



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Eléctrica

**MÉTODO DE LOS NUDOS AMPLIADO Y SU APLICACIÓN A
CIRCUITOS ELÉCTRICOS**



Memoria y Anexos

Autor: Ferran Vega Comet
Director: Juan José Mesas García
Codirector: Luis Sainz Sapera
Convocatoria: Enero 2021

Resumen

El presente proyecto consiste en la extensión del método de los nudos clásico con el fin de poder abordar la resolución de una gama más amplia de circuitos eléctricos incluyendo fuentes de corriente controladas por tensión, fuentes de tensión puras y acoplamientos magnéticos. Para ello se sigue un procedimiento que, en primer lugar, realiza la determinación de la matriz de admitancias de nudo empleando matrices de incidencia. Se continúa con el estudio y la descripción del método de los nudos clásico, aplicable en la resolución de circuitos sin fuentes de corriente controladas por tensión, sin fuentes de tensión puras y sin acoplamientos magnéticos. Se sigue con el estudio y la descripción del método de los nudos ampliado, aplicable en la resolución de circuitos con presencia de fuentes de corriente controladas por tensión, fuentes de tensión puras y acoplamientos magnéticos. Finalmente se desarrolla un programa que, a partir de los datos de un circuito dado, aplique para su resolución el método de los nudos clásico o ampliado según corresponda.

Resum

El present projecte consisteix en l'extensió del mètode dels nusos clàssic amb la finalitat de poder abordar la resolució d'una gamma més àmplia de circuits elèctrics incloent fonts de corrent controlades per tensió, fonts de tensió pures i acoblaments magnètics. Per a això se segueix un procediment que, en primer lloc, realitza la determinació de la matriu d'admitàncies de nus emprant matrius d'incidència. Es continua amb l'estudi i la descripció del mètode dels nusos clàssic, aplicable en la resolució de circuits sense fonts de corrent controlades per tensió, sense fonts de tensió pures i sense acoblaments magnètics. Se segueix amb l'estudi i la descripció del mètode dels nusos ampliat, aplicable en la resolució de circuits amb presència de fonts de corrent controlades per tensió, fonts de tensió pures i acoblaments magnètics. Finalment es desenvolupa un programa que, a partir de les dades d'un circuit donat, apliqui per a la seva resolució el mètode dels nusos clàssic o ampliat segons correspongui.

Abstract

The present project consists of the extension of the classical node voltage method in order to be able to address the resolution of a wider range of electrical circuits including voltage-controlled current sources, pure voltage sources and magnetic couplings. To do this, a procedure is followed that, firstly, performs the determination of the node admittance matrix using incidence matrices. It continues with the study and description of the classical node voltage method, applicable in solving circuits without voltage-controlled current sources, without pure voltage sources and without magnetic couplings. It carries on with the study and description of the extended node voltage method, applicable in solving circuits with the presence of voltage-controlled current sources, pure voltage sources and magnetic couplings. Finally, a program is developed that, from the data of a given circuit, applies the classical or extended node voltage method for its resolution as appropriate.



Agradecimientos

Expresar mi sincero agradecimiento a mi tutor por su dedicación, por toda la ayuda que me ha brindado a lo largo del proyecto y por ser un buen profesor hecho que ha me ha generado un especial interés en las asignaturas que me ha impartido. También a mi familia y mi pareja por el apoyo y confianza durante toda la etapa universitaria. Sin ellos, no hubiese sido posible.



Glosario

Y_N	Matriz de admitancias de nudo
KCL	Ley de las corrientes de Kirchhoff
N+	Nudo de salida de una rama orientada
N-	Nudo de entrada de una rama orientada
A	Matriz de incidencia
A'	Matriz transpuesta de la matriz A
J_N	Vector de corrientes inyectadas en los nudos
V_N	Vector de potenciales de los nudos
A_g	Matriz de incidencia de las fuentes de tensión puras
A_g'	Matriz transpuesta de A_g
A_m	Matriz de incidencia de los acoplamientos magnéticos
A_m'	Matriz transpuesta de A_m
Z_m	Matriz de impedancias de los acoplamientos magnéticos
e_g	Vector de tensiones de las fuentes de tensión puras
g	Transconductancia
S	Potencia compleja



Índice

RESUMEN	I
RESUM	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMIENTOS	V
GLOSARIO	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos del trabajo.....	1
1.2. Alcance del trabajo	1
2. MATRIZ DE ADMITANCIAS DE NUDO DE UN CIRCUITO EMPLEANDO MATRICES DE INCIDENCIA	3
2.1. Método de cálculo a partir de un circuito dado.....	3
2.2. Programación mediante Matlab del proceso automatizado para la creación de la matriz Y_N	6
2.2.1. Entrada de datos del circuito 2A.....	6
2.2.2. Obtención del resultado del circuito 2A	7
2.2.3. Entrada de datos del circuito 2B	8
2.2.4. Obtención del resultado del circuito 2B.....	9
3. MÉTODO DE LOS NUDOS CLÁSICO: CIRCUITOS TIPO 1	11
3.1. Formulación del método de los nudos clásico para circuitos tipo 1.....	11
3.2. Programación mediante Matlab del proceso automatizado para la resolución de circuitos tipo 1.....	16
3.2.1. Entrada de datos del circuito 3A.....	16
3.2.2. Obtención del resultado del circuito 3A	18
3.2.3. Entrada de datos del circuito 3B	18
3.2.4. Obtención del resultado del circuito 3B.....	20
3.2.5. Entrada de datos del circuito 2A.....	20
3.2.6. Obtención del resultado del circuito 2A	22
3.2.7. Entrada de datos del circuito 2B	22
3.2.8. Obtención del resultado del circuito 2B.....	23
4. MÉTODO DE LOS NUDOS AMPLIADO: CIRCUITOS TIPO 2	25

