

Grado en Ingeniería Eléctrica  
curso académico 2017-2018

*Trabajo Fin de Grado*

**“FORMAS DE ONDA DE LA  
TENSIÓN TRANSITORIA DE  
RESTABLECIMIENTO EN UN  
DISYUNTOR”**

---

AUTOR

**ALEJANDRO SANTANO GARCÍA**

TUTOR

**JUAN CARLOS BURGOS DÍAZ**

**LEGANÉS, JUNIO DE 2018**



#### Agradecimientos:

Me gustaría manifestar mi agradecimiento, en el momento de la conclusión de este Proyecto Fin de Grado, a toda mi familia, pero en especial a mis padres, ya que sin ellos nada de esto hubiera sido posible. Gracias por darme la oportunidad de estudiar y apoyarme a lo largo de todos estos años; soy lo que soy gracias a vosotros. Gracias Esther y Bernardo.

Quiero también expresarle mi agradecimiento a Marina, mi novia, por todo su apoyo y cariño. Siempre ha sabido estar en los buenos y en los malos momentos. No tengo suficientes palabras de gratitud por todo lo que has hecho.

Finalmente, y en la misma escala de importancia, deseo darle las gracias, y expresarle mi respeto y admiración, a mi tutor, el profesor D. Juan Carlos Díaz, quien, por medio de este proyecto, me ha brindado la oportunidad de trabajar a su lado y aprender de él. El resultado final no habría sido posible sin su valiosa y generosa ayuda; además, sus conocimientos lo convierten en uno de los mejores profesionales que he tenido la inmensa suerte de conocer a lo largo de estos años. Gracias Juan Carlos.



**ÍNDICE GLOBAL**

ÍNDICE GLOBAL .....	1
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
1. INTRODUCCIÓN .....	12
1.1. Introducción .....	12
1.1.1. Abstract .....	13
1.2. Planteamiento del problema.....	14
1.3. Marco regulador.....	14
1.4. Entorno socio-económico .....	14
1.5. Estado del arte .....	14
1.6. Objetivos del TFG.....	15
2. DISYUNTORES. TENSIÓN TRANSITORIA DE RESTABLECIMIENTO .....	16
2.1. Aparamenta de corte y tipos.....	16
2.2. Tipos de disyuntores.....	16
- Disyuntores de Hexafluoruro de azufre .....	17
- Interruptor en vacío: .....	18
2.3. Tensión transitoria de restablecimiento .....	20
2.4. Selección de aparamenta.....	23
2.5. Normativa .....	24
3. SIMULACIÓN DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS .....	25
3.1. Introducción .....	25
3.2. Tipos de simuladores.....	25
- EMTP-ATP.....	25
- PSS/E.....	26
- SimPower Systems. ....	27
- PSCAD .....	28
- PSIM .....	28
3.3. Conclusión .....	28
4. MODELADO DE LÍNEAS EN ATP .....	29

4.1. Introducción .....	29
4.2. Modelo en pi .....	30
4.3. Modelo de línea traspuesta.....	32
4.4. Modelo Bergeron .....	34
4.5. Modelo J.Martí.....	37
4.6. Modelo Semlyen .....	40
4.8. Conclusiones del estudio realizado .....	42
5. SIMULACIONES REALIZADAS.....	43
5.1. Diferentes casos de estudio.....	43
5.2. Características de los elementos considerados en la simulación .....	43
5.3. TTR de un interruptor con un cortocircuito en bornes del transformador .....	45
5.3.1. Influencia de las pérdidas en el transformador .....	48
- Para una $P_{cu}$ = 250 kW y $P_{fe}$ = 200 kW: .....	48
- Para $P_{cu}$ = 60 kW y $P_{fe}$ = 50 kW: .....	49
- Para $P_{cu}$ = 30 kW y $P_{fe}$ = 25 kW: .....	49
5.4. TTR de un interruptor con un cortocircuito al final de una línea larga .....	50
5.4.1. Teoría básica.....	50
5.4.2. Simulaciones.....	56
- Tensión en el lado izquierdo del interruptor (punto B) .....	56
- Tensión en el lado derecho del interruptor (punto D).....	59
5.4.3. Variación en la longitud de la línea .....	62
- Para una longitud de 125 Km: .....	63
- Para una longitud de 15 Km: .....	63
- Para una longitud de 280 Km: .....	64
5.4.4. Despeje de una falta mediante un interruptor situado en el extremo de una línea larga.....	65
- Tensión en el lado izquierdo del interruptor (punto D) .....	65
- Tensión en el lado derecho del interruptor (punto C) .....	66
5.5. Conclusiones del trabajo realizado .....	68
- TTR de un interruptor con un cortocircuito en bornes del transformador.....	68
- TTR de un interruptor con cortocircuito al final de una línea.....	68
6. CONCLUSIONES .....	70
6.1 Objetivo principal.....	70
- Estudio de la TTR y TSTTR.....	70
6.2 Objetivos secundarios.....	70

- Selección del software adecuado.....	70
- Elección del modelo de línea adecuado.....	70
7. PRESUPUESTO .....	71
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS .....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Interruptor de SF6 con actuador magnético [2].....	18
Figura 2.2: Proceso de apertura de un interruptor SF6 [1]. .....	18
Figura 2.3: Interruptor de vacío [2]. .....	19
Figura 2.4: Apertura de un interruptor de vacío [2].....	19
Figura 2.5: ecuación de Ayrton y energía del arco [1].....	20
Figura 2.6: Ejemplo de fuente de alterna bobina y condensador para hallar TTR [1]. ..	20
Figura 2.7: Gráfica de la TTR [1] .....	21
Figura 2.8: ecuación de la TSTTR [1].....	22
Figura 2.9: El cociente $U_c/t_3$ es la TSTTR [1]. .....	22
Figura 2.10: Gráfica que muestra los impulsos tipo maniobra y tipo rayo [1].....	23
Figura 2.11: Representación de una TTR especificada de cuatro parámetros y de un segmento de retardo para las secuencia de ensayos de T100, T60 de defecto kilométrico y de discordancia de fases (tomada de [3]). .....	24
Figura 2.12: Representación de una TTR especificada por una traza de referencia de dos parámetros y por un segmento de línea definiendo el retardo (tomada de [3]). ...	24
Figura 3.1: Menú de ATP para crear todo tipo de modelo de líneas .....	26
Figura 3.2: pantalla de inicio de PSS/E [6]. .....	27
Figura 4.1: Modelos de líneas dentro del menú de ATP .....	30
Figura 4.2: modelo pi de una línea [1].....	31
Figura 4.3: ventana donde se introducen los datos del modelo en Pi. ....	31
Figura 4.4: Ventana donde se introducen datos de $Z_1$ , $Z_2$ y $Z_0$ en una línea en Pi. ....	32
Figura 4.5: trasposición de línea [11]. .....	32
Figura 4.6: ventana donde se introducen los datos del modelo de línea traspuesta. ...	33
Figura 4.7: esquema del circuito a simular con línea traspuesta. ....	33
Figura 4.8: grafica obtenida a partir de la simulacion del esquema de la figura 4.7. ....	33
Figura 4.9: circuito del modelo Bergeon [12]. .....	34
Figura 4.10: ventana donde se selecciona el modelo Bergeron y se introducen los datos de resistencia, frecuencia y longitud.....	35
Figura 4.11: ventana donde se introducen los datos del conductor y las dimensiones de la torre seleccionada. ....	35
Figura 4.12: Ejemplo de torre utilizado para los datos introducidos en la Figura 4.11. [13] .....	36



Figura 4.13: esquema del circuito a simular con el modelo Bergeron.....	36
Figura 4.14: Gráfica obtenida a partir de la simulación del esquema de la figura 4.13.	36
Figura 4.15: escalones producidos durante la sobretensión en modelo de Bergeron. .	37
Figura 4.16: Circuito representativo del modelo J.Martí [14]......	38
Figura 4.17: ventana donde se selecciona el modelo J.Marti. ....	38
Figura 4.18: Esquema del circuito con el modelo de J.Marti. ....	39
Figura 4.19: grafica que se produce al simular el esquema con el modelo de J.Marti. .	39
Figura 4.20: imagen que muestra que no se producen anomalías en el modelo de J.Martí.....	40
Figura 4.21: ventana donde se selecciona el modelo Semlyen.....	41
Figura 4.22: esquema del circuito con el modelo de Semlyen.....	41
Figura 4.23: gráfica que se produce al simular el esquema con el modelo de Semlyen. .....	41
Figura 5.1: ventana donde se introducen los datos del transformador BACTRAN. ....	44
Figura 5.2: circuito equivalente de Transformador BACTRAN con capacidad y resistencia en serie conectados en bornes. ....	45
Figura 5.3: ventana donde se introducen los datos de la rama RLC conectada en bornes del transformador BACTRAN.....	45
Figura 5.4: Esquema para la simulación de cortocircuito en bornes .....	45
Figura 5.5: gráfica de tensión debida a cortocircuito en bornes del disyuntor. ....	46
Figura 5.6: TTR producida tras la simulación del esquema de la figura 5.4. ....	46
Figura 5.7: tiempo que tarda en producirse un semiperiodo de la TTR producida ( $6,99 \cdot 10^{-6}$ s).....	47
Figura 5.8: TTR que se produce con $P_{cc}= 250$ kW y $P_{fe}= 200$ kW. ....	48
Figura 5.9: TTR que se produce con $P_{cc}= 60$ kW y $P_{fe}= 50$ kW. ....	49
Figura 5.10: TTR que se produce con $P_{cc}= 30$ kW y $P_{fe}= 25$ kW. ....	50
Figura 5.11: esquema con falta a una distancia del interruptor y gráfica de la tensión frente a distancia del interruptor.....	51
Figura 5.12: Esquema monofásico equivalente [16] .....	52
Figura 5.13: Circuito equivalente para la obtención de la TTR [16]. ....	52
Figura 5.14: gráfica resultante de la falta kilométrica. Distancia entre falta e interruptor 3 Km [16]. ....	55
Figura 5.15: Esquema para simulación de cortocircuito al final de una línea larga.....	56
Figura 5.16: Tensión en el punto B del esquema de la figura 5.15. ....	57
Figura 5.17: Tensión en el punto B en los primeros 3,5 ms después de la producción del cortocircuito en C. ....	57

Figura 5.18: Influencia del cortocircuito en el punto B del esquema de la figura 5.15.	58
Figura 5.19: a) Transitorio de tensión en el punto B posterior a la apertura efectiva del interruptor b) medida de la tensión pico-pico .....	59
Figura 5.20: : Influencia del cortocircuito en el punto D del esquema de la figura 5.15. ....	60
Figura 5.21: Tensión en el punto D del esquema de la figura 5.15. ....	60
Figura 5.22: Detalle de la tensión en el punto D de la figura 5.15. ....	61
Figura 5.23: TTR producida entre los contactos (B y D) del disyuntor objeto de estudio del esquema de la figura 5.15. ....	61
Figura 5.24: Zoom de la TTR producida en el disyuntor objeto de estudio del esquema de la figura 5.15. ....	62
Figura 5.25: TTR producida en el disyuntor cuando se reduce la longitud de la línea a 125 Km. ....	63
Figura 5.26: TTR producida en el disyuntor cuando se reduce la longitud de la línea a 50 Km. ....	63
Figura 5.27: TTR producida en el disyuntor cuando se aumenta la longitud de la línea a 280 Km. ....	64
Figura 5.28: Esquema para simulación de cortocircuito al final de una línea larga cambiando la posición del disyuntor. ....	65
Figura 5.29: Tensión en el punto D del esquema de la figura 5.28. ....	65
Figura 5.30: Zoom de la tensión en el punto D de la figura 5.28. ....	66
Figura 5.31: Tensión en el punto B de la figura 5.28. ....	66
Figura 5.32: Tensión en el punto C del esquema de la figura 5.28. ....	67
Figura 5.33: TTR que se produce de simular el esquema de la figura 5.28. ....	67
Figura 5.34: Zoom de la TTR producida en el disyuntor objeto de estudio del esquema de la figura 5.28. ....	67

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resultados TTR y TSTTR para cortocircuito en bornes de transformador. ....	68
Tabla 2: Resultados TTR y TSTTR para cortocircuito al final de una línea. ....	69
Tabla 3: Presupuesto de Recursos Humanos. ....	71

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. Introducción**

En el presente Trabajo Fin de Grado se hablará sobre los tipos de aparataje, con atención especial sobre los tipos de disyuntores que existen en el mercado, así como los más usados.

Se expondrán los tipos de esfuerzos que sufren los disyuntores: mecánicos, térmicos y dieléctricos.

El presente TFG se focalizará en el estudio de los esfuerzos dieléctricos, ocasionados por la Tensión Transitoria de Restablecimiento (TTR) en diferentes escenarios y ver cómo se comporta el disyuntor ante las situaciones que se plantearán, conociendo la tipología del circuito en el cual se realizará el estudio.

Para dicho estudio de la TTR se utilizará como apoyo el software ATP, un programa para estudios de transitorios en diferentes circunstancias. ATP es el programa elegido frente a otros como PSIM, PSCAD, PSSE y SIMPOWER SYSTEM (de los cuales también se hablará) ya que dispone de un amplio menú para realizar modelos de líneas, transformadores, circuitos RLC, RC y LC, gran variedad de aparatos de medida, etc.

En cuanto a modelo de líneas, se realizarán una serie de simulaciones con los distintos tipos que ATP ofrece para escoger el modelo que más se aproxime a la realidad y que, posteriormente, se utilizará en los esquemas para el estudio de la tensión transitoria.

Los esquemas a realizar mediante ATP serán sistemas en los que sucede un cortocircuito trifásico en diferentes posiciones y con diferentes elementos para finalmente obtener unas conclusiones sobre la situación más peligrosa la cual el disyuntor puede enfrentarse en cuanto a esfuerzos dieléctricos se refiere.

### 1.1.1. Abstract

This Final Year's Dissertation will deal with the different types of switchgear, focusing mainly on the diverse breakers that exist in the market as well as on the most used ones.

The different types of stress, such as mechanical, thermic and dielectric, suffered by breakers will be explained.

This Final Year's Dissertation will hinge around the study of the electric stress provoked by transient recovery voltage (TRV) on different scenarios in order to analyse how the breaker will behave in the different situations knowing the typology of the circuit in which the study will be carried out.

For the study of the TRV, ATP software will be used since this program is specifically designed for the study of transients under different circumstances. From among a number of programs, such as PSIM, PSCAD, PSSE and SIMPOWER SYSTEM (which will also be mentioned later on), the ATP program has been selected since it provides a rich menu in order to carry out line models, transformers, RLC, RC and LC circuits, and it also supplies a great variety of measurement mechanisms, etc.

As regards the line models, a number of simulations with the different types offered by ATP will be carried out in order to choose the model which is closest to reality and that will be used later on in the diagrams for the study of transient voltage.

The diagrams produced by ATP will be systems in which a three-phase short circuit occurs in different positions and with different elements in order to finally obtain a series of conclusions about the most dangerous situation which a breaker must face as far as voltage stress is concerned.

## **1.2. Planteamiento del problema**

Cada vez que un interruptor abre un circuito (por ejemplo, para despejar una falta en el sistema eléctrico) aparece entre los polos del mismo una tensión que se denomina Tensión Transitoria de Restablecimiento.

La Tensión Transitoria de Restablecimiento es un fenómeno muy importante a tener en cuenta, ya que puede ocasionar un deterioro importante en los contactos del disyuntor si dicha TTR es muy elevada. También puede ocasionar que se cebe el arco entre los polos del interruptor impidiendo la apertura efectiva del circuito.

En el presente TFG se simularán diferentes escenarios en los que el disyuntor se ve sometido a dicho problema. Se partirá de un circuito en el cual se le realizará un cortocircuito con su posterior despeje mediante el disyuntor que se desea estudiar para la aparición de la tensión transitoria de restablecimiento.

## **1.3. Marco regulador**

En el presente TFG se han seguido las indicaciones de la siguiente normativa:

**Norma española de Aparata de Alta Tensión (Norma 62271-100.2011).** Se muestra con detalle en el apartado 2.5 de la memoria.

## **1.4. Entorno socio-económico**

El impacto socio-económico que puede conllevar el estudio realizado en este proyecto puede ser positivo, ya que tener una buena información de los esfuerzos que puede soportar un disyuntor (en el presente TFG se centrará en los esfuerzos dieléctricos) es de gran ayuda para las empresas fabricantes de dichos elementos para la obtención de un producto de calidad y duradero. Un interruptor que sea capaz de soportar esfuerzos dieléctricos de las peores características no solo asegura un sistema eléctrico de calidad, sino que supone un ahorro económico ya que la pieza tendrá un tiempo medio de vida mayor.

El presupuesto detallado irá al final del proyecto (apartado 6).

## **1.5. Estado del arte**

El estudio de la Tensión Transitoria de Restablecimiento es un fenómeno físico muy documentado a lo largo de la historia. A continuación se muestran unos ejemplos de documentos cuyo estudio se centra en dicho fenómeno:

*“Study on short circuit current and transient recovery voltage of circuit breakers for UHV AC Half-Wavelength Transmission lines”*. Autores: Bin Han, Liangeng Ban, Zutao Xiang and Yuanyuan Zhang. China Electric Power Research Institute. Pekín, China. Año 2016.

*“Analysis of the Effect of Distance on the TRV Waveform for a Short-Line Fault”*. Autor: Grazia Todeschini, miembro de IEEE. Año 2010.

*“A Methodology to Determine Transient Recovery Voltage in Short-Line Fault”*. Autores: Daniel Pérez Dorantes y Máximo Hernández Ángeles. México. Año 2016.

Cabe destacar también que existen páginas web especializadas en información sobre el mundo de la electricidad que abarcan desde principios del siglo XX hasta la actualidad donde se puede encontrar información de gran ayuda para el estudio de la tensión Transitoria de restablecimiento. Algunas de ellas son Cigré e IEEE.

Un documento a destacar que aparece en Cigré y que habla sobre el tema de estudio de este presente TFG es:

*“Transiente Recovery Voltages in Medium voltage networks”*. Autores : Ivano Bonfati, Denis Dufournet, André Even, Rochus Gröber, Hiromichi Kawano, Piet Knol, Pierre Migaud, Joseph Millon-Fremillon, David Peelo, Thomas Tobin, Lou van der Sluis. Año 1998.

## **1.6. Objetivos del TFG**

El presente TFG se centra en el estudio de la Tensión Transitoria de Restablecimiento (TTR) que se produce entre los contactos de un disyuntor y que ocasiona esfuerzos dieléctricos los cuales debe soportar de forma correcta. Por eso el conocimiento de este fenómeno es muy importante a la hora de diseñar disyuntores.

El objetivo principal del presente TFG es el estudio de la tensión transitoria de restablecimiento (TTR) de un disyuntor y de la tasa de subida de la misma (TSTTR) en diferentes escenarios (cortocircuito en bornes del transformador, cuando el interruptor está situado en el principio de línea, ídem cuando el interruptor está situado en el final de línea, estudio de la falta kilométrica).

Además de este objetivo principal se marcan otros objetivos secundarios como son:

- Elegir el software más adecuado para el estudio de transitorios de estas características.
- Elección del modelo de línea más adecuado para su uso posterior en los diferentes escenarios.

## **2. DISYUNTORES. TENSIÓN TRANSITORIA DE RESTABLECIMIENTO**

### **2.1. Aparamenta de corte y tipos**

Se denomina como aparamenta [1] al conjunto de aparatos o dispositivos de conexión y su combinación con los elementos de mando, medida, protección y regulación asociados, utilizados en las instalaciones eléctricas.

Para los objetivos de este Trabajo Fin de Grado, la aparamenta que presenta mayor interés es la de corte. Este tipo de aparamenta tiene como propósito tanto el de establecer la corriente como el de interrumpirla en uno o varios circuitos, según las condiciones de servicio que estén previstas, sin que se produzca ningún daño o alteración significativa en el aparato y sin que la explotación sufra ninguna clase de perturbación. Los aparatos fundamentales que pueden distinguirse varios tipos:

- Seccionadores: Cuya misión es unir o separar de forma clara partes de una instalación. No son capaces de interrumpir corriente.
- Interruptores automáticos o disyuntores: Capaces de interrumpir y establecer corrientes normales de servicio, capaces de interrumpir y establecer corrientes anormales.
- Interruptor-seccionador: Capaz de interrumpir y establecer corrientes normales de servicio, pero no corrientes anormales de cortocircuito.
- Contactor: se trata de un componente electrónico destinado a establecer o interrumpir el paso de corriente, bien en el circuito de potencia, bien en el de mando. Este tipo de componente electrónico puede accionarse a distancia y presenta dos posiciones: estable o de reposo. El circuito se abre o se cierra en función de que se dé una secuencia lógica.
- Cortacircuitos fusible: Son dispositivos que abren el circuito en el que están instalados cuando la corriente que circula por ellos provoca, por calentamiento, la fusión de uno o varios de sus elementos previstos para este fin. El tiempo de fusión depende del valor de la corriente aplicada.

### **2.2. Tipos de disyuntores**

Los disyuntores pueden ser clasificados en función del elemento aislante que existe entre sus contactos. En este sentido cabe distinguir entre los siguientes tipos de disyuntores.

