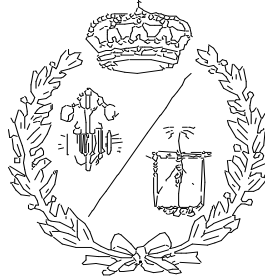


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE
ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS
MEDIANTE EL USO DE PSCAD/EMTD Y
PYTHON**

**(Automated analysis of electrical power
systems using PSCAD/EMTD and Python)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Ángel Alonso González

Sept-2020

Tabla de contenidos

Ilustraciones.....	3
Tablas.....	5
Ecuaciones	5
Resumen	6
Abstract	7
Introducción	8
Motivaciones del proyecto	8
Estado del arte.....	8
Análisis EMT (Transitorios electromagnéticos)	8
Cortocircuitos en las redes eléctricas	9
Sistema eléctrico de potencia.....	10
Subsistema de generación	10
Subsistema de transmisión	11
Subsistema de distribución	11
Curva de la demanda eléctrica	11
Metodología	12
Software.....	12
PSCAD	12
Excel.....	13
Matlab	14
Python.....	14
Introducción	14
Librería de automatización	14
Aplicación a simulaciones	15

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

Uso del PSCAD para la modelización de redes	23
Distinción entre vista trifásica y monofásica	23
Componentes activos	23
Fuentes de tensión trifásicas.....	24
Componentes pasivos.....	25
Cargas	25
Líneas de transmisión.....	26
Cables enterrados	28
Elemento de medida.....	29
Modelos de PSCAD para redes de media y baja tensión	31
Red de baja tensión	31
Esquema unifilar y modelo en PSCAD	31
Conductores y tendido	34
Cargas	35
Red de media tensión	36
Esquema unifilar y modelo en PSCAD	36
Generación	39
Conductores y tendido.....	39
Cargas	40
Caso 1: Análisis de la red variando la carga.....	41
Parámetros de la simulación.....	41
Media tensión	41
Red de media tensión	42
Red de baja tensión	47
Obtención de los fasores.....	47

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

Cálculo del desequilibrio	48
Caso 2: Análisis de la red aplicando un cortocircuito de resistencia variable.....	51
Cortocircuito trifásico a tierra en el bus 1	51
Sobreintensidad por bus	52
Sobreintensidad respecto a la resistencia a tierra.....	53
Valor de la corriente de cortocircuito en función de la carga de la red	54
Conclusiones.....	54
Anexo I: Código de Python	56
Red de media tensión	56
Red de baja tensión	57
Red con cortocircuito.....	61
Anexo II: Código de Matlab	63
Cálculo de desequilibrio.....	63
Bibliografía.....	64

Ilustraciones

Ilustración 1: Tipos de cortocircuitos	9
Ilustración 2: Sistema de potencia con generación centralizada	10
Ilustración 3: Curvas de predicción, programación y demanda real para el 26/07/2020	12
Ilustración 4: Interacción del usuario con PSCAD a través de Python	15
Ilustración 5: Diagrama de flujo del script utilizado para las simulaciones	16
Ilustración 6: Cuadro de atributos de dos componentes distintos, donde se puede ver la clase	18
Ilustración 7: Cuadro de propiedades de un componente	19
Ilustración 8: Cuadro de ajustes del proyecto, resaltada en rojo la opción de guardar los resultados	21

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

Ilustración 9: Elemento utilizado para pasar de visualización unifilar a trifásica	23
Ilustración 10: Configuración y parámetros de una fuente de tensión	24
Ilustración 11: Parámetros de una carga fija a tierra	25
Ilustración 12: Parámetros de una carga fija entre dos líneas	25
Ilustración 13: Impedancias de distinto tipo	26
Ilustración 14: Herramienta desde donde se crean las líneas de transmisión	26
Ilustración 15: Configuración de una línea de transmisión	27
Ilustración 16: Herramienta desde la que se crean los cables	28
Ilustración 17: Elementos utilizados para la conexión remota de los dos extremos del cable.....	28
Ilustración 18: Configuración y nombramiento de las señales de un multímetro	29
Ilustración 19: Panel gráfico que muestra la variable "V1"	30
Ilustración 20: Modelo de BT en PSCAD	32
Ilustración 21: Esquema unifilar de BT	33
Ilustración 22: Posicionamiento de los cables.....	35
Ilustración 23: Modelo de MT en PSCAD.....	37
Ilustración 24: Esquema unifilar de MT	38
Ilustración 25: Tendido de MT	40
Ilustración 26: Descomposición de la tensión	43
Ilustración 27: Caída de tensión en el bus 5.....	45
Ilustración 28: Potencia disipada en la línea de transmisión G-1	46
Ilustración 29: Formas de onda de las tensiones por fase	47
Ilustración 30: Un sistema desequilibrado mostrado como la suma de las componentes positiva inversa y homopolar	49
Ilustración 31: Pico de intensidad provocado por un cortocircuito	52
Ilustración 32: Bajada de intensidad aguas abajo del cortocircuito	52
Ilustración 33: Corriente de cortocircuito en el bus 1 en función de la resistencia de cortocircuito	53
Ilustración 34: Corrientes de cortocircuito por fase	54

Tablas

Tabla 1: Características de los conductores BT	34
Tabla 2: Cargas trifásicas BT	35
Tabla 3: Cargas monofásicas BT	36
Tabla 4: Características de los conductores de MT	40
Tabla 5: Cargas trifásicas MT	41
Tabla 6: Resultados MT	42
Tabla 7: Caídas de tensión en MT.....	44
Tabla 8: Caída de tensión en porcentaje en MT.....	44
Tabla 10: Intensidades por bus en MT	45
Tabla 10: Potencia aparente disipada	46
Tabla 18: Desequilibrio en tensiones	50
Tabla 19: Desequilibrio en corrientes.....	51
Tabla 20: Intensidad por bus con y sin cortocircuito	52
Tabla 21: Corriente de cortocircuito por fase en función de la resistencia	53
Tabla 22: Variación de la intensidad con la carga	54

Ecuaciones

Ecuación 1: Radio del conductor	34
Ecuación 2: Potencia de cortocircuito	39
Ecuación 3: Impedancia de cortocircuito	39
Ecuación 4: Inductancia	39
Ecuación 5: Tensión de línea	43
Ecuación 6: Tensión a (proyección sobre el eje real)	43
Ecuación 7: Tensión r (proyección sobre el eje imaginario).....	43
Ecuación 8: Caída de tensión MT	43
Ecuación 9: Potencia aparente disipada	45
Ecuación 10: Descomposición de un sistema desequilibrado	49
Ecuación 11: Obtención de las componentes de las secuencias	49
Ecuación 12: Desequilibrio	50

Resumen

La gran cantidad de redes eléctricas existentes, así como la creciente complejidad de estas hace que las herramientas de cálculo de circuitos eléctricos como PSCAD/EMT cobren gran importancia. Este tipo de software hace mucho más fácil el estudio de los distintos escenarios que pueden darse en redes eléctricas.

En este trabajo se explorará la opción de utilizar una librería de Python para actuar sobre PSCAD, de forma que se pueden facilitar en gran medida los análisis que busquen realizar múltiples simulaciones (como podría ser un análisis de sensibilidad), variando distintos parámetros y observando como esto afecta a los resultados de las simulaciones.

En primer lugar, se hará un análisis del estado del arte, explorando aquellos conceptos que se tratan en las simulaciones. Seguidamente se trata el software y lenguaje de programación utilizados en el trabajo, en el apartado de metodología, donde también se discute la aplicación de estas herramientas a una serie de simulaciones.

Después, se incluyen varios apartados que tratan sobre el uso de PSCAD y los distintos componentes y herramientas que es necesario conocer para poder definir las redes de media y baja tensión que se explican a continuación. Una vez definidas las redes solo queda por exponer las distintas simulaciones a las que se les somete utilizando los conocimientos explicados previamente de control del programa mediante Python.

Por último, se incluyen las conclusiones del trabajo y los anexos, donde se pueden consultar los códigos de Python y Matlab utilizados durante la realización del trabajo.

Abstract

The vast amount of electrical power networks and its increasing complexity are making the tools oriented to solving circuits, such as PSCAD/EMTD, gain a lot of leverage against the traditional ways of solving circuits. This kind of software makes easier the study of the different scenarios that may occur on electrical power networks during its normal operation.

The purpose of this project is to assess whether it is advantageable to use a Python library to manipulate PSCAD, so that those analysis that require multiple simulations (such as a sensitivity analysis), varying a wide range of parameters, can be simpler.

First, an analysis of the state of the art will be made, exploring those concepts that are used in the simulations. Then the software and programming language are presented and applied to a series of simulations.

Next, there is an explanation of the different tools and components that are used on PSCAD to construct the two models that are afterwards presented. Then the different simulations that are carried out are discussed.

Finally, the conclusions of the project are included with the annexes, in which the Python and Matlab codes used during the simulations may be consulted.

Introducción

Motivaciones del proyecto

Este trabajo viene motivado por la dificultad existente en hacer análisis de sensibilidad de redes eléctricas de distribución en PSCAD de forma manual. Este tipo de análisis requiere ir cambiando uno o varios parámetros de la red con el fin de ver como el cambio en estos parámetros repercute en las variables de la red de interés.

Actuar sobre el programa mediante un script de Python da la comodidad de poder hacer decenas de simulaciones con la ejecución del programa, pudiendo además almacenar los datos que sean de interés tras cada simulación.

Estado del arte

Análisis EMT (Transitorios electromagnéticos)

Dada la gran complejidad de los sistemas de potencia actuales, así como de los elementos que los forman es importante la existencia de una metodología para el análisis en el dominio del tiempo de los distintos fenómenos que pueden darse.

Como indica Martínez-Velasco [1] se trata de sistemas que necesitan mantener un balance continuo entre cargas y generación, manteniendo la calidad del suministro en el proceso. Para conseguir este balance y calidad de servicio se dan conexiones y desconexiones de distintas cargas y generación, estas operaciones además de rayos y cortocircuitos dan lugar a transitorios electromagnéticos que requieren ser estudiados, para lo cual surge el análisis EMT¹.

Este análisis puede ayudar a detectar sobretensiones y sobrecorrientes, a las cuales se podría buscar soluciones a partir de los resultados del análisis.

Este tipo de análisis requiere más a nivel computacional que un análisis de estado estacionario, dado que requiere de la resolución de las ecuaciones diferenciales que surgen de las leyes fundamentales de los circuitos. Esto es una razón más por la que si

¹ Acrónimo inglés ElectroMagnetic Transient (transitorio electromagnético)

se automatizar las simulaciones es ventajoso dado que permite dejar el ordenador procesando durante mucho tiempo sin necesidad de supervisión.

Cortocircuitos en las redes eléctricas

Se trata de fenómenos que ocurren de forma extraordinaria y durante poco tiempo; sin embargo, tienen gran importancia pues pueden tener graves efectos tanto sobre la red eléctrica en la que este fenómeno se produce como sobre las cargas que se conectan e incluso en casos extremos sobre la salud de las personas. Es por esto por lo que las protecciones que se colocan en las redes son muy importantes, pues ayudan a mitigar el daño que los cortocircuitos son capaces de producir.

Según indica [2] existen 5 tipos de cortocircuitos que pueden darse en un sistema eléctrico de potencia:

- Trifásico.
- Bifásico sin contacto a tierra.
- Bifásico con contacto a tierra.
- Monofásico a tierra.
- Con doble contacto a tierra.

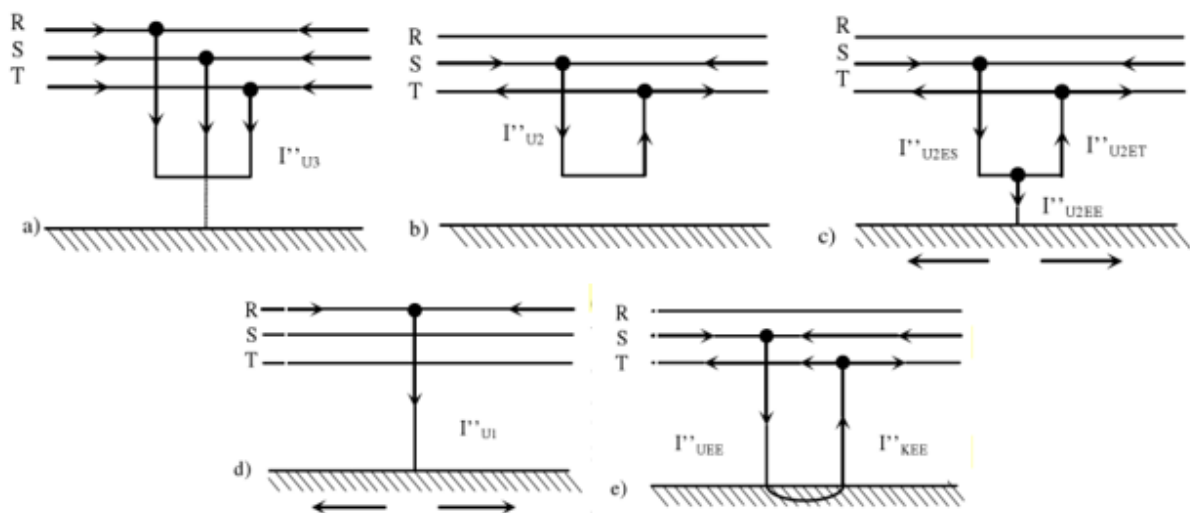


Ilustración 1: Tipos de cortocircuitos

En PSCAD se puede simular todo el espectro de cortocircuitos, excepto el último que ya de por sí existen muy pocas posibilidades de que ocurra. Este último podría llegar a

simularse con dos elementos tipo “fault” pero como he indicado previamente no es un caso de gran interés.

Los cortocircuitos trifásicos afectan a todas las fases de la misma manera, comportándose como un sistema en equilibrio. Son los más fáciles de estudiar y además, uno de los más importantes dado que pueden ser muy perjudiciales para la red.

Los cortocircuitos de una sola fase a tierra pueden considerarse los más comunes y su estudio es algo más complejo que el del cortocircuito trifásico, pues supone la necesidad de utilizar las redes de secuencia directa, inversa y homopolar.

Sistema eléctrico de potencia

Un sistema eléctrico de potencia tiene como objetivo la generación y transporte de energía eléctrica para suplir la demanda en los puntos de consumo. La subdivisión más simple que se puede hacer es generación, transporte y distribución [3].

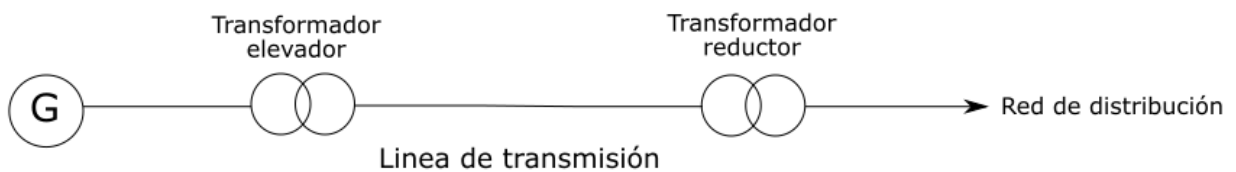


Ilustración 2: Sistema de potencia con generación centralizada

La ilustración 2 muestra una simplificación del sistema eléctrico centralizado que impera en gran parte de los sistemas eléctricos mundiales. Consiste en la generación centralizada de energía eléctrica en grandes cantidades y su posterior transporte y distribución mediante líneas de corriente alterna.

Subsistema de generación

Responsable de la generación de energía eléctrica, que tiene como objetivo ajustarse a la demanda eléctrica de los consumidores. Existen muchos métodos de generación de electricidad, los tradicionales comprenden la generación a partir de combustibles

fósiles, la hidroeléctrica y la nuclear. Las nuevas tecnologías están desplazando a las antiguas gracias a la búsqueda de un sistema energético más limpio, lo que está suponiendo el paso de una generación centralizada a una más distribuida.

Subsistema de transmisión

Su principal cometido es aportar la infraestructura necesaria para el transporte de la energía eléctrica requerida en los puntos de consumo. La red ha de estar correctamente dimensionada para asegurar la calidad y ha de disponer de las protecciones necesarias para evitar los daños que pueden provocar efectos transitorios en la red.

Subsistema de distribución

Se le considera el lazo entre el sistema y los clientes. Tiene cierto parecido con la transmisión, pero las redes de distribución trabajan a menor tensión y con menores distancias que las líneas de transmisión que parten de los generadores. Se puede distinguir entre líneas de distribución de baja tensión y media tensión en función de la tensión a la que se está distribuyendo. Las de baja tensión suelen utilizarse para llegar a consumidores urbanos y las de media tensión para llegar a industrias, que generalmente tienen consumos mayores.

El diseño de los elementos que componen los sistemas de potencia se basa en parte en software con el que se pueden simular diferentes escenarios con el fin de optimizar el diseño final de la red.

El auge de las nuevas tecnologías está transformando el sistema eléctrico de potencia que conocíamos y es por ello por lo que encontrar una forma más cómoda de simular múltiples escenarios es de gran interés.

Curva de la demanda eléctrica

La curva de la demanda eléctrica describe de forma gráfica la variación de la energía eléctrica requerida por el sistema. Red Eléctrica Española (REE) hace previsiones de la curva de la demanda eléctrica de cada día, basándose en la demanda de días parecidos de años anteriores y añadiendo ciertos factores para su corrección como pueden ser la laboralidad, la climatología y la actividad económica.

