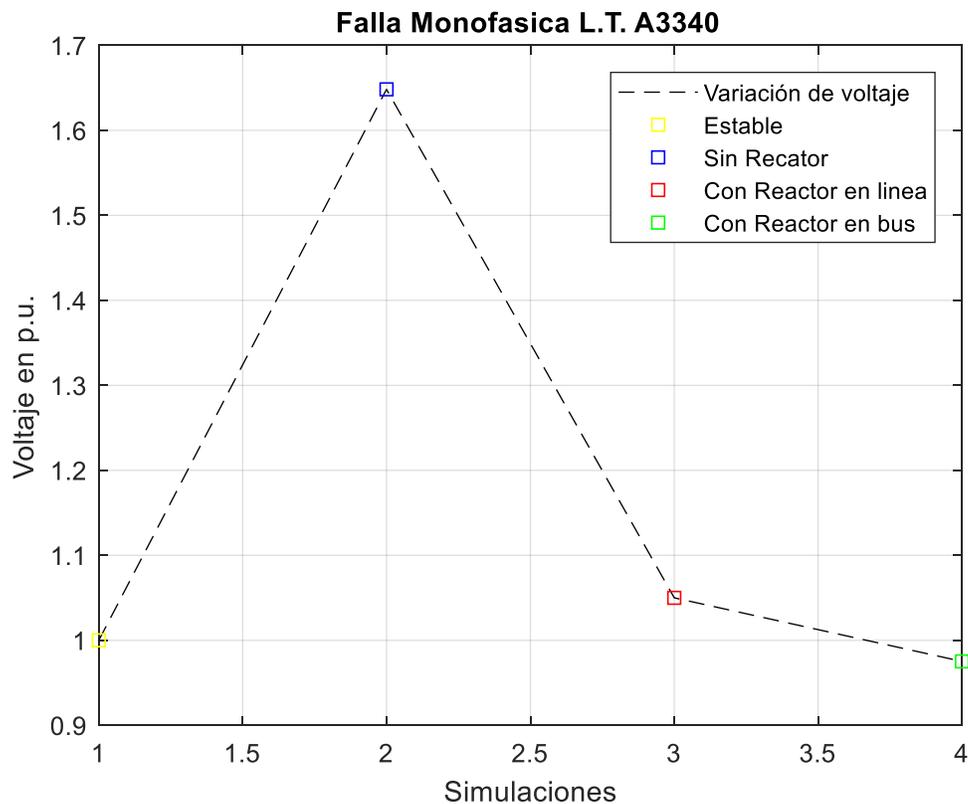


Figura 5.3.-Simulaciones de Falla monofásica en LT TMT A3340.

5.4 FALLA MONOFASICA EN L.T. MMT A3T90

La siguiente simulación de falla monofásica ocurre en la línea de transmisión A3T90 al igual que en las anteriores simulaciones se simulan los siguientes escenarios: Primero el sistema en estado estable, después la simulación sin los reactores eléctricos, la cual consigue valores muy superiores de los rangos de operación permitidos en el sistema eléctrico de potencia. La tercera simulación nos permite observar el voltaje de la falla con los reactores en derivación conectados a través de la línea de transmisión logrando un voltaje aceptable que este dentro del rango permitido. El escenario con el uso del reactor conectado en el bus del sistema rebasa los límites de los rangos de operación debido a la capacidad de este. Siendo mejor opción el reactor conectado en la línea ante este escenario