- Aire
- Aceite
- Vacío
- Hexafloruro de azufre (SF6)



De los nombrados anteriormente los más utilizados son los de vacío y en los de SF6 y el resto están anticuados y en desuso, por lo cual no se describirán aquí:

- Disyuntores de Hexafluoruro de azufre

El Hexafluoruro de azufre [2], también se conoce como SF6. Se trata de un gas inerte artificial cuyas propiedades de aislamiento han resultado ser altamente adecuadas; además, posee gran estabilidad tanto térmica como química. Debido a estas peculiaridades, y por la gran fiabilidad que se ha podido observar, SF6 se ha utilizado ampliamente en interruptores, tanto de alta tensión como de media. No obstante, a pesar de que las ventajas específicas del gas SF6 en aplicaciones de ingeniería eléctrica ya eran conocidas desde los años 30 del siglo XX, no comenzaron a desarrollarse ni a instalarse interruptores de alta tensión con aislamiento de SF6 hasta los años 50 del mismo siglo.

Para conseguir la rápida extinción del arco entre contactos se debe “soplar el arco” para alejar los portadores de carga de la zona entre electrodos y enfriar el arco, además de tener un medio aislante de calidad.

La primera generación de interruptores SF6 de media tensión utilizaba un sistema de gas a doble presión. Ya en los diseños de segunda generación, la diferencia de presión que se requería para el flujo del gas se producía mediante un pistón que, al estar integrado en el mismo conjunto que el contacto móvil, comprimía un pequeño volumen de gas al ser accionado mecánicamente. Este tipo de interruptores, a los que se denomina de “soplado mecánico” o “soplado simple”, requerían de un mecanismo de cierta potencia. Ya los diseños de interruptor de tercera generación, los llamados de “autoextinción” o de “soplado térmico”, producían el flujo de gas por medio de la energía contenida en el arco y ello permitía que la cantidad necesaria para funcionar fuese significativamente menor.

En la actualidad, y tras varias décadas de investigación, los diseños de que se dispone son más eficientes. El interruptor conocido como “Auto Puffer” tiene un funcionamiento parecido al de un dispositivo de soplado simple y puede interrumpir corrientes de hasta un 30 % de la máxima capacidad de ruptura nominal. También puede funcionar como un interruptor de tipo “autoextinción” en caso de corrientes superiores, de esta manera aúna las ventajas de los diseños anteriormente existentes [2].



Figura 2.1: Interruptor de SF6 con actuador magnético [2].

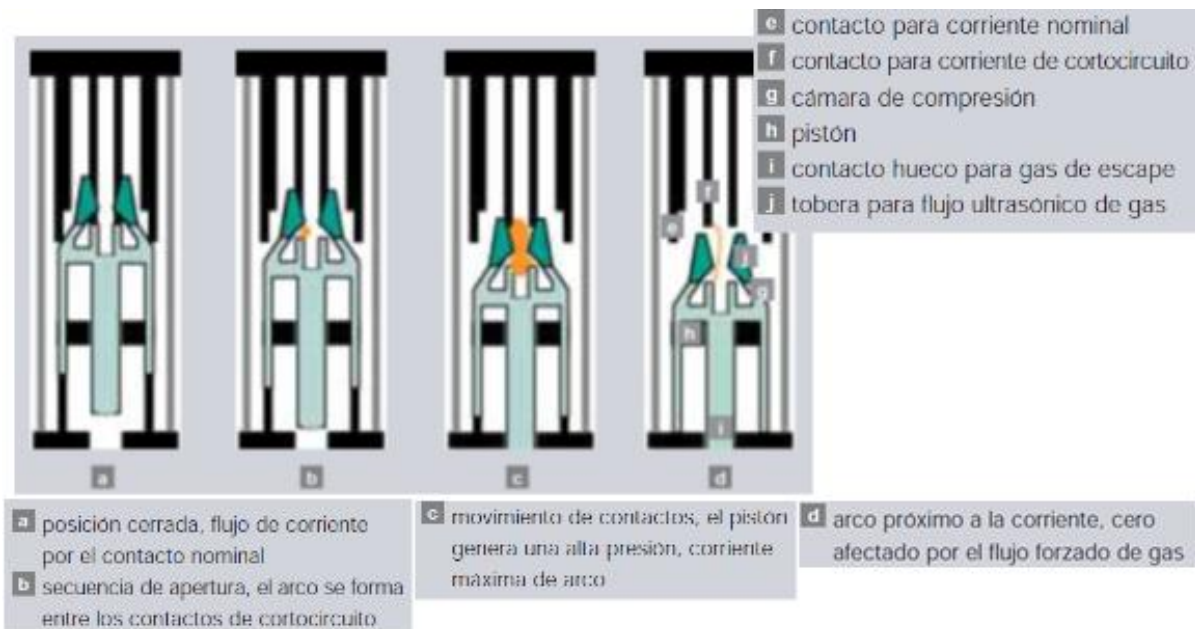


Figura 2.2: Proceso de apertura de un interruptor SF6 [1].

- Interruptor en vacío:

Se consideraba que la interrupción de corriente en el vacío era una técnica de conmutación 'ideal' [2]. No obstante, durante varias décadas permaneció ignorada debido a una serie de dificultades prácticas. Uno de los principales escollos radicaba en la fabricación de un contenedor aislante que tuviese las características idóneas para mantenerse herméticamente sellado de manera permanente. La respuesta al problema vino, en la década de los años 60, por medio de la utilización de contenedores de vidrio. Este tipo de tecnología fundamentada en los recipientes de vidrio soplado en absoluto suponía una novedad, pues había estado disponible durante siglos. Sin embargo, el desarrollo de los materiales cerámicos basados en el óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) supuso un avance considerable, ya que éstos poseen una resistencia mayor a los esfuerzos cíclicos que se originan por los cambios de temperatura.

Hallar tanto el material como la forma de que fueran idóneos para los contactos del interruptor también fue un reto nada despreciable. Los contactos, tanto en las operaciones de apertura como de cierre, debían ofrecer una gran resistencia a la erosión del arco que, además, debía producirse de forma uniforme y difusa por toda la superficie de contacto. Tanto durante el proceso de cierre como después, el material de contacto debía resultar poco propenso a la soldadura [2].

También es importante obtener bajos valores de corriente de corte al interrumpir intensidades débiles, así como conseguir una absorción total de gases residuales. La búsqueda del material apropiado mostró que la gran mayoría de las propiedades que se requerían podían ser encontradas en el cromo. Con investigaciones posteriores se demostró que un material compuesto por cromo y cobre era el más indicado y el que mejor podía satisfacer las necesidades básicas.

Los interruptores de vacío son utilizados en tensiones medias hasta 50kV.



Figura 2.3: Interruptor de vacío [2].

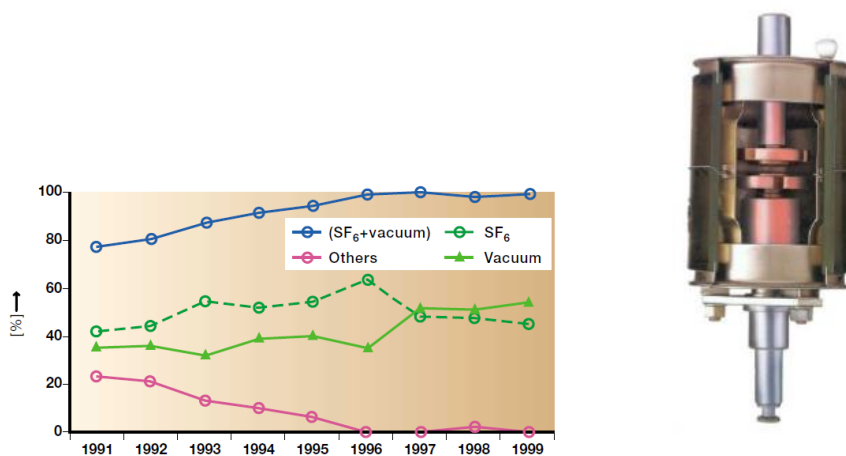


Figura 2.4: Apertura de un interruptor de vacío [2].

### 2.3. Tensión transitoria de restablecimiento

También conocida como TTR [1], es la tensión máxima que aparece en bornes del interruptor durante el transitorio de corte de corriente y una vez extinguido el arco eléctrico. Para estudiar la extinción del arco y sus reencendidos hasta extinguirse es preciso obtener la tensión entre contactos durante el transitorio (TTR) teniendo en cuenta la topología del circuito conectado al interruptor.

Un arco eléctrico está formado por electrones emitidos desde el electrodo que esté a potencial negativo en ese momento y por iones.

Para corrientes bajas la caída de tensión en el arco aumenta porque el gas entre contactos está más frío y en consecuencia menos ionizado. Para altas corrientes la caída de tensión en el arco es prácticamente independiente de la corriente.

A bajas corrientes el arco pierde temperatura y por tanto ionización y conductividad.

La ecuación de Ayrton proporciona la caída de tensión que se produce en el disyuntor cuando realiza la maniobra:

$$\Delta U = u_a + u_b + u_c$$

Ecuación de Ayrton

$$\Delta U = a + bl + \frac{c + dl}{i}$$

Energía del arco  $E = \Delta u \cdot i \cdot t$

Figura 2.5: ecuación de Ayrton y energía del arco [1].

- $U_a$ : Caída de tensión en el ánodo.
- $U_b$ : Caída de tensión en el medio entre electrodos.
- $U_c$ : Caída de tensión en el cátodo.

Una buena forma de ver la Tensión transitoria de Restablecimiento es con un sencillo ejemplo [1]:

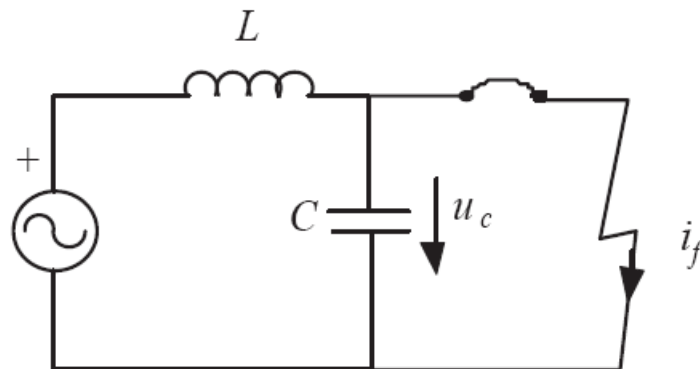


Figura 2.6: Ejemplo de fuente de alterna bobina y condensador para hallar TTR [1].

De la figura anterior se sacan las siguientes ecuaciones:

$$E\sqrt{2} \cos(\omega t) = L \frac{di}{dt} + U_c$$

$$i = C \frac{dU_c}{dt}$$

Siendo E la tensión de la fuente.

Con las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + \frac{U_c}{LC} = \frac{E\sqrt{2}}{LC}$$

Aplicando el método de la transformada de Laplace para la resolución de ecuaciones diferenciales, se consigue:

$$s^2 U_c(s) - s u_c(0) - u'_c(0) + \omega_0^2 U_c(s) = \omega_0^2 E\sqrt{2} \frac{s}{s^2 + \omega^2}$$

$$U_c(s) = E\sqrt{2} \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \left( \frac{s}{s^2 + \omega^2} - \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \right)$$

Por tanto, se tiene como Tensión Transitoria de Restablecimiento:

$$u_c(t) = E\sqrt{2} \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} (\cos \omega t - \cos \omega_0 t)$$

$$u_c(t) = E\sqrt{2} (\cos \omega t - \cos \omega_0 t)$$

En el circuito de la figura 2.6, En tanto el interruptor esté cerrado la corriente en el condensador es cero. En cuanto el arco se extingue la tensión en el condensador (esto es, la tensión en bornes del interruptor) empieza a crecer.

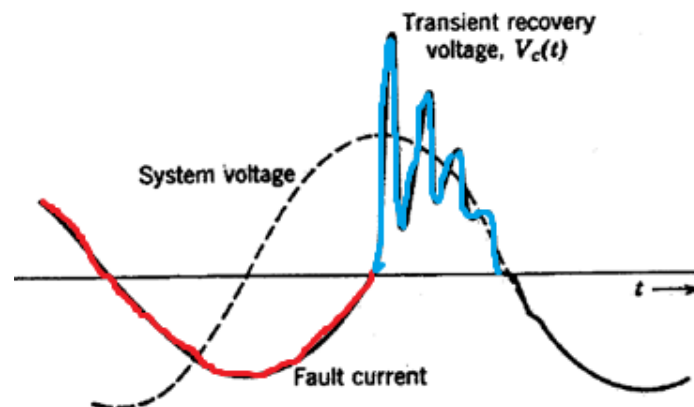


Figura 2.7: Gráfica de la TTR [1].

La tensión máxima (teórico) puede llegar a ser  $2\sqrt{2}E$ .

La gráfica que se muestra en la figura 2.7 es en caso de que el interruptor actúe antes de que se llegue al régimen permanente del cortocircuito.

En el caso de que se corte cuando se ha llegado al régimen permanente, la corriente que hay que cortar es menor (lo que es bueno para que los contactos se deterioren menos).

Sin embargo (especialmente en altas potencias y tensiones), lo normal es que el interruptor abra el circuito cuando la corriente de cortocircuito está todavía en el transitorio (no se ha extinguido la componente unidireccional de corriente), en este caso la corriente a cortar es mayor (y los contactos deben estar preparados para soportar ese arco eléctrico sin deterioro), pero por el lado de la tensión transitoria de restablecimiento tenemos menos problema, porque es menor, de forma que habrá menos reencendidos.

Es importante saber si el arco se cebará, y para eso se debe conocer la tasa de subida de la TTR. Cuanto mayor sea  $f_0$  más probabilidades hay de que se cebe el arco entre contactos. El arco se vuelve a establecer si la tensión entre los polos del interruptor supera la curva de regeneración dieléctrica. La temperatura, la presión y la naturaleza de los gases entre contactos, son factores que influyen en la recuperación del medio dieléctrico, así como la velocidad de soplado del arco.

Al extinguirse la corriente se establece un régimen transitorio en el cual las capacidades parásitas del circuito se cargan a la tensión de la fuente a través de la inductancia del circuito, y en ese transitorio la tensión en el condensador puede llegar a ser el doble de la de la red. El máximo de tensión se alcanza en medio ciclo de la frecuencia natural de oscilación.

$$TSTTR = \frac{2\sqrt{2}E}{\frac{I_0}{2}} = 4f_0\sqrt{2}E$$

Figura 2.8: ecuación de la TSTTR [1].

Para la normalización de la TTR en circuitos de parámetros concentrados de hasta 100 kV las normas contemplan una envolvente simple definida por dos parámetros:

- $U_c$  : Valor máximo del primer pico de oscilación
- $t_3$ :Tiempo en el que se obtiene el máximo

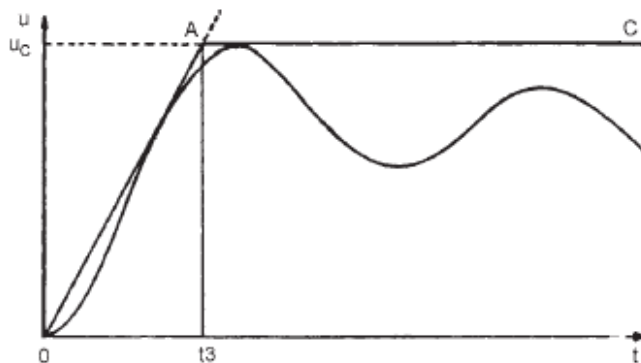


Figura 2.9: El cociente  $U_c/t_3$  es la TSTTR [1].

## 2.4. Selección de aparamenta

Para seleccionar la aparamenta [1] es imprescindible conocer los esfuerzos que ésta debe soportar.

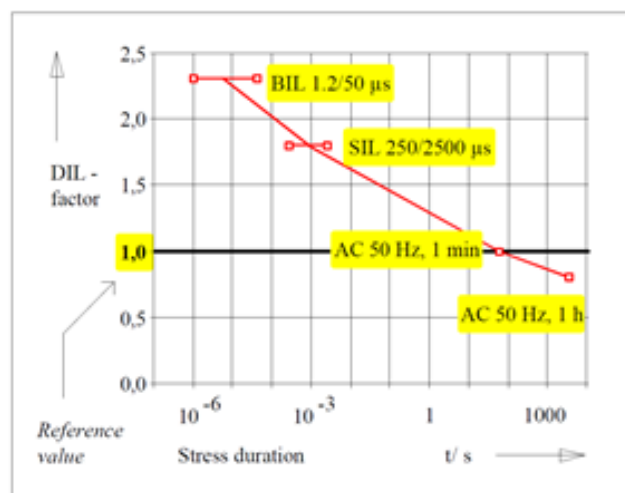
Durante su vida útil la aparamenta está sometida a una serie de esfuerzos. La selección de la aparamenta debe hacerse de modo que ésta sea capaz de soportar esos esfuerzos sin dañarse:

- esfuerzos térmicos
- esfuerzos dieléctricos
- esfuerzos mecánicos

Se hablará del más importante, los esfuerzos dieléctricos, es decir, la tensión transitoria de restablecimiento.

Como bien se ha explicado antes, cuando se corta una corriente aparece una tensión entre los contactos del interruptor (TTR), esto hace que dicho interruptor sufra esfuerzos dieléctricos

La tensión que puede soportar un equipo es función de su duración. No es la misma la tensión que se precisa para producir la ruptura si se aplica durante 1 minuto que si se aplica durante 1 hora o si son ondas más cortas, como las que se producen durante la maniobra de interruptores (SIL) o durante la caída de un rayo (BIL)



BIL: Lightning Impulse Level  
SIL: Switching Impulse Level

Figura 2.10: Gráfica que muestra los impulsos tipo maniobra y tipo rayo [1].

## 2.5. Normativa

Las siguientes figuras que se citan proceden de la norma española de aparata de alta tensión (norma 62271-100.2011) [3]:

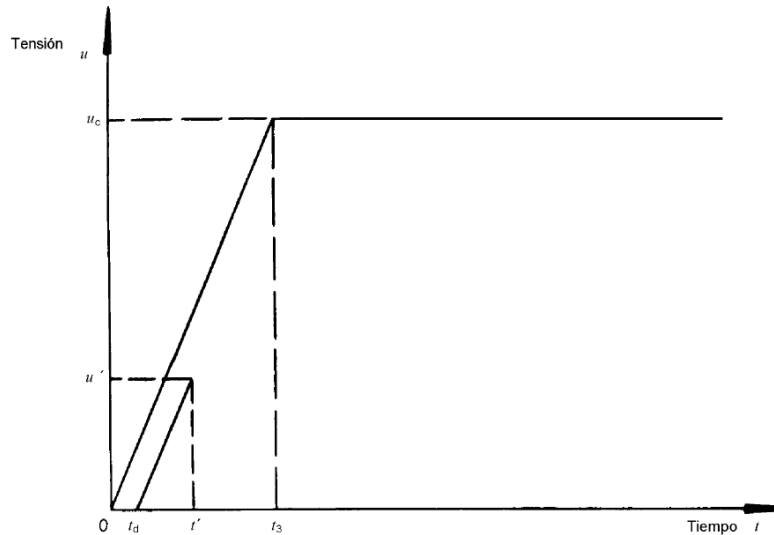
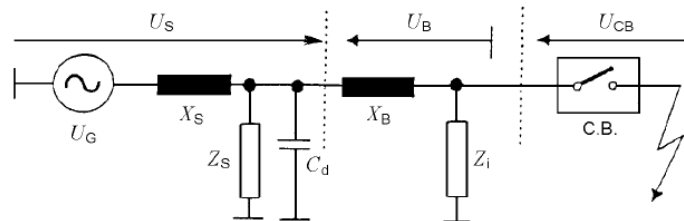


Figura 2.11: Representación de una TTR especificada de cuatro parámetros y de un segmento de retardo para las secuencia de ensayos de T100, T60 de defecto kilométrico y de discordancia de fases (tomada de [3]).



**Legenda**

- |  |   |
|--|---|
| C.B. Interruptor automático  | $C_d$ Capacidad del tiempo de retardo lado alimentación         |
| $U_G$ Tensión de alimentación  | $Z_S$ Elementos de control de la TTR lado alimentación          |
| $U_B$ Tensión en los bornes del juego de barras                        | $Z_i$ Elementos de control de la TTRI                           |
| $U_{CB}$ Tensión en los bornes del interruptor automático              | $X_S$ Reactancia a la frecuencia industrial lado alimentación   |
| $U_S$ Tensión en los bornes de la reactancia del lado de la alineación | $X_B$ Reactancia del juego de barras a la frecuencia industrial |
- NOTA Si se utiliza una inductancia concentrada para  $X_S$  los elementos de control de la TTRI pueden ser conectados en paralelo a esta inductancia.

Figura 2.12: Representación de una TTR especificada por una traza de referencia de dos parámetros y por un segmento de línea definiendo el retardo (tomada de [3]).



## **3. SIMULACIÓN DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS**

### **3.1. Introducción**

El Fenómeno de Transitorios Electromagnéticos [4] es la interacción instantánea de energías almacenadas en campos eléctricos y magnéticos que aparecen tras una perturbación del equilibrio existente en la red, creándose así variaciones instantáneas de corriente y tensión. Este a menudo es el principal responsable del fallo de materiales aislantes y equipamientos.

Por tanto, para prevenir daños es muy importante el estudio y simulación de estos transitorios, de forma que se pueda encontrar una solución que aminore la cuantía de las sobretensiones o sobrecorrientes, y en caso de que no exista se puedan diseñar los equipos de protección pertinentes (protecciones de sobreintensidad, pararrayos, etc.).