La curva que traza Red Eléctrica como previsión sirve para hacer la programación diaria operativa que consiste en una planificación de la producción para los distintos grupos de generación eléctrica a los que se les ha adjudicado el suministro de energía en el mercado. En caso de desvío sobre la curva previsión se adjudicará la producción a través de los mercados de desvíos y regulación terciaria.

Es debido a la demanda variable por lo que en el trabajo realizado se experimenta con distintos escenarios de carga en la red. [4]

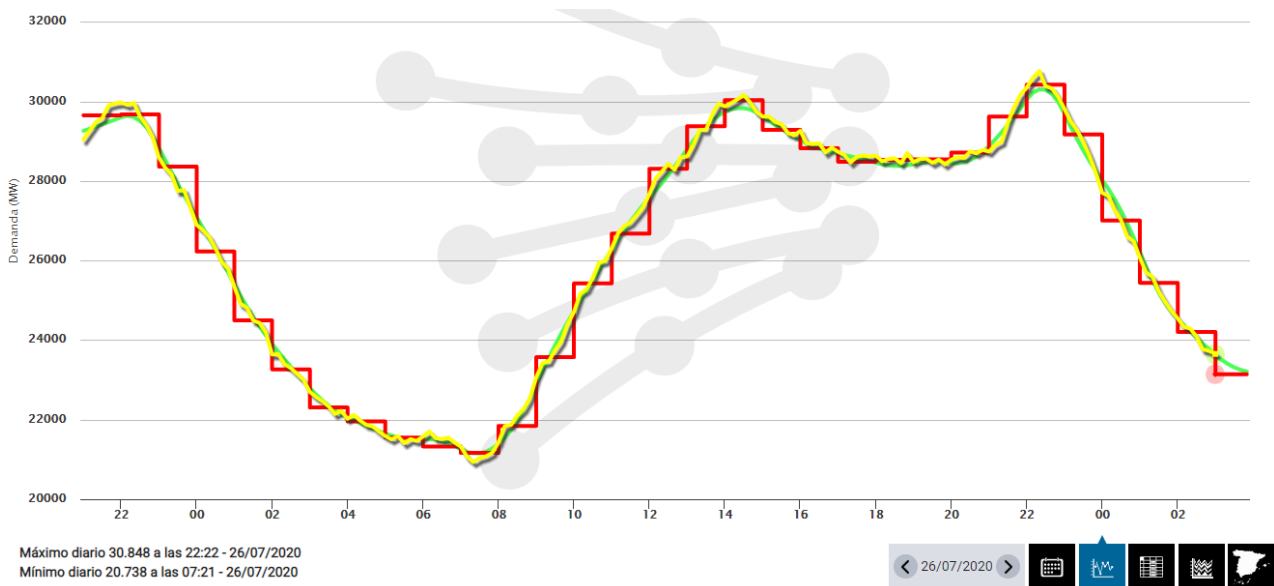


Ilustración 3: Curvas de predicción, programación y demanda real para el 26/07/2020

Metodología

Software

PSCAD

Introducción

PSCAD es una herramienta para el análisis de transitorios electromagnéticos (EMT) que permite crear y simular en el dominio del tiempo distintos modelos de sistemas de potencia. Permite la creación de modelos de gran nivel de detalle de líneas de transporte y cables aislados, así como de turbinas eólicas de distintos tipos y módulos fotovoltaicos que pueden ser analizados en el dominio del tiempo gracias a PSCAD.

También permite recrear maniobras en sistemas de potencia mediante breakers² y simular cortocircuitos a fin de ver como el sistema se comporta dado que es importante para las protecciones. A su vez se pueden variar algunos parámetros de forma manual durante la simulación mediante botones, diales y controles deslizantes.

Uso de PSCAD para análisis en estado estacionario

A pesar de que PSCAD es una herramienta ideada para hacer análisis de transitorios (de ahí que simule en el dominio del tiempo) se puede utilizar en ciertas ocasiones para el análisis en estado estacionario de flujos de carga. En caso de tener una red pasiva conectada a un bus tipo *slack*³ PSCAD se pueden hacer este tipo de análisis sin necesidad de ningún programa que haga análisis de tipo PSS⁴.

Para hacer un análisis de flujo de cargas en PSCAD lo único que se debe hacer es simular un tiempo suficiente para que los valores del sistema a analizar se estabilicen, de esta forma podemos tomar ese valor una vez estabilizado como el de estado estacionario.

En caso de incluirse en el sistema buses de generación tipo PV se requerirá de un análisis previo de tipo PSS de forma que se puedan dar el ángulo de desfase de cada generador, así como su potencia activa y aparente iniciales. Viene detallado en [5]

Excel

Se utilizará Excel para el tratamiento de los datos. Una vez pasados con Python los datos de interés a un documento “txt” solo habrá que abrir el documento con Excel. Se ha de indicar la posición de las columnas al programa, así como el formato del separador de decimales, una vez hecho esto, dado el formato con el que se ha pasado los datos al “txt” Excel no tendrá problema en abrir el documento.

Después se debe asociar cada valor a su columna, lo que a veces puede ser problemático porque no se ordenan de forma intuitiva y hay que obtener la relación entre variable y evolución temporal almacenada en el fichero de salida.

² Interruptor sobre el que se puede actuar durante la ejecución del programa.

³ Bus utilizado para balancear la potencia activa y reactiva al realizar estudios de flujos de potencia.

⁴ Acrónimo inglés para Periodical Steady-State (estado estacionario)

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

Una vez asociado cada dato a la variable a la que se refiere se pueden crear todo tipo de gráficos para mostrar como diferentes variables cambian al modificar los parámetros del sistema de potencia.

Matlab

Matlab es un programa utilizado para múltiples aplicaciones. En este caso su utilidad reside en el fácil manejo de las matrices en esta herramienta, que se prueba de gran utilidad a la hora de observar los desequilibrios en las redes, dado que exige el uso de matrices si se quiere hacer de una forma fácil.

Python también permite el uso de matrices, y manipular ficheros Excel. Sin embargo, Matlab permite su uso de forma mucho más simple, incluyendo que se trabaja con números complejos de forma muy sencilla comparado con Excel. Matlab es una herramienta muy fuerte en estos aspectos y compensa el hecho de tener que exportar los datos desde Python que es donde se llevan a cabo la mayor parte de los cálculos.

Python

Introducción

Python es un lenguaje de programación que ha sido utilizado para automatizar el proceso de simulaciones. Se trata de un lenguaje de programación interpretado y que por lo tanto no necesita compilación previa a su ejecución. Además, Python puede considerarse como un lenguaje muy *user-friendly* dado que el código es muy intuitivo si se tiene cierto nivel de inglés. Se trata del lenguaje ideal para esta aplicación dada la existencia de una librería de Python que permite alterar parámetros y hacer simulaciones en PSCAD.

Además, Python se puede utilizar para el tratamiento de datos en formato “.txt”, permitiendo modificar archivos de este tipo, así como leerlos. De esta forma se podrá leer los archivos que produce el programa durante la simulación donde se encuentran los resultados y posteriormente pasar a otro archivo los datos de interés.

Librería de automatización

Además de existir la librería estándar de Python, que son el conjunto de módulos que vienen instalados con el propio Python, existe una grandísima cantidad de librerías

creadas por empresas o por la propia comunidad de Python que facilitan el uso de este lenguaje de programación en distintos ámbitos o para distintos objetivos.

En este caso la librería utilizada es una creada por los desarrolladores de PSCAD que permite manejar algunos aspectos del programa a través de un script, con el fin de permitir la automatización de simulaciones, que manualmente supone mucho más tiempo. Alguna de las acciones que facilita esta librería son:

- Ejecutar PSCAD.
- Cargar proyectos.
- Ejecutar simulaciones.
- Hacer cambios en la red a estudiar: en componentes o líneas de transmisión.

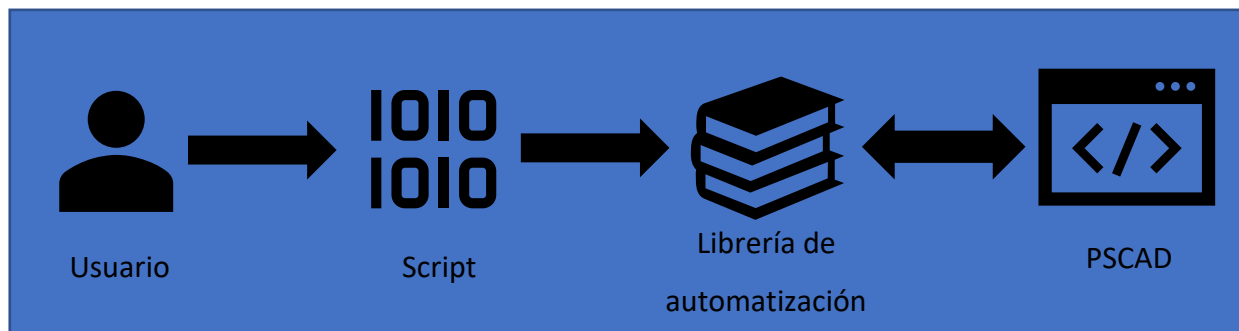


Ilustración 4: Interacción del usuario con PSCAD a través de Python

Normalmente la instalación de una librería de Python se hace a través del propio lenguaje en la cmd, ejecutando un comando de instalación (pip install) sin embargo, la instalación de esta librería es muy fácil dado que el descargable que se encuentra en la página web [6] dispone de un instalador. El resto de módulos que no están en la librería estándar de Python como pueden ser “scipy” o “numpy”, para facilitar los cálculos. También puede utilizarse “matplotlib” para hacer los gráficos, aunque en su gran mayoría se han hecho con Excel.

Aplicación a simulaciones

La librería de automatización [7] que PSCAD facilita para interferir en el programa mediante Python se demuestra muy útil para la realización de una serie de simulaciones entre las que solo varían uno o varios parámetros.

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

A través de Python se puede cambiar todos los parámetros de los componentes de un sistema de potencia que se esté simulando en PSCAD, en la mayoría de los casos el procedimiento para este cambio es el mismo con pequeñas variaciones dependiendo del tipo de componente a modificar. Sin embargo, el proceso general de la simulación no varía:

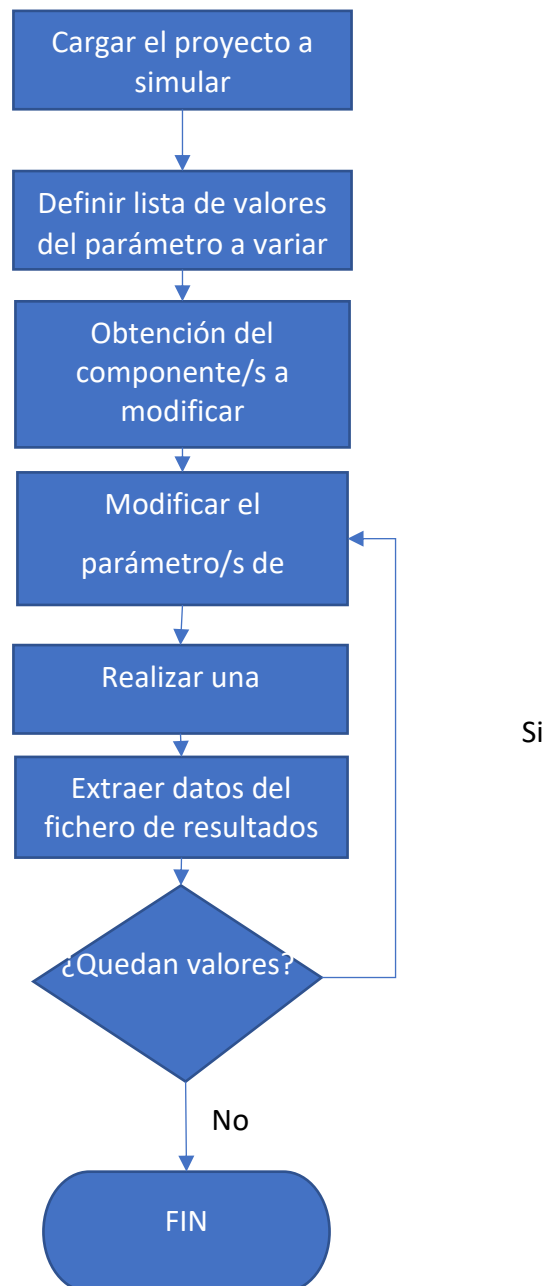


Ilustración 5: Diagrama de flujo del script utilizado para las simulaciones

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

Carga del proyecto

En este primer paso se ejecuta el programa y posteriormente se carga el workspace en el cual se quiere realizar la simulación. Inmediatamente después se carga el proyecto en el que se encuentra el sistema de potencia que queremos simular.

```
import sys, os
import mhrc.automation
from mhrc.automation.utilities.file import File #Importa las librerías utilizadas
pscad = mhrc.automation.launch_pscad()         #Inicia PSCAD
pscad.load(r"RUTADELWORKSPACE")               #Carga el workspace cuya ruta es
                                                #RUTADELWORKSPACE
workspace=pscad.workspace()                    #Obtiene el objeto para referirse al
                                                #workspace
proyecto =workspace.project('PROYECTO')       #Obtiene el objeto para referirse al
                                                #proyecto de nombre PROYECTO
```

Obtención del componente

Previo a seleccionar el componente se debe obtener el objeto correspondiente al canvas donde se encuentra el componente.

```
main = proyecto.user_canvas('Main')           #Obtiene el objeto para referirse al
                                                #canvas
```

A la hora de obtener el componente como un objeto en Python sobre el que poder actuar se han de tener en cuenta dos cosas: la clase de este y su id. Ambos pueden ser vistos en los atributos del componente.

La clase de un componente distingue entre dos tipos de componentes:

1. Aquellos que son propios del PSCAD y tienen una clase específica, como puede ser un cable o una línea de transmisión. La clase se corresponderá con el componente del que se trate e.g. una línea de transmisión será de la clase "TLine".

ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

- Componentes cuyas descripciones son leídas por PSCAD de una librería de componentes. Este es el caso más común y su clase será "UserCmp".

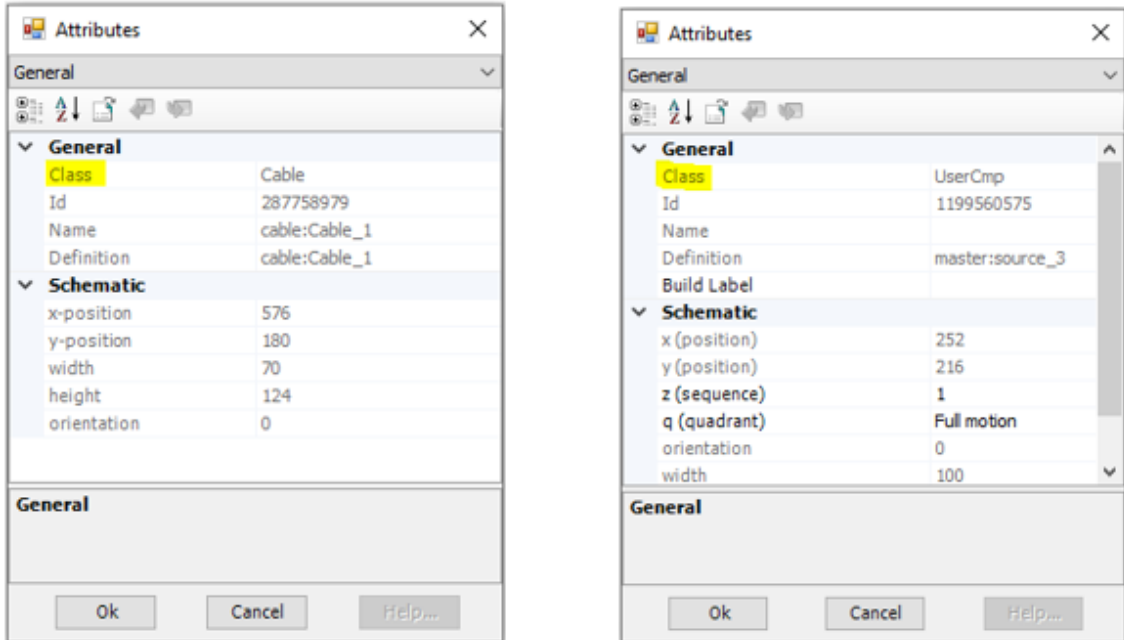


Ilustración 6: Cuadro de atributos de dos componentes distintos, donde se puede ver la clase

Una vez conocida la clase del componente solo tenemos que ver su Id, que también está en la ventana de atributos, para poder obtener el componente en Python.