4.1.	Formulaci3n del m3todo de los nudos ampliado para circuitos tipo 2.....	26
4.2.	Programaci3n mediante Matlab del proceso automatizado para la resoluci3n de circuitos tipo 2	30
4.2.1.	Entrada de datos del circuito 4A.....	31
4.2.2.	Obtenci3n del resultado del circuito 4A.....	32
4.2.3.	Entrada de datos del circuito 4B.....	33
4.2.4.	Obtenci3n del resultado del circuito 4B	34
4.2.5.	Entrada de datos del circuito 4C.....	35
4.2.6.	Obtenci3n del resultado del circuito 4C	36
4.2.7.	Entrada de datos del circuito 4D	37
4.2.8.	Obtenci3n del resultado del circuito 4D.....	38
5.	M3TODO DE LOS NUDOS AMPLIADO: CIRCUITOS TIPO 3 _____	39
5.1.	Formulaci3n del m3todo de los nudos ampliado para circuitos tipo 3, caso1.....	40
5.2.	Programaci3n mediante Matlab del proceso automatizado para la resoluci3n de circuitos tipo 3, caso 1	44
5.2.1.	Entrada de datos del circuito 5A.....	44
5.2.2.	Obtenci3n del resultado del circuito 5A.....	45
5.2.3.	Entrada de datos del circuito 5B.....	46
5.2.4.	Obtenci3n del resultado del circuito 5B	48
5.2.5.	Entrada de datos del circuito 5C.....	49
5.2.6.	Obtenci3n del resultado del circuito 5C.....	50
5.2.7.	Entrada de datos del circuito 5D	50
5.2.8.	Obtenci3n del resultado del circuito 5D.....	52
5.3.	Formulaci3n del m3todo de los nudos ampliado para circuitos tipo 3, caso 2....	53
5.4.	Programaci3n mediante Matlab del proceso automatizado para la resoluci3n de circuitos tipo 3, caso 2	56
5.4.1.	Entrada de datos del circuito 5E.....	57
5.4.2.	Obtenci3n del resultado del circuito 5E	58
5.4.3.	Entrada de datos del circuito 5F.....	59
5.4.4.	Obtenci3n del resultado del circuito 5F	60
5.4.5.	Entrada de datos del circuito 5G	61
5.4.6.	Obtenci3n del resultado del circuito 5G.....	62
5.4.7.	Entrada de datos del circuito 5H	62
5.4.8.	Obtenci3n del resultado del circuito 5H.....	64
5.4.9.	Entrada de datos del circuito 5I.....	65
5.4.10.	Obtenci3n del resultado del circuito 5I	66

5.5.	Formulación del método de los nudos ampliado para circuitos tipo 3, caso 3	66
5.6.	Programación mediante Matlab del proceso automatizado para la resolución de circuitos tipo 3, caso 3.....	71
5.6.1.	Entrada de datos del circuito 5J	72
5.6.2.	Obtención del resultado del circuito 5J.....	73
5.6.3.	Entrada de datos del circuito 5K	73
5.6.4.	Obtención del resultado del circuito 5K.....	75
5.6.5.	Entrada de datos del circuito 5L.....	75
5.6.6.	Obtención del resultado del circuito 5L	76
5.6.7.	Entrada de datos del circuito 5M	77
5.6.8.	Obtención del resultado del circuito 5M	78
6.	ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL	79
6.1.	Clasificación y análisis de los agentes con impacto ambiental	79
6.2.	Cálculo de la huella de carbono.....	80
7.	PRESUPUESTO	83
7.1.	Costes de los recursos humanos	83
7.2.	Coste de los recursos materiales	84
7.3.	Costes totales.....	85
	CONCLUSIONES	87
	BIBLIOGRAFÍA	89
	ANEXO A. PROGRAMA CÁLCULO YN	91
A1.	Plantilla_YN	91
A2.	Código para el cálculo de la matriz de admitancias de nudo (Y_N) a través del método de las matrices de incidencia mediante el uso de <i>Matlab</i>	92
	ANEXO B. PROGRAMA CIRCUITOS TIPO 1	95
B1.	Plantilla datos circuitos tipo 1.....	95
B2.	Código de resolución de circuitos tipo 1 mediante el uso de <i>Matlab</i>	96
	ANEXO C. PROGRAMA CIRCUITOS TIPO 2	103
C1.	Plantilla datos circuitos tipo 2.....	103
C2.	Código de resolución de circuitos tipo 2 mediante el uso de <i>Matlab</i>	104
	ANEXO D. PROGRAMA CIRCUITOS TIPO 3	113
D1.	Plantilla datos circuitos tipo 3.....	113

D2. Código de resolución de circuitos tipo 3 mediante el uso de *Matlab*..... 114



1. Introducción

El método de los nudos es un procedimiento de análisis de circuitos que se estudia en ingeniería eléctrica y que consiste en la aplicación de la ley de las corrientes de Kirchhoff (KCL). La aplicación de este método tiene limitaciones ya que solamente se pueden resolver de forma directa circuitos eléctricos que contengan impedancias, fuentes de corriente y fuentes de tensión no puras (estas últimas transformadas en fuentes de corriente equivalentes).