### **3.2. Tipos de simuladores**

Para estudiar este fenómeno se utilizan softwares de calidad tales como:

- EMTP-ATP
- PSS/E
- SIMPOWER SYSTEMS
- PSCAD
- PSIM

En lo que sigue se dará una breve panorámica de todos ellos para justificar la elección de la herramienta utilizada en la realización en el presente Trabajo Fin de Grado.

- EMTP-ATP: Es un programa de ordenador el cual se utiliza para el estudio de circuitos eléctricos, principalmente de fenómenos transitorios. El programa permite modelar matemáticamente sistemas eléctricos, mecánicos y de control, monofásicos y polifásicos.

EMTP [5] ha sido desarrollado especialmente para problemas de sistemas de potencia, pero algunos de sus métodos tienen aplicaciones en el análisis de circuitos electrónicos. Programas como EMTP (Electromagnetic Transient Program), durante los últimos años, han cogido bastante fuerza con respecto a otros tipos de software de características similares y se ha establecido como una de las herramientas más usadas y aceptadas a nivel global para representar, simular y modelar transitorios electromagnéticos en sistemas eléctricos de potencia. Una característica importante de estos programas es que utilizan un método de integración de paso único (utilizando, las reglas de integración trapezoidal y Euler) para resolver las ecuaciones diferenciales de los componentes del sistema en el dominio del tiempo. Sin embargo, la gran limitación que se puede encontrar en este tipo de software es el excesivo tiempo de cálculo cuando se seleccionan pasos de integración muy pequeños para simular sistemas eléctricos de

gran tamaño. Por lo tanto, para superar este obstáculo, expertos en la materia han propuesto la necesidad de nuevos tipos de programas EMTP capaces de llevar a cabo simulaciones de paso de integración variable con múltiples pasos de tiempo en redes eléctricas.

Aunque el programa puede ser adquirido sin costo, ATP no es del dominio público, se requiere una licencia antes que los programas puedan ser recibidos por el interesado.

Una de las grandes ventajas del ATP es la gran cantidad de modelos que incorporan en sus librerías (por ejemplo, en un transformador va desde transformadores ideales a transformadores saturables multidevanado con capacidad entre arrollamientos y entre arrollamientos y tierra, numerosos modelos de líneas áreas, elementos de medida, etc.). Un inconveniente importante es que no todos los modelos funcionan lo bien que deberían funcionar, por lo que hay que tener un conocimiento de transitorios electromagnéticos para determinar si la solución obtenida es coherente con lo esperado o no.

En la figura 3.1 se muestran los elementos de la librería de ATP, agrupados por categorías:

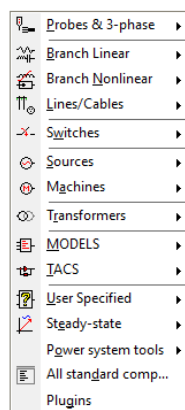


Figura 3.1: Menú de ATP para crear todo tipo de modelo de líneas.

- **PSS/E**: el programa PSS/E [6] (Power System Simulator for Engineering) está formado por un conjunto de módulos para la simulación de sistemas eléctricos en condiciones de régimen permanente y régimen dinámico. Así, permite realizar estudios de flujos de potencia, análisis de contingencias, despacho económico, flujo óptimo de potencia (OPF) análisis de faltas, reducción de redes, estudios de estabilidad dinámica, estudios lineales de red, etc.

El software se estructura en un conjunto de actividades que permiten ejecutar diferentes acciones. La adaptación de PSS/E al entorno gráfico ha hecho posible la obtención de un entorno de trabajo más amigable, permitiendo al usuario acceder fácilmente a las actividades más comunes, mediante un conjunto de botones y menús desplegables. PSS/E precisa, para trabajar, diferentes tipos de ficheros. Así, la información relativa a la topología del sistema y características técnicas de los elementos que lo componen (nudos, cargas, generadores, líneas, etc.) se guarda en ficheros de texto .raw (solo contiene datos para el flujo de potencias), o en ficheros

binarios .sav (contiene datos tanto para flujo de potencias como para análisis de faltas), que requieren menor espacio de memoria; mientras que el diagrama unifilar se almacena en ficheros .sld.

Para la realización de estudios de faltas es necesario incorporar la información de las impedancias de secuencia del sistema, contenida en ficheros .seq (solo contiene datos para análisis de faltas).

Desde su introducción en 1976, ha evolucionado desde un simple tipo de comando de líneas a un programa que analiza, optimiza y simula sistemas de potencia y puede encargarse tanto de modelado de sistemas dinámicos y probabilísticos.

El PSS/E resuelve los problemas utilizando cálculo fasorial, por lo que no es adecuado para el cálculo de transitorios muy rápidos (de duración inferior a un ciclo de red) en los que las magnitudes pudieran no ser sinusoidales. Tampoco permite estudiar en detalle circuitos con semiconductores.

Este software, está distribuido en España por la empresa alemana Siemens. El programa es de pago aunque existe una versión gratuita con un número limitado de nodos.

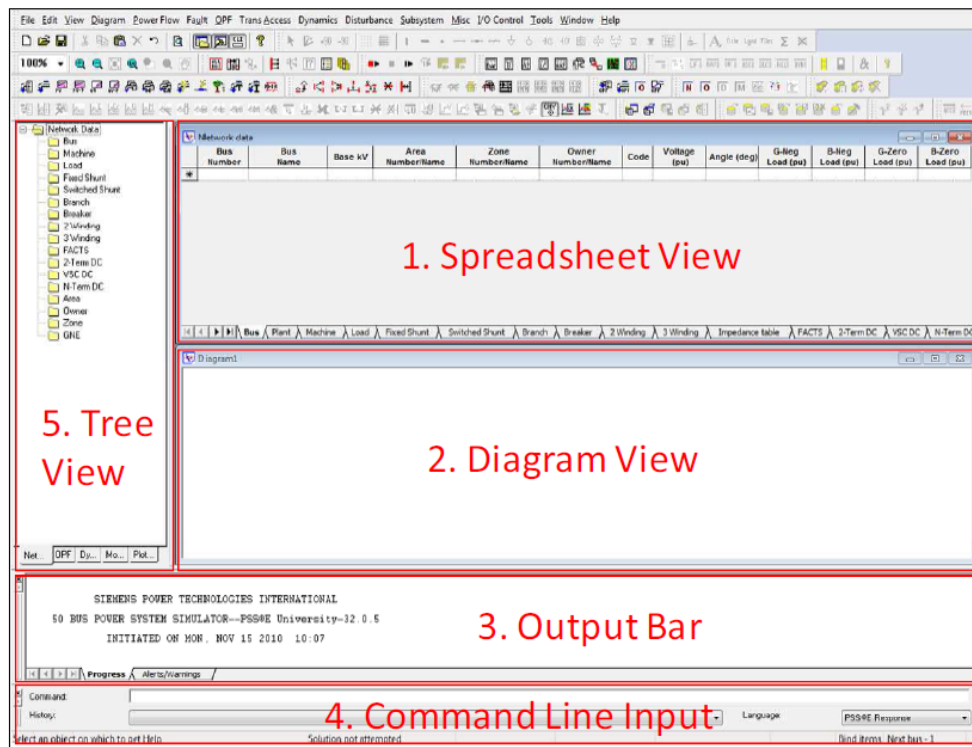


Figura 3.2: pantalla de inicio de PSS/E [6].

- **SimPower Systems:** Para hablar de esta herramienta debe hacerse referencia primeramente al programa Matlab [7], ya que es una toolbar dentro de dicho programa.

Matlab es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Entre el gran abanico de posibilidades que este software permite realizar, se encuentra la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

Dentro de Matlab se encuentra un software adicional llamado Simulink (plataforma de simulación multidominio), a su vez dentro de Simulink aparece con Simpower Systems. SimPower System diseñado para permitir a los científicos e ingenieros construir y simular de forma rápida y fácil modelos de sistemas de potencia. Este sistema utiliza el entorno y las herramientas de Simulink. El número de modelos de transformador o de modelos de líneas de parámetros distribuidos es muy inferior al que ofrece ATP Draw.

- **PSCAD:** Es una herramienta [8] que deriva de los softwares conocidos como CAD (computer-aided design) cuyo significado en español es, diseño asistido por ordenador.

Esta herramienta asiste a ingenieros, arquitectos y diseñadores para el modelaje tanto en 2D como en 3D.

PSCAD se centra en el modelaje de sistemas eléctricos de potencia en instalaciones industriales y comerciales.

Uno de los puntos fuertes del PSCAD es su librería de componentes, por ejemplo:

Resistencias (R), bobinas (L), condensadores (C) Bobinas acopladas y transformadores, tanto monofásicos como trifásicos, líneas aéreas y cables, fuentes de tensión e intensidad interruptores y conmutadores componentes de electrónica de potencia como diodos, tiristores e IGBT Funciones de control digital y analógico ,máquinas de continua y alterna, con sus sistemas de excitación, regulación de velocidad y sistemas inerciales medidores convertidores electrónicos, como rectificadores, inversores, HVDC y SVC.

Para utilizar este programa se requiere una licencia comercial, por lo que no es un software de libre disposición, aunque existe una versión libre con un número limitado de nodos.

- **PSIM:** Es un software [9] de simulación de circuitos electrónicos diseñados específicamente para electrónica de potencia. PSIM también es utilizado para control digital, diseño de motores, etc. Desarrollado por Powersim, PSIM usa análisis nodales y métodos trapezoidales de integración.

PSIM es utilizado por la industria para investigaciones y desarrollo de productos, también se utiliza en centros educativos para investigación y enseñanza.

### **3.3. Conclusión**

A la vista de todo lo anterior, el software que se utilizará será el ATPDraw, por dos razones; en primer lugar, por su gratuidad y en segundo lugar por el gran número de librerías que incorpora.

Por esa razón éste es el software en el que se han desarrollado la mayor parte de las simulaciones utilizadas en la asignatura Instalaciones Eléctricas.

## **4. MODELADO DE LÍNEAS EN ATP**

### **4.1. Introducción**

En una línea eléctrica existen efectos resistivos, inductivos y capacitivos. La forma de tener en cuenta esos efectos depende de para qué tipos de estudios se precisan los modelos y depende de la longitud de la línea.

Para los estudios de energización de las líneas (y otros estudios de conexión y desconexión de equipos en tiempos muy cortos) la impedancia que debe tenerse en cuenta es la Impedancia Característica o Impedancia de Onda, que se define como

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Donde L y C son la inductancia por unidad de longitud de la línea y la capacidad por unidad de longitud de la línea. Para una mayor precisión del estudio puede tenerse en cuenta también la resistencia de la línea y las conductancias en paralelo con las capacidades parásitas de las líneas. Los modelos utilizados son modelos de parámetros distribuidos en los que la línea es discretizada en secciones infinitesimales.

Sin embargo, para estudios de regímenes permanentes y de regímenes transitorios no focalizados en la energización o desenergización del sistema, se emplea la Impedancia de Línea. En estos casos se emplean modelos de parámetros concentrados.

Los elementos que deben tenerse en cuenta en la Impedancia de línea dependen de la longitud de la misma. Para líneas muy cortas (hasta 80 km y 69 kV) es suficiente con considerar tan sólo la resistencia e inductancia de la línea, despreciando la capacidad de la misma y frecuentemente se acude a un modelo de parámetros concentrados.

Para el caso de líneas de longitud media (hasta 240 km) es importante tener en cuenta, además los efectos capacitivos.

El objetivo de este capítulo es presentar los modelos de líneas disponibles en ATP-Draw y compararlos entre sí, de forma que se elija un modelo que será el que se utilice para posteriores estudios. Para comparar los diferentes modelos entre sí estudiaremos la energización de una línea larga en vacío. Para este estudio deben tenerse en cuenta los índices de reflexión [10].

Como se estudiarán los modelos en línea abierta, en el extremo de línea la intensidad no puede seguir su camino, pero como debe cumplirse la primera ley de Kirchhoff al llegar a ese punto, las cargas eléctricas deben regresar a la fuente por el mismo camino que llegó:

$$\rho = \frac{\infty - Z_{C1}}{\infty + Z_{C1}} = 1$$

Por este caso, el coeficiente de reflexión de la tensión es 1, de modo que la onda de tensión reflejada es igual a la incidente.

En los apartados que siguen se analizará la respuesta de los diferentes modelos y se seleccionará aquel cuya respuesta que se asemeje más a las presentadas en la bibliografía.

En la figura 4.1 se muestra el menú Líneas/Cables de EMTP. En próximos apartados se presentan de forma breve los diferentes modelos de línea disponibles en EMTP/ATP.

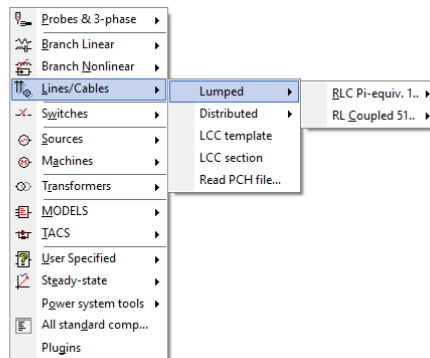


Figura 4.1: Modelos de líneas dentro del menú de ATP.

Para las siguientes simulaciones el tiempo de viaje de las ondas en la línea es de 0,53 ms. El paso de integración elegido fue de 1 μs, y se ha simulado un tiempo total de 150 ms.

## 4.2. Modelo en pi

Son modelos de línea de longitud media, es decir, de 80 Km hasta 240 Km. Este modelo se encuadra dentro de los modelos de parámetros concentrados.

Las líneas eléctricas se representan mediante su modelo en pi. Los parámetros que definen la línea son R, X y B, donde:

- R: resistencia de la línea
- X: reactancia de la línea
- B: susceptancia de la línea Los nudos entre los que se encuentra la línea se denominan i y k.



Component: LINEPI3S

Atributos

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R0	Ohm/m	1	In	1	
L0	mH/m	1	Out	1	
C0	$\mu$ F/m	1			
R+	Ohm/m	1			
L+	mH/m	1			
C+	$\mu$ F/m	1			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Lines  
Length 1 [m]  Hide  \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 4.4: Ventana donde se introducen datos de  $Z1$ ,  $Z2$  y  $Z0$  en una línea en PI.

Este modelo es apropiado para el estudio de regímenes permanentes y de regímenes transitorios de largo período, pero no es adecuado para el estudio de la energización y desenergización de líneas, salvo que sean muy cortas, por tanto, en este TFG no se utilizará.

### 4.3. Modelo de línea traspuesta

Las líneas aéreas de transmisión de la energía eléctrica [11] son líneas de alta tensión, trifásica, y carecen de cable de neutro (tres conductores). Muchas veces se podrán ver más de 3 conductores, 6 por ejemplo, esto se debe a que es una disposición dúplex, es decir, dos conductores por fase, pero sigue siendo trifásica. Estas líneas que recorren grandes distancias tienen reactancias distribuidas, tanto inductivas como capacitivas. Debido a la diferencia en la configuración geométrica de una y otra fase las reactancias de las tres fases son distintas entre sí, para anular estas diferencias se realizan trasposiciones. La trasposición consiste en rotar la posición de fases cada tercio del recorrido.

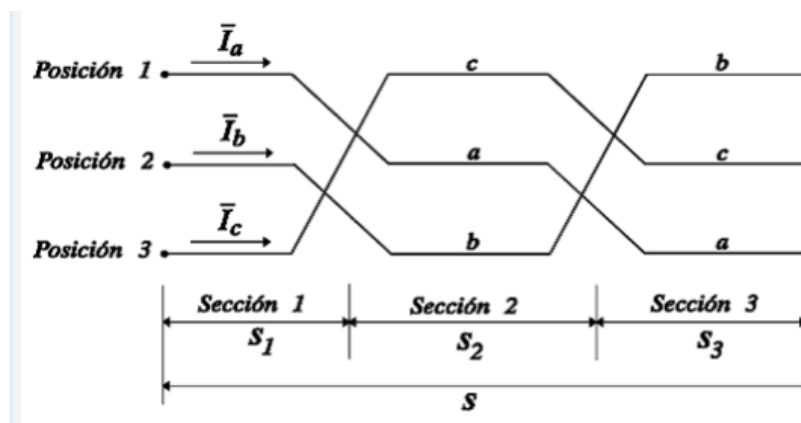


Figura 4.5: trasposición de línea [11].



Para simular este modelo en ATP-Draw, en el menú de líneas, se selecciona el modelo de "Clarke". Se configura la longitud de dicha línea, y la resistencia por unidad de longitud.

Los datos introducidos para realizar la simulación se muestran en la figura 4.6:

DATA	UNIT	VALUE
R/l	Ohm/m	0
Z		500
v		300000000

NODE	PHASE	NAME
From	A	B
To	1	C

Length: 160000 (m)  
Output: No  
I/LINE:  L', C'  Z, v  Z, tau  
Conductance:  G=0  G=R'C/L

Figura 4.6: ventana donde se introducen los datos del modelo de línea traspuesta.

Para comprobar la bondad del modelo para simular transitorios se estudiará la energización de una línea larga de parámetros distribuidos. El esquema del circuito, con una fuente de alimentación de 10000V, es el siguiente:

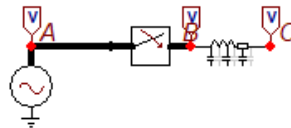


Figura 4.7: esquema del circuito a simular con línea traspuesta.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.8:

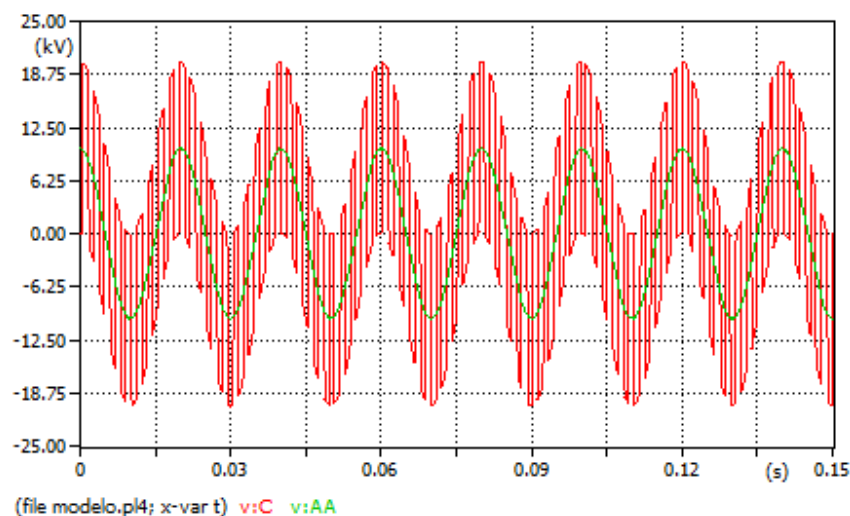


Figura 4.8: grafica obtenida a partir de la simulación del esquema de la figura 4.7.

Los resultados obtenidos son acordes con lo que se describe en la bibliografía: Al estar abierta la línea en su extremo remoto la tensión en el nudo C es el doble ( onda de color rojo) de la proporcionada por la fuente de corriente alterna (onda de color verde) aplicada en el nudo A, debido a que el índice de reflexión es 1.

A pesar de ello este modelo no es adecuado para nuestros estudios ya que la tensión nunca se amortigua, cosa que sí ocurre en una línea real.

#### 4.4. Modelo Bergeron

Este método de parámetros distribuidos [12] se basa en la solución del dominio del tiempo de las ecuaciones diferenciales de una línea de transmisión sin pérdidas.

El modelo se muestra en la figura 4.9 donde se ha sustituido la línea de cara a un observador situado a al principio de la misma por su equivalente Norton. Lo mismo se puede hacer para un observador situado en el extremo final de la línea. La corriente en los extremos inicial y final de la línea en cada instante de tiempo es:

$$i_{km}(t) = \frac{1}{Z_c} v_k(t) + i_k(t - \tau) \quad (1)$$

$$i_{mk}(t) = \frac{1}{Z_c} v_m(t) + i_k(t - \tau) \quad (2)$$

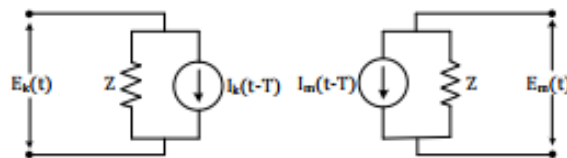


Figura 4.9: circuito del modelo Bergeron [12].

La simulación de este modelo en ATP-Draw se realiza a partir de la selección de “LCC template” en el menú de líneas.

Para configurar este modelo debe elegirse un tipo de torre e introducir los datos tanto del conductor como las dimensiones de dicha torre y los valores de frecuencia, longitud y resistencia. También es importante tener en cuenta el efecto pelicular:

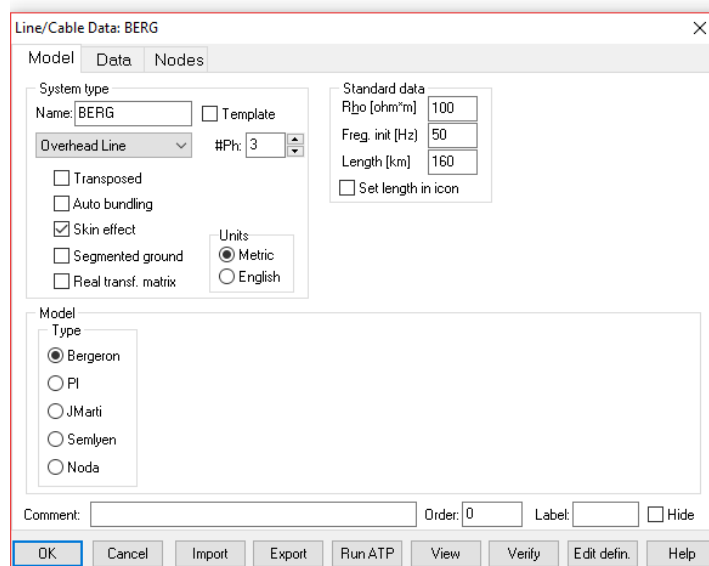


Figura 4.10: ventana donde se selecciona el modelo Bergeron y se introducen los datos de resistencia, frecuencia y longitud.

