

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Análisis y Simulación de Cortocircuitos en Redes
Ferrovias

Autor: Rida Aboulhaich

Tutor: Alejandro Marano Marcolini

Dpto. Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Análisis y Simulación de Cortocircuitos en Redes Ferrovias

Autor:
Rida Aboulhaich

Tutor:
Alejandro Marano Marcolini
Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Máster: Análisis y Simulación de Cortocircuitos en Redes Ferroviarias

Autor: Rida Aboulhaich

Tutor: Alejandro Marano Marcolini

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Me gustaría mostrar mi agradecimiento a mi tutor Alejandro Marano Marcolini por su gran labor docente, ayuda y excelente trato que me brindó a lo largo del desarrollo de este proyecto.

A mis padres y hermanos por su enorme apoyo a lo largo de mis estudios, me han transmitido un increíble potencial para acabar mi carrera.

Este proyecto marca el fin de una etapa muy importante de mi vida, Atrás quedan muchos años de esfuerzo y dedicación. Durante todos estos años, muchos son los amigos con los cuales compartí largas horas de estudio, aunque se hace imposible nombrar a todos ellos, gracias.

Rida Aboulhaich

Sevilla, 2019

Resumen

En este proyecto, se presentan dos metodologías basadas en Python para el estudio y simulación de cortocircuitos en redes ferroviarias. Haciendo uso del análisis matricial y del software OpenDSS, se realiza la creación y simulación de una falta en cualquier configuración posible de los sistemas de tracción ferroviaria con alimentación a 25kV en corriente alterna.

Considerando como datos de partida la longitud máxima de la vía, la distancia máxima entre los centros de autotransformación y el consumo del material rodante, las herramientas desarrolladas en este proyecto permiten construir el modelo de la red y de todo su sistema de alimentación.

Mediante una ejecución iterativa, se simula la falta a lo largo de la red de alimentación, obteniendo en cada iteración todos los valores de interés fruto del defecto producido.

El desarrollo de dos herramientas diferentes de cálculo permite comparar y garantizar la fiabilidad de los resultados. Los valores obtenidos no solo ayudarán a entender el sistema de alimentación bajo defecto, sino que permitirán dimensionar y optimizar los sistemas bajo estudio.

Abstract

In this project, two Python-based methodologies for the study and simulation of short circuits in railway networks are presented. Using matrix analysis and the OpenDSS software, it is possible to create and simulate a fault in any possible configuration of railway traction systems with 25kVac power supply.

Given the maximum length of the network, the maximum distance between the auto-transformation centers and the consumption of the rolling stock, the tools developed in this project allow us the construction of the railway network model and its entire feed system.

Throughout an iterative execution, the fault is simulated along all the network. In this way, in each iteration, all the values of interest resulting from the fault are obtained.

Two different computation tools are developed with the aim of comparing the results and guarantee their reliability. The values obtained are not only useful to understand the effects of the faults in the railway system, but also for the system planning and optimization.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	x
Índice	xi
Notación	xiv
1 justificación y objetivos	1
1.1 <i>Redes de transporte ferroviarias</i>	1
1.2 <i>Objetivos del proyecto</i>	2
2 Corrientes de cortocircuito	5
2.1 <i>Introducción</i>	5
2.2 <i>Valores máximos y mínimos de corrientes de cortocircuito</i>	6
2.3 <i>Origen de los cortocircuitos</i>	7
2.4 <i>Fuentes que aportan al cortocircuito</i>	8
2.5 <i>Consecuencias de los cortocircuitos</i>	9
2.6 <i>Características técnicas de diseño</i>	10
2.6.1 <i>Líneas de transporte de energía</i>	10
2.6.2 <i>Subestación eléctrica de tracción</i>	12
2.6.3 <i>Centros de autotransformación</i>	15
2.6.4 <i>Transformador de servicios auxiliares</i>	15
2.7 <i>Cálculo de valores nominales</i>	16
2.7.1 <i>Intensidad nominal en el lado primario del transformador</i>	16
2.7.2 <i>Intensidad nominal en el lado secundario del transformador</i>	16
2.7.3 <i>Intensidad nominal que circula por los autotransformadores</i>	16
2.8 <i>Cálculo de corrientes de cortocircuito</i>	17
2.8.1 <i>Tipos de cortocircuitos considerados en el sistema de alimentación a 25kV</i>	17
2.8.2 <i>Cortocircuito en la red de transporte</i>	19
2.8.3 <i>Cortocircuito en el lado primario del transformador de la SET</i>	20
2.8.4 <i>Cortocircuito en el lado secundario del transformador de SSAA</i>	20
2.8.5 <i>Ejemplo numérico: Obtención de los valores de intensidades de cortocircuito</i>	20
2.8.5.1 <i>Cálculo de corriente de cortocircuito en la red de alimentación</i>	24
2.8.5.2 <i>Cálculo de corriente de cortocircuito a la salida del transformador de la SET</i>	25
2.8.5.3 <i>Cálculo de corriente de cortocircuito a la salida del transformador de SSAA</i>	25
2.8.6 <i>Cortocircuito en el secundario del transformador y en el resto de los puntos de la red de tracción</i>	26
2.9 <i>Análisis nodal para cálculo de cortocircuitos</i>	26
3 Electrificación de líneas ferroviarias.....	29
3.1 <i>Definiciones generales</i>	29
3.2 <i>Sistemas de electrificación</i>	33
3.2.1 <i>Sistema de electrificación 1x25 kVca</i>	35
3.2.2 <i>Sistema de electrificación 2x25KVca</i>	38

3.3	<i>Ventajas y desventajas de los sistemas 1x25 y 2x25KVca</i>	40
3.4	<i>Modos de funcionamiento</i>	41
3.4.1	Funcionamiento normal	41
3.4.2	Caída de un transformador: Situación degradada N-1.....	41
3.4.3	Caída de dos transformadores: Situación degradada N-2	42
3.4.4	Caída de tres transformadores: Situación degradada N-3	42
4	Algoritmo analítico para estudio de faltas	45
4.1	<i>Modelos eléctricos equivalentes considerados para el sistema 1x25 kVca</i>	45
4.1.1	Modelo de la fuente de alimentación.....	46
4.1.2	Modelo del transformador monofásico	47
4.1.3	Modelo de los conductores	48
4.2	<i>Modelos eléctricos equivalentes de los componentes del sistema 2x25 kVca</i>	53
4.2.1	Modelo de la fuente de alimentación.....	53
4.2.2	Modelo de la subestación eléctrica de tracción	54
4.2.3	Modelo del centro de autotransformación.....	57
4.2.4	Modelo de los conductores de la red	59
4.3	<i>Programación del algoritmo</i>	65
5	Estudio de cortocircuito mediante software OpenDSS	75
5.1	<i>Introducción al software de simulación OpenDSS</i>	75
5.1.1	COM Server	76
5.1.2	Control de OpenDSS desde Python.....	77
5.2	<i>Análisis de cortocircuito del sistema 1x25 y 2x25 kVca mediante OpenDSS</i>	77
5.3	<i>Programación de los sistemas en OpenDSS</i>	80
6	Aplicación a sistemas reales y resultados	87
6.1	<i>Datos de partida de los sistemas ferroviarios usados en el caso práctico</i>	87
6.1.1	Red de alimentación	87
6.1.2	Subestación eléctrica de tracción (SET)	87
6.1.3	Centros de autotransformación	91
6.1.4	Conductores.....	92
6.1.4.1	Sistema 1x25kV	92
6.1.4.2	Sistema 2x25kV	92
6.2	<i>Equipo en el que se ha realizado la simulación</i>	92
6.3	<i>Simulación del caso práctico: Red ferroviaria 1x25</i>	93
6.3.1	Subestación eléctrica de tracción en vacío.....	93
6.3.1.1	Cortocircuito a la entrada de la SET	93
6.3.1.2	Cortocircuito a la salida de la SET.....	93
6.3.2	Subestación eléctrica de tracción en carga	94
6.3.2.1	Evolución de la corriente por catenaria y rail.....	95
6.3.2.2	Evolución de la tensión en los nodos.....	96
6.3.2.3	Evolución de la corriente de falta.....	97
6.4	<i>Simulación del caso práctico: Red ferroviaria 2x25</i>	99
6.4.1	Subestación eléctrica de tracción en vacío.....	99
6.4.1.1	Cortocircuito a la entrada de la SET	99
6.4.1.2	Cortocircuito a la salida de la SET.....	99
6.4.2	Subestación eléctrica de tracción en carga	100
6.4.2.1	Evolución de la corriente por los centros de autotransformación	100
6.4.2.2	Evolución de la corriente por la catenaria	101
6.4.2.3	Evolución de la corriente por el raíl	103
6.4.2.4	Evolución de la tensión en los nodos.....	103
6.4.2.5	Evolución de la corriente de falta.....	104
6.4.3	Cortocircuito bajo la presencia de un material móvil.....	105

7	Conclusiones y líneas futuras.....	107
7.1	<i>Conclusiones.....</i>	107
7.2	<i>Líneas futuras.....</i>	108
7.2.1	Cálculo de las impedancias de las líneas.....	108
7.2.2	Conexión del circuito de alimentación a servicios auxiliares.....	108
7.2.3	Evaluación del impacto en el resto de las instalaciones.....	108
7.2.4	Extensión de las herramientas al resto de sistemas.....	108
7.2.5	Estudio de faltas mediante el método de Montecarlo.....	109
	Índice de Tablas.....	111
	Índice de Figuras.....	113
	Referencias.....	117
	Anexos.....	119
7.3	<i>Código del algoritmo matricial.....</i>	119
7.4	<i>Código para la simulación en el software OpenDSS.....</i>	135
7.5	<i>Código de funciones auxiliares.....</i>	163

Notación

AV	Alta velocidad
AT	Alta tensión
AT	Autotransformador
ATI	Centro de autotransformación intermedio
ATF	Centro de autotransformación final
BT	Baja tensión
CA	Corriente Alterna
CC	Corriente continua
ETI	Especificaciones técnicas de interoperabilidad
MT	Media tensión
REE	Red Eléctrica Española
SET	Subestación eléctrica de tracción
SSAA	Servicios auxiliares
Vca	Tensión alterna
Vcc	Tensión continua

1 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

A continuación se realiza un prólogo con objeto de justificar la elección del tema considerado, así como la definición del contenido principal de este trabajo y los objetivos del mismo.

1.1 Redes de transporte ferroviarias

El ferrocarril es uno de los métodos de transporte terrestres más usados en la actualidad. Sus inicios tuvieron lugar durante la primera mitad del siglo XIX en la época de la Revolución Industrial como resultado de la larga búsqueda de nuevas formas de transporte para satisfacer las grandes necesidades, tanto para el transporte de materiales o mercancías como para el desplazamiento de personas de forma más segura y barata.

Este nuevo método de transporte innovador ofrecía muchas más ventajas respecto a las otras formas de la época. Entre ellas se encuentran: la elevada capacidad para transportar grandes cantidades de mercancías en largos recorridos, gastos menores en combustible, costes de operación reducidos, alta flexibilidad, baja siniestralidad, un método de desplazamiento atractivo para las personas y etc.

Todas estas ventajas, unidas a la continua modernización respecto a la comodidad y a la rapidez generada por las infraestructuras, permitieron que este sistema de transporte tenga un crecimiento muy importante a lo largo de su historia.

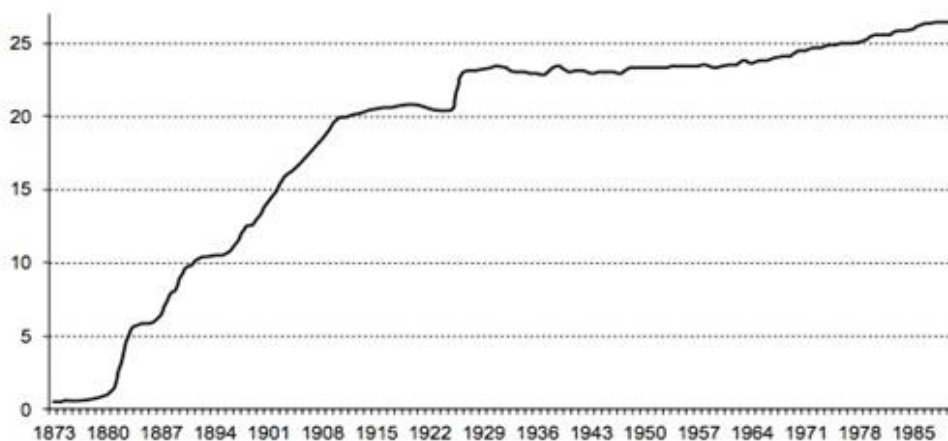


Figura 1-1. Expansión de las vías del ferrocarril durante los últimos siglos. Fuente [14].

Si se estudia el coste-beneficio del sistema de transporte ferroviario, se podría estimar su impacto en la economía de un país. Los beneficios obtenidos pueden ser cuantificables como ganancias netas o no cuantificables reflejadas en el crecimiento regional.

Entre los beneficios cuantificables se encuentran la reducción en el tiempo de viaje y una considerable disminución del uso de los automóviles, lo cual implica descongestionamiento de las calles y reducciones en las emisiones de CO₂.

Con relación a los beneficios no cuantificables se destacan: la reducción en la demanda total de energía, el importante desarrollo y crecimiento económico de la región y la elevación del estándar de vida. Además, la instalación de un sistema ferroviario permite buenas comunicaciones entre las diferentes regiones, lo cual implica un mejor acceso a lugares institucionales, educativos, turísticos, recreativos, etc.

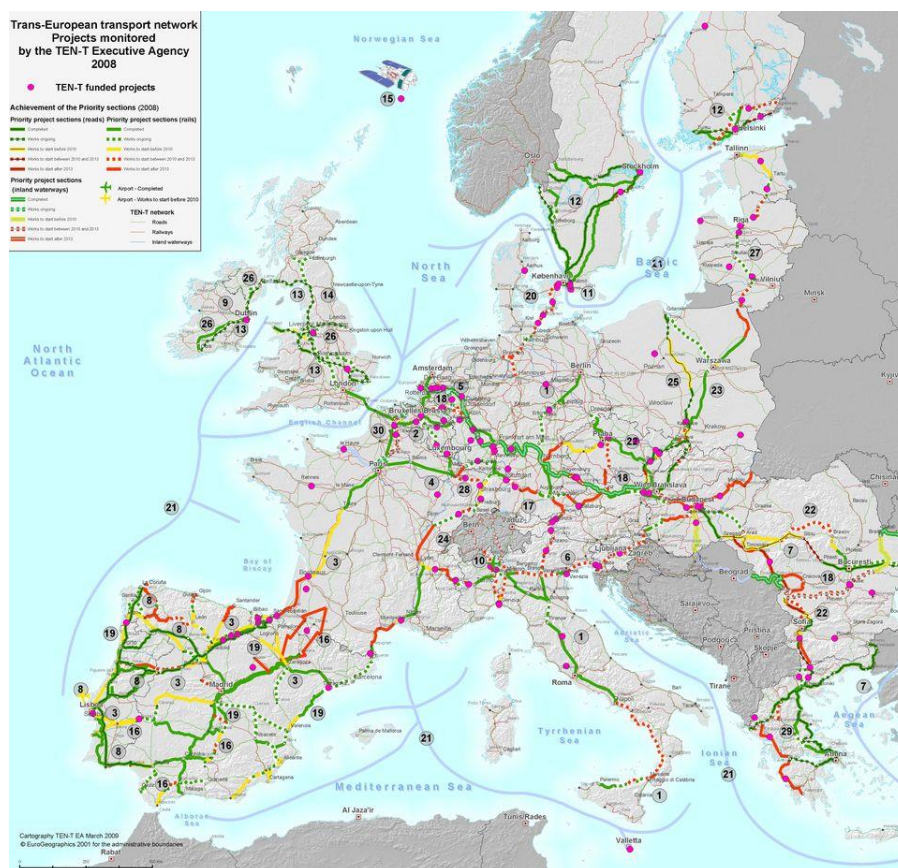


Figura 1-2. Mapa con las vías ferroviarias actuales y futuras en Europa. Fuente [16].

En definitiva, de todos los medios de transporte de la actualidad, sin lugar a duda, se podría afirmar que el ferroviario es uno de los más usados. Su instalación en los centros de las grandes ciudades y la conexión entre ellas es fundamental para garantizar su crecimiento. A diario lo usan grandes masas de personas tanto para cortas como largas distancias, permitiendo así solventar los grandes problemas a los cuales se enfrenta la sociedad hoy en día (los atascos, contaminación, etc.).

1.2 Objetivos del proyecto

Los sistemas de alimentación 1x25 y 2x25 kV se consideran entre los mejores para ofrecer las soluciones óptimas a los ferrocarriles de alta velocidad. La alimentación a tensiones más elevadas permite una considerable reducción del número de subestaciones eléctricas, así como un gran aumento en eficiencia. Otra consecuencia inmediata del suministro de energía a la tensión doble es la disminución de la corriente que circula por la línea,

lo cual implica menores pérdidas y permite el uso de equipos y locomotoras de menor complejidad. Además, existen por otro lado otros aspectos que permiten aumentar el prestigio y funcionalidad del sistema 2x25kVca, entre ellos; los relacionados con la reducción de las interferencias electromagnéticas entre los convertidores de tracción y los circuitos de telecomunicaciones adyacentes.

No obstante, las condiciones críticas de operación relacionadas con los eventos de cortocircuito pueden interferir con los componentes del sistema de tracción, comprometiendo así la funcionalidad de todo el sistema. La presencia de los autotransformadores hace que los niveles de cortocircuitos sean más críticos debido a que contribuyen al aumento de las corrientes de falta.

Por lo tanto, el análisis de cortocircuito es importante no solo para determinar la potencia nominal de los equipos de potencia y el ajuste de los dispositivos de protección a instalar, sino también para comprobar los perfiles de tensión de la red y de las líneas cercanas al punto donde se ha producido el defecto, así como la compatibilidad electromagnética con los circuitos adyacentes. En definitiva, se requiere un estudio detallado de cortocircuito tanto en estado estacionario como en estado transitorio.

La precisión en el modelado de los componentes del sistema es una preocupación importante para el análisis de cortocircuitos, ya que afecta significativamente a los resultados de la simulación. Otro aspecto fundamental es identificar y estimar correctamente las impedancias de los componentes del sistema y la configuración de la red, por tener una influencia directa en los resultados. Por lo tanto, se debe prestar especial atención a la hora de implementar los modelos equivalentes de los transformadores, autotransformadores, las impedancias propias y mutuas de la catenaria, los raíles y el feeder negativo.

En este trabajo se ha simulado el sistema eléctrico ferroviario de 1x25 kVca y 2x25 kVca para realizar el análisis detallado del estado estacionario de cortocircuitos. Con la ayuda del análisis nodal, y la implementación en secuencia (matrices en cadenas) de las matrices de admitancias primitivas, que representan a cada elemento, se ha conseguido simular el modelo estacionario de toda la red de alimentación a 25kV en cualquier configuración y con las particularizaciones deseadas.

El sistema ha sido implementado también mediante el software informático *OpenDSS*, el cual permite realizar el análisis y simulación de circuitos eléctricos tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia, lo que permite evaluar fácilmente el comportamiento complejo del sistema de alimentación al representar cada uno de los componentes de la red por un bloque equivalente. Además, debido a la posibilidad de interacción de esta aplicación con el programa externo escrito en Python, se pudo llevar a cabo la definición del sistema con todas las particularizaciones deseadas.

A lo largo de los capítulos se han detallado y descrito los sistemas de tracción bajo estudio, así como la descripción de las metodologías propuestas para realizar análisis de faltas y obtener soluciones en régimen permanente con dos herramientas diferentes.

En definitiva, los objetivos planteados se pueden enumerar y resumir en las siguientes líneas:

- Adquisición de los fundamentos básicos de los sistemas de alimentación ferroviarios.
- Análisis y estudio de las metodologías de identificación de faltas presentes en la actualidad.
- Elaboración de las herramientas de estudio propias.
- Comparación de los resultados con otras metodologías.

Este proyecto termina tras la aplicación de las herramientas de estudio desarrolladas para los casos prácticos, en los cuales se tendrán las siguientes consideraciones:

- La evolución del módulo de las intensidades y tensiones de cortocircuito, así como el progreso del desfase entre ellos. Se obtendrá considerando que la falta tiene lugar entre catenaria-rail a lo largo de toda la vía con la siguiente casuística:
 - La subestación eléctrica de tracción está en vacío.
 - La subestación eléctrica de tracción alimenta a tres tramos con la presencia de un tren en el primero.
 - La subestación eléctrica de tracción alimenta a tres tramos con la presencia de un tren en el segundo.
 - La subestación eléctrica de tracción alimenta a tres tramos con la presencia de un tren en el tercero.

- Comparación de los resultados obtenidos y comprobación de la influencia de la presencia de trenes en la evolución de las intensidades de cortocircuito de los autotransformadores

- Evolución de la variación del desfase entre intensidades y tensiones.

2 CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO

En este segundo capítulo se pretenden presentar las nociones básicas de cálculo de corrientes de cortocircuito y los diferentes tipos de fallos que se dan con mayor frecuencia, así como los puntos donde se alcanzan los valores máximos. El cálculo de la duración y el dimensionado de los elementos de protección quedan fuera del alcance de este proyecto.

2.1 Introducción

En el diseño de las redes ferroviarias, es fundamental considerar no sólo las corrientes nominales de servicio, sino también las sobrecorrientes debidas a las sobrecargas y a las intensidades de cortocircuitos que se producen debido a los diferentes fallos que se dan cuando la red se encuentra en servicio. Se puede definir el cortocircuito como *“una conexión de relativamente baja resistencia o impedancia, producida de forma accidental entre dos o más puntos de un circuito que están normalmente a tensiones diferentes”* [5].

Una de las principales características de las intensidades de cortocircuito es el incremento prácticamente instantáneo de la corriente y el alcance de valores máximos varias veces superior a la corriente nominal, a diferencia de las de sobrecarga, que se caracterizan por un incremento más suave, es decir, mantenido en un intervalo de tiempo y algo mayor a la corriente nominal.

Un estudio y análisis de corrientes producidas por faltas es de vital importancia en el diseño de las redes ferroviarias. Las corrientes de cortocircuito pueden producir esfuerzos térmicos y electrodinámicos significativos, pudiendo provocar daños irreparables sobre el resto de los elementos de la instalación en caso de no ser eliminadas cuanto antes sea posible.

El conocimiento de la magnitud de estas corrientes cuando se produce un fallo en cualquier punto de la instalación es indispensable para el diseño de los distintos elementos que componen el sistema ferroviario, tales como: barras, cables, dispositivos de maniobra, de protección y etc.

Por lo tanto, el conocimiento de la corriente máxima de cortocircuito implica adquirir el dominio sobre:

- a. Capacidad de ruptura del interruptor de circuito.
- b. Capacidad de disyuntor
- c. Capacidad de resistencia electrodinámica del equipo de conmutación y de los diferentes elementos del sistema de potencia.
- d. Capacidad térmica del interruptor.
- e. Degradación del aislamiento.
- f. Corriente de cortocircuito mínima (sensibilidad del sistema de protección)
- g. Dimensionamiento de equipos (CT, transformador, aislador, barras colectoras, etc.)
- h. Estabilidad de la red
- i. Estabilidad de tensión y compensación de potencia reactiva.
- j. Fuerza de la red para absorber energía renovable.

En resumen, tanto para el diseño de una instalación como para el dimensionamiento de los dispositivos de protección es una obligación el conocer entre otras cosas, las corrientes de cortocircuito máximas y mínimas en todos los puntos de la instalación.

2.2 Valores máximos y mínimos de corrientes de cortocircuito

Por lo general, se puede afirmar que las corrientes de cortocircuito mínimas se producen en los puntos finales o extremos de los circuitos protegidos, considerando la configuración de la red y el tipo de cortocircuito de menor aporte. Esto es debido a que se tienen en consideración más elementos pasivos en la instalación (líneas de transmisión, transformadores, etc.). La introducción de las impedancias equivalentes de estos elementos en la fórmula de cálculo de intensidades de cortocircuito hace que el valor obtenido decrezca de forma proporcional a medida que se aleje de la fuente de alimentación.

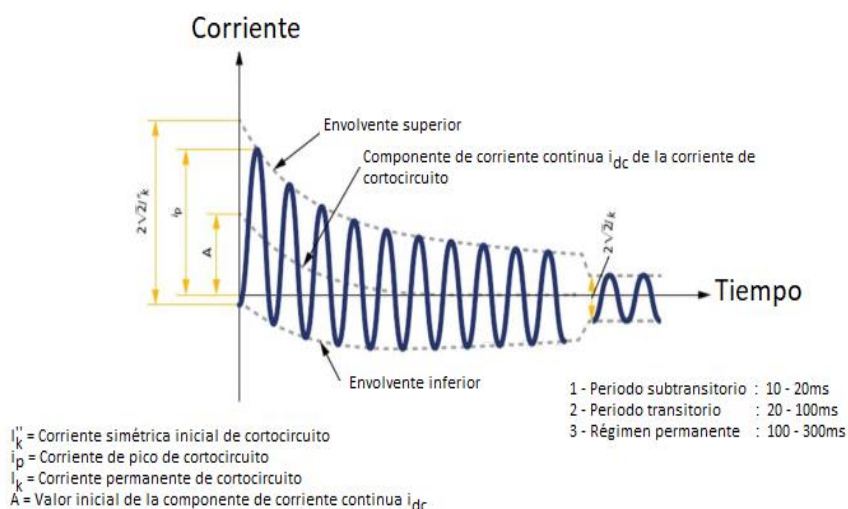


Figura 2-1. Representación esquemática de corriente de cortocircuito. Fuente [4].

Los valores máximos de corrientes de cortocircuito que se pueden alcanzar entre la catenaria y rail según el tipo de la explotación ferroviaria vienen establecidos en las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad (ETI). Estas magnitudes se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 2-1 Máximo nivel de cortocircuito entre la línea de contacto y el carril. ETI del subsistema de Energía. Directiva 96/48/CE.

Sistema de alimentación	Subestación generalmente conectada en paralelo	Máxima corriente de cortocircuito con el carril que puede darse
	S/N	(kA)
25.000 V-50 Hz C.A.	N	15 ¹
15.000 V-16.7 Hz C.A.	SS	40
3.000 VC.C.	SS	50 (perspectiva sostenida) ²
1.500 VC.C.	SS	75 (perspectiva sostenida) ²
750 VC.C.	SS	65 (perspectiva sostenida) ²
¹ El valor de 12 kA anteriormente el comúnmente aceptado. ² Véase la definición en la norma EN 501 23-1.		

En este proyecto, se distinguirán dos modos de funcionamiento para el análisis de las corrientes de cortocircuito en una típica instalación ferroviaria de tracción. Estas dos posibilidades de estudio bien diferenciados entre sí son las siguientes:

- Subestación eléctrica de tracción en vacío: la SET alimentada por la red eléctrica de transporte se mantiene totalmente desconectada de los centros de autotransformación asociados a la red de alimentación ferroviaria. Mediante este estudio, debido a que es la situación más desfavorable, se obtendrá la corriente de cortocircuito máxima [8].
- Subestación eléctrica de tracción en carga: la SET alimentada desde la red de transporte se encuentra en modo normal de servicio, el resto de los elementos del sistema de tracción y los centros de autotransformación asociados están conectados y por lo tanto contribuyen de una u otra forma a las corrientes de cortocircuito.

Con objeto de conocer la influencia de los trenes en servicio sobre las curvas de corrientes y tensiones a lo largo de la línea ferroviaria cuando se produce un cortocircuito en cualquier punto de la instalación, se llevarán a cabo simulaciones mediante el software OpenDSS.

En definitiva, las corrientes de cortocircuito juegan un papel fundamental para el diseño de los elementos y equipos que constituyen el sistema de red de alimentación. Entre los objetivos del cálculo de las intensidades de cortocircuitos se puede destacar:

- Definir el poder de corte y de cierre de los interruptores. Conocidos los valores máximos y mínimos de las corrientes de cortocircuito, se definen las capacidades de ruptura mínimas que deben de tener los diferentes interruptores instalados a lo largo de toda la red ferroviaria.
- Conocer los esfuerzos térmicos y electrodinámicos en los componentes.
- Dimensionar correctamente la subestación eléctrica de tracción y los centros de transformación.
- Determinar el ajuste de los dispositivos de protección para la protección de los conductores frente a cortocircuito.

Una vez realizado el análisis de cortocircuito se obtendrán los siguientes resultados:

- Las tensiones después de la falta en todos los nodos de la red.
- La potencia de cortocircuito en el punto de falta.
- La intensidad de cortocircuito en el punto de falta.
- La distribución de corrientes por todas las líneas de la red.

2.3 Origen de los cortocircuitos

Dependiendo del tipo de instalación eléctrica en estudio, los fallos pueden ser originados por diversos fenómenos. Si se particulariza a instalaciones ferroviarias, entre los motivos más comunes que dan lugar a un cortocircuito y por lo tanto un corte de suministro se pueden destacar [4] [5]:

- a. Relámpagos en las líneas de transmisión.
- b. Fenómenos de ondas viajeras.
- c. Contaminación de los aisladores por disposición de las sales.
- d. Deterioro o perforación del aislamiento debido a calentamientos excesivos prolongados, ambiente corrosivo o envejecimiento natural.
- e. Problemas mecánicos: rotura de conductores o aisladores por objetos extraños o animales, ramas de árboles en líneas aéreas e impactos en cables subterráneos (son uno de los grandes contribuyentes de

las faltas).

- f. Sobretensiones debido a descargas atmosféricas, maniobras o a defectos.
- g. Factores humanos: falsas maniobras, sustitución inadecuada de materiales, etc.
- h. Rating inadecuado de los elementos de protección.
- i. Choque de aves con la catenaria.
- j. Otras causas: vandalismos, incendios, tormentas, inundaciones, nieve etc.

2.4 Fuentes que aportan al cortocircuito

Los elementos denominados activos son las principales fuentes que contribuyen al cortocircuito. Es decir, la presencia de estos elementos en una instalación eléctrica hace que los valores máximos de intensidades de cortocircuito sean mayores. Estos elementos son esencialmente las máquinas eléctricas rotativas. Entre los elementos activos, se pueden destacar:

- Red de suministro y distribución de energía eléctrica.
- Generadores y motores (todas aquellas máquinas eléctricas síncronas).
- Motores asíncronos (todas aquellas máquinas eléctricas asíncronas).

A continuación, se muestra una tabla resumen de la influencia que puede tener la presencia de determinados elementos eléctricos y la localización de la falta sobre las corrientes de cortocircuito.

Tabla 2–2. Efecto sobre las intensidades de cortocircuito.

	Diferentes casos que se pueden dar ¹	Efecto sobre la Corriente de Falta
1	Localización del fallo	
1.1	En las cercanías de la fuente de alimentación	↑
1.2	A una distancia de la fuente de alimentación	↓
2	Fuente en servicio	
2.1	Con el máximo número de generadores en servicio	↑
2.2	Con el mínimo número de generadores en servicio	↓
3	Transformadores de potencia funcionando en paralelo	↑

¹ Esta tabla se ha tomado de un artículo presentado por la empresa de electricidad ABB. Para profundizar y conocer más sobre cómo afectan los diferentes elementos eléctricos a las corrientes de falta diríjase a [4].

4	Incremento de la resistencia de falta	↓
5	Incremento de la impedancia de puesta a tierra	↓
6	Un aumento en la carga y el generador de CA	↑
7	Un aumento en el ratio X/R	↑

2.5 Consecuencias de los cortocircuitos

Las consecuencias que puede provocar un fallo de este tipo si no es detectado y eliminado rápidamente pueden ser desastrosas para la instalación. Dependiendo de la naturaleza y duración de los defectos, la magnitud de las corrientes y el punto de la instalación afectado, la corriente de falta puede provocar no solo daños materiales sino también la pérdida de vidas humanas.

Aunque los impactos van a depender del punto en el cual se produce el fallo y la duración del mismo, en general se pueden considerar los siguientes efectos:

- En el punto donde se generó la falta se produce:
 - Fusión de los conductores.
 - Deterioro de los aislamientos.
 - Incendios provocados por los arcos eléctricos.
 - Daños mortales en caso de presencia de seres vivos.

- En el circuito o equipo defectuoso:
 - Aparición de esfuerzos electrodinámicos.
 - Deformación de los juegos de barras.
 - Rotura de aisladores.
 - Averías en bobinados de transformadores o centros de transformación asociados.
 - Esfuerzos térmicos, con sobrecalentamientos y riesgo de deterioros de los aislantes.

- Para el resto de la instalación:
 - Disminución notable de la tensión, dando lugar a que parte de la instalación quede fuera de servicio.
 - Perturbaciones en los circuitos de control y comunicaciones.
 - Inestabilidad dinámica y pérdida de sincronismo.
 - La alta corriente inducida puede causar perturbaciones en los circuitos cercanos.

- Efectos térmicos:
 - Se miden a través de la ecuación de Joule, que permite obtener la cantidad de energía liberada.

$$E_T = \int R \cdot i^2 dt \quad (2-1)$$

➤ Efectos electromagnéticos:

- Mediante la Ley de Biot y Savart, se pueden calcular los esfuerzos electrodinámicos a los que se ven sometidos dos conductores paralelos y rectilíneos separados por una distancia d y por los cuales circula una corriente I .

La fuerza máxima es proporcional al cuadrado de la corriente máxima de la intensidad de cresta de cortocircuito y se puede estimar mediante la siguiente fórmula:

$$F_{MAX} \approx \frac{I_s^2}{d} \cdot L \quad (2-2)$$

Siendo:

I_s : Corriente máxima de cresta

L : Longitud entre los conductores

d : Distancia entre los conductores

2.6 Características técnicas de diseño

2.6.1 Líneas de transporte de energía

A continuación, se presenta el diagrama esquemático general de la red de alimentación de alta tensión desde la fuente de generación hasta los transformadores de potencia de MT. Como se puede observar, existen diferentes niveles de suministro de tensión normalizados, estando cada nivel caracterizado por unas particularidades de explotación y funcionamiento.

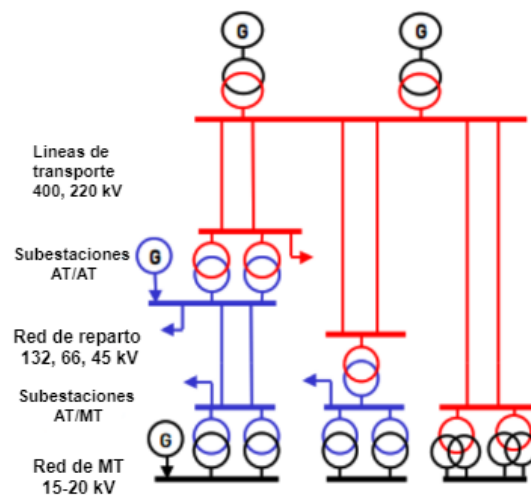


Figura 2-2. Diagrama esquemático de la arquitectura de red de AT. Fuente [13].

En la siguiente tabla se resume las funciones principales, la estructura y el tipo de explotación asignados a cada uno de los diferentes niveles de tensión mostrados en la figura anterior.

Tabla 2–3 Arquitectura de red de alta tensión. Fuente [13].

Tensión	Función	Estructura	Explotación
220 kV	Transporte o Reparto	Mallada	Mallada o Radial
132 kV	Reparto	Mallada	Mallada o Radial
66kV	Reparto	Mallada	Mallada o Radial
45 kV	Reparto	Mallada	Radial o Rallada
15-20 kV	MT	Mallada o Radial	Radial
400 V	BT	Mallada o Radial	Radial

Además, para cada nivel de suministro existen unos requisitos que vienen exigidos por el propietario de la red de distribución (REE), y los cuales el consumidor debe respetar. Por ejemplo, el suministrador establece la intensidad mínima a efectos térmicos que debe soportar cualquier instalación con intención de conectarse a la red de transporte.

Tabla 2–4 Datos normalizados de red de alta tensión en sus diferentes niveles. Fuente [13].

Características eléctricas	MT	45 kV	66 kV	132 kV	220 kV
Nivel de Aislamiento					
- Tensión más elevada del material (Us)	24 kV	52 kV	2,5 kV	145 kV	245 kV
- Tensión soportada a frecuencia industrial	50 kV	95 kV	140 kV	275 kV	460 kV
- Tensión soportada a impulsos tipo rayo	125 kV	250 kV	325 kV	650 kV	1050 kV
Intensidad de cortocircuito máxima admisible	25 kA	--	31,5 kA	31,5 kA	50 kA
- Simple barra	--	25 kA	--	--	--
- Doble barra	--	31,5 kA	--	--	--
Tratamiento de neutro	Aislado	A tierra	A tierra	A tierra	A tierra
Tensión máxima en los nudos	16 kV	48 kV	70 kV	145 kV	245 kV
Tensión mínima en los nudos	14 kV	42 kV	61 kV	123 kV	205 kV
Explotación normal	Radial	Radial	Radial	Mallada	Mallada

La tensión de alimentación estará en función de la potencia total demandada por la locomotora dentro del tipo de la instalación que se quiere llevar a cabo, adaptándose por lo general a las tensiones de las líneas de las compañías de transporte y distribución de energía cercanas. Para el caso de las instalaciones ferroviarias de alta velocidad se alimentan directamente de las líneas de transporte (110-400kV) debido a la gran demanda de potencia que se produce.

Tabla 2–5 Tensiones utilizadas en España para la alimentación de SS/EE de tracción. Fuente [2].

Líneas convencionales	Tensiones utilizadas
	20-25kV 45kV 60-66kV
Líneas alta velocidad	110kV 135kV 220kV 380kV-400kV

2.6.2 Subestación eléctrica de tracción

En la Tabla 6–2, se exponen las características técnicas más representativas de los transformadores de potencia monofásicos instalados en las subestaciones eléctricas de tracción.

Tabla 2–6 Características de los transformadores de tracción. Fuente [2].

Características de transformadores de tracción	220 kV	400 kV
Potencia de régimen continuo	60MVA	60MVA
Instalación	Intemperie	Intemperie
Refrigeración	ONAN	ONAN
Frecuencia	50Hz	50Hz
Número de fases	2	2
Conexión	li0-li6	li0-li6
Factor de desacoplamiento	K=0	K=0
Neutro de la red de alimentación	Rígido a tierra	Rígido a tierra
Factor de potencia	0.8	0.8
Tensión primario	220kV	400kV
Tensión secundario	2x27,5kV	2x27,5kV
Regulación: En carga primario, lado de AT 21 posiciones $\pm 0.8\%$ entre dos tomas	Si	Si
Tensión de cortocircuito U_{cc} (AT - BT)	10%	10%
Niveles de aislamiento		

Arrollamiento primario:		
Tensión nominal	220kV	400kV
Tensión de ensayo a frecuencia industrial	460kV	
Tensión soportada a impulsos tipo rayo 1,2/50 μ s	1.050kV	1.425kV
Arrollamiento secundario:		
Tensión nominal	2x27,5kV	2x27,5kV
Tensión de ensayo a frecuencia industrial	105kV	105kV
Tensión soportada a impulsos tipo rayo 1,2/50 μ s	250kV	250kV
Nivel de ruido con 100% de carga y 100%Un a 1m	75dB (A)	75 dB(A)
Material de aislamiento	Aceite mineral	Aceite mineral
Estándar UNE – EN60076	Si	Si
Temperatura ambiental máxima de diseño	45 °C	45 °C
Pérdidas a 75 °C	160 kW	160 kW
Pérdidas en vacío 100% Ur	30 kW	30 kW

Las configuraciones de conexión de la SET a la red de alimentación más comunes que se pueden encontrar son las siguientes:

- Conexión a dos fases de la red:
 - Alimentación con transformadores monofásicos conectados a una línea de alimentación: esta configuración es considerada la más sencilla de implementar por su simplicidad y menor coste. Sus principales inconvenientes son las elevadas tensiones de desequilibrio que se pueden producir entre las fases de la red de alimentación y las perturbaciones en las instalaciones próximas [2].
- Conexión a tres fases de la red:
 - Conexión V: Es la alternativa al sistema de alimentación anterior, en este, se realiza la conexión a las tres fases de la red pública en vez de dos. Se caracteriza por tener subestaciones de tracción con dos transformadores conectados a fases diferentes y trabajando en régimen normal. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de este modelo de conexión en el sistema de alimentación monofásico 1x25kVca.

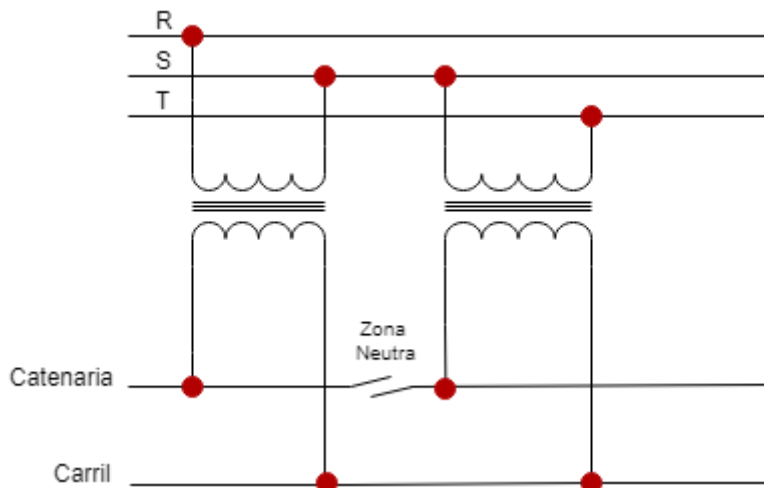


Figura 2-3.Sistema monofásico con conexión en V.

- Conexión Scott-T: Este tipo de configuración consta de dos transformadores de potencia con las mismas prestaciones. Uno de ellos, tiene una toma en su devanado primario al 86.6% del valor de la tensión nominal. Esta toma se usa como punto de conexión con la toma central del otro transformador de potencia. Su principal ventaja es la reducción drástica de los desequilibrios, pero son más caros. Está configuración está siendo usada principalmente en el sistema japonés de ferrocarriles.

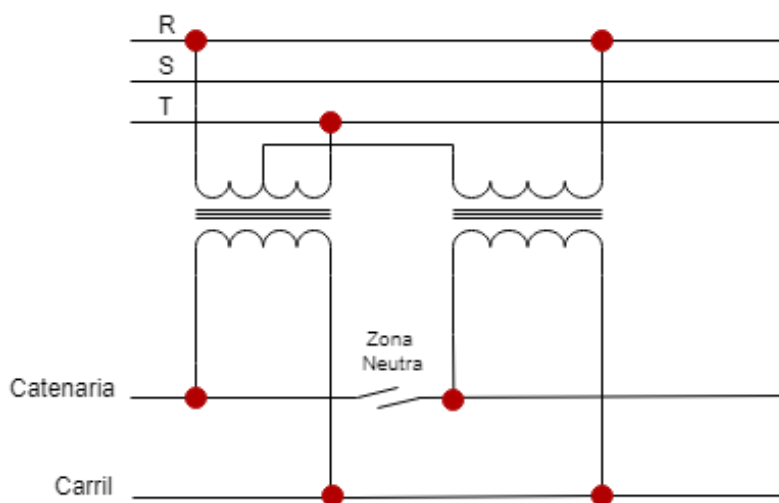


Figura 2-4. Sistema monofásico con conexión tipo Scott.

Estos tipos de conexión son aplicables al resto de sistemas de alimentación en corriente alterna y no únicamente a los de 25kVca objeto de estudio de este proyecto. El uso de una conexión u otra va a depender del resultado del estudio técnico-económico que se tiene que llevar a cabo de los condicionantes de la explotación. Entre ellos; las potencias ofrecidas por la red eléctrica en el punto de conexión, costes de instalación, longitud de la línea a electrificar, requisitos de fiabilidad y disponibilidad, el diseño de la configuración y en gran medida de los requisitos de distorsión que el agente de distribución de la energía eléctrica permite en la zona.

2.6.3 Centros de autotransformación

Como se comentará más adelante, en los sistemas de alimentación en corriente alterna de 2x25 kV es necesario instalar unos centros de autotransformación a lo largo de la red. Los datos característicos más comunes de los autotransformadores son los siguientes:

Tabla 2-7. Características más representativas de los autotransformadores

Potencia nominal	10 MVA*
Instalación	Intemperie
Refrigeración	Natural – ONAN
Frecuencia	50 Hz
Número de fases	Monofásico
Devanados	Cobre
Neutro	Rígido a la tierra
Tensión Nominal primaria en vacío	55 kV
Tensión Nominal secundaria en vacío	27,5 kV
Relación de transformación en vacío	55 kV/27,5 kV
Tensión de cortocircuito AT – BT	1 % (a 75°C, potencia base 15 MVA)
Tensión más elevada para el material	60 kV – 50 Hz
*En función de las necesidades de la línea, también es común encontrarse autotransformadores de 15 MVA	

2.6.4 Transformador de servicios auxiliares

El transformador de servicios auxiliares en general suele tener las siguientes características:

Tabla 2-8. Características del transformador de servicios auxiliares. Fuente [2]

Relación de transformación	27,5/0,23kV
Tipo de conexión	lio
Potencia nominal	250 kVA
Frecuencia	50 Hz
Tensión Nominal Primario	27,5 kV
Regulación Tensión Primario	±2 x 2,5%

Tensión Nominal Secundario en vacío	240 V
Arrollamiento Primario Tipo	Encapsulado
Arrollamiento Secundario Tipo	Impregnado
Tensión de cortocircuito (75°C) (ε_{cc})	8 %
Material conductor arrollamiento	Cu
Pérdidas en vacío a U_n	1600 W
Pérdidas debidas a la carga (75°C)	2800 W

2.7 Cálculo de valores nominales

2.7.1 Intensidad nominal en el lado primario del transformador

La intensidad nominal en el lado del primario del transformador de potencia de la subestación eléctrica se puede obtener a partir de la potencia y la tensión de suministro de la red.

$$I_N = \frac{S_N}{U_N \cdot \sqrt{3}} \quad (2-3)$$

2.7.2 Intensidad nominal en el lado secundario del transformador

Las diferentes intensidades nominales del secundario del transformador de potencia se pueden calcular utilizando las fórmulas siguientes:

$$I_{NS_min} = \frac{S_N}{27,5KV \cdot (1 + \%U_N)} \cdot \frac{1}{2}$$

$$I_{NS_media} = \frac{S_N}{27,5KV} \cdot \frac{1}{2} \quad (2-4)$$

$$I_{NS_max} = \frac{S_N}{27,5KV \cdot (1 - \%U_N)} \cdot \frac{1}{2}$$

Siendo:

$\%U_N$: Tanto por ciento de la tensión regulable del transformador.

2.7.3 Intensidad nominal que circula por los autotransformadores

El valor de la intensidad nominal que circula por cada fase de los autotransformadores, tanto intermedios como finales, se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$I_N = \frac{S_N}{U_N} \quad (2-5)$$

En la siguiente figura se ha representado el recorrido de la corriente por las diferentes fases del autotransformador. Como se puede observar, la intensidad se reparte en partes iguales entre el feeder positivo y el negativo.

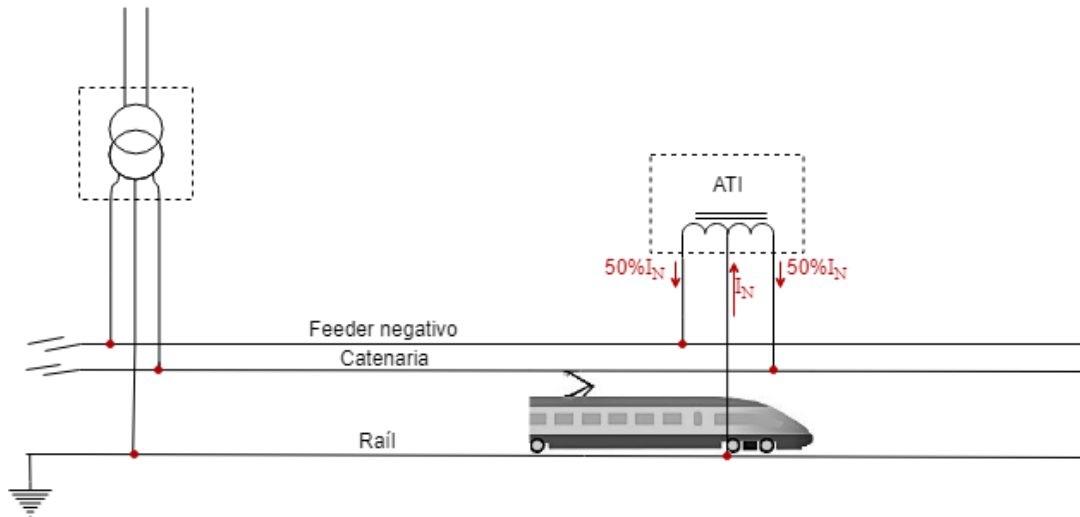


Figura 2-5. Intensidad nominal que circula por el autotransformador.

Si consideramos los datos característicos del autotransformador presentados en la Tabla 6-3, los valores nominales que se obtienen son los siguientes:

$$I_N = \frac{S_N}{U_N} = \frac{15 \text{ MVA}}{27.5 \text{ kV}} = 545.45 \text{ A} \quad (2-6)$$

Por lo tanto, la intensidad nominal que circula por cada una de las fases será la mitad, según lo comentado anteriormente:

$$I_N = \frac{1}{2} \cdot I_N = \frac{1}{2} \cdot 545.45 \text{ A} = 272.73 \text{ A}$$

2.8 Cálculo de corrientes de cortocircuito

2.8.1 Tipos de cortocircuitos considerados en el sistema de alimentación a 25kV

Si consideramos una red de alimentación ferroviaria a 25kV desde su origen (punto de conexión con las líneas de transporte de energía) hasta su punto final (último tramo de la vía alimentado por la SET), podemos encontrar los siguientes tipos de cortocircuitos:

- Cortocircuito trifásico equilibrado: Este tipo de cortocircuito tendrá su origen en las propias líneas de transporte de energía. No es una falta muy común, ya que el porcentaje de incidencia es únicamente del 5%, un valor muy bajo si lo comparamos con el porcentaje de incidencia de las faltas monofásicas, del 80%.

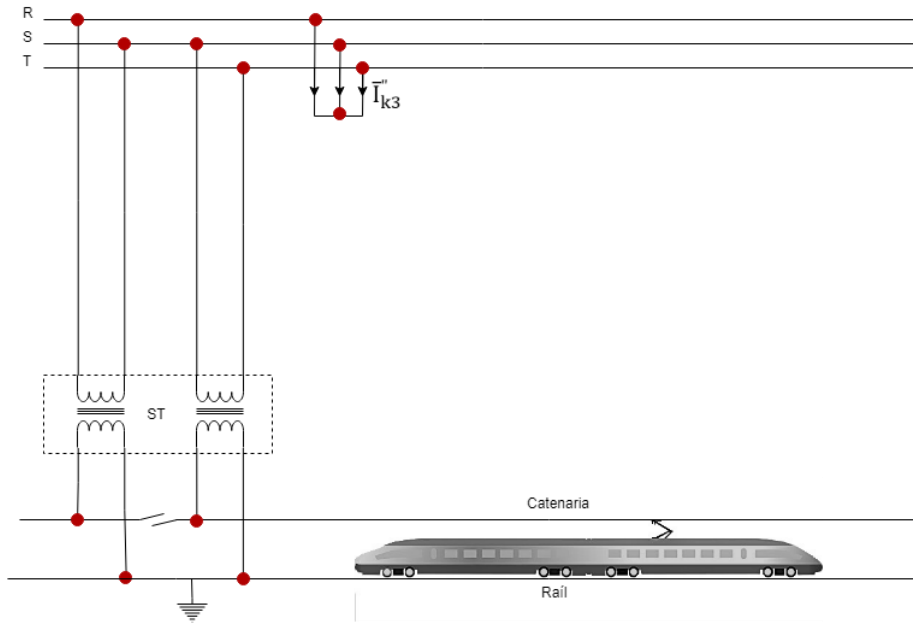


Figura 2-6. Cortocircuito trifásico equilibrado.

- b. Cortocircuito entre dos fases aislado (sin conexión a tierra): Es consecuencia de la conexión accidental entre dos fases diferentes. El porcentaje de incidencia es del 15%. Se puede dar lugar en diferentes lugares. En la figura de abajo, se indican dos puntos en los que se puede originar este tipo de falta.