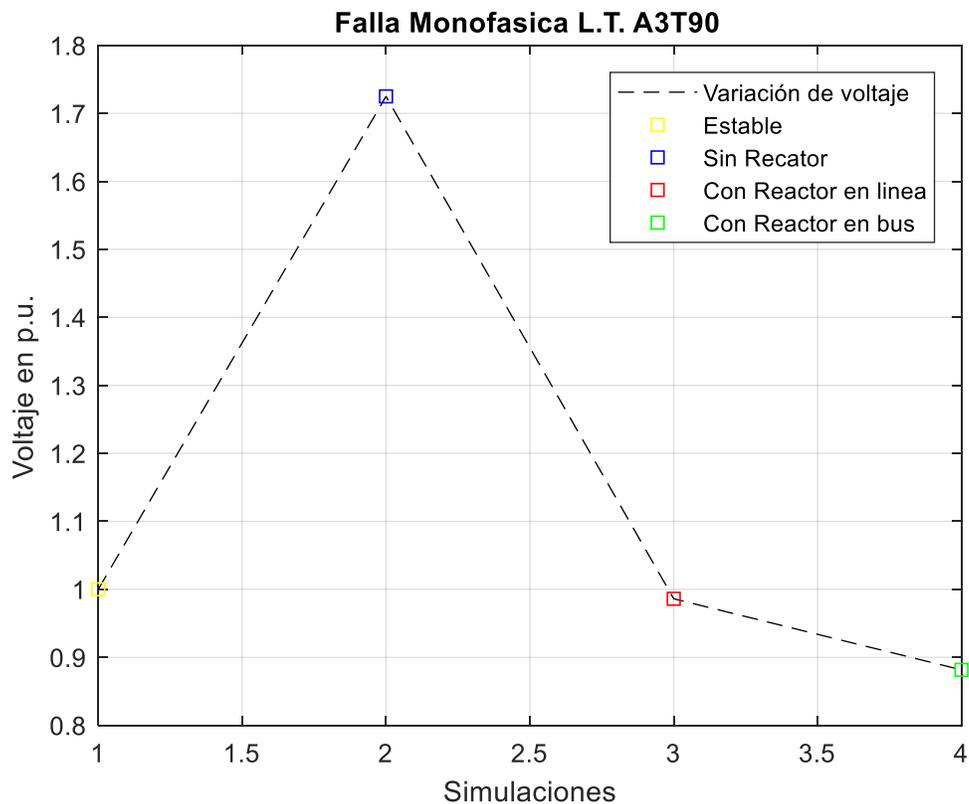


Figura 5.4.-Simulaciones de Falla monofásica en LT MMT A3T90.

Conclusión

A través de los dos casos de falla monofásica a tierra en la línea A3340 y AT390 sin el uso de compensación se obtiene un sobrevoltaje considerable en el sistema el cual puede provocar daños de los equipos, así como también un desbalance en el sistema, con el fin de lograr un perfil de voltaje más adecuado al sistema se usó los dos esquemas de compensación con los que cuenta la línea, logrando obtener un mejor valor de perfil del voltaje.

Para el caso en la línea A3340 con el uso de los reactores conectados a la línea se logró obtener un voltaje en p.u. de 1.05 y con el reactor en barra un valor de voltaje de 0.97 p.u. teniendo con ambos un valor aceptable dentro de los límites $\pm 5\%$ logrando con ambos esquemas el objetivo de disminuir el voltaje ante dicha falla. Para el caso de la línea A3T90 se logró obtener un voltaje con reactores en línea de 0.98 p.u. y para el reactor conectado en la barra un valor de 0.88 p.u. logrando un valor aceptable solo con los reactores conectados en línea ya que solo este se encuentra dentro de $\pm 5\%$.

5.5 FALLA BIFÁSICA EN L.T. EDO A3U00

El siguiente escenario es una falla bifásica que ocurre en la línea de transmisión A3U00 que al igual que en los casos anteriores se grafican los diferentes tipos de escenarios ocurridos en el sistema con sus diferentes variables, en primer lugar observamos el comportamiento del voltaje en estado estable, en la siguiente simulación se puede observar el aumento de voltaje provocado por la falla bifásica sin la compensación reactiva de los reactores, en el tercer caso se observa la mitigación del aumento de voltaje provocado por la falla con la compensación reactiva de los reactores conectados a través del potencial de la línea de transmisión pero sin llegar a los valores óptimos permitidos pero logrando mitigar los sobrevoltajes y una recuperación más rápida del sistema eléctrico, y por último el escenario con la compensación de reactores conectados en el bus del sistema logra valores aceptables dentro del rango permitido de operación.