En la pestaña "data" se introduce los datos de radio interior y exterior del conductor y las dimensiones de la torre seleccionada:

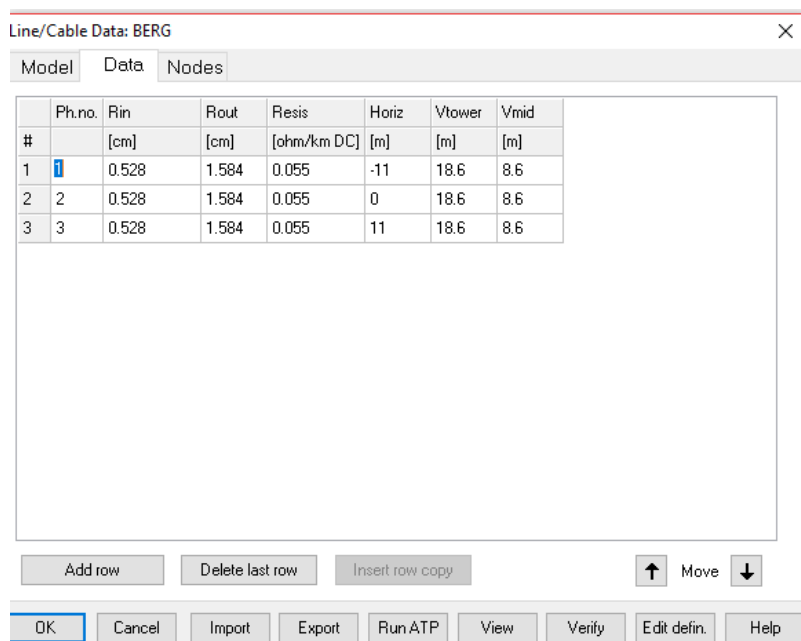


Figura 4.11: ventana donde se introducen los datos del conductor y las dimensiones de la torre seleccionada.

Los datos de la imagen anterior se cogieron del siguiente ejemplo[13]:

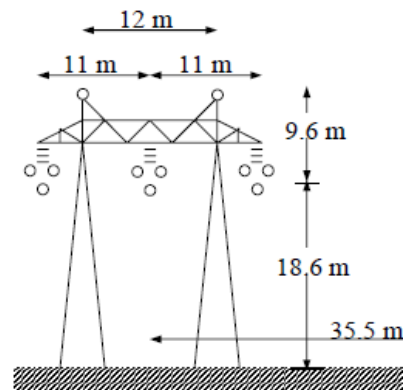


Figura 4.12: Ejemplo de torre utilizado para los datos introducidos en la Figura 4.11 [13].

El esquema del circuito utilizado para la simulación ha sido el de la figura 4.13. La fuente de alimentación se ha tomado de 10000 V.

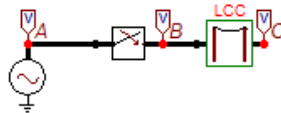


Figura 4.13: esquema del circuito a simular con el modelo Bergeron.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.14:

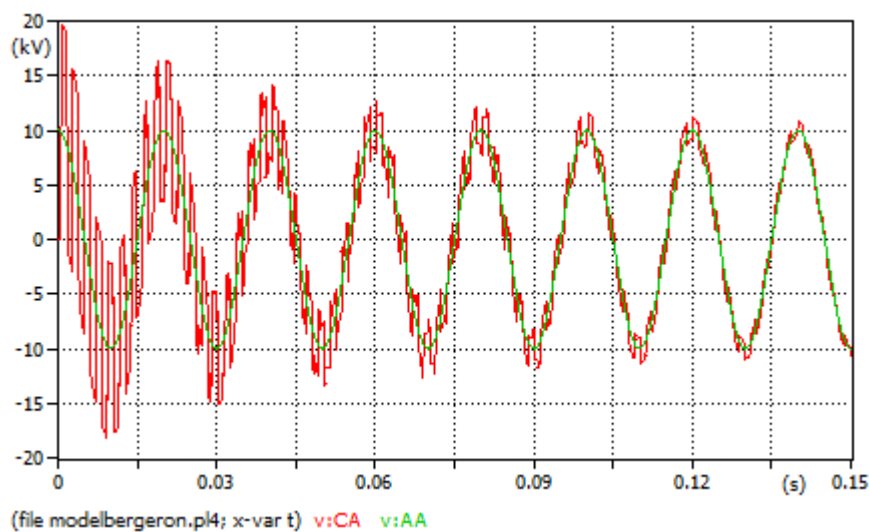


Figura 4.14: Gráfica obtenida a partir de la simulación del esquema de la figura 4.13.

Al igual que en el caso anterior, la tensión en el extremo remoto de línea (onda de color rojo, correspondiente al nodo C) se duplica, llegando a valer 20 kV. Sin embargo, como se aprecia en la figura, en este caso la tensión en el extremo remoto se va amortiguando a medida que pasa el tiempo.

Es un modelo que se aproxima bastante a la realidad pero se producen ciertas anomalías que (se muestran en la figura 4.15) no corresponden a la realidad. Además de que tarda más en amortiguarse.

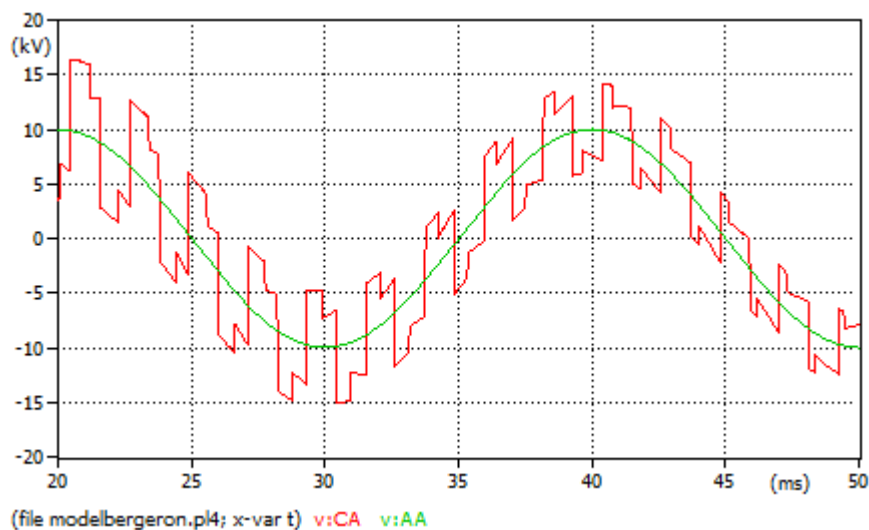


Figura 4.15: escalones producidos durante la sobretensión en modelo de Bergeron.

#### 4.5. Modelo J.Martí

La metodología usada por J.Martí [14] evita problemas numéricos de estabilidad, y es útil para un amplio rango de frecuencias, de 0 Hz a 106 Hz. Es un modelo dependiente de frecuencia pues los parámetros del cable y la línea se calculan primeramente en el dominio de la frecuencia y posteriormente en el dominio de fase.

A diferencia del modelo de Bergeron, la línea es sustituida por su equivalente Thevenin tanto para un observador situado en el principio de la misma como para un observador situado en el extremo remoto de la misma.

Debido a la naturaleza distribuida de las pérdidas y a la dependencia en frecuencia de los parámetros, es más conveniente desarrollar las ecuaciones de línea en el dominio de la frecuencia, como se muestra en las siguientes ecuaciones:

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

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

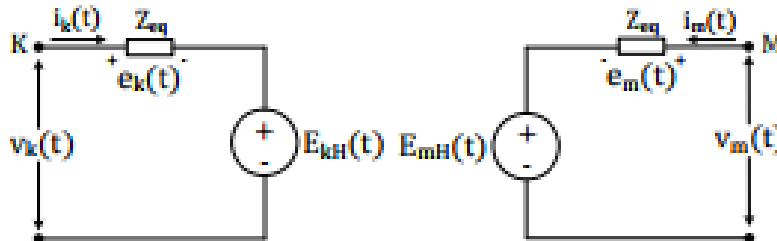


Figura 4.16: Circuito representativo del modelo J.Martí [14].

La simulación de este modelo en ATP-Draw se realiza a partir de la selección de “LCC template” en el menú de líneas.

Para la configuración de este modelo debe elegirse un tipo de torre e introducir sus dimensiones y medidas de los conductores. En este caso se ha utilizado el mismo ejemplo que el modelo de Bergeron (figura 4.12), con lo que la pantalla de datos de entrada se muestra en la figura 4.17:

Figura 4.17: ventana donde se selecciona el modelo J.Martí.

El esquema del circuito utilizado para la simulación ha sido el de la figura 4.18. La fuente de alimentación se ha tomado de 10.000 V.

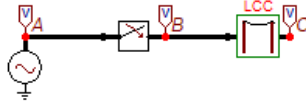


Figura 4.18: Esquema del circuito con el modelo de J.Marti.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.19:

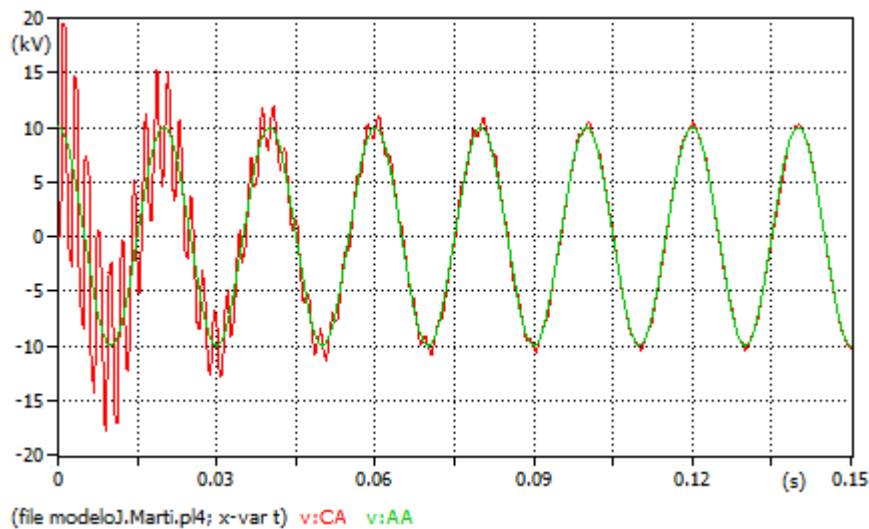


Figura 4.19: grafica que se produce al simular el esquema con el modelo de J.Marti.

Se aprecia como la gráfica se va amortiguando a medida que pasa el tiempo. A diferencia del modelo Bergeron, las anomalías descritas anteriormente (figura 4.15) en este caso no se producen y las sobretensiones duran menos.

En la figura 4.20 se aprecia que las anomalías producidas en el modelo Bergeron (figura 4.15), en el modelo Martí no están:

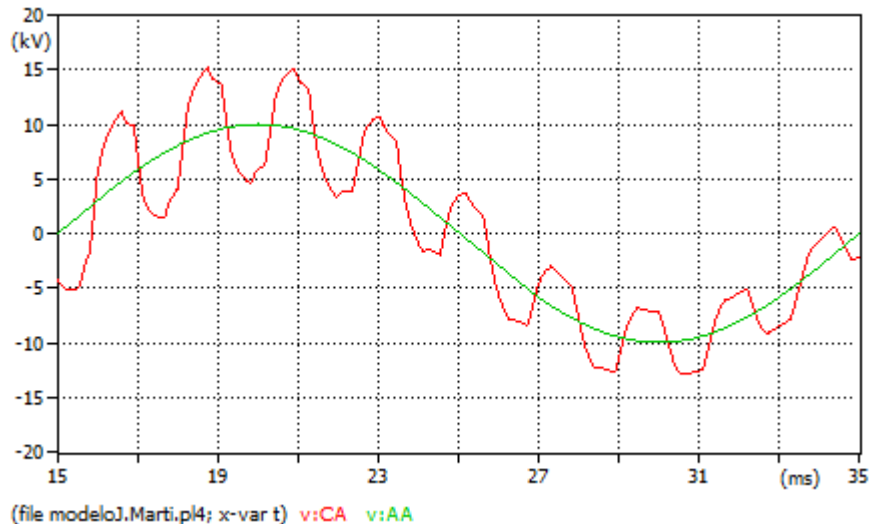


Figura 4.20: imagen que muestra que no se producen anomalías en el modelo de J.Martí.

#### 4.6. Modelo Semlyen

El modelo Semlyen, al igual que el de J.Martí, es un modelo dependiente de la frecuencia.

Este modelo [14] aproxima la impedancia característica y la constante de propagación mediante funciones exponenciales.

En la práctica, mediante este método, resulta muy difícil obtener unos resultados exactos ya que los cálculos se vuelven muy complicados y puede ocasionar errores de calculación.

La simulación de este modelo en ATP-Draw se realiza a partir de la selección de “LCC template” en el menú de líneas.

Para la configuración de este modelo debe elegirse un tipo de torre e introducir sus dimensiones y medidas de los conductores. En este caso se ha utilizado el mismo ejemplo que el modelo de Bergeron y J.Martí (figura 4.12), con lo que la pantalla de datos de entrada se muestra en la figura 4.21:



Line/Cable Data: S

Model Data Nodes

System type  
Name: S  Template  
Overhead Line  #Ph: 3  
 Transposed  
 Auto bundling  
 Skin effect  
 Segmented ground  
 Real transf. matrix  
Units:  
 Metric  
 English

Standard data  
Rho [ohm\*m] 100  
Freq. init [Hz] 50  
Length [km] 160  
 Set length in icon

Model  
Type  
 Bergeron  
 PI  
 JMarti  
 Semlyen  
 Noda  
Data  
Decades 10 Points/Dec 10  
Freq. matrix [Hz] 5000 Freq. SS [Hz] 50  
 Use default fitting

Comment: Order: 0 Label:  Hide

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

Figura 4.21: ventana donde se selecciona el modelo Semlyen.

El esquema del circuito utilizado para la simulación ha sido el de la figura 4.22. La fuente de alimentación se ha tomado de 10.000 V.

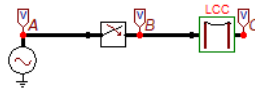


Figura 4.22: esquema del circuito con el modelo de Semlyen.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.23:

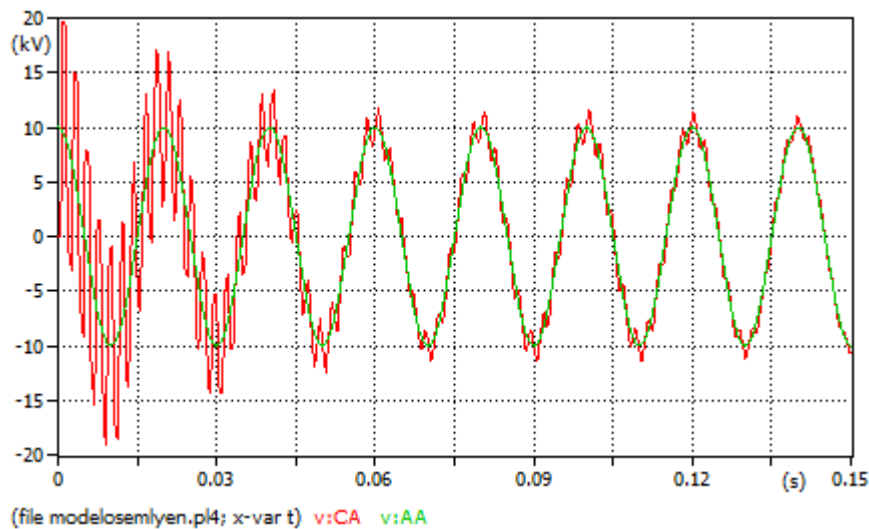


Figura 4.23: gráfica que se produce al simular el esquema con el modelo de Semlyen.

Se aprecia como la gráfica se va amortiguando a medida que pasa el tiempo. Al ser un modelo dependiente de la frecuencia al igual que el de J.Martí, los resultados obtenidos son similares.

La diferencia es que en el modelo de J.Martí tarda menos en amortiguarse que en el modelo Semlyen, por lo que la sobretensión dura menos

#### **4.8. Conclusiones del estudio realizado**

En este capítulo se han expuesto de forma breve los diferentes modelos disponibles en ATP-Draw para simular el comportamiento de una línea de distribución.

Para poder comparar el comportamiento de cada uno de los modelos se ha simulado el transitorio de energización de una línea con el extremo remoto abierto.

A la hora de elegir uno de estos modelos para realizar posteriores simulaciones el más adecuado es el modelo de J.Martí ya que es el que más se aproxima a la realidad y proporciona una información bastante cercana a lo que se produciría en un caso real. Por eso éste será el utilizado en este trabajo Fin de Grado.

## **5. SIMULACIONES REALIZADAS**

### **5.1. Diferentes casos de estudio**

Tras elegir el modelo de línea que será utilizado para realizar los diferentes estudios de este Trabajo Fin de Grado (capítulo 5), en este capítulo se estudiará los valores de la TTR en diferentes casos y ver cuál es la forma de onda asociada a cada caso.

Como se expuso en el apartado 2.3, la TTR es la tensión que aparece entre los contactos del disyuntor una vez extinguido el arco. Es de vital importancia este estudio ya que puede llegar a ser una tensión muy elevada y el disyuntor en cuestión debe estar diseñado para soportarla.

Mediante ATP se simularán las faltas más peligrosas que puede sufrir un disyuntor. Los casos a analizar son los siguientes:

- Cortocircuito en bornes de un transformador.
- Cortocircuito al final de una línea corta.
- Cortocircuito al final de una línea larga.
- Cortocircuito al final de una línea infinitamente larga.

### **5.2. Características de los elementos considerados en la simulación**

En los cuatro estudios, las características del transformador del principio de línea y de la línea de transmisión serán los mismos.

Como fuente de alimentación se utilizará una fuente trifásica de 66 kV de tensión eficaz de línea.

El transformador que se utilizará tiene una relación de transformación de 66/10 kV y una potencia nominal de 100 MVA. Conexión de los arrollamientos YNd1. Las pérdidas en el hierro normales para un transformador de esta potencia serían 100 kW (un 0,1 % de la potencia nominal), la corriente de vacío normal para un transformador de esta potencia sería un 0,2% de la corriente nominal, la impedancia de cortocircuito porcentual habitual para un transformador de esta potencia sería de un 14% y las pérdidas en el cobre 250 kW (un 0,25% de la potencia nominal).

Para modelar el transformador se ha utilizado el modelo BCTRAN de ATP, la pantalla de entrada de datos se muestra en la figura 5.1:

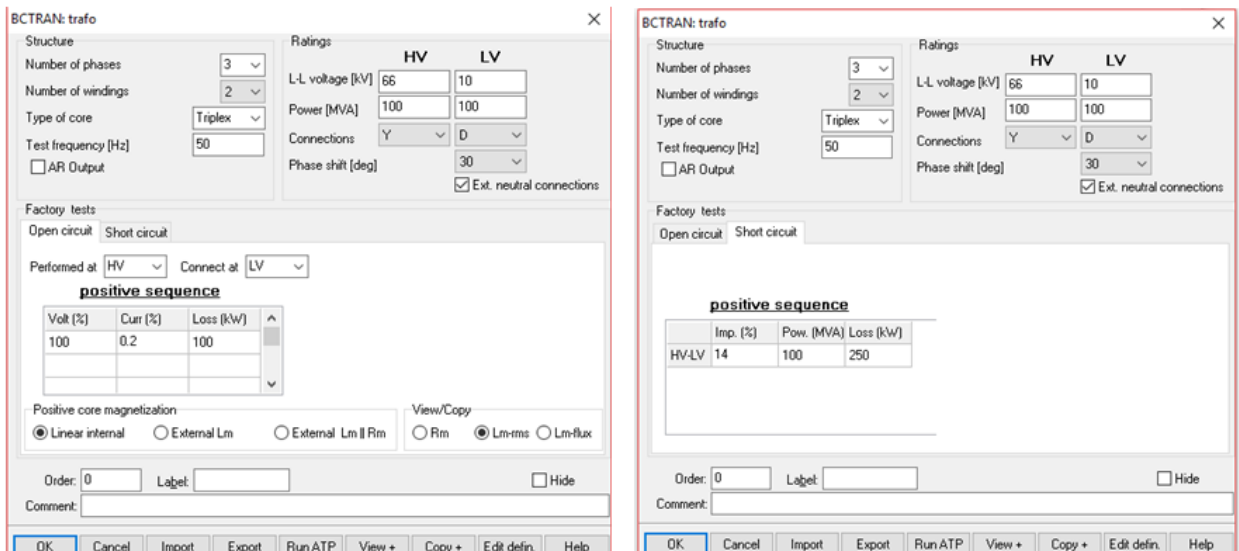


Figura 5.1: ventana donde se introducen los datos del transformador BCTRAN.