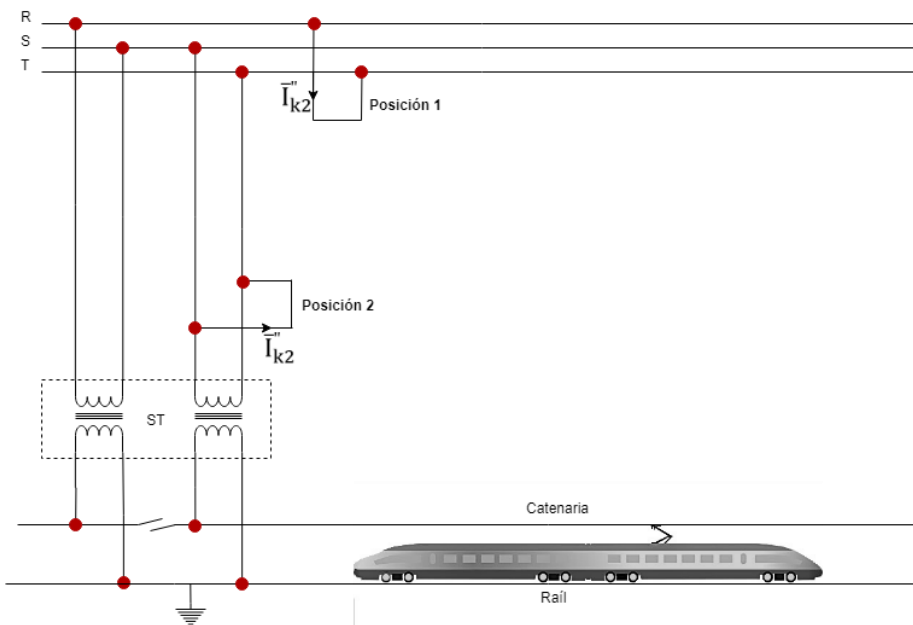


Figura 2-7. Cortocircuito entre dos fases aislado (sin conexión a tierra).

- c. Cortocircuito monofásico fase-tierra: Este tipo de falta es el más común entre los comentados anteriormente. El porcentaje de incidencia es del 80%. Esta falta tendrá origen, por ejemplo, cuando se produce un contacto accidental entre la catenaria y un cable con potencia nulo (raíl, cable de retorno o tierra)

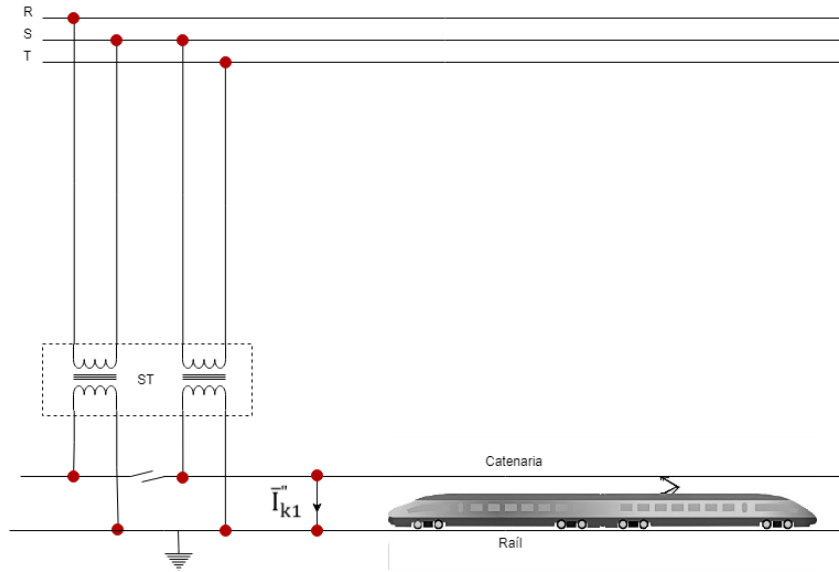


Figura 2-8. Cortocircuito monofásico fase-tierra.

2.8.2 Cortocircuito en la red de transporte

El primer tipo de falta considerado es aquel que se da lugar en las propias líneas de alimentación, justo antes de la conexión con la SET. Este puede ser de dos tipos: un cortocircuito trifásico equilibrado o un cortocircuito entre dos fases aislado (sin conexión a tierra), ambos mostrados respectivamente en la Figura 2-6 y Figura 2-7. Las intensidades de cortocircuito trifásica y bifásica obtenidas son de la misma forma y orden que en la situación de la subestación eléctrica en vacío.

A partir de la relación (2-7) se puede obtener el valor de la corriente de cortocircuito trifásica simétrica inicial (I_{k3}''). Para el cálculo, es necesario disponer de la potencia de cortocircuito de la red, que por lo general viene proporcionada como un dato estadístico. Es decir; la REE marca unos valores admisibles de corriente para los diferentes niveles de tensión con los que opera, pero no establece ningún valor de potencia de cortocircuito excepto a efectos de datos estadísticos.

$$I_{k3}'' = \frac{S_{k3Q}''}{\sqrt{3} \cdot U_{nQ}} \quad (2-7)$$

Siendo:

S_{k3Q}'' : Potencia de cortocircuito inicial en el punto de conexión.

U_{nQ} : Tensión nominal del sistema en el punto de conexión.

La intensidad de cortocircuito bifásica se puede calcular a partir de la intensidad trifásica obtenida mediante la ecuación anterior:

$$I_{k2}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3}'' \quad (2-8)$$

En la Figura 2-9 se ha representado el valor de cresta de la intensidad de cortocircuito máxima, conocida también por intensidad dinámica. Esta corriente se puede definir como el valor de la primera cresta del periodo transitorio.

Su cálculo es igual de importante que la intensidad térmica de cortocircuito de corta duración (1s) para determinar el poder de corte de los interruptores y de la resistencia electrodinámica de la aparamenta.

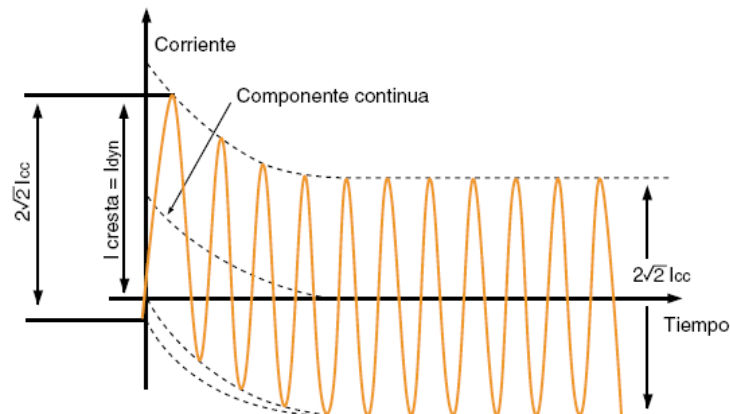


Figura 2-9. Intensidad de cortocircuito en el periodo subtransitorio. Fuente [8].

El valor de la intensidad dinámica que circula por el transformador se puede calcular a partir de la intensidad térmica de cortocircuito impuesta por la red, usando la siguiente ecuación:

$$I_{din} = 2,5 \cdot I_{k3}'' \quad (2-9)$$

2.8.3 Cortocircuito en el lado primario del transformador de la SET

Si consideramos el tipo de conexión más común a la red, en la cual se realiza la conexión monofásica a dos fases de la red, con la combinación de las tres de una subestación eléctrica y la sucesiva, el cortocircuito que se produce a la entrada del primario del transformador de potencia de la SET será de tipo bifásico. Los valores que se obtendrán serán del mismo orden que los obtenidos para el cálculo de la falta bifásica cuando esta se da lugar en las propias líneas de alimentación. Esto es debido a que, para su cálculo en este proyecto, se considera que la impedancia total de conexión entre la red de transporte y la SET es muy pequeña y por lo tanto despreciable.

2.8.4 Cortocircuito en el lado secundario del transformador de SSAA

En la mayoría de los sistemas de alimentación ferroviaria se dispone de unas cargas de tipo esencial alimentadas en baja tensión. Generalmente el suministro de energía a estos equipos se realiza mediante la conexión de un transformador de tipo monofásico al lado de 25kV de la SET. El tipo de falta que se puede dar en el lado secundario de este transformador de SSAA es un cortocircuito de tipo monofásico (fase-tierra).

2.8.5 Ejemplo numérico: Obtención de los valores de intensidades de cortocircuito

Si consideramos el esquema de conexión a la red y del circuito de servicios auxiliares a la SET mostrado en la Figura 2-10, se puede proceder como se muestra a continuación para determinar los valores de las corrientes de cortocircuito en los puntos comentadas anteriormente.

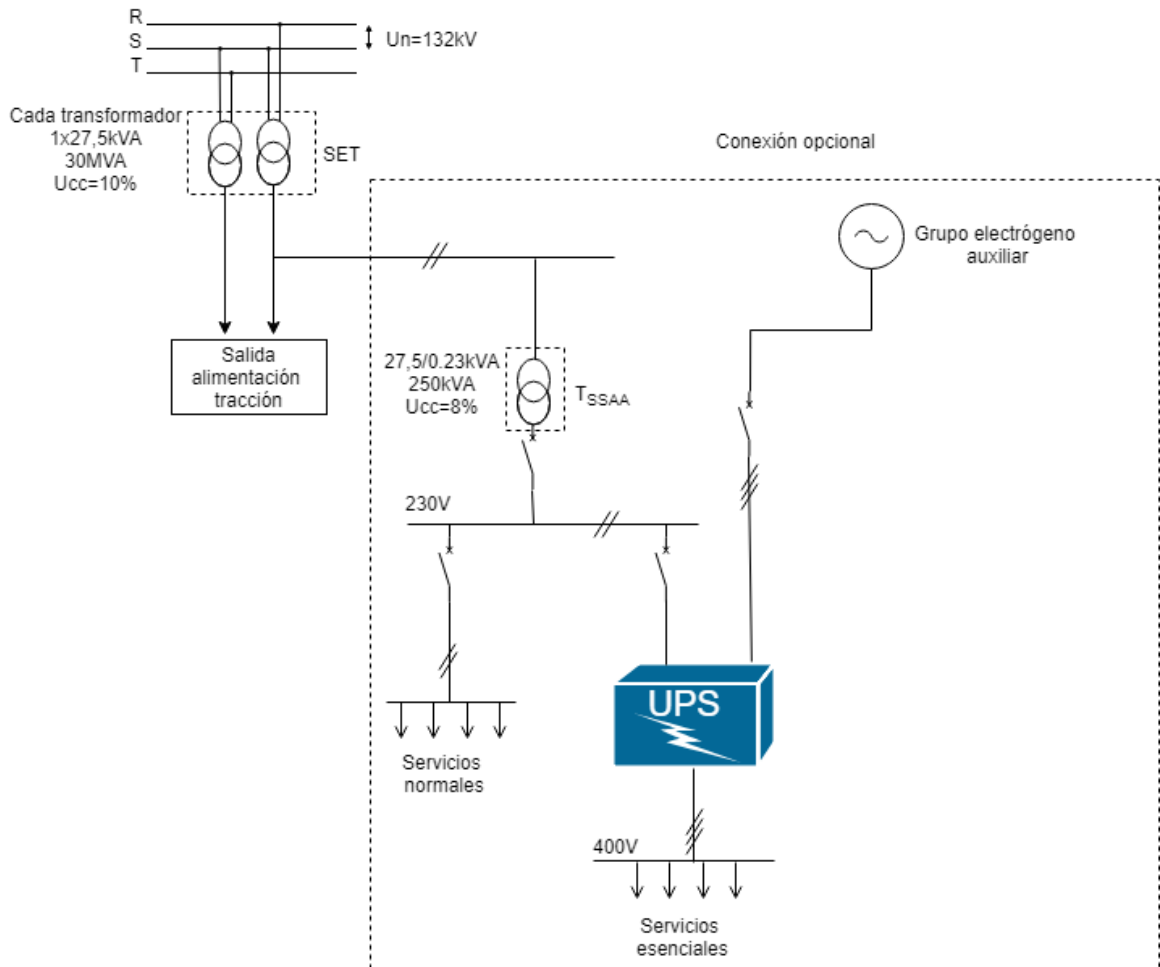


Figura 2-10. Configuración de la conexión de servicios auxiliares.

En primer lugar, se representa el modelo equivalente simplificado en forma de impedancias de la conexión del circuito de alimentación a servicios auxiliares mostrado anteriormente en la Figura 2-10. Consideramos los datos típicos de la red de alimentación, transformador de tracción y transformador de servicios auxiliares de la Tabla 2-6 y Tabla 6-3. Las impedancias de cortocircuito de estos elementos pueden ser calculadas como se procede a continuación:

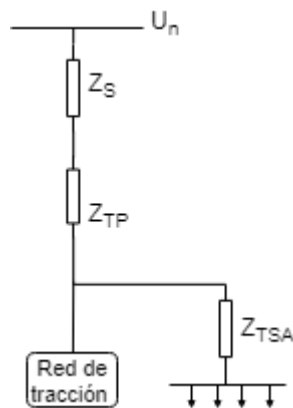


Figura 2-11. Circuito equivalente de configuración de la conexión de SSAA.

Con objeto de facilitar los cálculos y expresar de forma más cómoda los resultados, se adopta una base genérica respecto a la cual se va a referir las impedancias:

$$\begin{aligned} U_{base} &= U_{B1} = 1.25 \text{ kV} \\ S_{base} &= S_{B1} = 10 \text{ MVA} \end{aligned} \quad (2-10)$$

Definidas la tensión y la potencia de la base genérica de trabajo, se puede utilizar la fórmula (2-11) para calcular el resto de las tensiones base en los demás puntos del circuito que están a una tensión diferente de la base genérica, que ha sido inicialmente adoptada. Estas partes del circuito se pueden ver en la Figura 2-12.

$$U_B(n) = U_B(n-1) \cdot t_r \quad (2-11)$$

Siendo:

tr: Relación de transformación asignada para la que el cambiador de tomas en carga está en la posición principal.

De este modo, usando la expresión anterior, se obtiene el valor del resto de las bases referidas a la inicial:

$$\begin{aligned} U_{B2} &= U_{B1} \cdot t_r = 0.23 \cdot \frac{25}{0.23} = 25 \text{ kV} \\ U_{B3} &= U_{B2} \cdot t_r = 25 \cdot \frac{132}{25} = 132 \text{ kV} \end{aligned} \quad (2-12)$$

➤ Impedancia del sistema de alimentación:

Para el cálculo de la impedancia del sistema de alimentación a la entrada de la SET, se considera que este valor incluye tanto la impedancia de la red como la impedancia de la línea hasta el punto de conexión con la SET. Para su obtención se utiliza la siguiente expresión:

$$Z_Q(p.u.) = \frac{S_{base}}{S_{k3Q}''} \cdot \left(\frac{U_{nQ}}{U_{B3}} \right)^2 = \frac{10 \text{ MVA}}{8000 \text{ MVA}} \cdot \left(\frac{132 \text{ kV}}{132 \text{ kV}} \right)^2 = 1.25 \cdot 10^{-3} p.u. \quad (2-13)$$

Donde:

S_{base} : Potencia base genérica definida inicialmente.

S_{k3Q}'' : Potencia de cortocircuito inicial en el punto de conexión.

U_{nQ} : Tensión nominal del sistema en el punto de conexión.

➤ Impedancia del transformador de tracción:

Las impedancias de cortocircuito del transformador de potencia y de servicios auxiliares vienen expresadas respecto a las bases nominales de cada transformador. Además, estas coinciden con sus tensiones relativas cuando estas vienen definidas por unidad. Por lo tanto, las impedancias expresadas respecto a la nueva base se calculan de la siguiente manera:

$$U_{cc} = 10\% \rightarrow Z_{TP}(p.u.) = 0.1 p.u. \text{ (expresada respecto a 60MVA)} \quad (2-14)$$

Usando la siguiente expresión se puede obtener el valor de la impedancia por unidad respecto a la nueva base:

$$Z_{TP} = U_{cc} \cdot \frac{S_{base}}{S_{rT}} \cdot \left(\frac{U_{rT}}{U_{B3}} \right)^2 = 0.1 \cdot \frac{10 \text{ MVA}}{30 \text{ MVA}} \cdot \left(\frac{132 \text{ kV}}{132 \text{ kV}} \right)^2 = 3.33 \cdot 10^{-2} \text{ p.u.} \quad (2-15)$$

El transformador considerado en este ejemplo numérico es de dos devanados; el cálculo es un poco más complicado para el caso del transformador de tres devanados ya que el circuito equivalente implica dos ramas de impedancias de cortocircuito en paralelo. Sin embargo, se podría utilizar el modelo de transformador de ADIF que posee una tensión relativa de cortocircuito del 10% entre el lado de alta y de baja².

➤ Transformador de servicios auxiliares:

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado para el transformador de tracción, se obtiene el valor de la impedancia del transformador de servicios auxiliares:

$$U_{cc} = 8\% \rightarrow Z_{TSA}(\text{p.u.}) = 0.08 \text{ p.u. (expresada respecto a 250 kVA)} \quad (2-16)$$

Usando la misma expresión anterior para el cambio de base, se calcula del mismo modo el valor de la impedancia por unidad del transformador de servicios auxiliares respecto a la nueva base:

$$Z_{TSA} = U_{cc} \cdot \frac{S_{base}}{S_{rT}} \cdot \left(\frac{U_{rT}}{U_{B2}} \right)^2 = 0.08 \cdot \frac{10 \text{ MVA}}{0.23 \text{ MVA}} \cdot \left(\frac{25 \text{ kV}}{25 \text{ kV}} \right)^2 = 3.2 \text{ p.u.} \quad (2-17)$$

Obtenidas las impedancias equivalentes de todos los componentes, expresadas por unidad, respecto a la base genérica de cálculo, se procede a calcular los valores de las corrientes de cortocircuito en los puntos 1, 2 y 3 mostrados en la Figura 2-12. Para ello, hay que plantear el modelo Thévenin equivalente del circuito en función de la localización donde se ha producido este fenómeno. Si se considera que el cortocircuito se produce en el punto 1, el equivalente Thévenin obtenido es el mostrado en la Figura 2-13.

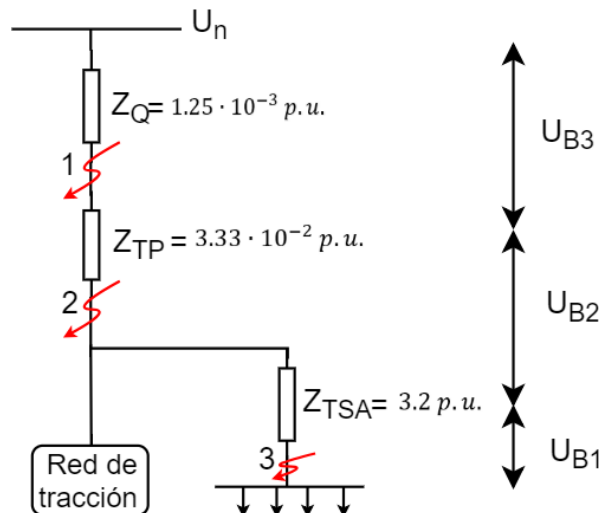


Figura 2-12. Circuito equivalente de configuración de la conexión de SSAA para cálculo de corrientes de falta.

² Este valor fue obtenido de la ET del transformador de ADIF. Para más información diríjase a [21]

2.8.5.1 Cálculo de corriente de cortocircuito en la red de alimentación

La impedancia Thévenin que interviene corresponde únicamente a la impedancia del sistema, ya que es la única que influye. Su valor es el obtenido anteriormente:

$$Z_{TH} = Z_Q = 1.25 \cdot 10^{-3} \text{ p.u.} \quad (2-18)$$

La tensión equivalente Thévenin tiene un valor por unidad de $1 \angle 0^\circ$, esto es debido a que la tensión en el punto de falta U_{nQ} es igual al valor de la tensión base U_{B3} obtenido anteriormente en ese lado del circuito. De este modo, el circuito equivalente a considerar para el cálculo del valor de la corriente de cortocircuito es el mostrado en la siguiente figura:

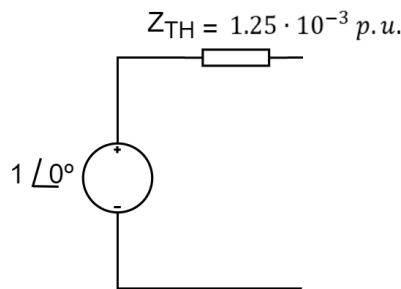


Figura 2-13. Circuito Thévenin equivalente para cálculo de falta en las líneas eléctricas de entrada.

Una vez obtenido el sistema simplificado, se calcula el valor por unidad de la corriente de falta en el punto donde se ha producido el cortocircuito, en este caso punto (1).

$$I''_{k3}(\text{p.u.}) = \frac{V_{TH}(\text{p.u.})}{Z_{TH}(\text{p.u.})} = \frac{U_{nQ}/U_{B3}}{Z_Q} = \frac{132 \text{ kV}/132 \text{ kV}}{1.25 \cdot 10^{-3} \text{ p.u.}} = 800 \text{ p.u.} \quad (2-19)$$

El valor real se puede calcular multiplicando el módulo de la corriente de cortocircuito, por unidad, obtenida anteriormente, por la corriente base, que se obtiene a partir de la potencia base, la tensión base y el tipo de cortocircuito considerado (trifásico o monofásico) en el punto de falta. Por lo tanto, el valor real obtenido es:

$$I''_{k3} = I''_{k3}(\text{p.u.}) \cdot I_{base} = I''_{k3}(\text{p.u.}) \cdot \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_{B3}} = 800 \text{ p.u.} \cdot \frac{10 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 132 \text{ kV}} = 34.990 \text{ kA} \quad (2-20)$$

Este mismo valor se podría haber calculado también directamente aplicando la expresión (2-7) presentada en el subcapítulo (2.8.2 Cortocircuito en la red de transporte).

$$I''_{k3} = \frac{S''_{k3Q}}{\sqrt{3} \cdot U_{nQ}} = \frac{8000 \cdot 10^6 \text{ VA}}{\sqrt{3} \cdot 132 \cdot 10^3 \text{ V}} = 34.990 \text{ kA} \quad (2-21)$$

Como era de esperar, los dos valores coinciden. La primera forma de cálculo mediante la definición de la tensión base tiene más protagonismo por la simplicidad que ofrece el cálculo de las corrientes de cortocircuito en los demás puntos del circuito que no son tan inmediatos.

Finalmente, el valor de la corriente de cortocircuito bifásica es de:

$$I_{k2}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3}'' = 30.302 \text{ kA} \quad (2-22)$$

2.8.5.2 Cálculo de corriente de cortocircuito a la salida del transformador de la SET

Para determinar la impedancia Thévenin se usa el valor de la impedancia equivalente de la red, así como la del transformador de potencia por unidad. Debido a que el punto (2) donde se ubica la falta se encuentra aguas abajo de la red, la impedancia Thévenin equivalente resulta de sumar en serie la impedancia de la red y la del transformador:

$$Z_{TH} = Z_Q + Z_{TP} = 1.25 \cdot 10^{-3} + 3.33 \cdot 10^{-2} = 3.45 \cdot 10^{-2} \text{ p.u.} \quad (2-23)$$

La tensión equivalente Thévenin tiene un valor por unidad de $1 \angle 0^\circ$. Esto es debido a que la tensión en el punto de falta U_{rT} es igual al valor de la tensión base U_{B2} obtenido anteriormente en ese lado del circuito. De este modo, el circuito equivalente a considerar para el cálculo del valor de la corriente de cortocircuito es el mostrado en la siguiente figura:

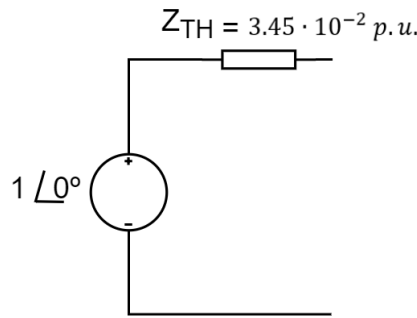


Figura 2-14. Circuito Thévenin equivalente para cálculo de falta a la salida de SET.

Luego:

$$I_{k1}'' = \frac{V_{TH}(\text{p.u.})}{Z_{TH}(\text{p.u.})} = \frac{U_{rT}/U_{B2}}{Z_Q + Z_{TP}} = \frac{25 \text{ kV}/25 \text{ kV}}{3.45 \cdot 10^{-2} \text{ p.u.}} = 28.91 \text{ p.u.} \quad (2-24)$$

El valor real de la corriente de cortocircuito monofásica:

$$I_{k1}'' = I_{k1}''(\text{p.u.}) \cdot I_{base} = I_{k1}''(\text{p.u.}) \cdot \frac{S_B}{U_{B2}} = 28.91 \text{ p.u.} \cdot \frac{10 \text{ MVA}}{25 \text{ kV}} = 11.566 \text{ kA} \quad (2-25)$$

2.8.5.3 Cálculo de corriente de cortocircuito a la salida del transformador de SSAA

Siguiendo los mismos pasos realizados anteriormente, se obtiene el valor de la corriente de cortocircuito monofásico cuando la falta se produce a la salida del transformador de SSAA:

Impedancia Thévenin:

$$Z_{TH} = Z_Q + Z_{TP} + Z_{TSA} = 1.25 \cdot 10^{-3} + 3.33 \cdot 10^{-2} + 3.2 = 3.234 \text{ p.u.} \quad (2-26)$$

Intensidad de cortocircuito por unidad:

$$I_{k1}''(p.u.) = \frac{V_{TH}(p.u.)}{Z_{TH}(p.u.)} = \frac{U_{rT}/U_{B1}}{Z_Q + Z_{TP} + Z_{TSA}} = \frac{25 \text{ kV}/25 \text{ kV}}{3.234 p.u.} = 0.309 p.u. \quad (2-27)$$

Intensidad de cortocircuito monofásica real:

$$I_{k1}'' = I_{k1}''(p.u.) \cdot I_{base} = I_{k1}''(p.u.) \cdot \frac{S_B}{U_{B1}} = 0.309 p.u. \cdot \frac{10 \text{ MVA}}{0.23 \text{ kV}} = 13.441 \text{ kA} \quad (2-28)$$

2.8.6 Cortocircuito en el secundario del transformador y en el resto de los puntos de la red de tracción

Para obtener el valor de la intensidad de cortocircuito en el secundario del transformador y aguas abajo de la instalación, es necesario realizar el cálculo mediante análisis nodal o simulación mediante el software OpenDSS, desarrollados en los siguientes capítulos. Para ello, se tiene en cuenta todo el sistema de tracción, considerando además todas las posibles situaciones que se pueden dar y eligiendo la más desfavorable desde el punto de vista de cortocircuito. Entre las diferentes situaciones de alimentación posibles, caben destacar los dos casos siguientes:

- La SET funciona en modo normal, alimenta únicamente al tramo de la vía que le corresponde hasta la zona neutra.
- La SET funciona en modo degradado, es decir, uno de los transformadores de la subestación anexa se encuentra fuera de servicio y, por lo tanto, se debe alimentar su tramo correspondiente.

Se pueden añadir varias pasibilidades de funcionamiento, aumentando el número de tramos a alimentar en función del número de subestaciones bajo fallo que se quieren simular. En el capítulo 3.4 Modos de funcionamiento, se realiza en estudio en profundidad de los modos degenerados bajos los cuales puede trabajar una subestación eléctrica de tracción.

2.9 Análisis nodal para cálculo de cortocircuitos

El algoritmo de resolución de redes ferroviarias ante cortocircuitos eléctricos desarrollado en este proyecto se fundamenta en la metodología de análisis nodal. Conocido también por el método de voltaje en los nodos, este consiste en plantear y resolver N-1 ecuaciones independientes entre sí, donde N representa el número total de nodos presentes en el circuito. Las ecuaciones se obtienen a partir del planteamiento de la ley de Kirchhoff.

Como ya se comentó, para plantear las ecuaciones, entra en juego la primera ley de Kirchhoff conocida también como ley de nodos, cuyo enunciado es el siguiente:

“En cualquier nodo, la suma de las corrientes que entran en ese nodo es igual a la suma de las corrientes que salen”.

De forma equivalente, la suma de todas las corrientes que pasan por el nodo es igual a cero.

$$\sum_{i=1}^n I_i = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (2-29)$$

El método de voltaje en los nodos es uno de los métodos más usados en la actualidad para analizar y resolver circuitos eléctricos. Junto con el método de la corriente en las mallas es uno de los procedimientos más eficientes para plantear y abordar el sistema de ecuaciones. Esto es debido a que organiza y procesa de una forma muy inteligente toda la información presente en el circuito eléctrico de estudio en un conjunto de N ecuaciones

independientes.

Esta técnica de resolución de circuitos eléctricos está incrustada en algunos softwares de simulación tan conocidos y usados como EMTP o SPICE.

Por lo tanto, se hará uso de este método para plantear el conjunto de sistema de ecuaciones por las cuales se rige la red de alimentación ferroviaria bajo estudio. Una vez obtenidas estas ecuaciones en forma matricial, se hará uso de un software externo para su resolución.

Conviene recordar que, tras obtener la solución del sistema y por lo tanto las tensiones en todos los nodos, estas serán relativas a uno que previamente se ha definido como nodo de referencia. En este proyecto se ha tomado el nodo de tierra con potencial nulo como nodo de referencia.

Debido a que es fundamental familiarizarse con esta técnica de resolución de circuitos para comprender el algoritmo de análisis nodal desarrollado en el siguiente capítulo, a continuación, se presenta un ejemplo de un circuito eléctrico simplificado como ejercicio práctico, con la finalidad de obtener el sistema de ecuaciones que rigen su comportamiento mediante esta metodología.

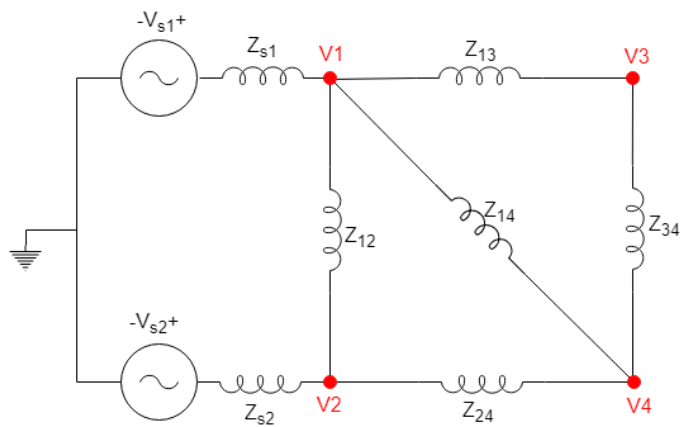


Figura 2-15. Ejemplo de circuito eléctrico para análisis nodal.

El primer paso a realizar es la obtención del diagrama de admitancias equivalente, este se obtiene planteando las relaciones equivalentes correspondientes a cada elemento. Por ejemplo, para el caso de las fuentes de alimentación se plantea el equivalente Norton, donde la fuente de tensión es sustituida por otra de intensidad en paralelo con una impedancia.

A continuación, se representan las expresiones necesarias para obtener los valores de los modelos equivalentes.

$$I_s = \frac{V_s}{Z_s}, \quad Y_s = \frac{1}{Z_s}, \quad Y_n = \frac{1}{Z_n} \quad (2-30)$$

Siendo:

I_s, Y_s : Corriente y admitancia de la fuente de alimentación.

Y_n : Admitancia genérica

Tras haber sustituido cada elemento del circuito por su modelo equivalente, se obtiene el diagrama representado en la ecuación (2-29). A partir de este esquema se puede plantear el sistema de ecuaciones mediante las leyes de Kirchoff descritas anteriormente.

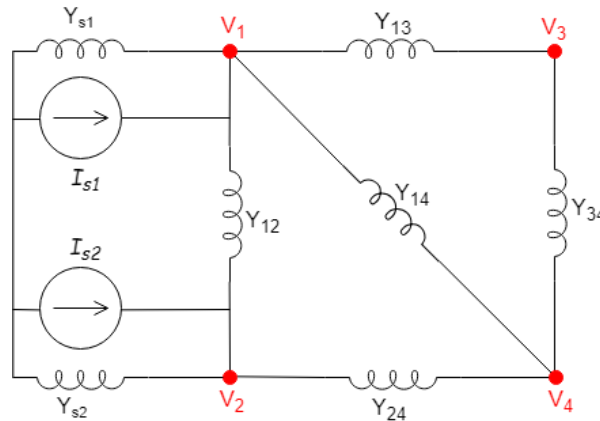


Figura 2-16. Diagrama eléctrico equivalente del ejercicio práctico de ejemplo.

El conjunto de ecuaciones que se obtiene está representado en la ecuación (2-31), donde las únicas incógnitas del sistema son las tensiones en los nodos.

$$\begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = Y_{bus} * \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

Siendo Y_{node} igual a:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{s1} + Y_{12} + Y_{13} + Y_{14} & -Y_{12} & -Y_{13} & -Y_{14} \\ -Y_{12} & Y_{12} + Y_{s2} + Y_{34} & 0 & -Y_{24} \\ -Y_{13} & 0 & Y_{13} + Y_{34} & -Y_{34} \\ -Y_{14} & -Y_{24} & -Y_{34} & Y_{14} + Y_{24} + Y_{34} \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

En la mayoría de las ocasiones excepto cuando hay acoplamientos, Y_{bus} es una matriz simétrica, cuyos elementos diagonales son las admitancias que concurren en cada nodo y los elementos fuera de la diagonal son las admitancias de conexión entre nodos.

En este proyecto, se hará uso de esta técnica para plantear y resolver el sistema de ecuaciones por las cuales se modela el circuito eléctrico de toda la red de tracción. Sin lugar a duda, existen otras metodologías de resolución y que no han sido abarcadas en este trabajo por su complejidad en la implementación práctica.

3 ELECTRIFICACIÓN DE LÍNEAS FERROVIARIAS

El objetivo principal de este capítulo es realizar una introducción básica de los sistemas de electrificación de alta velocidad más usados hoy en día. En primer lugar, se procederá a realizar una breve definición de cada uno de los componentes más comunes que se puede encontrar en una red eléctrica ferroviaria. En segundo lugar, se terminará el capítulo realizando la descripción de los sistemas de alimentación ferroviaria 1x25 kVca y 2x25 kVca, antes de proceder con el cálculo de cortocircuitos mediante análisis nodal y mediante software OpenDSS en los capítulos posteriores.

3.1 Definiciones generales

Alta tensión: *Se considera alta tensión eléctrica (AT) a todas aquellas instalaciones que emplean energía eléctrica con una tensión eficaz nominal superior a 1 kV.*

Aparatación eléctrica: *Se entiende por aparatación eléctrica al conjunto de aparatos de medida, maniobra, seguridad o de control utilizados en una instalación eléctrica independientemente del nivel de tensión utilizado en la instalación.*

Autotransformador o Booster: *Tipo de transformador destinado a la alimentación de las catenarias de los ferrocarriles. Tiene como objetivo principal recoger la corriente de retorno desde las vías hasta el conductor de retorno. Este tipo de transformadores son monofásicos con relación 1:1. Tienen valores de impedancia bajos y a pesar de ello, tienen que tolerar corrientes de cortocircuito frecuentes en las líneas de ferrocarril.*

Baja tensión: *Se considera baja tensión (BT) a todas aquellas instalaciones en las cuales la tensión nominal eficaz es inferior a 1 kV en corriente alterna y 1.5kV en corriente continua.*

Cable de retorno: *Conocido también por el nombre de feeder de retorno, se trata de un conductor que discurre en paralelo a la catenaria y está apoyado en la parte trasera de los postes metálicos de la misma. Tiene como misión principal disminuir la impedancia del circuito de retorno (carril).*

Cable de protección: *Conductor requerido en ciertas medidas de protección contra choques eléctricos y que conecta algunas de las siguientes partes a tierra o a un neutro artificial: Masas, Elementos conductores, Borne principal de tierra, Toma de tierra.*

Cantón: *Se entiende por cantón a cada uno de los tramos en los cuales se divide una línea ferroviaria. Está formado por un conjunto de barras (alrededor de 41 barras) unidas rígidamente entre si. La longitud máxima no debe de exceder los 500m.*

Catenaria: *Conjunto de cables eléctricos instalados sobre la vía y que permiten transportar y suministrar energía eléctrica a los trenes. En la siguiente figura se representan los principales cables que se pueden encontrar en red de alimentación ferroviaria tipo 2x25 kV de corriente alterna.*

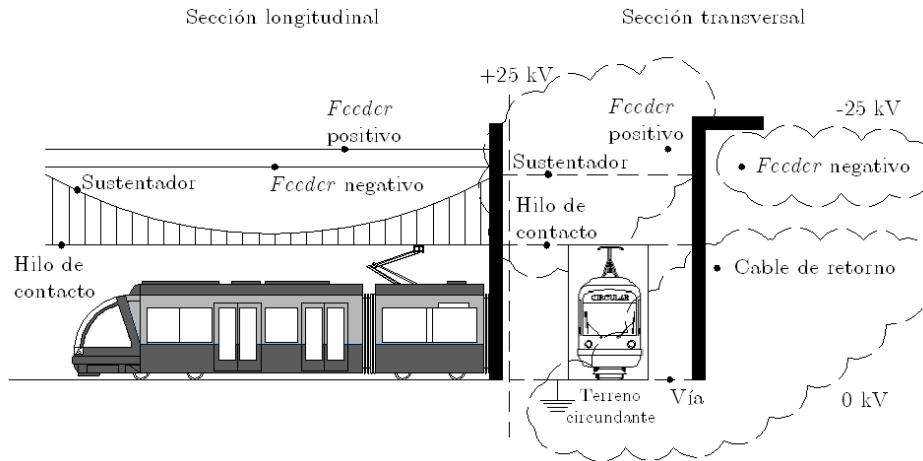


Figura 3-1. Principales conductores en un sistema de tracción. Fuente [8].

Los conductores mostrados en la figura anterior junto con el terreno se clasifican principalmente en los siguientes tres grupos:

- A. Conductores a tensión positiva (catenaria):
 - Hilo de contacto.
 - Sustentador.
 - Feeder positivo.
- B. Conductores a tensión negativa:
 - Feeder negativo.
- C. Conductores de neutro, de puestas a tierra (retorno):
 - Carril.
 - Cable de retorno.
 - Terreno circundante.

Para asegurar un correcto funcionamiento, los diferentes conductores de cada grupo se encuentran conectados entre sí cada cierta distancia.

Centro de transformación: Es una instalación eléctrica que sirve para reducir o aumentar la tensión de la energía eléctrica con fin de adecuarla a los usuarios finales.

Centro de autotransformación intermedio: Contiene un autotransformador que conecta un tramo de la vía con el siguiente.

Centro de autotransformación final: Contiene un autotransformador que conecta la celda final de un tramo con la celda inicial del siguiente tramo que esta alimentado por la próxima subestación eléctrica. En la Figura 3-2 se muestran los centros de autotransformación intermedios y finales en una red de alimentación eléctrica.

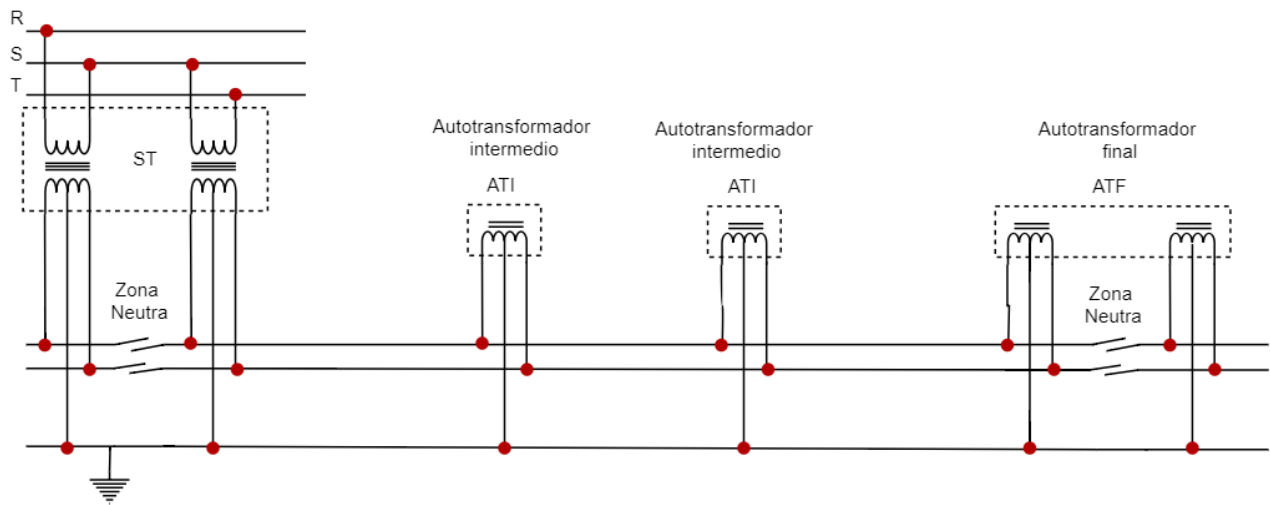


Figura 3-2. Ejemplo de Autotransformador Intermedio y Final.

Corriente de puesta a tierra: Es la corriente total que se deriva al terreno a través de la instalación de puesta a tierra.

Corriente nominal o de diseño: Es la corriente que puede circular de forma indefinida por un conductor en condiciones normales de diseño sin provocar ningún daño en el mismo.

Corriente de cortocircuito: Es la intensidad resultante de una falta de tipo cortocircuito en un sistema eléctrico.

Cortocircuito: Contacto, accidental o intencional, entre dos o más partes conductoras que se encuentran a diferente potencial. La corriente pasa del conductor activo (normalmente fase) al neutro o a tierra.

Estado N-1: Es aquel estado de la red en el que solo están operativos N-1 elementos del total que la forman. Esto es debido a que un elemento de la red ha dejado de cumplir con su función de diseño por cualquier motivo que haya dado lugar su fallo.

Feeder negativo: Se conoce con este nombre al conductor que en las instalaciones de corriente alterna y en especial a las de 2x25kV, acompaña a la catenaria con una tensión de 25kV desfasada 180° con respecto a la tensión de catenaria [2].

Feeder positivo: Cable encargado de suministrar energía eléctrica a las locomotoras. Se encuentra colocado en la parte inferior de la catenaria y está en contacto continuo con el hilo de contacto.

Hilo de contacto: Línea aérea de contacto o catenaria, es el conductor en el que el pantógrafo hace contacto.

Impedancia: Se puede definir la impedancia como la medida de oposición o resistencia que presenta un circuito a una corriente cuando se le aplica un voltaje.

Interruptor automático: Dispositivo eléctrico que impide el paso de la corriente eléctrica cuando se produce un fallo en la instalación con objeto de proteger frente a sobrecargas y cortocircuitos.

Material rodante: Se denomina material rodante a todos los tipos de vehículos que circulan por las vías ferroviarias.

El poder de corte: Es la intensidad de cortocircuito máxima que un interruptor automático es capaz de soportar y cortar sin dejar de cumplir con la función para la cual fue diseñado.

Puesta a tierra: Generalmente es un electrodo que conecta un punto de la instalación eléctrica con tierra, permitiendo así, la desviación de las corrientes a tierra ante un fallo.

Raíl: Barra de metal sobre la cual encajan las ruedas del ferrocarril para poder circular.

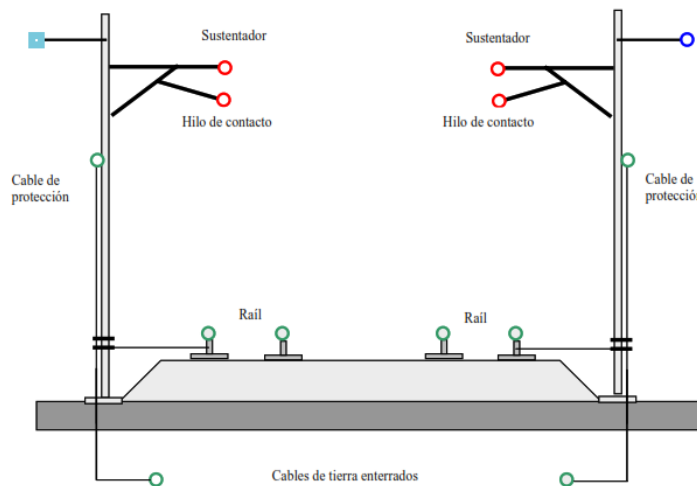


Figura 3-3. Sección transversal del sistema de alimentación 2x25 kVca. Fuente [6].

Redes de transporte de compañía: Son las redes de transporte y distribución propiedad de una empresa de distribución de energía eléctrica.

Reenganche automático: Se trata de un interruptor automático con capacidad de cierre automático del circuito después de un tiempo predeterminado, normalmente, instantes después de abrir el interruptor por un fallo en el circuito.

Resistencia de puesta a tierra: Se trata de la resistencia total entre un cable puesto a tierra y el punto donde el potencial es nulo.

Seccionador: Es un componente electromecánico que permite separar de manera mecánica un circuito eléctrico de su alimentación, permitiendo la existencia de una distancia satisfactoria de aislamiento eléctrico. El objetivo es garantizar la seguridad de los operarios mientras realizan maniobras de mantenimiento sobre la parte que ha sido aislada del resto de la instalación.

La diferencia principal entre un interruptor automático y el seccionador consiste en que este último aparato no dispone de mecanismo de supresión de arco y por lo tanto carece de poder de corte. Por lo tanto, es fundamental no hacer la apertura con el circuito en carga ya que pueden producir daños en el seccionador debido al arco eléctrico.

Sobretensión: Exceso de tensión eléctrica en una instalación, es decir un aumento por encima de los valores establecidos como máximos en servicio normal.

Sustentador: Es el conductor cuyo objetivo principal es soportar el peso del hilo de contacto, a fin de mantenerlo a una altura constante. Para ello se sirve de unos elementos conocidos como péndolas.

Subestación eléctrica de tracción (SET): Denominada también subestación eléctrica de potencia tiene como objetivo transformar la energía eléctrica proveniente de la red trifásica de transporte, que generalmente suele ser de AT, a unas condiciones de voltaje, corriente y frecuencia apropiadas para su uso en líneas ferroviarias.

Entre sus funciones principales se pueden destacar las siguientes:

- **Seguridad:** Limita el riesgo para las personas y las instalaciones ya que sirve de aislamiento del sistema eléctrico de las zonas donde se ha producido la falta.
- **Explotación:** Permite dirigir los flujos de energía de manera óptima, minimizando pérdidas, además permite realizar el mantenimiento de los equipos e instalaciones.
- **Interconexión:** Ofrece la posibilidad de escalar distintos niveles de tensión y garantizar la seguridad en el suministro mediante un mallado adecuado de la red eléctrica.

Sus principales componentes son:

- *Sistemas de puesta a tierra*
- *Sistemas de protección y (tele)control*
- *Transformadores de potencia*
- *Aparata y elementos de alta tensión*
- *Equipos de servicios auxiliares*

Tensión asignada de un cable U_0/U : También conocida por tensión de aislamiento, es el máximo valor de tensión que puede soportar un cable sin que su aislamiento pierda sus propiedades.

Tensión de paso: Es la parte de la tensión a tierra que aparece en caso de un defecto a tierra entre dos puntos del terreno separados un metro.

Tensión de suministro: Es el valor de tensión de suministro proporcionado por la compañía eléctrica.

Tensión nominal: Valor convencional de la tensión con la que se denomina un sistema o instalación y para el que ha sido previsto su funcionamiento y aislamiento.

Zona neutra: Separación entre dos tramos de la vía alimentados por dos subestaciones eléctricas diferentes. En las especificaciones Técnicas de Interoperabilidad el valor aproximado de la distancia de la zona neutra en alta velocidad es de 400 m.

3.2 Sistemas de electrificación

Hoy en día, existe una amplia variedad de sistemas de electrificación. Esta diversidad surgió por la evolución que ha tenido el sistema ferroviario a lo largo de los años. El motor de inducción de corriente continua era el más desarrollado y por lo tanto el mejor motor de tracción de la época, esto hizo que se construyeran grandes longitudes de líneas ferroviarias alimentadas en corriente continua, dando lugar a que la mitad de las líneas de electrificación ferroviaria en el mundo son de corriente continua.

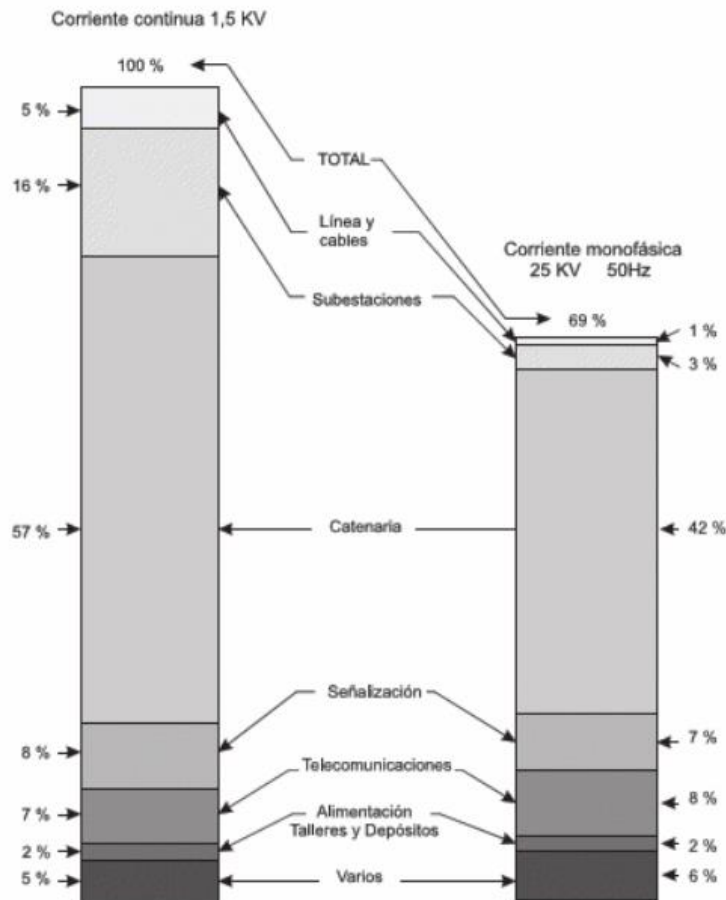


Figura 3-4. Estudio comparativo en inversión de sistema alimentado en corriente continua Vs corriente monofásica. Fuente [1].

Este sistema de electrificación alimenta la red de tracción a una tensión máxima de 3000Vcc. Cuando las locomotoras demandan grandes potencias para alcanzar mayores prestaciones, las corrientes que circulan por los cables son excesivamente elevadas, como consecuencia, es necesario trazar líneas con grandes secciones a fin de disminuir las caídas de tensión.

Debido a la tendencia de alcanzar cada vez velocidades más elevadas, la potencia demandada ha ido creciendo de forma proporcional. El sistema de alimentación en corriente continua resultó totalmente ineficiente para cubrir estas altas prestaciones exigidas. Esto dio lugar al auge de la alimentación en corriente alterna. En las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad para Ferrocarriles de Alta Velocidad se ha adoptado la tensión de 25 kV, en sus configuraciones de 1x25 kV y 2x25 kV. Con esta solución se consigue transmitir el doble de potencia con unas pérdidas muy reducidas debido a la disminución de la circulación de la corriente por la catenaria.

Debido a las grandes inversiones necesarias para realizar la transformación de líneas ferroviarias alimentadas en corriente continua a corriente alterna, gran parte de estas líneas se resisten todavía al cambio.

Los sistemas de tracción ferroviaria más instalados en Europa son los siguientes:

- Corriente continua 0,6 kV, 0,750 kV, 1,5 kV y 3 kV.
- Corriente alterna 16 2/3 Hz, 15 kV.
- Corriente alterna 50 Hz y 25 kV.

En España, la distribución de la electrificación es la siguiente:

- Ancho ibérico (1.668 mm): 11.750 km de vías; 2.914 km de vía doble electrificada, 74 km de vía doble sin electrificar, 3.576 km de vía única electrificada, 5.191 km de vía única sin electrificar, 3.000 V, CC.
- Ancho Internacional (1.435 mm): 1.636,2 km de vías. 1.548,2 km vía doble, 68 km vía única, 20 km triple carril, 25 kV, 50 Hz, AC.

3.2.1 Sistema de electrificación 1x25 kVca

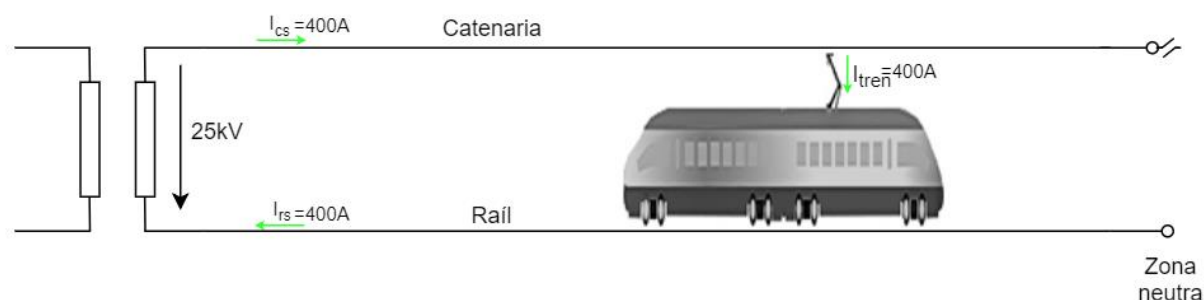


Figura 3-5. Sistema de alimentación 1x25 kVca.

El sistema 1x25 kVca es la versión inicial y/o simplificada del sistema 2x25 kVca. Las subestaciones de tracción contienen transformadores monofásicos con relación de transformación AT/25 kV. Estos centros de tracción se conectan a dos fases diferentes de la línea de alta tensión trifásica de la compañía suministradora o red de transporte. La alimentación se realiza a 50 Hz y los valores de tensión de alimentación típicos ofrecidos por las compañías de líneas de transporte (REE) son 132 kV, 220 kV o 400 kV.