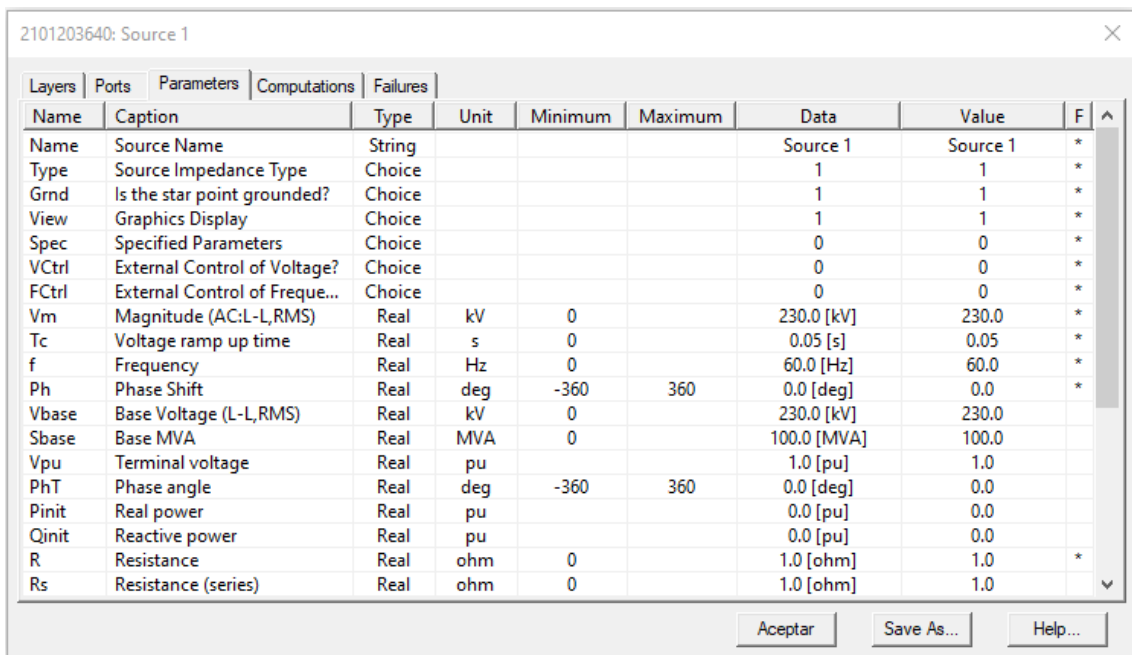
```

componente=main.user_cmp(ID)           #Obtiene el objeto para referirse al
componente=main.CLASE (ID)            #componente de id=ID y de clase usercmp
                                       #Obtiene el objeto para referirse al
                                       #componente de id=ID y de clase CLASE
                                       #(CLASE ha de estar en minusculas)
    
```

Modificación del parámetro

Para la modificación del parámetro hace falta en primer lugar conocer el nombre por el que debemos referirnos al parámetro que debemos modificar. Todos los atributos modificables de nuestro componente pueden verse en las propiedades de este, a las que se puede acceder desde el propio programa.

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON



Name	Caption	Type	Unit	Minimum	Maximum	Data	Value	F
Name	Source Name	String				Source 1	Source 1	*
Type	Source Impedance Type	Choice				1	1	*
Grnd	Is the star point grounded?	Choice				1	1	*
View	Graphics Display	Choice				1	1	*
Spec	Specified Parameters	Choice				0	0	*
VCtrl	External Control of Voltage?	Choice				0	0	*
FCtrl	External Control of Freque...	Choice				0	0	*
Vm	Magnitude (AC:L-L,RMS)	Real	kV	0		230.0 [kV]	230.0	*
Tc	Voltage ramp up time	Real	s	0		0.05 [s]	0.05	*
f	Frequency	Real	Hz	0		60.0 [Hz]	60.0	*
Ph	Phase Shift	Real	deg	-360	360	0.0 [deg]	0.0	*
Vbase	Base Voltage (L-L,RMS)	Real	kV	0		230.0 [kV]	230.0	
Sbase	Base MVA	Real	MVA	0		100.0 [MVA]	100.0	
Vpu	Terminal voltage	Real	pu			1.0 [pu]	1.0	
PhT	Phase angle	Real	deg	-360	360	0.0 [deg]	0.0	
Pinit	Real power	Real	pu			0.0 [pu]	0.0	
Qinit	Reactive power	Real	pu			0.0 [pu]	0.0	
R	Resistance	Real	ohm	0		1.0 [ohm]	1.0	*
Rs	Resistance (series)	Real	ohm	0		1.0 [ohm]	1.0	

Ilustración 7: Cuadro de propiedades de un componente

En la figura superior se observa el cuadro de propiedades correspondiente a un generador. El nombre que necesitamos para cambiar el parámetro desde Python será el que aparece en la columna “Name”, siendo la siguiente columna la descripción de este parámetro. Se observa que existe dos tipos de propiedades:

1. Propiedades que requieren una entrada de elección e.g. el control externo de la tensión (0 en caso de no, 1 en caso de sí)
2. Propiedades que requieren como entrada un número real. Este tipo de propiedades normalmente no están restringidas, pero algunas tienen un mínimo y un máximo e.g. el desfase. Es importante fijarse en las unidades que se especifican para evitar errores en la entrada de datos desde el programa.

Una vez conocido el nombre del parámetro que se desea variar ya podemos hacer el cambio.

```

componente.set_parameters (NAME=i)           #Estable el valor del parámetro
                                             #referido como NAME al valor i
    
```

Simulación del escenario

Una vez realizados los cambios deseados ya se puede correr la simulación.

```
power_system.run () #Simula el proyecto
```

Extracción de datos

Una vez simulado el sistema de potencia PSCAD genera un archivo que tendrá el nombre elegido por el usuario y del cual se podrán obtener los datos deseados de la simulación.

El archivo de salida es del tipo “.out”, siendo un archivo de texto. En este archivo de texto habrá una serie de columnas. La primera columna siempre será correspondiente al tiempo mientras que el resto se referirán a las diferentes salidas que existan en el proyecto. Sin embargo, la colocación de los datos en columnas no sigue un orden específico, sino que hay que referirse al archivo del mismo nombre, pero de extensión “.inf” en el que se especifica el orden de los datos que se muestran en el documento de salida.

A pesar de que la colocación de los datos no sigue un orden específico, esta se mantendrá igual mientras no se añadan nuevas salidas, por lo tanto, con comprobar una vez el orden en el “.inf” podemos saber el orden de los datos para la serie de simulaciones que deseamos realizar.

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

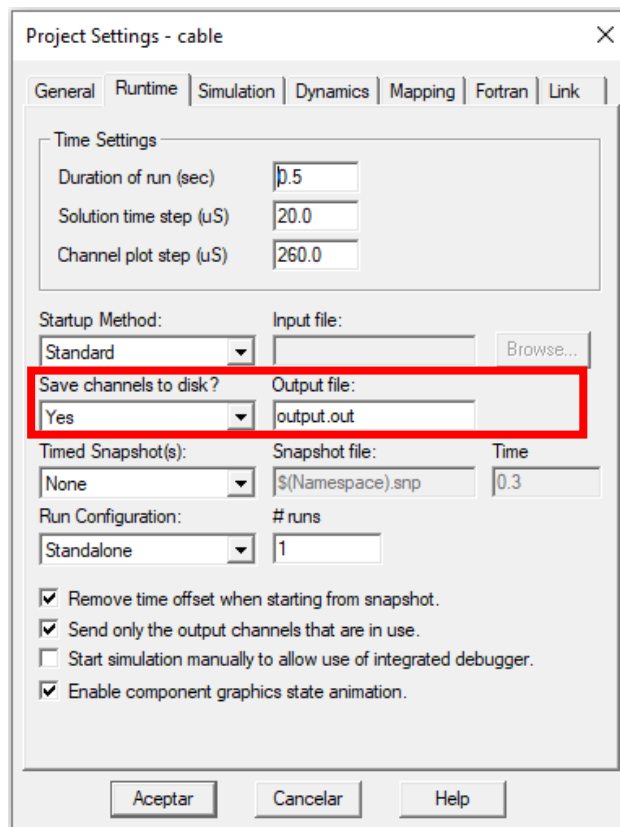


Ilustración 8: Cuadro de ajustes del proyecto, resaltada en rojo la opción de guardar los resultados

Para la lectura de este archivo y la extracción de información de este se utilizarán las librerías “sys” y “os” para navegar por el explorador de archivos y crear carpetas donde guardar los datos. Los datos se extraerán a Python y también se guardará una copia del archivo de salida para cada simulación.

Del archivo de salida se pueden obtener los datos de interés, ya sea una serie de valores para diferentes momentos en el tiempo o un solo valor para cierto tiempo, como se muestra en el ejemplo a continuación.

En caso de que hubiera múltiples datos de salida (valor1, valor2) habría que mirar previamente en el archivo “.inf” el orden para saber que elemento de la lista asignar a cada valor. El archivo “.inf” se generará con cualquier simulación así que se puede hacer una simulación manual para comprobarlo antes de hacer la serie de simulaciones con Python.

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

Se generará un archivo de salida por cada 10 valores de salida, de forma que el primero se llamará “nombredelcircuitosimulado_01”, el segundo “nombredelcircuitosimulado_02” y así sucesivamente.

```
src_folder=r"RUTA CARPETA DE SALIDA DE PSCAD"
dst_folder=r"RUTA CARPETA DE RESULTADOS"
folder = os.path.join(dst_folder, "NOMBRETEST") #Crea carpeta dentro de la
                                                #carpera de resultados para este test
File.move_files(src_folder, folder, ".out", ".inf") #Mueve los archivos de salida a la
                                                #carpeta del test
#Se abre el archivo de salida y se obtienen los valores en una lista en Python
#Por ejemplo vamos a obtener el valor del primer output del proyecto para la muestra 500
#La muestra 500 corresponde con t=500 veces el paso de tiempo seleccionado
f=open(r"RUTA ARCHIVO DE SALIDA .out")
valor=[]
for j, linea in enumerate(f):
    if j<502:
        continue
    elif j==502:
        a=linea
    else:
        break
l=a.split()
valor.append(l[1])
```

Almacenamiento de datos de un instante de tiempo concreto en “txt”

Se puede copiar el archivo obtenido de PSCAD completo como se hace en el anterior trozo de código, pero también puede almacenarse datos referidos a un tiempo concreto.

Una vez extraídos los datos del archivo de salida generado por PSCAD (que generalmente serán varios) se procede a escribirlos en un txt con el objetivo de luego poder acceder a ellos desde Excel sin necesidad de hacer modificaciones.

El formato elegido será estructurar el txt de forma que cada parámetro represente una columna y cada simulación una fila. Todas las columnas estarán separadas una distancia igual dado que los valores extraídos de PSCAD siempre tienen el mismo número de decimales, solo habrá una pequeña variación en caso de un signo negativo, pero no afectará al pasar los datos a Excel puesto que la separación entre columnas es suficiente.

```
f = open ('resultados.txt', 'a')
for n in l:
    f.write(n+" ")
f.write("\n")
```

Uso del PSCAD para la modelización de redes

En primer lugar, para el uso de PSCAD, habrá que modelizar las redes que interesa estudiar, para lo cual habrá que introducir una serie de elementos y componentes que aparecen normalmente en redes.

Distinción entre vista trifásica y monofásica

Gran parte de los elementos trifásicos que se pueden encontrar en PSCAD pueden verse bien de forma unifilar o mostrando los 3 hilos. El hecho de que el programa permita no solo la vista unifilar sino también la de todas las fases hace que se puedan conectar cargas a una sola fase o entre dos fases, además de permitir medidas en cada una de las fases en caso de tratarse de una red desequilibrada.

Teniendo esto en cuenta existirán cables que representen una línea trifásica y otros una sola línea, para pasar de uno a otro existe un elemento:

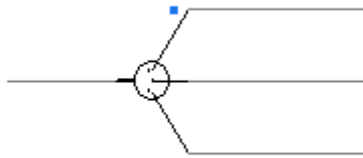


Ilustración 9: Elemento utilizado para pasar de visualización unifilar a trifásica

Componentes activos

En cuanto a componentes activos lo más destacable son las fuentes de tensión, las cuales pueden ser trifásicas o monofásicas. Como para las aplicaciones que más nos interesan de este programa es en sistemas de potencia nos centraremos en las fuentes de tensión trifásicas.

También pueden modelarse fuentes de corriente monofásicas.

Fuentes de tensión trifásicas

Existen diferentes modelos de fuentes de tensión trifásicas dentro de PSCAD, la de mayor interés, por su simplicidad, será la “*Three Phase Voltage Source Model 2*” que permite definir las siguientes características:

1. Tipo y magnitud de la impedancia (resistiva, R-R//L, R-L-C, inductiva, capacitiva o ideal), la magnitud se marca en la pestaña correspondiente al tipo de impedancia especificado.
2. Magnitud de la tensión compuesta (en valor eficaz).
3. Tiempo que tarda en alcanzar el valor de tensión especificado.
4. Frecuencia de la fuente.
5. Desfase.

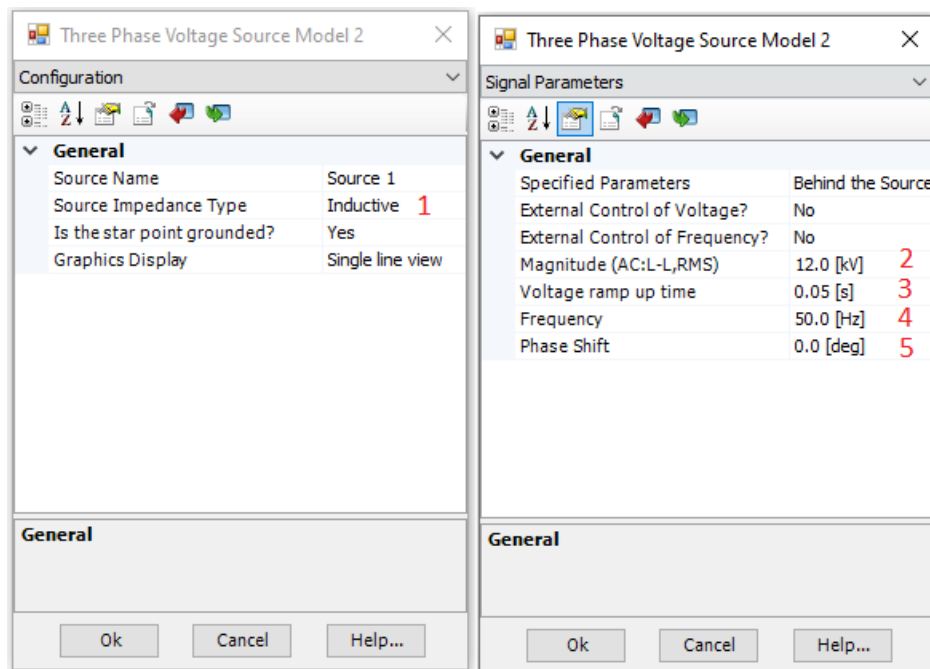


Ilustración 10: Configuración y parámetros de una fuente de tensión

También permite el control externo de la magnitud de la tensión y la frecuencia, que se podría hacer a través de controles como sliders o diales.

Arriba se describe los parámetros a variar en caso de ser especificados detrás de la impedancia de fase.

Componentes pasivos

La mayor parte de los elementos que componen una red son pasivos, como por ejemplo los cables, las líneas de transmisión y las cargas.

Cargas

Las cargas se pueden modelar de dos formas en PSCAD: como una impedancia o como un consumo fijo de potencia. Dependiendo de la aplicación las cargas se modelarán de una forma u otra.

Consumo fijo de potencia

Este tipo de cargas son muy útiles si lo que se quiere modelar es una red que da suministro a varios clientes con un consumo fijo de potencia. Pueden ser tanto de línea a tierra como de línea a línea. Las características que se deben fijar son:

1. Potencia activa por fase.
2. Potencia reactiva por fase.
3. Tensión de fase de trabajo.
4. Frecuencia.

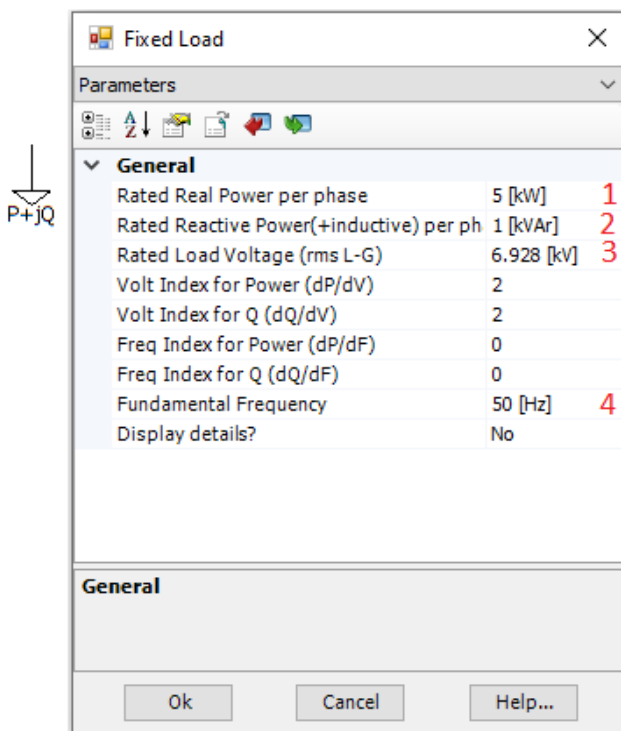


Ilustración 11: Parámetros de una carga fija a tierra

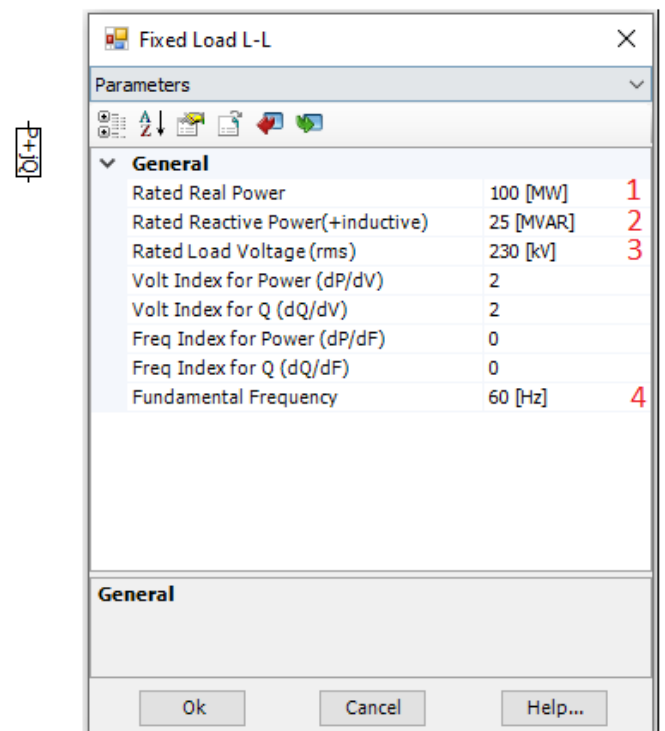


Ilustración 12: Parámetros de una carga fija entre dos líneas

Este tipo de cargas puede ser tanto monofásica como trifásica.