Dado que el modelo del transformador no incluye capacidades, para modelar la capacidad parásita entre el secundario del transformador y el núcleo magnético (puesto a tierra) se ha conectado una capacidad en bornes del transformador. El valor de la capacidad parásita se ha deducido de los protocolos de ensayo en fábrica del transformador. Como un condensador no admite variaciones instantáneas de tensión se ha conectado una resistencia de un valor muy reducido en serie con el mismo. El valor de la inductancia del transformador (considerada para el lado de 10kV) es la siguiente:

$$X_{cc} = \frac{(10 * 10^3)^2}{100 * 10^3} * 0,14 = 0,14 \Omega$$

Por lo que  $L_{cc}$ :

$$L_{cc} = \frac{0,14}{100 * \pi} = 4,45 * 10^{-4} H$$

Con el valor de  $L_{cc}$  (0,00045 H) hallado y el valor de la capacidad ( $C= 0,01 \mu F$ ) se puede hallar el valor de la frecuencia de resonancia para determinar el grado máximo de oscilación de dicho sistema:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L * C}} = \frac{1}{\sqrt{4,45 * 10^{-4} * 0,01 * 10^{-6}}} = 474,075 \frac{rad}{s}$$

Con lo que el valor de la frecuencia natural es:

$$f_0 = \frac{\omega_r}{2 * \pi} = \frac{474,075}{2 * \pi} = 75,39 kHz$$

Este valor indica a la frecuencia que oscilará el sistema tras el cese de la perturbación.

En la figura 5.2 se muestra el circuito equivalente del circuito de dicho transformador con la capacidad y la resistencia en serie conectados en bornes del transformador:

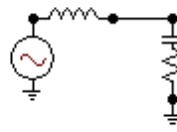


Figura 5.2: circuito equivalente de Transformador BCTTRAN con capacidad y resistencia en serie conectados en bornes.

Para modelar la resistencia ( $R= 0,01$  Ohms) y de la capacidad ( $C= 0,01$   $\mu$ F) se ha utilizado el modelo de rama RLC de 3 fases de ATP, la pantalla de entrada de datos se muestra en la figura 5.3:

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R_1	Ohms	0.01	IN1	ABC	
L_1	mH	0	OUT1	ABC	Cap
C_1	$\mu$ F	0.01			
R_2	Ohms	0.01			
L_2	mH	0			
C_2	$\mu$ F	0.01			
R_3	Ohms	0.01			
L_3	mH	0			

Figura 5.3: ventana donde se introducen los datos de la rama RLC conectada en bornes del transformador BCTTRAN.

El valor de la inductancia es 0 ya que solo nos interesa para nuestro estudio los valores de la capacidad y de la resistencia.

### 5.3. TTR de un interruptor con un cortocircuito en bornes del transformador

Para ver la TTR que produce un cortocircuito en bornes de un interruptor, se ha simulado el esquema siguiente imagen en ATP:

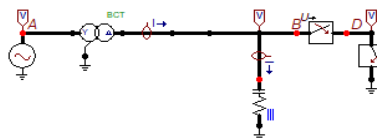


Figura 5.4: Esquema para la simulación de cortocircuito en bornes.

Para representar el cortocircuito se ha utilizado un disyuntor trifásico conectado entre el punto D de la figura 5.4 y tierra, que cierra a los 0,02 s de iniciar la simulación. El disyuntor objeto de estudio abre a los 0.0781 s.

El tiempo de la simulación es de 0,1 s.

La grafica resultante del esquema de la figura 5.4 es la siguiente:

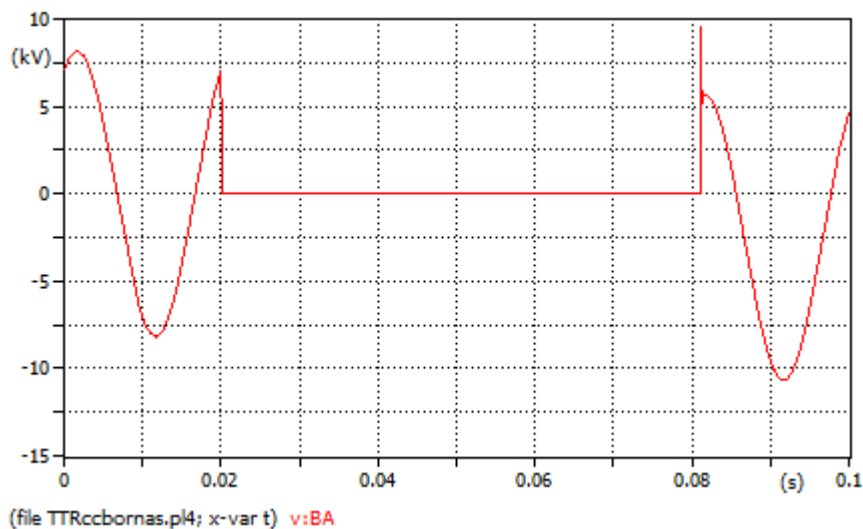


Figura 5.5: Tensión transitoria de restablecimiento debida a cortocircuito en bornes del disyuntor.

En la imagen siguiente se muestra un zoom focalizado en el instante donde se produce la TTR:

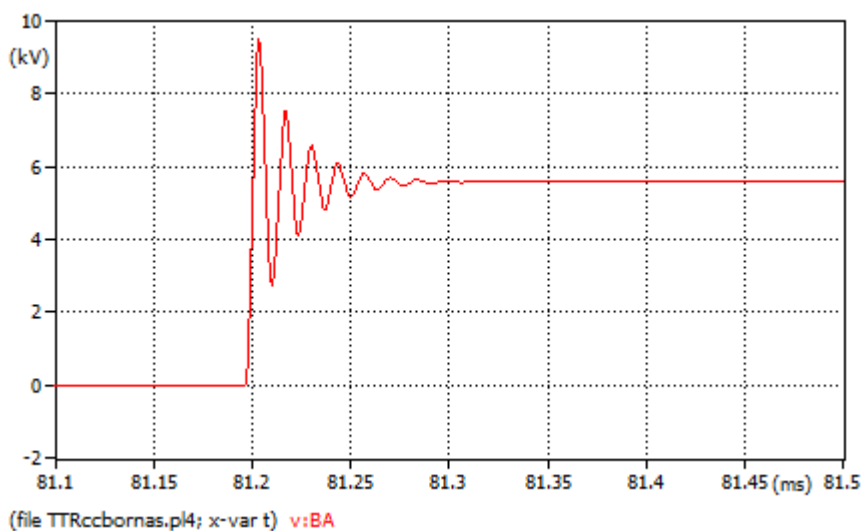


Figura 5.6: TTR producida tras la simulación del esquema de la figura 5.4.

El primer pico de tensión posterior a la apertura corresponde a la TTR (9,5 kV). Se produce en el punto B del esquema de la figura 5.4 justo después de que el arco entre los contactos de dicho disyuntor se haya extinguido.

Es importante saber si el arco se cebará, por lo que se debe saber la TSTTR (Tasa de Subida de la TTR). Para ello debe conocerse el tiempo que media entre el primer pico de tensión tras la apertura y el momento de apertura del disyuntor, el cual es de  $T_0 = 6,99 \cdot 10^{-6} \text{s}$ . Conociendo este dato ya se puede obtener el valor de la TSTTR (a partir de la ecuación de la figura 2.8):

$$TSTTR = \frac{9,5}{\frac{T_0}{2}} = 2,72 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

Cuanto menor sea  $T_0$  y mayor TTR se produzca, habrá mayor TSTTR, por tanto más posibilidades de cebado del arco.

Para comprobar la similitud de los cálculos teóricos realizados y la simulación, se comparará el tiempo que tarda en producirse un período de la frecuencia natural ( $f_0$ ) de dicho sistema.

A partir de los cálculos teóricos se obtiene:

$$T = \frac{1}{f_0} = \frac{1}{75390} = 1,32 \cdot 10^{-5} \text{ s.}$$

A partir de la simulación realizada:

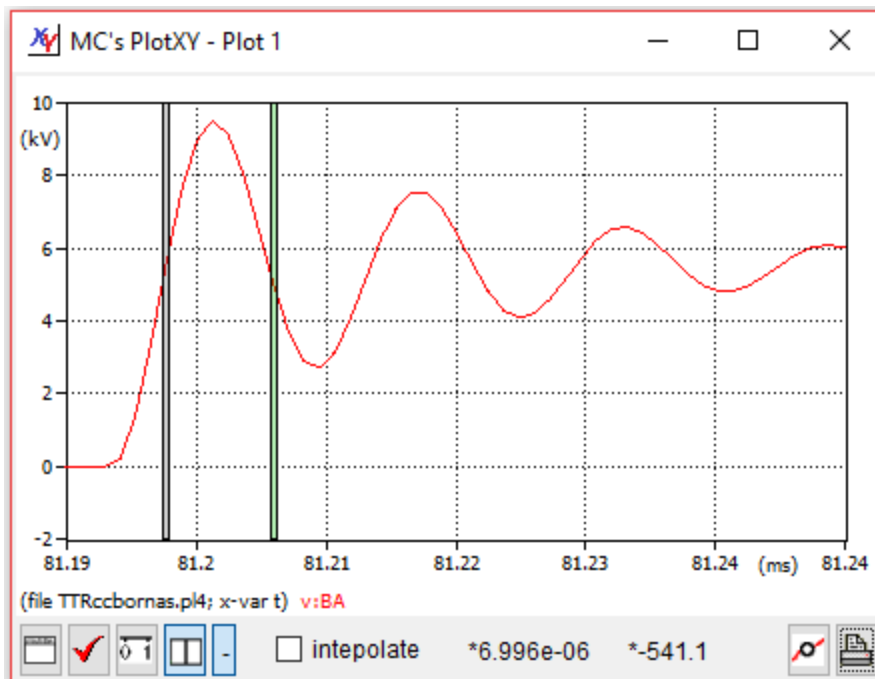


Figura 5.7: tiempo que tarda en producirse un semiperiodo de la TTR producida ( $6,99 \cdot 10^{-6} \text{s}$ ).

La duración de un semiperiodo es de 6,99  $\mu$ s. Ahora bien, si este período de tiempo se multiplica por dos se obtiene el tiempo que tarda en producirse un período completo de la oscilación:

$$T = 6,99 * 10^{-6} * 2 = 1,398 * 10^{-5} s$$

Como se observa tanto el valor obtenido por los cálculos teóricos como el obtenido en la simulación es prácticamente igual por lo que se nos está proporcionando una información bastante cercana a lo que ocurría en la realidad.

### 5.3.1. Influencia de las pérdidas en el transformador

El valor de a TTR en este caso se ve afectado por el valor de las pérdidas en el hierro ( $P_{fe}$ ) y en el cobre ( $P_{cc}$ ) del transformador.

- Para una  $P_{cu} = 250$  kW y  $P_{fe} = 200$  kW:

Como se ha indicado anteriormente, la cuantía de las pérdidas en el cobre se pueden considerar normal para un transformador de 100 MVA. Sin embargo, la cuantía de las pérdidas en el hierro es anormalmente elevada para un transformador de estas características.

Aumentando las pérdidas en el hierro hasta 200 kW se obtiene:

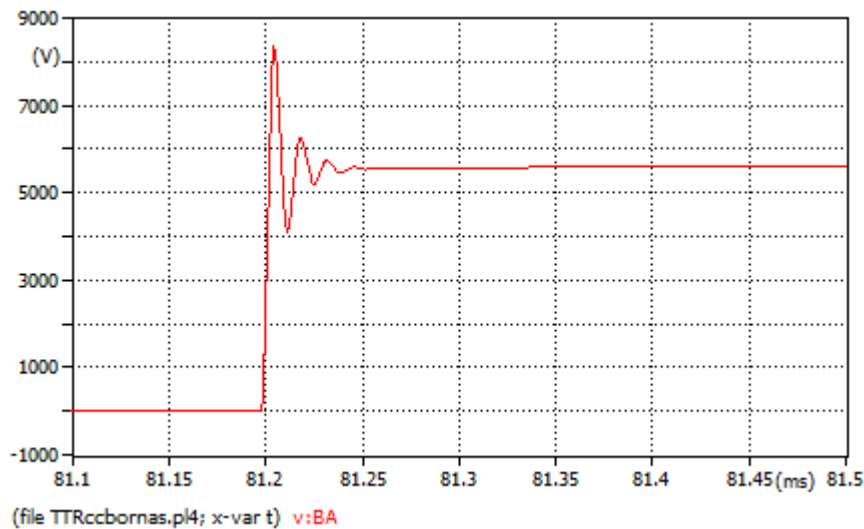


Figura 5.8: TTR que se produce con  $P_{cc} = 250$  kW y  $P_{fe} = 200$  kW.

Para este caso el valor de la TTR es de 8,35 kV, se ha reducido debido al aumento del valor de las pérdidas en el hierro del transformador. El  $T_0 = 6,99 * 10^{-6}$  s. por lo que la TSTTR es:

$$TSTTR = 2,39 \text{ kV}/\mu s$$

La TSTTR es menor que en el caso anterior ya que se produce una TTR inferior, aunque el valor de  $T_0$  es el mismo. Las posibilidades de cebado del arco se reducen.



- Para  $P_{cu} = 60 \text{ kW}$  y  $P_{fe} = 50 \text{ kW}$ :

En este caso tanto la cuantía de las pérdidas en el cobre como la cuantía de las pérdidas en el hierro es más baja de lo habitual, aproximadamente la tercera parte. Este caso, a pesar de ser poco realista se simula para acercarse a las condiciones en las que habitualmente se suelen obtener cuando se analiza el problema de forma algebraica sin utilizar herramientas computacionales.

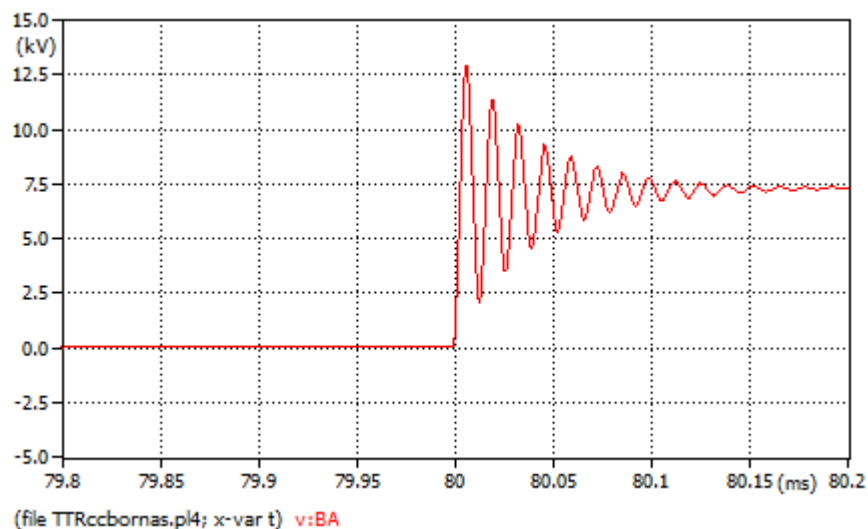


Figura 5.9: TTR que se produce con  $P_{cc} = 60 \text{ kW}$  y  $P_{fe} = 50 \text{ kW}$ .

En este caso el valor de la TTR asciende hasta los 13,07 kV y se amortigua más lentamente, por lo que tiene mayor duración, debido a una considerable disminución de las pérdidas en el cobre y en el hierro. El  $T_0 = 5,99 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ . por lo que la TSTTR es:

$$TSTTR = 4,36 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

La TSTTR es bastante superior a la de los apartados anteriores, debido a que la TTR sufre un aumento considerable y a que el valor de  $T_0$  disminuye. Existen más posibilidades de que se cebe el arco.

- Para  $P_{cu} = 30 \text{ kW}$  y  $P_{fe} = 25 \text{ kW}$ :

En este caso las pérdidas consideradas son extraordinariamente bajas, lo que acerca la simulación a los resultados que habitualmente se suelen obtener cuando se analiza el problema de forma algebraica sin utilizar herramientas computacionales.

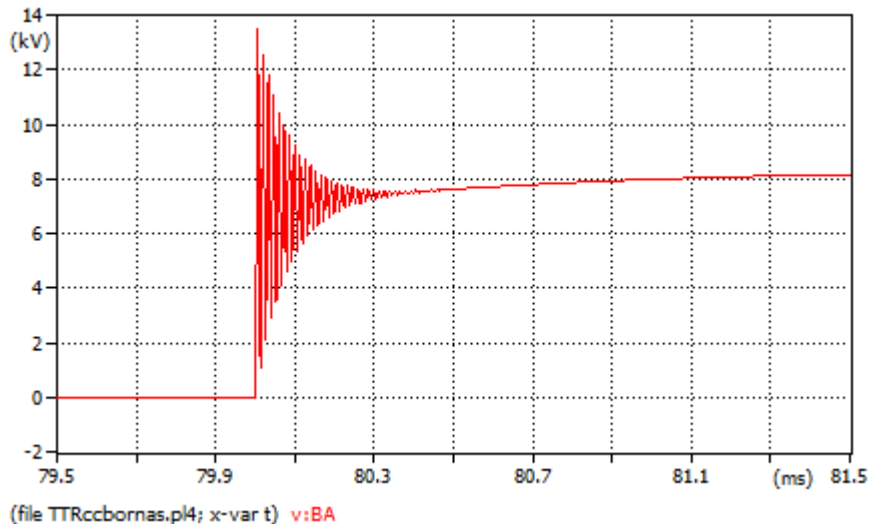


Figura 5.10: TTR que se produce con  $P_{cc} = 30 \text{ kW}$  y  $P_{fe} = 25 \text{ kW}$ .

En este caso el valor de la TTR asciende hasta los 13,59 kV y se amortigua más lentamente, por lo que tiene mayor duración, debido a una considerable disminución de las pérdidas en el cobre y en el hierro. El  $T_0 = 6,005 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ , igual que en el caso anterior por lo que la TSTTR es:

$$TSTTR = 4,53 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

La TTR que se produce es superior a las que suceden en los casos anteriores por lo que la TSTTR es la mayor de todas; por tanto, existen más posibilidades de cebado del arco.

Este caso sería el más peligroso de todos por el momento.

Como se observa en las figuras anteriores, cuanto menores sean las pérdidas en el cobre y en el hierro, mayor será la TTR que se produzca y más tiempo tardará en amortiguarse por lo que es peor para los contactos del disyuntor, porque sufre mayores esfuerzos dieléctricos. El valor máximo teórico de dicha TTR se da en el caso de que no hubiera resistencias de amortiguamiento y vale:

$$TTR = \frac{2 * \sqrt{2} * 10}{\sqrt{3}} = 16,32 \text{ kV}$$

En ningún caso de los mostrados anteriormente se llega a este valor ya que existen pérdidas en el circuito que evitan que se llegue a esta cifra (principalmente influenciado por las pérdidas en el transformador).

## 5.4. TTR de un interruptor con un cortocircuito al final de una línea larga

### 5.4.1. Teoría básica

La diferencia significativa entre una falta [15] que se produce cerca del disyuntor y la que tiene lugar a cierta distancia a lo largo de la línea de transmisión es que la impedancia de la línea no sólo limita la corriente en cierta medida, sino que, como consecuencia, en el trozo de línea entre el interruptor y la falta existe una cierta distribución de tensión. El voltaje

generado se divide a cualquiera de los lados del disyuntor en proporción a la impedancia de la fuente y de la línea.

Cuanto más lejos se produzca la falta, mayor fracción de voltaje soporta la línea. La corriente en el interruptor se extingue en el paso por cero de la corriente; en ese instante la tensión generada está próxima al máximo de la onda. Por tanto, la línea aguas abajo del interruptor, ahora desconectada del sistema, tiene momentáneamente sobre ella una distribución de carga que es máxima en el disyuntor y desciende de una manera más o menos lineal hasta llegar a cero en el punto de la falta (figura 5.11).

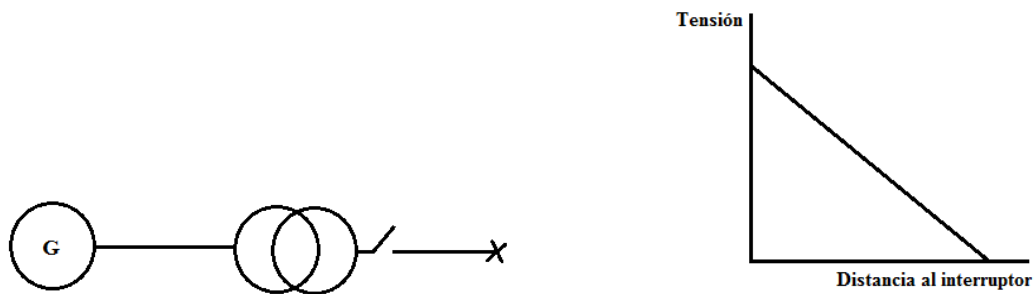


Figura 5.11: esquema con falta a una distancia del interruptor y gráfica de la tensión frente a distancia del interruptor.

Una vez que se abre el interruptor, la distribución de carga no permanece estática, sino que viaja o tratará de hacerlo en ambas direcciones a lo largo de la línea.