Los desequilibrios en tensión y corriente generados en la red trifásica por la conexión de la carga bifásica vienen normalizados según la norma EN-60034-1, donde se establece los valores máximos que se pueden alcanzar.

Entre los distintos desequilibrios introducidos en la red de alimentación y sus causas se pueden destacar:

- Desequilibrios de tensión provocados por la conexión tipo monofásica a la red.
- Distorsión armónica: se originan corrientes y tensiones armónicas principalmente por el material móvil.
- Fluctuaciones de tensión en la red.
- Huecos de tensión. Son provocados por defectos en el circuito de tracción (cortocircuitos).

La principal solución que se ha adoptado para disminuir los desequilibrios generados en la red y por lo tanto cumplir con los requisitos mínimos recogidos en la normativa, es la división de la catenaria en varios tramos separados por zonas neutras. Además, las fases que alimentan a las subestaciones se van rotando para alimentar subestaciones consecutivas. Las zonas neutras, son necesarias y fundamentales, debido a que permiten la separación entre las dos fases que alimentan a dos SE consecutivas, evitando así que el material móvil pueda cortocircuitar los secundarios de los transformadores conectados, ya que no necesariamente las subestaciones consecutivas se encuentran en el mismo ángulo de fase.

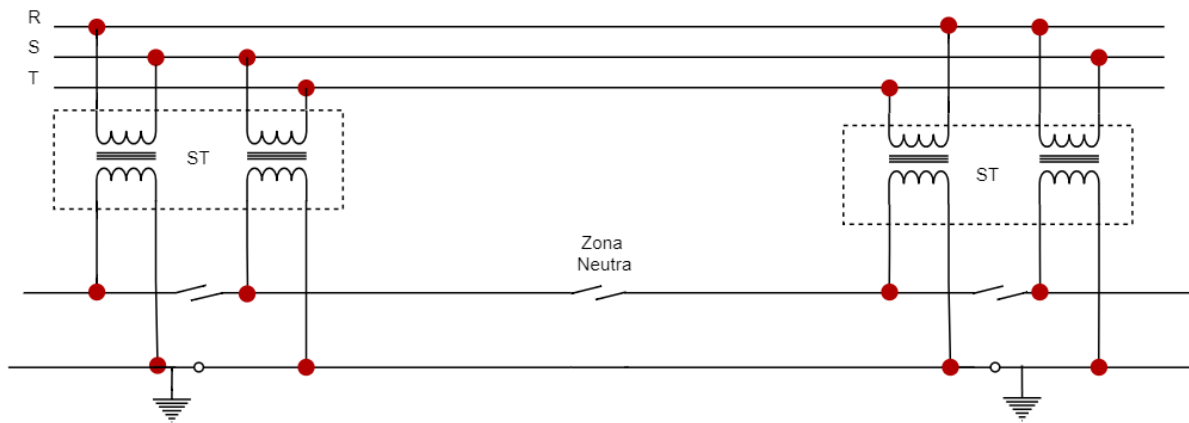


Figura 3-6. Esquema eléctrico del sistema de electrificación 1x25 kVca.

Las subestaciones eléctricas que alimentan a cada tramo de la catenaria, como se comentó anteriormente, se conectan de forma alternativa a las fases de la red de suministro de energía eléctrica. Con esta configuración, se permite disminuir los desequilibrios introducidos en la red eléctrica. El desequilibrio de corriente tiene un efecto menor en los generadores, mientras que el desequilibrio en las tensiones puede provocar serios problemas en los consumidores.

El desequilibrio de tensión U_v generado se puede estimar usando la expresión (3-1), donde se observa que es inversamente proporcional a la potencia de cortocircuito de la red trifásica.

$$U_v = H \frac{P_m}{P_{cc3}} \cdot 100 \quad (3-1)$$

Siendo:

P_m : La potencia monofásica demandada por la subestación eléctrica de tracción.

En la norma EN 60034-1 se indican los límites de desequilibrio máximos permitidos, admitiendo un desequilibrio del 1% en régimen permanente o del 1.5% durante unos pocos minutos [2].

No obstante, este tipo de conexión plantea varios problemas a la hora de explotación de las subestaciones eléctricas. Entre ellos se pueden destacar:

- Existencia de zonas neutras de separación de fase entre subestaciones colaterales.
- Existencia de tensiones diferentes entre dos subestaciones contiguas.
- Caídas de tensión elevadas en cada uno de los extremos de los tramos alimentados por las subestaciones.
- Menor rendimiento del frenado por recuperación, debido a que la sección alimentada por la subestación es menor y, por tanto, existen menos trenes en el trayecto que puedan utilizar la energía suministrada por los trenes durante este tipo de frenado.

El retorno de la corriente en este sistema de electrificación se produce principalmente por los carriles. En la Figura 3-7 se ha representado la distribución típica de intensidades del sistema eléctrico 1x25 kVca, donde se puede apreciar la importante cantidad de corriente que regresa por la tierra. El valor de esta corriente será mayor cuando peor sea el aislamiento tierra-carril y menor la resistividad del terreno [1].

Los porcentajes de distribución son los siguientes:

- 70% de la corriente retorna por el carril.
- 20% de la corriente retorna por las capas más superficiales.
- 10% de la corriente retorna por las capas más profundas del terreno.

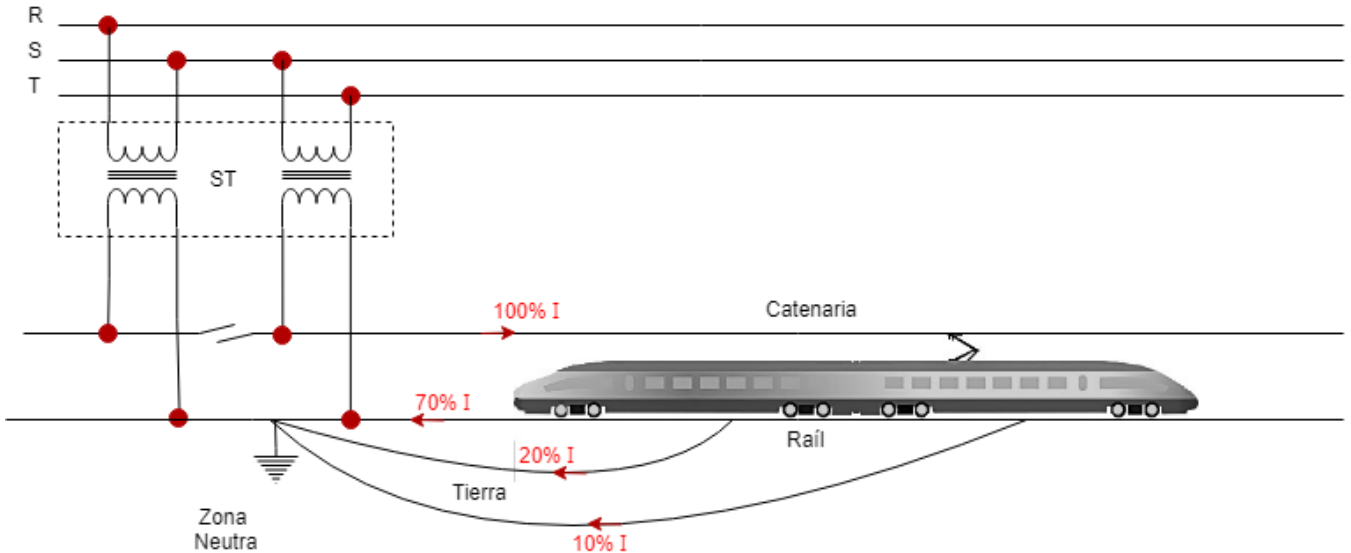


Figura 3-7. Distribución de corrientes por el sistema 1x25 kV.

La corriente que retorna por las capas más superficiales del terreno presenta varios inconvenientes, entre otros, provoca perturbaciones en los cables de señalización y comunicación cercanos a la vía. Con objeto de disminuir estos efectos y por lo tanto reducir las perturbaciones creadas, cabe la posibilidad de implantar un cable adicional, denominado conductor de retorno.

Otra solución menos común de encontrar y que se ha planteado para reducir las perturbaciones generadas por las corrientes de retorno, es la instalación de Autotransformadores Booster. Estos autotransformadores con relación de transformación unitaria se instalan a lo largo de la vía en intervalos de 2 a 4 km. El primario se conecta al cable de alimentación (catenaria) mientras que el secundario se conecta al cable de retorno.

Al añadir este tipo de transformadores a lo largo del sistema de alimentación, se consigue redirigir las corrientes desde el rail al cable de retorno, que, como consecuencia, se consigue evitar los problemas de interferencias que anteriormente eran generados por la circulación de corriente por el rail.

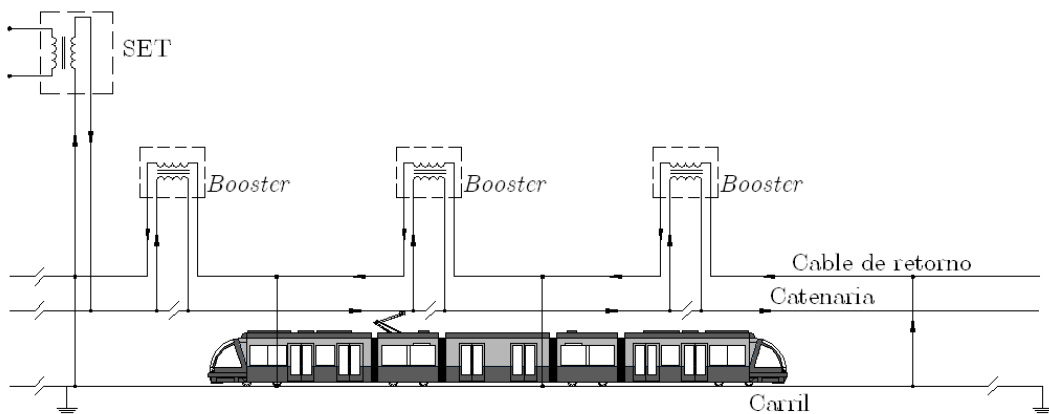


Figura 3-8. Sistema 1x25 kVca con cable de retorno y AT Booster. Fuente [8].

Uno de los principales inconvenientes que supone la utilización de este tipo de transformadores, además de incrementar la impedancia de la línea, es el sobrecoste que supone su instalación en la red, ya que para que sean efectivos, deben instalarse cada 3-4km, teniendo en cuenta la diferencia de potencial que pueden aparecer en los seccionamientos.

3.2.2 Sistema de electrificación 2x25KVca

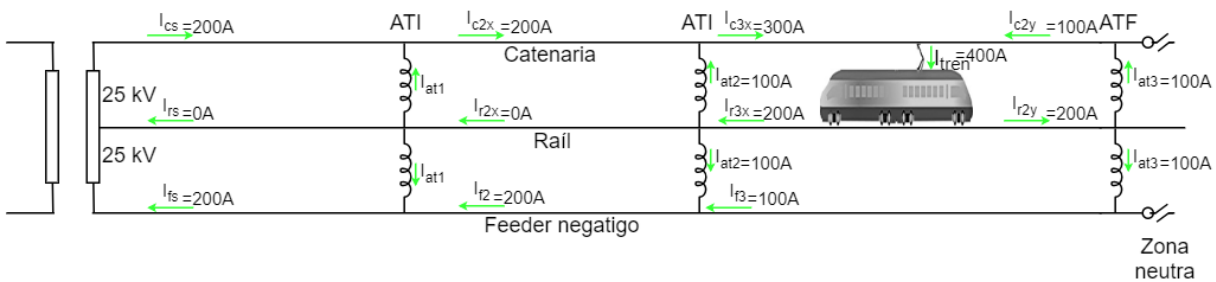


Figura 3-9. Sistema de alimentación 2x25 kV.

A lo largo del tiempo, mediante los avances tecnológicos y con el fin de mejorar las condiciones de electrificación y proporcionar mejores condiciones que la ya proporcionadas por el sistema implantado 1x25kV, se dio lugar al sistema 2x25 kV. Entre sus principales características permite alimentar mayores tramos de líneas aéreas sin superar los límites de caídas de tensión permitidas. Los países pioneros en la instalación de este nuevo sistema fueron Francia, Japón, Italia y España. Con el tiempo, este tipo de alimentación ha ido cogiendo más fuerza y cada vez se han ido sumando más países a la construcción de nuevas líneas ferroviarias alimentadas con este tipo de sistema.

A diferencia del sistema 1x25 kV, este se caracteriza por la instalación de un conductor adicional llamado feeder negativo o feeder de retorno, y que tiene una tensión negativa de -25 kV a lo largo de toda la línea. Con esto, se consigue una tensión adicional de 25 kV entre el feeder y el carril con un desfase de 180° respecto a la tensión entre la línea aérea de contacto y el carril.

La instalación de centros de transformación intermedios y finales en este sistema de electrificación ayudan a mantener la tensión en la línea y redistribuir la corriente de retorno. Estos centros adicionales, están situados a lo largo del trazado de la vía. Normalmente la distancia media entre cada uno es de 10 a 15 km.

Las tomas de los extremos del autotransformador se conectan a la catenaria y al feeder negativo, mientras la toma media se conecta a la línea de tierra o carril.

En la Figura 3-10 se muestra el esquema eléctrico del sistema de electrificación 2x25 kV y como se realiza la conexión de los autotransformadores a la catenaria, feeder negativo y rail.

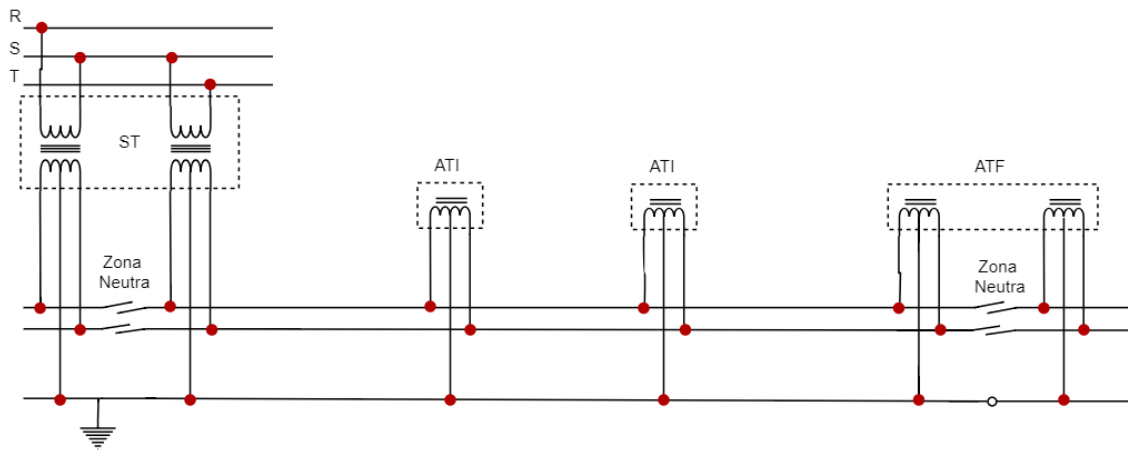


Figura 3-10. Esquema eléctrico del sistema de electrificación 2x25 kV.

Con este sistema se consigue transmitir la potencia a una tensión doble, esto proporciona una serie de ventajas significativas respecto al sistema 1x25 kV. La caída de tensión es considerablemente menor debido a que la corriente que circula por el sistema se ha visto reducida prácticamente a la mitad por trabajar a la tensión de 50 kV. Además, las subestaciones de tracción pueden distanciarse aproximadamente el doble (60-80 km) mucho mayor que el sistema 1x25 kV en los cuales el máximo era de 30 km sin sobrepasar los límites de caídas de tensión.

Otra de las ventajas que se obtienen al instalar el feeder negativo, es su uso como conductor principal de la corriente de retorno a la subestación eléctrica de tracción, con esto se evita la circulación de elevadas intensidades por el carril. Como consecuencia de esta forma de funcionamiento, las interferencias/afecciones por compatibilidad electromagnética son mucho menores.

En la Figura 3-11 se ha representado la distribución de corrientes por este sistema de electrificación. Se ha supuesto que los autotransformadores, los conductores y el transformador de potencia de la subestación eléctrica de tracción son ideales. La corriente de retorno por el carril queda limitada al tramo intermedio entre los dos autotransformadores en los que se encuentre el tren.

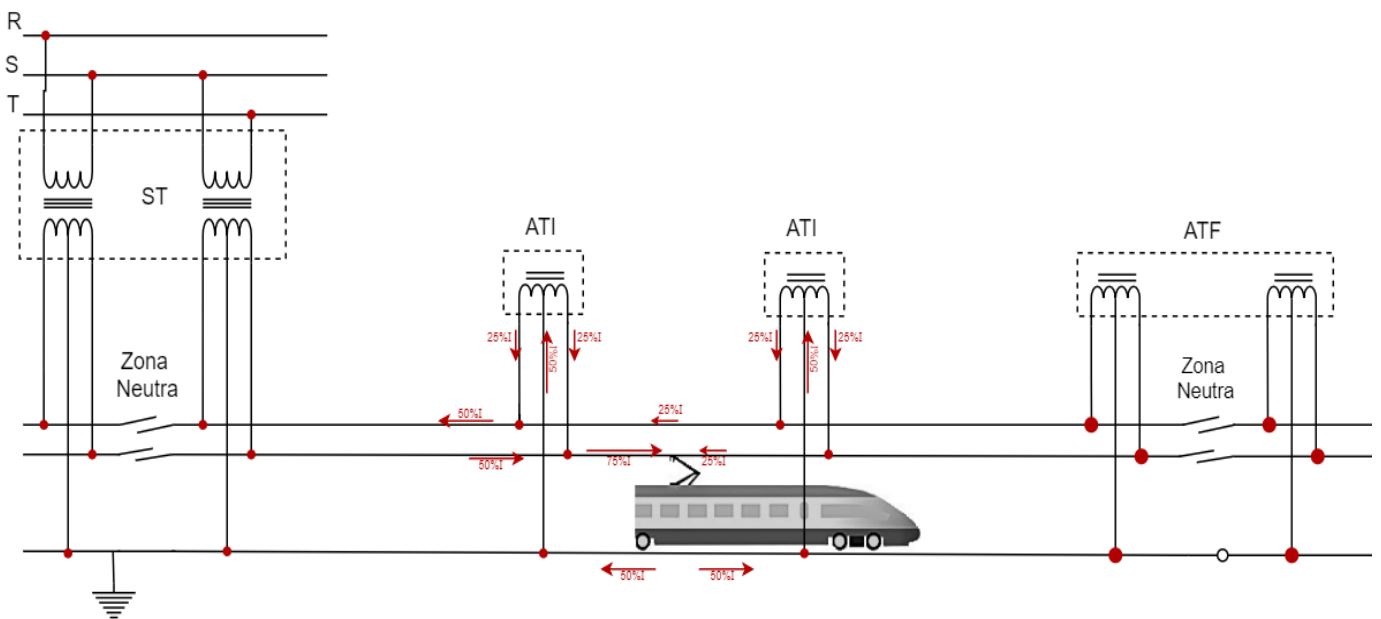


Figura 3-11. Distribución de corrientes en el sistema 2x25 kV.

El sistema en realidad no es ideal, aunque el autotransformador intenta distribuir la intensidad en dos partes prácticamente iguales, existe una pequeña desigualdad originada por la caída de tensión en el arrollamiento, la cual se procura que sea muy pequeña (del orden del 1%).

En los casos en los que la intensidad de tracción es suministrada desde autotransformadores distantes, habrá una parte de esa corriente que pasará a tierra a través del carril. Esta intensidad es la que podría causar problemas de inducción en las líneas de telecomunicaciones o de señalización que se encuentran en la plataforma del ferrocarril, aunque habitualmente se emplean unos tipos de cable inmunes a las perturbaciones, así como fibra óptica para las transmisiones de señales de telecomunicación.

3.3 Ventajas y desventajas de los sistemas 1x25 y 2x25KVca

Una de las principales ventajas del sistema 1x25 kV respecto al sistema 2x25KV es su simplicidad a la hora de la explotación en todos los puntos de la instalación. Entre los inconvenientes se pueden destacar; por un lado, la corriente que circula por las partes más internas del terreno es muy elevada, y que tiene como consecuencia la introducción de perturbaciones electromagnéticas en los cables de telecomunicaciones haciendo necesario recurrir al apantallamiento de los mismos. Por otro lado, solo se pueden alcanzar distancias máximas entre las SET de 30-40 km sin superar las caídas de tensión máximas admisibles.

Como ya se comentó anteriormente, la implantación del sistema 2x25 viene a mejorar las limitaciones existentes en el sistema 1x25 kV. Las perturbaciones se ven reducidas debido a que la corriente deja de circular por el carril en todo su trayecto de vuelta por la instalación de los autotransformadores. Las distancias máximas de alimentación que se pueden alcanzar se ven duplicadas debido a la disminución de las caídas de tensión. en resumen, se consigue una mejora del circuito de tracción, para iguales volúmenes de tráfico.

Entre las desventajas que presenta este sistema, encontramos que el sistema eléctrico de la catenaria se complica ante la necesidad de un *feeder* de retorno, por lo que es necesario instalar autotransformadores cada 10-15 km. Además, el aparellaje eléctrico de las subestaciones es más complejo al ser bifásico y de mayor tensión. Dando lugar a que las protecciones sean más costosas.

A continuación, se presenta una tabla comparativa donde se resume las principales ventajas y desventajas de estos dos sistemas de electrización de corriente alterna más usados hoy en día.

Tabla 3-1. Comparacion entre los sistemas 1x25 kVca y 2x25 kVca.

Características principales	Sistema 1x25 kVca	Sistema 2x25 kVca
Complejidad de la instalación	Baja	Alta
Potencia instalada	2x30 MVA (habitualmente)	2x60 MVA (habitualmente)
Necesidad de instalación de autotransformadores	No	Cada 10-15 km
Impedancia de la catenaria	Alta	Baja
Caída de tensión en la catenaria	Alta	Baja
Perturbaciones electromagnéticas introducidas en otras instalaciones	Alta	Baja
Complejidad del	Baja	Alta

En conclusión, se puede deducir de la tabla anterior que la alimentación recomendada es mediante el sistema 2x25kVca ya que con este sistema se resuelve la mayoría de las limitaciones y problemas presentes en los otros tipos, lo cual explica la tendencia creciente de este sistema.

Un ejemplo del cambio es el tramo de alimentación *LGV Sud-Est (París-Lyon)* donde está siendo sustituido el sistema de electrificación 1x25 kVca por el de 2x25 kVca, a consecuencia de los problemas de interferencias en las telecomunicaciones.

3.4 Modos de funcionamiento

A la hora de diseñar una red de alimentación ferroviaria se tiene como uno de los más importantes principios que se tiene en cuenta es el de garantizar la continuidad de suministro bajo fallos. Esto se puede conseguir mediante una redundancias activas o pasivas, o simplemente doblar los equipos con objeto de respetar el nivel de fallo N-1. A continuación, se presentan diferentes modos de funcionamiento de un sistema de 25 kV:

3.4.1 Funcionamiento normal

En la Figura 3-12 se observa el esquema eléctrico de alimentación cuando la subestación eléctrica de tracción se encuentra en modo normal de funcionamiento. Es decir, bajo ningún fallo. Todos los seccionadores que separan los diferentes tramos instalados en las zonas neutras a lo largo de la vía se encuentra abiertos. De esto modo, los dos transformadores de la SET funcionan de forma paralela.

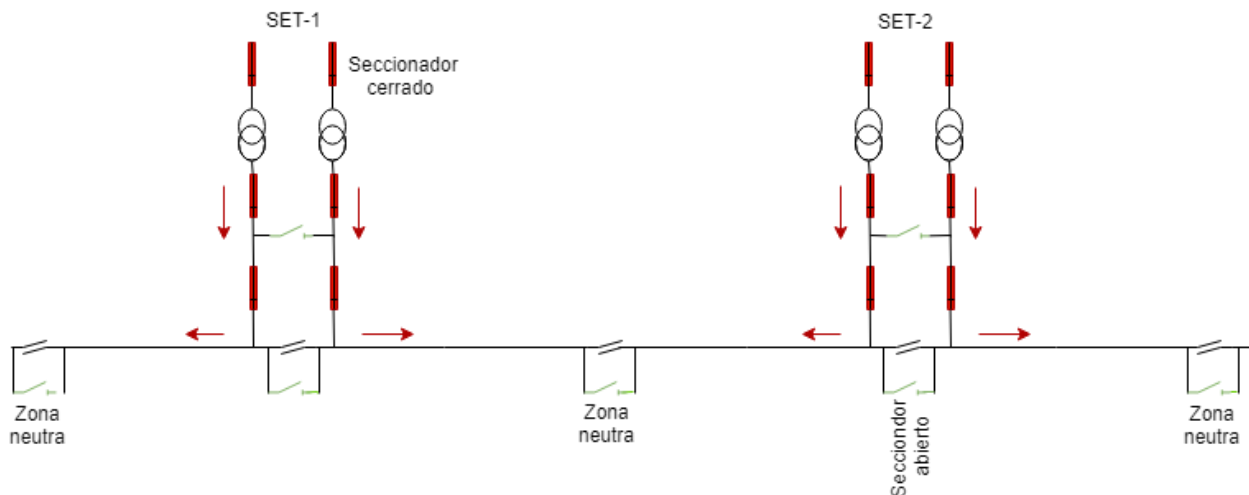


Figura 3-12. Esquema eléctrico de alimentación en funcionamiento normal.

3.4.2 Caída de un transformador: Situación degradada N-1

Este modo de funcionamiento representa el esquema eléctrico de alimentación cuando se produce un fallo en la SET y, por lo tanto, la pérdida de un transformador. Con el fin de no dejar un tramo de la vía sin el suministro de energía, se produce la apertura del seccionador anterior y posterior al transformador bajo fallo, y se cierra el seccionador que conecta las dos líneas paralelas de alimentación. De esto modo, el transformador instalado en paralelo se encarga de suministrar la potencia que el otro transformador ha dejado de proporcionar. En la Figura 3-13 se representa como quedaría la instalación.

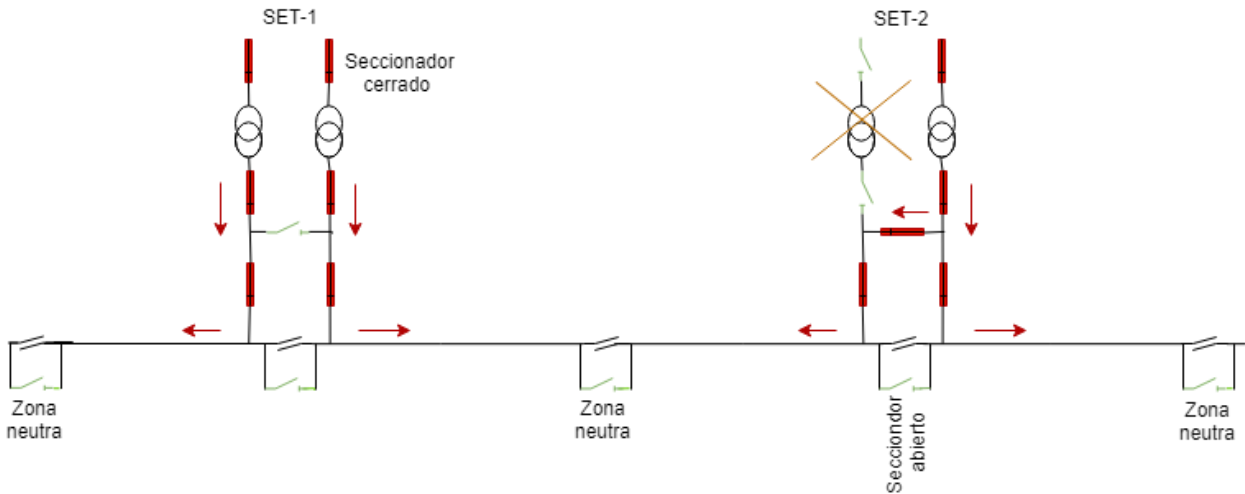


Figura 3-13. Esquema eléctrico de alimentación en modo degradado N-1.

3.4.3 Caída de dos transformadores: Situación degradada N-2

Este modo funcionamiento representa el esquema eléctrico cuando se produce la caída total de una de las subestaciones eléctricas de tracción, que se da lugar cuando los dos transformadores instalados dentro dejan de funcionar. Los transformadores instalados en las siguientes SET se encargarán de suministrar toda la potencia demandada por los trenes en los tramos alimentado inicialmente en modo normal sin fallo por la SET que ha dejado de funcionar. El esquema eléctrico de funcionamiento en esta situación se muestra en la Figura 3-14

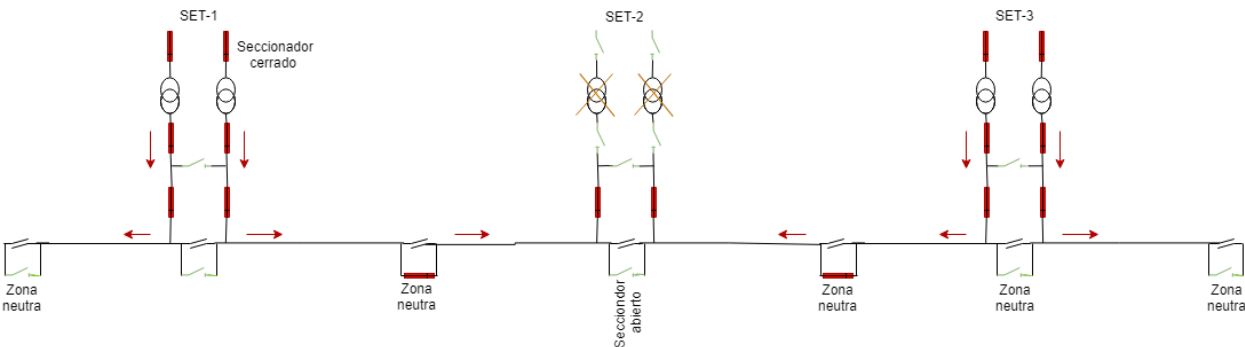


Figura 3-14. Esquema eléctrico de alimentación en modo degradado N-2.

3.4.4 Caída de tres transformadores: Situación degradada N-3

Se puede continuar en funcionamiento aun teniendo la pérdida de una subestación eléctrica de tracción y un transformador de potencia de la siguiente. Esta situación es la más desfavorable y, aunque es difícil de alcanzar, se debe de tener en cuenta a la hora del diseño de la SET. Los transformadores de potencia instalados dentro de esta son diseñados para proporcionar la potencia equivalente a la demandada por el modo de funcionamiento degradado N-3. Siendo esta condición, uno de los requisitos de diseño para continuar con el suministro de energía.

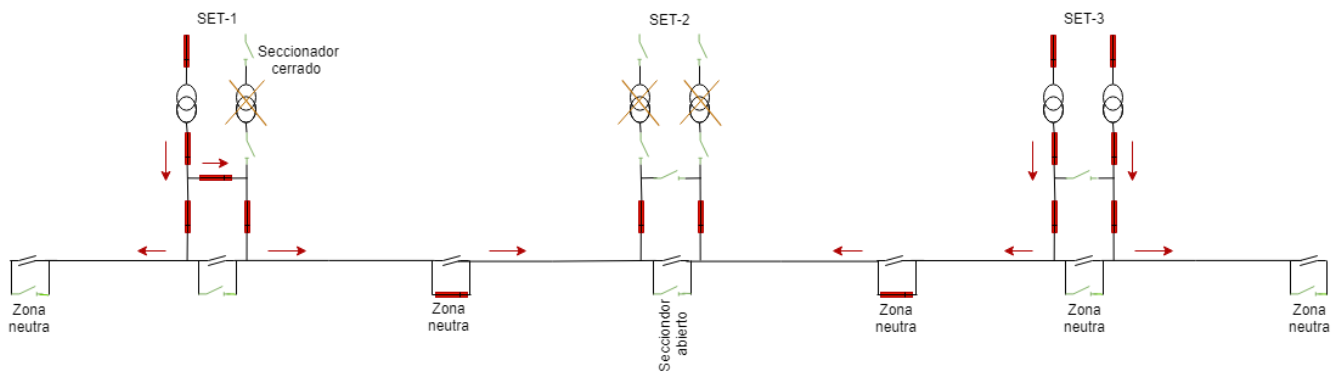


Figura 3-15. Esquema eléctrico de alimentación en modo degradado N-3.

4 ALGORITMO ANALÍTICO PARA ESTUDIO DE FALTAS

En este capítulo se exponen los modelos eléctricos equivalentes considerados para los dos sistemas de alimentación ferroviaria objeto de estudio de las faltas. Para cada uno de los elementos de los que está formado el sistema, se obtendrá su matriz primitiva de admitancias a partir del circuito eléctrico equivalente por el cual se modela. Finalmente, se unirán todas las matrices de admitancias nodales para formar la matriz global que representa a todo el sistema de tracción.

4.1 Modelos eléctricos equivalentes considerados para el sistema 1x25 kVca

La Figura 4-1 representa el modelo eléctrico equivalente considerado a la hora de modelar el sistema de alimentación de corriente alterna 1x25 kV. Se han representado todos los elementos disponibles en un tramo de la vía separado por dos zonas neutras y alimentado por una única SET. Estos son: la fuente de alimentación, la subestación eléctrica de tracción y finalmente las líneas de conducción. La conexión del carril con la tierra se realiza a cada distancia D, la cual será dato de partida (en este caso se toma como 10 km).

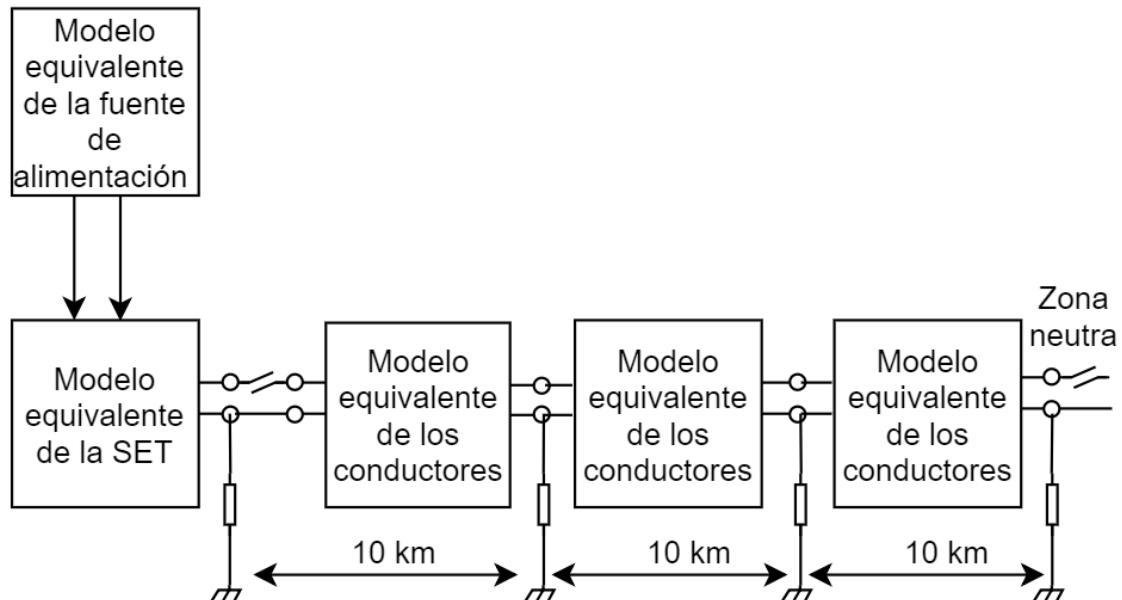


Figura 4-1. Modelo equivalente completo de una red de tracción tipo 1x25 kV para el análisis de cortocircuito.

4.1.1 Modelo de la fuente de alimentación

En primer lugar, se realiza el cálculo del modelo equivalente considerado para la fuente de alimentación.

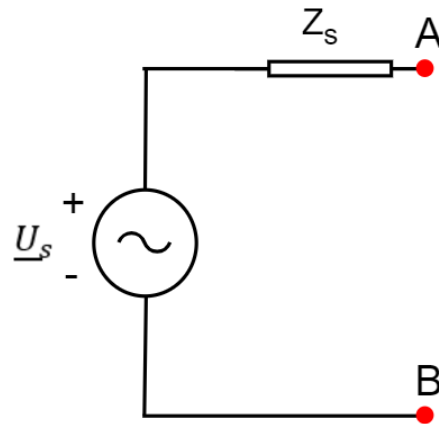


Figura 4-2. Fuente de alimentación para el sistema 1x25kV.

Siendo:

Z_s : Impedancia de cortocircuito de la red de transporte hasta el punto de conexión con la subestación eléctrica de tracción.

En la siguiente figura, se muestra el modelo eléctrico que se obtiene tras plantear el equivalente Norton para la fuente de tensión del circuito mostrado en la figura anterior.

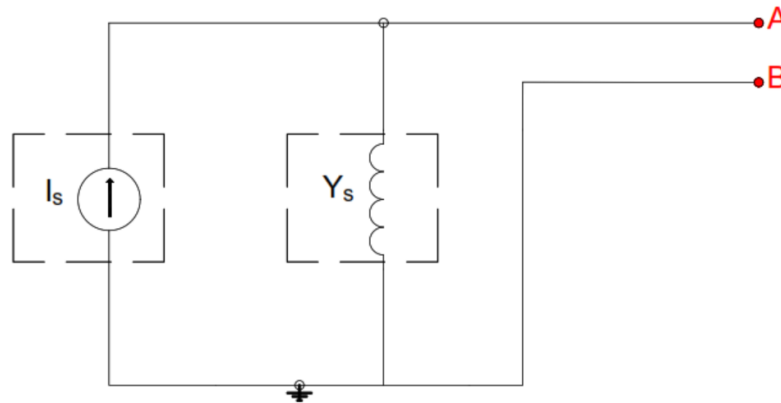


Figura 4-3. Modelo equivalente de la fuente de alimentación: sistema 1x25 kVca.

Siendo:

Y_s : Admitancia Norton equivalente obtenida tras realizar la transformación.

Hasta este punto, si consideramos únicamente el modelo de la fuente en el sistema de ecuaciones que se pretende construir, la matriz de admitancias Y_{bus} , sería muy simple y tendría la siguiente forma:

$$Y_{bus} = Y_s \quad (4-1)$$

Siendo el sistema de ecuaciones (en este caso, compuesto únicamente por una ecuación):

$$I_s = Y_{bus} \cdot V_A \quad (4-2)$$

4.1.2 Modelo del transformador monofásico

El siguiente elemento que estaría conectado a los nodos A y B, puntos de la conexión a la red, sería la SET, compuesta por transformadores de potencia. A continuación, se muestra el circuito eléctrico de un transformador monofásico.

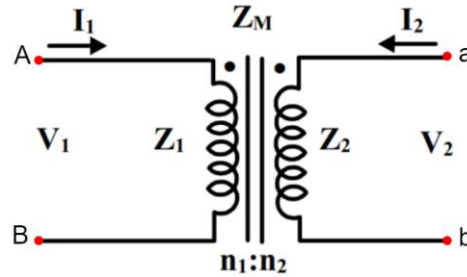


Figura 4-4. Transformador monofásico.

El circuito equivalente y la matriz de admitancias primitiva del modelo del transformador monofásico presentado en la Figura 4-4 se puede deducir realizando los pasos que se indican en [15], obteniendo finalmente el circuito equivalente presentado a continuación.

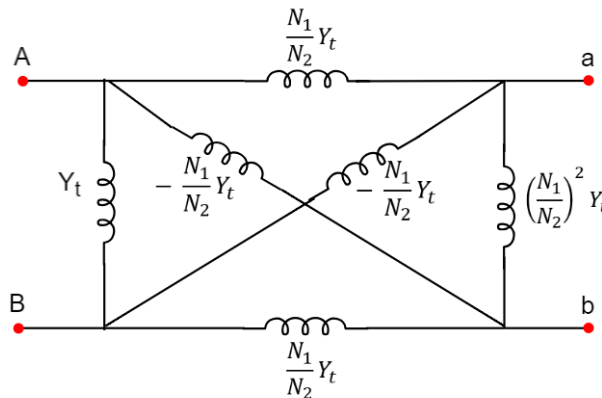


Figura 4-5. Modelo de circuito equivalente sin acoplamiento de un transformador monofásico.

La matriz de admitancias primitiva se obtiene considerando que los nodos B y b del circuito están conectados a tierra.

$$Y_{pr} = \begin{bmatrix} Y_t & -aY_t \\ -aY_t & a^2Y_t \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

Siendo:

Y_t : Admitancia de cortocircuito vista desde el primario.

a : Relación de transformación $\frac{N_1}{N_2}$.

Si añadimos la matriz de admitancias primitiva del transformador que se acaba de obtener a la matriz del sistema Y_{bus} se obtiene lo siguiente:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_s + Y_t & -aY_t \\ -aY_t & a^2Y_t \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

Siendo el sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} I_s \\ 0 \end{bmatrix} = Y_{bus} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_a \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

4.1.3 Modelo de los conductores

La Figura 4-6 muestra las impedancias propias de los conductores de tensión positiva, denominados en este proyecto como catenaria, y los conductores de puesta a tierra: raíles. Además de las impedancias propias, se representan las impedancias mutuas, fruto de acoplamientos magnéticos y capacitivos entre ellos.

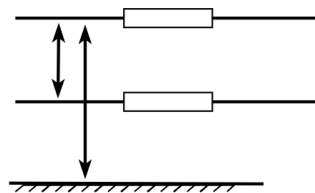


Figura 4-6. Modelo de línea de dos conductores más tierra.

Cómo se ha comentado anteriormente, el cable de tierra y cable de retorno se modelarán como un único conductor mediante una impedancia equivalente total. La Figura 4-7, representa el modelo de impedancias por unidades de longitud de un tramo genérico y cuya ecuación primitiva de nodos puede ser expresada como:

$$\begin{bmatrix} V_{cc'} \\ V_{rr'} \end{bmatrix} = L \cdot \begin{bmatrix} Z_{cc} & Z_{cr} \\ Z_{cr} & Z_{rr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_o \\ I_r \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

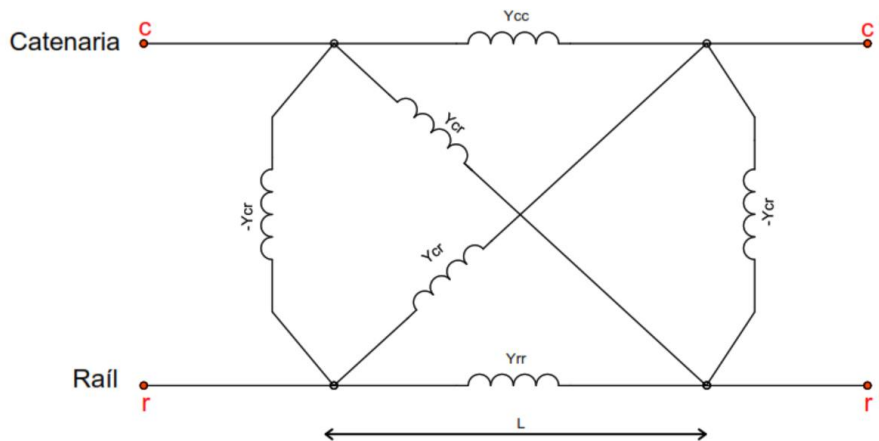


Figura 4-7. Circuito equivalente de catenaria y carriles en una sección de longitud L.

A partir de la representación anterior, la matriz primitiva de admitancias entre los nodos c, r, c' y r' se puede deducir fácilmente, quedando como se muestra a continuación:

$$Y_{pr} = \frac{1}{L} \cdot \begin{bmatrix} Z_{cc} & Z_{cr} \\ Z_{cr} & Z_{rr} \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{L} \cdot \begin{bmatrix} Y_{cc} & Y_{cr} \\ Y_{cr} & Y_{rr} \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

La matriz de incidencia correspondiente se puede expresar como:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{matrix} cc' \\ rr' \end{matrix} \quad (4-8)$$

Con ello, la matriz de admitancias de este nodo genérico de conexión entre líneas se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$Y_{nodo} = C^t Y_{pr} C = \begin{bmatrix} Y_{pr} & -Y_{pr} \\ -Y_{pr} & Y_{pr} \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

De nuevo, si añadimos la matriz primitiva de los conductores en la matriz del sistema Y_{bus} se tiene la siguiente expresión:

$$Y_{bus} = \begin{matrix} & \begin{matrix} V_A & V_a & V_{c'} & V_{r'} \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} Y_s + Y_t & -aY_t & 0 & 0 \\ -aY_t & a^2Y_t + Y_{cc} & -Y_{cc} & -Y_{cr} \\ 0 & -Y_{cc} & Y_{cc} & Y_{cr} \\ 0 & -Y_{cr} & Y_{cr} & Y_{rr} \end{bmatrix} & \end{matrix} \quad (4-10)$$

Siendo el sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} I_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = Y_{bus} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_a \\ V_{c'} \\ V_{r'} \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

Se seguirá la misma metodología de adición de las matrices primitivas nodales de los componentes (el proceso es repetitivo) hasta conseguir representar el modelo de toda la red ferroviaria de alimentación.

Una vez obtenidos los modelos equivalentes de cada componente, así como se ha indicado la forma de obtener las correspondientes matrices de admitancias primitivas en los nodos de conexión y su unión para formar la matriz de admitancias Y_{bus} , que representa a todo el sistema de tracción, se puede introducir una falta y resolver el sistema de ecuaciones obteniendo las tensiones en todos los nodos definidos.

La simulación de la falta se puede realizar en cualquier punto de toda la red de alimentación. En la siguiente figura, se muestra la introducción de un cortocircuito a una distancia de X km de la subestación eléctrica de tracción.

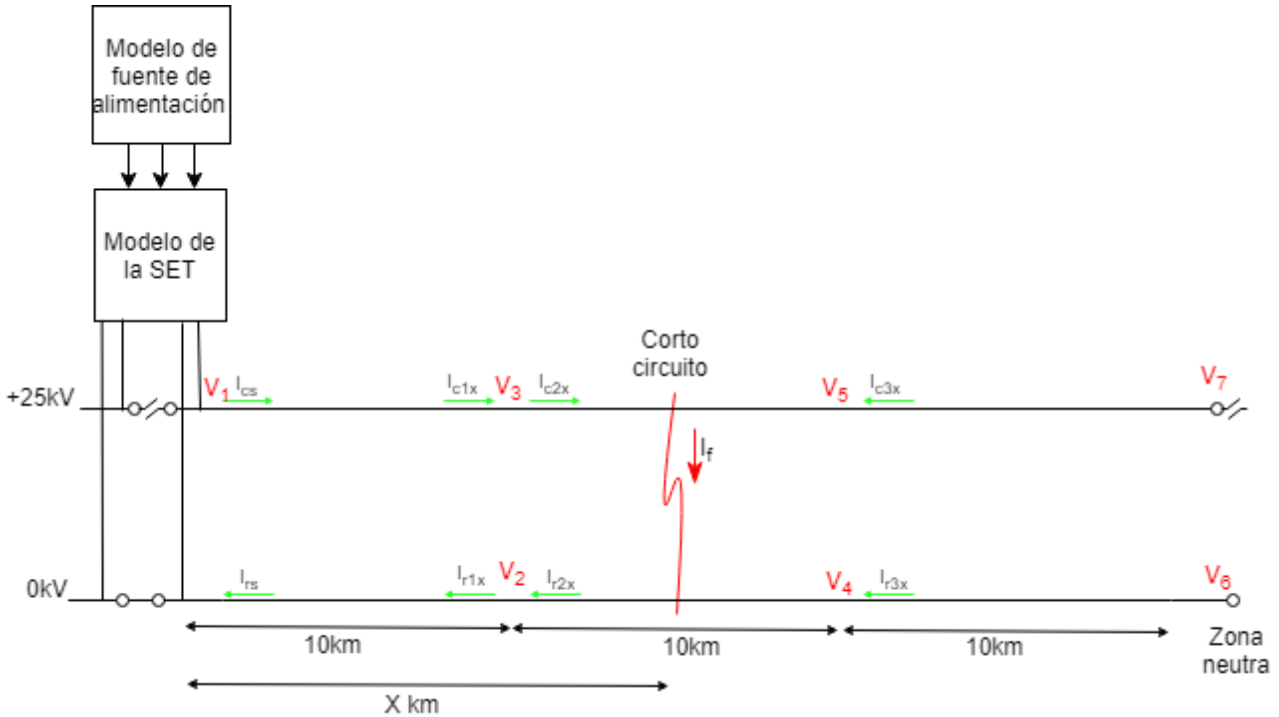


Figura 4-8. Ejemplo de falta en el sistema 1x25 kV.

La representación de los conductores tras realizar la introducción del cortocircuito en el segundo tramo del ejemplo anterior se muestra en la Figura 4-9. Como se puede observar, cada lado del tramo resultante de la división se ha modelado mediante un circuito equivalente de líneas de forma independiente.

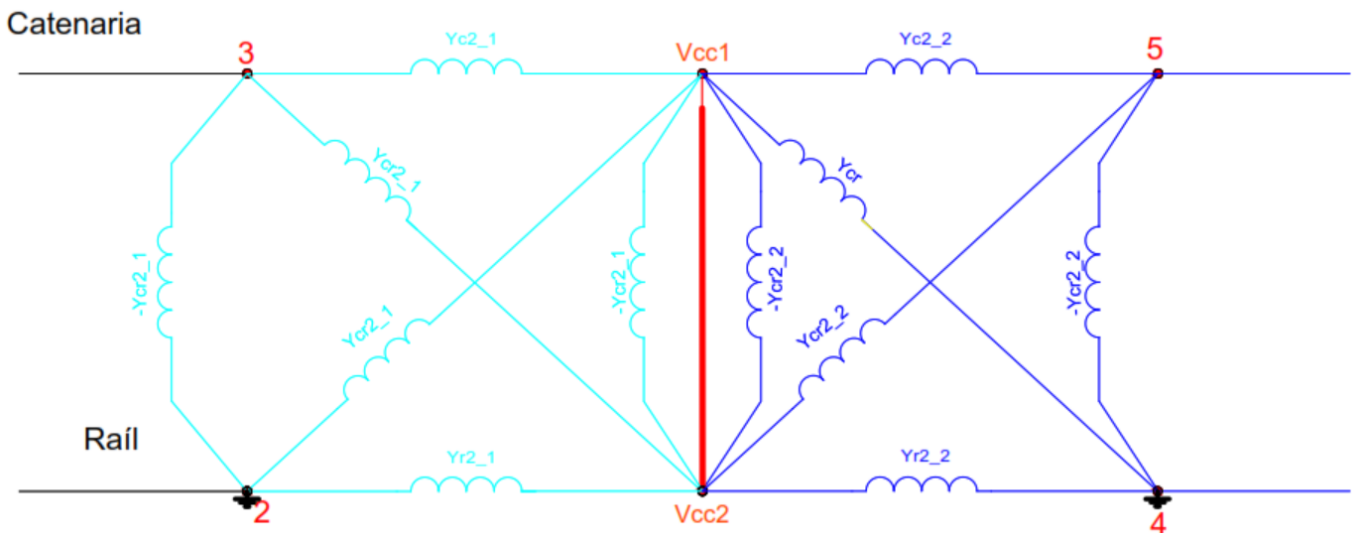


Figura 4-9. Ejemplo de falta en el sistema 1x25 kV con modelos equivalentes.

La matriz global de admitancias Y_{bus} , que representa al sistema con un cortocircuito mostrado en la Figura 2-8, es la expuesta en la siguiente página. Dentro de esta matriz, se pueden observar las matrices primitivas correspondientes a cada elemento.

También notar las modificaciones necesarias para considerar el cortocircuito, que se modela mediante la

introducción de dos nuevos nodos (V_{cc1} y V_{cc2}) con una muy pequeña impedancia de unión entre ambos para efectuar el cortocircuito $Z_{cc} = 0.0001\Omega$.

$$\begin{pmatrix}
V_A & V_A & V_a = 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & V_{cc,1} & V_{cc,2} \\
V_A & Y_s + Y_t & -aY_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
V_a = 1 & 0 & a^2Y_t + Y_{c1,1} & Y_{cr1,1} & -Y_c & -Y_{cr} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
2 & 0 & 0 & Y_{sb} + Y_{r1,1} + Y_{PT} & -Y_{cr} & -Y_r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
3 & 0 & 0 & 0 & Y_{c1,1} + Y_{c2,1} & Y_{cr1,2} + Y_{cr2,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & -Y_{c2,1} & -Y_{cr2,1} \\
4 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{r1,2} + Y_{r2,1} + Y_{PT} & 0 & 0 & 0 & 0 & -Y_{cr2,1} & -Y_{r2,1} \\
5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{c2,2} + Y_{c3,1} & Y_{cr2,2} + Y_{cr3,1} & -Y_c & -Y_{cr} & -Y_{c2,2} & -Y_{cr2,2} \\
6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{r2,2} + Y_{r3,1} + Y_{PT} & -Y_{cr} & -Y_r & -Y_{cr2,2} & -Y_{r2,2} \\
7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Y_{c3,2} & -Y_{cr3,2} & 0 & 0 \\
8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Y_{r3,2} + Y_{PT} & 0 & 0 \\
V_{cc,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{c2,1} + Y_{c2,2} + Y_{cc} & Y_{cr2,1} + Y_{cr2,2} - Y_{cc} \\
V_{cc,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{r2,1} + Y_{r2,2} + Y_{cc}
\end{pmatrix}$$

4.2 Modelos eléctricos equivalentes de los componentes del sistema 2x25 kVca

Del mismo modo que en el subcapítulo anterior, en la Figura 4-10 se plantea el modelo completo equivalente del sistema de alimentación ferroviaria 2x25 kVca. Para cada uno de sus componentes se obtendrá el modelo eléctrico equivalente, así como la matriz primitiva de admitancias nodal con las simplificaciones consideradas. Una vez obtenida la matriz nodal de cada nuevo elemento descrito, se añadirá a la matriz Y_{bus} que corresponde a la matriz de admitancias por la cual se modela todo el sistema de tracción.