En el presente proyecto se pretende introducir una ampliación de este método, la cual se ha estudiado con la finalidad de poder resolver una variedad más amplia de circuitos.

1.1. Objetivos del trabajo

El objetivo principal del presente proyecto es la extensión del método de los nudos clásico con la finalidad de poder abordar la resolución de una gama de circuitos eléctricos más amplia incluyendo nuevos elementos en los circuitos como son las fuentes de corriente controladas por tensión, las fuentes de tensión puras y los acoplamientos magnéticos.

En segundo lugar, otro objetivo propuesto es el desarrollo de un programa utilizando el software informático *Matlab* [1], que, a partir de los datos de un circuito dado, aplique para su resolución el método de los nudos clásico o ampliado según corresponda.

1.2. Alcance del trabajo

El alcance del proyecto se establece a partir de los procedimientos que se deben realizar para lograr poder resolver circuitos con las características definidas anteriormente. Para ello, se sigue el siguiente procedimiento:

En primer lugar, se realizará un estudio para conocer el método de determinación de la matriz de admitancias de nudo de un circuito empleando matrices de incidencia. La utilización de las matrices de incidencia proporcionará una disminución del volumen de trabajo siendo un método simple y eficaz para la obtención de la matriz de admitancia sobre todo en circuitos que sean complejos y de gran tamaño.

Se estudiará también el método de los nudos clásico ya que es la base de donde se parte. A partir de conocer este método, se podrá proceder a la resolución de circuitos que no contengan fuentes de corriente controladas por tensión, fuentes de tensión puras ni tampoco acoplamientos magnéticos.

Una vez se conozca bien el método de los nudos clásico, se estudiará el método de los nudos ampliado, donde se prevé ir añadiendo distintos elementos al circuito para poder finalmente tener todos los conocimientos y herramientas necesarias para resolver circuitos eléctricos que contengan fuentes de corriente controladas por tensión, fuentes de tensión puras y/o acoplamientos magnéticos.

En último lugar y poniendo en práctica todos los conocimientos adquiridos durante el análisis del método de los nudos tanto clásico como ampliado, se aplicarán para el desarrollo de un programa con el que se conseguirá que un usuario que no necesariamente tenga que ser un experto en la materia, sino que simplemente tenga conocimientos básicos, pueda introducir los datos de un circuito dado y ejecutarlo para obtener como resultado todos los valores de tensiones, corrientes y potencias de las ramas del circuito.

Los métodos de los nudos clásico y ampliado se van a aplicar a circuitos trabajando en régimen permanente, ya sea sinusoidal o de continua. Además, dado que el conjunto de los números reales está incluido en el conjunto de los números complejos, el programa se va a desarrollar empleando números complejos y para circuitos trabajando en régimen sinusoidal permanente, pues este régimen incluye al de continua permanente como caso particular.

Se decide que el programa proporcione los resultados no redondeados a un número de decimales concreto, dejando en manos del usuario el posterior tratamiento de estos resultados en relación a este aspecto.

Conviene remarcar que todos aquellos circuitos que contengan elementos adicionales a los antes mencionados, tales como fuentes de corriente controladas por corriente, fuentes de tensión controladas por tensión, fuentes de tensión controladas por corriente, transformadores, etc., quedan fuera del alcance de este TFG.

2. Matriz de admitancias de nudo de un circuito empleando matrices de incidencia

Si se conoce el método de determinación de la matriz de admitancias de una red eléctrica cualquiera a partir de los valores de impedancias y su localización entre los nudos del sistema, se puede llegar a la conclusión que para circuitos complejos es un método que puede ser laborioso y provocar errores al estar trabajando con una gran cantidad de elementos, valores y relaciones entre las conexiones.

El nuevo método que se propone utiliza matrices de incidencia, las cuales ayudan a simplificar el volumen de trabajo y así reducir posibles errores humanos en el proceso de creación de la matriz. Para poder demostrar de una forma más comprensible el funcionamiento de este método de determinación de la matriz de admitancias de nudo de un circuito cualquiera empleando matrices de incidencia, se utilizará un ejemplo de circuito eléctrico. Independientemente del tipo de circuito con el que se trabaje, ya sea tipo 1, tipo 2 o tipo 3 la determinación de la matriz de admitancias de nudo se realizará de la misma forma.

2.1. Método de cálculo a partir de un circuito dado

Se parte de la representación gráfica de un circuito eléctrico, donde se muestran los valores de las impedancias de los elementos y los valores de las fuentes de una forma genérica.

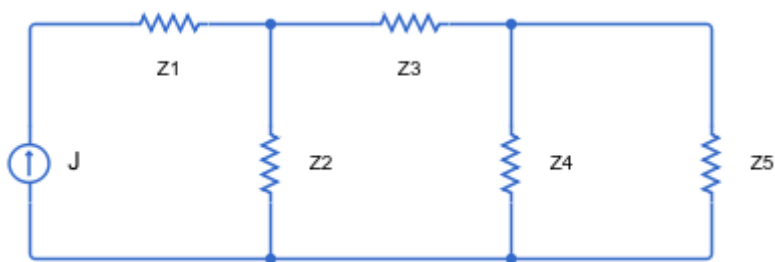


Figura 2.1. Representación esquemática del circuito.