En el caso en estudio, la carga está de algún modo confinada en el sentido de que una onda viajera no puede continuar hacia la fuente ya que está bloqueada por el disyuntor, ni tampoco se puede propagar más allá de la falta, asumiendo que la falta es un cortocircuito.

Cuando una onda choca con una discontinuidad en una línea, inmediatamente se inicia una nueva onda reflejada, ya que las ondas iniciales inmediatamente encuentran las condiciones terminales del circuito interrumpido y del cortocircuito. Las nuevas ondas interfieren con la distribución de carga existente.

La onda que se desplaza hacia la izquierda se encontrará inmediatamente con el circuito abierto del interruptor y se reflejará con la misma amplitud y tensión. La onda idéntica que se desplaza hacia la derecha inmediatamente se encontrará con el cortocircuito y se reflejará con signo cambiado.

La tensión en el disyuntor es de especial interés por cuanto que forma parte de la Tensión Transitoria de Restablecimiento (TTR) del disyuntor tras haber interrumpido la corriente en la falta. Se verá que el terminal del lado de línea del disyuntor del circuito puede experimentar una considerable oscilación de tensión de  $+V$  a  $-V$ , en un tiempo breve. Lo que puede

perjudicar que la operación del disyuntor tenga éxito es esta rápida elevación de la tensión transitoria de restablecimiento.

En el ejemplo siguiente [16] se intenta exponer lo explicado anteriormente:

La figura 5.12 representa una red de alta tensión,  $e(t)$ , más los parámetros  $L$  y  $C$  vistos desde el interruptor, mientras que el tramo de línea entre interruptor y cortocircuito es representado por su impedancia (resistencia) característica.

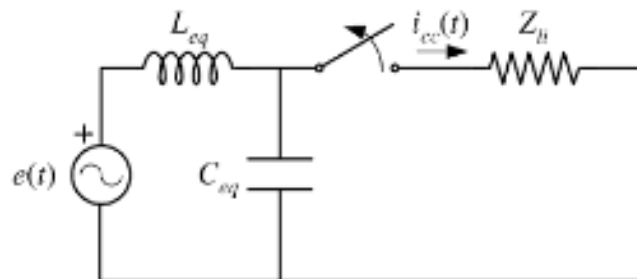


Figura 5.12: Esquema monofásico equivalente [16].

Mediante el uso del método de superposición, el circuito equivalente para este caso es el que se presenta en la figura 5.13, la TTR será la tensión que aparezca entre los terminales de la fuente de corriente. Ya que la línea se representa por una resistencia igual a su impedancia característica, lo cual quiere decir que el circuito de la figura 5.13 será válido mientras no llegue la primera onda reflejada desde el extremo en cortocircuito de la línea, lo cual proporcionará una estimación de manera más sencilla la máxima pendiente inicial de la TTR.

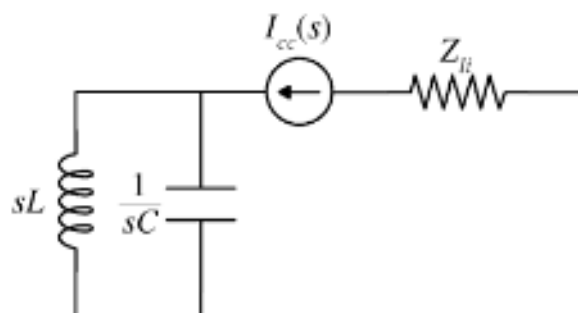


Figura 5.13: Circuito equivalente para la obtención de la TTR [16].

La transformada de la tensión entre los terminales de la fuente de corriente se puede obtener como la resta de la tensión que resulta en cada lado de la fuente de corriente:

$$U(s) = I_{cc}(s) * \left[ Z_{li} + \frac{sL_{eq} * \frac{1}{sC_{eq}}}{sL_{eq} + \frac{1}{sC_{eq}}} \right] = I_{cc}(s) * \left[ Z_{li} + \frac{s}{C_{eq}(s^2 + \omega_0^2)} \right]$$

Donde  $Z_{li}$ ,  $L_{eq}$ ,  $C_{eq}$  son respectivamente la impedancia (resistencia) característica de la línea, la inductancia y la capacidad equivalente de la red, y:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{eq}C_{eq}}}$$

Puesto que se supone que la apertura del interruptor tiene lugar cuando la corriente de corto es 0, se empleará la siguiente ecuación para la corriente de cortocircuito:

$$I_{cc}(t) = \frac{\sqrt{2}V}{\omega(L_{eq} + L_{li})} \text{sen}(\omega t)$$

Donde  $V$  es la tensión eficaz de la fuente y  $L_{li}$  es la inductancia del tramo de la línea entre el interruptor y el cortocircuito.

A partir de la transformada de Laplace de la intensidad que se inyecta en el circuito, la expresión de  $U(s)$ , quedará de la siguiente forma:

$$U(s) = \frac{\sqrt{2}V}{\omega(L_{eq} + L_{li})} * \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} * \left[ Z_{li} + \frac{s}{C_{eq}(s^2 + \omega_0^2)} \right]$$

Que puede expresarse de la siguiente forma:

$$U(s) = \frac{\sqrt{2}V}{(L_{eq} + L_{li})} * \left[ Z_{li} * \frac{1}{s^2 + \omega^2} + \frac{1}{C_{eq}} * \frac{1}{s^2 + \omega^2} * \frac{s}{(s^2 + \omega_0^2)} \right]$$

La antitransformada de esta expresión, por tanto, será:

$$u(t) = L^{-1}(U(s)) = \sqrt{2}V * \left[ \frac{Z_{li}}{\omega(L_{eq} + L_{li})} * \text{sen}\omega t + \frac{1}{\omega_0^2(L_{eq} + L_{li})C_{eq}} * (\text{cos}\omega - \text{cos}\omega_0 t) \right]$$

Ya que  $\omega \ll \omega_0$ .

El circuito equivalente es válido para intervalos de tiempo igual a  $2\tau$ , donde  $\tau$  es el tiempo de propagación de ondas entre interruptor y cortocircuito. La expresión resultante puede ser simplificada, ya que durante este intervalo de tiempo el seno de un ángulo puede ser sustituido por su argumento y el coseno de un ángulo por un escalón de valor constante. Por tanto  $\text{sen}\omega t$  puede ser sustituido por  $\omega t$  y el término  $\text{cos}\omega t$  puede ser sustituido por 1. Por tanto

$$\frac{1}{\omega_0^2(L_{eq} + L_{li})C_{eq}} \approx \frac{1}{\omega_0^2(L_{eq})C_{eq}} = 1$$

Así pues queda la siguiente expresión aproximada:

$$u(t) = \sqrt{2}V * \left[ \frac{Z_{li}}{L_{eq}} * t + (1 - \cos\omega_0 t) \right]$$

El primer término de la expresión es la tensión que se aparece en el lado de la línea, mientras que el segundo es la tensión que aparece en el lado del equivalente de la red.

El valor máximo de esta expresión depende del tiempo de propagación de las ondas entre el interruptor y el cortocircuito, y de los valores de la impedancia característica de la línea y de la inductancia equivalente de la red de alta tensión

Teniendo en cuenta que

$$L_{eq} = \frac{1}{\omega} * \frac{(\sqrt{3}V)^2}{S_{cc}}$$

$$Z_{li} = \frac{(\sqrt{3}V)^2}{S_c}$$

Donde  $S_c$  es la denominada potencia natural de la línea (potencia en el extremo receptor de la línea cuando la línea está alimentando una carga de valor la impedancia característica) y  $S_{cc}$  la potencia de cortocircuito en el punto de localización del interruptor que despeja la falta, queda la siguiente expresión:

$$u(t) = \sqrt{2}V * \left[ \omega \frac{S_{cc}}{S_c} * t + (1 - \cos\omega_0 t) \right]$$

Puesto que la expresión obtenida sólo es válida hasta que llegue la primera reflexión de onda al interruptor desde el punto de falta, se puede aproximar de la siguiente forma:

$$u(t) = \sqrt{2}V * \omega \frac{S_{cc}}{S_c} * t$$

El máximo de esta expresión se alcanzará cuando  $t=2\tau$ , es decir

$$U_{max} = \sqrt{2}V * \omega \frac{S_{cc}}{S_c} * 2\tau$$

En general este valor máximo no será muy elevado en comparación con la tensión de pico a frecuencia de operación de la red. La falta kilométrica puede ser peligrosa debido a la pendiente que presentará, y que se puede estimar a partir de la derivada de la expresión:

$$u(t) = \sqrt{2}V * \omega \frac{S_{cc}}{S_c} * t$$

Con lo que queda:

$$\left[ \frac{du(t)}{dt} \right]_{t=0} = \sqrt{2}V * \omega \frac{S_{cc}}{S_c}$$

Así por ejemplo, si los valores de  $V$ ,  $S_{cc}$  y  $S_c$  son:

- Tensión de la fuente:

$$V = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127,02 \text{ kV}$$

- Potencia natural de la línea  $S_c$ :

$$S_c = \frac{(V\sqrt{3})^2}{Z_{li}} = \frac{(220)^2}{400} = 121 \text{ MVA}$$

- $S_{cc}=5000 \text{ MVA}$
- Distancia entre el interruptor y el cortocircuito 3 km

Entonces, el tiempo de propagación de ondas entre interruptor y cortocircuito será:

$$\tau = \frac{3}{300000} = 10^{-5} \text{ s}$$

De aquí resultan los siguientes valores:

$$U_{max} = \sqrt{2} * 127,02 * 2\pi 50 * \frac{5000}{121} * 2 * 10^{-5} = 46,6 \text{ kV}$$

$$\left[ \frac{du(t)}{dt} \right]_{t=0} = \sqrt{2} * 127,02 * 2\pi 50 * \frac{5000}{121} = 2,33 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

La figura 5.14 muestra la tensión resultante en ambos lados del interruptor, la TTR, será la diferencia entre ambas tensiones.

Se puede comprobar que la tensión en el lado de la línea presenta una forma característica en diente de sierra y una elevada pendiente inicial. La TTR es debida prácticamente a la componente que se origina en el lado de la línea.

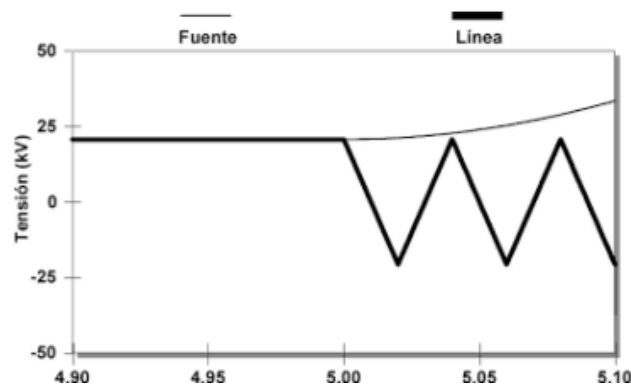


Figura 5.14: gráfica resultante de la falta kilométrica. Distancia entre falta e interruptor 3 Km [16].

La TTR depende de la distancia entre falta e interruptor, es decir, cuanto mayor sea dicha distancia mayor TTR y más sufrirá el interruptor, pero menor será su pendiente.

Con lo que el máximo valor TTR deberá producirse en una situación de falta muy alejada del disyuntor a través de una línea.

#### 5.4.2. Simulaciones

En este apartado se verá, mediante el programa ATP, lo expuesto anteriormente en el apartado 5.4.1.

El esquema a simular se muestra en la figura 5.15:

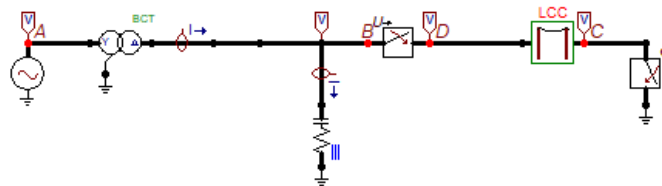


Figura 5.15: Esquema para simulación de cortocircuito al final de una línea larga.

En el esquema mostrado se han utilizado los valores siguientes:

Como fuente de alimentación se utilizará una fuente trifásica de 66 kV de tensión eficaz de línea, el transformador, tiene una relación de transformación de 66/10 kV, un grupo de conexión Yd1 y una potencia nominal de 100 MVA, la capacidad y resistencia en serie conectados en bornes tienen unos valores de 0,01 Ohms y 0,01  $\mu$ F.

Para representar la línea larga se ha escogido el modelo de J.Martí con una longitud de 250 Km.

Para representar el cortocircuito se dispone de un disyuntor trifásico que cierra a los 0,02 s y el disyuntor objeto de estudio abre para despejar la falta a los 0,0781 s.

El tiempo de simulación será de 0,5 segundos. El tiempo de viaje de las ondas viajeras en dicha línea es de aproximadamente 0,83 ms, con lo cual el tiempo que tarda una onda viajera en ir desde el interruptor hasta el cortocircuito y volver de nuevo al interruptor es 1,67 ms.

Dada la complejidad de los fenómenos que tienen lugar estudiaremos por separado la tensión en el lado izquierdo del interruptor (punto B) y la tensión en el lado derecho del interruptor (punto D) para, posteriormente, analizar la TTR.

- Tensión en el lado izquierdo del interruptor (punto B)

La tensión en el lado izquierdo del interruptor después de despejar la falta resulta de una serie de oscilaciones entre la capacidad parásita del transformador a tierra y la impedancia de cortocircuito del transformador, como se muestra en la figura 5.16.



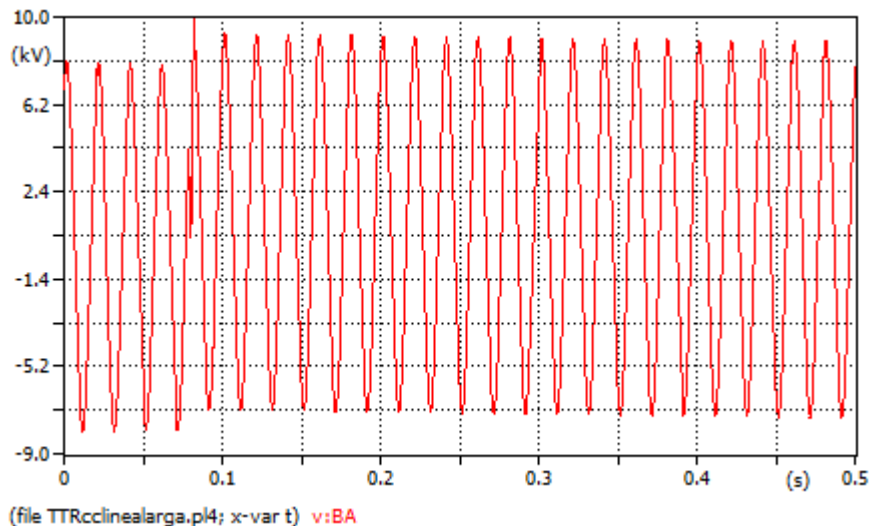


Figura 5.16: Tensión en el punto B del esquema de la figura 5.15.

Si se compara esta figura con la figura 5.5, se puede ver que en la figura 5.5 desde el instante de producción de la falta ( $t=0,02$ ) y el instante de apertura del interruptor (la orden de apertura del interruptor se da en el instante  $0,0781$ , pero la apertura del interruptor no se da hasta el paso por cero de la corriente, lo cual ocurre en  $t=0,0811$ ) la tensión en el punto B es nula, ya que la falta se produce en el punto C, que dista una distancia nula de B. Sin embargo, ahora el cortocircuito se produce a 250 km (punto C), con lo que la información de que se ha producido un cortocircuito debe viajar desde C hasta B y tarda  $0,83$  ms en llegar a B (como se aprecia en la figura 5.17).

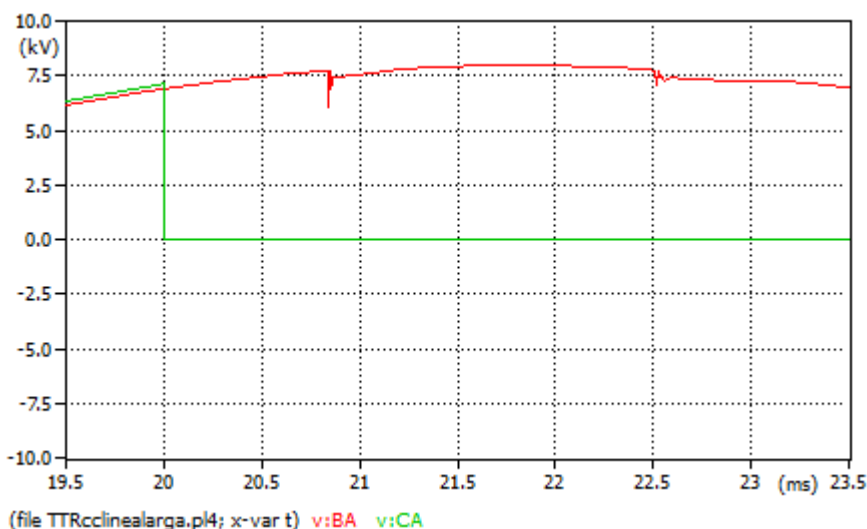


Figura 5.17: Tensión en el punto B en los primeros 3,5 ms después de la producción del cortocircuito en C.

Como el cortocircuito está muy lejos la tensión en el punto B está más influida por la red que por la existencia del cortocircuito, y la tensión en el punto B en  $t=20,83$  ms disminuye un poco,

pero no llega a caer a cero, como se ve en las figuras 5.17 y 5.18. En ambas figuras se ve una segunda onda procedente del cortocircuito que llega  $2 \times 0,83 = 11,7$  ms más tarde, esto es, en  $t = 22,5$  ms. La cuantía de esta segunda onda es mucho menor que la primera.

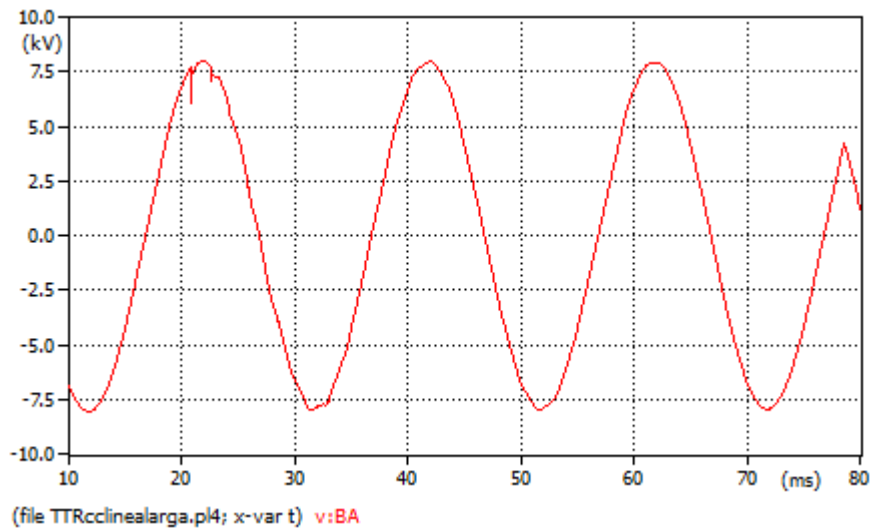
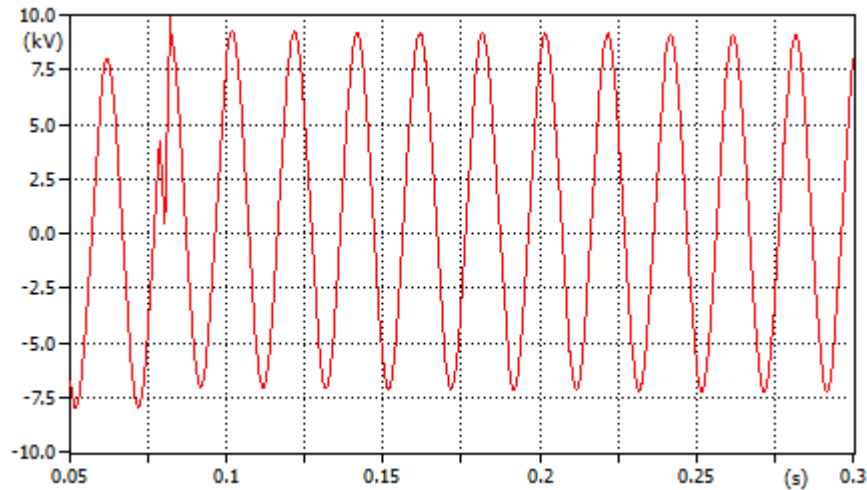
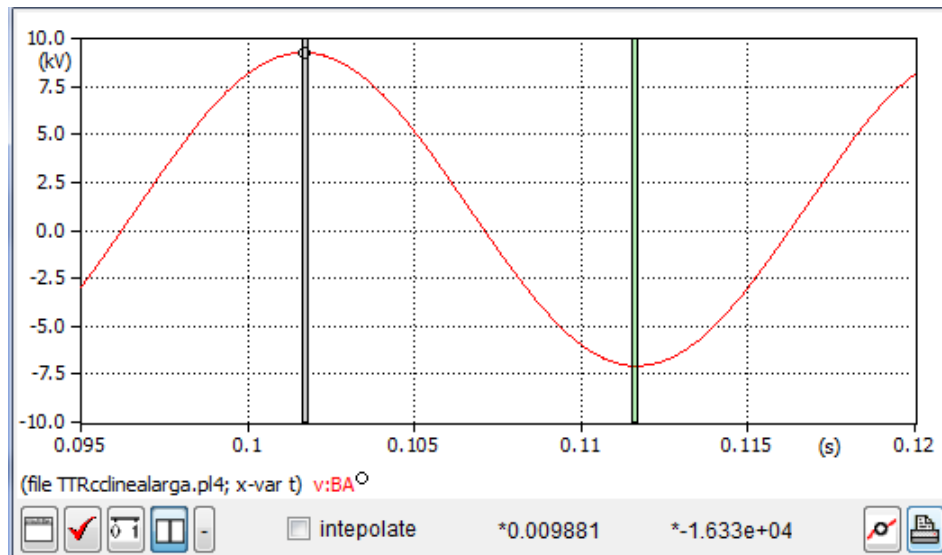


Figura 5.18: Influencia del cortocircuito en el punto B del esquema de la figura 5.15.