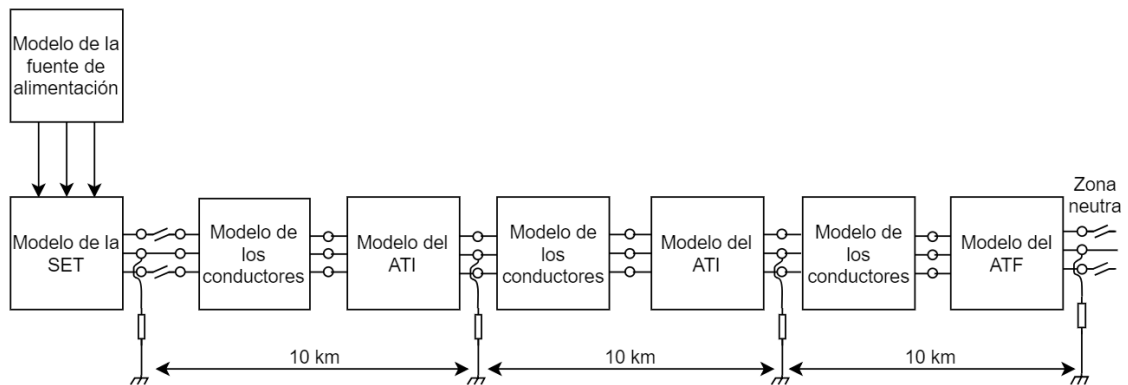


Figura 4-10. Modelo equivalente completo de una red de tracción tipo 2x25 kV para el análisis de cortocircuito.

4.2.1 Modelo de la fuente de alimentación

Uno de los primeros componentes por el que se podría empezar planteando el modelo equivalente es la fuente de alimentación. Sería un error grave no tener en cuenta la impedancia de la red cuando se esté realizando el cálculo de las corrientes de falta. Esto es debido a que la impedancia de la fuente de alimentación afecta significativamente a los valores máximos obtenidos, de modo que es necesario obtener un modelo equivalente que represente de forma más precisa este elemento.

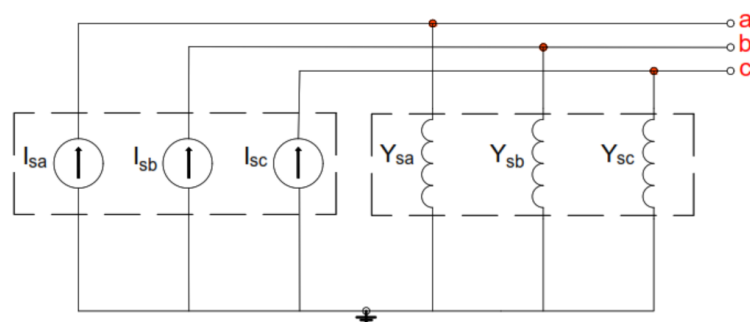


Figura 4-11. Modelo equivalente de la fuente de alimentación: Sistema 2x25 kVca.

El esquema de la Figura 4-11 representa el modelo Norton equivalente adoptado. Los valores de las fuentes de intensidad y las admitancias se obtienen planteando las ecuaciones de equivalencia.

4.2.2 Modelo de la subestación eléctrica de tracción

La subestación eléctrica de tracción está formada principalmente por dos transformadores monofásicos de potencia de los que cada uno alimenta a un lado del tramo de la vía.

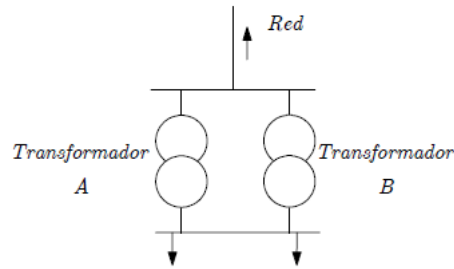


Figura 4-12. SET de tracción: sistema 2x25kV.

La Figura 4-13 representa el modelo del circuito equivalente de un transformador monofásico sin acoplamiento y con derivación nominal en lado secundario donde:

Y_t : Representa la admitancia de CC equivalente del transformador.

β : Representa la posición de las tomas del transformador.

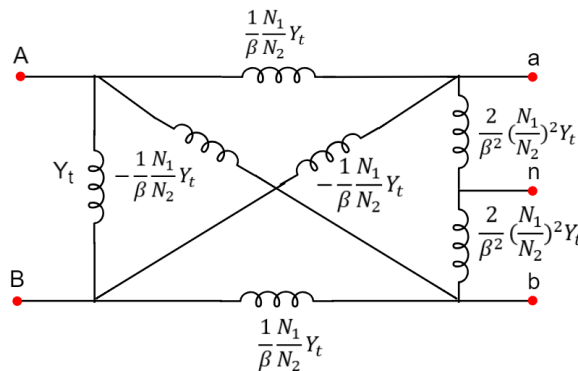


Figura 4-13. Modelo de circuito equivalente sin acoplamiento de un transformador monofásico con derivación en el lado secundario.

Para el análisis de cortocircuito de una red de tracción se pueden construir modelos de subestaciones eléctricas equivalentes con cualquiera de los tres esquemas de conexión comentados anteriormente en el subcapítulo 2.6.2 Subestación eléctrica de tracción. Usando el modelo del transformador monofásico, y combinando correctamente las conexiones de los devanados, se consiguen las demás configuraciones de conexión a la red.

En la Figura 4-14 se muestra el modelo de la subestación eléctrica de tracción con tipo de conexión fase-fase. La representación incluye los dos modelos de los dos transformadores monofásicos de potencia, cada uno alimentando a un lado de la red ferroviaria.

Debido a que la aparición de faltas a ambos lados de la red es un caso muy improbable y considerando que el cortocircuito ocurrirá únicamente a un lado de la vía alimentada por un único transformador de la subestación eléctrica, se pueden despreciar las corrientes en el lado sin falta. Esto es debido a que las corrientes de cortocircuito son mucho más elevadas que las corrientes nominales en el modo de funcionamiento normal del otro lado de la vía.

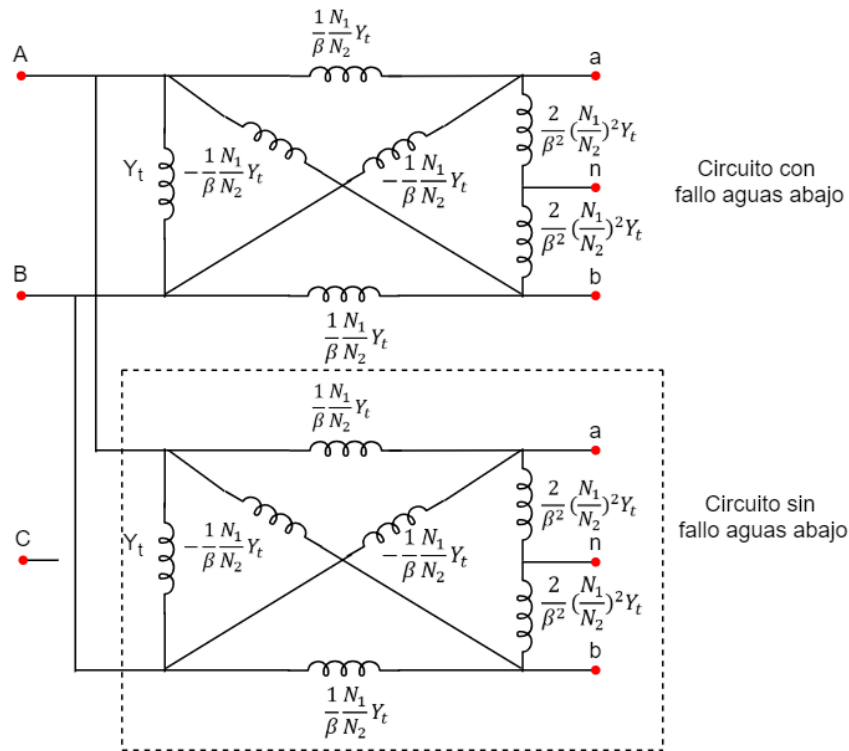


Figura 4-14. Modelo equivalente de conexión fase-fase a la red para análisis de faltas.

Por lo tanto, el modelo completo de la SET representado en la Figura 4-13 se puede simplificar, pasando a considerar un único transformador monofásico con toma media en el lado secundario, como se muestra en la siguiente figura.

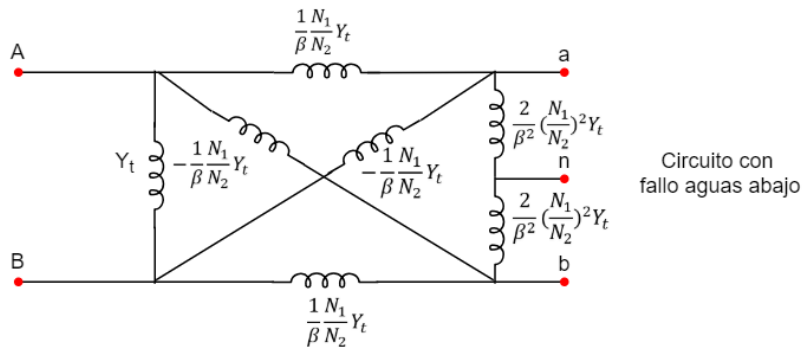


Figura 4-15. Modelo equivalente simplificado de conexión fase-fase a la red para análisis de faltas.

Para la conexión tipo Scott el análisis es un poco más complicado: en este no se puede llevar a cabo la simplificación, y por lo tanto no se puede eliminar el circuito correspondiente al del otro lado de la subestación, en el que no hay falta, como se ha hecho con la conexión tipo fase-fase.

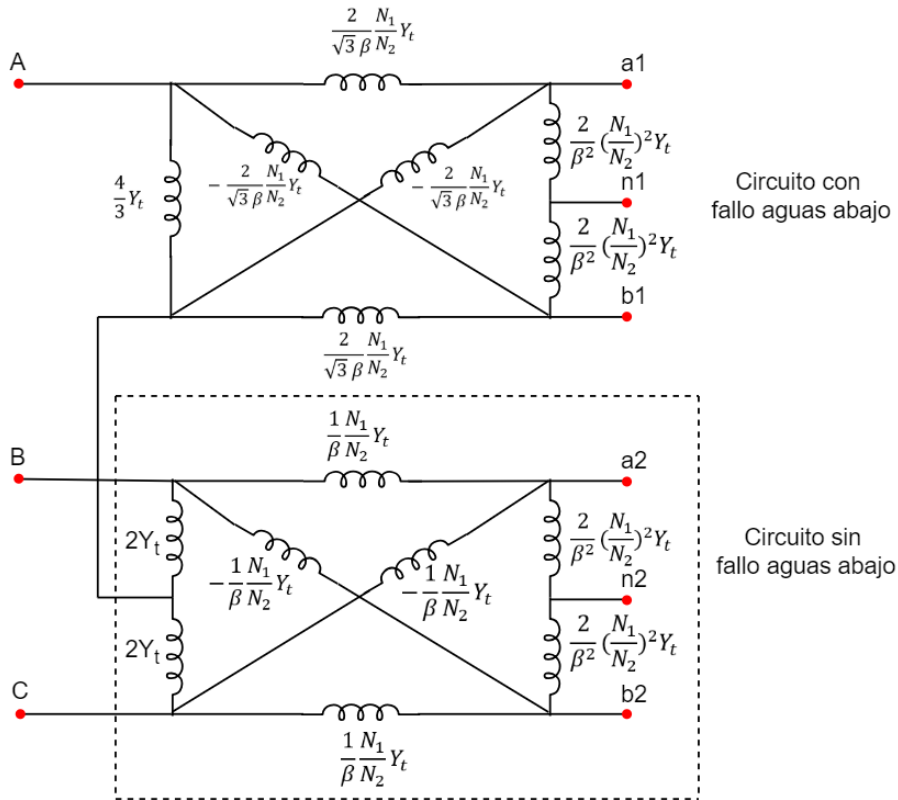


Figura 4-16. Modelo equivalente de SET con conexión tipo Scott-T.

Sin embargo, si se puede obtener un modelo equivalente con términos agrupados, el cual se muestra en la siguiente figura.

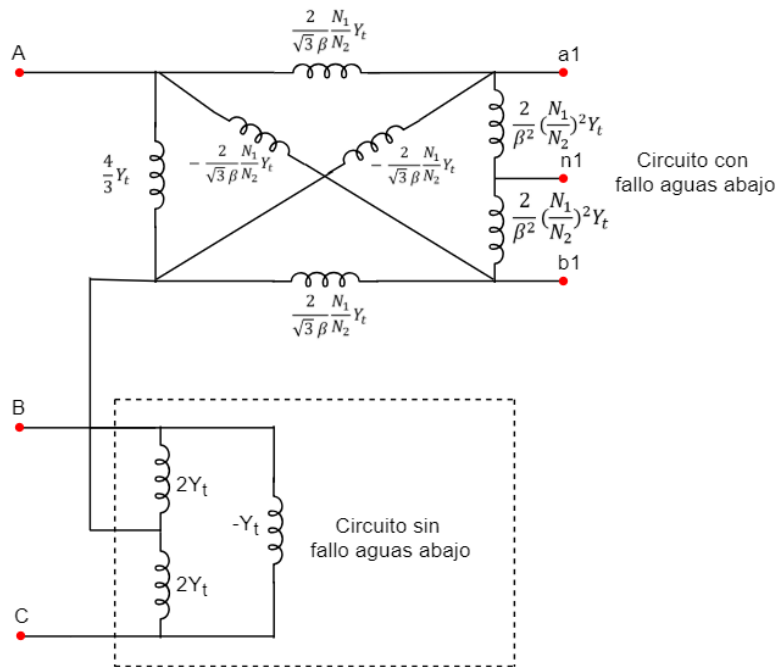


Figura 4-17. Modelo equivalente simplificado de SET con conexión tipo Scott-T para análisis de faltas.

4.2.3 Modelo del centro de autotransformación

En tercer lugar, se explica el modelo equivalente considerado para simular de la forma más precisa posible el comportamiento del autotransformador, que es el componente principal para redirigir las corrientes de retorno en las redes ferroviarias. A lo largo de la vía, como ya se comentó en capítulos anteriores, se conectan varios autotransformadores: el número a instalar está en función de la longitud total de la vía y la distancia máxima deseada entre los centros de autotransformación.

La función de estos centros de autotransformación es evitar el retorno de corriente por la vía en los tramos donde no circula el tren. Esto se consigue redistribuyendo las intensidades de retorno que penetran por la toma media de los autotransformadores hacia el feeder positivo y el negativo, convirtiendo así a este último en el principal cable para el retorno de la intensidad.

Un autotransformador monofásico consiste básicamente en una bobina sobre un núcleo magnético con una toma intermedia. Su construcción se puede llevar a cabo a partir del transformador monofásico de potencia, para lo que basta simplemente con realizar la conexión de dos devanados en serie como se muestra en la Figura 4-18.

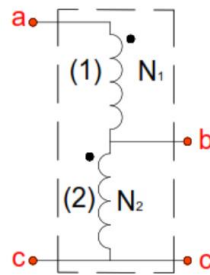


Figura 4-18. Esquema eléctrico del autotransformador.

Las impedancias mutua y propia de los devanados del autotransformador se muestran de forma esquemática en la Figura 4-19, y su correspondiente matriz de impedancias primitiva, Z_{pr} es expresada en la ecuación (4-12).

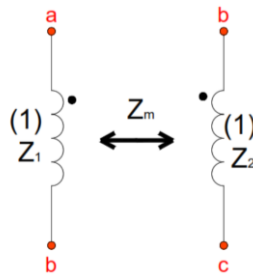


Figura 4-19. Diagrama esquemático para el modelado del AT.

La matriz primitiva de admitancias se puede obtener a partir de la matriz de impedancias:

Matriz de impedancias:

$$Z_{pr} = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_m \\ Z_m & Z_2 \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

Matriz de admitancias:

$$Y_{pr} = \frac{1}{Z_1 Z_2 - Z_m^2} \begin{bmatrix} Z_1 & -Z_m \\ -Z_m & Z_2 \end{bmatrix} \quad (4-13)$$

En la mayoría de los autotransformadores instalados en las redes ferroviarias, el coeficiente de acoplamiento es muy cercano a la unidad, y la resistencia de los devanados es mucho más pequeña en comparación con la reluctancia propia, de modo que se puede realizar la siguiente simplificación:

$$Z_m \cong \frac{N_1}{N_2} Z_2 \cong \frac{N_2}{N_1} Z_1 \quad (4-14)$$

Por otro lado, la admitancia de cortocircuito Y_t y el coeficiente de regulación 'a' de los devanados del transformador que están conectados en serie para modelar el autotransformador son respectivamente definidos de la siguiente forma:

$$Y_{pr} \equiv \frac{Z_2}{Z_1 Z_2 - Z_m^2} \quad (4-15)$$

$$a \equiv \frac{N_1}{N_2} \quad (4-16)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4-15), y (4-16) en la ecuación (4-13), la matriz de admitancias se puede reescribir del siguiente modo:

$$Y_{pr} = \begin{bmatrix} y_t & -ay_t \\ -ay_t & a^2 y_t \end{bmatrix} \quad (4-17)$$

Por lo tanto, la matriz de admitancias por la cual se modela el transformador se puede expresar como:

$$Y_{node} = C^t Y_{pr} C$$

Siendo:

C: la matriz de incidencia y sus valores, obtenidos a partir de la Figura 4-19.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

De esta forma, la ecuación general nodal de admitancias para un autotransformador genérico instalado a lo largo de la red puede ser expresada de la siguiente forma:

$$Y_{node} = \begin{bmatrix} y_t & -y_t - ay_t & ay_t \\ -y_t - ay_t & y_t + 2ay_t + a^2 y_t & -ay_t - a^2 y_t \\ ay_t & -ay_t - a^2 y_t & a^2 y_t \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

Siendo su circuito equivalente el siguiente:

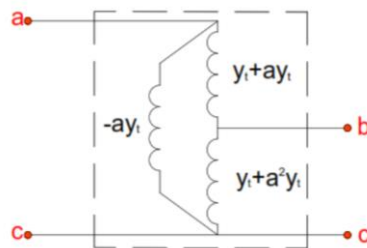


Figura 4-20. Circuito equivalente de un autotransformador general libre de acoplamiento.

Finalmente, teniendo en cuenta las simplificaciones comentadas anteriormente, en los sistemas de alimentación 2x25 kVca se puede considerar $a=1$ y $N = N_1 = N_2$. La ecuación (4-19) puede ser simplificada y expresada de

la siguiente forma:

$$Y_{node} = \begin{bmatrix} y_t & -2y_t & y_t \\ -2y_t & 4y_t & -2y_t \\ y_t & -2y_t & y_t \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

y cuyo circuito equivalente es el siguiente:

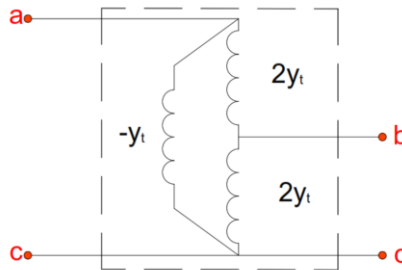


Figura 4-21. Circuito equivalente simplificado de un autotransformador general libre de acoplamiento.

A partir de la matriz de admitancias simplificada del autotransformador, obtenida anteriormente, se puede obtener la intensidad que circula por cada uno de los devanados de los autotransformadores en todos los instantes de tiempo. Para ello, tan solo basta con plantear la ecuación de nodos y despejar:

$$2Y_t \cdot (V_a - V_b) - Y_t \cdot (V_a - V_c) = I_a \quad (4-21)$$

Reescribiendo la ecuación anterior, la intensidad que circula por el primer devanado del autotransformador puede ser expresada como:

$$I_a = Y_t \cdot (V_a - 2V_b + V_c) \quad (4-22)$$

4.2.4 Modelo de los conductores de la red

El circuito de tracción, como se ha visto en el capítulo 3 Electrificación de líneas ferroviarias, está compuesto por un número variable de conductores, instalados de forma paralela con unas distancias definidas y constantes a lo largo de toda la línea de alimentación. La catenaria, el rail y el feeder negativo son los tres conductores principales de un sistema ferroviario de alimentación tipo 2x25 kVca. Para tener en cuenta el resto de los conductores instalados, el modelo equivalente desarrollado en este proyecto para representar el sistema de conducción considera la siguiente agrupación de cables:

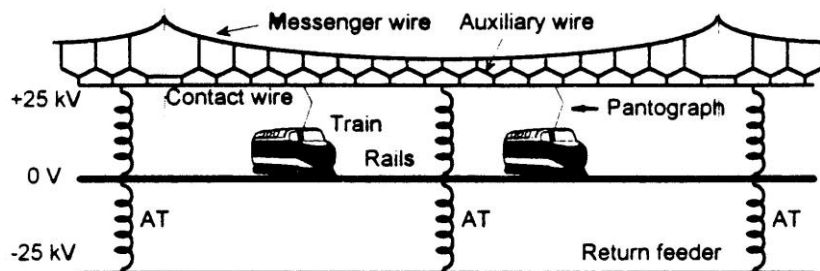


Figura 4-22. Red ferroviaria estándar de alimentación 2x25 kVca. Fuente [3]

- Línea área (catenaria): incluye el hilo de contacto, el sustentador y el feeder positivo. El hilo de contacto está soportado por el sustentador a lo largo de toda la vía como se muestra en la Figura 4-22. Este grupo representa los conductores de tensión positiva.
- Feeder negativo.
- Raíles: incluye el raíl en sí, el cable de retorno, el terreno circundante y un conductor estático que se proporciona para proteger a todos los conductores de los rayos [7].

Los cables de cada grupo están conectados entre sí a cada cierta distancia con el fin de asegurar que las cargas se distribuyan adecuadamente entre ellos. Si se intenta modelar la línea teniendo en cuenta todos los conductores por separado, haría falta construir una matriz de impedancias y admitancias de dimensiones $N \times N$, siendo N el número total de conductores.

Para el análisis del estado estacionario de una red ferroviaria alimentada por una SET, es factible modelar por parámetros agrupados los conductores. Por lo tanto; sin cometer errores considerables, se puede sustituir cada uno de estos grupos de cables por un único conductor equivalente, de igual caída de tensión y cuya intensidad es la suma de las intensidades de los conductores a los cuales sustituye.

De esta manera, al considerar los conductores equivalentes de catenaria, feeder negativo y raíl se obtendrían unos resultados muy próximos al modelo real con un error de cálculo muy poco significativo.

Además de las impedancias propias de cada conductor, existen acoplamientos magnéticos y capacitivos entre los tres conductores mencionados (catenaria, feeder y raíl), por lo que habría que considerar estos acoplamientos mutuos por los que se ven afectados, como se representa en la Figura 4-23 .

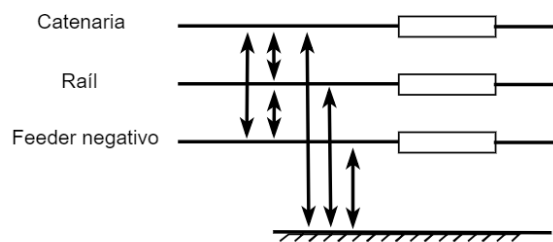


Figura 4-23. Modelo de línea de tres conductores más tierra.

De forma equivalente:

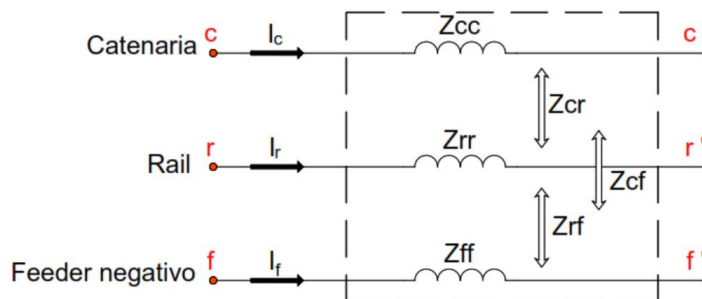


Figura 4-24. Impedancias propias y mutuas del hilo de contacto, los raíles y el feeder negativo por unidad de longitud.

La Figura 4-24 muestra las impedancias propias y mutuas del hilo de contacto, los raíles y el feeder negativo por unidad de longitud. Para una sección de los conductores con L unidades de longitud entre dos AT adyacentes,

la ecuación primitiva correspondiente puede ser expresada como:

$$\begin{bmatrix} V_{oo'} \\ V_{rr'} \\ V_{ff'} \end{bmatrix} = L * \begin{bmatrix} Z_{oo} & Z_{or} & Z_{of} \\ Z_{or} & Z_{rr} & Z_{rf} \\ Z_{of} & Z_{rf} & Z_{ff} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_o \\ I_r \\ I_f \end{bmatrix} \quad (4-23)$$

A partir de la ecuación anterior es deducible la matriz de admitancias, pudiéndose expresar mediante la ecuación (4-24).

$$Y_{pr} = \frac{1}{L} * \begin{bmatrix} Z_{oo} & Z_{or} & Z_{of} \\ Z_{or} & Z_{rr} & Z_{rf} \\ Z_{of} & Z_{rf} & Z_{ff} \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{L} * \begin{bmatrix} Y_{oo} & Y_{or} & Y_{of} \\ Y_{or} & Y_{rr} & Y_{rf} \\ Y_{of} & Y_{rf} & Y_{ff} \end{bmatrix} \quad (4-24)$$

Por lo tanto, la matriz de admitancias entre dos nodos genéricos de conexión entre líneas de alimentación tendrá la siguiente forma:

$$Y_{nodo} = C^t Y_{pr} C = \begin{bmatrix} Y_{pr} & -Y_{pr} \\ -Y_{pr} & Y_{pr} \end{bmatrix} \quad (4-25)$$

Siendo:

C: La matriz de incidencia que se puede obtener a partir de la Figura 4-24.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{matrix} oo' \\ rr' \\ ff' \end{matrix} \quad (4-26)$$

En la Figura 4-25 se representa el esquema eléctrico del circuito equivalente libre de acoplamiento de la ecuación (4-25).

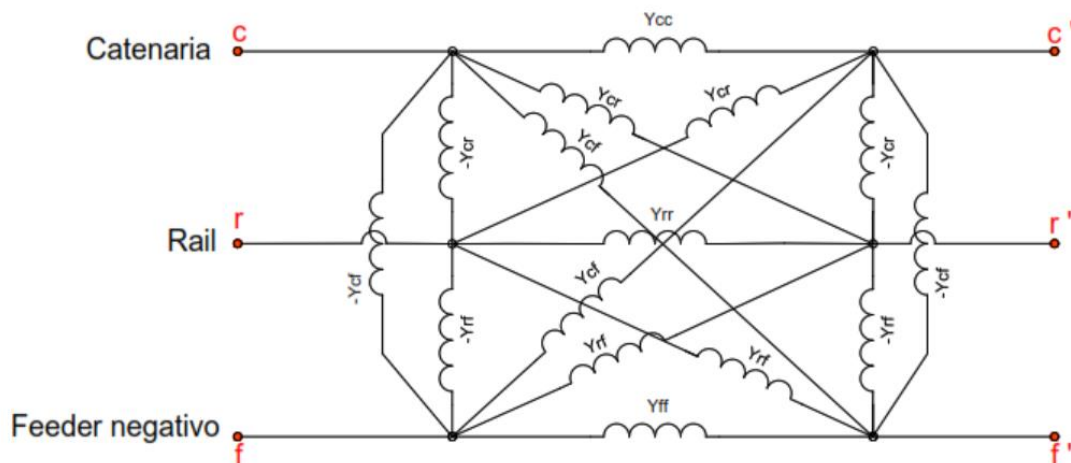


Figura 4-25. Circuito equivalente sin acoplamiento de hilo de contacto, carriles y feeder negativo en una sección AT con L unidades de longitud.

La siguiente figura muestra cuando un cortocircuito se produce a una distancia X desde la subestación eléctrica de tracción, también se representan las distintas corrientes de falta que recorren la red a consecuencia de este

fenómeno. La dirección y el sentido de circulación no son tan lógicos e inmediatos como en el caso del sistema 1x25 kVca, en el que había únicamente dos niveles de tensión, pero sí se pueden deducir a partir de la distribución de corrientes en el circuito eléctrico de la red bajo modo de funcionamiento normal.

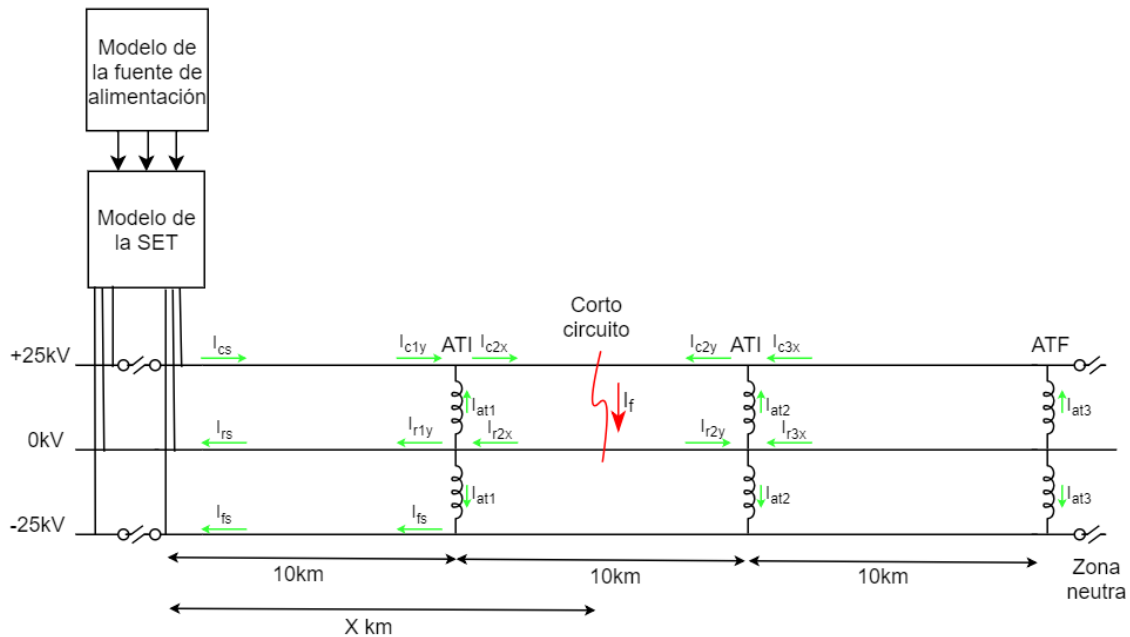


Figura 4-26. Ejemplo de cortocircuito en el sistema 2x25kVca.

El cálculo y el análisis del sistema tras introducir la falta se puede llevar a cabo mediante la división de la red en dos subsecciones, la primera con X de longitud y la otra con $(L-X)$. Los circuitos equivalentes de los conductores entre los dos autotransformadores, fruto de la división generada por el cortocircuito, se pueden obtener planteando un modelo individual como el descrito en la Figura 4-25 a cada lado del tramo dividido.

A continuación, en la Figura 4-27 se muestra el modelo completo del tramo en el que se ha producido el cortocircuito, en el que se pueden observar los modelos equivalentes de la primera y la segunda mitad de las líneas de conducción en los cuales se ha dividido el tramo por la introducción de falta.

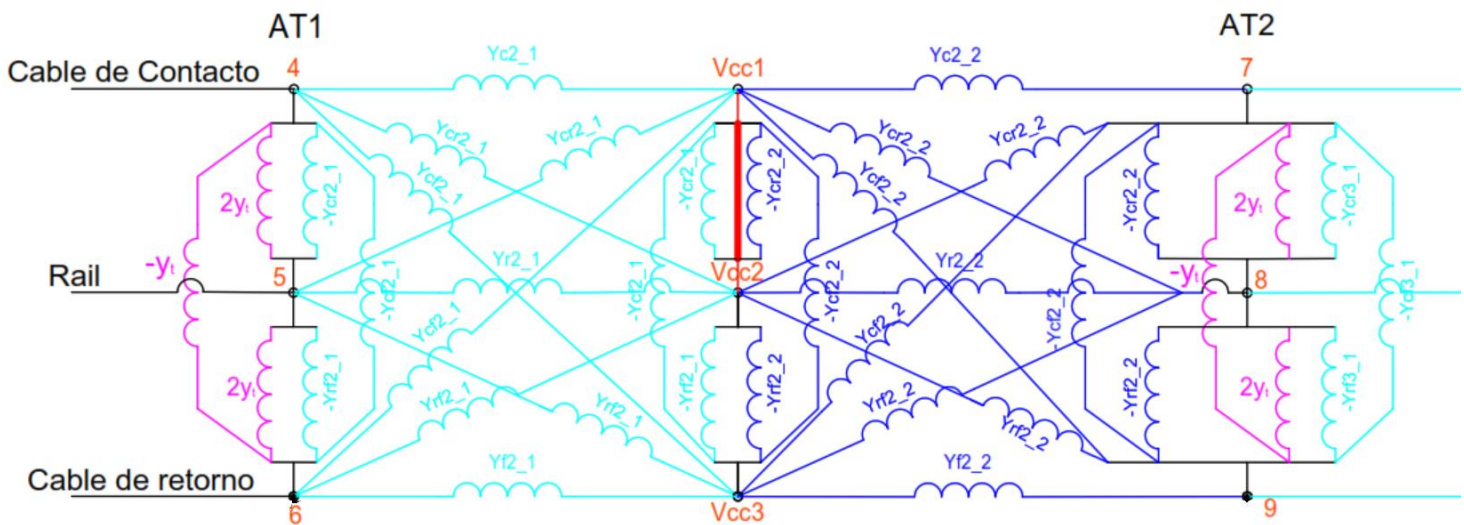


Figura 4-27. Ejemplo de cortocircuito en el sistema 2x25kVca con modelos equivalentes.

Se ha realizado una representación en diferentes colores con objeto de facilitar la identificación del modelo equivalente de cada uno de los elementos desarrollados a lo largo de este capítulo. Por ejemplo, con el color rosa, se representa el modelo equivalente de los autotransformadores 1 y 2. El primero, se une con el modelo equivalente de la primera mitad de las líneas del tramo dividido en los nodos 4, 5 y 6, que son los puntos de conexión de los centros de autotransformación a la catenaria, vía y feeder negativo respectivamente.

	Modelo del primer autotransformador
	Modelo de la primera mitad de la línea
	Conexión de cortocircuito
	Modelo de la segunda mitad de la línea
	Modelo del segundo autotransformador

Como se puede observar, al introducir la falta en el segundo tramo se ha realizado un corte en las líneas, modelándose por separado cada una de las partes a cada lado del punto en el que se ha producido la falta.

Además, aparecen tres nodos en color rojo mediante los que se modelará la introducción del cortocircuito en la red de alimentación. Estos nodos se irán moviendo a medida que se avance con la simulación para que el estudio pueda abarcar todos los puntos de la vía.

La línea gruesa que une el nodo Vcc1 con Vcc2 representa la resistencia de cortocircuito y tendrá un valor definido.

Es conveniente especificar que, en este proyecto, el cortocircuito simulado ha sido entre la catenaria y tierra. El otro tipo que se podría dar es entre el feeder negativo y tierra, que es similar a este siendo simétricos los resultados que se obtendrían.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$Y_{sa} + Y_{c1_1}$	Y_{cr1_1}	Y_{cf1_1}	$-Y_c$	$-Y_{cr}$	$-Y_{cf}$	0	0	0
2	0	$Y_{sb} + Y_{r1_1}$	Y_{rf1_1}	$-Y_{cr}$	$-Y_r$	$-Y_{rf}$	0	0	0
3	0	0	$Y_{sc} + Y_{f1_1}$	$-Y_{cf}$	$-Y_{rf}$	$-Y_f$	0	0	0
04	0	0	0	$Y_{c1_2} + Y_t + Y_{c2_1}$	$Y_{cr1_2} - 2Y_t + Y_{cr2_1}$	$Y_{cf1_2} + Y_t + Y_{cf2_1}$	0	0	0
5	0	0	0	0	$Y_{r1_2} + 4Y_t + Y_{r2_1} + Y_{PT}$	$Y_{rf1_2} - 2Y_t + Y_{rf2_1}$	0	0	0
6	0	0	0	0	0	$Y_{f1_2} + Y_t + Y_{f2_1}$	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	$Y_{c2_2} + Y_t + Y_{c3_1}$	$Y_{cr2_2} - 2Y_t + Y_{cr3_1}$	$Y_{cf2_2} + Y_t + Y_{cf3_1}$
8	0	0	0	0	0	0	0	$Y_{r2_2} - 4Y_t + Y_{r3_1} + Y_{PT}$	$Y_{rf2_2} - 2Y_t + Y_{rf3_1}$
9	0	0	0	0	0	0	0	0	$Y_{f2_2} + Y_t + Y_{f3_1}$
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_{cc_1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_{cc_2}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_{cc_3}	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	10	11	12	V_{cc_1}	V_{cc_2}	V_{cc_3}
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	$-Y_{c2_1}$	$-Y_{cr2_1}$	$-Y_{cf2_1}$
	0	0	0	$-Y_{cr2_1}$	$-Y_{r2_1}$	$-Y_{rf2_1}$
	0	0	0	$-Y_{cf2_1}$	$-Y_{rf2_1}$	$-Y_{f2_1}$
	$-Y_c$	$-Y_{cr}$	$-Y_{cf}$	$-Y_{c2_2}$	$-Y_{cr2_2}$	$-Y_{cf2_2}$
	$-Y_{cr}$	$-Y_r$	$-Y_{rf}$	$-Y_{cr2_2}$	$-Y_{r2_2}$	$-Y_{rf2_2}$
	$-Y_{cf}$	$-Y_{rf}$	$-Y_f$	$-Y_{cf2_2}$	$-Y_{rf2_2}$	$-Y_{f2_2}$
	$Y_{c3_2} + Y_t$	$Y_{cr3_2} - 2Y_t$	$Y_{cf3_2} + Y_t$	0	0	0
	0	$Y_{r3_2} + 4Y_t + Y_{PT}$	$Y_{rf3_2} - 2Y_t$	0	0	0
	0	0	$Y_{f3_2} + Y_t$	0	0	0
	0	0	0	$Y_{c2_1} + Y_{c2_2} + Y_{cc}$	$Y_{c2_1} + Y_{c2_2} - Y_{cc}$	$Y_{cf2_1} + Y_{cf2_2}$
	0	0	0	0	$Y_{r2_1} + Y_{r2_2} + Y_{cc}$	$Y_{rf2_1} + Y_{rf2_2}$
	0	0	0	0	0	$Y_{f2_1} + Y_{f2_2}$

4.3 Programación del algoritmo

Para la implementación informática del sistema objeto de estudio es necesario el uso de un lenguaje de programación con características tales como funcionalidad, simplicidad, coste reducido, etc. Es por ello por lo que el software usado ha sido Python. Este lenguaje es muy intuitivo y uno de los más usados hoy en día en la ingeniería.

Con la ayuda de la interfaz gráfica PyCharm se han implementado todas las sentencias y funciones necesarias para el desarrollo de todos los modelos equivalentes explicados anteriormente y realizar la unión de los mismos en los nodos definidos a lo largo de la red, formando así la matriz de admitancias global que representa a todo el sistema ferroviario y obteniendo finalmente su resolución.

En la Figura 4-27 se muestra el diagrama de flujo principal del código desarrollado en este estudio, tanto para el análisis nodal como para la simulación llevada a cabo con el software OpenDSS.

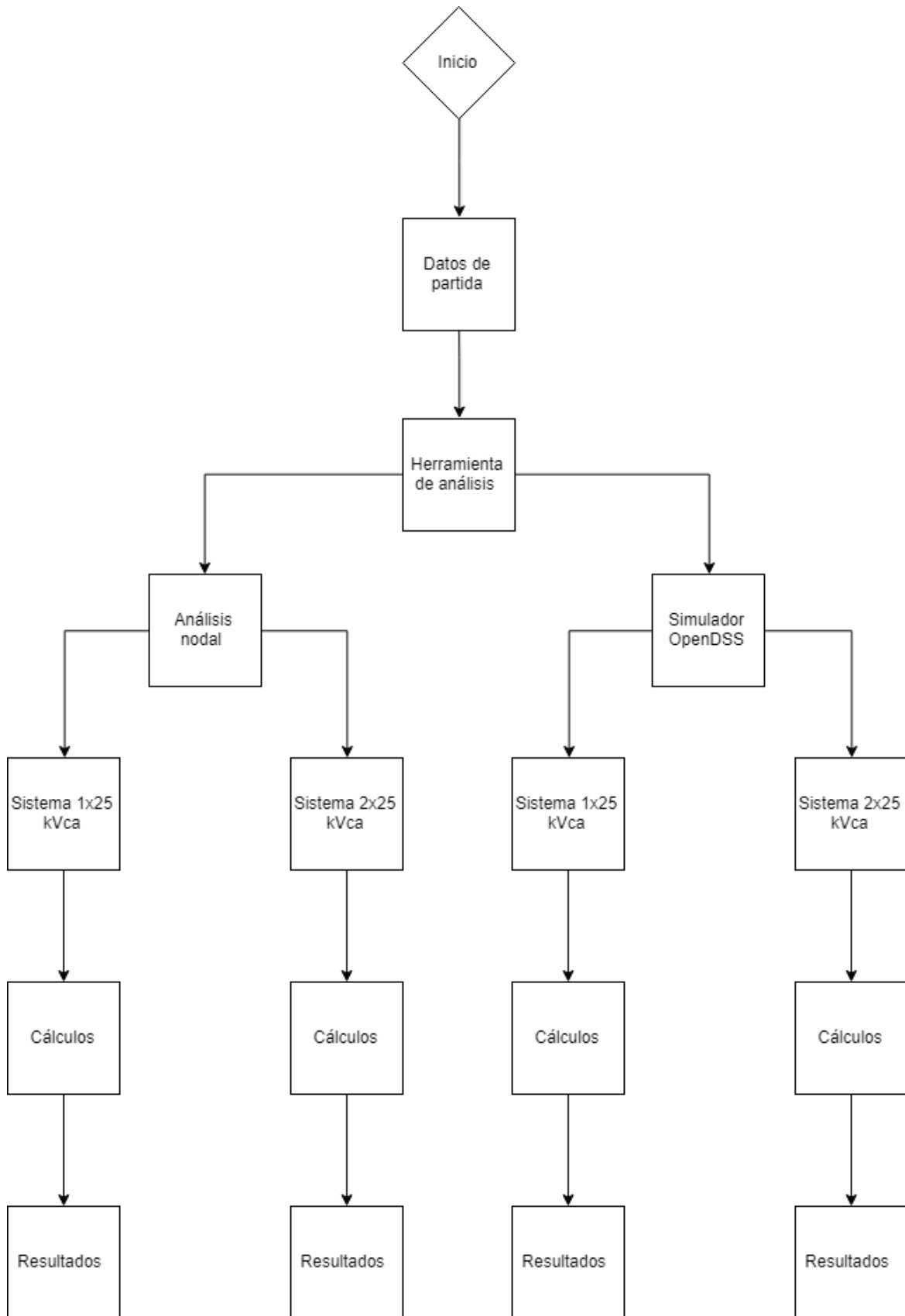


Figura 4-28. Diagrama de flujo principal.

Una vez se ha elegido el tipo de análisis que se quiere llevar a cabo, se inicia otro diagrama de flujo particularizado a cada una de las ramas del diagrama principal. Por ejemplo, en la Figura 4-29 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo matricial.

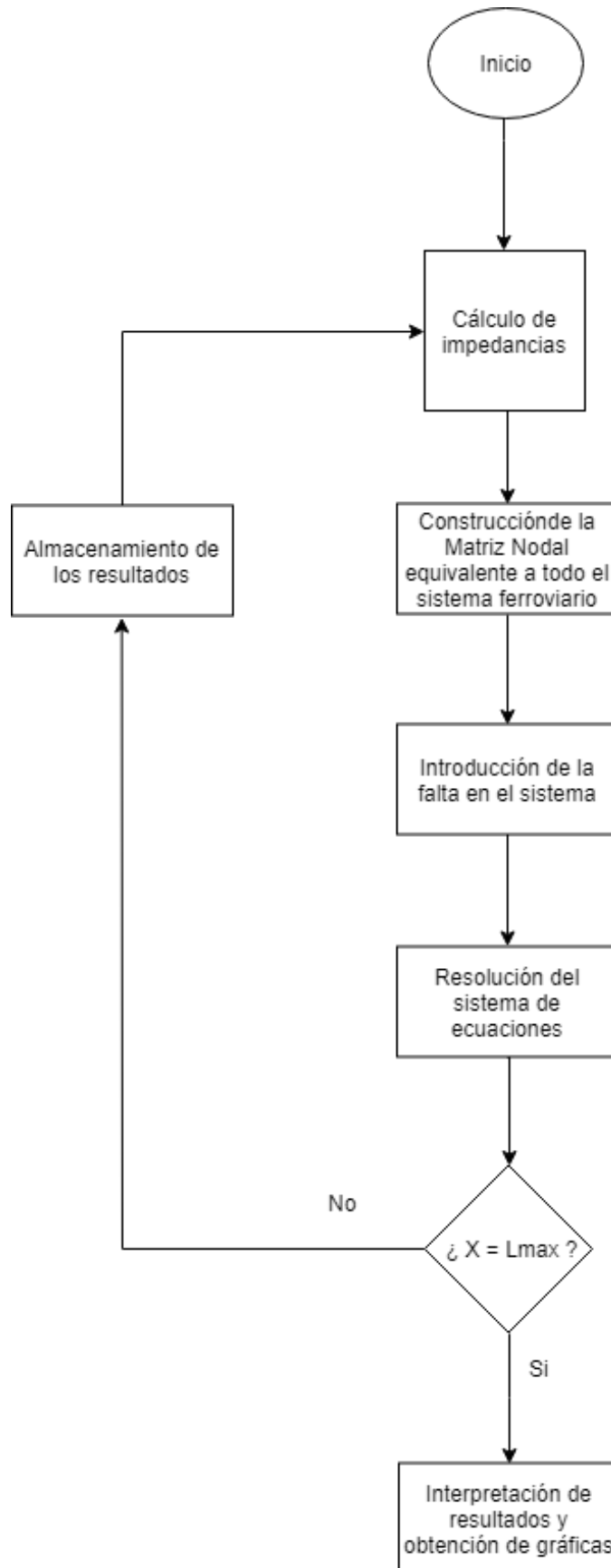


Figura 4-29. Diagrama de flujo del algoritmo matricial.

A continuación, se explican los distintos módulos de los que está formado el diagrama de flujo del algoritmo matricial, representado en la Figura 4-29.

Inicio

Los datos de partida que deben ser introducidos antes de iniciar la simulación son los siguientes:

- Tipo de sistema: 1x25 kVca o 2x25kVca.
- Tensión de la red.
- Frecuencia de alimentación (únicamente para el análisis mediante OpenDSS).
- Impedancia de líneas, de autotransformadores y de transformadores de potencia.
- Longitud total de la vía a estudiar.
- Distancia máxima entre autotransformadores.

En función de los datos proporcionados, se hace la construcción del sistema de tracción con las características y particularizaciones deseadas. Se llevará a cabo el análisis de cortocircuito en todos los puntos de la longitud total de la vía que se desee estudiar.

Tras ser introducidos los datos de partida, se inicia un bucle iterativo. En cada paso se incrementa en una unidad de longitud la posición de la falta, volviéndose a construir el sistema de ecuaciones con los modelos equivalentes considerando la nueva posición.

El proceso de simulación termina cuando la ubicación de la falta ha alcanzado la longitud total de la vía. Entonces se realiza la interpretación de los valores almacenados y se muestran tanto por pantalla como en forma de gráficas.

Cálculo de impedancias

El cálculo de las admitancias equivalentes del resto de elementos presentes en la red que no sean conductores como: la red de alimentación, SET, etc., se realiza una única vez al inicio del código. Los valores obtenidos no dependen de la posición en la que se produce la falta, por lo que serán constantes a lo largo de todas las iteraciones consideradas para simular la falta a lo largo de todos los puntos de la longitud total de la vía considerada para el análisis de cortocircuito.

Por otro lado, dentro del ciclo de iteraciones y en función de la posición de la falta en la vía, se calculan las impedancias de las líneas para cada uno de los tramos en los que se ha dividido la red. Una posible forma de implementación sería crear todas las variables que representan las impedancias de las líneas para el caso más desfavorable, sin tener en cuenta las características del sistema objeto de estudio. El número total de variables a crear vendrá dado por:

- Tipo de sistema: 1x25kVca o 2x25kVca
- Longitud total de la vía: L_{max}
- Longitud máxima del tramo: D

Con objeto de no construir una matriz de muy grandes dimensiones que incluya todas las variables predefinidas para los dos tipos de sistemas y número total de tramos a crear, y, por lo tanto, reservar demasiado espacio de memoria, se ha hecho uso la función "exec". Con la ayuda de esta función, se consigue crear únicamente el número de variables que realmente van a intervenir en los cálculos.

```

                                ##-----Cálculo de las admitancias-----##
#Se calculan las admitancias de las líneas de alimentación (Catenaria, Tierra o Raíl,
Feeder negativo) en función de la posición la falta
Tramo_CC=Pos_CC(X,D)
for j in np.arange(1, N_Tramos+1):
# Inicialmente (Yc1_1, Ycrl_1, Yr1_1 ...) son nulas mientras sus admitancias opuestas
(Yc1_2, Ycrl_2, Yr1_2 ...) tienen su valor máximo
if j!=Tramo_CC: # Se definen todas las admitancias de todos los tramos menos aquel en
el cual se produce la falta
    exec('Yc' + str(j) + '_' + str(1) + '= Yc')
    exec('Yr' + str(j) + '_' + str(1) + '= Yr')
    exec('Ycr' + str(j) + '_' + str(1) + '= Ycr')

    exec('Yc' + str(j) + '_' + str(2) + '= Yc')
    exec('Yr' + str(j) + '_' + str(2) + '= Yr')
    exec('Ycr' + str(j) + '_' + str(2) + '= Ycr')

    if sistema == "2x25":
        exec('Yf' + str(j) + '_' + str(1) + '= Yf')
        exec('Ycf' + str(j) + '_' + str(1) + '= Ycf')
        exec('Yrf' + str(j) + '_' + str(1) + '= Yrf')

        exec('Yf' + str(j) + '_' + str(2) + '= Yf')
        exec('Ycf' + str(j) + '_' + str(2) + '= Ycf')
        exec('Yrf' + str(j) + '_' + str(2) + '= Yrf')

elif j==Tramo_CC: # Se definen las admitancias del tramo que está en estudio
if L!=Tramo_CC*D:# Calculo de las admitancias fuera de los extremos tramo(evitar
división entre cero)
    exec('Yc' + str(j) + '_' + str(1) + '= 1/((X-' +str(Tramo_CC-1)+'*D)*Zc)')
    exec('Yc' + str(j) + '_' + str(2) + '= 1/(( '+' +str(Tramo_CC)+'*D-X)*Zc)')

    exec('Yr' + str(j) + '_' + str(1) + '= 1/((X-' +str(Tramo_CC-1)+'*D)*Zr)')
    exec('Yr' + str(j) + '_' + str(2) + '= 1/(( '+' +str(Tramo_CC)+'*D-X)*Zr)')

    exec('Ycr' + str(j) + '_' + str(1) + '= 1/((X-' +str(Tramo_CC-1)+'*D)*Zcr)')
    exec('Ycr' + str(j) + '_' + str(2) + '= 1/(( '+' +str(Tramo_CC)+'*D-X)*Zcr)')

    if sistema == "2x25":
        exec('Yf' + str(j) + '_' + str(1) + '= 1/((X-' +str(Tramo_CC-1)+'*D)*Zf)')
        exec('Yf' + str(j) + '_' + str(2) + '= 1/(( '+' +str(Tramo_CC)+'*D-X)*Zf)')

        exec('Ycf' + str(j) + '_' + str(1) + '= 1/((X-' +str(Tramo_CC-1)+'*D)*Zcf)')
        exec('Ycf' + str(j) + '_' + str(2) + '= 1/(( '+' +str(Tramo_CC)+'*D-L)*Zcf)')

        exec('Yrf' + str(j) + '_' + str(1) + '= 1/((X-' +str(Tramo_CC-1)+'*D)*Zrf)')
        exec('Yrf' + str(j) + '_' + str(2) + '= 1/(( '+' +str(Tramo_CC)+'*D-X)*Zrf)')

elif L==Tramo_CC*D:# Cálculo de las admitancias en los puntos extremos del tramo
    exec('Yc' + str(j) + '_' + str(1) + '= Yc')
    exec('Yc' + str(j) + '_' + str(2) + '= 0')

    exec('Yr' + str(j) + '_' + str(1) + '= Yr')
    exec('Yr' + str(j) + '_' + str(2) + '= 0')

    exec('Ycr' + str(j) + '_' + str(1) + '= Ycr')
    exec('Ycr' + str(j) + '_' + str(2) + '= 0')

    if sistema == "2x25":
        exec('Yf' + str(j) + '_' + str(1) + '= Yf')
        exec('Yf' + str(j) + '_' + str(2) + '= 0')

        exec('Ycf' + str(j) + '_' + str(1) + '= Ycf')
        exec('Ycf' + str(j) + '_' + str(2) + '= 0')

        exec('Yrf' + str(j) + '_' + str(1) + '= Yrf')
        exec('Yrf' + str(j) + '_' + str(2) + '= 0')

```

Además, con la ayuda de una nueva función llamada "Pos_CC", se ha podido ahorrar muchas líneas de código, ya que de otra forma sería implementar muchas sentencias "if-else" para distinguir los diferentes tramos en los cuales se producirá el cortocircuito.