Impedancias

En este tipo de cargas se pone la impedancia en lugar de la potencia consumida. Se puede poner un valor fijo o puede variarse a través de un elemento de control durante

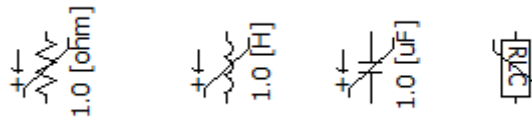


Ilustración 13: Impedancias de distinto tipo

la simulación.

Líneas de transmisión

Las líneas de transmisión permiten una modelización con gran grado de detalle en PSCAD. En primer lugar, para colocar una línea de transmisión se ha de crear una nueva línea de transmisión a través del “Component Wizard”, siendo las líneas junto a los cables el único tipo de componentes que requieren ser creados desde ahí.

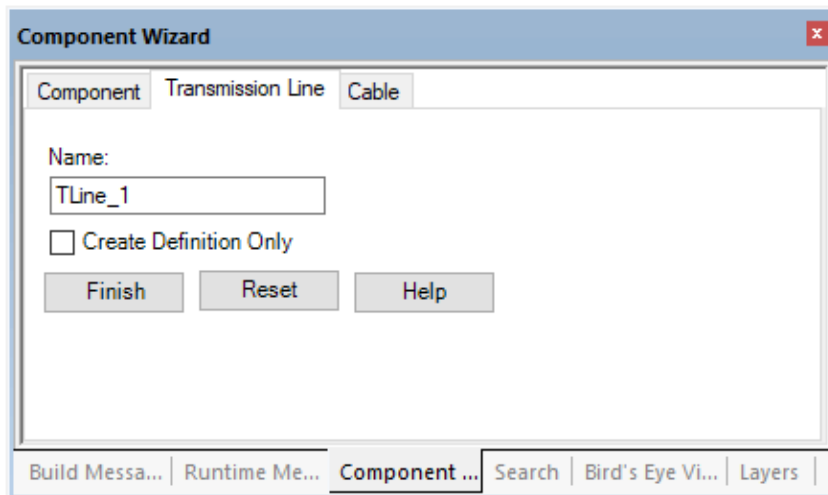


Ilustración 14: Herramienta desde donde se crean las líneas de transmisión

Haciendo clic derecho sobre el elemento creado se pueden cambiar algunos de sus parámetros:

1. La frecuencia de trabajo
2. La longitud de la línea

3. Elección entre conexión local o remota. La conexión remota supone la creación de dos elementos que actuarán como inicio y final de la línea llamados “*Tline interface*” que deben tener el mismo nombre que la línea de transmisión cuyos extremos representa, mientras que la conexión local permite utilizar el propio elemento “*Tline*” como línea de transmisión, conectándose el resto de los elementos a este.

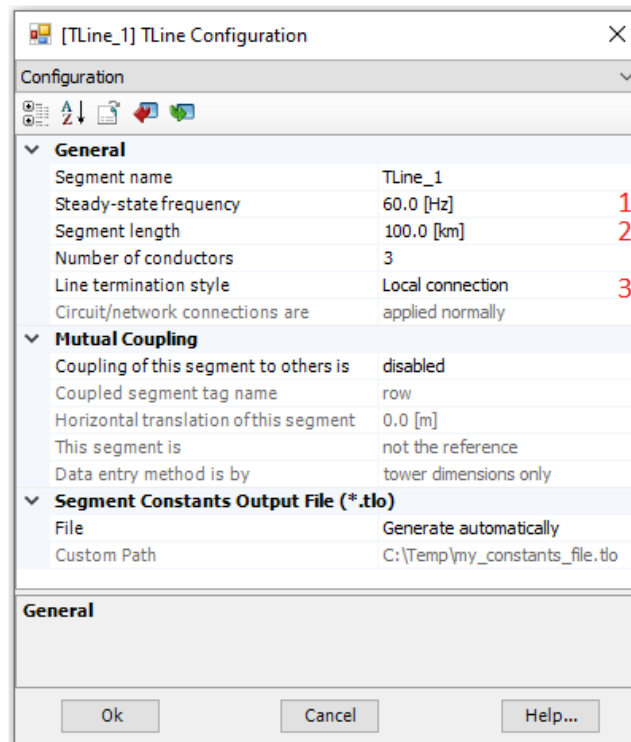


Ilustración 15: Configuración de una línea de transmisión

También se han de elegir el número de conductores eléctricamente conectados. Una vez establecidos estos parámetros, haciendo doble clic sobre la línea de transmisión entramos a una nueva pantalla donde se puede elegir:

1. Modelo de cálculo de la línea de transmisión (modelo Bergeon o modelo dependiente de la frecuencia)
2. Resistividad del suelo.
3. Geometría de la línea; en la que se especifica el número de conductores, el número de cables de tierra, la altura de los conductores, su separación y la geometría del propio conductor.

Cables enterrados

Además de permitir modelar líneas aéreas de transmisión, PSCAD aporta una herramienta para la creación de cables enterrados. Esta funciona de manera similar a

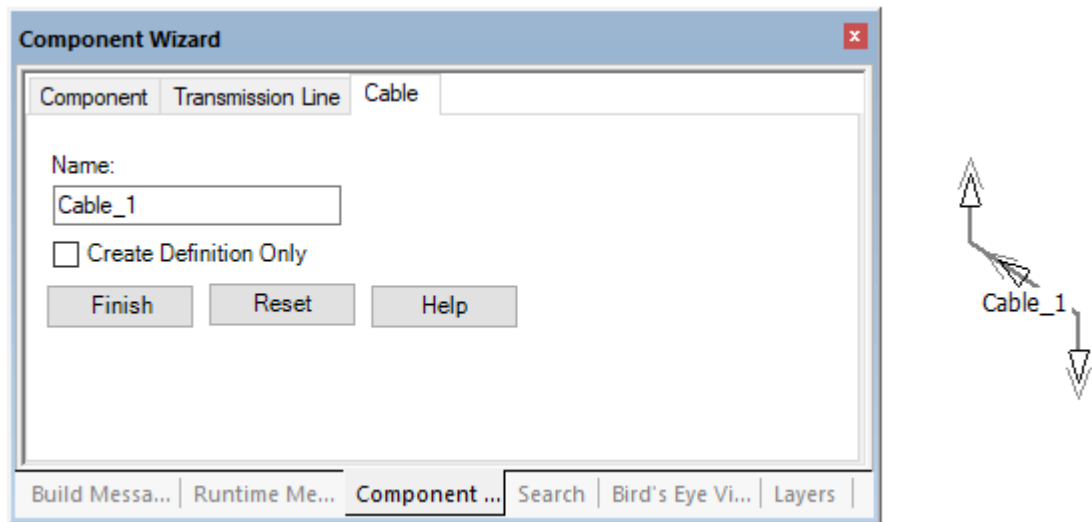


Ilustración 16: Herramienta desde la que se crean los cables

las líneas de transmisión, teniendo que crearse cada cable desde el “Component Wizard”:

Haciendo clic derecho sobre el elemento creado se pueden variar algunos de sus parámetros, de igual forma que en las líneas de transmisión, exceptuando el hecho de que no permite conexión local en lugar de conexión remota, siendo por lo tanto obligatorio el uso de dos elementos “Cable Interface”.

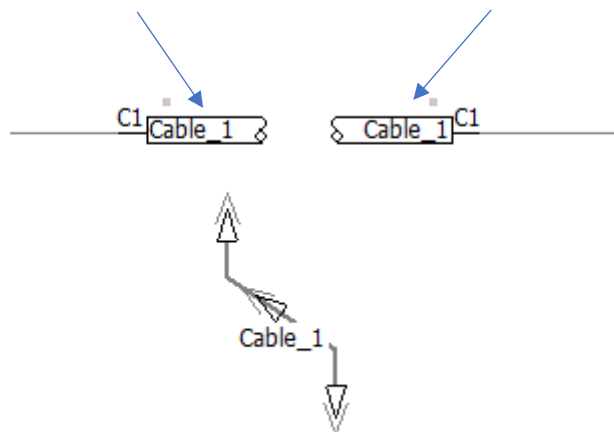


Ilustración 17: Elementos utilizados para la conexión remota de los dos extremos del cable

Al igual que en las líneas de transmisión al hacer doble clic sobre el elemento se entra a otra interfaz donde se puede cambiar la geometría, el modelo de cálculo y las características del suelo.

Elemento de medida

Existe un elemento de medida que engloba al resto que se pueden encontrar en el programa y permite la medida de las siguientes variables de la red, ordenadas según vienen en la configuración del elemento:

1. Tensión instantánea (forma de onda).
2. Corriente instantánea (forma de onda).
3. Flujo de potencia activa.
4. Flujo de potencia reactiva.
5. Valor eficaz de la tensión de línea.
6. Valor eficaz de la corriente de línea.
7. Ángulo de desfase de la tensión.

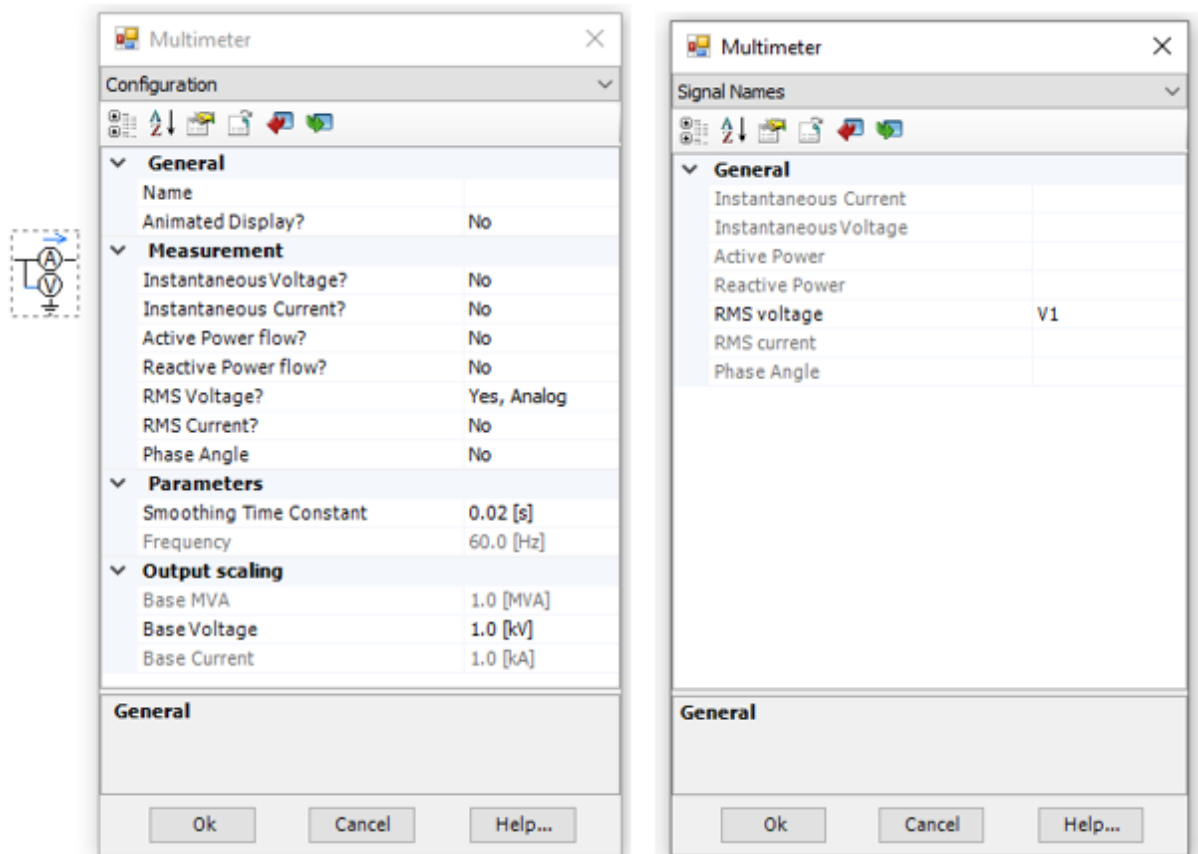


Ilustración 18: Configuración y nombramiento de las señales de un multímetro

De forma predeterminada los valores que se obtienen de este elemento están en MVA, kV y kA. Una vez se selecciona que valores se desean obtener hay que darle un nombre a cada señal, por ejemplo, a la tensión eficaz se le puede dar el nombre de "V1".

Realización de una medida en PSCAD

Una vez se ha indicado en el multímetro que valor se quiere medir y el nombre que se le asigna a la señal lo único que queda hacer es enviar esta señal a un canal de salida o "Output Channel" que guardará los valores de esta señal para cada momento del tiempo en el documento de salida.

En el canal de salida se puede configurar la escala que se le quiere dar a la señal, en caso de querer obtenerla en V en lugar de kV o en otra unidad de medida. Si se quiere graficar la señal se puede hacer a través de un panel gráfico o "Graph Pane":

1. Primero se añade un "overlay graph" en el panel gráfico.
2. Después se copia la curva del output channel en "Add as curve".
3. Finalmente se pega la curva en el gráfico creado.

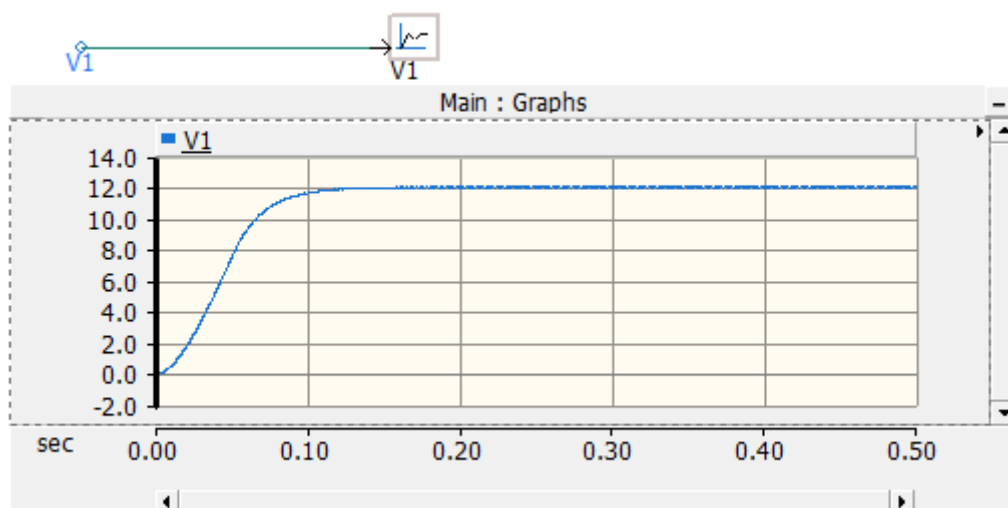


Ilustración 19: Panel gráfico que muestra la variable "V1"

Modelos de PSCAD para redes de media y baja tensión

Red de baja tensión

El modelo que es utilizado para el estudio no corresponde a un caso real, dada la gran complejidad que se presenta al pasar la realidad a PSCAD. En lugar de tomar un caso real se ha creado una red de distribución bastante simple y se han adaptado sus valores a los de una red de Viesgo.