A continuación, se representa nuevamente el circuito con sus impedancias, nombrando cada uno de los nudos como N_i , asignando uno de ellos como nudo de referencia (tierra) con $i = 0$, y el resto de nudos con valores de $i = 1$ hasta n , siendo n el número total de nudos del circuito menos 1. El inicio de la numeración de los nudos es arbitrario. Por otro lado, se debe asignar una orientación a cada una de las ramas del circuito que contengan impedancias, definiendo un sentido de recorrido para cada una de ellas que va desde donde parten hasta donde terminan. Finalmente definir una identificación

nombrando cada una de las ramas como R_k ($k=1,2,3,\dots,b$), siendo b el número total de ramas del circuito. En este apartado, como lo que se busca es la matriz de admitancias, solamente será necesario asignar una orientación y una identificación a las ramas que contengan impedancias. Más adelante, en otros apartados, se orientarán todas las ramas del circuito.

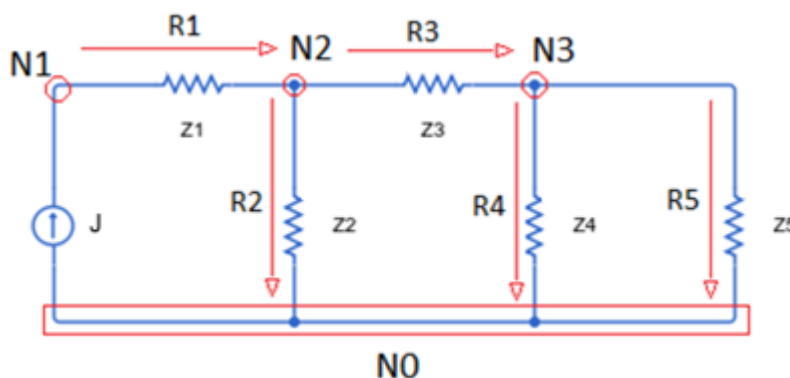


Figura 2.2. Esquema de los nudos y las ramas orientadas del circuito

En este punto se pueden conocer las dimensiones que va a tener la matriz de admitancias de nudo, que será nombrada como Y_N , la cual será una matriz cuadrada de n filas por n columnas siendo n el número total de nudos menos 1.

Para seguir con el proceso se introduce un nuevo concepto, la incidencia.

- **Concepto de incidencia**

Sea r una rama genérica de un circuito, y p y q sus dos nudos extremos. En la rama orientada se sigue un recorrido que se aleja del nudo p y se acerca al nudo q . Se llama incidencia de la rama r a un vector columna, A_r , que tiene n componentes, y que los únicos valores no nulos son los que ocupan el sitio de p y q de acuerdo con:

$$A_r(p)=+1 \qquad A_r(q)=-1$$

Si p o q fuera el nudo de referencia, A_r tendría un solo elemento no nulo

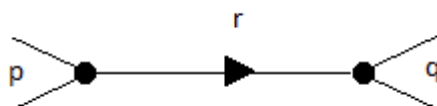


Figura 2.3. Esquema rama genérica de un circuito

Una vez expuesto este concepto se puede generar la matriz de incidencia A asociada a un circuito. Para ello el proceso que se sigue es el siguiente. Cuando se está en una rama R_k y esta rama está comprendida entre un nudo p y otro q , con una orientación desde el nudo p hasta el q , se coloca un 1 en la fila p correspondiente a la columna de la rama R_k y un -1 en la fila q correspondiente a la columna de la rama R_k . Para terminar de completar la columna, se colocarán ceros en los espacios vacíos. Esta matriz tendrá unas dimensiones de n filas por b columnas. Las filas de la matriz representan los nudos del circuito exceptuando el de referencia y las columnas las distintas ramas de dicho circuito.

A partir del ejemplo del circuito anterior y para acabar de entender el funcionamiento, se muestra cómo hacer el proceso para una de las ramas. Si se escoge la rama "R1" y se observa que la dirección asignada va del nudo 1 al nudo 2, se colocará en la columna R1 de la matriz de incidencia un número 1 en la fila 1 correspondiente al nudo 1 y un -1 en la fila 2 correspondiente al nudo 2. Para acabar de rellenar la columna, se va a introducir un 0 en el espacio vacío del nudo 3 ya que este nudo no tiene relación con los anteriores. Una vez realizado este ejercicio para todas las ramas que contienen impedancias, se tendrá formada una matriz que nos relaciona todos los nudos y elementos de la red y se obtiene el resultado que aparece abajo. Esta matriz no tiene en cuenta el nudo de referencia.

<i>Nudo</i>	<u>R1</u>	<u>R2</u>	<u>R3</u>	<u>R4</u>	<u>R5</u>
N1	1	0	0	0	0
N2	-1	1	1	0	0
N3	0	0	-1	1	1

Finalmente queda calcular la matriz de admitancias y para ello queda aplicar la siguiente ecuación y obtener el resultado final de la matriz Y_N .

$$Y_N = \sum_{k=1}^5 \underline{y}_k \cdot (A_k \cdot A_k^T) \tag{Eq.2.1}$$

$$\begin{aligned}
 Y_N &= \underline{y}_1 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [1 \quad -1 \quad 0] + \underline{y}_2 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [0 \quad 1 \quad 0] + \underline{y}_3 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot [0 \quad 1 \quad -1] + \underline{y}_4 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot [0 \quad 0 \quad 1] + \underline{y}_5 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot [0 \quad 0 \quad 1] \\
 &= \underline{y}_1 \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \underline{y}_2 \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \underline{y}_3 \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} + \underline{y}_4 \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \underline{y}_5 \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 Y_N &= \begin{bmatrix} \underline{y}_1 & -\underline{y}_1 & 0 \\ -\underline{y}_1 & \underline{y}_1 + \underline{y}_2 + \underline{y}_3 & -\underline{y}_3 \\ 0 & -\underline{y}_3 & \underline{y}_3 + \underline{y}_4 + \underline{y}_5 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