Es decir, la forma del código para el cálculo de impedancias cuando la falta se da lugar en el primer tramo sin el uso de las dos funciones comentadas anteriormente ("exec" y "Pos_CC") habría sido de la siguiente forma:

```

if 0<=X<=D: #El corto circuito se produce entre el primer tramo
    Yc2_1=Yc # Inicialmente Yc1_1 es nula y Yc1_2 vale máximo
    Yr2_1=Yr
    Yc2_2=Yc
    Yr2_2=Yr

    Yc3_1=Yc
    Yr3_1=Yr
    Yc3_2=Yc
    Yr3_2=Yr

    Ycr2_1=Ycr
    Ycr2_2=Ycr
    Ycr3_1=Ycr
    Ycr3_2=Ycr

    if L!=10:
        Yc1_1=1/(X*Zc)
        Yc1_2=1/((X-L)*Zc)
        Yr1_1=1/(X*Zr)
        Yr1_2=1/((D-X)*Zr)
        Ycr1_1=1/(X*Zcr)
        Ycr1_2=1/((D-X)*Zcr)
elif L==10:
    Yc1_1=Yc
    Yc1_2=0
    Yr1_1=Yr
    Yr1_2=0
    Ycr1_1=Ycr
    Ycr1_2=0

elif D<X<=2*D: # El corto circuito se producirse entre el segundo tramo
    Yc1_1=Yc
    Yr1_1=Yr
    Yc1_2=Yc
    ...

```

Para hacer el cálculo de las admitancias cuando se produce el cortocircuito en los sucesivos tramos, habría que seguir una estructura parecida a esta.

Construcción de la matriz nodal equivalente a todo el sistema ferroviario

Continuando con el flujo de trabajo en el que se desarrolla el algoritmo, se procede a la construcción de la matriz nodal de todo el sistema de alimentación ferroviario, teniendo en cuenta los modelos equivalentes de todos los elementos que intervienen en el análisis nodal y las admitancias de las líneas obtenidas en el paso anterior.

Del mismo modo que en el punto anterior, el objetivo de usar la función "exec" es principalmente la optimización del código y del tiempo de ejecución, procediendo de esta forma a la creación de la matriz que representa exclusivamente al sistema en estudio con las particularidades que se encuentran especificadas.

En primer lugar, se define una matriz inicial para representar el modelo equivalente de la fuente de alimentación y el transformador de potencia. En función de la longitud máxima de la vía a estudiar, se procederá a la creación de nuevos tramos y la adición de sus modelos equivalentes a esta matriz inicial para formar finalmente la matriz Y_{bus} que representa a todo el sistema. Todos los elementos se unirán cuidadosamente al conjunto de nodos definidos a lo largo del sistema ferroviario. Estos nodos serán las incógnitas finales objeto de cálculo. Para el tipo de sistema 1x25 la construcción de la matriz de admitancias de todo el conjunto se realiza de la siguiente forma:

```

##----Construcción de la matriz de admitancias general del sistema sin
tener en cuenta la falta----##
# Se define la matriz inicial
Y0 = np.zeros((2,2), dtype=complex)
Y0[0,0] = Ysa+Yc1_1
Y0[0,1] = Ycr1_1
Y0[1,1] = Ysb+Yr1_1+Ypt

```

```

# Se termina de construir la matriz de admitancias en función de la longitud de la vía y
del numero de tramos.
k=0 # Variable auxiliar, inicialmente vale 0, ira incrementando en múltiplos de 1
n=-1 # Variable auxiliar, inicialmente vale -1, ira incrementando en múltiplos de 1
while k <=N_Tramos:
    if k==0:
        exec('Y' + str(k) + '= Y0')
    else:
        if k!=1:# Se corrigen los valores anteriores de la matriz diagonal añadiendo las
admitancias de los nuevos tramos que se pretende conectar
            # Para k=1 no se hace porque ya se han tenido en cuenta en la matriz
inicial
            # Valores anteriores de la matriz diagonal
            exec('Y' + str(k-1)+str(['k+n,k+n']) + '+= Yc'+str(k)+'_'+str(1))
            exec('Y' + str(k-1)+str(['k+n+1,k+n+1']) + '+= Yr'+str(k)+'_'+str(1))

            # Las admitancias de las líneas o elementos fuera de la diagonal
            exec('Y' + str(k-1)+str(['k+n,k+n+1']) + '+= Ycr'+str(k)+'_'+str(1))

        # Se define la matriz de admitancias del nuevo tramo de la vía
        Yn=np.zeros((2,2),dtype=complex)

        # Elementos de la diagonal
        exec('Yn[0][0]= Yc'+str(k)+'_'+str(2))
        exec('Yn[1][1]= Ypt+Yr'+str(k)+'_'+str(2))
        # Resto de elementos
        exec('Yn[0][1]= Ycr'+str(k)+'_'+str(2))

        #Se juntan las dos matrices, haciendo la unión del nuevo tramo de la vía
        exec('Y'+str(k)+'=sci.block_diag('+Y'+str(k-1)+'',Yn+'')')

        #Se añade las nuevas conexiones: Por ejemplo, para k=1 se tiene:
        exec('Y' + str(k) + str(['k+n,k+n+2']) + '= -Yc') #Y[1,3]
        exec('Y' + str(k) + str(['k+n,k+n+3']) + '= -Ycr') #Y[1,4]

        exec('Y' + str(k) + str(['k+n+1,k+n+2']) + '= -Ycr') #Y[2,3]
        exec('Y' + str(k) + str(['k+n+1,k+n+3']) + '= -Yr') #Y[2,4]
        n+=1
        #Se realiza la asignación la matriz de admitancias
        exec ('Y'+str(k))
        k+=1

```

Introducción de la falta

Hasta este punto, se ha implementado la matriz de admitancias que representa el sistema en modo de funcionamiento normal. En este paso, se llevará a cabo la modificación del conjunto de ecuaciones obtenidas para tener en cuenta la presencia de la falta en el sistema. Es decir; se modificará la matriz del sistema Y_{bus} para introducir el cortocircuito, y las alteraciones a realizar estarán sujetas a la posición en la cual se produce la falta.

```

# Se actualiza la dimensión de la matriz
if X!=D and X!=2*D and X!=3*D:
    Ybus[:-2, :-2]=Y
elif X==D or X==2*D or X==3*D:
    Ybus[:, :]=Y

if 1<=X<=D: #CC se produce en el primer tramo de la vía
    if X!=D:
        # se realiza la desconexión entre los nodos
        Ybus[0,2]=0
        Ybus[0,3]=0
        Ybus[1,2]=0
        Ybus[1,3]=0

        # se realiza la unión de los nodos con el nodo de falta
        Ybus[0,N-2]=-Yc1_1
        Ybus[0,N-1]=-Ycr1_1

```

Tras finalizar la construcción de la matriz nodal de admitancias, con los modelos de todos los elementos del

sistema ferroviario y la modificación de la misma para considerar el cortocircuito, se obtiene un sistema de ecuaciones para resolver de la siguiente forma:

$$\tilde{I}_{node} = Y_{bus} \cdot \tilde{V}_{Node}$$

$$\begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = Y_{bus} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (4-27)$$

El número total de nodos a crear estará en función del tipo de sistema bajo estudio junto a las particularidades indicadas y la posición en la cual se producirá la falta. Es importante destacar que, cuando se produce la falta en los puntos extremos, el número de nodos es menor debido a que no se han creado los tres nodos ficticios como se ha procedido para el resto de las ubicaciones.

Resolución

Teniendo el sistema de ecuaciones construido se procede a su resolución, para ello se llama a la función “*linalg.solve*” disponible en el paquete “*Numpy*” de Python, como se muestra a continuación:

```
###-----Resolución del sistema de ecuaciones-----###
V=np.linalg.solve(Ybus, Inode)
```

Interpretación de resultados

Finalmente, se realiza el análisis de los resultados y se crean las gráficas necesarias para representar los valores de interés.

```
###-----Se realiza el plot con los datos obtenidos----###
Graficas
(sistema,Lmax,If,Ics,Irs,Ifs,Iat1,Iat2,Iat3,Ic1y,Ic2x,Ic2y,Ic3x,Ir1y,Ir2x,Ir2y,Ir3x,V1,V2,V3,V4,V5,V6,V7,V8,V9,V10,Vcc1,Vcc2,Vcc3)
```


5 ESTUDIO DE CORTOCIRCUITO MEDIANTE SOFTWARE OPENDSS

En el presente capítulo se realizará el desarrollo de la segunda metodología para el análisis de cortocircuitos. Con la ayuda de la herramienta de programación Python, se implementarán los circuitos eléctricos de los distintos sistemas ferroviarios de alimentación en el software de simulación OpenDSS. De esta forma se obtendrán otros resultados con los cuales se compararán los obtenidos mediante la herramienta de análisis nodal desarrollada en el capítulo anterior.

5.1 Introducción al software de simulación OpenDSS

OpenDSS (Open Distribution System Simulator) es un software de licencia libre desarrollado por EPRI (Electric Power Research Institute) desde hace más de una década. Está diseñado para realizar simulaciones de sistemas de distribución de energía eléctrica y considerado hoy en día, como uno de los programas de mayor fiabilidad de modelado.

Esta aplicación de simulación permite ejecutar varios tipos de análisis, entre ellos y siendo el más usado se encuentra el análisis en el dominio de la frecuencia, pudiendo realizar análisis del sistema bajo estudio a cualquier frecuencia deseada. Otros modos de simulación disponibles son:

- **Snapshot Power Flow:** Flujo de potencia instantáneo. Resuelve un único flujo de potencia de forma estática.
- **Daily Power Flow:** Flujo de potencia diario, realiza la simulación a partir de un intervalo de horas proporcionando, por defecto ejecuta 24 soluciones en incrementos de una hora.
- **Yearly Power Flow:** Parecido al diario, pero con flujo de potencia anual.
- **Harmonics:** Análisis de los armónicos.
- **Dynamics:** Análisis dinámico, simulación de estados transitorios electromagnéticos.
- **Faultstudy:** Estudios de fallos. Se puede obtener un estudio completo de corrientes y voltajes cuando se produce un cortocircuito en algún punto de la red.
- **Montecarlo fault study:** Estudios de faltas por el método de Montecarlo.
- **Otros:** El usuario puede definir otros métodos de resolución.

Entre las aplicaciones en las cuales está siendo usado este potente programa de simulación, se pueden destacar:

- Planificación y simulación de redes de distribución de energía.
- Desarrollo de nuevas técnicas de optimización y mejora de eficiencia de las redes de distribución.
- Modelado de interconexión de los circuitos de generación distribuida.
- Simulación de casi todo tipo de plantas de generación de energía.

- Cálculo y estudio de armónicos.
- Simulaciones diarias y anuales de demanda y generación.
- Análisis de configuración de dispositivos de protección, transformadores y etc.
- Análisis dinámico.
- Cálculo de cortocircuitos.
- Otros.

Con objeto de no alargar demasiado este capítulo, en las referencias, [9], [11] y [12] se puede encontrar más información respecto al uso de esta herramienta, entre otras, funcionalidades tan esenciales como:

- Definición de elementos eléctricos básicos.
- Sintaxis de comandos.
- Comandos disponibles.
- Obtención y representación de los resultados.
- Creación de monitores.
- Simulación de ejemplos básicos para familiarizarse con el software.

5.1.1 COM Server

Una de las principales ventajas de este software de simulación es su interacción a través de “*COM Server*” con otros softwares tales como, Matlab, Excel, Python, Mathworks, etc., permitiendo así mayor flexibilidad al usuario, lo que se transforma en comodidad para el análisis de la información. La Figura 5-1 muestra como interactúan los diferentes módulos dentro de la estructura de OpenDSS.

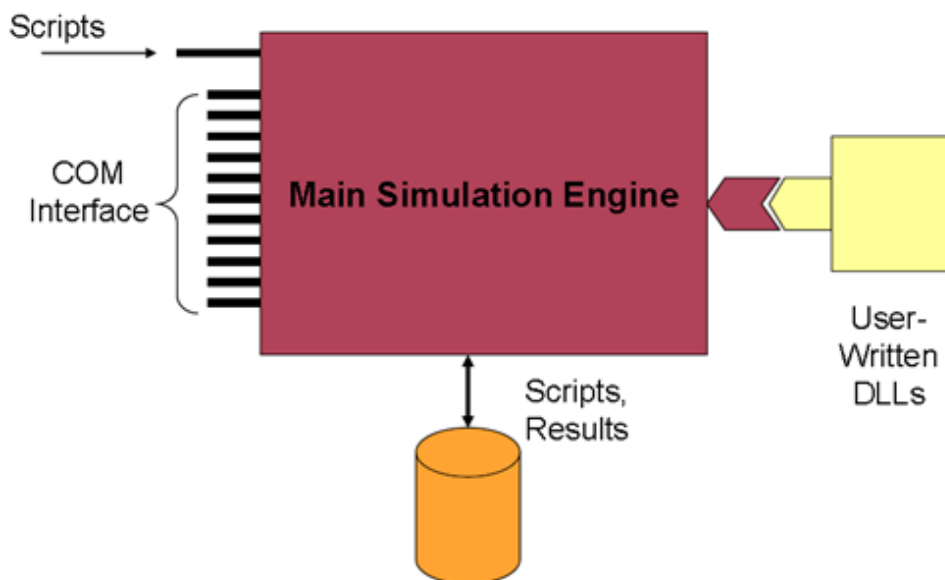


Figura 5-1. Estructura de trabajo de OpenDSS Fuente [9].

Por otro lado, la aplicación cuenta con otra forma de interacción, se trata de la interfaz de usuario que viene por defecto con el software, es básica pero completamente funcional. Además, ofrece multitud de herramientas de control y análisis de cada elemento del circuito. Por lo tanto, a través de la propia interfaz de usuario del programa, Figura 5-2 se pueden generar los códigos de diseño de circuitos y simulación de los mismos.

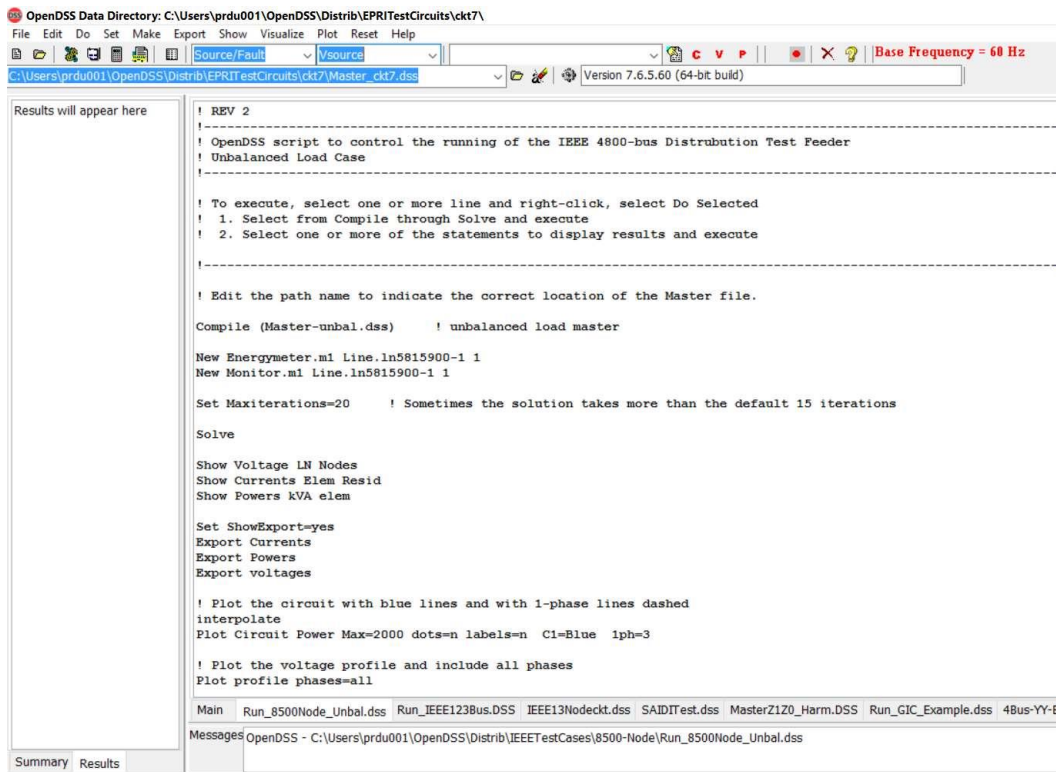


Figura 5-2. Ejemplo de la ventana del panel de control para el DSS. Fuente [9].

5.1.2 Control de OpenDSS desde Python

Tal como se mencionó anteriormente, OpenDSS puede ser controlado desde otros paquetes de software tales como Python. Esto es posible a través del “COM Server”.

Para poder realizar la conexión habrá que instalar varios paquetes, los cuales estarán disponibles en la página web del desarrollador. La inicialización del COM Server desde Python se puede realizar, de manera básica, dentro del código que se pretende ejecutar.

5.2 Análisis de cortocircuito del sistema 1x25 y 2x25 kVca mediante OpenDSS

La forma con la cual trabaja el software de simulación OpenDSS es muy parecida a la herramienta desarrollada en el capítulo anterior. Los circuitos eléctricos se representan a través de ecuaciones de admitancias nodales, de tal forma que cada elemento del sistema es modelado por una matriz de admitancias nodal primitiva, la cual es adjuntada a la matriz de admitancias global que representa el modelo de todo el sistema. El conjunto de ecuaciones que representa al circuito es solucionado con la ayuda de algoritmos de matrices dispersas.

La Figura 5-3 ilustra cómo OpenDSS une todos los elementos activos y pasivos presentes en el circuito para calcular la solución.

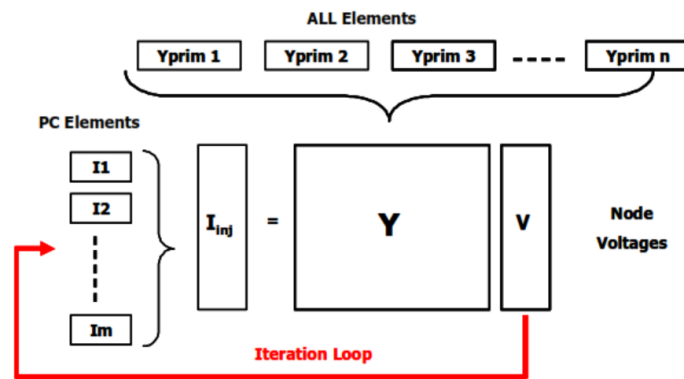


Figura 5-3. Bucle de solución OpenDSS. Fuente [9].

Respecto a la manera con la cual este software modela la fuente de alimentación y los elementos no lineales, especialmente cargas y generadores, es la mostrada en la Figura 5-4. El comportamiento de estos elementos es modelado como un circuito Norton equivalente, una admitancia constante denominada Y_{prim} y una fuente de corriente a la cual se hace referencia como corriente de compensación o inyección de corrientes. De esta manera, la corriente que depende de la parte no lineal del modelo de cualquier elemento incluido en la matriz general del sistema es compensada por una fuente externa.

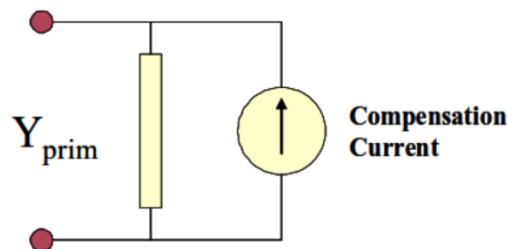


Figura 5-4. Modelos equivalente de fuente de alimentación mediante corrientes de compensación usado en OpenDSS.

Esto funciona muy bien para la mayoría de las cargas presentes en los sistemas de distribución, permitiendo por lo tanto representar una amplia gama de modelos de cargas con variación en la tensión, consiguiendo una rápida convergencia en la mayoría de los sistemas de distribución cualesquiera que sean sus condiciones.

Además, esta técnica de representación de cargas es muy usada en la mayoría de los programas de análisis de sistemas de distribución. Una de las principales ventajas de esta metodología, radica en su amplia flexibilidad en la consideración de los modelos de cargas. Esta característica es muy importante para algunos tipos de análisis, como los estudios de eficiencia energética.

La matriz Y_{prim} se mantiene generalmente constante por motivos de eficiencia computacional. Con esto se limita el número de veces que la matriz que representa a todo el sistema tenga que ser reconstruida. Esto tiene gran importancia al contribuir en gran medida, a la eficiencia computacional cuando se realizan simulaciones de larga duración, como las anuales. A continuación, se citan algunos de los modelos de cargas que están disponibles en

OpenDSS³:

1. Modelo de carga con potencia activa (P) y potencia reactiva (Q) constantes: Conocido también por modelo de carga de potencia constante. Es el modelo más utilizado en los estudios de flujo de potencia. Puede sufrir problemas de convergencia cuando la tensión se desvía demasiado del rango normal.
2. Modelo de carga de impedancia (Z) constante: Este modelo es esencialmente lineal donde P y Q varían según el cuadrado de la tensión. Este tipo de representación de carga suele garantizar la convergencia en cualquier condición.
3. Modelo de carga con P constante y Q cuadrática: En esta representación se considera que la potencia reactiva varía de forma cuadrática con la tensión, actuando como una reactancia constante, mientras que, la potencia activa es independiente de la tensión con un comportamiento parecido a un motor.
4. Modelo de carga exponencial: La dependencia de la tensión de P y Q se define mediante parámetros exponenciales. Este modelo se usa típicamente para estudios de Reducción de Voltaje de Conservación (CVR). También es usado en los sistemas de distribución, cuando se alimenta a un conjunto de cargas con un comportamiento desconocido de antemano.
5. Modelo de carga con corriente (I) constante: En este modelo, P y Q varían linealmente con la tensión, mientras que la magnitud de carga permanece constante. Esta metodología es muy común en los programas de análisis de sistemas de distribución.

Para la resolución del circuito, OpenDSS empieza el bucle de iteraciones a partir de una solución inicial de tensiones V_0 en los nodos del sistema, esta es obtenida directamente a partir de la ecuación $I = Y * V$, donde las cargas y generadores presentes en el circuito con comportamiento no lineal son considerados como modelos lineales al no tener en cuenta las fuentes de inyección de corriente descritas anteriormente. Este tipo de computo de solución inicial es parecido al denominando “*Arranque plano*” en otros algoritmos de flujo de potencia, excepto que, en este, se tiene en cuenta todas las conexiones multifásicas y los diferentes niveles de tensión presentes en el sistema. El vector de voltaje en los nodos obtenido como solución inicial, es a menudo muy próximo a la solución final del sistema tras incluir el comportamiento no lineal de los elementos.

El objetivo principal del uso de esta metodología para la obtención de una solución inicial es debido a que el Software OpenDSS ha sido diseñado para resolver redes de distribución de n-fases, en las cuales puede haber conexiones y transformadores con relación de transformación de todo tipo. Para resolver este tipo de sistemas es de vital importancia partir de una buena solución inicial para hacer que el sistema converja en un número considerable de iteraciones, reduciendo así la probabilidad de divergencia y el tiempo total de computo para obtener la solución final.

El ciclo de iteraciones comienza con la obtención de las corrientes de compensación de todos los elementos no líneas presentes en el sistema, estas son incorporadas al vector de corrientes en los nodos I_{inj} representado en la Figura 5-3. La siguiente iteración se realizará teniendo en cuenta el nuevo vector I_{inj} obtenido en la iteración anterior. Este proceso se repite hasta llegar a la n-ésima iteración en la cual la precisión de la solución obtenida es de $0.0001p.u.$

Por lo tanto, el proceso de cómputo se centra fundamentalmente en resolver el sistema no lineal de ecuaciones de admitancias de la siguiente forma:

$$I_{inj}(V_{node}) = Y_{system} \cdot V_{node} \quad (5-1)$$

Donde:

³ Para obtener más información sobre estos modelos de cargas dirijase a [9]

I_{inj} : *Modela las corrientes de compensación o de inyección de los elementos PC presentes en el circuito y que pueden tener un comportamiento no lineal.*

5.3 Programación de los sistemas en OpenDSS

El primer paso a realizar antes de empezar a definir los elementos del circuito eléctrico que se pretende analizar es inicializar la conexión de Python con OpenDSS. Para ello, habrá que instalar los paquetes que, aunque vienen con el programa, no son instalados automáticamente debido a que son específicos para la interacción del software con este lenguaje de programación.

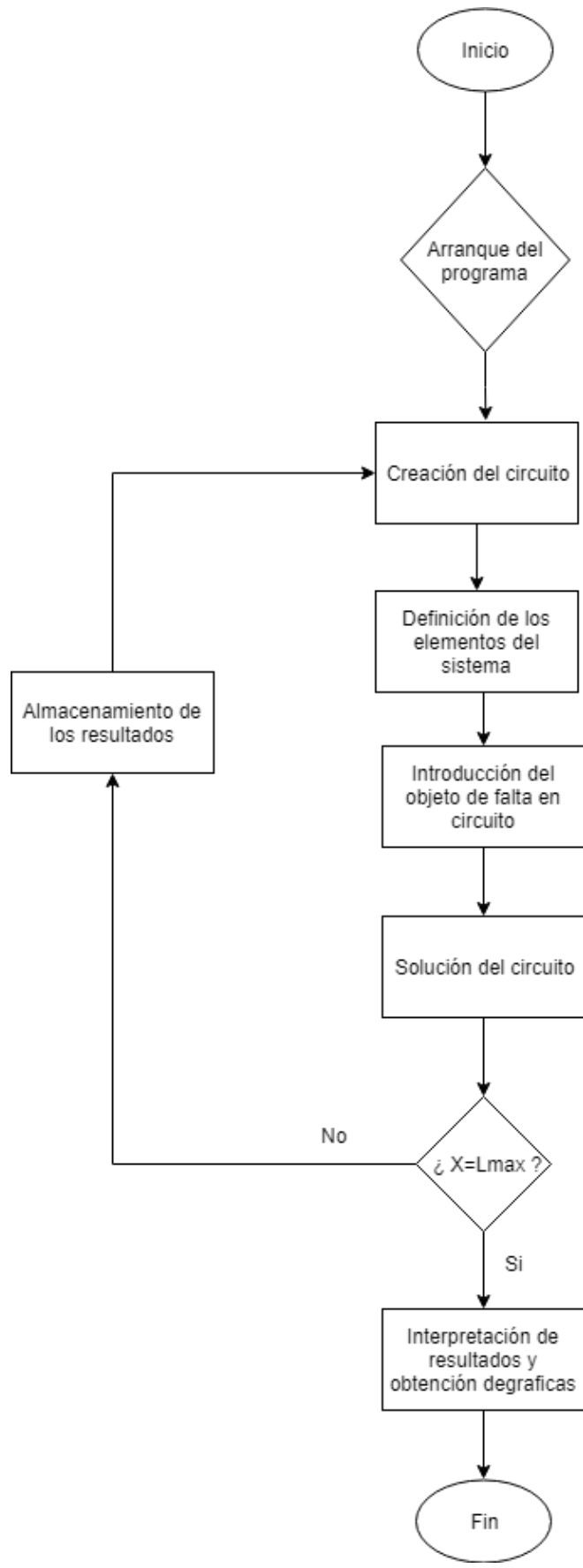


Figura 5-5. Diagrama de flujo de análisis mediante OpenDSS.

Arranque del software

Para la apertura del software desde la interfaz de Python, los pasos a seguir son muy simples y se indican a continuación. Como se puede ver en las sentencias, se ha realizado la asignación de nuevas variables con objeto de reducir la longitud de las líneas de comando.

```
# Se inicializa la comunicación con la interfaz COM de OPDSS
DSS_StartUp = win32com.client.Dispatch("OpenDSSEngine.DSS")

# Se arranca el programa OpenDSS y se comprueba si hubo algún error en el arranque
if DSS_StartUp.Start(0) == 0:
    print "DSS failed to start"
else:
    #Se asignan nuevas variables para un mejor acceso
    DSSCircuit = DSS_StartUp.ActiveCircuit
    DSSText = DSS_StartUp.Text
    Solution = DSSCircuit.Solution
```

Creación del circuito eléctrico

Una vez el inicializado el programa, se entra en el bucle principal de iteraciones que termina cuando se alcanza la longitud total de la vía. En cada paso se elimina el circuito anterior y se crea de nuevo todo el sistema de tracción, definiendo en todas las ocasiones cada elemento por el cual está compuesto y la nueva posición en la cual se va a producir la falta.

```
for i in np.arange(1,Lmax+1): #empieza en i=1 y llega hasta i=Lmax
    L= i+0.0
    # Se eliminan todos los circuitos anteriores para crear uno nuevo
    DSSText.Command = "clear"
```

En primer lugar, se crea la fuente de alimentación según el tipo del sistema en estudio en función de sus características (potencia de cortocircuito monofásica y trifásica, número de fases a conectar, etc.). Como se comentó en los inicios de este capítulo, una de las herramientas más importantes de las cuales dispone este software es su posibilidad de aplicación para la simulación de sistemas de distribución de energía en el dominio de frecuencia. Por lo tanto, se podrán llevar a cabo simulaciones en función de la frecuencia deseada (50 o 60 Hz).

Del mismo modo que en el modelo equivalente desarrollado en el análisis nodal, en este circuito también se realiza una conexión entre el rail y tierra cada cierta longitud de la vía (se ha tomado una distancia de 10 km).

El modelo de impedancias de líneas considerado es de tipo *"LineCode"* que son librerías con las características generales de los cables. Se introducirá una matriz con los valores de las impedancias de todos los conductores y los acoplamientos entre ellos.

El uso de una variable auxiliar llamada *"conbus"* es para indicar la conexión de los conductores y los elementos entre sí. Dependerá únicamente del tipo del sistema a construir: dos fases para 1x25 y tres para 2x25.

```
if sistema == "1x25":
    # 1 Fuente de alimentación
    DSSText.Command = "New object=circuit.C1x25 basekv=132 frequency="+str(f)+ " phases=3
    MVASC1=8000 MVASC3=8000"

    # 2 Transformador de tracción
    DSSText.Command = "New Transformer.TrafoSE Phases=1 Windings=2 XHL="+str(ImpTSE)
    DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Sourcebus.1.2 kV=132 KVA=20000"
    DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus0.1.2 kV=25 KVA=20000"

    # Al principio de cada tramo se conecta el raíl con tierra
    DSSText.Command="New reactor.0 X=0.001 R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus0.2 bus2=Bus0.0
    phases=1"

    # Modelo de líneas áreas
    DSSText.Command = "New Linecode.Catenaria nphases=2 units=KM" #Definimos la impedancia de
    la catenaria con una matriz triangular 2x2
```



```

DSSText.Command="more Rmatrix=["+str(Rl[0,0])+ "|" +str(Rl[0,1])+ " "+str(Rl[1,1])+"]"
DSSText.Command="more Xmatrix=["+str(Xl[0,0])+ "|" +str(Xl[0,1])+ " "+str(Xl[1,1])+"]"
DSSText.Command="more Cmatrix=["+str(Cl*10**9)+ "|" +str(Cl*10**9)+ " "+str(Cl*10**9)+"]"

# Variable auxiliar para indicar el tipo de conexión entre buses
conbus='.1.2'

```

Hay que considerar los casos particulares de igual modo que se ha hecho en la implementación del algoritmo de análisis nodal. Estos se dan lugar cuando se produce un cortocircuito en los puntos extremos, es decir: en las bornas de los centros de autotransformación. En este caso, no se crean dos nuevos nodos, más bien se realiza directamente la conexión entre las bornas del autotransformador. Como resultado, la dimensión del sistema de ecuaciones a resolver y el número incógnitas es menor.

Introducción de falta

Tras definir todos los elementos por los cuales está compuesto el circuito y realizar la conexión entre ellos, se procede a la conexión de fase del feeder positivo con tierra. Para ello se hace uso del elemento "*Fault Object*" disponible en OpenDSS para simular el comportamiento de una conexión accidental tipo cortocircuito y cuya impedancia es $Z_{cc} = 0.0001\Omega$.

La siguiente figura muestra un ejemplo de un cortocircuito producido en el primer tramo de la red. En ella se aprecia la definición mediante bloques de los diferentes componentes de la red, así como la división del primer tramo donde se ha producido el cortocircuito para modelar de forma independiente cada lado de la división. Además, se ha marcado en rojo el nuevo bus introducido con objeto de cortocircuitar las dos fases. La posición de este elemento se ira avanzando con cada incremento en el ciclo de iteraciones, es decir, se realizará una definición de bloques parecida a esta a medida que la falta se aleja de la SET.

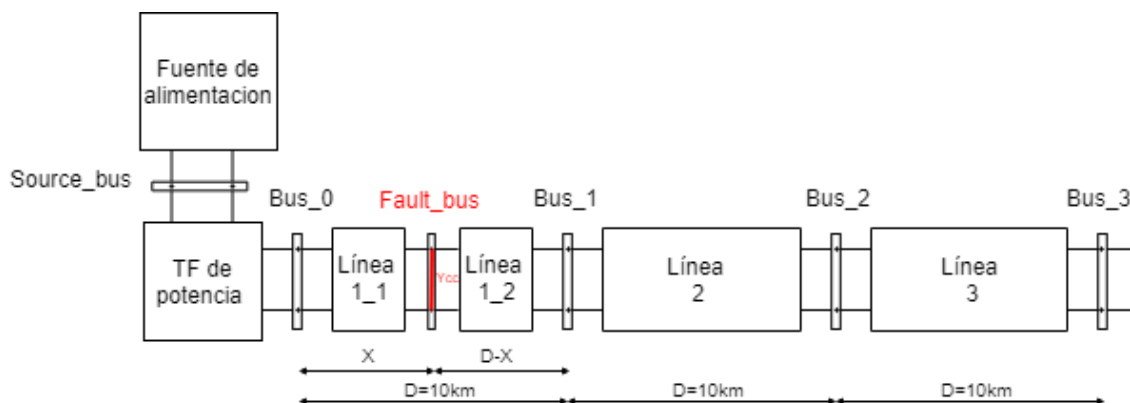


Figura 5-6. Simulación de los sistemas en OpenDSS.

Para el ejemplo de la figura anterior, sistema de distribución de 1x25kVca y un cortocircuito producido en el primer tramo de la red se modela con las siguientes líneas de código:

```

# 3_1 Creación y conexión de línea 1_1
DSSText.Command = "New line.Line1_1 Bus1=Bus0"+str(conbus)+" Bus2=BusF"+str(conbus)+"
length="+str(L)+" linecode=Catenaria"

# 3_2 Creación y conexión de línea 1_2
DSSText.Command = "New line.Line1_2 Bus1=BusF"+str(conbus)+" Bus2=Bus1"+str(conbus)+"
length="+str(D-L)+" linecode=Catenaria"

# 4 Conexión a tierra mediante una resistencia de 2.002
DSSText.Command="New reactor.1 X=0.001 R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus1.2 bus2=Bus1.0 phases=1"

# 5 Conexión de la línea 2
DSSText.Command = "New line.Line2 Bus1=Bus1"+str(conbus)+" Bus2=Bus2"+str(conbus)+"
length="+str(D)+" linecode=Catenaria"

```

```

# 6 Conexión a tierra mediante una resistencia de 2.002
DSSText.Command="New reactor.2 X=0.001 R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus2.2 bus2=Bus2.0 phases=1"

# 7 Creación y conexión de línea 3
DSSText.Command = "New line.Line3 Bus1=Bus2"+str(conbus)+" Bus2=Bus3"+str(conbus)+"
length="+str(D)+" linecode=Catenaria"

# 8 Conexión a tierra mediante una resistencia de 2.002
DSSText.Command="New reactor.3 X=0.001 R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus3.2 bus2=Bus3.0 phases=1"

# Creación y conexión de Fault object para cortocircuitar dos fases
DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1 bus1=busF.1 bus2=busF.2"

```

Solución del circuito

Una vez creado y conectado el objeto de falta al sistema en estudio con el resto de los elementos que intervienen en la red de tracción, se procede a la resolución del circuito para cada posición de la falta. Para ello, se establece el modo de control "snap" que permite simular el circuito para una única iteración con los valores dados y se llama al comando "solve" para resolver el circuito eléctrico.

```

###-----Solución del circuito-----###
# solución y modo de control del sistema
DSSText.Command = "Set controlmode=snap" #modo de control
DSSText.Command = "solve"

```

Interpretación de los resultados

Por último, se procede a la extracción de los resultados y la obtención de las gráficas

```

if sistema == "1x25":
    Vf1=DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(1)
    Vf2=DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(2)

    if L==1:
        Vnames_f1_Static1_1 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(1) #(u'sourcebus.1',
u'bus0.1', u'busf.1', u'bus1.1', u'bus2.1', u'bus3.1')
        Vnames_f2_Static1_1 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(2) #(u'sourcebus.2',
u'bus0.2', u'busf.2', u'bus1.2', u'bus2.2', u'bus3.2')
        elif L==D:
            Vnames_f1_Static2_2 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(1) #(u'sourcebus.1',
u'bus0.1', u'bus1.1', u'bus2.1', u'bus3.1')
            Vnames_f2_Static2_2 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(2) #(u'sourcebus.2',
u'bus0.2', u'bus1.2', u'bus2.2', u'bus3.2')

    if L!=D and L!=2*D and L!=3*D:
        Vnames_f1 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(1)
        Vnames_f2 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(2)

        Vvalues_f1 = DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(1)
        Vvalues_f2 = DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(2)
            # V1 Vcc1 V3 V5 V7
            # 1 2 3 4 5
        for s in np.arange(1,len(Vnames_f1)): #(u'sourcebus.1', u'bus0.1', u'busf.1',
u'bus1.1', u'bus2.1', u'bus3.1')
            if Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static1_1[1]: V1[i] = Vvalues_f1[s]
            elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static1_1[2]: Vcc1[i]= Vvalues_f1[s]
            elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static1_1[3]: V3[i] = Vvalues_f1[s]
            elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static1_1[4]: V5[i] = Vvalues_f1[s]
            elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static1_1[5]: V7[i] = Vvalues_f1[s]
            else : print "Nodo no encontrado"

            # V2 Vcc2 V4 V6 V8
            # 1 2 3 4 5
        for s in np.arange(1,len(Vnames_f2)): #(u'sourcebus.2', u'bus0.2', u'busf.2',
u'bus1.2', u'bus2.2', u'bus3.2')
            if Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static1_1[1]: V2[i] = Vvalues_f2[s]
            elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static1_1[2]: Vcc2[i]= Vvalues_f2[s]
            elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static1_1[3]: V4[i] = Vvalues_f2[s]
            elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static1_1[4]: V6[i] = Vvalues_f2[s]
            elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static1_1[5]: V8[i] = Vvalues_f2[s]
            else : print "Nodo no encontrado"

```


6 APLICACIÓN A SISTEMAS REALES Y RESULTADOS

Tras finalizar el desarrollo de las dos herramientas de análisis, se procede en este capítulo a su aplicación en casos prácticos de redes de alimentación.

6.1 Datos de partida de los sistemas ferroviarios usados en el caso práctico

El estudio de corrientes de falta se va a realizar sobre una red de tracción ferroviaria localizada dentro de la península ibérica. Precisamente dentro del territorio español, por lo tanto, los valores ensayados en los casos prácticos presentados en este capítulo son típicos de instalaciones de REE. Conviene destacar que, sin lugar a duda, para las dos metodologías de estudio implementadas (análisis nodal y OpenDSS) se puede ensayar cualquier combinación de datos de partida deseadas, siempre y cuando sean coherentes y compatibles con los dos tipos de sistemas objeto de estudio; en caso contrario no se producirá la compilación del código y dará lugar a un error.

6.1.1 Red de alimentación

Tabla 6–1. Datos de partida de la red de transporte.

Tensión nominal de la red	132 kV
Frecuencia	50 Hz
Intensidad de cortocircuito trifásico máxima admisible impuesta por REE	40 kA
Potencia de cortocircuito trifásico en el punto de conexión: S''_{kQ}	80000 MVA

A partir de los datos facilitados en la tabla se puede calcular la impedancia compleja de la red de alimentación

$$Z_Q = \frac{(U_{nQ})^2}{S''_{kQ}} = \frac{(132 \text{ kV})^2}{8000 \text{ MVA}} = 2.178 \text{ j } \Omega \quad (6-1)$$

6.1.2 Subestación eléctrica de tracción (SET)

Tabla 6–2. Datos de partida del transformador de potencia.

	Sistema 1x25 kVca	Sistema 2x25 kVca
Tensión nominal secundario en vacío	1x27,5 kV	2x27,5 kV
Relación de transformación en vacío	132 / 27,5kV	132 / 27,5kV

Potencia nominal del primario	30 MVA	60 MVA
Tensión de cortocircuito primario-secundario (12)	10 % (base 30 MVA)	10 % (base 60 MVA)
Tensión de cortocircuito secundario-terciario (23)		10 % (base 60 MVA)
Pérdidas máximas asignadas debidas a carga y referidas a 75°C	100 kW	160 kW
Relación de impedancia	30	30

➤ Transformador de dos devanados

Las impedancias de cortocircuito de secuencia directa $Z_T = R_T + jX_T$ del transformador de 30 MVA para la red de la alimentación 1x25 kVca, con y sin cambiador de tomas en carga, se puede calcular a partir de los datos asignados del transformador cómo se procede a continuación:

En primer lugar, se calcula la impedancia total del transformador a partir de la tensión de cortocircuito:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = 0.1 \cdot \frac{(132 \text{ kV})^2}{30 \text{ MVA}} = 58.08 \Omega \quad (6-2)$$

Siendo:

U_{rT} : Tensión asignada del transformador.

S_{rT} : Potencia aparente asignada del transformador.

u_{kr} : Tensión de cortocircuito en tanto por ciento a la corriente asignada.

En segundo lugar, se calcula la resistencia a partir de las pérdidas:

$$I_{rT} = \frac{S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{rT}} = \frac{30 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 132 \text{ kV}} \cong 131.22 \text{ A} \quad (6-3)$$

$$R_T = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} = \frac{100 \text{ kW}}{3 \cdot (131.22 \text{ A})^2} \cong 1.936 \Omega \quad (6-4)$$

Siendo:

I_{rT} : Corriente asignada del transformador.

P_{krT} : Pérdidas totales del transformador en los devanados a la corriente asignada.

La reactancia se calculará una vez obtenidas la impedancia y la resistencia; esta tiene un valor de:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{58.08^2 - 1.936^2} \cong 58.047 \text{ j } \Omega \quad (6-5)$$

Finalmente, la impedancia compleja referida al primario del transformador monofásico de potencia con dos devanados es:

$$\underline{Z}_T = \underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = (3.097 + 57.997 j) \Omega \quad (6-6)$$

Para la obtención de Z_2 referida al secundario, basta con dividir por la relación de transformación al cuadrado:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_2 &= (3.097 + 57.997 j) \Omega \cdot \frac{1}{t_r^2} = (3.097 + 57.997 j) \Omega \cdot \frac{1}{\left(\frac{220}{27.5}\right)^2} \\ &= (0.04839 + 0.9062 j) \Omega \end{aligned} \quad (6-7)$$

Las impedancias complejas Z_1 y Z_2 obtenidas, se usarán en las simulaciones mediante la herramienta de análisis nodal. Los estudios llevados a cabo con OpenDSS se parte directamente de la tensión de cortocircuito del transformador de potencia.

► Transformador de tres devanados:

En el caso de transformadores de tres devanados, las impedancias de cortocircuito de secuencia directa Z_1 , Z_2 y Z_3 se pueden calcular a partir de las impedancias de cortocircuito (referidas al lado de alta tensión del transformador):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{12} &= \left(\frac{u_{Rr12}}{100\%} + j \frac{u_{Xr12}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rT12}^2}{S_{rT12}} \\ \underline{Z}_{13} &= \left(\frac{u_{Rr13}}{100\%} + j \frac{u_{Xr13}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rT13}^2}{S_{rT13}} \\ \underline{Z}_{23} &= \left(\frac{u_{Rr23}}{100\%} + j \frac{u_{Xr23}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rT23}^2}{S_{rT23}} \end{aligned} \quad (6-8)$$

Con:

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} \quad (6-9)$$

Por las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= \frac{1}{2} \cdot (Z_{12} + Z_{13} - Z_{23}) \\ \underline{Z}_2 &= \frac{1}{2} \cdot (Z_{23} + Z_{12} - Z_{13}) \\ \underline{Z}_3 &= \frac{1}{2} \cdot (Z_{13} + Z_{23} - Z_{12}) \end{aligned} \quad (6-10)$$

Siendo:

U_{rT1} : La tensión asignada del lado 1.

S_{rT12} : La potencia aparente asignada entre los lados 1 y 2.

S_{rT13} : La potencia aparente asignada entre los lados 1 y 3.

S_{rT23} : La potencia aparente asignada entre los lados 2 y 3.

$u_{Xri,j}$: La componente reactiva asignadas de la tensión de cortocircuito, dada en tanto

por ciento, entre los lados i y j .

En el sistema de alimentación ferroviario 2x25 kVca, el secundario del transformador es de 55 kV con una toma en el punto intermedio, resultando dos secundarios de 27,5 kV con los devanados secundarios N_2 y terciario N_2 iguales. Por lo tanto, las impedancias de cortocircuito Z_2 y Z_3 como las impedancias Z_{12} y Z_{13} son iguales, de modo que se puede considerar las siguientes ecuaciones simplificadas:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= \frac{1}{2} \cdot (2 Z_{12} - Z_{23}) \\ \underline{Z}_2 &= Z_3 = \frac{1}{2} \cdot (Z_{23}) \end{aligned} \quad (6-11)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones planeadas, se procede con las sustituciones para obtener los valores numéricos de \underline{Z}_1 y \underline{Z}_2 :

En primer lugar, se calcula Z_{12} :

$$Z_{12} = \frac{u_{kr12}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT12}^2}{S_{rT12}} = 0.1 \cdot \frac{(132 \text{ kV})^2}{60 \text{ MVA}} = 29.04 \Omega \quad (6-12)$$

La resistencia R_{T12} :

$$\begin{aligned} Z_T^2 &= R_T^2 + X_T^2 \\ 29.04^2 &= R_{T12}^2 + (30 \cdot R_{T12})^2 \\ R_{T12} &= 0.9674 \Omega \end{aligned} \quad (6-13)$$

La reactancia X_{T12} :

$$X_{T12} = \sqrt{Z_{T12}^2 - R_{T12}^2} = \sqrt{29.04^2 - 0.774^2} \cong 29.029 \text{ j } \Omega \quad (6-14)$$

De igual modo, se continua con el cálculo de \underline{Z}_{23} :

$$Z_{23} = \frac{u_{kr23}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT12}^2}{S_{rT12}} = 0.05 \cdot \frac{(132 \text{ kV})^2}{30 \text{ MVA}} = 29.04 \Omega \quad (6-15)$$

El valor de la tensión de cortocircuito u_{kr23} se ha obtenido realizando un cambio de base:

$$\begin{aligned} u_{kr23(\text{Base nueva})} &= \frac{u_{kr23(\text{Base vieja})} \cdot S_{rT(\text{Base nueva})}}{S_{rT(\text{Base vieja})}} \\ u_{kr23(30 \text{ MVA})} &= \frac{0.1 \cdot 30 \text{ MVA}}{60 \text{ MVA}} = 0.05 \text{ p. u.} \end{aligned} \quad (6-16)$$

La resistencia R_{T23} :

$$\begin{aligned} Z_T^2 &= R_T^2 + X_T^2 \\ 29.04^2 &= R_{T23}^2 + (30 \cdot R_{T23})^2 \\ R_{T23} &= 0.9674 \Omega \end{aligned} \quad (6-17)$$

La reactancia X_{T23} :

$$X_{T12} = \sqrt{Z_{T23}^2 - R_{T23}^2} = \sqrt{29.04^2 - 0.774^2} \cong 29.029 \text{ j } \Omega \quad (6-18)$$

Finalmente, la impedancia compleja de \underline{Z}_1 y \underline{Z}_2 son:

$$\underline{Z}_1 = \frac{1}{2} \cdot (2 Z_{12} - Z_{23}) = (0.4837 + j14.515) \Omega$$

$$\underline{Z}_2 = Z_3 = \frac{1}{2} \cdot (Z_{23}) \cdot \frac{1}{t_r^2} = (0.0209 + j0.6299) \Omega$$

Siendo:

t_r : Relación de transformación asignada para la que el cambiador de tomas en carga está en la posición principal

El valor de la impedancia \underline{Z}_1 esta referido al lado de alta tensión del transformador de potencia, mientras que \underline{Z}_2 esta referido al lado de baja tensión.

De igual modo que en el transformador de dos devanados, las impedancias complejas \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 y \underline{Z}_3 obtenidas, se usarán en las simulaciones mediante la herramienta de análisis nodal. Los estudios llevados a cabo con OpenDSS se usa como dato la tensión de cortocircuito del transformador de potencia.

6.1.3 Centros de autotransformación

Los autotransformadores de potencia utilizados en la simulación del sistema de alimentación 2x25 kVca disponen de las siguientes características:

Tabla 6–3. Características de los autotransformadores.

Tensión nominal del secundario en vacío	27,5 kV
Potencia nominal del primario	15 MVA*
Tensión de cortocircuito primario-secundario (ε_{cc})	1.2 % (base 15 MVA)
Relación de impedancias (X/R)	15
*En función de las necesidades de la línea, también es común encontrarse autotransformadores de 10MVA.	

A partir de los datos presentados en la Tabla 6–3 se pueden obtener las impedancias internas de cada autotransformador mediante la siguiente fórmula:

$$X = \varepsilon_{cc} \cdot \frac{U_{N2}^2}{S_N} = 0.012 \cdot \frac{27,5^2 \text{ kV}}{15 \text{ MVA}} = 0,605 \Omega \quad (6-19)$$

Teniendo en cuenta la relación de impedancias se obtiene el valor la resistencia:

$$R = \frac{X}{15} = 0,040 \Omega \quad (6-20)$$

Finalmente, la impedancia compleja del autotransformador es:

$$\underline{Z}_{aut} = 0,040 + 0,605j \Omega$$

6.1.4 Conductores

6.1.4.1 Sistema 1x25kV

Tabla 6–4 Datos de partida de líneas: sistema 1x25kVca

	Impedancia ohmios/km
Catenaria (Zc)	0.1192+0.7522j
Raíl (Zr)	0.1618+0.6709j
Acoplamiento Catenaria-Raíl (Zcr)	0.0574+0.3877j

6.1.4.2 Sistema 2x25kV

Tabla 6–5 Datos de partida de líneas: sistema 2x25kVca

	Impedancia en ohmios/km
Catenaria (Zc)	0.1192+0.7522j
Raíl (Zr)	0.1618+0.6709j
Feeder negativo (Zf)	0.2036+0.8847j
Acoplamiento Catenaria-Raíl (Zcr)	0.0574+0.3877j
Acoplamiento Catenaria-Feeder negativo (Zcf)	0.0568+0.3953j
Acoplamiento Raíl-Feeder negativo (Zrf)	0.0571+0.3410j

6.2 Equipo en el que se ha realizado la simulación

Software:

- Sistema operativo: Windows 10
- Interfaz gráfica: PyCharm
- Lenguaje de programación: Python

Hardware: La simulación se ha realizado con un equipo con las siguientes características

- Memoria RAM: 8GB
- Procesador: Intel Core i5-7200U 2.71GHz

6.3 Simulación del caso práctico: Red ferroviaria 1x25

6.3.1 Subestación eléctrica de tracción en vacío

En primer lugar, se procede a realizar la simulación mediante la segunda herramienta de análisis (OpenDSS) del sistema de alimentación 1x25 kV con la SET en vacío. Es decir; no hay ningún tramo de línea ferroviaria conectado a ella. Con esta disposición, se obtendrían los valores máximos de las corrientes de cortocircuito. Los cálculos teóricos se han realizado en el subcapítulo 2.8 Cálculo de corrientes de cortocircuito.