La tensión en el punto B antes de producirse el cortocircuito es una senoide con un valor de cresta de 7.500 V. Este valor de cresta difiere del valor de cresta de la fem de la red ( $10.000 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 8.165$  V) debido a las caídas de tensión provocadas por la corriente de fugas de la línea. Esa misma tensión (aproximadamente) es la que se tiene en el punto B a partir del instante de producción del cortocircuito (0,02 s). Sin embargo, el interruptor abre en  $t = 78,7$  ms (el primer paso por cero de la corriente después de haber dado la orden de apertura). A partir de dicho instante la línea larga queda desconectada del transformador, con lo que deja de haber corriente de fugas. Entonces la tensión en el punto B alcanzará la f.e.m. de la red (8.165 V) a través de un transitorio amortiguado (figura 5.19). Como se puede ver en la figura 5.19 b) la tensión pico-pico después del transitorio de apertura del interruptor es de 16.330 V, que corresponde a un valor de cresta de la senoide de 8.165 V. si bien la senoide se encuentra desplazada (en el lenguaje técnico “tiene un offset”) hacia arriba debido a las condiciones de contorno del transitorio.



a) (file TTRcdinealarga.pl4; x-var t) v:BA



b)

Figura 5.19: a) Transitorio de tensión en el punto B posterior a la apertura efectiva del interruptor b) medida de la tensión pico-pico.

#### - Tensión en el lado derecho del interruptor (punto D)

En cuanto se produce el cortocircuito, la información de que la tensión en el punto en el que se ha producido el cortocircuito es cero viaja hasta el interruptor y tarda 0,83 ms en llegar al interruptor, de modo que esa información llega en 20,83 ms (figura 5.20). En la figura se aprecia que al punto D llega una segunda onda reflejada 1,7 ms después, que es el tiempo que tarda la onda reflejada en D en ir hasta el punto de producción del cortocircuito (punto C) y volver. A pesar de esos pequeños picos la tensión en el punto D apenas se ve afectada por la existencia del cortocircuito, ya que este está muy lejos y la tensión en D básicamente viene impuesta por la fuente.

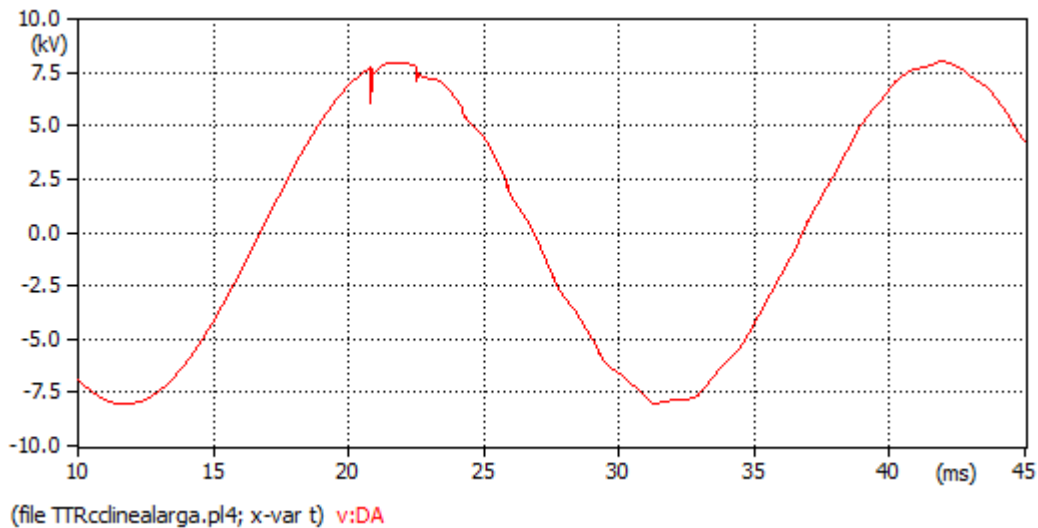


Figura 5.20: : Influencia del cortocircuito en el punto D del esquema de la figura 5.15.

Hasta aquí, los fenómenos son idénticos a los expuestos para el punto B, ya que B y D están unidos entre sí hasta que abre el interruptor en  $t = 78,7$  ms.

A partir del instante  $t = 78,7$  ms, el interruptor abre y los puntos B y D quedan desconectados y sus tensiones evolucionan de forma independiente una de la otra. La evolución de la tensión en el punto B ya se ha comentado. La evolución de la tensión en el punto D se muestra en la figura 5.21. Como se puede ver, la tensión en el punto D cae a cero a través de unas oscilaciones amortiguadas cuyo período es 1,66 ms (el tiempo que tarda la onda en ir desde el circuito abierto que existe en el punto D hasta el cortocircuito que existe en el punto C).

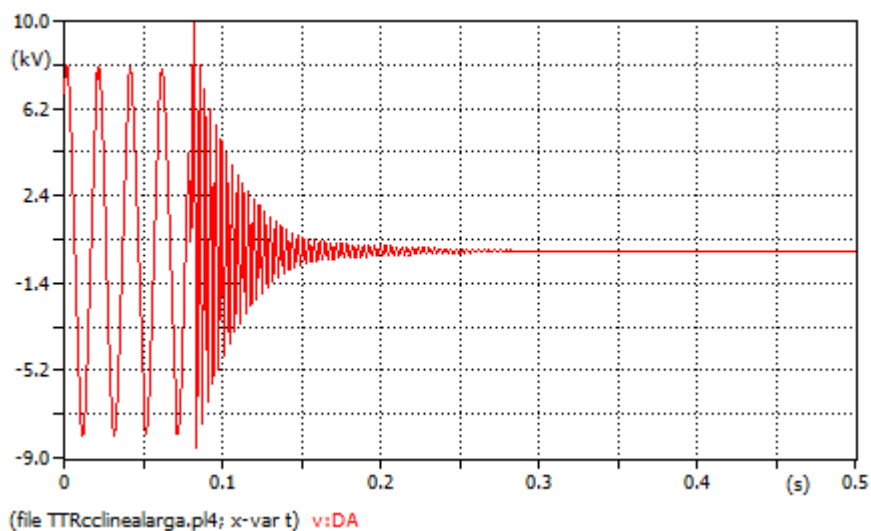


Figura 5.21: Tensión en el punto D del esquema de la figura 5.15.

La figura 5.22 muestra un detalle de la tensión en el punto D en el entorno de tiempo próximo a 78,7 ms:

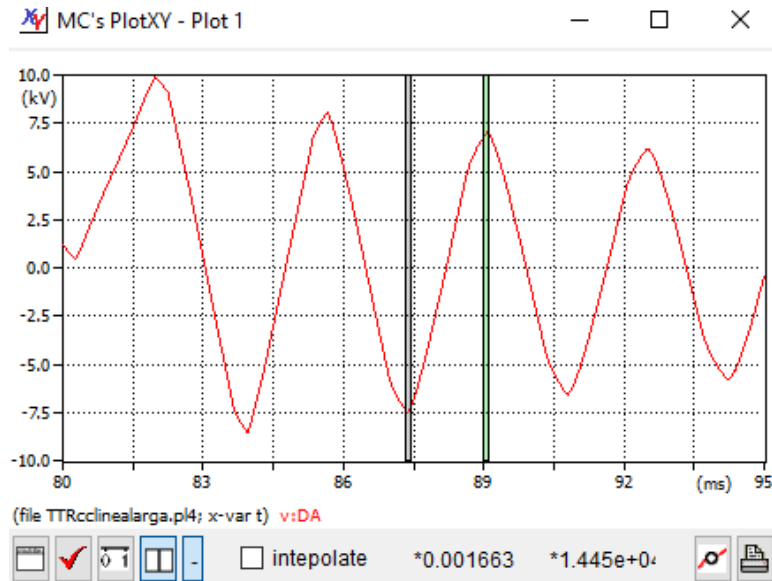


Figura 5.22: Detalle de la tensión en el punto D de la figura 5.15.

La diferencia de tensiones del punto B y el punto D dará la TTR que se produce en el disyuntor:

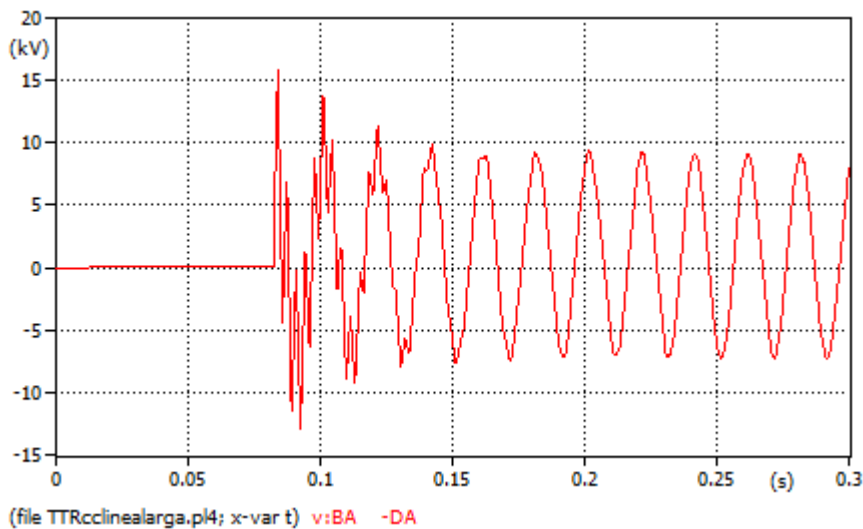


Figura 5.23: TTR producida entre los contactos (B y D) del disyuntor objeto de estudio del esquema de la figura 5.15.

Se muestra un zoom para apreciar mejor dicha TTR:

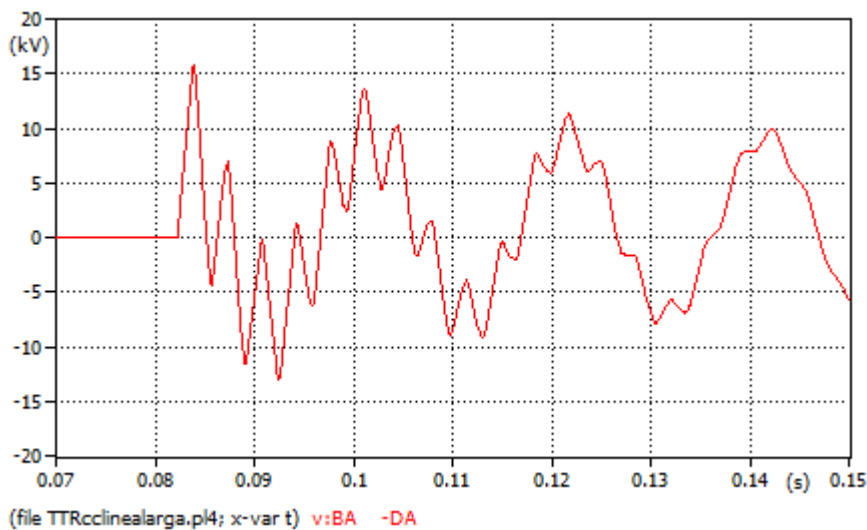


Figura 5.24: Zoom de la TTR producida en el disyuntor objeto de estudio del esquema de la figura 5.15.

Como se aprecia en la figura anterior, al ser la tensión en B básicamente sinusoidal, la envolvente de la onda en una senoide, pero sobre ella se aprecian los dientes de sierra característicos (expuesto en la figura 5.14).

El valor de esta TTR es de 15,8 kV, muy superior al caso de falta en un punto cercano del disyuntor por lo que se reafirma lo explicado en el apartado 5.4.1. Este valor es más próximo al valor teórico hallado en apartados anteriores de la TTR (16,32 kV) lo que indica que este caso es más problemático que el del cortocircuito en bornes del interruptor por lo que el disyuntor sufre mayores esfuerzos dieléctricos.

El valor de la TSTTR para este caso teniendo en cuenta el tiempo ( $T_0 = 0,001713$  s) que transcurre desde la apertura del disyuntor objeto de estudio hasta que se produce el mayor pico de tensión durante el transitorio, la TSTTR será de:

$$TSTTR = \frac{15,8}{\frac{1,713}{2}} = 18,44 \text{ kV/ms}$$

Cuanto mayor sea la TTR mayor TSTTR se producirá por lo que mayores serán las posibilidades de cebado del arco.

En comparación con la TSTTR del caso de cortocircuito en bornes del disyuntor, la tasa de subida será menor por consiguiente una pendiente inferior en la gráfica de la onda de tensión.

#### 5.4.3. Variación en la longitud de la línea

Ahora bien, si se realizan cambios en la longitud de la línea entre el disyuntor donde se está realizando el estudio y donde se produce el cortocircuito, la TTR debería verse afectada:

- Para una longitud de 125 Km:

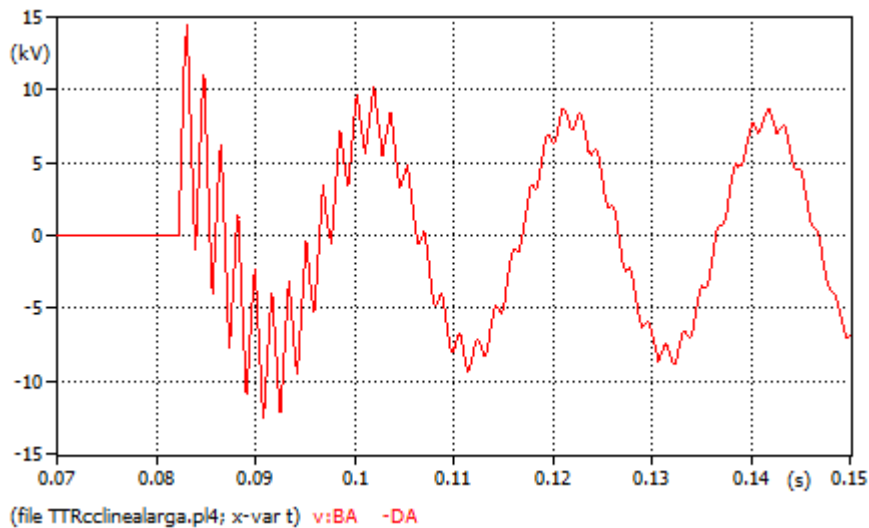


Figura 5.25: TTR producida en el disyuntor cuando se reduce la longitud de la línea a 125 Km.

El valor de la TTR es de 14,49 kV.

La TSTTR que se produce, teniendo en cuenta que  $T_0=0,000882$  s, será de:

$$TSTTR = 32,85 \text{ kV/ms}$$

Al reducir la longitud de la línea, el tiempo transcurrido desde la apertura del disyuntor objeto de estudio hasta que se produce el mayor pico de tensión es inferior, por lo que la pendiente es mayor lo que conlleva a una tasa de subida superior lo cual es perjudicial para el interruptor, pues en un tiempo tan breve es difícil que se recupere la rigidez dieléctrica del medio entre contactos.

- Para una longitud de 15 Km:

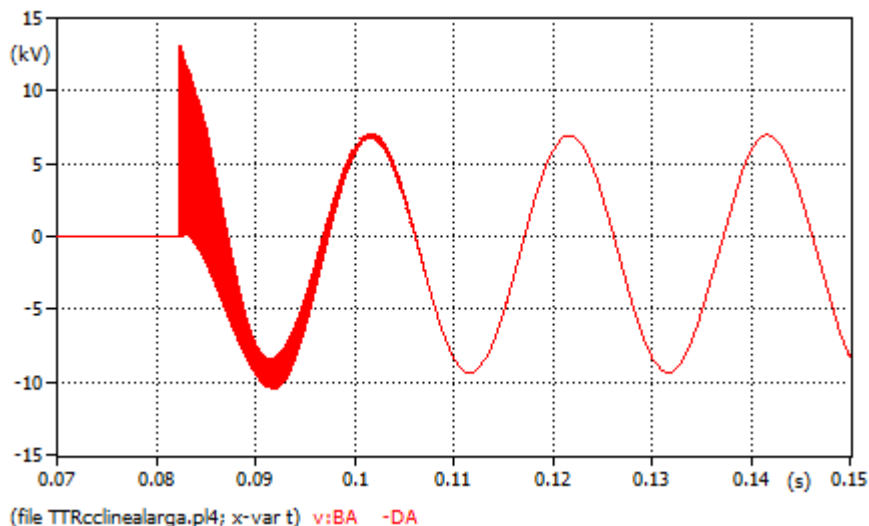


Figura 5.26: TTR producida en el disyuntor cuando se reduce la longitud de la línea a 50 Km.

El valor de la TTR es de 13,075 kV.

La TSTTR que se produce, teniendo en cuenta que  $T_0=0,000109s$ , será de:

$$TSTTR = 239 \text{ kV/ms}$$

Al reducir aún más la longitud de la línea, el tiempo transcurrido desde la apertura del disyuntor objeto de estudio hasta que se produce el mayor pico de tensión se ve aún más reducido, por lo que la pendiente es mayor lo que ocasiona una tasa de subida superior.

A medida que se reduce la longitud de la línea, el valor de la TTR disminuye, pero aumenta el número de oscilaciones que se producen en la onda de tensión.

Esto se debe a que el tiempo de viaje de las ondas de tensión desde el punto D hasta el punto B es inferior y el número de reflexiones es mayor.

La onda que llega al punto del cortocircuito sufrirá una reflexión del mismo valor, pero signo contrario (índice de reflexión -1) y la reflexión que sufre esta misma onda cuando llega al punto del circuito en abierto (punto D) debido al despeje de la falta por el disyuntor será del mismo valor y mismo signo (índice de reflexión 1).

Este fenómeno se producirá hasta que la onda de tensión se amortigüe por completo.

Por el contrario si se aumenta el valor de la longitud de la línea, debería ocurrir todo lo contrario, es decir, que la TTR aumente ya que el valor de la carga atrapada es mayor, pero el número de oscilaciones sea menor.

- Para una longitud de 280 Km:

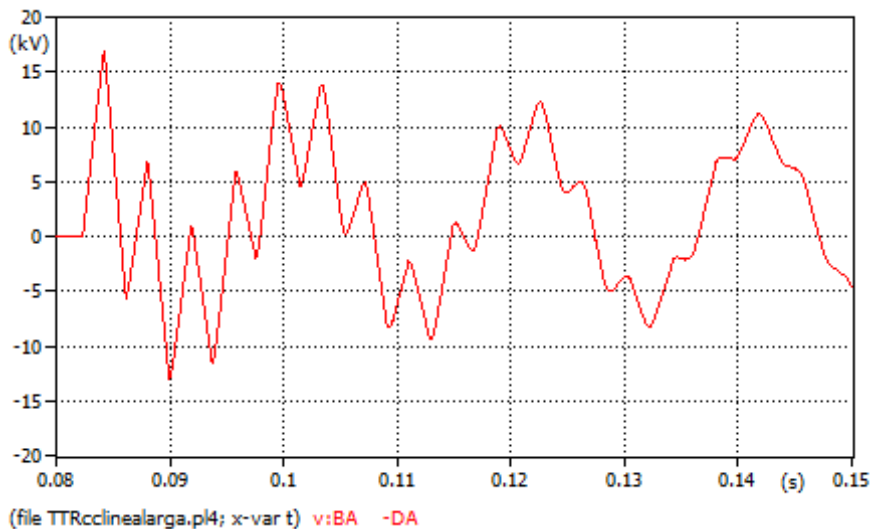


Figura 5.27: TTR producida en el disyuntor cuando se aumenta la longitud de la línea a 280 Km.

Aquí la TTR tiene un valor de 16,85 kV

En este último caso es donde se produce la TTR de mayor valor, incluso superando al valor teórico hallado anteriormente (16,32 kV). Aquí es donde se producirían los mayores esfuerzos dieléctricos debido al valor tan elevado de la TTR.

La TSTTR que se produce, teniendo en cuenta que  $T_0=0,001874 \text{ s}$ , será de:

$$TSTTR = 17,98 \text{ kV/ms}$$

Al aumentar la longitud de la línea, el tiempo transcurrido desde la apertura del disyuntor objeto de estudio hasta que se produce el mayor pico de tensión aumenta, por lo que la pendiente es menor lo que conlleva a una tasa de subida inferior. Este caso es el más desfavorable de lo estudiado hasta ahora.



La conclusión que se puede obtener es que cuanto mayor sea la longitud de la línea, mayor valor de TTR se obtiene, pero la pendiente será menor, es decir, se tarda más en alcanzar el valor de dicha TTR y la tasa de subida será inferior.

Cuanto menor sea la longitud de la línea, menor TTR se produce, pero la pendiente será mayor, es decir, se tarda menos en alcanzar dicho valor de tensión y la tasa de subida será superior por lo que hay más probabilidades de cebado del arco.