2.2. Programación mediante Matlab del proceso automatizado para la creación de la matriz Y_N

Para poder agilizar este proceso de cálculo y obtener el resultado de la matriz de admitancias de nudo, ya que es el primer paso para la realización de cualquier estudio de red eléctrica y en concreto en este proyecto para el análisis de circuitos eléctricos, se ha desarrollado un programa con el software de cálculo matemático Matlab [1] cuyo código se proporciona en el Anexo A2.

Este programa se basa en que a partir de introducir en una hoja de cálculo (“.xlsx”) los valores de las impedancias del circuito del cual se quiera obtener la matriz de admitancias de nudo, realiza un procesamiento de los datos y un cálculo basado en el método explicado anteriormente de las matrices de incidencia para obtener finalmente el resultado deseado. La visualización de este resultado se obtiene en una nueva hoja de cálculo que se genera automáticamente.

A continuación, se muestra cómo debe de ser la entrada de datos en la hoja de cálculo, así como el resultado de salida que se obtiene después de ejecutar el programa. Para ello se realizan dos ejemplos de circuitos eléctricos.

2.2.1. Entrada de datos del circuito 2A

Se ha denominado 2A al siguiente circuito procedente de la referencia [2].

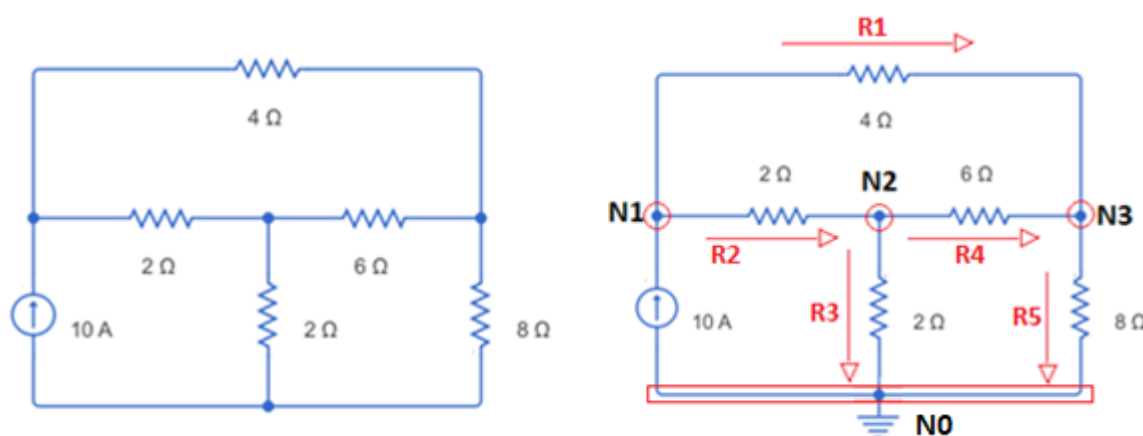


Figura 2.4. Circuito 2A y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

Una vez identificados los nudos y orientadas las ramas, se dispone de una plantilla de Excel llamada *Plantilla_YN*, la cual se aporta en el Anexo A1, donde se deben introducir los datos del siguiente modo: en la casilla nudo de salida (N+) se introduce el número de nudo de donde sale la flecha de cada una de las ramas. En la siguiente casilla, nudo de entrada (N-) se introduce el número del nudo al cual se

dirige la flecha. Finalmente, en las casillas de la derecha se introduce el valor de la impedancia de la rama en cuestión.

Hay que rellenar las casillas que sean necesarias hasta completar todas las ramas que contengan impedancias del circuito.

A continuación, se muestra la entrada de datos del ejemplo práctico.

Nudo salida N+	Nudo entrada N-	Z	
		R (Ohm)	X (Ohm)
1	3	4	0
1	2	2	0
2	0	2	0
2	3	6	0
3	0	8	0

Figura 2.5. Entrada de datos del circuito 2A.

Una vez rellenado se debe guardar el documento Excel con el nombre del problema. Este ejemplo se guardará como *Circuito_2A_YN*.

2.2.2. Obtención del resultado del circuito 2A

La obtención del resultado se hace a través del software Matlab. Una vez abierto se debe iniciar el programa *Calculo_YN.m*. Cuando este programa es ejecutado, pregunta al usuario a través de la Matlab Command Window el nombre del archivo Excel que contiene los datos de impedancias del circuito. Una vez el usuario especifica en la Matlab Command Window dicho nombre, por ejemplo, en este caso *Circuito_2A_YN*, el programa se ejecuta y genera como resultado un nuevo archivo Excel de nombre *Resul_Circuito_2A_YN* que únicamente contiene la matriz Y_N .

De esta forma, introduciendo en la plantilla de datos de entrada los datos de cualquier circuito, se puede obtener el resultado.

A continuación, se muestra la matriz Y_N que se obtiene al ejecutar el fichero Excel *Circuito_2A_YN*.