6.3.1.1 Cortocircuito a la entrada de la SET

Si consideramos que la falta se da lugar en la propia la red de transporte de energía, justamente antes del punto de conexión con la SET, el cortocircuito podría ser de dos tipos: trifásico equilibrado o cortocircuito bifásico sin conexión a tierra. Haciendo la simulación teniendo estas dos casuísticas en cuenta, se obtienen los siguientes resultados mostrados en la siguiente tabla:

Tensión en los nodos 1, 2, 3, 4 y 5. Puntos de conexión de la SET con la red y de la red de tracción con la SET.					Corriente de falta obtenida	
En (p.u.)			En V		En kA	
1	2	3	4	5	I''_{k3}	I''_{k2}
En ausencia de falta						
0.999	0.999	1.000	24999.998	0.0012	-	
Después de la falta						
0.5000	0.499	1.000	0.573	2.7561e-08	34.990	30,302

Los nodos 1, 2 y 3 representan los nodos de conexión disponibles en la red de alimentación. Considerando el tipo de conexión V usado para la simulación, la SET se conecta a la primera y segunda fase de la red, que corresponden con los nodos 1 y 2.

Los nodos 4 y 5 corresponden a las salidas del transformador de potencia al cual se enganchará el resto de sistema de tracción.

Si comparamos los valores de corrientes de cortocircuito con los obtenidos mediante cálculos numéricos en las expresiones (2-21) y (2-22), se puede ver que los resultados son idénticos.

6.3.1.2 Cortocircuito a la salida de la SET

Del mismo modo que en el punto anterior, se procedió a simular la falta a la salida de la SET. Para este tipo de

sistema 1x25 kV el único tipo de cortocircuito que se puede dar en este punto es el Fase-Tierra, los valores obtenidos son los siguientes.

Tensión en los nodos 1, 2, 3, 4 y 5. Puntos de conexión de la SET con la red y de la red de tracción con la SET.					Corriente de falta obtenida
En (p.u.)			En V		En kA
1	2	3	4	5	I''_{k1}
En ausencia de falta					
0.999	0.999	1.000	24999.998	0.0012	-
Después de la falta					
0.943	0.955	1.000	1.1169	5.364e-08	11.169

El valor de 11.169 kA representa la intensidad de cortocircuito Fase-Tierra máxima que se puede alcanzar cuando un cortocircuito se produce aguas abajo de la SET. Este valor ha sido obtenido considerando el sistema de alimentación 1x25 kV con sus características y de la red de alimentación ya mencionadas.

Si comparamos este valor con el obtenido mediante el cálculo numérico nos encontramos ante un error cometido del:

$$error (\%) = \frac{abs (11.169 - 11.566)}{11.169} \cdot 100 = 3.55\%$$

6.3.2 Subestación eléctrica de tracción en carga

En la Figura 6-1 se han representado las variables de interés sobre la red de tracción 1x25kV de la cual se realizará el análisis de faltas, y cuyas características se han presentado en el primer subcapítulo de este capítulo de aplicación a casos prácticos de las herramientas de análisis desarrolladas.

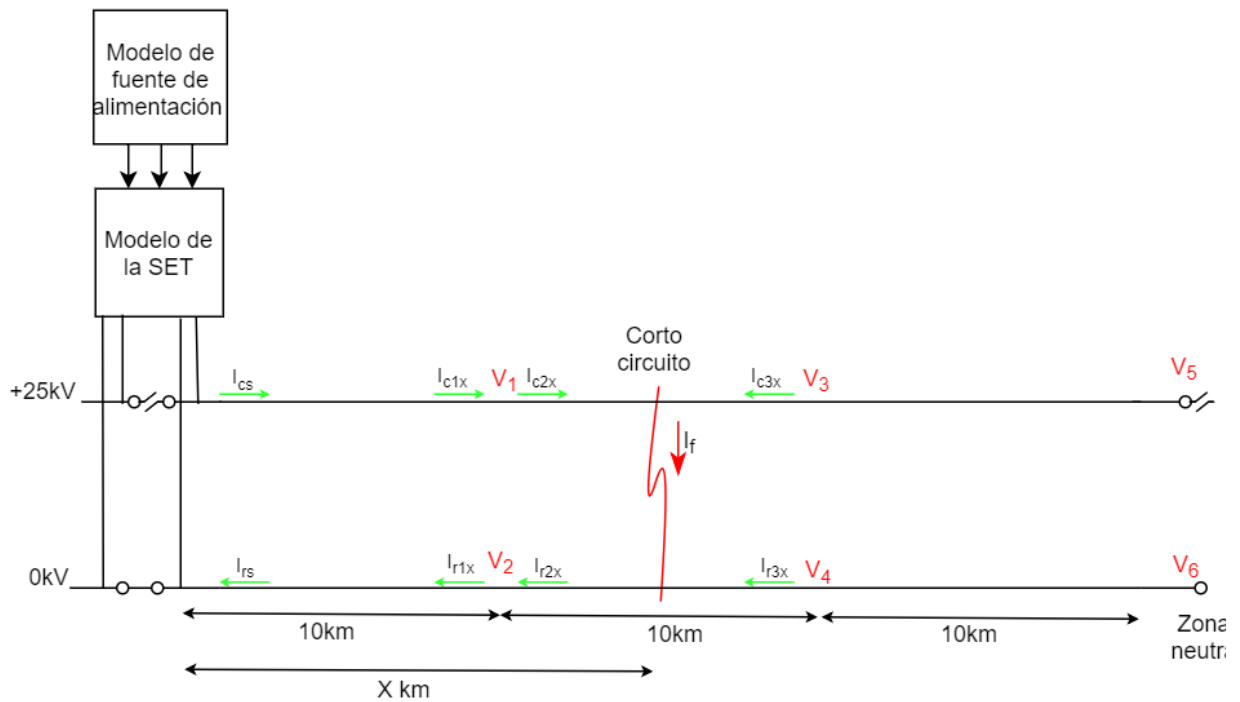


Figura 6-1. Esquema eléctrico del sistema 1x25 kV: caso práctico.

6.3.2.1 Evolución de la corriente por catenaria y raíl

Teniendo en cuenta la representación de nodos y corrientes mostradas en la figura anterior, se muestran en primer lugar la distribución de corrientes por la catenaria sobre los diferentes tramos en los cuales se ha dividido la red. Estos valores se han obtenido introduciendo la falta a lo largo de todos los puntos de la vía, hasta alcanzar la longitud máxima de la red.

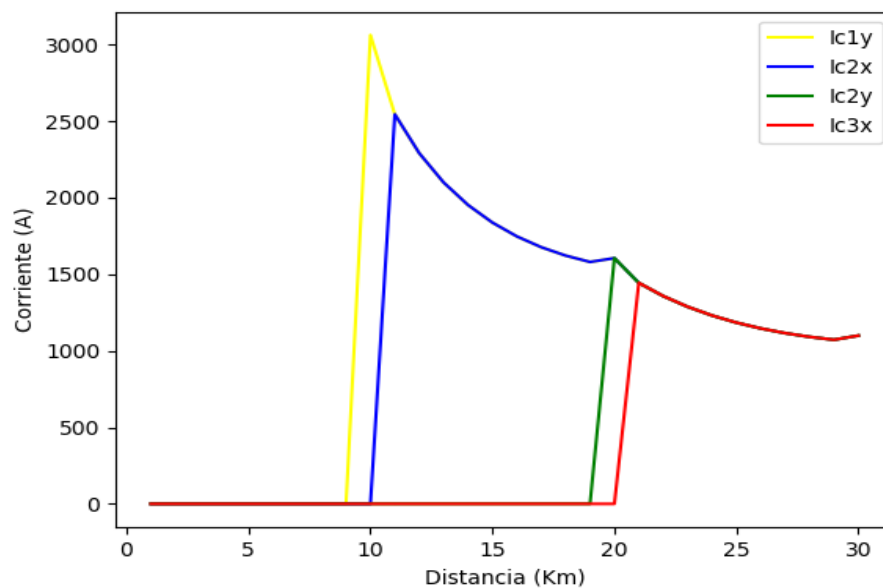


Figura 6-2. Corrientes de falta por catenaria y raíl en el sistema 1x25kVca del caso práctico, mediante análisis matricial.

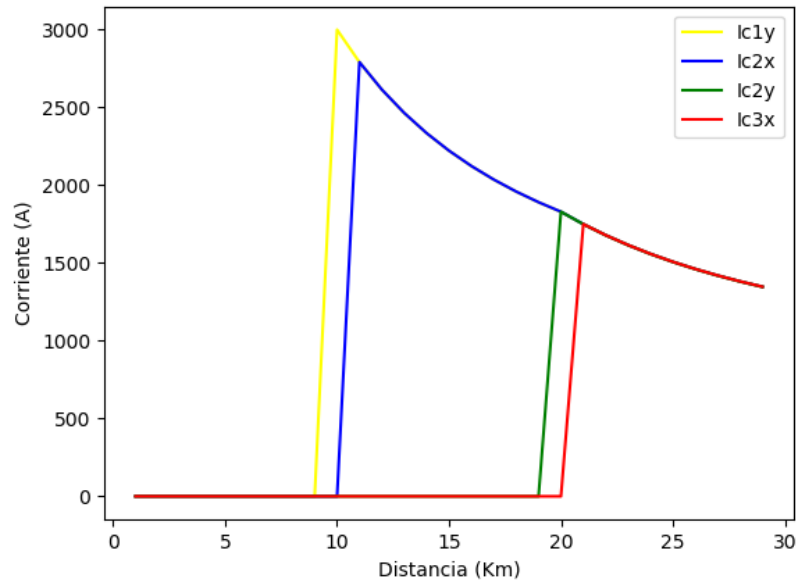


Figura 6-3. Corrientes de falta por catenaria y rail en el sistema 1x25kVca del caso práctico, mediante OpenDSS.

Como se puede observar, no hay circulación de corrientes por los tramos sucesivos al tramo en el cual se produce la falta, es decir, la corriente que circula por la catenaria en el segundo tramo, por ejemplo, I_{c2x} es casi nula mientras que la falta se esté produciendo en el primer tramo. Esta corriente deja de ser cero y obtendrá su valor máximo cuando el cortocircuito se da lugar en las bornas del segundo tramo. A partir de entonces, su valor irá decreciendo a medida que el punto de falta se va alejando.

6.3.2.2 Evolución de la tensión en los nodos

Lo contrario ocurre con la tendencia de las tensiones en los nodos V1, V3, V5 y V7. A medida que la falta se va alejando de la subestación eléctrica de tracción, la tensión en los nodos va creciendo debido a que la longitud total de la red que debe alimentar el sistema de tracción es mayor.

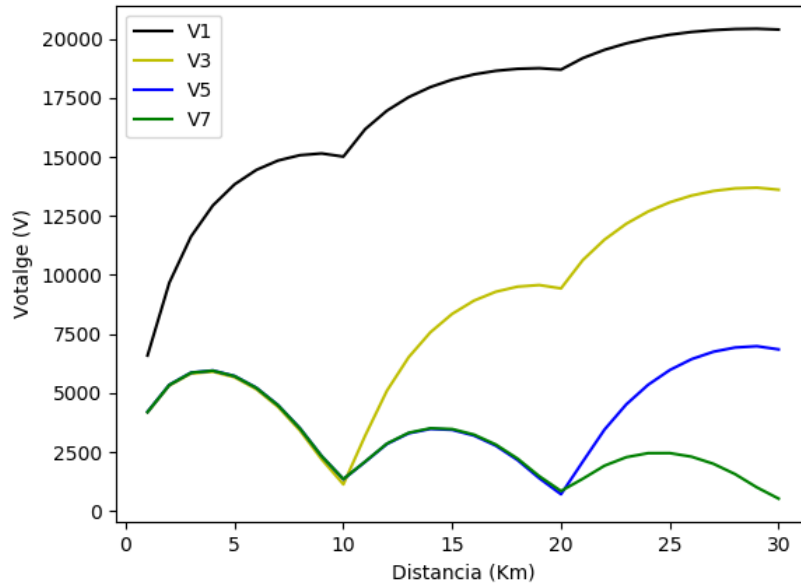


Figura 6-4. Tensiones en los nodos en el sistema 1x25kVca del caso práctico, mediante análisis matricial.

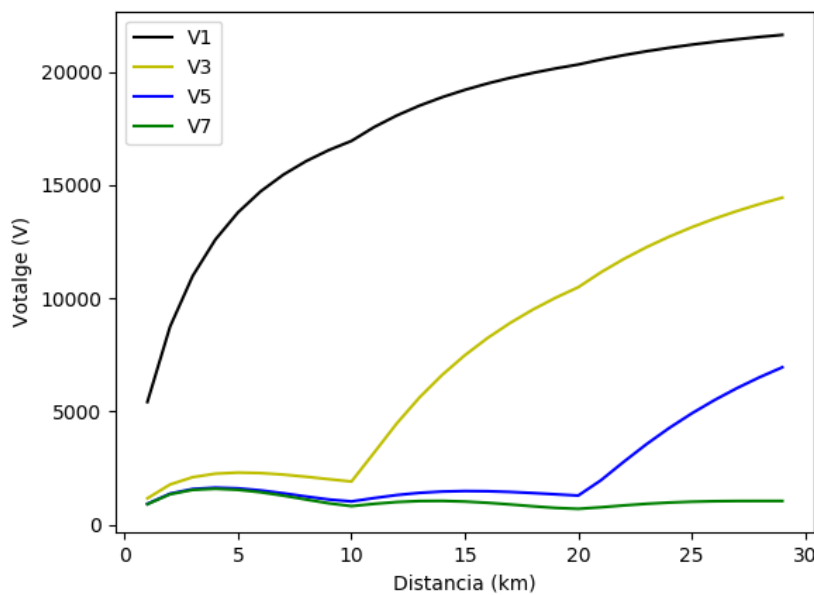


Figura 6-5. Tensiones en los nodos en el sistema 1x25kVca del caso práctico, mediante OpenDSS.

6.3.2.3 Evolución de la corriente de falta

Con respecto a la corriente de falta, los valores máximos se alcanzan cuando el cortocircuito se produce en las bornas de la subestación eléctrica. A medida que la falta se va alejando del punto de alimentación, los valores van decreciendo.

Debido a la ausencia de los autotransformadores, la corriente que circula por la catenaria y la corriente de falta son prácticamente del mismo orden, algo que no ocurre en el otro sistema de alimentación, como se verá más adelante.

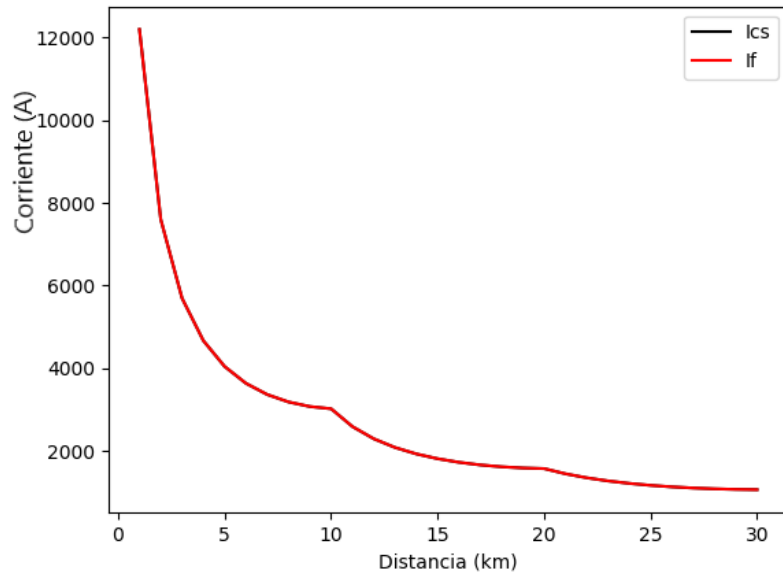


Figura 6-6. Distribución de corrientes de falta obtenidas en el sistema 1x25kVca del caso práctico, mediante análisis nodal.

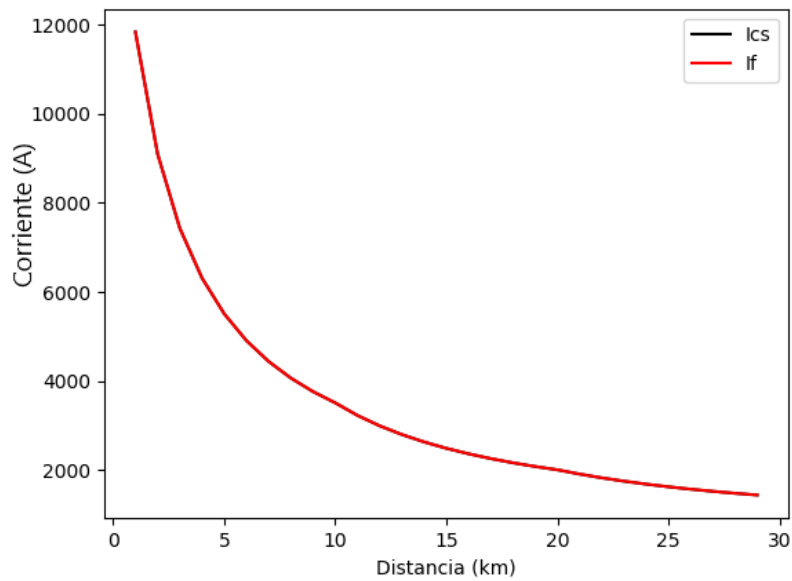


Figura 6-7. Evolución de corrientes de falta obtenidas en el sistema 1x25kVca del caso práctico, mediante OpenDSS.

6.4 Simulación del caso práctico: Red ferroviaria 2x25

6.4.1 Subestación eléctrica de tracción en vacío

De igual modo, se procede a realizar la simulación mediante la segunda herramienta de análisis (OpenDSS) del sistema de alimentación 2x25 kV con la SET en vacío para obtener las corrientes de cortocircuito máximas, por ser este el caso más desfavorable.

6.4.1.1 Cortocircuito a la entrada de la SET

Tensión en los nodos 1, 2, 3, 4, 5 y 6. Puntos de conexión de la SET con la red y de la red de tracción con la SET.						Corriente de falta obtenida	
En (p.u.).			En V			En kA	
1	2	3	4	5	6	I''_{k3}	I''_{k2}
En ausencia de falta							
0.999	0.999	1.000	24999.996	0.0024	24999.989	-	
Después de la falta							
0.500	0.499	1.000	0.573	5.512e-8	0.5739	34.990	30,302

Los nodos 1, 2 y 3 son los puntos de conexión disponibles en la red de alimentación. La SET se conecta a la primera y segunda fase de la red, que se corresponden con los nodos 1 y 2.

Los nodos 4, 5 y 6 representan los puntos de conexión del feeder negativo, cable de tierra y feeder negativo a la subestación eléctrica de tracción.

Como era de esperar, las corrientes de cortocircuito trifásica y bifásica son las mismas que las obtenidas en la simulación del sistema 1x25 kVca con la SET en vacío. Esto es debido a que las condiciones aguas arriba no han cambiado.

6.4.1.2 Cortocircuito a la salida de la SET

Tensión en los nodos 1, 2, 3, 4, 5 y 6. Puntos de conexión de la SET con la red y de la red de tracción con la SET.						Corriente de falta obtenida
En (p.u.).			En V			En kA
1	2	3	4	5	6	I''_{k1}
En ausencia de falta						
0.999	0.999	1.000	24999.996	0.0024	24999.989	-
Después de la falta						
0.894	0.916	1.000	2.091	0.0010	5461.470	20,904

A la vista de los resultados, se puede observar que la tensión del feeder negativo no tiende a anularse de la misma manera que la tensión de la catenaria, la cual ha sido cortocircuitada con tierra.

6.4.2 Subestación eléctrica de tracción en carga

En la siguiente figura se representan las variables de interés sobre la red de tracción 2x15kV en la cual se va a realizar el análisis de falta. El cortocircuito mostrado es uno genérico: las simulaciones se han obtenido considerando que la falta se produce a lo largo de toda la red.

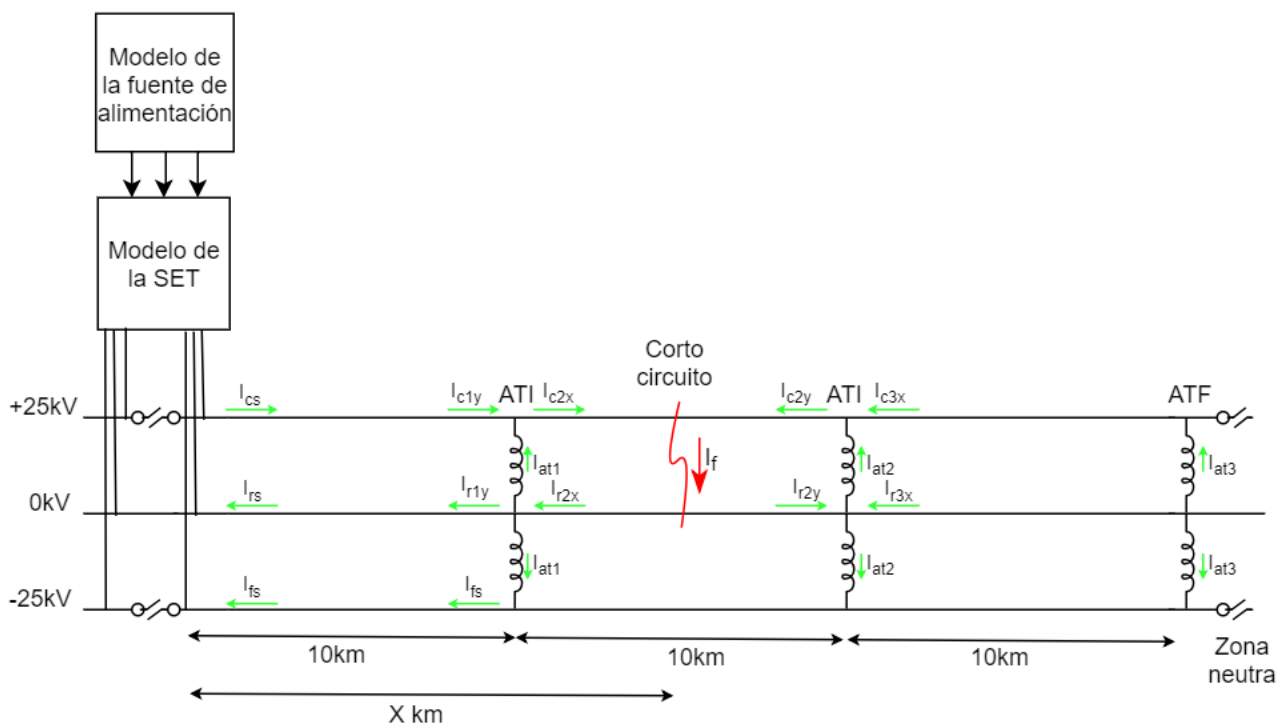


Figura 6-8. Esquema eléctrico del sistema 2x25 kV: caso práctico.

6.4.2.1 Evolución de la corriente por los centros de autotransformación

En primer lugar, se muestra la distribución de corrientes en los tres autotransformadores instalados a lo largo de la red. La corriente que circula por cada uno viene caracterizada por la posición en la cual se produce la falta. Por ejemplo, cuando la falta se encuentra dentro del primer tramo, la corriente que circula por los autotransformadores 2 y 3 es casi nula. Esto es debido a que el comportamiento del primer autotransformador es casi ideal, redirigiendo toda la corriente de cortocircuito por los raíles a la catenaria (feeder positivo y negativo).

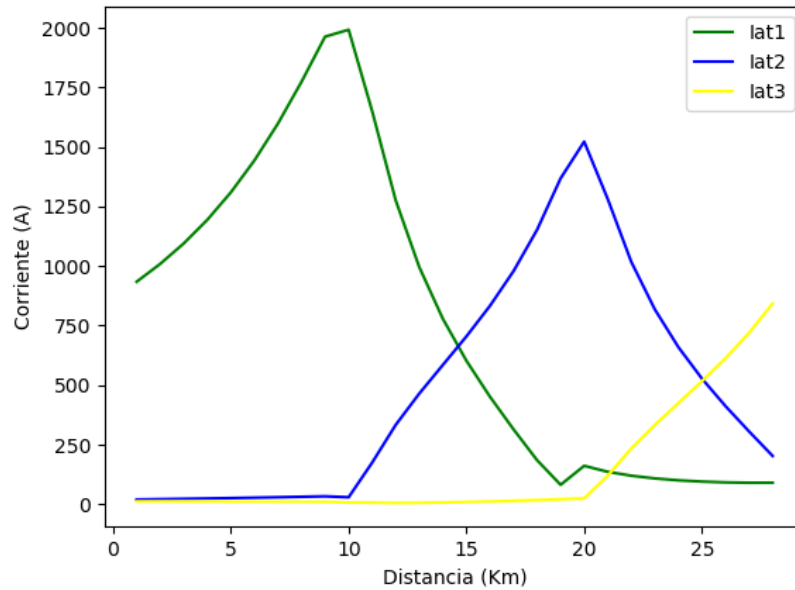


Figura 6-9. Evolución de las corrientes en los autotransformadores en el sistema 2x25kVca del caso práctico, mediante análisis matricial.

Los resultados mostrados en la figura anterior obtenidos mediante análisis matricial y los de la figura siguiente obtenidos mediante simulación en OpenDSS son prácticamente idénticos.

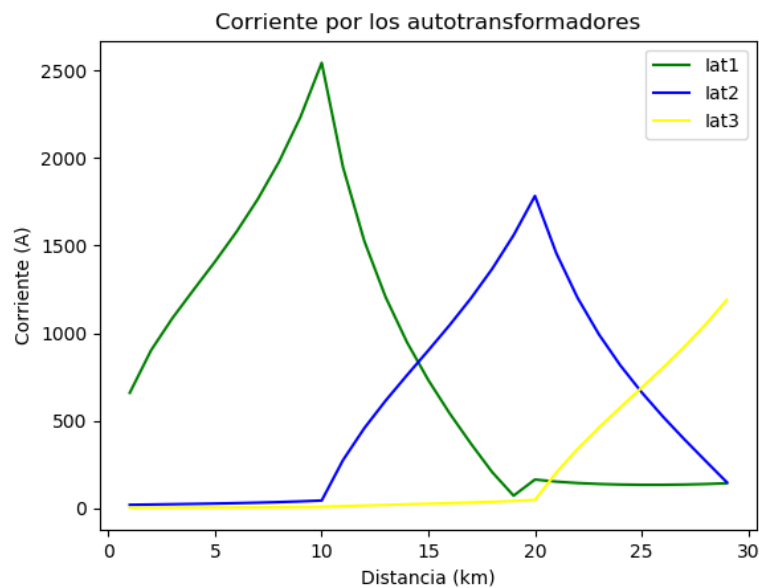


Figura 6-10. Evolución de las corrientes en los autotransformadores en el sistema 2x25kVca del caso práctico, mediante OpenDSS.

6.4.2.2 Evolución de la corriente por la catenaria

A continuación, se representan las corrientes que circulan por el feeder positivo en los tramos 2 y 3 de la red. Como era de esperar, mientras que la falta se produzca en el primer tramo, no debería circular corriente por los tramos sucesivos como consecuencia del comportamiento de los autotransformadores.

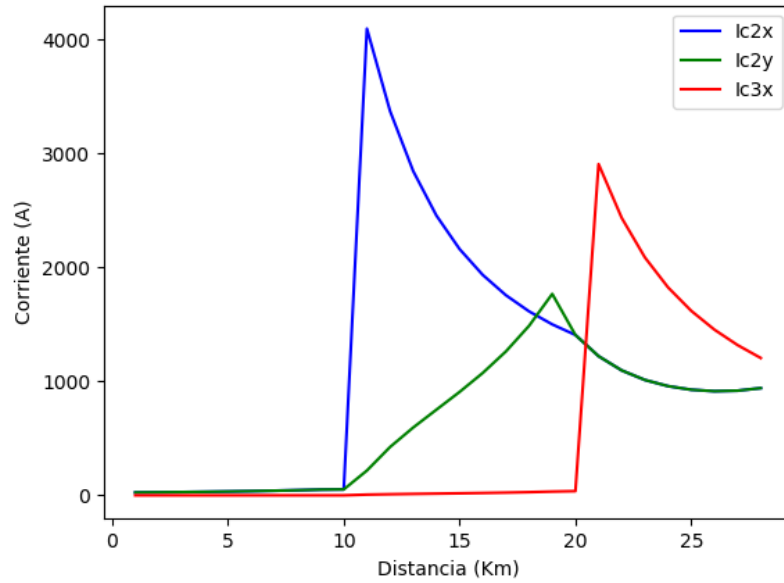


Figura 6-11. Evolución de las corrientes por la catenaria obtenidas en el sistema 2x25kVca del caso práctico, mediante análisis matricial.

Del mismo modo, los resultados obtenidos mediante la segunda herramienta son similares.

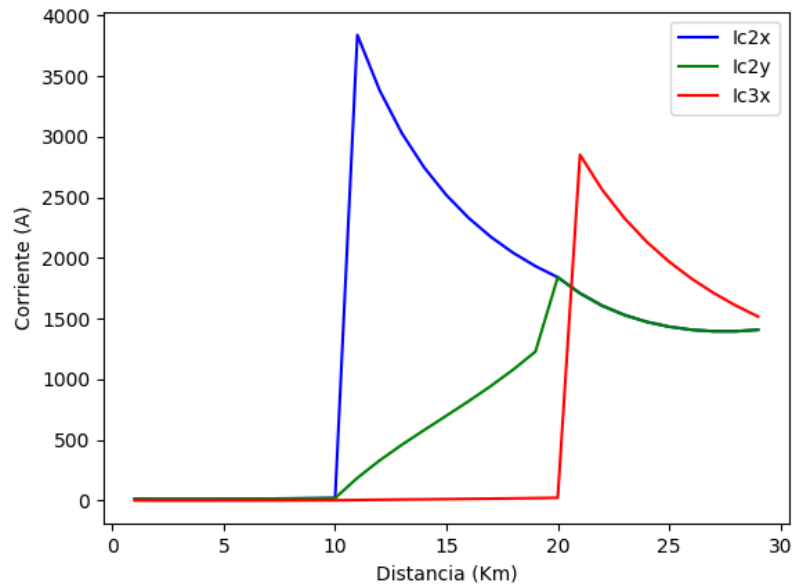


Figura 6-12. Evolución de las corrientes por la catenaria obtenidas en el sistema 2x25kVca del caso práctico, mediante OpenDSS.

6.4.2.3 Evolución de la corriente por el rail

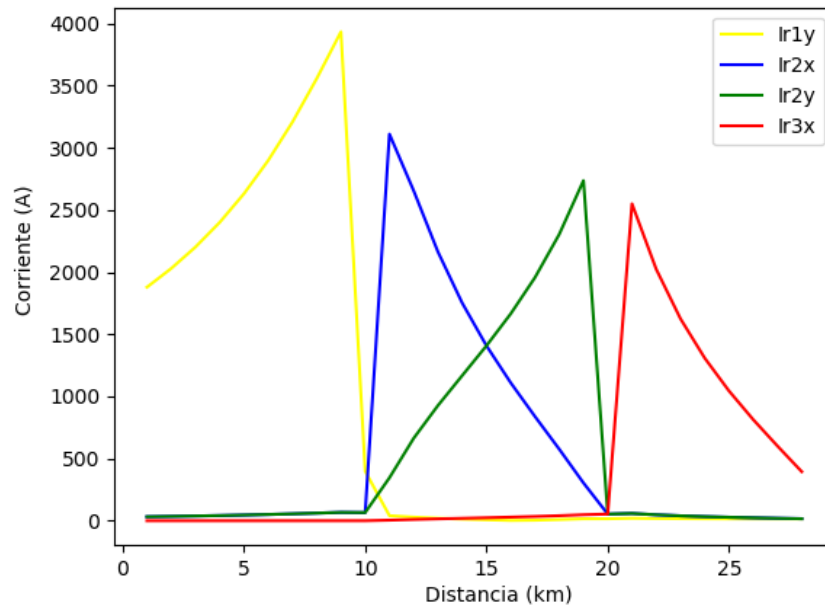


Figura 6-13. Evolución de las corrientes por el rail obtenidas en el sistema 2x25kVca del caso práctico, mediante análisis nodal.

6.4.2.4 Evolución de la tensión en los nodos

Las tensiones en los nodos definidos a lo largo de la catenaria Figura 6-8 se muestran a continuación.

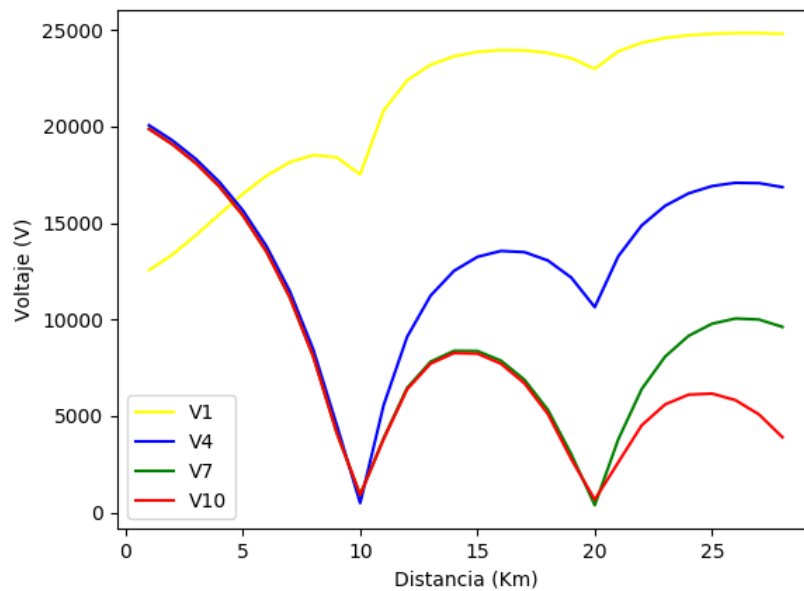


Figura 6-14. Tensiones en los nodos en el sistema 2x25kVca del caso práctico, mediante análisis nodal

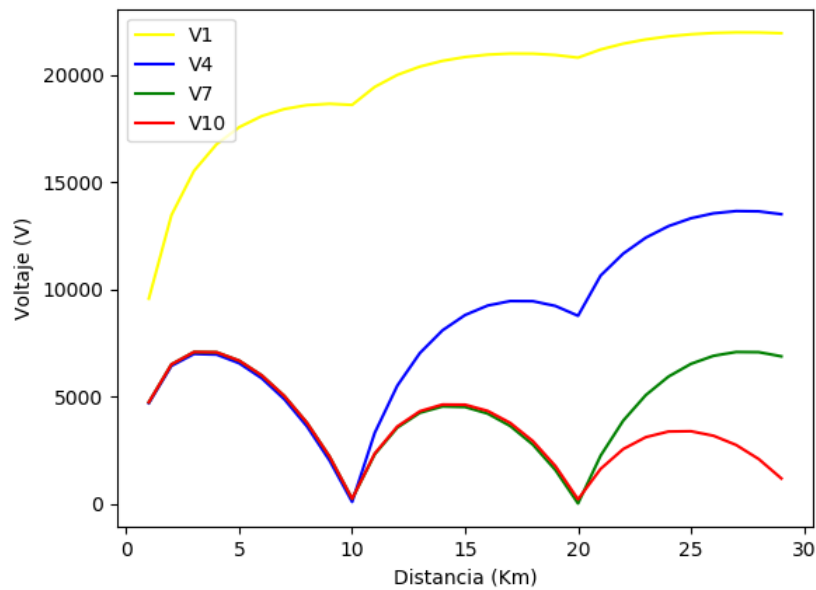


Figura 6-15. Tensiones en los nodos en el sistema 2x25kVca del caso práctico, mediante OpenDSS.

A medida de que la falta se aleja de la subestación eléctrica de alimentación, las tensiones en los nodos tienden a alcanzar la tensión nominal de suministro. Como se puede observar, la tensión en las bornas del transformador de potencia, representadas con el nodo V1, es prácticamente de 25kV cuando la falta se produce a partir de 25 km desde la subestación eléctrica.

6.4.2.5 Evolución de la corriente de falta

Finalmente, en la Figura 6-15 se muestra la tendencia que siguen las corrientes que circulan por la catenaria, railes, feeder negativo y la intensidad de falta.

Se observa claramente las diferencias entre el sistema 1x25 y el sistema 2x25: en el primero la corriente de falta es siempre menor o igual a la que circula por la catenaria. La presencia de los centros de autotransformación instalados en el segundo sistema, cuyo objetivo principal es redirigir la corriente que circula por los railes a la catenaria y al feeder negativo, hacen que se produzca una recirculación de corrientes dentro del tramo en el cual se da lugar el cortocircuito y, por lo tanto, a que la intensidad que atraviesa el objeto de falta sea mayor que la de la catenaria.

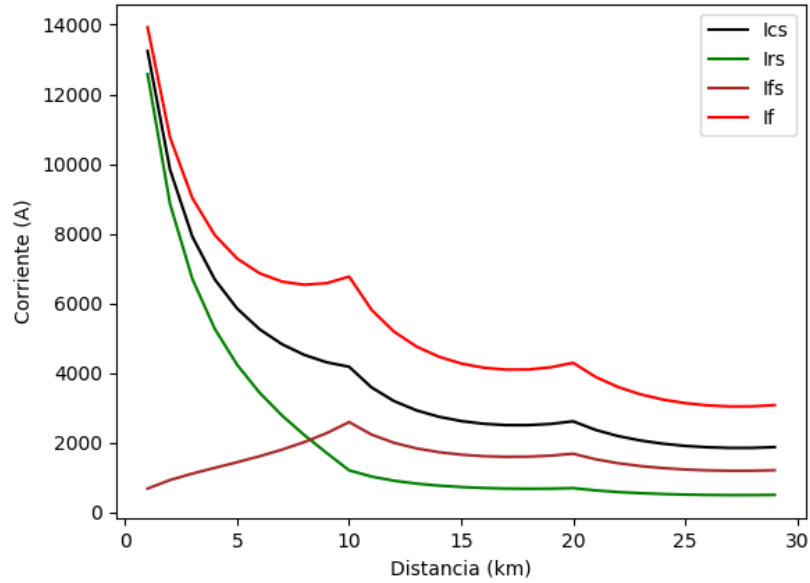


Figura 6-16. Corrientes de cortocircuito en el sistema 2x25kVca del caso práctico, mediante OpenDSS.

6.4.3 Cortocircuito bajo la presencia de un material móvil

A continuación, con objeto de estudiar el efecto de la presencia de una locomotora sobre las corrientes de falta, se procede a realizar la simulación de la red de alimentación 2x25 kVca bajo cortocircuito. El tren considerado tiene una potencia de 8 MW y está situado a una distancia de 15 desde el origen de la SET.

Del mismo modo que los demás apartados, la falta se simula a lo largo de todos los puntos de la red hasta alcanzar la longitud máxima $X=L_{max}$. Los resultados obtenidos son los siguientes.

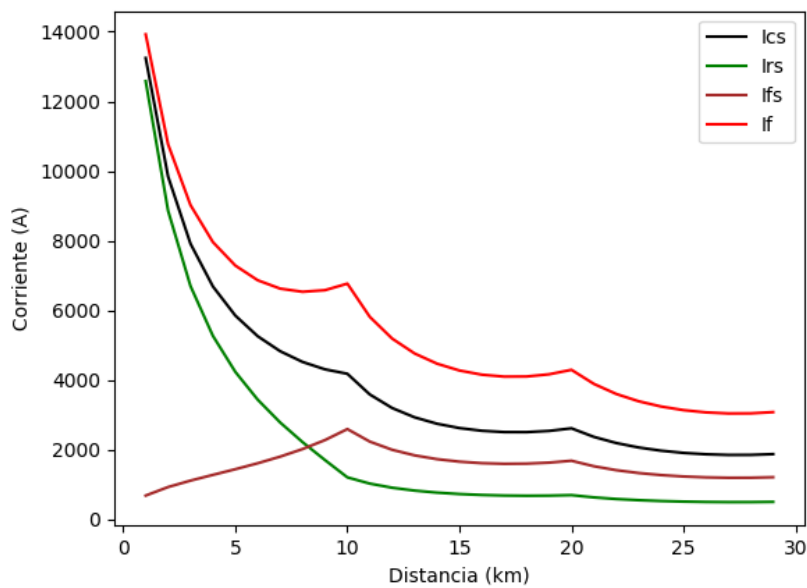


Figura 6-17. Corrientes de cortocircuito en el sistema 2x25kVca del caso práctico con tren en el segundo tramo, mediante OpenDSS.

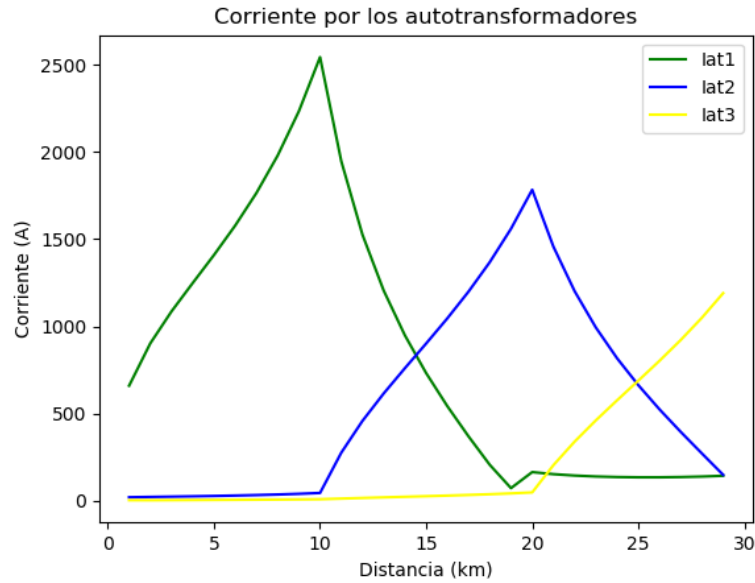


Figura 6-18. Evolución de las corrientes en los autotransformadores en el sistema 2x25kVca del caso práctico con tren en el segundo, mediante OpenDSS.

A la luz de la Figura 6-17 y Figura 6-18, se puede observar que tanto las corrientes de cortocircuito por catenaria, feeder negativo y rail como las que circulan por los autotransformadores, siguen la misma tendencia a pesar de la presencia de un material rodante en la red en el segundo tramo.

En otras simulaciones, se ha aumentado el número de trenes y la posición de los mismos (primer tramo, segundo tramo o tercer tramo), del mismo modo, los resultados obtenidos son prácticamente los mismo que se obtienen en ausencia de locomotoras. De este modo, se puede afirmar que la evolución de las corrientes de cortocircuito es independientes de la presencia o no de material móvil lo largo de la vía.

7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

A continuación, en este último capítulo y antes dar por acabada esta obra, se procede a señalar las conclusiones obtenidas. Además, se indicarán varias líneas de investigación que pueden ser de gran interés en el caso de continuar con el trabajo desarrollado, ya sea para su ampliación o simplemente la mejora del mismo.

7.1 Conclusiones

A lo largo de este proyecto, se han desarrollado dos programas de análisis de cortocircuito: el primero utilizando la metodología de la matriz de admitancias en cadena para los modelos propuestos; y el segundo mediante el software de simulación OpenDSS. Dos ejemplos de sistemas de tracción ferroviaria 1x25kVca y 2x25kVca han sido usados como casos prácticos para demostrar la eficacia de las herramientas implementadas.

Después de aplicar las dos herramientas a los casos prácticos y obtener los valores de todas las variables que se ven alteradas a consecuencia de la aparición de la falta en el sistema de alimentación ferroviaria, se han comparado las soluciones con los resultados experimentales obtenidos a través de otras metodologías [4], [17], verificando así la eficacia de las herramientas y la validez de la solución.

La idea de implementar dos metodologías de estudio diferentes entre sí, con objeto de poder comparar los resultados y medir la fiabilidad de los mismos, ha supuesto un aumento de considerables dimensiones en la carga total de trabajo, pero ha servido de gran ayuda para obtener un buen conocimiento cualitativo e incluso intuitivo de cómo se ve influenciado el fenómeno por los cambios en las variables físicas y eléctricas.

El planteamiento y la resolución del circuito equivalente de la red de distribución se podría realizar de diversas maneras. Sin embargo, se ha optado por el método del voltaje en los nodos para obtener el conjunto de ecuaciones bajo las cuales se rige el circuito por diversas razones, entre ellas, por ser una metodología intuitiva, de la que se puede obtener con sencillez la flecha de las corrientes, desfases y todas las variables de interés tras resolver el circuito. Además, es una herramienta que se puede programar cómodamente con la ayuda de las matrices de admitancias y el número de ecuaciones que es necesario resolver es de menor tamaño en comparación con el método de las corrientes en las mallas.

La selección de OpenDSS como una segunda herramienta de simulación de cortocircuitos ha proporcionado buenos resultados, ya que los modelos de los elementos de la red disponibles en este software permiten analizar sistemas complejos con características reales. Por lo tanto, se han podido modelar todos los componentes con variables complejas del circuito y montar todo el conjunto de sistema de tracción, cualquiera que sea su configuración, con las particularidades deseadas.

Es de obligada necesidad comentar el hecho de que la buena interacción de que dispone esta herramienta de análisis de circuitos con el software de programación Python ha servido de gran ayuda a la hora de realizar el proyecto.

Este proyecto puede proporcionar una gran ayuda para aprender y comprender mejor todo el sistema de tracción ferroviaria, el cual está en auge en la actualidad, ofreciendo la posibilidad de contemplar el planteamiento y

desarrollo de problemas de optimización y dimensionamiento del mismo.

7.2 Líneas futuras

7.2.1 Cálculo de las impedancias de las líneas

A la hora de implementar el modelo equivalente de los sistemas de alimentación considerado para algunos elementos, como por ejemplo los conductores de alimentación, se partió del conocimiento previo de la matriz de impedancias equivalente para realizar el cálculo de corrientes de falta. Desarrollar una metodología de cálculo que, en función del tipo de sistema a instalar, las propiedades físicas de los conductores y las características de la instalación, permita realizar la determinación de la impedancia eléctrica en catenaria y la obtención de su matriz correspondiente con los acoplamientos entre los conductores, daría mayor versatilidad al programa desarrollado en este proyecto. Esto es debido a que en muchas ocasiones se dispone de las características de la línea de alimentación y no de la matriz de impedancias equivalente de los conductores.

7.2.2 Conexión del circuito de alimentación a servicios auxiliares

Realizar la conexión del circuito de alimentación de servicios auxiliares de la red de tracción y estudiar el efecto que tendría sobre los resultados. La mayoría de las redes de tracción ferroviarias disponen de un conjunto de equipos alimentados en baja tensión, consumos englobados dentro del conjunto de servicios auxiliares necesarios para que la instalación funcione correctamente. La alimentación de estos equipos se realiza generalmente a través de un transformador monofásico de potencia conectado en el lado de baja, de 25kV, de la subestación eléctrica de tracción.

7.2.3 Evaluación del impacto en el resto de las instalaciones

Estudiar el impacto producido aguas arriba de la red y en el resto de las instalaciones que comparten el mismo punto de conexión. Entre otras, se podrían precisar metodologías para calcular la magnitud de las perturbaciones inducidas en los circuitos cercanos debido a la alta corriente inducida, evaluar la disminución notable de la tensión producida en el resto de la instalación como resultado de la falta, y valorar las perturbaciones producidas en los circuitos de control y de comunicación.

Las corrientes de cortocircuito generan importantes esfuerzos mecánicos sobre las redes de distribución de energía eléctrica. Estas excitaciones que aparecen como consecuencia de las corrientes de falta generalmente se traducen en el movimiento de los cables portadores de corriente a gran velocidad, con su consiguiente "efecto latigazo" y un incremento en las fuerzas mecánicas que estos transmiten a los apoyos que los sustentan (aisladores, herrajes y soportes) con riesgo de su agotamiento o rotura. Por otro lado, debido al excesivo movimiento de los cables, estos podrían superar la distancia mínima de separación entre ellos, por lo que la ionización del aire y las tensiones eléctricas de la red pueden dar lugar al origen de un cortocircuito secundario como consecuencia del cebado del arco eléctrico y el deterioro de los cables. Por lo tanto, es fundamental plantear una relación entre las corrientes de cortocircuito y las respuestas mecánicas. Esto permitirá, además, obtener una correcta precepción la hora del dimensionamiento de los soportes y los podadores.

7.2.4 Extensión de las herramientas al resto de sistemas

Las dos herramientas desarrolladas en este proyecto son aptas únicamente para analizar los dos sistemas de alimentación ferroviaria de alta tensión más usados en la actualidad (1x25kV y 2x25kV). Sin embargo, como bien es sabido, hay otros tipos de sistemas de tracción que están instalados a lo largo de todo el mundo y que no dejan de ser importantes. Sería de gran interés continuar con las herramientas desarrolladas para englobar el

resto de los otros tipos de sistemas de alimentación ferroviaria.