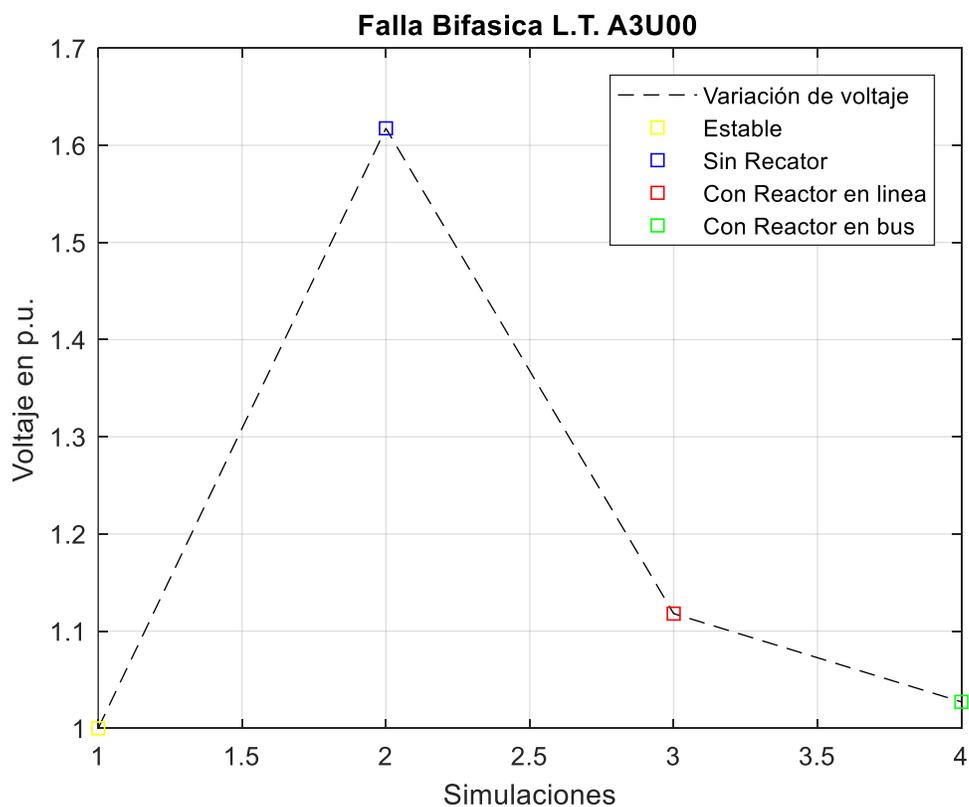


Figura 5.5.-Simulaciones de Falla bifásica en LT EDO A3U00.

5.6 FALLA BIFASICA EN L.T. MMT A3040

En la siguiente figura se observa la variación del voltaje obtenido respecto a los diferentes escenarios, en primer lugar, se puede observar el voltaje en el sistema en estado estable para diferenciar el voltaje respecto a los siguientes escenarios: en el siguiente escenario se muestra el aumento de voltaje obtenido cuando sucede la falla bifásica sin ningún esquema de compensación rebasando así los límites de operación durante y después de la falla. Tratando de disipar la falla y recuperar el sistema lo más pronto se utilizan los esquemas de compensación como se muestra en la figura utilizando la compensación de reactores en derivación, logrando obtener un voltaje aceptable y además una recuperación pronta del sistema. Por último, se utiliza el reactor conectado en el bus del sistema en el cual logramos disminuir el voltaje, pero a diferencia del reactor en línea disminuye el voltaje fuera de los rangos de operación durante la falla. De esta manera se concluye que el reactor en línea es más eficiente ante este tipo de escenario.