	A	B	C	D	E	F
1	YN (Siemens)					
2	Y		Y		Y	
3	G(S)	B(S)	G(S)	B(S)	G(S)	B(S)
4	0.75	0	-0.5	0	-0.25	0
5	-0.5	0	1.16666667	0	-0.16666667	0
6	-0.25	0	-0.16666667	0	0.54166667	0
7						

Figura 2.6. Resultado de salida: Matriz Y_n obtenida correspondiente al circuito 2A.

2.2.3. Entrada de datos del circuito 2B

Se ha denominado 2B al siguiente circuito procedente de la referencia [3].

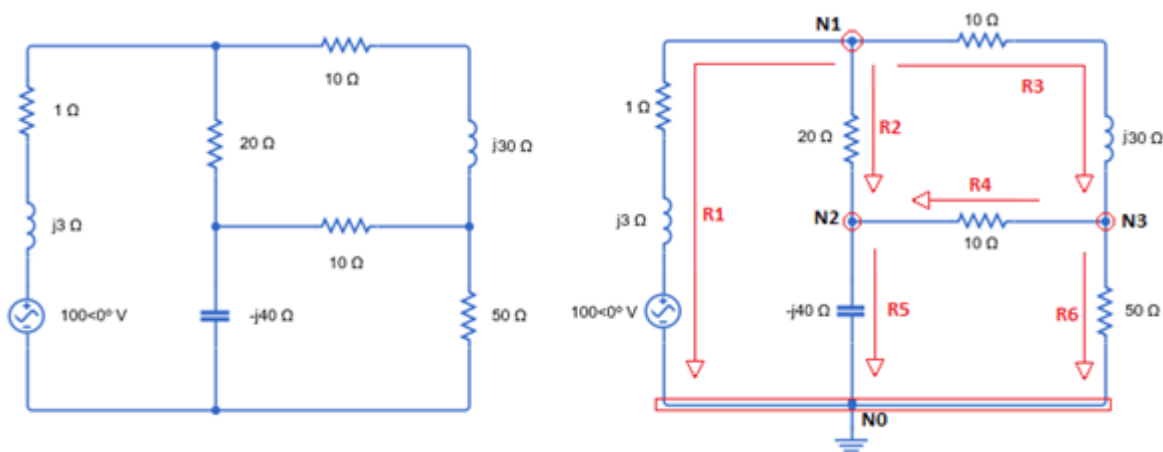


Figura 2.7. Circuito 2B y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

Recordando el proceso realizado anteriormente, una vez identificados los nudos y orientadas las ramas, se introducen los datos del circuito en la plantilla llamada *Plantilla_YN*, la cual se aporta en el Anexo A1, rellenando tantas filas como ramas que contengan impedancias. Una vez rellenada deberá quedar del siguiente modo:

Nudo salida	Nudo entrada	Z	
		R (Ohm)	X (Ohm)
1	0	1	3
1	2	20	0
1	3	10	30
3	2	10	0
2	0	0	-40
3	0	50	0

Figura 2.8. Entrada de datos del circuito 2B.

Una vez rellenado se debe guardar el documento Excel con el nombre del problema. En este caso se guardará como *Circuito_2B_YN*.

2.2.4. Obtención del resultado del circuito 2B

La obtención del resultado se hace a través del software Matlab. Una vez abierto se debe iniciar el programa *Calculo_YN.m*. Cuando este programa es ejecutado, pregunta al usuario a través de la Matlab Command Window el nombre del archivo Excel que contiene los datos de impedancias del circuito. Una vez el usuario especifica en la Matlab Command Window dicho nombre, en este caso *Circuito_2B_YN*, el programa se ejecuta y genera como resultado un nuevo archivo Excel de nombre *Resul_Circuito_2B_YN* que únicamente contiene la matriz Y_N .

De esta forma, introduciendo en la plantilla de datos de entrada los datos de cualquier circuito, se puede obtener el resultado.

A continuación, se muestra la matriz Y_N que se obtiene al ejecutar el fichero Excel *Circuito_2B_YN*.

YN (Siemens)					
Y		Y		Y	
G(S)	B(S)	G(S)	B(S)	G(S)	B(S)
0.16	-0.33	-0.05	0	-0.01	0.03
-0.05	0	0.15	0.025	-0.1	0
-0.01	0.03	-0.1	0	0.13	-0.03

Figura 2.9. Resultado de salida: Matriz Y_N obtenida correspondiente al circuito 2B.

3. Método de los nudos clásico: Circuitos tipo 1

Con la finalidad de poder analizar y resolver circuitos eléctricos de varios tipos, y una vez mostrado el método de obtención de la matriz de admitancias de nudo a partir de matrices de incidencia, se puede abordar la resolución del primer tipo de circuitos, los circuitos tipo 1.

Los circuitos tipo 1 son aquellos que pueden estar formados por los siguientes tipos de elementos:

- 1- Impedancias con valor distinto de cero o admitancias, de una sola pareja de terminales.
- 2- Fuentes de corriente
- 3- Fuentes de tensión no puras, es decir cuyo modelo Thévenin tiene impedancia no nula.

En todos los tipos de circuito que se van a tratar en este TFG y para la correcta resolución de cada uno a la que se hará frente, es fundamental la preparación del circuito ya que es el primer paso.

En primer lugar, se tiene que identificar cada uno de los nudos, asignando uno de ellos como nudo de referencia, el de tierra con el número 0 y el resto con valores del 1 al n , siendo n el número total de nudos del circuito menos 1. Por otro lado, se debe asignar una orientación a cada una de las ramas del circuito, definiendo un sentido de recorrido para cada una de ellas que va desde donde parten hasta donde terminan. Finalmente definir una identificación, en este caso desde $R1$ hasta Rb siendo b el número total de ramas del circuito.