7.2.5 Estudio de faltas mediante el método de Montecarlo

Entre las herramientas de análisis de cortocircuito disponibles en la actualidad se encuentra el método de Montecarlo, una potente metodología de cálculo que está disponible dentro del software de simulación de circuitos eléctricos OpenDSS, y el mismo que ha sido utilizado para desarrollar la segunda herramienta de análisis implementada en este proyecto. Explorar más en profundidad esta herramienta integrada dentro del software libre OpenDSS y comparar los resultados con los obtenidos en esta obra sería de gran interés.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2–1 Máximo nivel de cortocircuito entre la línea de contacto y el carril. ETI del subsistema de Energía. Directiva 96/48/CE.	6
Tabla 2–2. Efecto sobre las intensidades de cortocircuito.	8
Tabla 2–3 Arquitectura de red de alta tensión. Fuente [13].	11
Tabla 2–4 Datos normalizados de red de alta tensión en sus diferentes niveles. Fuente [13].	11
Tabla 2–5 Tensiones utilizadas en España para la alimentación de SS/EE de tracción. Fuente [2].	12
Tabla 2–6 Características de los transformadores de tracción. Fuente [2].	12
Tabla 2–7. Características más representativas de los autotransformadores	15
Tabla 2–8. Características del transformador de servicios auxiliares. Fuente [2]	15
Tabla 3–1. Comparacion entre los sistemas 1x25 kVca y 2x25 kVca.	40
Tabla 6–1. Datos de partida de la red de transporte.	87
Tabla 6–2. Datos de partida del transformador de potencia.	87
Tabla 6–3. Características de los autotransformadores.	91
Tabla 6–4 Datos de partida de líneas: sistema 1x25kVca	92
Tabla 6–5 Datos de partida de líneas: sistema 2x25kVca	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Expansión de las vías del ferrocarril durante los últimos siglos. Fuente [14].	1
Figura 1-2. Mapa con las vías ferroviarias actuales y futuras en Europa. Fuente [16].	2
Figura 2-1. Representación esquemática de corriente de cortocircuito. Fuente [4].	6
Figura 2-2. Diagrama esquemático de la arquitectura de red de AT. Fuente [13].	10
Figura 2-3. Sistema monofásico con conexión en V.	14
Figura 2-4. Sistema monofásico con conexión tipo Scott.	14
Figura 2-5. Intensidad nominal que circula por el autotransformador.	17
Figura 2-6. Cortocircuito trifásico equilibrado.	18
Figura 2-7. Cortocircuito entre dos fases aislado (sin conexión a tierra).	18
Figura 2-8. Cortocircuito monofásico fase-tierra.	19
Figura 2-9. Intensidad de cortocircuito en el periodo subtransitorio. Fuente [8].	20
Figura 2-10. Configuración de la conexión de servicios auxiliares.	21
Figura 2-11. Circuito equivalente de configuración de la conexión de SSAA.	21
Figura 2-12. Circuito equivalente de configuración de la conexión de SSAA para cálculo de corrientes de falta.	23
Figura 2-13. Circuito Thévenin equivalente para cálculo de falta en las líneas eléctricas de entrada.	24
Figura 2-14. Circuito Thévenin equivalente para cálculo de falta a la salida de SET.	25
Figura 2-15. Ejemplo de circuito eléctrico para análisis nodal.	27
Figura 2-16. Diagrama eléctrico equivalente del ejercicio práctico de ejemplo.	28
Figura 3-1. Principales conductores en un sistema de tracción. Fuente [8].	30
Figura 3-2. Ejemplo de Autotransformador Intermedio y Final.	31
Figura 3-3. Sección transversal del sistema de alimentación 2x25 kVca. Fuente [6].	32
Figura 3-4. Estudio comparativo en inversión de sistema alimentado en corriente continua Vs corriente monofásica. Fuente [1].	34
Figura 3-5. Sistema de alimentación 1x25 kVca.	35
Figura 3-6. Esquema eléctrico del sistema de electrificación 1x25 kVca.	36
Figura 3-7. Distribución de corrientes por el sistema 1x25 kV.	37
Figura 3-8. Sistema 1x25 kVca con cable de retorno y AT Booster. Fuente [8].	37
Figura 3-9. Sistema de alimentación 2x25 kV.	38
Figura 3-10. Esquema eléctrico del sistema de electrificación 2x25 kV.	39
Figura 3-11. Distribución de corrientes en el sistema 2x25 kV.	39
Figura 3-12. Esquema eléctrico de alimentación en funcionamiento normal.	41

Figura 3-13. Esquema eléctrico de alimentación en modo degradado N-1.	42
Figura 3-14. Esquema eléctrico de alimentación en modo degradado N-2.	42
Figura 3-15. Esquema eléctrico de alimentación en modo degradado N-3.	43
Figura 4-1. Modelo equivalente completo de una red de tracción tipo 1x25 kV para el análisis de cortocircuito.	45
Figura 4-2. Fuente de alimentación para el sistema 1x25kV.	46
Figura 4-3. Modelo equivalente de la fuente de alimentación: sistema 1x25 kVca.	46
Figura 4-4. Transformador monofásico.	47
Figura 4-5. Modelo de circuito equivalente sin acoplamiento de un transformador monofásico.	47
Figura 4-6. Modelo de línea de dos conductores más tierra.	48
Figura 4-7. Circuito equivalente de catenaria y carriles en una sección de longitud L.	48
Figura 4-8. Ejemplo de falta en el sistema 1x25 kV.	50
Figura 4-9. Ejemplo de falta en el sistema 1x25 kV con modelos equivalentes.	50
Figura 4-10. Modelo equivalente completo de una red de tracción tipo 2x25 kV para el análisis de cortocircuito.	53
Figura 4-11. Modelo equivalente de la fuente de alimentación: Sistema 2x25 kVca.	53
Figura 4-12. SET de tracción: sistema 2x25kV.	54
Figura 4-13. Modelo de circuito equivalente sin acoplamiento de un transformador monofásico con derivación en el lado secundario.	54
Figura 4-14. Modelo equivalente de conexión fase-fase a la red para análisis de faltas.	55
Figura 4-15. Modelo equivalente simplificado de conexión fase-fase a la red para análisis de faltas.	55
Figura 4-16. Modelo equivalente de SET con conexión tipo Scott-T.	56
Figura 4-17. Modelo equivalente simplificado de SET con conexión tipo Scott-T para análisis de faltas.	56
Figura 4-18. Esquema eléctrico del autotransformador.	57
Figura 4-19. Diagrama esquemático para el modelado del AT.	57
Figura 4-20. Circuito equivalente de un autotransformador general libre de acoplamiento.	58
Figura 4-21. Circuito equivalente simplificado de un autotransformador general libre de acoplamiento.	59
Figura 4-22. Red ferroviaria estándar de alimentación 2x25 kVca. Fuente [3]	59
Figura 4-23. Modelo de línea de tres conductores más tierra.	60
Figura 4-24. Impedancias propias y mutuas del hilo de contacto, los raíles y el feeder negativo por unidad de longitud.	60
Figura 4-25. Circuito equivalente sin acoplamiento de hilo de contacto, carriles y feeder negativo en una sección AT con L unidades de longitud.	61
Figura 4-26. Ejemplo de cortocircuito en el sistema 2x25kVca.	62
Figura 4-27. Ejemplo de cortocircuito en el sistema 2x25kVca con modelos equivalentes.	63
Figura 4-28. Diagrama de flujo principal.	66
Figura 4-29. Diagrama de flujo del algoritmo matricial.	68
Figura 5-1. Estructura de trabajo de OpenDSS Fuente [9].	76
Figura 5-2. Ejemplo de la ventana del panel de control para el DSS. Fuente [9].	77

Figura 5-3. Bucle de solución OpenDSS. Fuente [9].	78
Figura 5-4. Modelos equivalente de fuente de alimentación mediante corrientes de compensación usado en OpenDSS.	78
Figura 5-5. Diagrama de flujo de análisis mediante OpenDSS.	81
Figura 5-6. Simulación de los sistemas en OpenDSS.	83
Figura 6-1. Esquema eléctrico del sistema 1x25 kV: caso práctico.	95
Figura 6-2. Corrientes de falta por catenaria y rail en el sistema 1x25kVca del caso práctico, mediante análisis matricial.	95
Figura 6-3. Corrientes de falta por catenaria y rail en el sistema 1x25kVca del caso práctico, mediante OpenDSS.	96
Figura 6-4. Tensiones en los nodos en el sistema 1x25kVca del caso práctico, mediante análisis matricial.	97
Figura 6-5. Tensiones en los nodos en el sistema 1x25kVca del caso práctico, mediante OpenDSS.	97
Figura 6-6. Distribución de corrientes de falta obtenidas en el sistema 1x25kVca del caso práctico, mediante análisis nodal.	98
Figura 6-7. Evolución de corrientes de falta obtenidas en el sistema 1x25kVca del caso práctico, mediante OpenDSS.	98
Figura 6-8. Esquema eléctrico del sistema 2x25 kV: caso práctico.	100
Figura 6-9. Evolución de las corrientes en los autotransformadores en el sistema 2x25kVca del caso práctico, mediante análisis matricial.	101
Figura 6-10. Evolución de las corrientes en los autotransformadores en el sistema 2x25kVca del caso práctico, mediante OpenDSS.	101
Figura 6-11. Evolución de las corrientes por la catenaria obtenidas en el sistema 2x25kVca del caso práctico, mediante análisis matricial.	102
Figura 6-12. Evolución de las corrientes por la catenaria obtenidas en el sistema 2x25kVca del caso práctico, mediante OpenDSS.	102
Figura 6-13. Evolución de las corrientes por el raíl obtenidas en el sistema 2x25kVca del caso práctico, mediante análisis nodal.	103
Figura 6-14. Tensiones en los nodos en el sistema 2x25kVca del caso práctico, mediante análisis nodal	103
Figura 6-15. Tensiones en los nodos en el sistema 2x25kVca del caso práctico, mediante OpenDSS.	104
Figura 6-16. Corrientes de cortocircuito en el sistema 2x25kVca del caso práctico, mediante OpenDSS.	105
Figura 6-17. Corrientes de cortocircuito en el sistema 2x25kVca del caso práctico con tren en el segundo tramo, mediante OpenDSS.	105
Figura 6-18. Evolución de las corrientes en los autotransformadores en el sistema 2x25kVca del caso práctico con tren en el segundo, mediante OpenDSS.	106

REFERENCIAS

- [1] F. J. González Fernández, Ingeniería Ferroviaria, Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2011.
- [2] M. Carmona Suárez y J. Montesinos Ortuño, Sistemas de Alimentación a la Tracción Ferroviaria, Madrid: Formarail, 2013.
- [3] C. Tsai-Hsiang and H. Yen-Feng , "Systematized Short-Circuit Analysis of a 2 x 25 KV Electric Traction Network," *Electric Power Systems Research*, pp. 133-142, 1998.
- [4] R. Nihar S, "Short Circuit in Power System," in *Technical Colloquium Indonesia PLN-ABB*, 2016.
- [5] G. Ferro, Corrientes de Cortocircuito en Sistemas Trifásicos, Universidad Nacional de Mar del Plata, 2015.
- [6] L. Battistelli, D. Proto y M. Pagano, «Steady State and Transient Short Circuit Analysis of 2x25 kV High Speed,» *University of Naples Federico II*, 2018.
- [7] K. T.A. , N. R and N. W, "Impedance Calculations for SEPTA's Rail Power Distribution System," pp. 79-85, 1995.
- [8] J. L. Juan, Diseño de las Subestaciones Eléctricas de Tracción y Centros de Autotransformación Asociados de una Línea Ferroviaria de Alta Velocidad, TFC, Barcelona: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, 2010.
- [9] R. C. Dugan y D. Montenegro, Reference Guide: The Open Distribution System Simulator, Electric Power Research Institute, Inc., 2018.
- [10] F. Almagro Yravedra, Modelo Eléctrico de Alimentación Ferroviaria, TFG, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2016.
- [11] L. G. Guerra Sánchez, Localización Óptima de Generación Distribuida en Sistemas de Distribución Trifásicos con Carga Variable en el Tiempo Utilizando el Método de Monte Carlo, TFM, Barcelona: Universidad de Barcelona, 2012.
- [12] D. Hidalgo Begines, Modelado de Redes de Distribución Usando OpenDSS, TFG, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2013.
- [13] J. M. S. Sanz, «Subestaciones Eléctricas,» de *IES Universidade Laboral (Haciadama-Coruña)*, Coruña, 2012.
- [14] J. C. Moreno-Brid y J. Ros, Development and Growth in the Mexican Economy, Oxford: Oxford University Press, 2009.

- [15] D. E. Rodas Rendón, Y. Steven Restrepo y A. Molina Cabrera, Transformador Monofásico de Distribución y de Potencia, Modelamiento con Taps, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2005.
- [16] «http://ec.europa.eu/budget/financialreport/2011/index_en.html,» [En línea].
- [17] J. I. García Bajo, Desarrollo de un Simulador de Laboratorio del Sistema de Alimentación 2x25kv de Trenes de Alta Velocidad, TFG, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2016.
- [18] M. Pérez González, J. A. González Taboada y A. Fernández Armesto, Efectos Mecánicos en Líneas Eléctricas de Alta Tensión Debidos a las Corrientes de Cortocircuito. Propuesta de un Modelo de Simulación del Fenómeno, Barcelona: Universitat Politecnica de Catalunya, 1996.
- [19] G. González González y E. O. Luna Urias, Análisis de Cortocircuito a Sistemas Eléctricos, Tesis, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2010.
- [20] D. d. D. d. S. D. F. d. S. Eléctrico, «Informe Anual de la Evolución de la Corriente de Cortocircuito en la Red de Transporte del Sistema Eléctrico Peninsular Español en el año 2017,» Red Eléctrica de España, 2018.
- [21] Dirección General de Explotación y Construcción-ADIF, «Transformadores de potencia para subestaciones de tracción. Sistema 2x25 kV,» Comité De Normativa, 2014.

7.3 Código del algoritmo matricial

```
#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf-8 -*-

#Se importan las librerías necesarias
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.linalg as sci
from funciones import *

#Datos de la red
Zs=2.178j

#Impedancia de la subestación eléctrica
Z1=3.097+57.997j
Z2=0.04839+0.9062j

#Impedancia del auto-transformador
Zaut=0.040+0.605j

# Resistencia de puesta a tierra
RPT=4
RPT=0.001+RPT
XPT=0.001j
ZPT=RPT+XPT

#Datos de impedancia por km      ---Datos del articulo---
Zc=0.1192+0.7522j  #ohmios/km
Zr=0.1618+0.6709j
Zf=0.2036+0.8847j
Zcr=0.0574+0.3877j
Zcf=0.0568+0.3953j
Zrf=0.0571+0.3410j

#Impedancia de cortocircuito
Zcc=0.0001

# Definición de los parámetros de entrada
D=10.00          # Longitud máxima de cada celda
Lmax=29         # Longitud máxima entre dos SET
#sistema = "1x25"      # Tipo del sistema del cual se quiere
realizar el estudio
sistema = "2x25"

###-----Se inicializan los vectores iniciales----###
Ic1x=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Ic1y=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Ic2x=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
```

```

Ic2y=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Ic3x=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Ic3y=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)

Irx=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Iry=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Irx2=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Iry2=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Irx3=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Iry3=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)

Ics=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Irs=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Ifs=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
If=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)

Iat1=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Iat2=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Iat3=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)

V1=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V2=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V3=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V4=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V5=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V6=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V7=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V8=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V9=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V10=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V11=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V12=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
VA=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)

Vcc1=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Vcc2=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Vcc3=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)

###-----Fin de definición-----###

###-----Calculo de los valores de
las admitancias-----###

#Se calcula el número de tramos totales a conectar en serie y si es
necesario el número total de centros de auto transformación
N_Tramos=Tramos(Lmax, D)

Ys=1/Zs

Ysa=1/ZSET
Ysb=1/ZSET
Ysc=1/ZSET

Yt=1/Zaut

Yc=1/(D*Zc)
Yr=1/(D*Zr)
Yf=1/(D*Zf)
Ycr=1/(D*Zcr)
Ycf=1/(D*Zcf)

```

```

Yrf=1/(D*Zrf)

YPT=1/ZPT
Ycc=1/Zcc

Iga= 25000*Ysa
Igb= 0
Igc=-25000*Ysc

        ##-----Se realiza el análisis de CC-----##
for i in np.arange(1,Lmax+1): #empieza en i=1 y llega hasta i=Lmax
    X= i+0.0

                                ##-----Cálculo de las admitancias de
las líneas-----##
    #Se calculan las admitancias de las líneas de alimentación (Catenaria,
Tierra o Rail, Feeder negativo) en función de la posición la falta
    Tramo_CC=Pos_CC(X,D)
    for j in np.arange(1, N_Tramos+1):
        # Inicialmente (Yc1_1, Ycr1_1, Yr1_1 ...) son nulas mientras sus
admitancias opuestas (Yc1_2, Ycr1_2, Yr1_2 ...) tienen su valor máximo
        if j!=Tramo_CC: # Se definen todas las admitancias de todos
los tramos menos aquel en el cual se produce la falta
            exec('Yc' + str(j) + '_' + str(1) + '= Yc')
            exec('Yr' + str(j) + '_' + str(1) + '= Yr')
            exec('Ycr' + str(j) + '_' + str(1) + '= Ycr')

            exec('Yc' + str(j) + '_' + str(2) + '= Yc')
            exec('Yr' + str(j) + '_' + str(2) + '= Yr')
            exec('Ycr' + str(j) + '_' + str(2) + '= Ycr')

            if sistema == "2x25":
                exec('Yf' + str(j) + '_' + str(1) + '= Yf')
                exec('Ycf' + str(j) + '_' + str(1) + '= Ycf')
                exec('Yrf' + str(j) + '_' + str(1) + '= Yrf')

                exec('Yf' + str(j) + '_' + str(2) + '= Yf')
                exec('Ycf' + str(j) + '_' + str(2) + '= Ycf')
                exec('Yrf' + str(j) + '_' + str(2) + '= Yrf')

        elif j==Tramo_CC: # Se definen las admitancias del tramo que
está en estudio
            if X!=Tramo_CC*D and X!=Tramo_CC*2*D:# Calculo de las
admitancias fuera de los extremos tramo(evitar división entre cero)
                exec('Yc' + str(j) + '_' + str(1) + '= 1/((X-
'+str(Tramo_CC-1)+'*D)*Zc) ')
                exec('Yc' + str(j) + '_' + str(2) + '=
1/(('+str(Tramo_CC)+'*D-X)*Zc) ')

                exec('Yr' + str(j) + '_' + str(1) + '= 1/((X-
'+str(Tramo_CC-1)+'*D)*Zr) ')
                exec('Yr' + str(j) + '_' + str(2) + '=
1/(('+str(Tramo_CC)+'*D-X)*Zr) ')

                exec('Ycr' + str(j) + '_' + str(1) + '= 1/((X-
'+str(Tramo_CC-1)+'*D)*Zcr) ')
                exec('Ycr' + str(j) + '_' + str(2) + '=
1/(('+str(Tramo_CC)+'*D-X)*Zcr) ')

```

```

        if sistema == "2x25":
            exec('Yf' + str(j) + '_' + str(1) + '= 1/((X-
'+str(Tramo_CC-1)+'*D)*Zf) ')
            exec('Yf' + str(j) + '_' + str(2) + '=
1/(('+str(Tramo_CC)+'*D-X)*Zf) ')

            exec('Ycf' + str(j) + '_' + str(1) + '= 1/((X-
'+str(Tramo_CC-1)+'*D)*Zcf) ')
            exec('Ycf' + str(j) + '_' + str(2) + '=
1/(('+str(Tramo_CC)+'*D-X)*Zcf) ')

            exec('Yrf' + str(j) + '_' + str(1) + '= 1/((X-
'+str(Tramo_CC-1)+'*D)*Zrf) ')
            exec('Yrf' + str(j) + '_' + str(2) + '=
1/(('+str(Tramo_CC)+'*D-X)*Zrf) ')

        elif X==Tramo_CC*D or X==Tramo_CC*2*D:# Cálculo de las
admitancias en los puntos extremos del tramo
            exec('Yc' + str(j) + '_' + str(1) + '= Yc')
            exec('Yc' + str(j) + '_' + str(2) + '= 0')

            exec('Yr' + str(j) + '_' + str(1) + '= Yr')
            exec('Yr' + str(j) + '_' + str(2) + '= 0')

            exec('Ycr' + str(j) + '_' + str(1) + '= Ycr')
            exec('Ycr' + str(j) + '_' + str(2) + '= 0')

        if sistema == "2x25":
            exec('Yf' + str(j) + '_' + str(1) + '= Yf')
            exec('Yf' + str(j) + '_' + str(2) + '= 0')

            exec('Ycf' + str(j) + '_' + str(1) + '= Ycf')
            exec('Ycf' + str(j) + '_' + str(2) + '= 0')

            exec('Yrf' + str(j) + '_' + str(1) + '= Yrf')
            exec('Yrf' + str(j) + '_' + str(2) + '= 0')

        ##-----Construcción de la matriz de
admitancias general del sistema sin tener en cuenta la falta----##

        # Se calcula la dimensión total de la matriz admitancias
        # Se considera que siempre se va a tener conectado como mínimo un auto
transformador
        N=dim(N_Tramos,sistema,X,D)
        Ybus= np.zeros((N,N), dtype=complex) #Matriz de admitancias
        Inode=np.zeros((N,1), dtype=complex)
        if sistema == "1x25":
            Inode[0]=Iga

            # Se define la matriz inicial
            Y0 = np.zeros((2,2), dtype=complex)
            Y0[0,0] = Ysa+Yc1_1
            Y0[0,1] = Ycr1_1
            Y0[1,1] = Ysb+Yr1_1+YPT

        # Se termina de construir la matriz de admitancias en función de
la longitud de la vía y del numero de tramos.

```



```

        k=0 # Variable auxiliar, inicialmente vale 0, ira
incrementando en múltiplos de 1
        n=-1 # Variable auxiliar, inicialmente vale -1, ira
incrementando en múltiplos de 1
        while k <=N_Tramos:
            if k==0:
                exec('Y' + str(k) + '= Y0') # Se asigna la matriz
inicial Y0=Y0
            else:
                if k!=1:# Se corrigen los valores anteriores de la
matriz diagonal añadiendo las admitancias de los nuevos tramos que se
pretende conectar
                    # Para k=1 no se hace porque ya se han
tenido en cuenta en la matriz inicial
                    # Valores anteriores de la matriz diagonal
                    exec('Y' + str(k-1)+str([k+n,k+n]) + '+='
Yc'+str(k)+'_'+str(1))
                    exec('Y' + str(k-1)+str([k+n+1,k+n+1]) + '+='
Yr'+str(k)+'_'+str(1))

                    # Las admitancias de las líneas o elementos
fuera de la diagonal
                    exec('Y' + str(k-1)+str([k+n,k+n+1]) + '+='
Ycr'+str(k)+'_'+str(1))

                # Se define la matriz de admitancias del nuevo tramo
de la vía
                Yn=np.zeros((2,2),dtype=complex)

                # Elementos de la diagonal
                exec('Yn[0][0]= Yc'+str(k)+'_'+str(2))
                exec('Yn[1][1]= YPT+Yr'+str(k)+'_'+str(2))

                # Resto de elementos
                exec('Yn[0][1]= Ycr'+str(k)+'_'+str(2))

                #Se juntan las dos matrices, haciendo la unión del
nuevo tramo de la vía
                exec('Y'+str(k)+'=sci.block_diag('+'Y'+str(k-
1)+'+',Yn'+')')

                #Se añade las nuevas conexiones: Por ejemplo, para
k=1 se tiene:
                exec('Y' + str(k) + str([k+n,k+n+2]) + '= -Yc')
                #Y[1,3]
                exec('Y' + str(k) + str([k+n,k+n+3]) + '= -Ycr')
                #Y[1,4]

                exec('Y' + str(k) + str([k+n+1,k+n+2]) + '= -Ycr')
                #Y[2,3]
                exec('Y' + str(k) + str([k+n+1,k+n+3]) + '= -Yr')
                #Y[2,4]

                n+=1
                #Se realiza la asignación de la matriz de admitancias
                exec ('Y'+'=Y'+str(k))
                k+=1

        if sistema == "2x25":
            Inode[0]=Iga
            Inode[1]=Igb
            Inode[2]=Igc

```

```

# Se define la matriz inicial
Y0 = np.zeros((3,3), dtype=complex)
Y0[0,0] = Ysa+Ycl_1
Y0[0,1] = Ycr1_1
Y0[0,2] = Ycf1_1
Y0[1,1] = Ysb+Yr1_1
Y0[1,2] = Yrf1_1
Y0[2,2] = Ysc+Yf1_1

# Se termina de construir la matriz de admitancias en función de
la longitud de la vía y del numero de tramos.
k=0 # Variable auxiliar, inicialmente vale 0, ira
incrementando en múltiplos de 1
n=-1 # Variable auxiliar, inicialmente vale -1, ira
incrementando en múltiplos de 2
while k <=N_Tramos:
    if k==0:
        exec('Y' + str(k) + '= Y0') # Se asigna la matriz
inicial Y0=Y0
    else:
        if k!=1:# Se corrigen los valores anteriores de la
matriz diagonal añadiendo las admitancias de los nuevos tramos que se
pretende conectar
            # Para k=1 no se hace porque ya se han
tenido en cuenta en la matriz inicial
            # Valores anteriores de la matriz diagonal
            exec('Y' + str(k-1)+str([[k+n,k+n]]) + '+='
Yc'+str(k)+'_'+str(1))
            exec('Y' + str(k-1)+str([[k+n+1,k+n+1]]) + '+='
Yr'+str(k)+'_'+str(1))
            exec('Y' + str(k-1)+str([[k+n+2,k+n+2]]) + '+='
Yf'+str(k)+'_'+str(1))

            # las admitancias de las lineas o elementos fuera de
la diagonal
            exec('Y' + str(k-1)+str([[k+n,k+n+1]]) + '+='
Ycr'+str(k)+'_'+str(1))
            exec('Y' + str(k-1)+str([[k+n,k+n+2]]) + '+='
Ycf'+str(k)+'_'+str(1))
            exec('Y' + str(k-1)+str([[k+n+1,k+n+2]]) + '+='
Yrf'+str(k)+'_'+str(1))

            # Se define la matriz de admitancias del nuevo tramo
de la vía
            Yn=np.zeros((3,3), dtype=complex)

            # Elementos de la diagonal
            exec('Yn[0][0]= Yc'+str(k)+'_'+str(2)+'+Yt')
            exec('Yn[1][1]= Yr'+str(k)+'_'+str(2)+'+4*Yt+YPT')
            exec('Yn[2][2]= Yf'+str(k)+'_'+str(2)+'+Yt')

            # Elementos fuera de la diagonal
            exec('Yn[0][1]= -2*Yt+Ycr'+str(k)+'_'+str(2))
            exec('Yn[0][2]= Yt+Ycf'+str(k)+'_'+str(2))
            exec('Yn[1][2]= -2*Yt+Yrf'+str(k)+'_'+str(2))

            #Se juntan las dos matrices, haciendo la unión del
nuevo tramo de la vía
            exec('Y'+str(k)+'=sci.block_diag('+'Y'+str(k-
1)+'+', Yn+'+')')

```

```

#Se añade las nuevas conexiones: Por ejemplo, para
k=1 se tiene:
#Y[0,4]      exec('Y' + str(k) + str([k+n ,k+n+3]) + '= -Yc')
#Y[0,5]      exec('Y' + str(k) + str([k+n ,k+n+4]) + '= -Ycr')
#Y[0,6]      exec('Y' + str(k) + str([k+n ,k+n+5]) + '= -Ycf')

#Y[1,4]      exec('Y' + str(k) + str([k+n+1,k+n+3]) + '= -Ycr')
#Y[1,5]      exec('Y' + str(k) + str([k+n+1,k+n+4]) + '= -Yr')
#Y[1,6]      exec('Y' + str(k) + str([k+n+1,k+n+5]) + '= -Yrf')

#Y[2,4]      exec('Y' + str(k) + str([k+n+2,k+n+3]) + '= -Ycf')
#Y[2,5]      exec('Y' + str(k) + str([k+n+2,k+n+4]) + '= -Yrf')
#Y[2,6]      exec('Y' + str(k) + str([k+n+2,k+n+5]) + '= -Yf')

      n+=2
#Se realiza la asignación de la matriz de admitancias
exec ('Y'='Y'+str(k))
k+=1

      ##-----Modificación de la matriz de
admitancias en función posición en la cual se produce la falta----##
# Se inicializa la matriz poniendo todos sus valores a cero
Ybus*=0
if sistema=="1x25":
    # Se actualiza la dimensión de la matriz
    if X!=D and X!=2*D and X!=3*D:
        Ybus[:-2, :-2]=Y
    elif X==D or X==2*D or X==3*D:
        Ybus[:, :]=Y

    if 1<=X<=D: #CC se produce en el primer tramo de la vía
        if X!=D:
            # se realiza la desconexión entre los nodos
            Ybus[0,2]=0
            Ybus[0,3]=0
            Ybus[1,2]=0
            Ybus[1,3]=0

            # se realiza la unión de los nodos con el nodo de
falta

            Ybus[0,N-2]==-Yc1_1
            Ybus[0,N-1]==-Ycr1_1
            Ybus[1,N-2]==-Ycr1_1
            Ybus[1,N-1]==-Yr1_1
            Ybus[2,N-2]==-Yc1_2
            Ybus[2,N-1]==-Ycr1_2
            Ybus[3,N-2]==-Ycr1_2
            Ybus[3,N-1]==-Yr1_2

            # se realiza la unión entre los nodos donde se
produce el el cortocircuito
            Ybus[N-2,N-2]=Yc1_1+Yc1_2+Ycc

```

```

        Ybus[N-2,N-1]=Ycr1_1+Ycr1_2-Ycc
        Ybus[N-1,N-1]=Yr1_1+Yr1_2+Ycc
    elif X==D: # Para los puntos extremos no hay que hacer
desconexión
        # se realiza la unión entre los nodos donde se
produce el cortocircuito
        Ybus[2,2]+=Ycc
        Ybus[2,3]+=-Ycc
        Ybus[3,3]+=Ycc

    elif D<X<=2*D:#CC se produce en el segundo tramo de la vía
cuadrante
        if X!=2*D:
            # se realiza la desconexión
            Ybus[2,4]=0
            Ybus[2,5]=0
            Ybus[3,4]=0
            Ybus[3,5]=0

            # se realiza la unión de los nodos con el nodo de
falta
            Ybus[2,N-2]=-Yc2_1
            Ybus[2,N-1]=-Ycr2_1
            Ybus[3,N-2]=-Ycr2_1
            Ybus[3,N-1]=-Yr2_1
            Ybus[4,N-2]=-Yc2_2
            Ybus[4,N-1]=-Ycr2_2
            Ybus[5,N-2]=-Ycr2_2
            Ybus[5,N-1]=-Yr2_2

            # se realiza la unión entre los nodos donde se
produce el el cortocircuito
            Ybus[N-2,N-2]=Yc2_1+Yc2_2+Ycc
            Ybus[N-2,N-1]=Ycr2_1+Ycr2_2-Ycc
            Ybus[N-1,N-1]=Yr2_1+Yr2_2+Ycc
        elif X==2*D:# Para los puntos extremos no hay que hacer
desconexión
            # se realiza la unión entre los nodos donde se
produce el cortocircuito
            Ybus[4,4]+=Ycc
            Ybus[4,5]+=-Ycc
            Ybus[5,5]+=Ycc

    elif 2*D<X<=3*D:
        if X!=3*D:
            # se realiza la desconexión
            Ybus[4,6]=0
            Ybus[4,7]=0
            Ybus[5,6]=0
            Ybus[5,7]=0

            # se realiza la unión de los nodos con el nodo de
falta
            Ybus[4,N-2]=-Yc3_1
            Ybus[4,N-1]=-Ycr3_1
            Ybus[5,N-2]=-Ycr3_1
            Ybus[5,N-1]=-Yr3_1
            Ybus[6,N-2]=-Yc3_2
            Ybus[6,N-1]=-Ycr3_2
            Ybus[7,N-2]=-Ycr3_2
            Ybus[7,N-1]=-Yr3_2

```

```

# se realiza la unión entre los nodos donde se
produce el el cortocircuito
Ybus[N-2,N-2]=Yc3_1+Yc3_2+Ycc
Ybus[N-2,N-1]=Ycr3_1+Ycr3_2-Ycc
Ybus[N-1,N-1]=Yr3_1+Yr3_2+Ycc
elif X==3*D: # Para los puntos extremos no hay que hacer
desconexión

# se realiza la unión entre los nodos donde se
produce el cortocircuito
Ybus[6,6]+=Ycc
Ybus[6,7]+=-Ycc
Ybus[7,7]+=Ycc

if sistema=="2x25":
# Se actualiza la dimensión de la matriz
if X!=D and X!=2*D and X!=3*D:
Ybus[:,-3,:-3]=Y
elif X==D or X==2*D or X==3*D:
Ybus[:,:]=Y

if 0<X<=D: #CC se produce en el primer tramo de la vía
if X!=D:
# se realiza la desconexión
Ybus[0,3]=0
Ybus[0,4]=0
Ybus[0,5]=0
Ybus[1,3]=0
Ybus[1,4]=0
Ybus[1,5]=0
Ybus[2,3]=0
Ybus[2,4]=0
Ybus[2,5]=0

# se realiza la unión de los nodos con el nodo de
falta

Ybus[0,N-3]=-Yc1_1
Ybus[0,N-2]=-Ycr1_1
Ybus[0,N-1]=-Ycf1_1
Ybus[1,N-3]=-Ycr1_1
Ybus[1,N-2]=-Yr1_1
Ybus[1,N-1]=-Yrf1_1
Ybus[2,N-3]=-Ycf1_1
Ybus[2,N-2]=-Yrf1_1
Ybus[2,N-1]=-Yf1_1
Ybus[3,N-3]=-Yc1_2
Ybus[3,N-2]=-Ycr1_2
Ybus[3,N-1]=-Ycf1_2
Ybus[4,N-3]=-Ycr1_2
Ybus[4,N-2]=-Yr1_2
Ybus[4,N-1]=-Yrf1_2
Ybus[5,N-3]=-Ycf1_2
Ybus[5,N-2]=-Yrf1_2
Ybus[5,N-1]=-Yf1_2

# se realiza la unión entre los nodos donde se
produce el el cortocircuito
Ybus[N-3,N-3]=Yc1_1+Yc1_2+Ycc
Ybus[N-3,N-2]=Ycr1_1+Ycr1_2-Ycc
Ybus[N-3,N-1]=Ycf1_1+Ycf1_2
Ybus[N-2,N-2]=Yr1_1+Yr1_2+Ycc
Ybus[N-2,N-1]=Yrf1_1+Yrf1_2
Ybus[N-1,N-1]=Yf1_1+Yf1_2

```

```

        elif X==D: # Para los puntos extremos no hay que hacer
desconexión
                # se realiza la unión entre los nodos donde se
produce el cortocircuito
                Ybus[3,3]+=Ycc
                Ybus[3,4]+=-Ycc
                Ybus[4,4]+=Ycc

        elif D<X<=2*D:#CC se produce en el segundo tramo de la via
cuadrante
                if X!=2*D:
                        # se realiza la desconexión
                        Ybus[3,6]=0
                        Ybus[3,7]=0
                        Ybus[3,8]=0
                        Ybus[4,6]=0
                        Ybus[4,7]=0
                        Ybus[4,8]=0
                        Ybus[5,6]=0
                        Ybus[5,7]=0
                        Ybus[5,8]=0

                                # se realiza la unión de los nodos con el nodo de
falta
                                Ybus[3,N-3]=-Yc2_1
                                Ybus[3,N-2]=-Ycr2_1
                                Ybus[3,N-1]=-Ycf2_1
                                Ybus[4,N-3]=-Ycr2_1
                                Ybus[4,N-2]=-Yr2_1
                                Ybus[4,N-1]=-Yrf2_1
                                Ybus[5,N-3]=-Ycf2_1
                                Ybus[5,N-2]=-Yrf2_1
                                Ybus[5,N-1]=-Yf2_1
                                Ybus[6,N-3]=-Yc2_2
                                Ybus[6,N-2]=-Ycr2_2
                                Ybus[6,N-1]=-Ycf2_2
                                Ybus[7,N-3]=-Ycr2_2
                                Ybus[7,N-2]=-Yr2_2
                                Ybus[7,N-1]=-Yrf2_2
                                Ybus[8,N-3]=-Ycf2_2
                                Ybus[8,N-2]=-Yrf2_2
                                Ybus[8,N-1]=-Yf2_2

                                        # se realiza la unión entre los nodos donde se
produce el el cortocircuito
                                        Ybus[N-3,N-3]=Yc2_1+Yc2_2+Ycc
                                        Ybus[N-3,N-2]=Ycr2_1+Ycr2_2-Ycc
                                        Ybus[N-3,N-1]=Ycf2_1+Ycf2_2
                                        Ybus[N-2,N-2]=Yr2_1+Yr2_2+Ycc
                                        Ybus[N-2,N-1]=Yrf2_1+Yrf2_2
                                        Ybus[N-1,N-1]=Yf2_1+Yf2_2

        elif X==2*D: # Para los puntos extremos no hay que hacer
desconexión
                # se realiza la unión entre los nodos donde se
produce el cortocircuito
                Ybus[6,6]+=Ycc
                Ybus[6,7]+=-Ycc
                Ybus[7,7]+=Ycc

        elif 2*D<X<=3*D:
                if X!=3*D:

```

```

# se realiza la desconexión
Ybus[6,9]=0
Ybus[6,10]=0
Ybus[6,11]=0
Ybus[7,9]=0
Ybus[7,10]=0
Ybus[7,11]=0
Ybus[8,9]=0
Ybus[8,10]=0
Ybus[8,11]=0

# se realiza la unión de los nodos con el nodo de
falta

Ybus[6,N-3]==-Yc3_1
Ybus[6,N-2]==-Ycr3_1
Ybus[6,N-1]==-Ycf3_1
Ybus[7,N-3]==-Ycr3_1
Ybus[7,N-2]==-Yr3_1
Ybus[7,N-1]==-Yrf3_1
Ybus[8,N-3]==-Ycf3_1
Ybus[8,N-2]==-Yrf3_1
Ybus[8,N-1]==-Yf3_1
Ybus[9,N-3]==-Yc3_2
Ybus[9,N-2]==-Ycr3_2
Ybus[9,N-1]==-Ycf3_2
Ybus[10,N-3]==-Ycr3_2
Ybus[10,N-2]==-Yr3_2
Ybus[10,N-1]==-Yrf3_2
Ybus[11,N-3]==-Ycf3_2
Ybus[11,N-2]==-Yrf3_2
Ybus[11,N-1]==-Yf3_2

# se realiza la unión entre los nodos donde se
produce el el cortocircuito
Ybus[N-3,N-3]=Yc3_1+Yc3_2+Ycc
Ybus[N-3,N-2]=Ycr3_1+Ycr3_2-Ycc
Ybus[N-3,N-1]=Ycf3_1+Ycf3_2
Ybus[N-2,N-2]=Yr3_1+Yr3_2+Ycc
Ybus[N-2,N-1]=Yrf3_1+Yrf3_2
Ybus[N-1,N-1]=Yf3_1+Yf3_2

elif X==3*D: # Para los puntos extremos no hay que hacer
desconexión

# se realiza la unión entre los nodos donde se
produce el cortocircuito
Ybus[9,9]==+Ycc
Ybus[9,10]==-Ycc
Ybus[10,10]==+Ycc

# Se hace la construcción de la matriz simétrica
Ybus=symmetrize(Ybus,N)

###-----Resolución del sistema de ecuaciones-----###

V=np.linalg.solve(Ybus, Inode)

```

```

                                ###-----Obtención de los valores a partir del vector
solución----###
    if sistema=="1x25":
        #Valores que son independientes del tramo en cual se va a
        producir el CC
        V1[i]=V[0]
        V2[i]=V[1]
        V3[i]=V[2]
        V4[i]=V[3]
        print abs(V4[i])
        Vcc1[i]=V[N-2]
        Vcc2[i]=V[N-1]

    if N_Tramos>=2:
        V5[i]=V[4]
        V6[i]=V[5]
    if N_Tramos>=3:
        V7[i]=V[6]
        V8[i]=V[7]

    if 1<=X<D:
        Ic1x[i]=(V1[i]-Vcc1[i])*Yc1_1
        Ic1y[i]=(V3[i]-Vcc1[i])*Yc1_2
        Ir1x[i]=(Vcc2[i]-V2[i])*Yr1_1
        Ir1y[i]=(Vcc2[i]-V4[i])*Yr1_2

        If[i]=Ic1x[i]+Ic1y[i]

    if N_Tramos>=2:
        Ic2x[i]=(V3[i]-V5[i])*Yc2_1
        Ic2y[i]=(V5[i]-V3[i])*Yc2_2
        Ir2x[i]=(V4[i]-V6[i])*Yr2_1
        Ir2y[i]=(V6[i]-V4[i])*Yr2_2

    elif N_Tramos>=3:
        Ic3x[i]=(V5[i]-V7[i])*Yc3_1
        Ic3y[i]=(V7[i]-V5[i])*Yc3_2
        Ic3x[i]=(V6[i]-V8[i])*Yr3_1
        Ic3y[i]=(V8[i]-V6[i])*Yr3_2

    elif D<X<2*D:
        Ic1x[i]=(V1[i]-V3[i])*Yc1_1
        Ic1y[i]=(V3[i]-V1[i])*Yc1_2
        Ir1x[i]=(V4[i]-V2[i])*Yr1_1
        Ir1y[i]=(V2[i]-V4[i])*Yr1_2

        Ic2x[i]=(V3[i]-Vcc1[i])*Yc2_1
        Ic2y[i]=(V5[i]-Vcc1[i])*Yc2_2
        Ir2x[i]=(V4[i]-V6[i])*Yr2_1
        Ir2y[i]=(V6[i]-V4[i])*Yr2_2

        If[i]=Ic2x[i]+Ic2y[i]

    if N_Tramos>=3:
        Ic3x[i]=(V5[i]-V7[i])*Yc3_1
        Ic3y[i]=(V7[i]-V5[i])*Yc3_2
        Ir3x[i]=(V6[i]-V8[i])*Yr3_1
        Ir3y[i]=(V8[i]-V6[i])*Yr3_2

```



```

elif 2*D<X<3*D:
    Ic1x[i]=(V1[i]-V3[i])*Yc1_1
    Ic1y[i]=(V3[i]-V1[i])*Yc1_2
    Ir1x[i]=(V4[i]-V2[i])*Yr1_1
    Ir1y[i]=(V2[i]-V4[i])*Yr1_2

    Ic2x[i]=(V3[i]-V5[i])*Yc2_1
    Ic2y[i]=(V5[i]-V3[i])*Yc2_2
    Ir2x[i]=(V4[i]-V6[i])*Yr2_1
    Ir2y[i]=(V6[i]-V4[i])*Yr2_2

    Ic3x[i]=(V5[i]-Vcc1[i])*Yc3_1
    Ic3y[i]=(V7[i]-Vcc1[i])*Yc3_2
    Ir3x[i]=(V6[i]-Vcc2[i])*Yr3_1
    Ir3y[i]=(Vcc2[i]-V8[i])*Yr3_2

    If[i]=Ic3x[i]+Ic3y[i]

elif X==D:
    Vcc1[i]=V3[i]
    Vcc2[i]=V4[i]

    Ic1x[i]=(V1[i]-V3[i])*Yc1_1
    Ic1y[i]=(V3[i]-V1[i])*Yc1_1
    Ir1x[i]=(V4[i]-V2[i])*Yr1_1
    Ir1y[i]=(V2[i]-V4[i])*Yr1_1

    If[i]=Ic1x[i]

    if N_Tramos>=2:
        Ic2x[i]=(V3[i]-V5[i])*Yc2_1
        Ic2y[i]=(V5[i]-V3[i])*Yc2_1
        Ir2x[i]=(V4[i]-V6[i])*Yr2_1
        Ir2y[i]=(V6[i]-V4[i])*Yr2_1

    elif N_Tramos>=3:
        Ic3x[i]=(V5[i]-V7[i])*Yc3_1
        Ic3y[i]=(V7[i]-V5[i])*Yc3_1
        Ir3x[i]=(V5[i]-V7[i])*Yr3_1
        Ir3y[i]=(V7[i]-V5[i])*Yr3_1

elif X==2*D:
    Vcc1[i]=V5[i]
    Vcc2[i]=V6[i]

    Ic1x[i]=(V1[i]-V3[i])*Yc1_1
    Ic1y[i]=(V3[i]-V1[i])*Yc1_1
    Ir1x[i]=(V4[i]-V2[i])*Yr1_1
    Ir1y[i]=(V2[i]-V4[i])*Yr1_1

    Ic2x[i]=(V3[i]-V5[i])*Yc2_1
    Ic2y[i]=(V5[i]-V3[i])*Yc2_1
    Ir2x[i]=(V4[i]-V6[i])*Yr2_1
    Ir2y[i]=(V6[i]-V4[i])*Yr2_1

    If[i]=Ic2x[i]

    if N_Tramos>=3:
        Ic3x[i]=(V5[i]-V7[i])*Yc3_1
        Ic3y[i]=(V7[i]-V5[i])*Yc3_1
        Ir3x[i]=(V5[i]-V7[i])*Yr3_1

```

```

                                Ir3y[i]=(V7[i]-V5[i])*Yr3_1

elif X==3*D:
    Vcc1[i]=V7[i]
    Vcc2[i]=V8[i]

    Ic1x[i]=(V1[i]-V3[i])*Yc1_1
    Ic1y[i]=(V3[i]-V1[i])*Yc1_2
    Ir1x[i]=(V4[i]-V2[i])*Yr1_1
    Ir1y[i]=(V2[i]-V4[i])*Yr1_1

    Ic2x[i]=(V3[i]-V5[i])*Yc2_1
    Ic2y[i]=(V5[i]-V3[i])*Yc2_1
    Ir2x[i]=(V4[i]-V6[i])*Yr2_1
    Ir2y[i]=(V6[i]-V4[i])*Yr2_1

    Ic3x[i]=(V5[i]-V7[i])*Yc3_1
    Ic3y[i]=(V7[i]-V5[i])*Yc3_1
    Ir3x[i]=(V5[i]-V7[i])*Yr3_1
    Ir3y[i]=(V7[i]-V5[i])*Yr3_1

    If[i]=Ic1x[i]

    Ics[i]=Ic1x[i]
    Irs[i]=Ir1x[i]

if sistema=="2x25":

    #Valores que son independientes del tramo en cual se va a
    producir el CC

    V1[i]=V[0]
    V2[i]=V[1]
    V3[i]=V[2]
    V4[i]=V[3]
    V5[i]=V[4]
    V6[i]=V[5]
    Vcc1[i]=V[N-3]
    Vcc2[i]=V[N-2]
    Vcc3[i]=V[N-1]
    Iat1[i]=Yt*(2*V5[i]-V4[i]-V6[i])

    if N_Tramos>=2:
        V7[i]=V[6]
        V8[i]=V[7]
        V9[i]=V[8]
        Iat2[i]=Yt*(2*V8[i]-V7[i]-V9[i])
    if N_Tramos>=3:
        V10[i]=V[9]
        V11[i]=V[10]
        V12[i]=V[11]
        Iat3[i]=Yt*(2*V11[i]-V10[i]-V12[i])
    #Valores que dependen del tramo en cual se va a producir el CC

    if 0<X<D:

        Ic1x[i]=(V1[i]-Vcc1[i])*Yc1_1
        Ic1y[i]=(V4[i]-Vcc1[i])*Yc1_2

```

```

If[i]=Ic1x[i]+Ic1y[i]

Irlx[i]=(Vcc2[i]-V2[i])*Yr1_1
Irly[i]=(Vcc2[i]-V5[i])*Yr1_2
Ifs[i]=(V6[i]-V3[i])*Yf

if N_Tramos>=2:
    Ic2x[i]=(V4[i]-V7[i])*Yc2_1
    Ic2y[i]=(V7[i]-V4[i])*Yc2_2
    Ir2x[i]=(V8[i]-V5[i])*Yr2_1
    Ir2y[i]=(V5[i]-V8[i])*Yr2_2

elif N_Tramos>=3:
    Ic3x[i]=(V7[i]-V10[i])*Yc3_1
    Ic3y[i]=(V10[i]-V7[i])*Yc3_2
    Ir3x[i]=(V8[i]-V11[i])*Yr3_1
    Ir3y[i]=(V10[i]-V8[i])*Yr3_2

elif D<X<2*D:
    Ic1x[i]=(V1[i]-V4[i])*Yc1_1
    Ic1y[i]=(V4[i]-V1[i])*Yc1_2

    Irlx[i]=V5[i]*Yr1_1
    Irly[i]=V5[i]*Yr1_2

    Ifs[i]=(V6[i]-V3[i])*Yf

    Ic2x[i]=(V4[i]-Vcc1[i])*Yc2_1
    Ic2y[i]=(V7[i]-Vcc1[i])*Yc2_2
    If[i]=Ic2x[i]+Ic2y[i]

    Ir2x[i]=(V8[i]-Vcc2[i])*Yr2_1
    Ir2y[i]=(Vcc2[i]-V8[i])*Yr2_2

    if N_Tramos>=3:
        Ic3x[i]=(V7[i]-V10[i])*Yc3_1
        Ic3y[i]=(V10[i]-V7[i])*Yc3_2
        Ir3x[i]=(V8[i]-V11[i])*Yr3_1
        Ir3y[i]=(V10[i]-V8[i])*Yr3_2

elif 2*D<X<3*D:
    Ic1x[i]=(V1[i]-V4[i])*Yc1_1
    Ic1y[i]=(V4[i]-V1[i])*Yc1_2

    Irlx[i]=V5[i]*Yr1_1
    Irly[i]=V5[i]*Yr1_2

    Ifs[i]=(V6[i]-V3[i])*Yf

    Ic2x[i]=(V4[i]-V7[i])*Yc2_1
    Ic2y[i]=(V7[i]-V4[i])*Yc2_2

    Ir2x[i]=(V8[i]-V5[i])*Yr2_1
    Ir2y[i]=(V5[i]-V8[i])*Yr2_2

    Ic3x[i]=(V7[i]-Vcc1[i])*Yc3_1
    Ic3y[i]=(V10[i]-Vcc1[i])*Yc3_2
    If[i]=Ic3x[i]+Ic3y[i]

    Ir3x[i]=(V8[i]-Vcc2[i])*Yr3_1
    Ir3y[i]=(V11[i]-Vcc2[i])*Yr3_2

```

```

elif X==D:

    Ic1x[i]=(V1[i]-Vcc1[i])*Yc1_1
    Ic1y[i]=Ic1x[i]

    Ir1x[i]=(V5[i]-V2[i])*Yr1_1
    Ir1y[i]=Ir1x[i]

    Ifs[i]=(V6[i]-V3[i])*Yf
    if N_Tramos>=2:
        Ic2x[i]=(V4[i]-V7[i])*Yc2_1
        Ic2y[i]=(V7[i]-V4[i])*Yc2_2
        Ir2x[i]=(V8[i]-V5[i])*Yr2_1
        Ir2y[i]=(V5[i]-V8[i])*Yr2_2
    elif N_Tramos>=3:
        Ic3x[i]=(V7[i]-V10[i])*Yc3_1
        Ic3y[i]=(V10[i]-V7[i])*Yc3_2
        Ir3x[i]=(V8[i]-V11[i])*Yr3_1
        Ir3y[i]=(V10[i]-V8[i])*Yr3_2

    If[i]=Ic1x[i]+Ic2x[i]

elif X==2*D:
    Ic1x[i]=(V1[i]-V4[i])*Yc1_1
    Ic1y[i]=(V4[i]-V1[i])*Yc1_2

    Ir1x[i]=V5[i]*Yr1_1
    Ir1y[i]=V5[i]*Yr1_2
    Ifs[i]=(V6[i]-V3[i])*Yf
    Ic2x[i]=(V4[i]-V7[i])*Yc2_1
    Ic2y[i]=Ic2x[i]

    If[i]=Ic2x[i]+Iat2[i]
    If[i]=If[i-1]+5
    Ir2x[i]=(V8[i]-Vcc2[i])*Yr2_1
    Ir2y[i]=Ir2x[i]

    if N_Tramos>=3:
        Ic3x[i]=(V7[i]-V10[i])*Yc3_1
        Ic3y[i]=(V10[i]-V7[i])*Yc3_2
        Ir3x[i]=(V8[i]-V11[i])*Yr3_1
        Ir3y[i]=(V10[i]-V8[i])*Yr3_2

    Ics[i]=Ic1x[i]
    Irs[i]=Ir1x[i]

    ###-----Fin de Bucle main----###

    ###-----Elaboración de las gráficas de los resultados obtenidos
----###

Graficas
(sistema,Lmax,If,Ics,Irs,Ifs,Iat1,Iat2,Iat3,Ic1y,Ic2x,Ic2y,Ic3x,Ir1y,Ir2x,Ir
2y,Ir3x,V1,V2,V3,V4,V5,V6,V7,V8,V9,V10,Vcc1,Vcc2,Vcc3)

```

7.4 Código para la simulación en el software OpenDSS

```
#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf-8 -*-

#Se importan las librerías necesarias
import win32com.client
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.linalg as sci
from math import sqrt
from math import atan
from funciones import *

                                ##----Introducción de datos de partida y
parámetros de simulación---##

D=10.00 # Distancia entre dos centros de auto-transformación
Lmax=29 # Longitud total de la vía de la cual se quiere realizar el estudio
f=60    # Frecuencia del sistema
PTren=10 # Potencia en kW del tren

#Se elige el sistema de estudio
sistema = "2x25"
#sistema = "1x25"

#SET en vacío o en carga
#SETvacío="Si"
SETvacío="No"

#Simulación de tren en la vía
#SimTren="Si"
SimTren="No"

# Impedancia de la SET y de los centros de autotransformación
ZSET=10 #Impedancia del transformador de la subestación
eléctrica--(Solo parte imaginaria)
Zaut=1.2 #Impedancia del auto-transformador

RPT=2 #Resistencia de puesta a tierra
Rcc=0.0001 #Resistencia de cortocircuito

#Se calcula el número de auto transformadores que serán necesario de
conectar
#Se considera que siempre se va a tener conectado como mínimo un auto-
transformador
AT=Tramos(Lmax, D)

# Se obtiene la matriz de impedancias en función del sistema elegido
(Rl,Xl,C1)=impedancia(sistema)

###-----Se inicializan los vectores iniciales----###
Ic1x=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Ic1y=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Ic2x=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Ic2y=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Ic3x=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Ic3y=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
```

```

Irlx=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Irlx=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Ir2x=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Ir2y=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Ir3x=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Ir3y=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)

Ics=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Irs=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Ifs=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
If=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)

Iat1=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Iat2=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Iat3=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)

V0=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V1=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V2=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V3=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V4=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V5=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V6=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V7=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V8=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V9=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V10=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V11=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
V12=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
VA=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)

Vcc1=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Vcc2=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)
Vcc3=np.zeros((Lmax+1,1), dtype=complex)

###-----Fin de definición de variables -----
----###

# Se inicializa la comunicación con la interfaz COM de OPDSS
DSS_StartUp = win32com.client.Dispatch("OpenDSSEngine.DSS")

# Se arranca el programa OpenDSS y se comprobá si hubo algún error en el
arranque
if DSS_StartUp.Start(0) == 0:
    print "DSS failed to start"
else:
    #Se asignan nuevas variables para un mejor acceso
    DSSCircuit = DSS_StartUp.ActiveCircuit
    DSSText = DSS_StartUp.Text
    Solution = DSSCircuit.Solution

if SETvacio=="Si":
    # Se eliminan todos los circuitos anteriores para crear uno nuevo
    DSSText.Command = "clear"

    if sistema == "1x25":
        # 1 Fuente de alimentación
        DSSText.Command = "New object=circuit.C1x25 basekv=132
frequency="+str(f)+ " phases=3 MVASC3=8000"