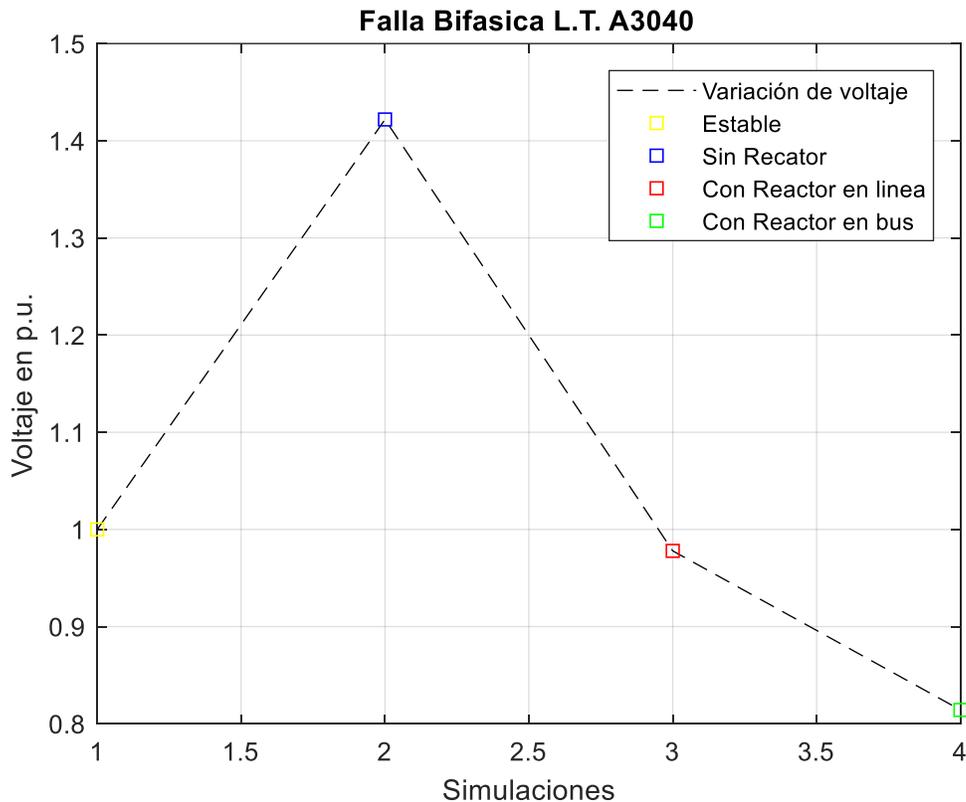


Figura 5.6.-Simulaciones de Falla bifásica en LT MMT A3040.

Conclusión

Para los casos de fallas bifásicas simulados en las líneas A3U00 y A3040 en ambos casos se observó la manera en que el fenómeno sobre transitorio afectaba el sistema sin el uso de los esquemas de compensación provocando así un aumento considerable de voltaje y una deformación de la onda senoidal el cual como ya se comentó anteriormente, puede deducirse en tiempos de interrupción más prolongados al sistema y daños a los equipos que componen dicho sistema.

En los dos casos se hizo el uso de la compensación para disminuir la sobretensión sin embargo fueron diferentes resultados debido a características propias de la línea, por ejemplo, en el caso de la línea A3U00 se obtuvo un mejor perfil de voltaje con el uso del reactor conectado en el bus del sistema con un voltaje en p.u. de 1.02 que entra dentro de los parámetros del rango de operación del sistema +/- 5%. Resultando mejor opción ante una falla de este tipo. En cambio, para la línea A3040 se determinó que los reactores eléctricos de potencia conectados al potencial de la línea obtuvieron mejor perfil de voltaje a comparación del que está conectado al bus del sistema, ya que la longitud de esta línea es muy larga con 243 Km. Se logro obtener un perfil de voltaje de 0.97 p.u.

5.7 SOBRETENSIÓN POR MANIOBRA EN L.T. TMT A3340

En este escenario se energiza la línea de transmisión en vacío con el fin de obtener los resultados con las diferentes condiciones del sistema, en el primer caso se observa el voltaje en estado estable. Después de ello se observa el notable aumento de voltaje debido a la energización de la línea en vacío sin compensación logrando así una desestabilización del sistema. Tratando de obtener una estabilidad en el sistema y un decremento en el voltaje al momento de la energización se usan los reactores conectados en la línea de transmisión que tienen una capacidad de 75 Mvar los cuales sirven como compensación para disminuir el voltaje al momento de la energización y lograr una recuperación más rápida en el sistema, en el último caso se utiliza el reactor conectado en el bus del sistema el cual logra disminuir aún más el nivel de tensión al momento de la energización de la línea de transmisión y de esta manera ser el más efectivo ante esta maniobra ya que no solo disminuye el voltaje si no que ayuda a la estabilización del sistema y la señal en menos tiempo.