Esquema unifilar y modelo en PSCAD

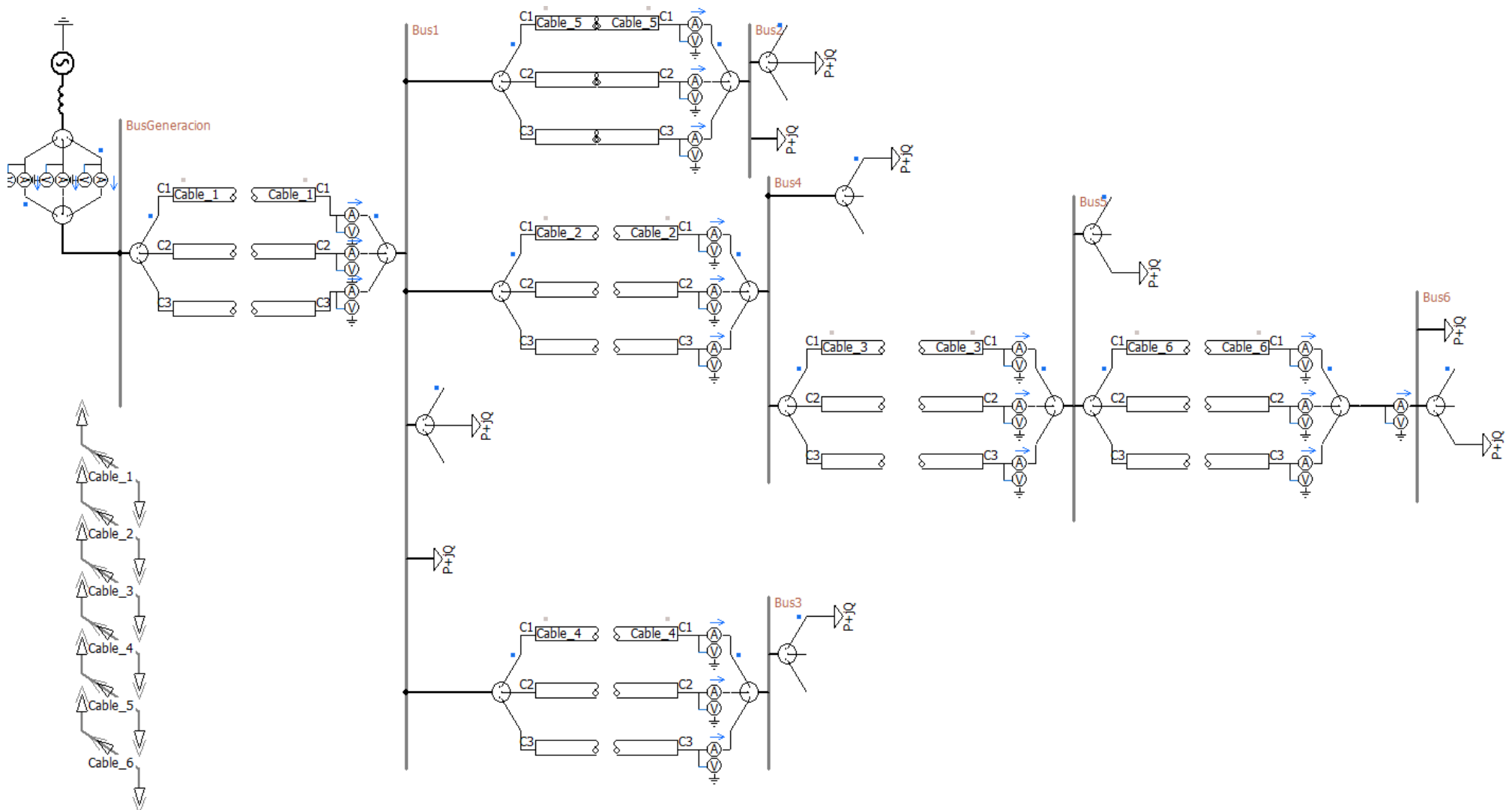


Ilustración 20: Modelo de BT en PSCAD

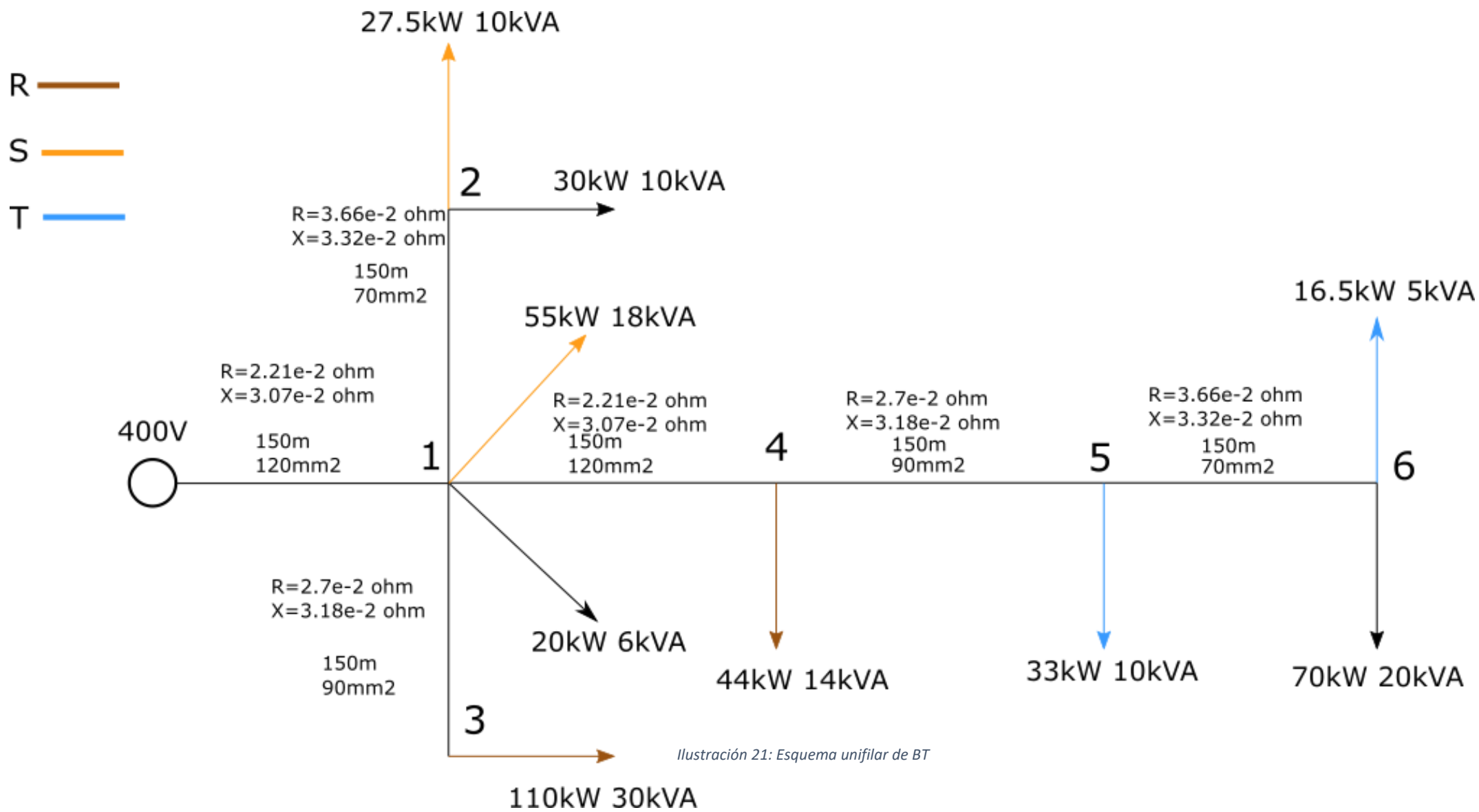


Ilustración 21: Esquema unifilar de BT

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

Conductores y tendido

A fin de que la simulación sea lo más veraz posible se ha decidido tomar que las líneas sean conductores enterrados, como podría ser en una ciudad. Los conductores **IRAM NM 247-3** son los modelados⁵, pues son utilizados por Viesgo en sus instalaciones. Son del tipo **H07V-K** que se corresponden a cables flexibles de cobre recocido compuesto por alambres (clase 5 según UNE EN 60228:2005 [8]). Para conductores enterrados PSCAD pide la entrada de su geometría y resistividad, así como la permitividad relativa del aislante.

Como indica la norma UNE 20003 [9] se tomará como resistividad del cobre 0.017241 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$

El aislamiento será un compuesto de PVC (tipo TI 1 según UNE EN 50363-3:2005 [10]) con una permitividad relativa de 2.8559 [11].

Para el cálculo del radio del conductor se ha utilizado la sección nominal.

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

Ecuación 1: Radio del conductor

Tabla 1: Características de los conductores BT

Sección (mm ²)	Espesor de aislación (mm)	Radio conductor(mm)
120	1.6	6.18
95	1.6	5.49
70	1.4	4.72

Los cables irán enterrados a 80 cm de la superficie con una separación entre ellos de 10 cm.

⁵ No es posible modelarlos de forma exacta, pues PSCAD solo permite el uso de un conductor sólido y no compuesto de alambres como es el utilizado.

Ángel Alonso González
**ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
 DE PSCAD/EMTD Y PYTHON**

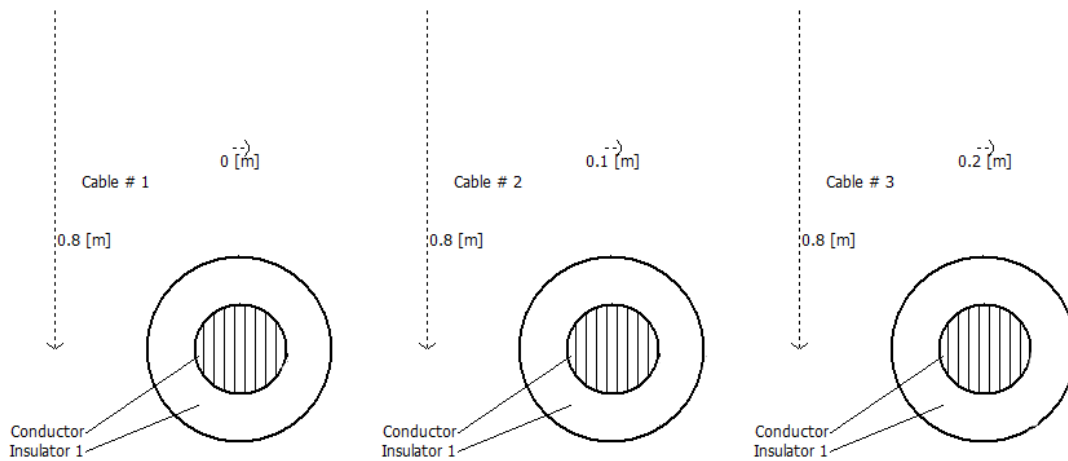


Ilustración 22: Posicionamiento de los cables

Una vez introducidos los datos correspondientes a los conductores y al tendido PSCAD es capaz de calcular la resistencia y la reactancia, que se pueden observar en el esquema unifilar.

Cargas

Las cargas que se colocarán en la red de baja tensión serán tanto trifásicas como monofásicas. Se modelarán en PSCAD como cargas fijas, en las que se determina su consumo de potencia activa y reactiva. Las cargas monofásicas han sido colocadas en fases de forma indistinta, de esta forma se podrá apreciar un desequilibrio en la corriente suministrada por cada fase.

Tabla 2: Cargas trifásicas BT

Bus	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)
1	20	6
2	30	10
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	70	20

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

Tabla 3: Cargas monofásicas BT

BUS	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)
1	55	18
2	27.5	10
3	110	30
4	44	14
5	33	10
6	16.5	5

Red de media tensión

Al igual que en el caso de la red de baja tensión no se trabaja con una red real, sino con una más simple adaptada a los parámetros de una red de Viesgo. A pesar de tratarse de una red algo más simple que una real nos permitirá hacer el estudio en el que se centra este trabajo.

Esquema unifilar y modelo en PSCAD

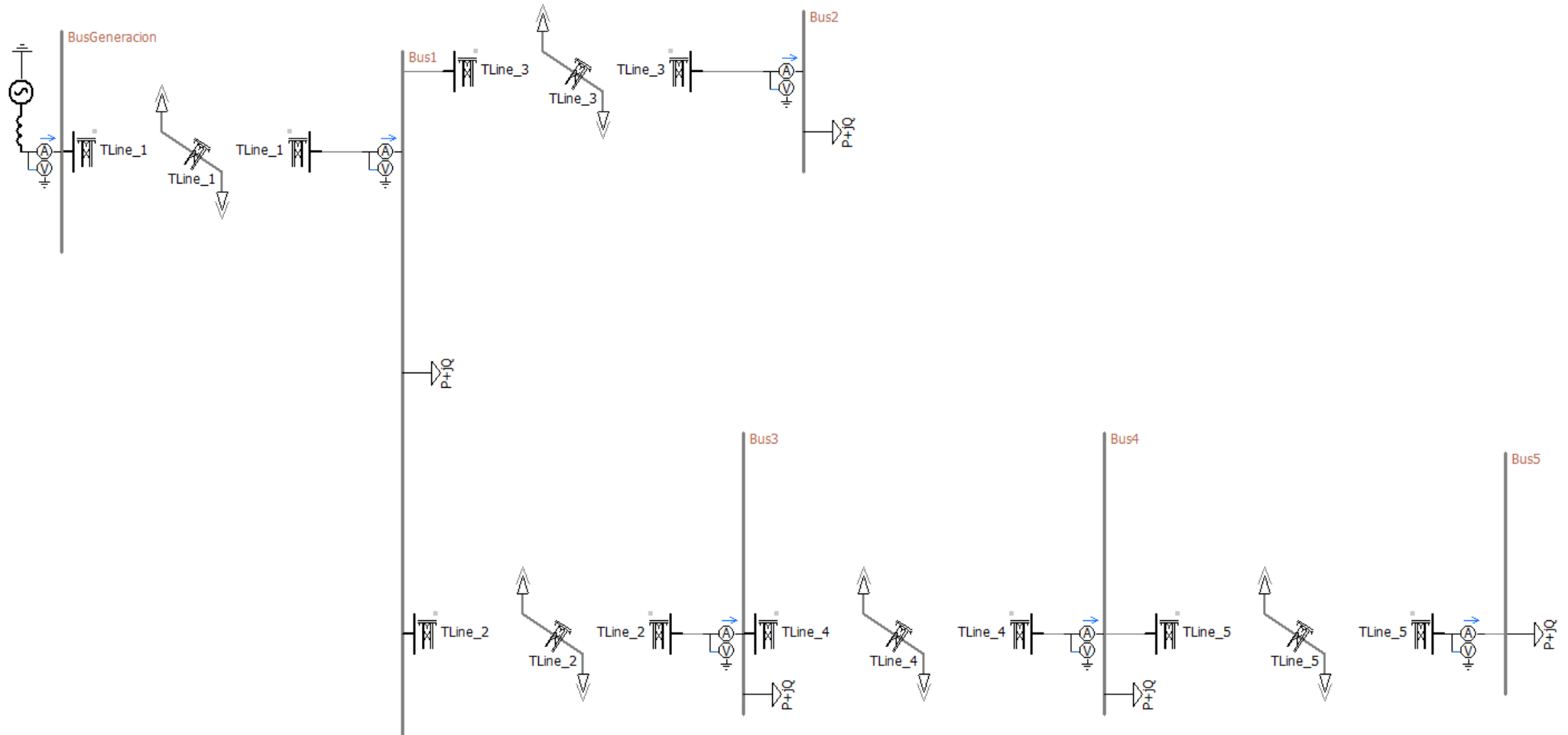


Ilustración 23: Modelo de MT en PSCAD

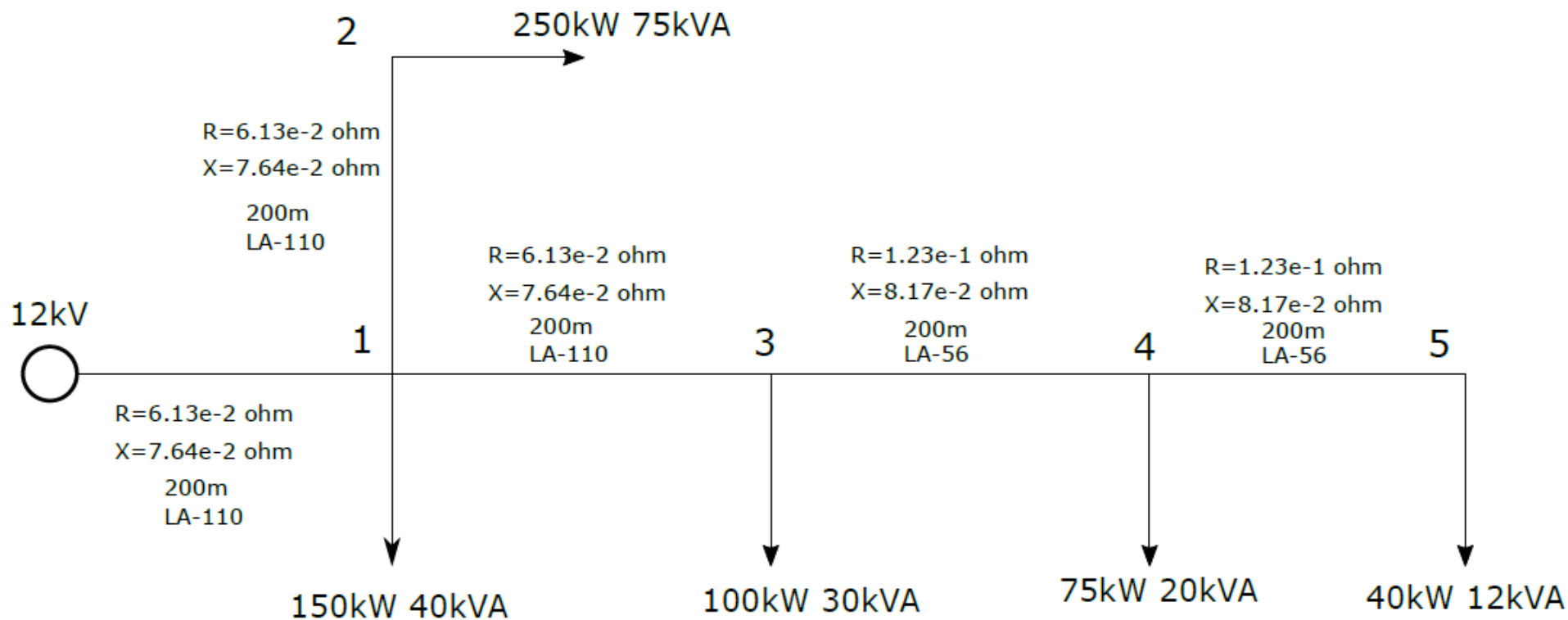


Ilustración 24: Esquema unifilar de MT

Generación

En el caso de la generación se tratará de simular la conexión a la red a través de un generador que suministrará tanta potencia (P y Q) como requiera la red pasiva a la que está conectada. Se tomará como potencia de cortocircuito 250 MVA, para dotar al generador de esta S_{CC} se deberá actuar sobre su impedancia, dado que PSCAD no permite fijar directamente la potencia de cortocircuito. De esta forma, conociendo la tensión de suministro y la potencia de cortocircuito se podrá calcular la impedancia de cortocircuito que acompaña al generador:

$$S_{CC} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$$

Ecuación 2: Potencia de cortocircuito

$$\frac{V_F^2}{Z_{CC}} = \frac{S_{CC}}{3} \rightarrow Z_{CC} = \frac{V_L^2}{S_{CC}}$$

Ecuación 3: Impedancia de cortocircuito

Se obtiene que la impedancia será 0.576 Ω , que se tomará como totalmente reactiva, dado que las impedancias de cortocircuito de la red son generalmente más inductivas que resistivas.

$$H = \frac{X}{2\pi \cdot f}$$

Ecuación 4: Inductancia

Resultando la inductancia 1.833 mH.