```

```

        # 2 Transformador de tracción
        DSSText.Command = "New Transformer.TrafoSE Phases=1 Windings=2
XHL="+str(ZSET)
        DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Sourcebus.1.2 kV=132 KVA=30000"
        DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus0.1.2 kV=25 KVA=30000"

        # Al principio de cada tramo se conecta el raíl con tierra
        DSSText.Command="New reactor.0 X=0.001 R="+str(0.001+RPT)+"
bus1=Bus0.2 bus2=Bus0.0 phases=1"

        # Creación y conexión de Fault object para cortocircuitar dos
fases
        DSSText.Command = "New object=Fault.CC1 phases=1 bus1=Sourcebus.1
bus2=Sourcebus.2 R="+str(Rcc)
        DSSText.Command = "New object=Fault.CC2 phases=1 bus1=Sourcebus.2
bus2=Sourcebus.3 R="+str(Rcc)
        DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1 bus1=Bus0.1
bus2=Bus0.2 R="+str(Rcc)

    elif sistema == "2x25":
        # 1 Fuente de alimentación
        DSSText.Command = "New object=circuit.C2x25 basekv=132
frequency="+str(f)+ " phases=3 MVASC3=8000"

        # 2 Transformador de tracción
        DSSText.Command = "New Transformer.TrafoSE Phases=1 Windings=3
XHL="+str(ZSET)
        DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Sourcebus.1.2 kV=132 KVA=60000"
        DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus0.1.3 kV=25 KVA=30000"
        DSSText.Command = "more wdg=3 Bus=Bus0.3.2 kV=25 KVA=30000"

        #Al principio de cada celda conectamos el rail a tierra
        DSSText.Command="New reactor.0 X=0.001 R="+str(0.001+RPT)+"
bus1=Bus0.3 bus2=Bus0.0 phases=1"

        # Creación y conexión de Fault object para
cortocircuitar dos fases
        DSSText.Command = "New object=Fault.CC1 phases=1 bus1=Sourcebus.1
bus2=Sourcebus.2 R="+str(Rcc)
        DSSText.Command = "New object=Fault.CC2 phases=1 bus1=Sourcebus.2
bus2=Sourcebus.3 R="+str(Rcc)

        #DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1 bus1=Bus0.1
bus2=Bus0.3 R="+str(Rcc)

        ###-----Solución del circuito---
----###
        # solución y modo de control del sistema
        DSSText.Command = "Set voltagebases=[132 25]"
        DSSText.Command = "Calc voltagebases"
        DSSText.Command = "Set controlmode=snap" #modo de control
        DSSText.Command = "solve"

        print DSSCircuit.AllBusNames
        print DSSCircuit.AllNodeNames
        print DSSCircuit.AllBusVmag
        print DSSCircuit.AllBusVmagPu

        DSSCircuit.SetActiveElement("Fault.CC");

```

```

    If =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[1]**2))
    print If

elif SETvacio=="No":
    for i in np.arange(0,Lmax+1): #empieza en i=1 y llega hasta i=Lmax
        X= i+0.0
        # Se eliminan todos los circuitos anteriores para crear uno nuevo
        DSSText.Command = "clear"

        if sistema == "1x25":
            # 1 Fuente de alimentación
            DSSText.Command = "New object=circuit.C1x25 basekv=132
frequency="+str(f)+ " phases=3 MVASC3=8000"

            # 2 Transformador de tracción
            DSSText.Command = "New Transformer.TrafoSE Phases=1 Windings=2
XHL="+str(ZSET)
            DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Sourcebus.1.2 kV=132
KVA=30000"
            DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus0.1.2 kV=25 KVA=30000"

            # Al principio de cada tramo se conecta el raíl con tierra
            DSSText.Command="New reactor.0 X=0.001 R="+str(0.001+RPT)+"
bus1=Bus0.2 bus2=Bus0.0 phases=1"

            # Modelo de líneas aéreas
            DSSText.Command = "New Linecode.Catenaria nphases=2 units=KM"
#Definimos la impedancia de la catenaria con una matriz triangular 2x2
            DSSText.Command="more Rmatrix=["+str(Rl[0,0])+"|"+str(Rl[0,1])+"
"+str(Rl[1,1])+"]"
            DSSText.Command="more Xmatrix=["+str(Xl[0,0])+"|"+str(Xl[0,1])+"
"+str(Xl[1,1])+"]"
            DSSText.Command="more
Cmatrix=["+str(Cl*10**9)+"|"+str(Cl*10**9)+" "+str(Cl*10**9)+"]"

            # Variable auxiliar para indicar el tipo de conexión entre buses
            conbus='.1.2'

            if 0<=X<=D and AT==3:
                if X!=0 and X!=D:
                    # 3_1 Creación y conexión de línea 1_1
                    DSSText.Command = "New line.Line1_1
Bus1=Bus0"+str(conbus)+" Bus2=BusF"+str(conbus)+" length="+str(X)+"
linecode=Catenaria"

                    # 3_2 Creación y conexión de línea 1_2
                    DSSText.Command = "New line.Line1_2
Bus1=BusF"+str(conbus)+" Bus2=Bus1"+str(conbus)+" length="+str(D-X)+"
linecode=Catenaria"

                    # 4 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
                    DSSText.Command="New reactor.1 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus1.2 bus2=Bus1.0 phases=1"

                    # 5 Conexión de la línea 2

```



```

DSSText.Command = "New line.Line2
Bus1=Bus1"+str(conbus)+" Bus2=Bus2"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

# 6 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
DSSText.Command="New reactor.2 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus2.2 bus2=Bus2.0 phases=1"

# 7 Creación y conexión de línea 3
DSSText.Command = "New line.Line3
Bus1=Bus2"+str(conbus)+" Bus2=Bus3"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

# 8 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
DSSText.Command="New reactor.3 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus3.2 bus2=Bus3.0 phases=1"

# Creación y conexión de Fault object para
cortocircuitar dos fases
DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1
bus1=busF.1 bus2=busF.2 R="+str(Rcc)

if X==0 or X==D:
    # 3_1 Creación y conexión de línea 1
    DSSText.Command = "New line.Line1_1
Bus1=Bus0"+str(conbus)+" Bus2=Bus1"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

# 4 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
DSSText.Command="New reactor.1 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus1.2 bus2=Bus1.0 phases=1" #Al principio de
cada celda conectamos el rail a tierra

# 5 Creación y conexión de línea 2
DSSText.Command = "New line.Line2
Bus1=Bus1"+str(conbus)+" Bus2=Bus2"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

# 6 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
DSSText.Command="New reactor.2 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus2.2 bus2=Bus2.0 phases=1"

# 7 Creación y conexión de línea 3
DSSText.Command = "New line.Line3
Bus1=Bus2"+str(conbus)+" Bus2=Bus3"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

# 8 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
DSSText.Command="New reactor.3 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus3.2 bus2=Bus3.0 phases=1"

# # Creación y conexión de Fault object para
cortocircuitar dos fases
if X==0:
    DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1
bus1=bus0.1 bus2=bus0.2 R="+str(Rcc)
elif X==D:

```

```

DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1
bus1=bus1.1 bus2=bus1.2 R="+str(Rcc)

elif D<X<=2*D and AT==3:
    if X!=2*D:
        # 3_1 Creación y conexión de línea 1
        DSSText.Command = "New line.Line1
Bus1=Bus0"+str(conbus)+" Bus2=Bus1"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

        # 4 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
        DSSText.Command="New reactor.1 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus1.2 bus2=Bus1.0 phases=1"

        # 5_1 Creación y conexión de línea 2_1
        DSSText.Command = "New line.Line2_1
Bus1=Bus1"+str(conbus)+" Bus2=BusF"+str(conbus)+" length="+str(X-D)+"
linecode=Catenaria"

        # 5_2 Creación y conexión de línea 2_2
        DSSText.Command = "New line.Line2_2
Bus1=BusF"+str(conbus)+" Bus2=Bus2"+str(conbus)+" length="+str(2*D-X)+"
linecode=Catenaria"

        # 6 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
        DSSText.Command="New reactor.2 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus2.2 bus2=Bus2.0 phases=1"

        # 7 Creación y conexión de línea 3
        DSSText.Command = "New line.Line3
Bus1=Bus2"+str(conbus)+" Bus2=Bus3"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

        # 8 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
        DSSText.Command="New reactor.3 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus3.2 bus2=Bus3.0 phases=1"

        # # Creación y conexión de Fault object para
cortocircuitar dos fases
        DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1
bus1=busF.1 bus2=busF.2 R="+str(Rcc)

        if X==2*D:
            # 3_1 Creación y conexión de línea 1
            DSSText.Command = "New line.Line1
Bus1=Bus0"+str(conbus)+" Bus2=Bus1"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

            # Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
            DSSText.Command="New reactor.1 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus1.2 bus2=Bus1.0 phases=1"

            # 5_1 Creación y conexión de línea 2
            DSSText.Command = "New line.Line2
Bus1=Bus1"+str(conbus)+" Bus2=Bus2"+str(conbus)+" length="+str(X-D)+"
linecode=Catenaria"

```

```

# 6 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
DSSText.Command="New reactor.2 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus2.2 bus2=Bus2.0 phases=1"

# 7 Creación y conexión de línea 3
DSSText.Command = "New line.Line3
Bus1=Bus2"+str(conbus)+" Bus2=Bus3"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

# 8 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
DSSText.Command="New reactor.3 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus3.2 bus2=Bus3.0 phases=1"

# # Creación y conexión de Fault object para
cortocircuitar dos fases
DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1
bus1=bus2.1 bus2=bus2.2 R="+str(Rcc)

elif 2*D<X<=3*D and AT==3:
    if X!=3*D:
        # 3_1 Creación y conexión de línea 1
        DSSText.Command = "New line.Line1
Bus1=Bus0"+str(conbus)+" Bus2=Bus1"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

# 4 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
DSSText.Command="New reactor.1 X=0.001
R="+str(0.001+2)+" bus1=Bus1.2 bus2=Bus1.0 phases=1" #Al principio de
cada celda conectamos el rail a tierra

# 5 Creación y conexión de línea 2
DSSText.Command = "New line.Line2
Bus1=Bus1"+str(conbus)+" Bus2=Bus2"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

# 6 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
DSSText.Command="New reactor.2 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus2.2 bus2=Bus2.0 phases=1"

# 7_1 Creación y conexión de línea 3_1
DSSText.Command = "New line.Line3_1
Bus1=Bus2"+str(conbus)+" Bus2=BusF"+str(conbus)+" length="+str(X-2*D)+"
linecode=Catenaria"

# 7_2 Creación y conexión de línea 3_1
DSSText.Command = "New line.Line3_2
Bus1=BusF"+str(conbus)+" Bus2=Bus3"+str(conbus)+" length="+str(3*D-X)+"
linecode=Catenaria"

# 8 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
DSSText.Command="New reactor.3 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus3.2 bus2=Bus3.0 phases=1"

# # Creación y conexión de Fault object para
cortocircuitar dos fases
DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1
bus1=busF.1 bus2=busF.2 R="+str(Rcc)

```

```

        if X==3*D:
            # 3_1 Creación y conexión de línea 1
            DSSText.Command = "New line.Line1
Bus1=Bus0"+str(conbus)+" Bus2=Bus1"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

            # 4 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
            DSSText.Command="New reactor.1 X=0.001
R="+str(0.001+2)+" bus1=Bus1.2 bus2=Bus1.0 phases=1" #Al principio de
cada celda conectamos el rail a tierra

            # 5 Creación y conexión de línea 2
            DSSText.Command = "New line.Line2
Bus1=Bus1"+str(conbus)+" Bus2=Bus2"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

            # 6 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
            DSSText.Command="New reactor.2 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus2.2 bus2=Bus2.0 phases=1"

            # 7 Creación y conexión de línea 3
            DSSText.Command = "New line.Line3
Bus1=Bus2"+str(conbus)+" Bus2=Bus3"+str(conbus)+" length="+str(X-2*D)+"
linecode=Catenaria"

            # 8 Conexión a tierra mediante una resistencia de
2.002
            DSSText.Command="New reactor.3 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus3.2 bus2=Bus3.0 phases=1"

            # # Creación y conexión de Fault object para
cortocircuitar dos fases
            DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1
bus1=bus3.1 bus2=bus3.2 R="+str(Rcc)

        elif sistema == "2x25":
            # 1 Fuente de alimentación
            DSSText.Command = "New object=circuit.C2x25 basekv=132
frequency="+str(f)+ " phases=3 MVASC3=8000"

            # 2 Transformador de tracción
            DSSText.Command = "New Transformer.TrafoSE Phases=1 Windings=3
XHL="+str(ZSET)
            DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Sourcebus.1.2 kV=132
KVA=60000"
            DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus0.1.3 kV=25 KVA=30000"
            DSSText.Command = "more wdg=3 Bus=Bus0.3.2 kV=25 KVA=30000"
            DSSText.Command="New reactor.0 X=0.001 R="+str(0.001+RPT)+"
bus1=Bus0.3 bus2=Bus0.0 phases=1" #Al principio de cada celda conectamos
el rail a tierra

            # Modelo de lineas aéreas
            DSSText.Command = "New Linecode.Catenaria nphases=3 units=KM"
#Definimos la impedancia de la catenaria con una matriz triangular 3x3
            DSSText.Command = "more
Rmatrix=["+str(Rl[0,0])+ "|" +str(Rl[0,1])+ " "+str(Rl[1,1])+ "|" +str(Rl[0,2])+ "
"+str(Rl[1,2])+ " "+str(Rl[2,2])+ "]"

```

```

        DSSText.Command = "more
Xmatrix=["+str(Xl[0,0])+"|"+str(Xl[0,1])+" "+str(Xl[1,1])+"|"+str(Xl[0,2])+"
"+str(Xl[1,2])+" "+str(Xl[2,2])+""]
        DSSText.Command = "more
Cmatrix=["+str(Cl*10**9)+"|"+str(Cl*10**9)+"
"+str(Cl*10**9)+"|"+str(Cl*10**9)+" "+str(Cl*10**9)+" "+str(Cl*10**9)+""]
        conbus='.1.3.2'
        if 0<=X<=D and AT==3:
            if X!=D and X!=0:
                # 3_1 Creación y conexión de línea 1_1
                DSSText.Command = "New line.Line1_1
Bus1=Bus0"+str(conbus)+" Bus2=BusF"+str(conbus)+" length="+str(X)+"
linecode=Catenaria"

                # 3_2 Creación y conexión de línea 1_2
                DSSText.Command = "New line.Line1_2
Bus1=BusF"+str(conbus)+" Bus2=Bus1"+str(conbus)+" length="+str(D-X)+"
linecode=Catenaria"

                # 4 Creación y conexión del Auto-transformador 1
                DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo1 phases=1
windings=2"
                DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus1.1.3 kV=25
kVA=15000"
                DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus1.3.2 kV=25
kVA=15000"
                DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
                DSSText.Command="New reactor.1 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus1.3 bus2=Bus1.0 phases=1" #Al principio de
cada celda conectamos el rail a tierra

                # 5 Creación y conexión de línea 2
                if SimTren=="Si":
                    DSSText.Command = "New line.Line2_1
Bus1=Bus1"+str(conbus)+" Bus2=BusTren"+str(conbus)+" length="+str(D/2)+"
linecode=Catenaria"

                    DSSText.Command = "New line.Line2_2
Bus1=BusTren"+str(conbus)+" Bus2=Bus2"+str(conbus)+" length="+str(D/2)+"
linecode=Catenaria"
                    DSSText.Command = "New load.Tren bus1=BusTren.1.3
phases=1 kw="+str(PTren)+" pf=0.995 kv=25 model=1 conn=del vminpu=0.8"
                else:
                    DSSText.Command = "New line.Line2
Bus1=Bus1"+str(conbus)+" Bus2=Bus2"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

                # 6 Creación y conexión del Auto-transformador 2
                DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo2 phases=1
windings=2"
                DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus2.1.3 kV=25
kVA=15000"
                DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus2.3.2 kV=25
kVA=15000"
                DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
                DSSText.Command="New reactor.2 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus2.3 bus2=Bus2.0 phases=1"

                # 7 Creación y conexión de línea 3
                DSSText.Command = "New line.Line3
Bus1=Bus2"+str(conbus)+" Bus2=Bus3"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

```

```

        # 8 Creación y conexión del Auto-transformador 3
        DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo3 phases=1
windings=2"
        DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus3.1.3 kV=25
kVA=15000"
        DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus3.3.2 kV=25
kVA=15000"
        DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
        DSSText.Command="New reactor.3 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus3.3 bus2=Bus3.0 phases=1"

        # # Creación y conexión de Fault object para
cortocircuitar dos fases
        DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1
bus1=busF.1 bus2=busF.3 R="+str(Rcc)

        if X==0 or X==D:
            # 3_1 Creación y conexión de línea 1
            DSSText.Command = "New line.Line1_1
Bus1=Bus0"+str(conbus)+" Bus2=Bus1"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

            # 4 Creación y conexión del Auto-transformador 1
            DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo1 phases=1
windings=2"
            DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus1.1.3 kV=25
kVA=15000"
            DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus1.3.2 kV=25
kVA=15000"
            DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
            DSSText.Command="New reactor.1 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus1.3 bus2=Bus1.0 phases=1" #Al principio de
cada celda conectamos el rail a tierra

            # 5 Creación y conexión de línea 2
            DSSText.Command = "New line.Line2
Bus1=Bus1"+str(conbus)+" Bus2=Bus2"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

            # 6 Creación y conexión del Auto-transformador 2
            DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo2 phases=1
windings=2"
            DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus2.1.3 kV=25
kVA=15000"
            DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus2.3.2 kV=25
kVA=15000"
            DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
            DSSText.Command="New reactor.2 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus2.3 bus2=Bus2.0 phases=1"

            # 7 Creación y conexión de línea 3
            DSSText.Command = "New line.Line3
Bus1=Bus2"+str(conbus)+" Bus2=Bus3"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

            # 8 Creación y conexión del Auto-transformador 3
            DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo3 phases=1
windings=2"
            DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus3.1.3 kV=25
kVA=15000"

```

```

kVA=15000"
        DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus3.3.2 kV=25
        DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
        DSSText.Command="New reactor.3 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus3.3 bus2=Bus3.0 phases=1"

        # # Creación y conexión de Fault object para
cortocircuitar dos fases
        if X==0:
            DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1
bus1=bus0.1 bus2=bus0.3 R="+str(Rcc)
        elif X==D:
            DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1
bus1=bus1.1 bus2=bus1.3 R="+str(Rcc)

        elif D<X<=2*D and AT==3:
            if X!=2*D:
                # 3_1 Creación y conexión de línea 1
                DSSText.Command = "New line.Line1
Bus1=Bus0"+str(conbus)+" Bus2=Bus1"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

                # 4 Creación y conexión del Auto-transformador 1
                DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo1 phases=1
windings=2"
                DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus1.1.3 kV=25
kVA=15000"
                DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus1.3.2 kV=25
kVA=15000"
                DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
                DSSText.Command="New reactor.1 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus1.3 bus2=Bus1.0 phases=1"

                # 5_1 Creación y conexión de línea 2_1
                DSSText.Command = "New line.Line2_1
Bus1=Bus1"+str(conbus)+" Bus2=BusF"+str(conbus)+" length="+str(X-D)+"
linecode=Catenaria"

                # 5_2 Creación y conexión de línea 2_2
                DSSText.Command = "New line.Line2_2
Bus1=BusF"+str(conbus)+" Bus2=Bus2"+str(conbus)+" length="+str(2*D-X)+"
linecode=Catenaria"

                # 6 Creación y conexión del Auto-transformador 2
                DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo2 phases=1
windings=2"
                DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus2.1.3 kV=25
kVA=15000"
                DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus2.3.2 kV=25
kVA=15000"
                DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
                DSSText.Command="New reactor.2 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus2.3 bus2=Bus2.0 phases=1"

                # 7 Creación y conexión de línea 3
                DSSText.Command = "New line.Line3
Bus1=Bus2"+str(conbus)+" Bus2=Bus3"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

                # 8 Creación y conexión del Auto-transformador 3
                DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo3 phases=1
windings=2"

```

```

kVA=15000"          DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus3.1.3 kV=25
                    DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus3.3.2 kV=25
kVA=15000"
                    DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
                    DSSText.Command="New reactor.3 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus3.3 bus2=Bus3.0 phases=1"

                    # # Creación y conexión de Fault object para
cortocircuitar dos fases
                    DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1
bus1=busF.1 bus2=busF.3 R="+str(Rcc)

                    if X==2*D:
                        # 3_1 Creación y conexión de línea 1
                        DSSText.Command = "New line.Line1
Bus1=Bus0"+str(conbus)+" Bus2=Bus1"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

                        # 4 Creación y conexión del Auto-transformador 1
                        DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo1 phases=1
windings=2"
                        DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus1.1.3 kV=25
kVA=15000"
                        DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus1.3.2 kV=25
kVA=15000"
                        DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
                        DSSText.Command="New reactor.1 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus1.3 bus2=Bus1.0 phases=1"

                        # 5_1 Creación y conexión de línea 2
                        DSSText.Command = "New line.Line2
Bus1=Bus1"+str(conbus)+" Bus2=Bus2"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

                        # 6 Creación y conexión del Auto-transformador 2
                        DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo2 phases=1
windings=2"
                        DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus2.1.3 kV=25
kVA=15000"
                        DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus2.3.2 kV=25
kVA=15000"
                        DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
                        DSSText.Command="New reactor.2 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus2.3 bus2=Bus2.0 phases=1"

                        # 7 Creación y conexión de línea 3
                        DSSText.Command = "New line.Line3
Bus1=Bus2"+str(conbus)+" Bus2=Bus3"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

                        # 8 Creación y conexión del Auto-transformador 3
                        DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo3 phases=1
windings=2"
                        DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus3.1.3 kV=25
kVA=15000"
                        DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus3.3.2 kV=25
kVA=15000"
                        DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
                        DSSText.Command="New reactor.3 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus3.3 bus2=Bus3.0 phases=1"

```



```

# # Creación y conexión de Fault object para
cortocircuitar dos fases
DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1
bus1=bus2.1 bus2=bus2.3 R="+str(Rcc)

elif 2*D<X<=3*D and AT==3:
    if X!=3*D:
        # 3_1 Creación y conexión de línea 1
        DSSText.Command = "New line.Line1
Bus1=Bus0"+str(conbus)+" Bus2=Bus1"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

        # 4 Creación y conexión del Auto-transformador 1
        DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo1 phases=1
windings=2"
        DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus1.1.3 kV=25
kVA=15000"
        DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus1.3.2 kV=25
kVA=15000"
        DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
        DSSText.Command="New reactor.1 X=0.001
R="+str(0.001+2)+" bus1=Bus1.3 bus2=Bus1.0 phases=1" #Al principio de
cada celda conectamos el rail a tierra

        # 5 Creación y conexión de línea 2
        DSSText.Command = "New line.Line2
Bus1=Bus1"+str(conbus)+" Bus2=Bus2"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

        # 6 Creación y conexión del Auto-transformador 2
        DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo2 phases=1
windings=2"
        DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus2.1.3 kV=25
kVA=15000"
        DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus2.3.2 kV=25
kVA=15000"
        DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
        DSSText.Command="New reactor.2 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus2.3 bus2=Bus2.0 phases=1"

        # 7_1 Creación y conexión de línea 3_1
        DSSText.Command = "New line.Line3_1
Bus1=Bus2"+str(conbus)+" Bus2=BusF"+str(conbus)+" length="+str(X-2*D)+"
linecode=Catenaria"

        # 7_2 Creación y conexión de línea 3_1
        DSSText.Command = "New line.Line3_2
Bus1=BusF"+str(conbus)+" Bus2=Bus3"+str(conbus)+" length="+str(3*D-X)+"
linecode=Catenaria"

        # 8 Creación y conexión del Auto-transformador 3
        DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo3 phases=1
windings=2"
        DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus3.1.3 kV=25
kVA=15000"
        DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus3.3.2 kV=25
kVA=15000"
        DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
        DSSText.Command="New reactor.3 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus3.3 bus2=Bus3.0 phases=1"

```

```

# # Creación y conexión de Fault object para
cortocircuitar dos fases
DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1
bus1=busF.1 bus2=busF.3 R="+str(Rcc)

    if X==3*D:
        # 3_1 Creación y conexión de línea 1
        DSSText.Command = "New line.Line1
Bus1=Bus0"+str(conbus)+" Bus2=Bus1"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

        # 4 Creación y conexión del Auto-transformador 1
        DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo1 phases=1
windings=2"
        DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus1.1.3 kV=25
kVA=15000"
        DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus1.3.2 kV=25
kVA=15000"
        DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
        DSSText.Command="New reactor.1 X=0.001
R="+str(0.001+2)+" bus1=Bus1.3 bus2=Bus1.0 phases=1" #Al principio de
cada celda conectamos el rail a tierra

        # 5 Creación y conexión de línea 2
        DSSText.Command = "New line.Line2
Bus1=Bus1"+str(conbus)+" Bus2=Bus2"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

        # 6 Creación y conexión del Auto-transformador 2
        DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo2 phases=1
windings=2"
        DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus2.1.3 kV=25
kVA=15000"
        DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus2.3.2 kV=25
kVA=15000"
        DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
        DSSText.Command="New reactor.2 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus2.3 bus2=Bus2.0 phases=1"

        # 7 Creación y conexión de línea 3
        DSSText.Command = "New line.Line3
Bus1=Bus2"+str(conbus)+" Bus2=Bus3"+str(conbus)+" length="+str(D)+"
linecode=Catenaria"

        # 8 Creación y conexión del Auto-transformador 3
        DSSText.Command = "New Transformer.Autotrafo3 phases=1
windings=2"
        DSSText.Command = "more wdg=1 Bus=Bus3.1.3 kV=25
kVA=15000"
        DSSText.Command = "more wdg=2 Bus=Bus3.3.2 kV=25
kVA=15000"
        DSSText.Command = "more xhl="+str(Zaut)
        DSSText.Command="New reactor.3 X=0.001
R="+str(0.001+RPT)+" bus1=Bus3.3 bus2=Bus3.0 phases=1"

# # Creación y conexión de Fault object para
cortocircuitar dos fases
DSSText.Command = "New object=Fault.CC phases=1
bus1=bus3.1 bus2=bus3.3 R="+str(Rcc)

```

```

circuito-----###                                     ###-----Solución del
# solución y modo de control del sistema
DSSText.Command = "Set controlmode=snap" #modo de control
DSSText.Command = "solve"

vector solución----###                                ###-----Se obtienen los valores del

if sistema == "1x25":
    Vf1=DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(1)
    Vf2=DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(2)

    if X==1:
        Vnames_f1_Static1_1 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(1)
#(u'sourcebus.1', u'bus0.1', u'busf.1', u'bus1.1', u'bus2.1', u'bus3.1')
        Vnames_f2_Static1_1 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(2)
#(u'sourcebus.2', u'bus0.2', u'busf.2', u'bus1.2', u'bus2.2', u'bus3.2')
    elif X==0:
        Vnames_f1_Static1_2 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(1)
#(u'sourcebus.1', u'bus0.1', u'bus1.1', u'bus2.1', u'bus3.1')
        Vnames_f2_Static1_2 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(2)
#(u'sourcebus.2', u'bus0.2', u'bus1.2', u'bus2.2', u'bus3.2')

    if X!=0 and X!=D and X!=2*D and X!=3*D:
        Vnames_f1 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(1)
        Vnames_f2 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(2)

        Vvalues_f1 = DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(1)
        Vvalues_f2 = DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(2)

V1          Vcc1          V3          V5          V7                                     #
1           2           3           4           5                                     #
    for s in np.arange(1,len(Vnames_f1)): #(u'sourcebus.1',
u'bus0.1', u'busf.1', u'bus1.1', u'bus2.1', u'bus3.1')
        if Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static1_1[1]:      V1[i] =
Vvalues_f1[s]
        elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static1_1[2]:    Vcc1[i]=
Vvalues_f1[s]
        elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static1_1[3]:    V3[i] =
Vvalues_f1[s]
        elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static1_1[4]:    V5[i] =
Vvalues_f1[s]
        elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static1_1[5]:    V7[i] =
Vvalues_f1[s]
        else : print "Nodo no encontrado"

V2          Vcc2          V4          V6          V8                                     #
1           2           3           4           5                                     #
    for s in np.arange(1,len(Vnames_f2)): #(u'sourcebus.2',
u'bus0.2', u'busf.2', u'bus1.2', u'bus2.2', u'bus3.2')
        if Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static1_1[1]:      V2[i] =
Vvalues_f2[s]
        elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static1_1[2]:    Vcc2[i]=
Vvalues_f2[s]
        elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static1_1[3]:    V4[i] =
Vvalues_f2[s]

```

```

elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static1_1[4]: V6[i] =
Vvalues_f2[s]
elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static1_1[5]: V8[i] =
Vvalues_f2[s]
else : print "Nodo no encontrado"

elif X==0 or X==D or X==2*D or X==3*D:

    Vnames_f1 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(1)
    Vnames_f2 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(2)

    Vvalues_f1 = DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(1)
    Vvalues_f2 = DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(2)

V1      V3      V5      V7      #
1       2       3       4       #
for s in np.arange(1,len(Vnames_f1)): #(u'sourcebus.1',
u'bus0.1', u'bus1.1', u'bus2.1', u'bus3.1')
Vvalues_f1[s] if Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static2_1[1]: V1[i] =
Vvalues_f1[s] elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static2_1[2]: V3[i] =
Vvalues_f1[s] elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static2_1[3]: V5[i] =
Vvalues_f1[s] elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static2_1[4]: V7[i] =
Vvalues_f1[s] else : print "Nodo no encontrado"
#
V2      V4      V6      V8      #
1       2       3       4       #
for s in np.arange(1,len(Vnames_f2)): #(u'sourcebus.1',
u'bus0.2', u'bus1.2', u'bus2.2', u'bus3.2')
Vvalues_f2[s] if Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static2_1[1]: V2[i] =
Vvalues_f2[s] elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static2_1[2]: V4[i] =
Vvalues_f2[s] elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static2_1[3]: V6[i] =
Vvalues_f2[s] elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static2_1[4]: V8[i] =
Vvalues_f2[s]

if 0<=X<=D:
    if X!=0 and X!=D:
        DSSCircuit.SetActiveClass('Line')
        DSS_StartUp.ActiveClass.First
        Iclx[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Irlx[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next
        Icly[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Irly[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

```

```

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next
        Ic2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        Ic2y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir2y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next
        Ic3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        Ic3y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir3y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        elif X==0 or X==D:
            Vcc1[i] = Vf1[2]
            Vcc2[i] = Vf2[2]
            DSSCircuit.SetActiveClass('Line')
            DSS_StartUp.ActiveClass.First
            Ic1x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir1x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

            #DSS_StartUp.ActiveClass.Next
            Ic1y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir1y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next
        Ic2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        Ic2y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))

```

```

        Ir2y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next
        Ic3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        Ic3y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir3y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

    elif D<X<=2*D:
        if X!=2*D:
            DSSCircuit.SetActiveClass('Line')
            DSS_StartUp.ActiveClass.First
            Ic1x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir1x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

            Ic1y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir1y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

            DSS_StartUp.ActiveClass.Next
            Ic2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

            DSS_StartUp.ActiveClass.Next
            Ic2y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir2y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

            DSS_StartUp.ActiveClass.Next
            Ic3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

```

```

        Ic3y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir3y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        elif X==2*D:
            Vcc1[i] = Vf1[3]
            Vcc2[i] = Vf2[3]
            DSSCircuit.SetActiveClass('Line')
            DSS_StartUp.ActiveClass.First
            Ic1x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir1x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

            Ic1y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir1y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

            DSS_StartUp.ActiveClass.Next
            Ic2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

            #DSS_StartUp.ActiveClass.Next
            Ic2y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir2y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

            DSS_StartUp.ActiveClass.Next
            Ic3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

            Ic3y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir3y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        elif 2*D<X<=3*D:
            if X!=3*D:
                DSSCircuit.SetActiveClass('Line')
                DSS_StartUp.ActiveClass.First

```

```

        Iclx[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Irlx[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))
        Ifs[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[2]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[3]**2))

        Icly[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Irlly[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next
        Ic2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        Ic2y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir2y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next
        Ic3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next
        Ic3y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir3y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

    elif X==3*D:
        Vcc1[i] = Vf1[4]
        Vcc2[i] = Vf2[4]

        DSSCircuit.SetActiveClass('Line')
        DSS_StartUp.ActiveClass.First
        Iclx[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Irlx[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

```



```

        Ic1y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir1y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next
        Ic2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        Ic2y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir2y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next
        Ic3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        #DSS_StartUp.ActiveClass.Next

        Ic3y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir3y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        Ics[i]=Ic1x[i]
        Irs[i]=Ir1x[i]

        DSSCircuit.SetActiveElement("Fault.CC");
        If[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))

        elif sistema == "2x25":
            Vf1=DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(1)
            Vf2=DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(2)
            Vf3=DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(3)

            if X==1:
                Vnames_f1_Statiga_1 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(1)
#(u'sourcebus.1', u'bus0.1', u'busf.1', u'bus1.1', u'bus2.1', u'bus3.1')
                Vnames_f2_Statiga_1 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(2)
#(u'sourcebus.2', u'bus0.2', u'busf.2', u'bus1.2', u'bus2.2', u'bus3.2')
                Vnames_f3_Statiga_1 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(3)
#(u'sourcebus.3', u'bus0.3', u'busf.3', u'bus1.3', u'bus2.3', u'bus3.3')

            elif X==0:

```

```

Vnames_f1_Statica_2 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(1)
#(u'sourcebus.1', u'bus0.1', u'bus1.1', u'bus2.1', u'bus3.1')
Vnames_f2_Statica_2 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(2)
#(u'sourcebus.2', u'bus0.2', u'bus1.2', u'bus2.2', u'bus3.2')
Vnames_f3_Statica_2 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(3)
#(u'sourcebus.3', u'bus0.3', u'bus1.3', u'bus2.3', u'bus3.3')

if X!=0 and X!=D and X!=2*D and X!=3*D:
    Vnames_f1 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(1)
    Vnames_f2 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(2)
    Vnames_f3 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(3)

    Vvalues_f1 = DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(1)
    Vvalues_f2 = DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(2)
    Vvalues_f3 = DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(3)

V1      Vcc      V4      V7      V10      #
1        2        3        4        5        #
    for s in np.arange(1,len(Vnames_f1)): #(u'sourcebus.1',
u'bus0.1', u'busf.1', u'bus1.1', u'bus2.1', u'bus3.1')
        if Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Statica_1[1]:      V1[i] =
Vvalues_f1[s]
        elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Statica_1[2]:    Vcc1[i]=
Vvalues_f1[s]
        elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Statica_1[3]:    V4[i] =
Vvalues_f1[s]
        elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Statica_1[4]:    V7[i] =
Vvalues_f1[s]
        elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Statica_1[5]:    V10[i] =
Vvalues_f1[s]
        else : print "Nodo no encontrado"

V3      Vcc      V6      V9      V12      #
1        2        3        4        5        #
    for s in np.arange(1,len(Vnames_f2)): #(u'sourcebus.2',
u'bus0.2', u'busf.2', u'bus1.2', u'bus2.2', u'bus3.2')
        if Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Statica_1[1]:      V3[i] =
Vvalues_f2[s]
        elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Statica_1[2]:    Vcc2[i]=
Vvalues_f2[s]
        elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Statica_1[3]:    V6[i] =
Vvalues_f2[s]
        elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Statica_1[4]:    V9[i] =
Vvalues_f2[s]
        elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Statica_1[5]:    V12[i] =
Vvalues_f2[s]
        else : print "Nodo no encontrado"

V2      Vcc      V5      V8      V11      #
1        2        3        4        5        #
    for s in np.arange(1,len(Vnames_f3)): #(u'sourcebus.1',
u'bus0.1', u'busf.1', u'bus1.1', u'bus2.1', u'bus3.1')
        if Vnames_f3[s] == Vnames_f3_Statica_1[1]:      V2[i] =
Vvalues_f3[s]
        elif Vnames_f3[s] == Vnames_f3_Statica_1[2]:    Vcc3[i]=
Vvalues_f3[s]

```

```

elif Vnames_f3[s] == Vnames_f3_Static1_1[3]: V5[i] =
Vvalues_f3[s]
elif Vnames_f3[s] == Vnames_f3_Static1_1[4]: V8[i] =
Vvalues_f3[s]
elif Vnames_f3[s] == Vnames_f3_Static1_1[5]: V11[i] =
Vvalues_f3[s]
else : print "Nodo no encontrado"

elif X==0 or X==D or X==2*D or X==3*D:
Vnames_f1 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(1)
Vnames_f2 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(2)
Vnames_f3 = DSSCircuit.AllNodeNamesByPhase(3)

Vvalues_f1 = DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(1)
Vvalues_f2 = DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(2)
Vvalues_f3 = DSSCircuit.AllNodeVmagByPhase(3)

#
V1      V4      V7      V10
#
1      2      3      4
for s in np.arange(1,len(Vnames_f1)): #(u'sourcebus.1',
u'bus0.1', u'bus1.1', u'bus2.1', u'bus3.1')
if Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static2_1[1]: V1[i] =
Vvalues_f1[s]
elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static2_1[2]: V4[i] =
Vvalues_f1[s]
elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static2_1[3]: V7[i] =
Vvalues_f1[s]
elif Vnames_f1[s] == Vnames_f1_Static2_1[4]: V10[i]
= Vvalues_f1[s]
else : print "Nodo no encontrado"

#
V3      V6      V9      V12
#
1      2      3      4
for s in np.arange(1,len(Vnames_f2)): #(u'sourcebus.1',
u'bus0.1', u'bus1.1', u'bus2.1', u'bus3.1')
if Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static2_1[1]: V3[i] =
Vvalues_f2[s]
elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static2_1[2]: V6[i] =
Vvalues_f2[s]
elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static2_1[3]: V9[i] =
Vvalues_f2[s]
elif Vnames_f2[s] == Vnames_f2_Static2_1[4]: V12[i]
= Vvalues_f2[s]
else : print "Nodo no encontrado"

#
V2      V5      V8      V11
#
1      2      3      4
for s in np.arange(1,len(Vnames_f3)): #(u'sourcebus.1',
u'bus0.1', u'bus1.1', u'bus2.1', u'bus3.1')
if Vnames_f3[s] == Vnames_f3_Static2_1[1]: V2[i] =
Vvalues_f3[s]
elif Vnames_f3[s] == Vnames_f3_Static2_1[2]: V5[i] =
Vvalues_f3[s]
elif Vnames_f3[s] == Vnames_f3_Static2_1[3]: V8[i] =
Vvalues_f3[s]
elif Vnames_f3[s] == Vnames_f3_Static2_1[4]: V11[i]
= Vvalues_f3[s]

```

```

else : print "Nodo no encontrado"

# Se procede a obtener las intensidades en las lineas
DSSCircuit.SetActiveClass('Line') #print
DSSCircuit.ActiveClass.AllNames #(u'line1_1', u'line1_2', u'line2',
u'line3')
DSSCircuit.ActiveClass.First #Se activa la primera linea---
u'line1_1'
if 0<=X<=D:
    if X!=0 and X!=D:
        Iclx[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Irlx[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))
        Ifs[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[2]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[3]**2))

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next # Se activa la siguiente
linea--- u'line1_2'
        Icly[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Irlly[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next # Se activa la siguiente
linea----u'line2'
        Ic2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))
        Ic2y[i] = Ic2x[i]
        Ir2y[i] = Ir2x[i]

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next # Se activa la siguiente
linea----u'line3'
        Ic3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))
        Ic3y[i] = Ic3x[i]
        Ir3y[i] = Ir3x[i]

    elif X==0 or X==D:
        Vcc1[i] = Vf1[2]
        Vcc2[i] = Vf2[2]
        Vcc3[i] = Vf3[2]

        Iclx[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Irlx[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

```

```

        Ifs[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[2]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[3]**2))
        Ic1y[i] = Ic1x[i]
        Ir1y[i] = Ir1x[i]

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next
        Ic2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))
        Ic2y[i] = Ic2x[i]
        Ir2y[i] = Ir2x[i]

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next
        Ic3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))
        Ic3y[i] = Ic3x[i]
        Ir3y[i] = Ir3x[i]

    elif D<X<=2*D:
        if X!=2*D:
            Ic1x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir1x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))
            Ifs[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[2]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[3]**2))
            Ic1y[i] = Ic1x[i]
            Ir1y[i] = Ir1x[i]

            DSS_StartUp.ActiveClass.Next
            Ic2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

            DSS_StartUp.ActiveClass.Next
            Ic2y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir2y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

            DSS_StartUp.ActiveClass.Next
            Ic3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))

```

```

        Ir3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[5]**2))
        Ic3y[i] = Ic3x[i]
        Ir3y[i] = Ir3x[i]
    elif X==2*D:
        Vcc1[i] = Vf1[3]
        Vcc2[i] = Vf2[3]
        Vcc3[i] = Vf3[3]

        Iclx[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[1]**2))
        Irlx[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[5]**2))
        Ifs[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[2]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[3]**2))
        Icly[i] = Iclx[i]
        Irlly[i] = Irlx[i]

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next
        Ic2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[1]**2))
        Ir2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[5]**2))
        Ic2y[i] = Ic2x[i]
        Ir2y[i] = Ir2x[i]

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next
        Ic3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[1]**2))
        Ir3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[5]**2))
        Ic3y[i] = Ic3x[i]
        Ir3y[i] = Ir3x[i]

    elif 2*D<X<=3*D:
        if X!=3*D:
            Iclx[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[1]**2))
            Irlx[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[5]**2))
            Ifs[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[2]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[3]**2))
            Icly[i] = Iclx[i]
            Irlly[i] = Irlx[i]

            DSS_StartUp.ActiveClass.Next
            Ic2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[1]**2))

```

```

        Ir2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))
        Ic2y[i] = Ic2x[i]
        Ir2y[i] = Ir2x[i]

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next
        Ic3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        DSS_StartUp.ActiveClass.Next
        Ic3y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
        Ir3y[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))

        elif X==3*D:
            Vcc1[i] = Vf1[4]
            Vcc2[i] = Vf2[4]
            Vcc3[i] = Vf3[4]

            Ic1x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir1x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))
            Ifs[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[2]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[3]**2))
            Ic1y[i] = Ic1x[i]
            Ir1y[i] = Ir1x[i]

            DSS_StartUp.ActiveClass.Next
            Ic2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir2x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))
            Ic2y[i] = Ic2x[i]
            Ir2y[i] = Ir2x[i]

            DSS_StartUp.ActiveClass.Next
            Ic3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[1]**2))
            Ir3x[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[4]**2+DSSCircuit.ActiveCktEl
ement.Currents[5]**2))
            Ic3y[i] = Ic3x[i]
            Ir3y[i] = Ir3x[i]

Ics[i]=Ic1x[i]
Irs[i]=Ir1x[i]

```

```

        DSSCircuit.SetActiveElement ('transformer.autotrafo1')
        Iat1[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[1]**2))

        #DSSCircuit.Transformers.Next
        DSSCircuit.SetActiveElement ('transformer.autotrafo2')
        #print DSSCircuit.ActiveCktElement.Name
        Iat2[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[1]**2))
        Iat2phase[i]=DSSCircuit.ActiveCktElement.CurrentsMagAng[1]

        DSSCircuit.SetActiveElement ('transformer.autotrafo3')
        Iat3[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[1]**2))
        Iat3phase[i]=DSSCircuit.ActiveCktElement.CurrentsMagAng[1]

        DSSCircuit.SetActiveElement("Fault.CC");
        If[i] =
float(sqrt(DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[0]**2+DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents[1]**2))
        #print DSSCircuit.ActiveCktElement.Currents

    else: print "Tipo de sistema introducido es no disponible"

    ###-----Se realiza el plot con los datos obtenidos----###
    Graficas
(sistema,Lmax,If,Ics,Ifs,Irs,Iat1,Iat2,Iat3,Ic1y,Ic2x,Ic2y,Ic3x,Ir1y,Ir2x,Ir2y,Ir3x,V1,V2,V3,V4,V5,V6,V7,V8,V9,V10,Vcc1,Vcc2,Vcc3)

```


7.5 Código de funciones auxiliares

```
#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf-8 -*-

#Se importan las librerías necesarias
import os
import win32com.client
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.linalg as sci

#Función para hacer la matriz simétrica
def symmetrize(Yimp,N):
    for i in range (N): #va desde 0 hasta N-1
        for j in range (N):
            if j==i:
                pass
            elif j< i:
                Yimp[i,j]=Yimp[j,i]
    return Yimp

#Función que permite calcular la dimensión que va a tener la matriz de impedancias
def dim(AT,sistema,L,D):
    if sistema == "1x25":
        if L!=D and L!=2*D and L!=3*D:
            N=4+2*AT
        elif L==D or L==2*D or L==3*D:
            N=2+2*AT
    elif sistema == "2x25":
        if L!=D and L!=2*D and L!=3*D:
            N=6+3*AT
        elif L==D or L==2*D or L==3*D:
            N=3+3*AT
    return N

#Función para calcular el número total de celdas a conectar en serie
def Tramos(Lmax, D):
    #Se calcula el número de auto-transformadores que serán necesario de conectar
    #Trafo en vacío AT=0 ---> No hay ningún auto transformador conectado, en principio no se va dar este caso
    if 0<Lmax<=D:
        NT=1
    elif D<Lmax<=2*D:
        NT=2
    elif 2*D<Lmax<=3*D:
        NT=3
    elif 3*D<Lmax<=4*D:
        NT=4
    elif 4*D<Lmax<=5*D:
        NT=5
    elif 5*D<Lmax<=6*D:
        NT=6
    return NT

# Esta función permite conocer en que tramo se esta produciendo la falta
def Pos_CC(L,D):
    if 0<L<=D:
```

```

        tramo=1
    elif D<L<=2*D:
        tramo=2
    elif 2*D<L<=3*D:
        tramo=3
    return tramo

#Función que permite calcular la matriz de impedancias en función del
sistema a considerar
def impedancia(sistema):
    Zc=0.1192+0.7522j# ohmios/km
    Zr=0.1618+0.6709j
    Zf=0.2036+0.8847j

    Zcr=0.0574+0.3877j
    Zcf=0.0568+0.3953j
    Zrf=0.0571+0.3410j

    if sistema == "1x25":
        Z=np.matrix([[Zc, Zcr],
                    [Zcr, Zr]])
        Rl = np.real(Z)
        Xl = np.imag(Z)
        C1 = 1.46159414243e-08

    elif sistema == "2x25":
        Z=np.matrix([[Zc, Zcr, Zcf],
                    [Zcr, Zr, Zrf],
                    [Zcf, Zrf, Zf]])
        Rl = np.real(Z)
        Xl = np.imag(Z)
        C1 = 1.46159414243e-08
    return (Rl,Xl,C1)

#Función para representar los valores obtenidos
def Graficas
(sistema,Lmax,If,Ics,Irs,Ifs,Iat1,Iat2,Iat3,Ic1y,Ic2x,Ic2y,Ic3x,Ir1y,Ir2x,Ir
2y,Ir3x,V1,V2,V3,V4,V5,V6,V7,V8,V9,V10,Vcc1,Vcc2,Vcc3,Iat1phase,Vat1phase,De
sphase1,Iat2phase,Vat2phase,Desphase2,Iat3phase,Vat3phase,Desphase3,VA):

    plt.close()
    D=np.arange(0,Lmax+1) #empieza en 0 y llega hasta 30
    if sistema=="1x25":

        #Plot If, Ics, Irs
        plt.figure(1)
        plt.subplot(211)
        plt.plot(D[0:], abs(Ics[0:]),color='black',label= "Ics")
        #plt.plot(D[0:], abs(Irs[0:]),color='green',label= "Irs") #Entre
0 y 10 debe de ser igual a Ic1x y If
        plt.plot(D[0:], abs(If[0:]),color='red',label= "If")
        plt.legend() # To obtain line-color
        plt.xlabel('Distancia (km)')
        plt.ylabel('Corriente (A)')

        #Plot Ic1y, Ic2x, Ic2y, Ic3x
        plt.figure(2)
        plt.subplot(211)
        plt.plot(D[0:], abs(Ic1y[0:]),color='yellow',label= "Ic1y")
        plt.plot(D[0:], abs(Ic2x[0:]),color='blue',label= "Ic2x")
        plt.plot(D[0:], abs(Ic2y[0:]),color='green',label= "Ic2y")

```

```

plt.plot(D[0:], abs(Ic3x[0:]),color='red',label= "Ic3x")
plt.legend()
plt.xlabel('Distancia (km)')
plt.ylabel('Corriente (A)')

#Plot Ir1y, Ir2x, Ir2y, Ir3x
plt.subplot(212)
plt.plot(D[0:], abs(Ir1y[0:]),color='yellow',label= "Ir1y")
plt.plot(D[0:], abs(Ir2x[0:]),color='blue',label= "Ir2x")
plt.plot(D[0:], abs(Ir2y[0:]),color='green',label= "Ir2y")
plt.plot(D[0:], abs(Ir3x[0:]),color='red',label= "Ir3x")
plt.legend()
plt.xlabel('Distancia (km)')
plt.ylabel('Corriente (A)')

#Plot V1, V3, V5
plt.figure(3)
plt.subplot(211)
plt.plot(D[0:], abs(V1[0:]),color='y',label= "V1")
plt.plot(D[0:], abs(V3[0:]),color='b',label= "V3")
plt.plot(D[0:], abs(V5[0:]),color='g',label= "V5")
plt.plot(D[0:], abs(Vcc1[0:]),color='red',label= "Vcc1")
plt.legend()
plt.xlabel('Distancia (km)')
plt.ylabel('Voltaje (V)')

#Plot V2, V4, V6
plt.subplot(212)
plt.plot(D[0:], abs(V2[0:]),color='y',label= "V2")
plt.plot(D[0:], abs(V4[0:]),color='b',label= "V4")
plt.plot(D[0:], abs(V6[0:]),color='g',label= "V6")
plt.plot(D[0:], abs(Vcc1[0:]),color='red',label= "Vcc1")
plt.legend()
plt.xlabel('Distancia (km)')
plt.ylabel('Voltaje (V)')

elif sistema=="2x25":
    #Plot If, Ics, Irs, Ifs
    plt.figure(1)
    plt.subplot(211)
    plt.plot(D[0:], abs(Ics[0:]),color='black',label= "Ics")
    plt.plot(D[0:], abs(Irs[0:]),color='green',label= "Irs")
    plt.plot(D[0:], abs(Ifs[0:]),color='brown',label= "Ifs")
    plt.plot(D[0:], abs(If[0:]),color='red',label= "If")
    plt.legend() # To obtain line-color
    plt.xlabel('Distancia (km)')
    plt.ylabel('Corriente (A)')

    #Plot Iat1, Iat2, Iat3
    plt.subplot(212)
    plt.plot(D[0:], abs(Iat1[0:]),color='green',label= "Iat1")
    plt.plot(D[0:], abs(Iat2[0:]),color='blue',label= "Iat2")
    plt.plot(D[0:], abs(Iat3[0:]),color='yellow',label= "Iat3")
    plt.legend()
    plt.xlabel('Distancia (km)')
    plt.ylabel('Corriente (A)')

    #Plot Ic1y, Ic2x, Ic2y, Ic3x
    plt.figure(2)
    plt.subplot(211)
    plt.plot(D[0:], abs(Ic1y[0:]),color='yellow',label= "Ic1y")

```

```

plt.plot(D[0:], abs(Ic2x[0:]),color='blue',label= "Ic2x")
plt.plot(D[0:], abs(Ic2y[0:]),color='green',label= "Ic2y")
plt.plot(D[0:], abs(Ic3x[0:]),color='red',label= "Ic3x")
plt.legend()
plt.xlabel('Distancia (km)')
plt.ylabel('Corriente (A)')

#Plot Ir1y, Ir2x, Ir2y, Ir3x
plt.subplot(212)
plt.plot(D[0:], abs(Ir1y[0:]),color='yellow',label= "Ir1y")
#plt.plot(D[0:], abs(Ir2x[0:]),color='blue',label= "Ir2x")
plt.plot(D[0:], abs(Ir2y[0:]),color='green',label= "Ir2y")
#plt.plot(D[0:], abs(Ir3x[0:]),color='red',label= "Ir3x")
plt.legend()
plt.xlabel('Distancia (km)')
plt.ylabel('Corriente (A)')

#Plot V1, V4, V7, V10
plt.figure(3)
plt.subplot(211)
plt.plot(D[0:], abs(V1[0:]),color='yellow',label= "V1")
plt.plot(D[0:], abs(V4[0:]),color='blue',label= "V4")
plt.plot(D[0:], abs(V7[0:]),color='green',label= "V7")
plt.plot(D[0:], abs(V10[0:]),color='red',label= "V10")
plt.legend()
plt.xlabel('Distancia (km)')
plt.ylabel('Voltaje (V)')

#Plot V2, V5, V8, V11
plt.subplot(212)
plt.plot(D[0:], abs(V2[0:]),color='yellow',label= "V2")
plt.plot(D[0:], abs(V5[0:]),color='blue',label= "V5")
plt.plot(D[0:], abs(V8[0:]),color='green',label= "V8")
plt.legend()
plt.xlabel('Distancia (km)')
plt.ylabel('Voltaje (V)')

plt.figure(4)
#Plot V3, V6, V9, V12
plt.subplot(211)
plt.plot(D[0:], abs(V3[0:]),color='yellow',label= "V3")
plt.plot(D[0:], abs(V6[0:]),color='blue',label= "V6")
plt.plot(D[0:], abs(V9[0:]),color='green',label= "V9")
plt.legend() # To obtain line-color
plt.xlabel('Distancia (km)')
plt.ylabel('Voltaje (V)')

#Plot Vcc1, Vcc2, Vcc3
plt.subplot(212)
plt.plot(D[0:], abs(Vcc1[0:]),color='yellow',label= "Vcc1")
plt.plot(D[0:], abs(Vcc2[0:]),color='blue',label= "Vcc2")
plt.plot(D[0:], abs(Vcc3[0:]),color='green',label= "Vcc3")
plt.legend() # To obtain line-color
plt.xlabel('Distancia (km)')
plt.ylabel('Voltaje (V)')

plt.show()

```