A partir de este momento y a diferencia del capítulo anterior sí que es importante definir la orientación de las ramas de una forma específica, teniendo en cuenta:

- a) Si la rama es una impedancia, la orientación de la flecha es indiferente.
- b) Si la rama es una fuente de corriente, la orientación de la flecha debe coincidir con la flecha de la fuente.
- c) Si la rama es una fuente de tensión no pura, la orientación de la flecha debe ir del positivo al negativo de la fuente.

3.1. Formulación del método de los nudos clásico para circuitos tipo 1

Sea un circuito con b ramas. Si y_k son las admitancias de cada una de ellas, j_k las corrientes de las fuentes de corriente o las equivalentes de las fuentes de tensión y u_k la diferencia de potencial en la rama k ($k=1, 2, \dots, b$) la aplicación de la KCL a todos sus nudos salvo el de referencia da:

$$0 = \sum_{k=1}^b A_k \cdot (\underline{y}_k \cdot \underline{u}_k + \underline{j}_k) = \sum_{k=1}^b \underline{y}_k \cdot (A_k \cdot A'_k) \cdot V_N + \sum_{k=1}^b A_k \cdot \underline{j}_k \quad (\text{Eq.3.1})$$

Si se toma,

$$Y_N = \sum_{k=1}^b \underline{y}_k \cdot (A_k \cdot A'_k) \quad (\text{Eq.3.2})$$

$$J_N = - \sum_{k=1}^b A_k \cdot \underline{j}_k \quad (\text{Eq.3.3})$$

Resulta,

$$Y_N \cdot V_N = J_N \quad (\text{Eq.3.4})$$

Observando la formación del sistema planteado:

- La matriz de coeficientes Y_N , llamada matriz de admitancias de nudo, es simétrica. Sus elementos en la diagonal principal son las sumas de las admitancias que inciden en cada uno de los nudos y los elementos fuera de la diagonal principal son las sumas con signo negativo de las admitancias entre parejas de nudos.
- El vector del segundo miembro, J_N , llamado vector de corrientes inyectadas en los nudos, tiene como componentes las sumas de las corrientes que llegan a los diferentes nudos y que provienen de las fuentes de corriente del circuito o de las fuentes de tensión no puras transformadas a fuentes de corriente (no puras).
- El vector V_N , incógnita del sistema, es el vector de potenciales de los nudos, donde dichos potenciales están referidos al nudo de referencia.

La aplicación del método de los nudos a los circuitos tipo 1 partiendo de los datos del circuito conlleva a efectuar los siguientes pasos.

- 1- Transformar las fuentes de tensión no puras en fuentes de corriente no puras pasando del modelo Thévenin al modelo Norton para tener todas las fuentes del circuito como fuentes de corriente.
- 2- Calcular la matriz Y_N tal y como se ha descrito en el punto anterior.
- 3- Calcular el vector J_N (vector de corrientes inyectadas en los nudos) a partir de las fuentes de corriente
- 4- Calcular el vector de potenciales

$$V_N = Y_N^{-1} \cdot J_N \quad (\text{Eq.3.5})$$

Siguiendo este proceso descrito se llega a obtener un vector que contiene las tensiones de los nudos. Estas tensiones son variables que no tienen significado físico, pero que son necesarias en el método de los nudos para calcular las variables que sí que tienen significado físico: las tensiones de rama y las corrientes de rama, siendo una rama todo lo que hay entre nudo y nudo. Una vez calculadas estas dos variables en cada rama, es posible calcular las potencias consumidas por cada una de ellas.

Cumpliendo con imponer la orientación especificada según los elementos, en cada rama del circuito, la tensión de rama tiene el positivo en el nudo de salida y el negativo en el de llegada. Además, en cada una de ellas la corriente de rama sale del nudo de salida y va hacia el de llegada. Por lo tanto, en cada rama el producto de esa tensión de rama por la corriente de rama conjugada da lugar a la potencia compleja consumida por la rama. Esta potencia es consumida porque la corriente de rama entra por el positivo de la tensión de rama.

Dada una rama cualquiera del circuito cuyos extremos son N+ y N-, se cumple que:

- La tensión de rama es la diferencia entre la tensión del nudo N+ y la tensión del nudo N-
- Si la rama es una impedancia,

$$\text{Corriente de rama} = \frac{\text{Tensión de rama}}{\text{Impedancia de rama}} \quad (\text{Eq.3.6})$$

- Si la rama es una fuente de corriente, $\text{Corriente de rama} = \text{Corriente de la fuente}$
- Si la rama es una fuente de tensión no pura,

$$\text{Corriente de rama} = \frac{\text{Tensión de rama}}{\text{Impedancia de la fuente}} - \frac{\text{Tensión de la fuente}}{\text{Impedancia de la fuente}} \quad (\text{Eq.3.7})$$

- Potencia compleja consumida por la rama,

$$S = \text{Tensión de rama} * \text{conj}(\text{Corriente de rama}) \quad (\text{Eq.3.8})$$

Tras detallar el proceso asociado a este método, se muestra un ejemplo de circuito con el sistema matricial que se obtiene al realizar el proceso anterior.