Conductores y tendido

Los conductores que componen la red de media tensión serán conductores desnudos de aluminio con alma de acero (**LA**). Al tratarse de cables de aluminio que tienen un refuerzo en su interior han sido modelados⁶ como cables huecos.

En el caso de conductores aéreos en PSCAD se pide para su modelado la resistencia por kilómetro y la geometría. Estos datos se pueden obtener de la norma UNE 21018 [12].

⁶ PSCAD no permite modelar cables trenzados huecos así que se ha modelado con un conductor sólido hueco.

Ángel Alonso González
**ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
 DE PSCAD/EMTD Y PYTHON**

Tabla 4: Características de los conductores de MT

Conductor	Resistencia (ohm/km)	Radio exterior (mm)	Radio interior (mm)
LA-110	0.3066	7	3
LA-56	0.6136	4.725	1.575

Se ha optado por un apoyo eléctrico de celosía **C-500** obtenido del catálogo de Fammsa, de 10 m de altitud y una cruceta **RC1-20/5** con una separación entre conductores de 2 m.

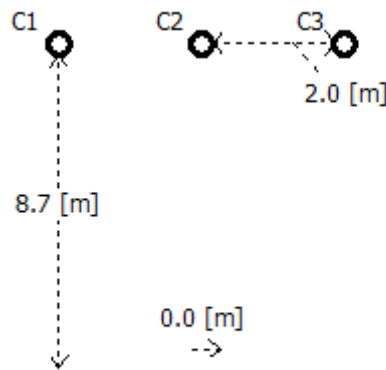


Ilustración 25: Tendido de MT

Una vez introducidos los datos correspondientes a los conductores y al tendido PSCAD es capaz de calcular la resistencia y la reactancia, que se pueden observar en el esquema unifilar.

Cargas

En la red de media tensión solo se colocarán cargas trifásicas, dado que normalmente no se colocan cargas de tipo monofásico en estas redes. Se modelarán de igual forma que en la red de baja tensión, como cargas fijas de las que se determina su potencia activa y reactiva.

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

Tabla 5: Cargas trifásicas MT

BUS	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)
1	150	40
2	250	75
3	100	30
4	75	20
5	40	12

Caso 1: Análisis de la red variando la carga

En este caso se analizarán los cambios que ocurren en la red con la variación de la carga, para ello se variará la potencia consumida por los clientes de forma que se vea como varían los parámetros dependiendo del nivel de carga de la red. Esta variación de la carga atiende a la variación de la demanda en una red a lo largo del día. A fin de simplificar la simulación se hará que la variación de la carga sea uniforme.

Parámetros de la simulación

Media tensión

La duración de la simulación será de 0.3 segundos, dado que da tiempo suficiente a los valores que se quieren estudiar a estabilizarse, para poder realizar el análisis en estado estacionario de la red.

El paso temporal será de 6 μ s dado que es el máximo paso con el que se puede realizar la simulación dada la corta longitud de las líneas que se utilizan. El modelo utilizado para estudiar las líneas (Frequency dependent mode) requiere un paso temporal más pequeño cuanto menor es la distancia de la línea.

El resto de los factores se dejan como están de forma predeterminada.

Red de media tensión

Los resultados obtenidos tras la simulación son los siguientes, siendo V tensión, I corriente y T el desfase de la tensión; en V, A y grados respectivamente:

Tabla 6: Resultados MT

%Carga	Vg	V1	V2	V3	V4	V5	I1	I2	I3	I4	I5
0.1	11999.172	11998.747	11998.571	11998.598	11998.460	11998.411	3.076	1.257	1.075	0.574	0.201
0.2	11998.323	11997.470	11997.119	11997.172	11996.895	11996.797	6.156	2.513	2.152	1.148	0.402
0.3	11997.473	11996.193	11995.666	11995.746	11995.329	11995.182	9.236	3.769	3.229	1.722	0.603
0.4	11996.622	11994.915	11994.213	11994.318	11993.762	11993.567	12.314	5.024	4.305	2.296	0.804
0.5	11995.771	11993.637	11992.759	11992.891	11992.196	11991.951	15.392	6.280	5.381	2.870	1.005
0.6	11994.919	11992.358	11991.304	11991.462	11990.628	11990.334	18.469	7.535	6.457	3.444	1.205
0.7	11994.066	11991.078	11989.849	11990.033	11989.060	11988.717	21.545	8.789	7.532	4.018	1.406
0.8	11993.213	11989.798	11988.393	11988.604	11987.492	11987.100	24.621	10.044	8.608	4.592	1.607
0.9	11992.359	11988.517	11986.937	11987.174	11985.922	11985.482	27.696	11.298	9.683	5.165	1.807
1	11991.504	11987.235	11985.480	11985.743	11984.353	11983.863	30.770	12.552	10.757	5.738	2.008
%Carga	Tg	T1	T2	T3	T4	T5					
0.1	-1.41E-02	-1.55E-02	-1.61E-02	-1.60E-02	-1.63E-02	-1.63E-02					
0.2	-2.81E-02	-3.10E-02	-3.22E-02	-3.20E-02	-3.25E-02	-3.26E-02					
0.3	-4.22E-02	-4.65E-02	-4.83E-02	-4.81E-02	-4.87E-02	-4.90E-02					
0.4	-5.62E-02	-6.20E-02	-6.44E-02	-6.41E-02	-6.50E-02	-6.53E-02					
0.5	-7.03E-02	-7.75E-02	-8.04E-02	-8.01E-02	-8.12E-02	-8.16E-02					
0.6	-8.43E-02	-9.30E-02	-9.65E-02	-9.61E-02	-9.74E-02	-9.78E-02					
0.7	-9.84E-02	-0.109	-0.113	-0.112	-0.114	-0.114					
0.8	-0.112	-0.124	-0.129	-0.128	-0.130	-0.130					
0.9	-0.126	-0.139	-0.145	-0.144	-0.146	-0.147					
1	-0.141	-0.155	-0.161	-0.160	-0.162	-0.163					

La red de media tensión esta equilibrada, dado que se trata de cargas únicamente trifásicas y no existe ningún elemento que pueda causar un desequilibrio. Para el cálculo de las caídas de tensión se ha de tener en cuenta el módulo y fase de la tensión en cada punto, dado que no se puede hacer la resta directa al no tener las tensiones el mismo ángulo.

$$V_L = \sqrt{V_a^2 + V_r^2}$$

Ecuación 5: Tensión de línea

$$V_a = V_L \cdot \cos(\theta)$$

Ecuación 6: Tensión a (proyección sobre el eje real)

$$V_r = V_L \cdot \sin(\theta)$$

Ecuación 7: Tensión r (proyección sobre el eje imaginario)

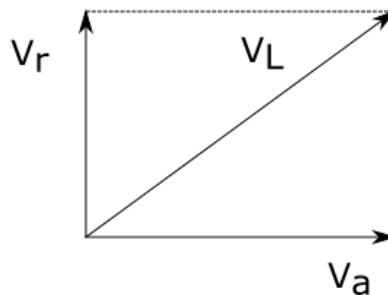


Ilustración 26: Descomposición de la tensión

Teniendo en cuenta lo superior y que la fuente suministra una tensión de línea de 12000 V con un desfase de 0° , se calculará la caída de tensión como:

$$\Delta V_i = \sqrt{(12000 - V_i \cdot \cos(\theta))^2 + (V_i \cdot \sin(\theta))^2}$$

Ecuación 8: Caída de tensión MT

Donde:

- θ es el desfase de la tensión.

Las caídas de tensión por bus en voltios serán las siguientes:

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

Tabla 7: Caídas de tensión en MT

%Carga	caída 1	caída 2	caída 3	caída 4	caída 5
0.1	3.484	3.663	3.639	3.738	3.772
0.2	6.974	7.332	7.283	7.481	7.550
0.3	10.463	11.000	10.926	11.223	11.326
0.4	13.951	14.667	14.569	14.964	15.102
0.5	17.438	18.334	18.210	18.704	18.877
0.6	20.925	21.999	21.851	22.443	22.651
0.7	24.410	25.664	25.491	26.182	26.424
0.8	27.895	29.328	29.130	29.919	30.196
0.9	31.379	32.991	32.768	33.656	33.967
1	34.862	36.653	36.405	37.392	37.737

Tabla 8: Caída de tensión en porcentaje en MT

%Carga	caída 1 (%)	caída 2 (%)	caída 3 (%)	caída 4 (%)	caída 5 (%)
0.1	0.029%	0.031%	0.030%	0.031%	0.031%
0.2	0.058%	0.061%	0.061%	0.062%	0.063%
0.3	0.087%	0.092%	0.091%	0.094%	0.094%
0.4	0.116%	0.122%	0.121%	0.125%	0.126%
0.5	0.145%	0.153%	0.152%	0.156%	0.157%
0.6	0.174%	0.183%	0.182%	0.187%	0.189%
0.7	0.203%	0.214%	0.212%	0.218%	0.220%
0.8	0.232%	0.244%	0.243%	0.249%	0.252%
0.9	0.261%	0.275%	0.273%	0.280%	0.283%
1	0.291%	0.305%	0.303%	0.312%	0.314%

Como se puede observar la caída de tensión es muy baja, lo que significa que aún se pueden conectar más cargas a esta red o que los cables están sobredimensionados. Se observa como la caída aumenta a medida que aumenta la carga, como es lógico, al aumentarse la potencia requerida de la red y por tanto la corriente suministrada.

Ángel Alonso González
**ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
 DE PSCAD/EMTD Y PYTHON**

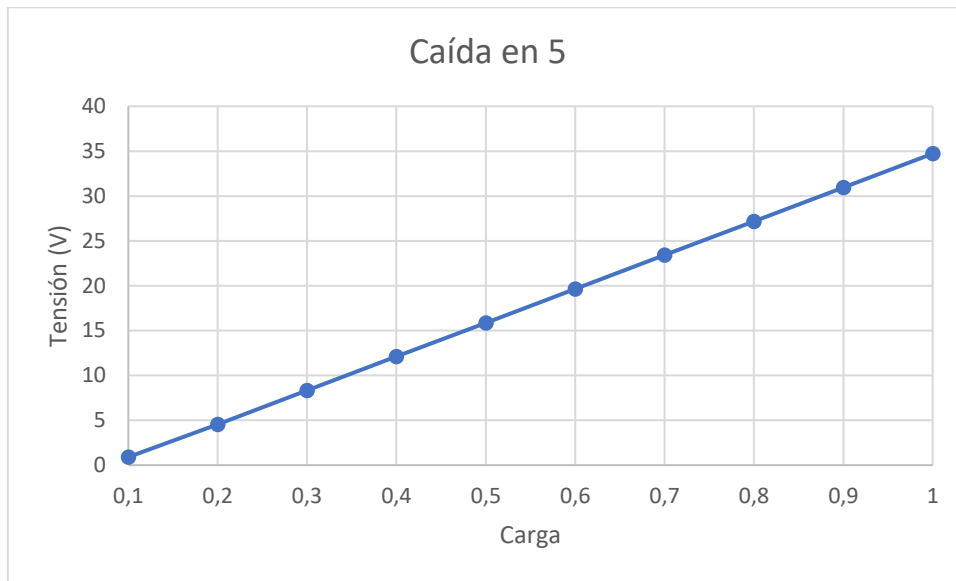


Ilustración 27: Caída de tensión en el bus 5

La caída de tensión varía de forma lineal con la potencia requerida por la red, dado que la caída de tensión es directamente proporcional a la potencia consumida aguas abajo de la línea en la que se produce la caída.

La potencia aparente disipada en las líneas es la siguiente:

$$S = 3 \cdot Z \cdot I_L^2$$

Ecuación 9: Potencia aparente disipada

Tabla 9: Intensidades por bus en MT

%Carga	i1	i2	i3	i4	i5
0.1	3.076	1.257	1.075	0.574	0.201
0.2	6.156	2.513	2.152	1.148	0.402
0.3	9.236	3.769	3.229	1.722	0.603
0.4	12.314	5.024	4.305	2.296	0.804
0.5	15.392	6.280	5.381	2.870	1.005
0.6	18.469	7.535	6.457	3.444	1.205
0.7	21.545	8.789	7.532	4.018	1.406
0.8	24.621	10.044	8.608	4.592	1.607
0.9	27.696	11.298	9.683	5.165	1.807
1	30.770	12.552	10.757	5.738	2.008

Ángel Alonso González
**ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
 DE PSCAD/EMTD Y PYTHON**

Tabla 10: Potencia aparente disipada

%Carga	S G-1	S 1-2	S 1-3	S 3-4	S 4-5
0.1	2.781	0.464	0.340	0.097	0.012
0.2	11.138	1.855	1.361	0.387	0.047
0.3	25.065	4.174	3.063	0.872	0.107
0.4	44.560	7.418	5.446	1.550	0.190
0.5	69.619	11.588	8.509	2.421	0.297
0.6	100.236	16.682	12.251	3.486	0.427
0.7	136.409	22.701	16.672	4.744	0.581
0.8	178.133	29.643	21.772	6.195	0.759
0.9	225.404	37.508	27.550	7.839	0.960
1	278.219	46.295	34.005	9.676	1.185

Es destacable como las pérdidas en la línea varían de forma cuadrática con el incremento de la potencia requerida, dado que la caída de tensión en las líneas de transporte varía de forma lineal y la corriente también.

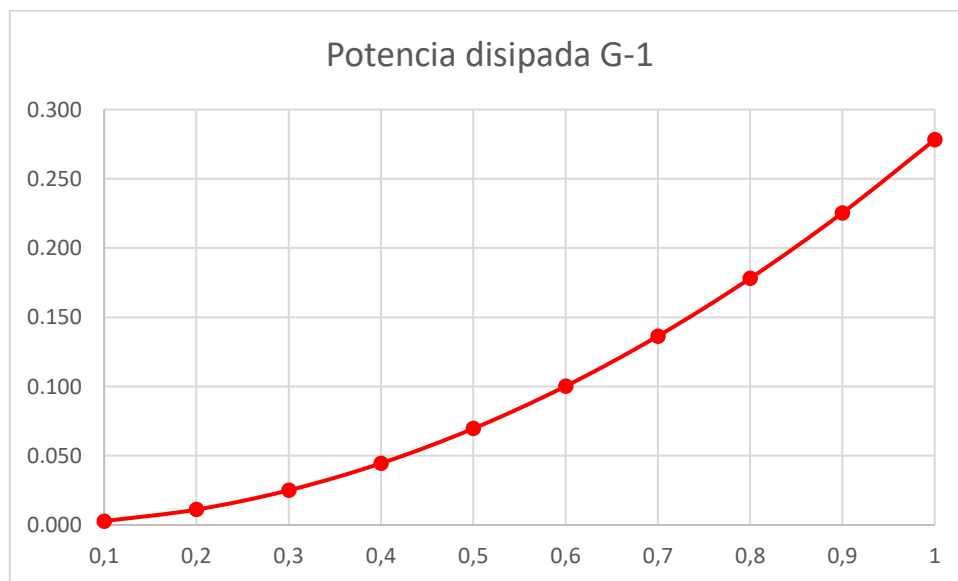


Ilustración 28: Potencia disipada en la línea de transmisión G-1

Red de baja tensión

Obtención de los fasores

Dado que se trata de una red en la que se han conectado cargas tanto trifásicas como monofásicas en distintos puntos de esta, existirá un desequilibrio en la red, que habrá que medir.

Para medir el desequilibrio existente lo primero que se hará es obtener las formas de onda de tensiones y corrientes para un mismo tiempo y durante un periodo.

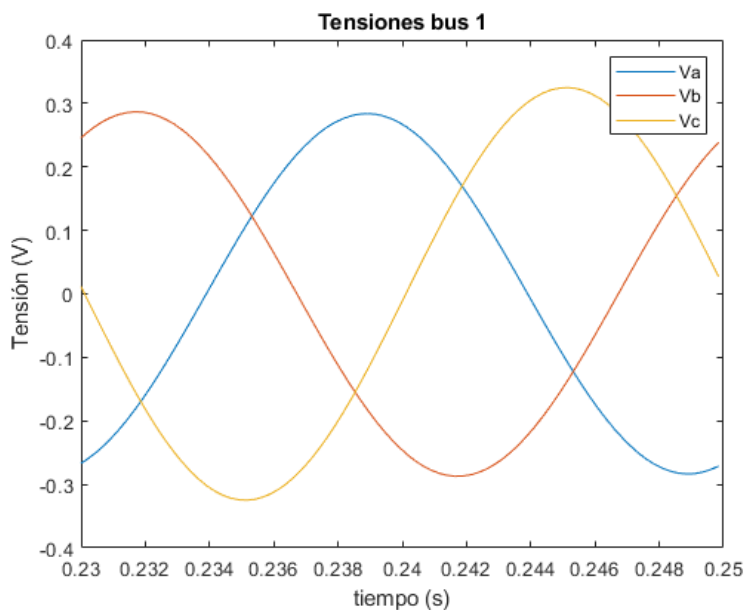


Ilustración 29: Formas de onda de las tensiones por fase

A partir de la forma de onda de las tensiones de cada fase podremos obtener los fasores correspondientes, aplicando la transformada de Fourier. La transformada de Fourier se puede utilizar para pasar señales dadas en función del tiempo al dominio de la frecuencia, de esta forma podemos obtener el módulo y desfase (o el fasor) de la onda correspondiente a la frecuencia fundamental (50 Hz), despreciando los armónicos. La obtención de los fasores se hace de esta manera dado que los valores de los desfases medidos directamente en PSCAD no son válidos.