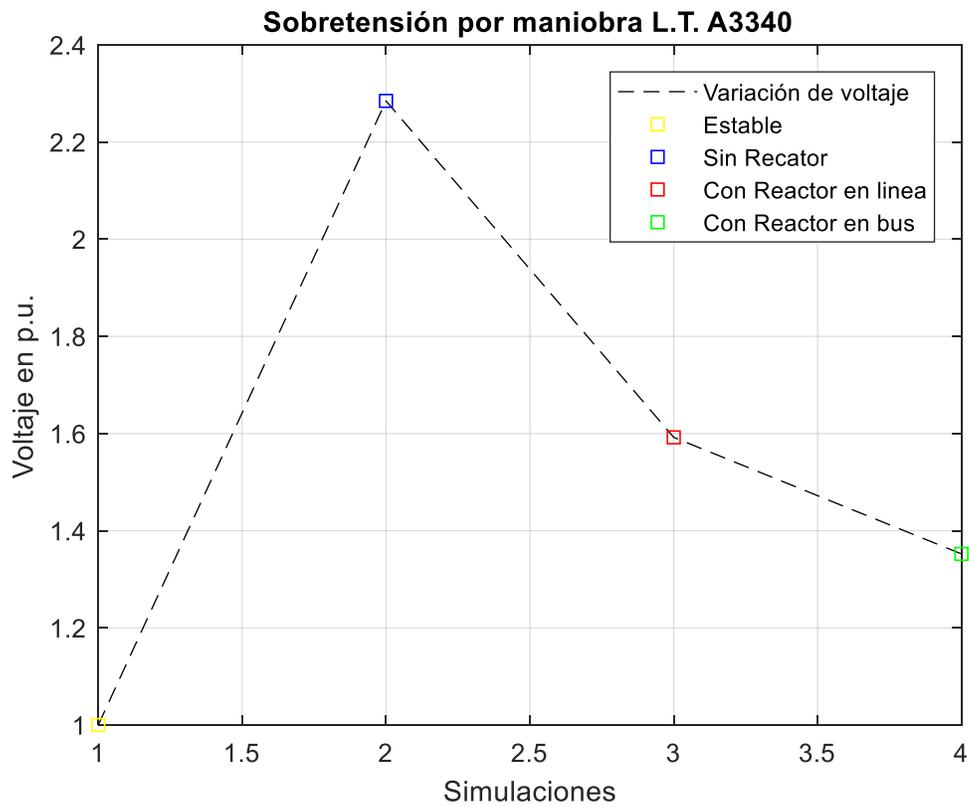


Figura 5.7.-Simulaciones de Sobretensión por maniobra en LT TMT A3340

5.8 SOBRETENSION POR MANIOBRA EN L.T. EDO A3T70

Ahora se utiliza la siguiente línea de transmisión EDO A3T70 para simular su energización en vacío y poder observar sus diferentes comportamientos ante tales situaciones. En su primer caso se simula el sistema en estado estable para obtener su voltaje, después obtenemos la señal de respuesta para observar su voltaje al momento de la maniobra sin compensación la cual aumenta notablemente la tensión y deforma la señal del sistema debido a la maniobra realizada llegando hasta 2.2 p.u. en la energización. Se utilizan como medio de compensación los reactores colocados en la línea de transmisión con el objetivo de disminuir la sobretensión al realizar la maniobra de energización, logrando un valor de 1.6 p.u. al momento de la energización y una estabilización del sistema más rápida. Por último, se simula la misma maniobra con el reactor conectado en el bus del sistema, disminuyendo el valor de tensión a 1.4 p.u. al momento de la maniobra y un mejor tiempo de recuperación del sistema, siendo así el más efectivo ante tal maniobra.