#### 5.4.4. Despeje de una falta mediante un interruptor situado en el extremo de una línea larga

Ahora se verá qué ocurre si en el esquema de la figura 5.15 se cambia el disyuntor objeto de estudio y se sitúa al final de la línea larga:

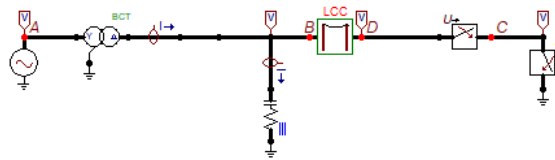


Figura 5.28: Esquema para simulación de cortocircuito al final de una línea larga cambiando la posición del disyuntor.

#### - Tensión en el lado izquierdo del interruptor (punto D)

La onda de tensión que aparece en el punto D del esquema de la figura 5.28 coincide con la tensión transitoria de restablecimiento y se muestra en la figura 5.29:

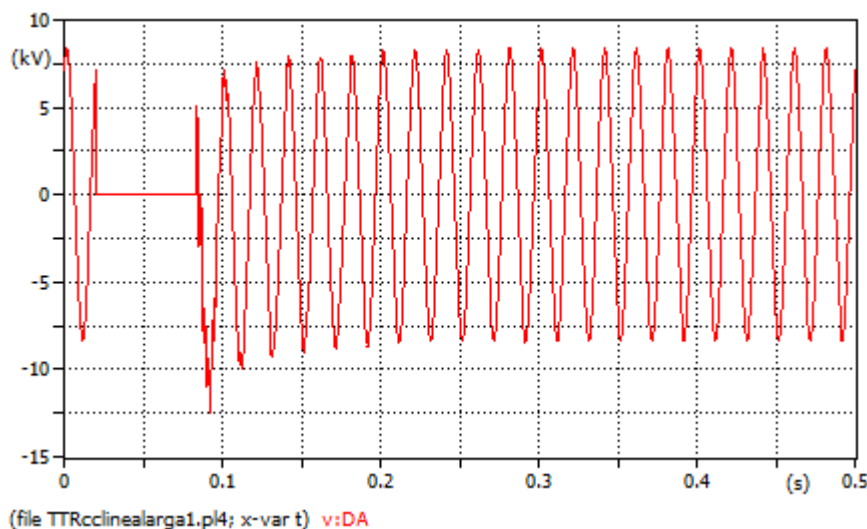


Figura 5.29: Tensión en el punto D del esquema de la figura 5.28.

Se aprecia como desde  $t=20\text{ms}$  hasta  $t=70\text{ms}$  la tensión en el lado izquierdo del interruptor (punto D) ahora sí se ve influenciada por el cortocircuito producido ya que el punto D está justamente en el cortocircuito y muy alejado de la fuente.

La orden de despeje (al igual que en los casos anteriores) se produce a los 0,0781 s, pero hasta que la corriente no pasa por cero (0,08326 s) no se realiza dicha acción.

Una vez despejada la falta se impondrá el valor de la f.e.m de la red (8,16 kV). No obstante, en los primeros cuatro ciclos posteriores a la apertura del interruptor se aprecia una sobretensión.

Haciendo un zoom de los primeros instantes posteriores al despeje de la falta se observa una onda de alta frecuencia superpuesta a la onda fundamental, correspondiente al conjunto de ondas viajeras que van desde el punto B hasta el punto D (figura 5.30).

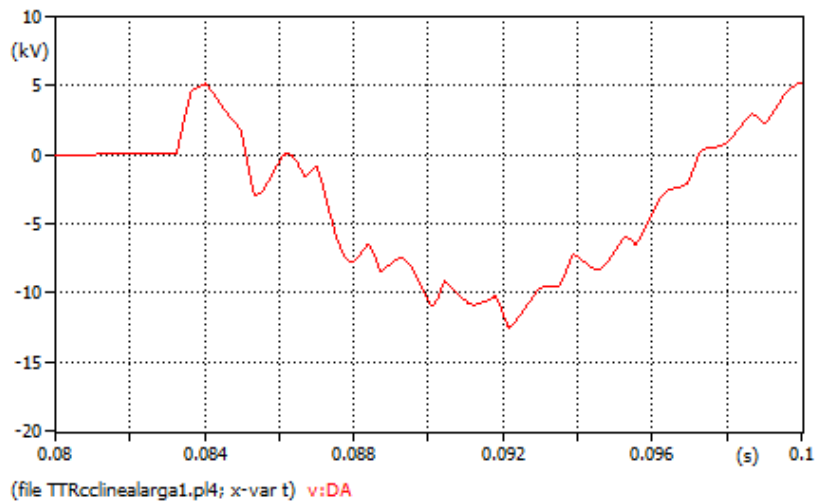


Figura 5.30: Zoom de la tensión en el punto D de la figura 5.28.

En la figura se muestra la tensión en el punto B. A pesar de que dicho punto está más cerca al transformador en su tensión se dejan notar las ondas viajeras que provienen del punto D.

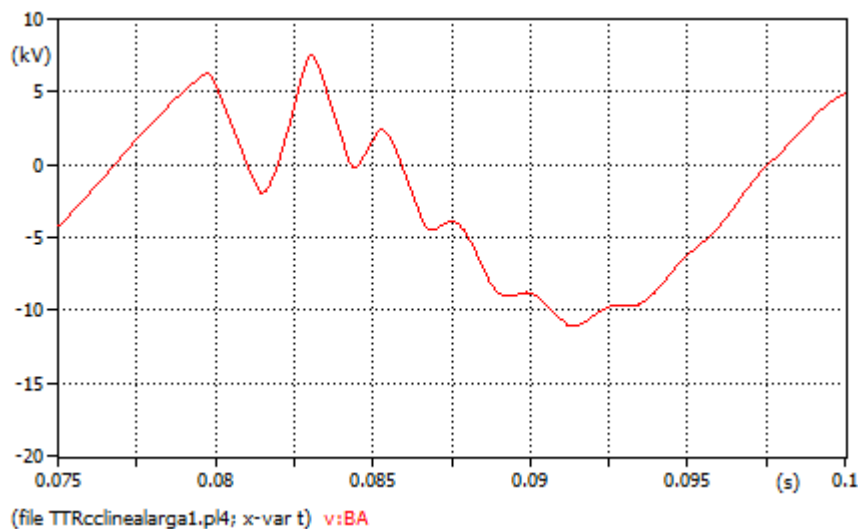


Figura 5.31: Tensión en el punto B de la figura 5.28.

- Tensión en el lado derecho del interruptor (punto C)

Para este caso el resultado será claro. Al encontrarse justo en el lado donde se produce el cortocircuito, en cuanto se produzca la falta la tensión caerá a 0.

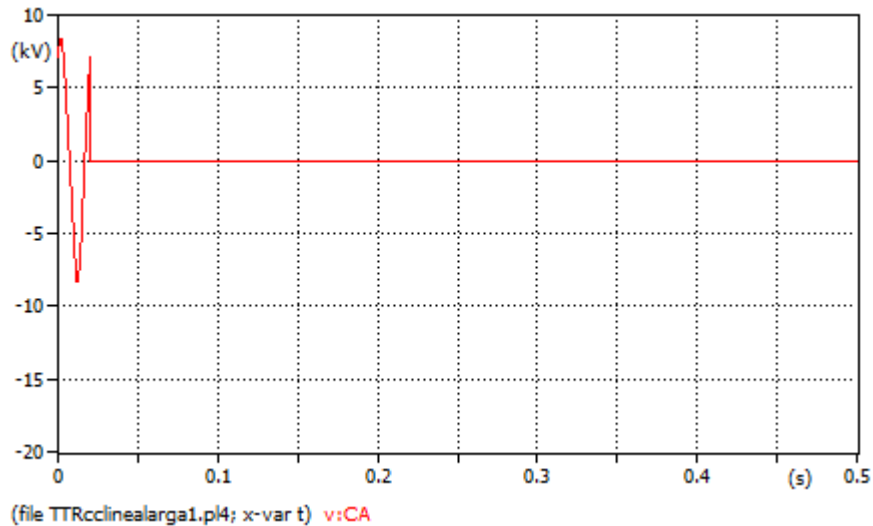


Figura 5.32: Tensión en el punto C del esquema de la figura 5.28.

La TTR que se obtiene de simular el esquema de la figura 5.28 es el siguiente:

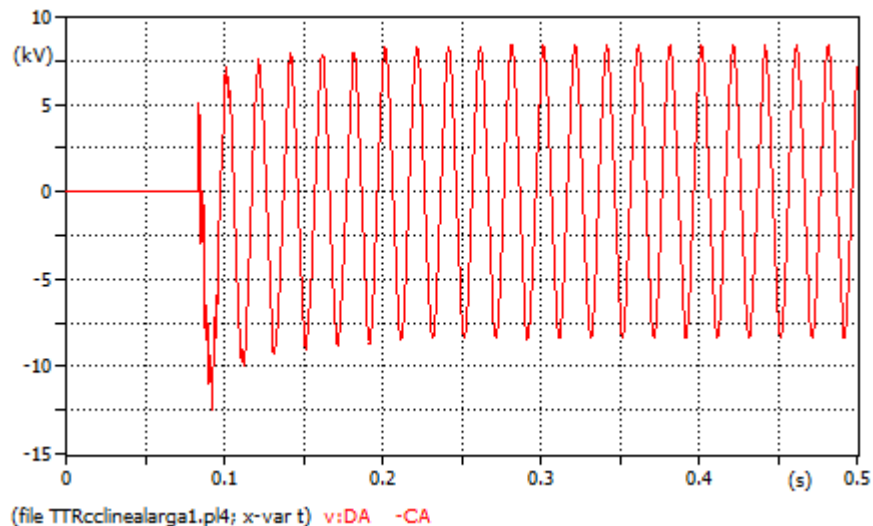


Figura 5.33: TTR que se produce de simular el esquema de la figura 5.28.

Se muestra un zoom para apreciar mejor dicha TTR:

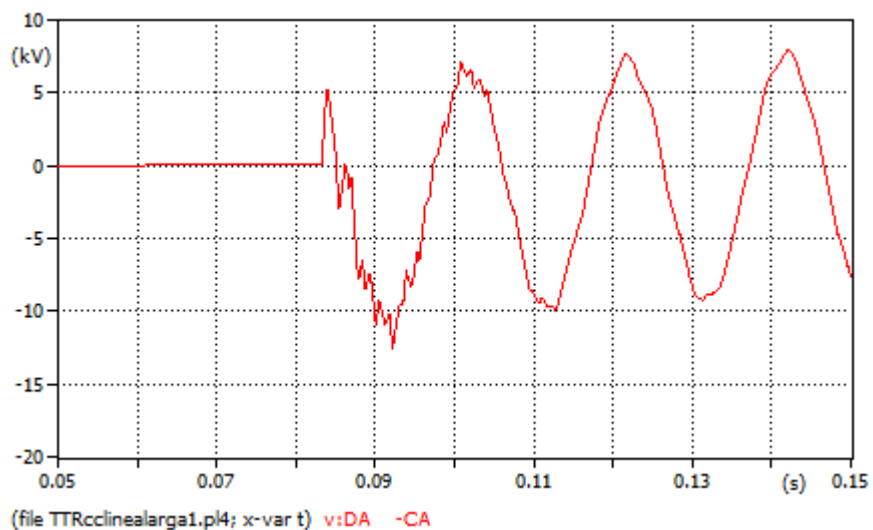


Figura 5.34: Zoom de la TTR producida en el disyuntor objeto de estudio del esquema de la figura 5.28.

El valor de la TTR es de 12,5 kV.

La TTR producida en este caso viene dada por la tensión que aparece en lado de la izquierda del interruptor (punto D).

Para este caso la TSTTR que se produce con un tiempo  $T_0 = 0,00909$  s:

$$TSTTR = 2,75 \text{ kV/ms}$$

En comparación con el caso de la figura 5.15, la tasa de subida es inferior debido a que la TTR es menor y a que el tiempo que transcurre desde que se corta la falta hasta que se da dicho valor es superior, por lo que se dan menos posibilidades de cebado del arco.

## 5.5. Conclusiones del trabajo realizado

En este capítulo se ha tratado el estudio de la Tensión Transitoria de Restablecimiento (TTR) en diferentes escenarios para ver los casos donde se producen las TTR más elevadas y por lo tanto los esfuerzos dieléctricos más desfavorables para el disyuntor y de este modo poder elegir el que soporte dichos esfuerzos.

Como se habló al principio del capítulo, los casos a estudio han sido:

- TTR de un interruptor con un cortocircuito en bornes del transformador: Para este apartado se ha comprobado que la TTR se ve afectada por las pérdidas que se producen en el transformador, cuanto menores sean estas pérdidas tanto en el cobre como en el hierro, mayor TTR se producirá lo que ocasiona mayores esfuerzos dieléctricos. También ocasiona una TSTTR mayor lo que aumenta las posibilidades del cebado del arco.

A continuación, se muestra una tabla con los datos de TTR y TSTTR obtenidos en cada simulación de este apartado:

$P_{cu} = 250 \text{ kW}$ $P_{fe} = 100 \text{ kW}$	TTR = 9,5 kV TSTTR = 2,72 kV/ $\mu$ s
$P_{cu} = 250 \text{ kW}$ $P_{fe} = 200 \text{ kW}$	TTR = 8,35 kV TSTTR = 2,39 kV/ $\mu$ s
$P_{cu} = 60 \text{ kW}$ $P_{fe} = 50 \text{ kW}$	TTR = 13,07 kV TSTTR = 4,36 kV/ $\mu$ s
$P_{cu} = 30 \text{ kW}$ $P_{fe} = 25 \text{ kW}$	TTR = 13,59 kV TSTTR = 4,53 kV/ $\mu$ s

Tabla 1: Resultados TTR y TSTTR para cortocircuito en bornes de transformador.

- TTR de un interruptor con cortocircuito al final de una línea: En este apartado se ha colocado entre medias de la falta y el interruptor que se desea estudiar una línea con el modelo J.Martí que se eligió en el capítulo 4.

Aquí ha sido necesario dividir el estudio en dos partes, el estudio del contacto de la parte izquierda del interruptor y el de la parte derecha, ya que al encontrarse una línea entre medias hay dos tensiones, una a cada lado.

La TTR en este caso se ve afectada principalmente por la longitud de la línea por lo que se han realizado varios casos cambiando la longitud de dicha línea.

Cuanto menor sea la longitud, menor TTR se producirá. El caso más desfavorable, es decir, la mayor TTR que se produce es cuando la línea tiene una gran longitud, como se explica en el apartado 5.4.1.

Finalmente se ha realizado el estudio del caso en que el interruptor que despeja la falta esté al final de una línea larga. En este caso solo será necesario realizar el estudio de la tensión en uno de los lados del interruptor ya que, al igual que en el apartado de cortocircuito en bornes, en el otro contacto la tensión respecto de tierra es directamente 0.

En este último caso la TTR sólo se ve afectada por el lado izquierdo del interruptor, donde se encuentra la fuente de tensión.

A continuación se muestra una tabla con los datos de TTR y TSTTR obtenidos en cada simulación de este apartado:

Línea de 250 Km	TTR = 15,8 kV TSTTR = 18,44 kV/ms
Línea de 125 Km	TTR = 14,49 kV TSTTR = 32,85 kV/ms
Línea de 15 Km	TTR = 13,075 kV TSTTR = 239 kV/ms
Línea de 280 Km	TTR = 16,85 kV TSTTR = 17,98 kV/ms
Cambiando posición de línea (250 Km)	TTR = 12,5 kV TSTTR = 2,75 kV/ms

*Tabla 2: Resultados TTR y TSTTR para cortocircuito al final de una línea.*

## **6. CONCLUSIONES**

En esta sección se expondrán las conclusiones de los capítulos anteriores a pesar de que pueda ser algo repetitivo, ya que al final de cada capítulo se ha dedicado un apartado a conclusiones; no obstante, se ha considerado necesario englobar todas las conclusiones en éste capítulo final.

Al concluir este proyecto se han alcanzado los objetivos marcados. A continuación se presentarán dichos objetivos y la conclusión obtenida:

### **6.1 Objetivo principal**

- Estudio de la TTR y TSTTR

Se ha conseguido realizar un estudio satisfactorio de la TTR y TSTTR ya que se han obtenido valores próximos a los teóricos. Los resultados obtenidos se han considerado correctos ya que son muy similares a los que se presentan en la bibliografía consultada para este presente proyecto fin de grado.

### **6.2 Objetivos secundarios**

- Selección del software adecuado

Entre los distintos softwares que existen para el estudio de transitorios, para este proyecto se ha elegido ATP ya que presenta un amplio menú para la creación de escenarios eléctricos y porque es un software de libre distribución. La elección de dicho software ha sido la correcta ya que los resultados obtenidos han sido satisfactorios.

- Elección del modelo de línea adecuado

Se realizó un pequeño estudio para seleccionar el modelo de línea más adecuado para este TFG entre los distintos modelos de líneas que nos ofrece ATP. El estudio consistió en el análisis del transitorio de energización de una línea en vacío. Después de este estudio se eligió el modelo de J.Martí ya que muestra resultados muy semejantes a los obtenidos de forma teórica. Este modelo es el utilizado en los diferentes escenarios para el estudio de la TTR y la TSTTR. La elección de este modelo de línea ha sido el correcto ya que se ha llegado a los objetivos esperados de forma satisfactoria.

## **7. PRESUPUESTO**

En este capítulo se expondrá el presupuesto general y el tiempo que se ha necesitado para desarrollar el presente Trabajo Fin de grado:

<b>Presupuesto Recursos Humanos propio</b>			
<b>Elemento</b>	<b>Nº de Horas</b>	<b>Precio (€/Hora)</b>	<b>Precio total (€)</b>
Documentación	50	20*	1000
Uso del software	150	25*	3750
Redacción de la memoria	100	15*	1500
<b>Coste total</b>			<b>6250</b>

*Tabla 3: Presupuesto de Recursos Humanos.*

(\* Precio estimado entre el precio de las horas junior).

El presupuesto relacionado con el tutor del presente TFG estimando un precio de 38 euros/hora (precio estimado de titular de universidad) y el tiempo dedicado en torno a 35 horas será de 1330 euros de coste total.

No se ha incluido un presupuesto de software debido a que el software ATP es de libre distribución.

Se debe tener en cuenta la amortización del ordenador con el que se ha trabajado:

En este caso, el precio de dicho ordenador fue de 900 €, con un tiempo de vida medio de 5 años. El presente TFG se ha realizado en seis meses por lo que la amortización será de 30 €/mes. 180 euros en total.

## **BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS**

- [1] Apuntes de la asignatura instalaciones eléctricas de la Universidad Carlos III de Madrid. Tercer curso, año académico 2016/2017. Profesor, Juan Carlos Burgos Díaz.
- [2] Leonhardt, G.; Marchi, M. y Rivetti, G. “¿SF6 o vacío? En busca del interruptor idóneo para Tensión Media”. Revista *ABB* No 4, 2000.
- [3] UNE 62271-100.
- [4] “Transitorios electromagnéticos”. *Centro de investigaciones eléctricas y electrónicas de Perú*. Disponible en: <http://www.cieep.org> . Acceso: 22/11/2017.
- [5] Dr.W.Scott Meyer and Dr.Tsu-huei Liu. *EMTP theory book*. United States of America.1987.
- [6] Apuntes de la asignatura Sistemas Eléctricos de la Universidad Carlos III de Madrid. Tercer curso, año académico 2016/2017. Profesora, María Ángeles Moreno López de Saá.
- [7] *Math Works*. Disponible en:  
[https://es.mathworks.com/products/matlab.html?s\\_tid=hp\\_products\\_matlab](https://es.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=hp_products_matlab)  
Acceso: 22/11/2017.
- [8] Camilo José Carrillo González. “Introducción a PSCAD”. Universidad de Vigo, departamento de ingeniería eléctrica.
- [9] “Why PSIM?” *Powersimtech.com*. Disponible en <https://powersimtech.com/>  
Acceso: 22/11/2017.
- [10] *Electrical Transients in Power Systems* (Allan Greenwood).
- [11] “¿Qué es la transposición de líneas de transmisión?” *Sector Electricidad, Comunidad de profesionales en ingeniería eléctrica*. Disponible en:  
<http://www.sectorelectricidad.com/14231/que-es-la-transposicion-de-lineas-de-transmision/>  
Acceso: 20/10/2017.
- [12] Luigi Vanfretti. “Modelos matemáticos y herramientas de software para la simulación de líneas de transmisión en estado dinámico”. Presentada en el XXIII Congreso de Estudiantes de Centroamérica y Panamá de 2004 en la ciudad de Guatemala, Guatemala.
- [13] Profesor Hans Kristian Høidalen “ATP Draw graphical pre-processor to ATP”. NTNU, Universidad de Noruega.



[14] Akihiro Ametani, Teruo Ohno, Naoto Nagaoka. *Cable System Transients. Theory, Modeling and Simulation*. Editorial Wiley.

[15] "Falta de línea corta o kilométrica. Electrical" en *Transients in Power Systems* (Allan Greenwood).

[16] Ignacio J. Ramírez Rosado, Juan A. Martínez Velasco, Juan A. Fuentes Moreno, Eduardo García Garrido, Luis A. Fernández Jiménez y Pedro J. Zorzano Santamaría. *Problemas resueltos de sistemas de energía eléctrica*. Editorial Thomson (2007).