El resultado de aplicar la transformada de Fourier nos dará amplitudes (valor de pico), dado que nos interesa el valor eficaz habrá que dividir entre $\sqrt{2}$. Se hará para varios escenarios de carga distintos (100%, 50%, 25% y 10%) obteniéndose el fasor en forma polar.

Cálculo del desequilibrio

Una vez obtenidos los fasores correspondientes a cada una de las fases se puede pasar a medir el desequilibrio en el que está la red. Para medir el desequilibrio de una red trifásica se pasa a descomponer el sistema en desequilibrio en la suma de tres sistemas:

Sea el vector de giro $a = -1/2 + j\sqrt{3}/2$ que gira en 120° un vector.

1. Sistema directo o de secuencia positiva, que consiste en un sistema equilibrado que gira en sentido positivo.

$$\begin{aligned}I_{a1} &= |I_{a1}| \angle 0^\circ \\I_{b1} &= a^2 \cdot I_{a1} = |I_{a1}| \angle -120^\circ \\I_{c1} &= a \cdot I_{a1} = |I_{a1}| \angle 120^\circ\end{aligned}$$

2. Sistema inverso o de secuencia negativa, que consiste en un sistema equilibrado que gira en sentido contrario al de secuencia positiva.

$$\begin{aligned}I_{a2} &= |I_{a2}| \angle 0^\circ \\I_{b2} &= a \cdot I_{a2} = |I_{a2}| \angle 120^\circ \\I_{c2} &= a^2 \cdot I_{a2} = |I_{a2}| \angle -120^\circ\end{aligned}$$

3. Sistema de secuencia homopolar, que consiste en un sistema cuyas fases tienen el mismo módulo y fase.

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = I_0$$

De esta forma, por ejemplo, para una corriente:

Ángel Alonso González
 ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
 DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

$$I = I_{homopolar} + I_{positiva} + I_{inversa}$$

Ecuación 10: Descomposición de un sistema desequilibrado

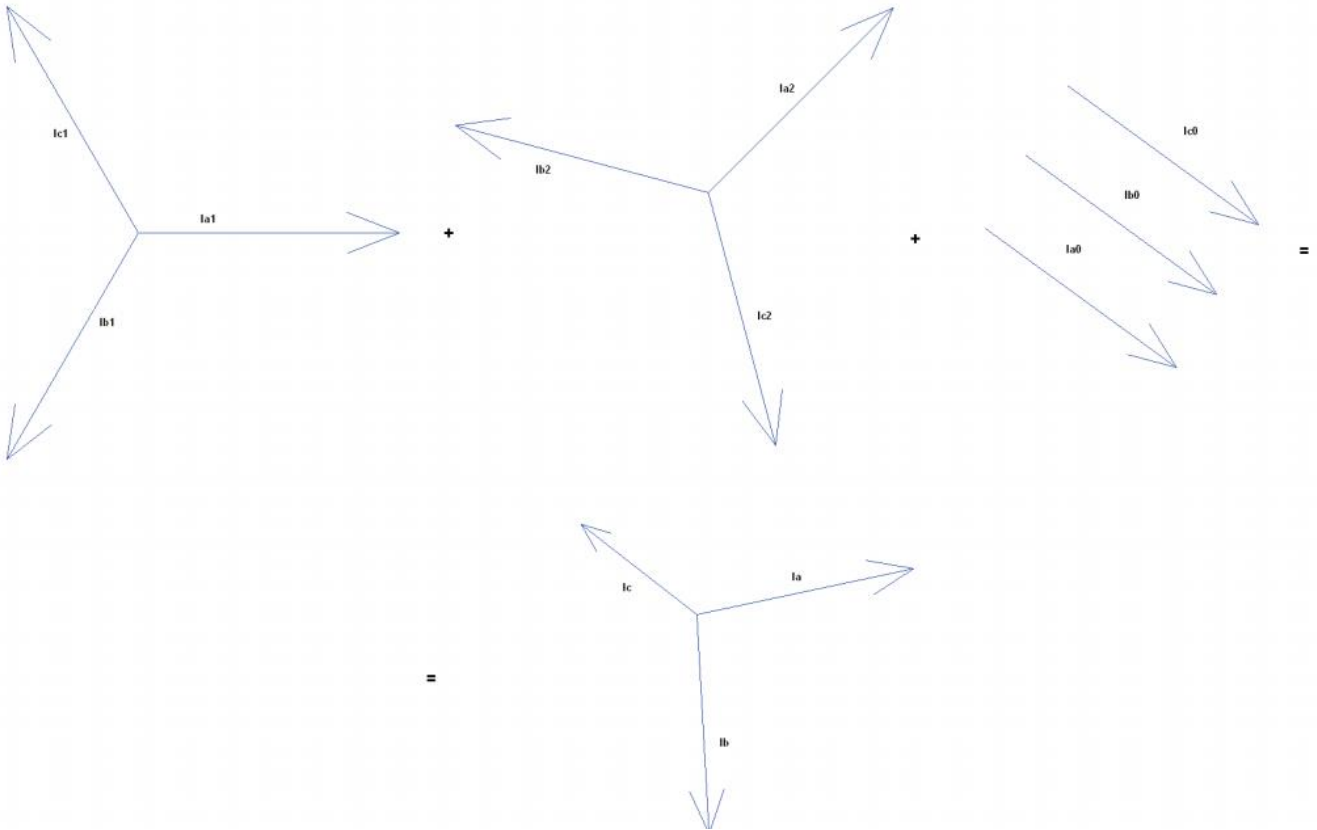


Ilustración 30: Un sistema desequilibrado mostrado como la suma de las componentes positiva inversa y homopolar

Se podrán obtener las componentes de las distintas secuencias de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

Ecuación 11: Obtención de las componentes de las secuencias

Una vez obtenidas las 3 secuencias en las que se puede dividir un sistema trifásico equilibrado podemos obtener el desequilibrio, que se obtendrá como la secuencia inversa entre la directa:

$$Desequilibrio = 100 \cdot \frac{|I_{a2}|}{|I_{a1}|}$$

Ecuación 12: Desequilibrio

En el caso de las tensiones el desequilibrio es bastante bajo, como se puede observar:

Tabla 11: Desequilibrio en tensiones

BUS	100% carga	50% carga	25% carga	10% carga
G	0.78%	0.61%	0.49%	0.42%
1	2.92%	1.91%	1.22%	0.72%
2	3.16%	1.97%	1.22%	0.71%
3	5.31%	3.31%	1.98%	1.05%
4	3.83%	2.41%	1.48%	0.84%
5	3.92%	2.42%	1.48%	0.84%
6	4.09%	2.49%	1.50%	0.85%

Se puede observar como el desequilibrio aumenta a medida que se va avanzando en la red, dado que las caídas de tensión, que serán diferentes en cada fase, se van acumulando, haciendo que el desequilibrio en tensiones aumente.

Además, el desequilibrio es más bajo con niveles de carga inferiores, dado que las caídas de tensión serán también menores en ese caso. La norma [13] establece que el límite de desequilibrio de tensiones está en un 2% existiendo la posibilidad de llegar a 3% si existen cargas de carácter monofásico o bifásico, requisito que cumple esta red. Sin embargo, para el caso de 100% y 50% de carga el circuito no cumple el requisito marcado por la norma. Para cumplir la norma existen varias medidas que se pueden llevar a cabo con el fin de reducir el desequilibrio en tensiones existente:

1. Aumentar la potencia de cortocircuito.
2. Equilibrar las cargas cambiando cargas monofásicas de fase o añadiendo nuevas cargas.

3. Reducir las impedancias de línea para conseguir que las caídas de tensión sean menores y por tanto el desequilibrio sea menor.

En el caso de las corrientes en desequilibrio es bastante mayor, dado que existen ramas en las que no hay corriente de una o varias fases:

Tabla 12: Desequilibrio en corrientes

BUS	100% carga	50% carga	25% carga	10% carga
G	15.97%	18.85%	20.83%	22.18%
1	15.97%	18.85%	20.83%	22.18%
2	47.67%	48.28%	48.26%	48.10%
3	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
4	30.46%	30.58%	30.14%	29.67%
5	42.56%	42.02%	41.79%	41.77%
6	20.58%	20.01%	19.69%	19.55%

Se puede observar un gran desequilibrio en corrientes, que es aún más pronunciado en el bus 3, donde solo hay corriente en una de las 3 fases. En el caso de las corrientes la variación de carga no afecta mucho al desequilibrio excepto en las corrientes suministradas por la fuente de tensión, dado que en cabecera se suman todas las corrientes, haciendo posible que cambien las relaciones entre las fases.

Caso 2: Análisis de la red aplicando un cortocircuito de resistencia variable

En este caso se añadirá un cortocircuito a la red con el objetivo de ver cómo cambia la corriente de cortocircuito al variar la resistencia del cortocircuito, así como la carga a la que está sometida el sistema.

Cortocircuito trifásico a tierra en el bus 1

Se va a hacer un estudio de las sobreintensidades acontecidas en la red a causa del cortocircuito, que durará 0.05 s y se dará a los 0.5 s de simulación. Al ser un cortocircuito trifásico la red se mantendrá equilibrada, lo que hará el estudio más sencillo.

Se obtendrá el valor del pico de corriente en la línea a través de un script de Python que obtendrá el valor más alto de la corriente para la serie de datos correspondientes al periodo 0.5001498 s - 0.5539428 s dado que el corto se da a los 0.5 s y dura 0.05 s dándose el pico siempre entre esos valores. A continuación, se muestra el pico de corriente que se da en el bus 1 con 100% de carga y 10 ohmios de resistencia a tierra:

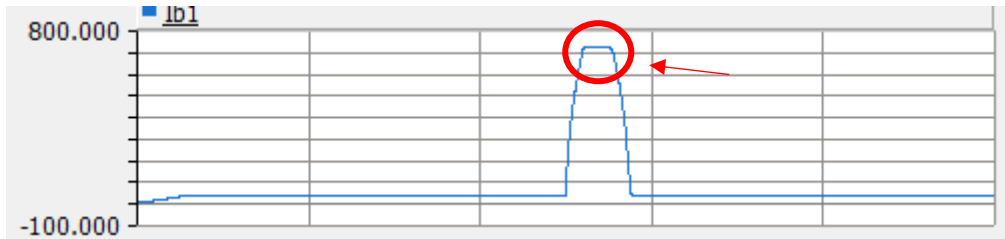


Ilustración 31: Pico de intensidad provocado por un cortocircuito

Sobreintensidad por bus

Al colocarse el cortocircuito en el bus 1 el resto de los buses que hay aguas abajo no se ven afectados, de hecho, la corriente suministrada disminuye. Estos datos corresponden a 0.01 ohmios de resistencia y 100% de carga.

Tabla 13: Intensidad por bus con y sin cortocircuito

Caso	i1	i2	i3	i4	i5
Sin cc	30.759	12.547	10.754	5.736	2.007
Con cc	13142.541	12.444	10.665	5.688	1.991
$\Delta\%$	42626.78%	-0.82%	-0.83%	-0.84%	-0.82%

Se puede observar cómo los buses aguas abajo del cortocircuito sufren una pequeña caída de intensidad, que puede ser debida al hueco de tensión generado por el cortocircuito.

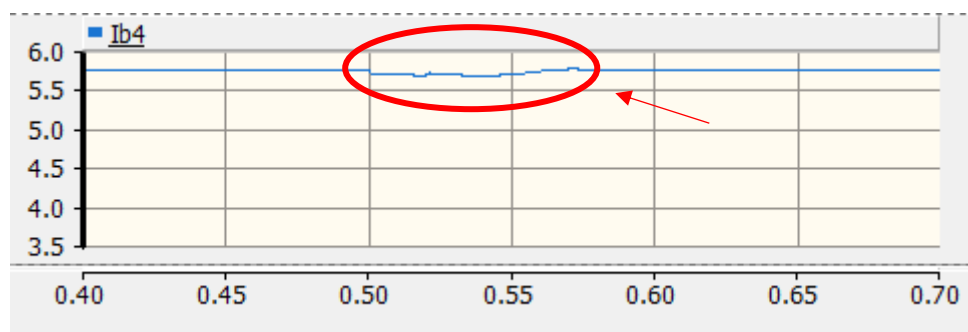


Ilustración 32: Bajada de intensidad aguas abajo del cortocircuito

Sobreintensidad respecto a la resistencia a tierra

La resistencia a tierra influye mucho en la sobreintensidad que se da en la red eléctrica, siendo la sobreintensidad mayor cuanto menor es la resistencia. En el caso de 100% de carga resulta una gráfica así:

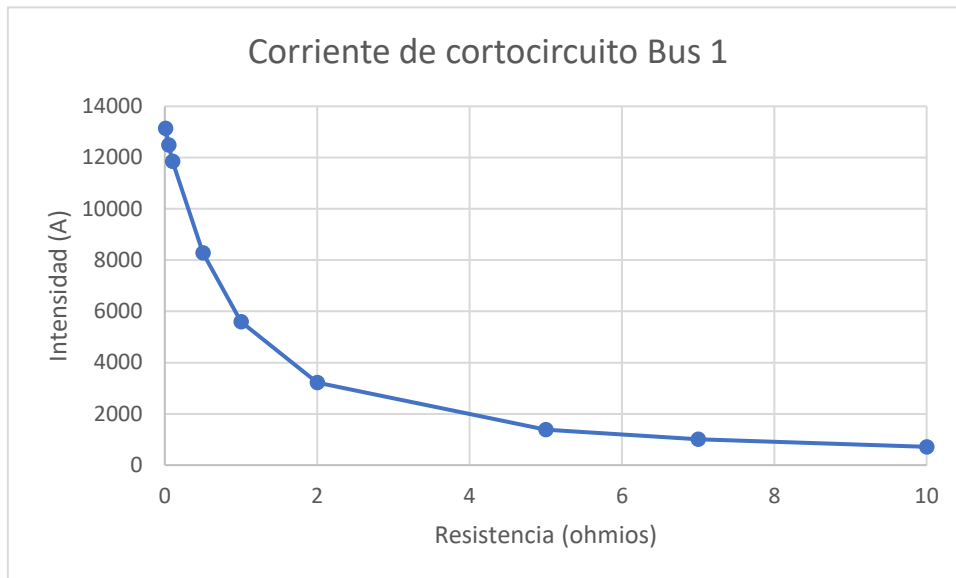


Ilustración 33: Corriente de cortocircuito en el bus 1 en función de la resistencia de cortocircuito

Se observa que para valores de la resistencia muy bajos el cortocircuito afecta a la red de forma mucho más traumática y una vez se va aumentando esta resistencia el valor de la corriente durante el cortocircuito se va estabilizando.

Tabla 14: Corriente de cortocircuito por fase en función de la resistencia

R	la	lb	lc
0.01	25627.154	13319.672	13021.2829
0.05	23666.1356	14138.7646	13919.2521
0.1	21585.4996	14374.5398	14248.8737
0.5	12482.2261	11436.1047	11379.5894
1	7992.91676	7867.72454	7861.01716
2	4531.2852	4529.37275	4526.88232
5	1918.79289	1918.1356	1918.53113
7	1380.1534	1380.8156	1380.80419
10	971.238678	971.175734	970.710486

Para valores de resistencia inferiores a 0.5 ohmios se observa que para la fase A aparece un valor de corriente máxima superior al de las otras dos fases, lo que puede ser debido a que aparezca saturación en algún elemento del circuito para la fase A. A medida que

el cortocircuito va alcanzando el régimen permanente los valores de las corrientes por fase se van igualando, constituyendo un sistema equilibrado, como cabe esperar en un cortocircuito trifásico.

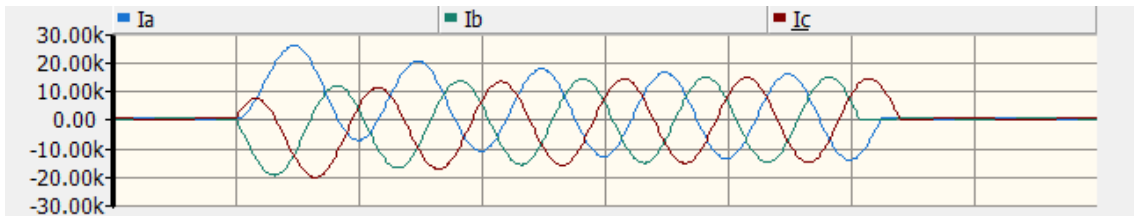


Ilustración 34: Corrientes de cortocircuito por fase

Valor de la corriente de cortocircuito en función de la carga de la red

Se observa como el valor de la corriente no se ve muy afectado por el nivel de carga de la red. Para la resistencia de 10 ohmios se puede ver como el nivel de carga no interfiere en el valor de la corriente de cortocircuito:

Tabla 15: Variación de la intensidad con la carga

Carga	Ia	Ib	Ic	I1	I2	I3	I4	I5
0.2	971.239	971.176	970.710	692.650	2.500	2.141	1.142	0.400
0.5	970.877	970.815	970.330	701.205	6.247	5.353	2.856	0.999
1	970.272	970.211	969.694	715.467	12.486	10.701	5.708	1.998

Conclusiones

Tras el trabajo realizado se puede llegar a la conclusión de que el uso de Python para interferir en PSCAD facilita mucho el trabajo en caso de querer hacer una serie de simulaciones, dado que con un script se pueden hacer incluso cientos de simulaciones de las que luego se pueden obtener los datos que se quieran. Dado que Python, junto a la librería de automatización que se utiliza para interferir con PSCAD, permite cambiar cualquier propiedad de cualquier componente del circuito a estudiar; existe un gran rango de estudios que se pueden ver beneficiados de la automatización que aporta Python.