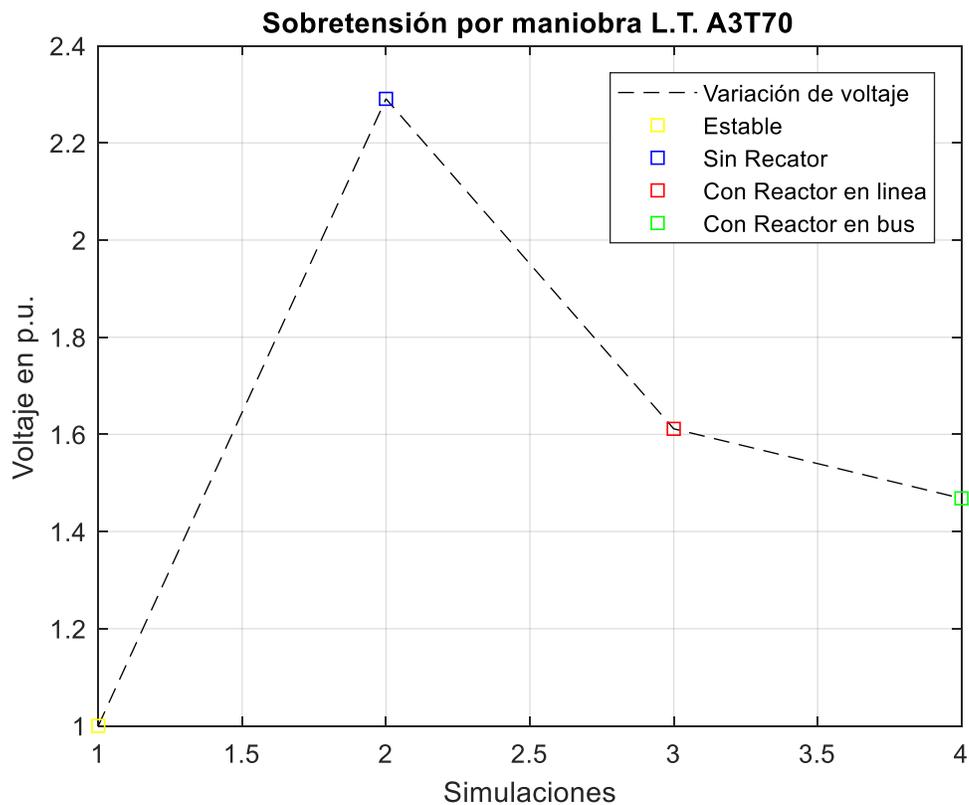


Figura 5.8.-Simulaciones de Sobretensión por maniobra en LT EDO A3T70

Conclusión

Las simulaciones de energización de líneas en vacío en las líneas de transmisión A3340 y A3T70 sin compensación reactiva nos demostró el sobrevoltaje provocado en el sistema debido al cierre de interruptores, así como también una desestabilización de este. Al hacer uso de los esquemas de compensación reactiva con los reactores en línea y reactores en barra de la subestación. Se puede concluir que en ambos casos el más eficiente ante tal maniobra fue el uso de los reactores eléctricos de potencia que están en la subestación, con valores de 1.35 p.u. y 1.4 p.u.

Obteniendo así una estabilidad en el sistema, la cual le permitirá operar en buenas condiciones ante tal maniobra.

5.9 CONCLUSIÓN GLOBAL

Finalmente, a través de las diferentes simulaciones, escenarios y condiciones operativas del sistema eléctrico de potencia podemos concluir que cada esquema de reactores cumple su función determinada que es tratar de compensar el sistema cuando se le requiera, pero ambos tienen diferente eficacia al operar ante tales escenarios por ejemplo en el caso 1 y 2 que es el efecto Ferranti funciona mejor el esquema de compensación del reactor conectado al bus del sistema y si lo comparamos con el caso 3 y 4 que es la falla monofásica, funciona mejor el reactor conectado en la línea de transmisión. Para ello debemos tomar en cuenta varios factores como el tipo de fenómeno transitorio, longitud de la línea, capacidad del reactor, etc. Por ello se concluye que cada esquema de compensación es diferente ya que ante un escenario determinado puede ser más eficaz uno que otro, refiriéndonos al reactor conectado al potencial de la línea y el reactor conectado directamente al bus del sistema.

En la figura 5.9 se pueden observar las diferencias de voltajes de las diferentes simulaciones y los diferentes esquemas de compensación. El Simulaciones 1 y 2 es el Efecto Ferranti, Simulaciones 3 y 4 Falla monofásica, Simulaciones 5 y 6 Falla bifásica, y las Simulaciones 7 y 8 es la sobretensión por maniobra.

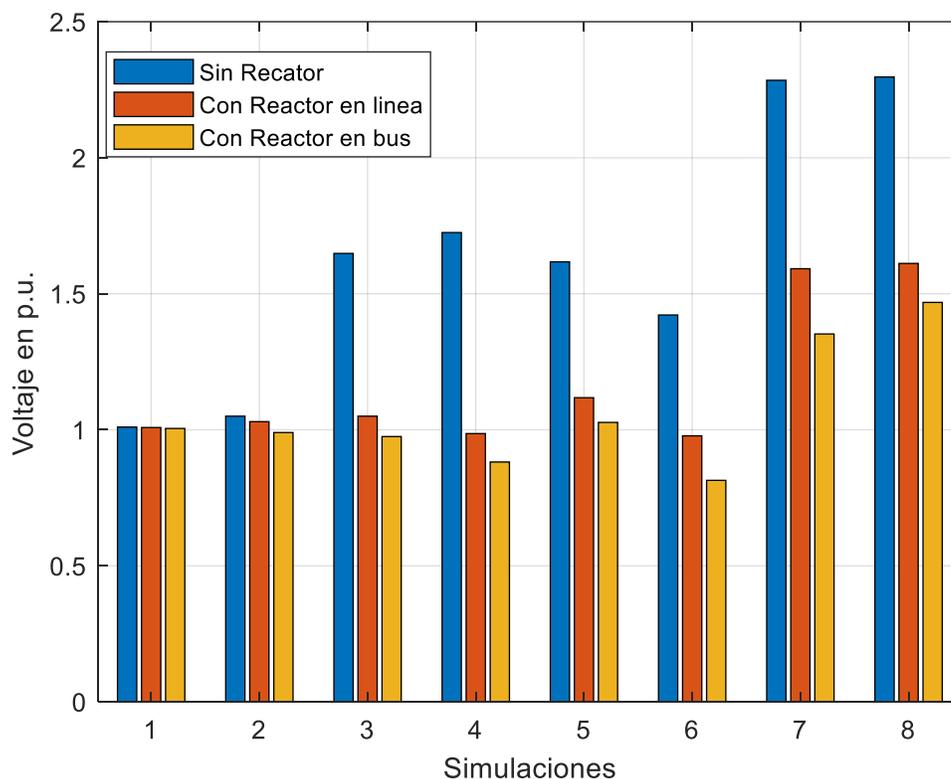


Figura 5.9.-Voltaje en p.u. de las Simulaciones.

APENDICE A

Código en Matlab de la obtención de parámetros para el reactor

```
clc
clear all
close all
%CALCULO DE REACTANCIA E INDUCTANCIA PARA REACTORES
ELÉCTRICOS DE POTENCIA

%-----Datos del sistema-----
-----
%Voltaje:
Kv=400;%Kv
%Frecuencia:
f=60;%Hz
%Velocidad angular
w=2*pi*f;%rad/seg

%%%%%%%%%% REACTORES CONECTADOS EN LINEA
%%%%%%%%%%

%-----Reactor monofasico 75 Mvar L.T TMT
A3340-----
% Capacidad del reactor
fprintf ( ' ¿Capacidad del reactor en Mvar en linea L.T
TMT A3340?: ' )
Mvar1=input ( ' ');

fprintf ( 'Reactancia por fase en ohms: ' )
X1=(Kv^2)/(Mvar1)%ohms

fprintf ( 'Inductancia por fase en mH: ' )
L1=X1/w%mH

%-----Reactor monofasico 70 Mvar L.T EDO
A3U10-----
% Capacidad del reactor
fprintf ( ' ¿Capacidad del reactor en Mvar en linea L.T
EDO A3U10?: ' )
Mvar2=input ( ' ');

fprintf ( 'Reactancia por fase en ohms: ' )
```

```

X2=(Kv^2)/(Mvar2)%ohms

fprintf ('Inductancia por fase en mH: ')
L2=X2/w%mH

%-----Reactor trifasico 25 Mvar L.T EDO
A3T70-----
% Capacidad del reactor
fprintf (' ¿Capacidad del reactor en Mvar en linea L.T
EDO A3T70?: ')
Mvar3=input (' ');

fprintf ('Reactancia por fase en ohms: ')
X3=(Kv^2)/(3*Mvar3)%ohms

fprintf ('Inductancia por fase en mH: ')
L3=X3/w%mH

%-----Reactor trifasico 25 Mvar L.T EDO
A3U00-----
% Capacidad del reactor
fprintf (' ¿Capacidad del reactor en Mvar en linea L.T
EDO A3U00?: ')
Mvar4=input (' ');

fprintf ('Reactancia por fase en ohms: ')
X4=(Kv^2)/(3*Mvar4)%ohms

fprintf ('Inductancia por fase en mH: ')
L4=X4/w%mH

%-----Reactor monofasico 75 Mvar L.T MMT
A3140-----
% Capacidad del reactor
fprintf (' ¿Capacidad del reactor en Mvar en linea L.T
MMT A3140?: ')
Mvar5=input (' ');

fprintf ('Reactancia por fase en ohms: ')
X5=(Kv^2)/(Mvar5)%ohms

fprintf ('Inductancia por fase en mH: ')
L5=X5/w%mH

```

```

%-----Reactor monofasico 100 Mvar L.T MMT
A3040-----
% Capacidad del reactor
fprintf ( ' ¿Capacidad del reactor en Mvar en linea L.T
MMT A3040?: ' )
Mvar6=input ( ' ');

fprintf ( 'Reactancia por fase en ohms: ' )
X6=(Kv^2) / (Mvar6) %ohms

fprintf ( 'Inductancia por fase en mH: ' )
L6=X6/w%mH

%-----Reactor monofasico 100 Mvar L.T MMT
A3T90-----
% Capacidad del reactor
fprintf ( ' ¿Capacidad del reactor en Mvar en linea L.T
MMT A3T90?: ' )
Mvar7=input ( ' ');

fprintf ( 'Reactancia por fase en ohms: ' )
X7=(Kv^2) / (Mvar7) %ohms

fprintf ( 'Inductancia por fase en mH: ' )
L7=X7/w%mH

%%%%%%%%%% REACTORES CONECTADOS EN BARRA
%%%%%%%%%%

%-----Reactor monofasico 100 Mvar S.E. JUL-
-----
% Capacidad del reactor
fprintf ( ' ¿Capacidad del reactor en Mvar en barra en
S.E. JUL?: ' )
Mvar8=input ( ' ');

fprintf ( 'Reactancia por fase en ohms: ' )
X8=(Kv^2) / (Mvar8) %ohms

fprintf ( 'Inductancia por fase en mH: ' )
L8=X8/w%mH