También se puede llegar a la conclusión de que PSCAD es una herramienta muy útil y potente en el caso de querer hacer estudios en el dominio del tiempo, sin embargo, esta

herramienta tiene más problemas en lo que respecta a estudios en estado estacionario. Este tipo de estudios pueden llegar a hacerse, pero los datos aportados por el programa no van orientados a este tipo de análisis, lo que hace las cosas más difíciles. Existen otros programas cuya orientación es ese tipo de estudios.

Se puede observar de misma manera que la herramienta utilizada para los análisis eléctricos permite la correcta modelización de líneas de media y alta tensión, lo que se prueba muy útil para analizar fenómenos transitorios que puedan ocurrir en estas.

La realización de este trabajo me ha aportado bastantes conocimientos que previamente no tenía. Dado que la formación en sistemas eléctricos y electrotecnia no es el único objetivo de mi grado. He tenido que aprender algunas cosas que previamente no conocía, como puede ser el análisis de sistemas eléctricos desequilibrados. También me ha aportado algunos conocimientos de PSCAD/EMTD que serán de gran utilidad en el futuro. Además, he aprendido a buscar información de forma más eficiente.

Anexo I: Código de Python

Red de media tensión

```
import sys, os
import matplotlib.pyplot as plt
import mhrc.automation, logging
from mhrc.automation.utilities.file import File
#Project charges data (kW and kVA)
P1=150
P2=250
P3=100
P4=75
P5=40
Q1=40
Q2=75
Q3=30
Q4=20
Q5=12

# Log 'INFO' messages & above. Include level & module name.
logging.basicConfig(level=logging.INFO,format="%(levelname)-8s %(name)-
26s %(message)s")
#launch PSCAD keeping it minimized
pscad = mhrc.automation.launch_pscad(minimize=True)
#Load the project workspace
pscad.load(r"C:\Users\ÁNGEL\Desktop\TFG\TFG.pswx")
#Get in the workspace, then the project and finally the canvas in which
the object to change is
workspace=pscad.workspace()
proyecto=workspace.project('mt_corrientes')
main = proyecto.user_canvas('Main')

#Obtain the objects that have to be changed
carga1=main.user_cmp(1964512496)
carga2=main.user_cmp(1383571789)
carga3=main.user_cmp(1956672364)
carga4=main.user_cmp(1316509323)
carga5=main.user_cmp(207051023)
load=[0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1]
generacion=[0.0]
for i in load:
    #Change parameters according to load curve
    carga1.set_parameters(PO=P1*i*0.001/3,QO=Q1*i*0.001/3)
    carga2.set_parameters(PO=P2*i*0.001/3,QO=Q2*i*0.001/3)
    carga3.set_parameters(PO=P3*i*0.001/3,QO=Q3*i*0.001/3)
    carga4.set_parameters(PO=P4*i*0.001/3,QO=Q4*i*0.001/3)
    carga5.set_parameters(PO=P5*i*0.001/3,QO=Q5*i*0.001/3)
    # Run project
    proyecto.run()
    f=open(r"C:\Users\ÁNGEL\Desktop\TFG\media_tension\mt_corrientes.gf
46\mt_corrientes_01.out")
    for k,linea in enumerate(f):
        if k<1000:
            continue
        elif k==1000:
            a=linea
        else:
            break
```

ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

```

l=a.split()
f=open(r"C:\Users\ÁNGEL\Desktop\TFG\media_tension\mt_corrientes.gf
46\mt_corrientes_02.out")
for k, linea in enumerate(f):
    if k<1000:
        continue
    elif k==1000:
        a=linea
    else:
        break
l2=a.split()
x0=False
for x in l2:
    while x0==False:
        xo=True
        break
    l.append(x)
f=open(r"C:\Users\ÁNGEL\Desktop\TFG\media_tension\mt_corrientes.gf
46\mt_corrientes_03.out")
for k, linea in enumerate(f):
    if k<1000:
        continue
    elif k==1000:
        a=linea
    else:
        break
l3=a.split()
x0=False
for x in l3:
    while x0==False:
        xo=True
        break
    l.append(x)
f = open ('resultadoscarga.txt', 'a')
for n in l:
    f.write(n+" ")
f.write("\n")
f.close()

```

Red de baja tensión

```

import sys, os
from scipy.fftpack import fft
import numpy as np
import mhrc.automation, logging
from mhrc.automation.utilities.file import File
import matplotlib.pyplot as plt
#Porject data (kW and kVA)
P1=20
P2=30
P6=70
Q1=6
Q2=10
Q6=20
Pm1=55
Pm2=27.5
Pm3=110
Pm4=44
Pm5=33
Pm6=16.5

```

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

```
Qm1=18
Qm2=10
Qm3=30
Qm4=14
Qm5=10
Qm6=5
# Log 'INFO' messages & above. Include level & module name.
logging.basicConfig(level=logging.INFO,format="%(levelname)-8s
%(name)-26s %(message)s")

#launch PSCAD keeping it minimized
pscad = mhrc.automation.launch_pscad(minimize=True)

#Load the project workspace
pscad.load(r"C:\Users\ÁNGEL\Desktop\TFG\TFG.pswx")

#Get in the workspace, then the project and finally the canvas in
which the object to change is
workspace=pscad.workspace()
proyecto=workspace.project('bt_save')
main = proyecto.user_canvas('Main')

#Obtain the objects that have to be changed
carga1=main.user_cmp(447241932)
carga2=main.user_cmp(1928236701)
carga6=main.user_cmp(1811954247)
cargam1=main.user_cmp(1921507037)
cargam2=main.user_cmp(7352566663)
cargam3=main.user_cmp(462196454)
cargam4=main.user_cmp(1113160860)
cargam5=main.user_cmp(967493418)
cargam6=main.user_cmp(1974381737)
load=[1,0.5,0.25,0.1]
for i in load:
    #Change parameters according to load curve
    carga1.set_parameters(PO=P1*i*0.001/3,QO=Q1*i*0.001/3)
    carga2.set_parameters(PO=P2*i*0.001/3,QO=Q2*i*0.001/3)
    carga6.set_parameters(PO=P6*i*0.001/3,QO=Q6*i*0.001/3)
    cargam1.set_parameters(PO=Pm1*i*0.001,QO=Qm1*i*0.001)
    cargam2.set_parameters(PO=Pm2*i*0.001,QO=Qm2*i*0.001)
    cargam3.set_parameters(PO=Pm3*i*0.001,QO=Qm3*i*0.001)
    cargam4.set_parameters(PO=Pm4*i*0.001,QO=Qm4*i*0.001)
    cargam5.set_parameters(PO=Pm5*i*0.001,QO=Qm5*i*0.001)
    cargam6.set_parameters(PO=Pm6*i*0.001,QO=Qm6*i*0.001)
    # Run project
    proyecto.run()

#
esp='
t=[]
Vga=[]
V1a=[]
V2a=[]
V3a=[]
V4a=[]
V5a=[]
V6a=[]
Vgb=[]
V1b=[]
```

ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

```
V2b=[]
V3b=[]
V4b=[]
V5b=[]
V6b=[]
Vgc=[]
V1c=[]
V2c=[]
V3c=[]
V4c=[]
V5c=[]
V6c=[]
Iga=[]
I1a=[]
I2a=[]
I3a=[]
I4a=[]
I5a=[]
I6a=[]
Igb=[]
I1b=[]
I2b=[]
I3b=[]
I4b=[]
I5b=[]
I6b=[]
Igc=[]
I1c=[]
I2c=[]
I3c=[]
I4c=[]
I5c=[]
I6c=[]
```

```
f=open(r"C:\Users\ÁNGEL\Desktop\TFG\baja_tension\bt_save.gf46\bt_save_01.out")
```

```
for k, linea in enumerate(f):
    if k < 1:
        continue
    else:
        a=linea
        l=a.split()
        t.append(l[0])
        Vga.append(l[1])
        Vgb.append(l[2])
        Vgc.append(l[3])
        V1a.append(l[4])
        V1b.append(l[5])
        V1c.append(l[6])
        V2a.append(l[7])
        Iga.append(l[8])
        Igb.append(l[9])
        Igc.append(l[10])
```

```
f=open(r"C:\Users\ÁNGEL\Desktop\TFG\baja_tension\bt_save.gf46\bt_save_02.out")
```

```
for k, linea in enumerate(f):
    if k < 1:
        continue
```

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

```
else:
    a=linea
    l=a.split ()
    I1a.append(l[2])
    I1b.append(l[3])
    V2b.append(l[4])
    I1c.append(l[5])
    I2a.append(l[6])
    I2b.append(l[7])
    I2c.append(l[8])
    V2c.append(l[9])
    I4a.append(l[10])

f=open(r"C:\Users\ÁNGEL\Desktop\TFG\baja_tension\bt_save.gf46\bt_save_
03.out")
for k,linea in enumerate(f):
    if k < 1:
        continue
    else:
        a=linea
        l=a.split ()
        I4b.append(l[1])
        I4c.append(l[2])
        I5a.append(l[3])
        I5b.append(l[4])
        I5c.append(l[5])
        V3a.append(l[6])
        I6a.append(l[7])
        I6b.append(l[8])
        I6c.append(l[9])
        V3b.append(l[10])

f=open(r"C:\Users\ÁNGEL\Desktop\TFG\baja_tension\bt_save.gf46\bt_save_
04.out")
for k,linea in enumerate(f):
    if k < 1:
        continue
    else:
        a=linea
        l=a.split ()
        V3c.append(l[1])
        V4c.append(l[2])
        V5c.append(l[3])
        V6c.append(l[4])
        V4a.append(l[5])
        V5a.append(l[6])
        V6a.append(l[7])
        V4b.append(l[8])
        V5b.append(l[9])
        V6b.append(l[10])

f=open(r"C:\Users\ÁNGEL\Desktop\TFG\baja_tension\bt_save.gf46\bt_save_
05.out")
for k,linea in enumerate(f):
    if k < 1:
        continue
    else:
        a=linea
        l=a.split ()
```

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

```
I3c.append(l[1])
I3b.append(l[2])
I3a.append(l[3])

M=[Vga,Vgb,Vgc,V1a,V1b,V1c,V2a,V2b,V2c,V3a,V3b,V3c,V4a,V4b,V4c,V5a,V5b
,V5c,V6a,V6b,V6c,Iga,Igb,Igc,I1a,I1b,I1c,I2a,I2b,I2c,I3a,I3b,I3c,I4a,I
4b,I4c,I5a,I5b,I5c,I6a,I6b,I6c]
f = open ('fasores.txt','a')
for variable in M:
    N=len(variable)
    deltaT=float(t[N-1])-float(t[N-2])
    Nciclo=(1/50)/deltaT
    #Nciclo da 80. algo asi que tomamos 81 muestras
    X=variable[N-82:N-1]
    N=len(X)
    Xw=fft(X)
    Xw=Xw/N*2
    Xw[0]=Xw[0]/2
    Xw_m=np.absolute(Xw[1])/np.sqrt(2)
    Xw_a=np.angle(Xw[1])#en radianes
    f.write(str(Xw_m)+" "+str(Xw_a))
    f.write("\n")
```

Red con cortocircuito

```
import sys, os
import matplotlib.pyplot as plt
import mhrc.automation, logging
from mhrc.automation.utilities.file import File
#Project charges data (kW and kVA)
P1=150
P2=250
P3=100
P4=75
P5=40
Q1=40
Q2=75
Q3=30
Q4=20
Q5=12

# Log 'INFO' messages & above. Include level & module name.
logging.basicConfig(level=logging.INFO,format="%(levelname)-8s %(name)-
26s %(message)s")

#launch PSCAD keeping it minimized
pscad = mhrc.automation.launch_pscad(minimize=True)

#Load the project workspace
pscad.load(r"C:\Users\ÁNGEL\Desktop\TFG\TFG.pswx")

#Get in the workspace, then the project and finally the canvas in which
the object to change is
workspace=pscad.workspace()
projecto=workspace.project('mt_fault')
main = proyecto.user_canvas('Main')

#Obtain the objects that have to be changed
cargal=main.user_cmp(1964512496)
carga2=main.user_cmp(1383571789)
```

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

```
carga3=main.user_cmp(1956672364)
carga4=main.user_cmp(1316509323)
carga5=main.user_cmp(207051023)
fault=main.user_cmp(23162038)
fault_control=main.user_cmp(815326365)
load=[0.2,0.5,1]
resist=[0.01,0.05,0.1,0.5,1,2,5,7,10]
for i in load:
    #Change parameters according to load curve
    carga1.set_parameters(PO=P1*i*0.001/3,QO=Q1*i*0.001/3)
    carga2.set_parameters(PO=P2*i*0.001/3,QO=Q2*i*0.001/3)
    carga3.set_parameters(PO=P3*i*0.001/3,QO=Q3*i*0.001/3)
    carga4.set_parameters(PO=P4*i*0.001/3,QO=Q4*i*0.001/3)
    carga5.set_parameters(PO=P5*i*0.001/3,QO=Q5*i*0.001/3)
    for j in resist:
        fault.set_parameters(RON=j)
        # Run project
        proyecto.run()
        #
        f=open(r"C:\Users\ÁNGEL\Desktop\TFG\media_tension\mt_fault.gf
46\mt_fault_01.out")
        datosbib=['Ia','Ib','Ic','I1','I2','I5','I4','I3'] #obtained
        #from ".inf" doc
        datos=[0,0,0,0,0,0,0,0]
        for k, linea in enumerate(f):
            if k<2001:
                continue
            elif k<2216:
                a=linea
                l=a.split()
                if float(l[1])>float(datos[0]):
                    datos[0]=l[1]
                if float(l[2])>float(datos[1]):
                    datos[1]=l[2]
                if float(l[3])>float(datos[2]):
                    datos[2]=l[3]
                if float(l[4])>float(datos[3]):
                    datos[3]=l[4]
                if float(l[5])>float(datos[4]):
                    datos[4]=l[5]
                if float(l[6])>float(datos[5]):
                    datos[5]=l[6]
                if float(l[7])>float(datos[6]):
                    datos[6]=l[7]
                if float(l[8])>float(datos[7]):
                    datos[7]=l[8]
            else:
                break
        f = open ('resultadosfault.txt','a')
        for n in datos:
            f.write(str(n)+"          ")
        f.write("\n")
        f.close()
```

Anexo II: Código de Matlab

Cálculo de desequilibrio

(Previamente se incluye el archivo de fasores obtenido de Python con la herramienta

import de Matlab)

```
modulos=fasores.VarName1;
angulos=fasores.VarName6;
val=['Vg','V1','V2','V3','V4','V5','V6','Ig','I1','I2','I3','I4','I5',
'I6']
D=zeros(14,1);
a=(-0.5+0.866j);
F=[1 1 1;1 a a^2;1 a^2 a];
for i=1:14*4
    variablea=modulos(3*(i-1)+1)*exp(angulos(3*(i-1)+1)*j);
    variableb=modulos(3*(i-1)+2)*exp(angulos(3*(i-1)+2)*j);
    variablec=modulos(3*(i-1)+3)*exp(angulos(3*(i-1)+3)*j);
    variable=[variablea;variableb;variablec];
    Vcomps=1/3*F*variable;
    D(i)=abs(Vcomps(3))/abs(Vcomps(2))*100; %inversa entre positiva
end
D
xlswrite('results.xls',D,'Sheet 1','A1')
```


Bibliografía

- [1] J. A. Martínez-Velasco, «Introduction to Electromagnetic Transient Analysis of Power Systems,» *Wiley Online Library*, 2014.
- [2] R. M. Mujal Rosas, *Protección de sistemas eléctricos de potencia*, UPC, 2014.
- [3] P. S. R. Murty, *Electrical Power Systems*, Elsevier, 2017.
- [4] Red Eléctrica de España, «Red Eléctrica de España,» 26 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/actividades/demanda-y-produccion-en-tiempo-real>.
- [5] Manitoba HVDC Research Centre, «PSCAD Cookbook: Load Flow Studies,» Canada, 2018.
- [6] Manitoba Hydro International, «PSCAD Automation Library,» [En línea]. Available: <https://www.pscad.com/software/pscad/automation-library>. [Último acceso: 25 Julio 2020].
- [7] Manitoba Hydro International, «Automation Library 1.2.4 documentation,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.pscad.com/webhelp/al-help/index.html>.
- [8] Aenor, «UNE 60228,» 2005.
- [9] Aenor, «UNE 20003».
- [10] Aenor, «UNE EN 50363-3,» 2005.
- [11] I. d. I. F. Pérez, *Caracterización de Materiales en Banda W*, 2011.
- [12] Aenor, «UNE 21018».
- [13] Aenor, «UNE EN 50160,» 2010.

Ángel Alonso González
ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE ESCENARIOS DE REDES ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO
DE PSCAD/EMTD Y PYTHON

- [14] J. D. H. R. W. D. G. Pepermans, «Distributed generation: definition, benefits and issues,» *elsevier*, 2003.