```

```

%-----Reactor monofasico 100 Mvar S.E. EDO-
-----
% Capacidad del reactor
fprintf ( ' ¿Capacidad del reactor en Mvar en barra en
S.E. EDO?: ' )
Mvar9=input ( ' ');

fprintf ( 'Reactancia por fase en ohms: ' )
X9=(Kv^2)/(Mvar9)%ohms

fprintf ( 'Inductancia por fase en mH: ' )
L9=X9/w%mH

%-----Reactor monofasico 150 Mvar S.E. MMT-
-----
% Capacidad del reactor
fprintf ( ' ¿Capacidad del reactor en Mvar en barra en
S.E. MMT?: ' )
Mvar10=input ( ' ');

fprintf ( 'Reactancia por fase en ohms: ' )
X10=(Kv^2)/(Mvar10)%ohms

fprintf ( 'Inductancia por fase en mH: ' )
L10=X10/w%mH

```

APENDICE B

Código en Matlab del modelo del Efecto Ferranti

```
clc
clear all
close all

%EFECTO FERRANTI
%LINEA EDO A3U00
Es=1.0; %p.u.
B=2.027e-3;%Constante
% a=95.69;
a=95.82;%Distancia de la linea
tetharad=B*a;
% tethagrados=tetharad*180/pi;
tethagrados=0;
%distancia inicial, distancia final, paso de integración
di=0;
fprintf (' ¿Distancia en millas de la linea?: ')
df=input (' ');
h=1;
pasos=round((df-di)/h);

x(1)=0;
Vx(1)=1.0;
Ix(1)=0.439;

for n=1:pasos;
    x(n+1)=x(n)+h;
%Voltaje en el extremo receptor
Vx(n+1)=(Es)*(cos((B)*(a-x(n+1))))/(cos(tetharad));
%Corriente en el extremo receptor
Ix(n+1)=(Es)*(sin(B)*(a-x(n+1)))/(cos(tetharad));
end

clc          %Limpiar ventana de comando
clear all   %Borra todas las variables del workspace
close all   %Cierra todas las figuras

%EFECTO FERRANTI
%LINEA MMT A3140
```

```

Es=1.0; %p.u.
B=2.027e-3;%Constante
% a=95.69;
a=151.02;%Distancia de la linea en millas
tetharad=B*a;
% tethagrados=tetharad*180/pi;
tethagrados=0;
%distancia inicial, distancia final, paso de integración
di=0;
fprintf (' ¿Distancia en millas de la linea?: ')
df=input (' ');
h=1;
pasos=round((df-di)/h);

x(1)=0;
Vx(1)=1.0;
Ix(1)=0.439;

for n=1:pasos;
    x(n+1)=x(n)+h;
%Voltaje en el extremo receptor
Vx(n+1)=(Es)*(cos((B)*(a-x(n+1))))/(cos(tetharad));
%Corriente en el extremo receptor
Ix(n+1)=(Es)*(sin(B)*(a-x(n+1)))/(cos(tetharad));
end

```

REFERENCIAS

1. T.J.E. Miller, *Reactive Power Control in Electrical Systems*, 1982.
2. C. Fuerte Esquivel, *introducción al análisis de transitorios electromagnéticos en sistemas interconectados*, 2019.
3. Camilo Patricio Zambra, *Modelos para evaluar efectos transitorios electromagnéticos en sistemas interconectados*, 2019.
4. Roberto Fernando Montesinos, *Selección y protección de reactores en sistemas eléctricos de potencia*, 1985.
5. Napoleón Noboa Gómez, *Influencia del soporte de potencia reactiva en la cargabilidad de líneas de transmisión*, 1985.
6. Pablo Alberto De Jarmy, *Simulación mediante el método finito de un reactor en derivación monofásico de 25 Mvar/400Kv*. Tecnológico de monterrey, 2010.
7. Cristian Alexander Mora, *Metodología para el dimensionamiento eléctrico de reactores de potencia incorporados en líneas de 500 Kv. Del sistema nacional de transmisión*, Escuela politécnica nacional, 2017.
8. Donald G. Fink, *Standard Handbook of Electrical Engineering*. McGraw-Hill, 2018.
9. Edgar Estuardo Ramírez, *análisis de sobretensiones debido a transitorios por maniobras en sistemas eléctricos de potencia mayores a 300 Kv.*, Universidad de san Carlos Guatemala, 2008.
10. Eiichi Haginomori, *Power System Transient Analysis*, WILEY, 2016.