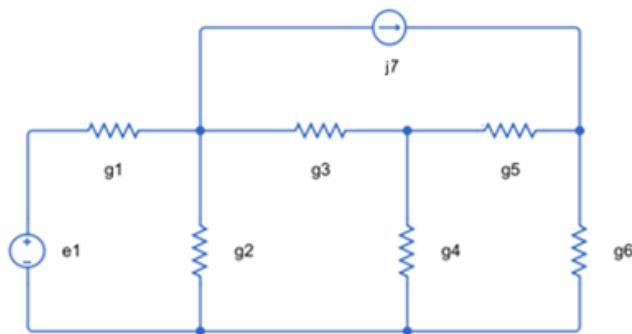


Figura 3.1. Ejemplo introductorio circuito tipo 1.

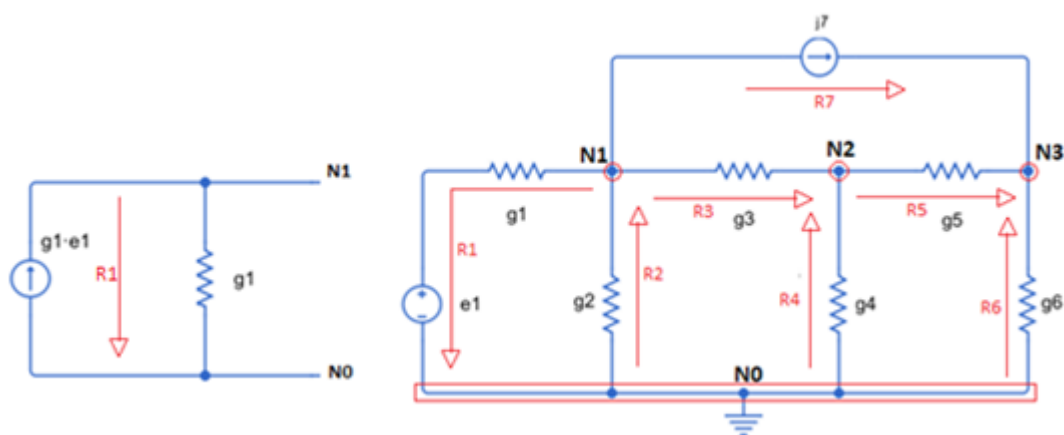


Figura 3.2. Transformación de la fuente de tensión no pura en fuente de corriente (no pura) y preparación del circuito para su resolución.

Una vez con el circuito preparado el primer paso es hacer uso de la matriz de incidencia.

Nudo	$\underline{R1}$	$\underline{R2}$	$\underline{R3}$	$\underline{R4}$	$\underline{R5}$	$\underline{R6}$
N1	1	-1	1	0	0	0
N2	0	0	-1	-1	1	0
N3	0	0	0	0	-1	-1

Aplicando la ecuación 3.2 mostrada anteriormente se obtiene el resultado final de la matriz Y_N .

$$Y_N = g_1 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [1 \ 0 \ 0] + g_2 \cdot \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [-1 \ 0 \ 0] + g_3 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [1 \ -1 \ 0] + g_4 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [0 \ -1 \ 0] + g_5 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot [0 \ 1 \ -1] + g_6 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot [0 \ 0 \ -1]$$

$$Y_N = \begin{bmatrix} g1 + g2 + g3 & -g3 & 0 \\ -g3 & g3 + g4 + g5 & -g5 \\ 0 & -g5 & g5 + g6 \end{bmatrix}$$

A continuación, se calcula el vector columna correspondiente al vector de corrientes inyectadas en los nudos, para ello se utiliza la ecuación 3.3 donde se introduce la incidencia de cada una de las fuentes de corriente junto a su valor y en el caso de tener fuentes de tensión no puras su equivalente transformado a fuente de corriente incorporando también su incidencia junto al valor de la corriente (en la fórmula que viene a continuación se ha consignado la incidencia de R1, que es la misma tanto para la fuente de corriente $g1 \cdot e1$ como para la impedancia $g1$, y como la fuente de corriente apunta en sentido contrario a R1, el valor de corriente de la fuente va con signo negativo).

$$J_N = - \left[\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot j7 + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot (-e1 \cdot g1) \right] = \begin{bmatrix} e1 \cdot g1 - j7 \\ 0 \\ j7 \end{bmatrix}$$

A partir de las dos matrices calculadas es posible resolver el sistema correspondiente a la ecuación 3.4 para obtener vector de potenciales de los nudos:

$$Y_N \cdot V_N = \begin{bmatrix} g1 + g2 + g3 & -g3 & 0 \\ -g3 & g3 + g4 + g5 & -g5 \\ 0 & -g5 & g5 + g6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g1 \cdot e1 - j7 \\ 0 \\ j7 \end{bmatrix} = J_N$$

Finalmente, y a partir de los potenciales de los nudos se puede calcular las tensiones de rama, y por último las corrientes de rama tal y como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \underline{u}_1 &= \underline{v}_1 - 0 & \underline{i}_1 &= g1 \cdot \underline{u}_1 - g1 \cdot e1 = g1 \cdot \underline{v}_1 - g1 \cdot e1 \\ \underline{u}_2 &= 0 - \underline{v}_1 & \underline{i}_2 &= g2 \cdot \underline{u}_2 = g2 \cdot (-\underline{v}_1) \\ \underline{u}_3 &= \underline{v}_1 - \underline{v}_2 & \underline{i}_3 &= g3 \cdot \underline{u}_3 = g3 \cdot (\underline{v}_1 - \underline{v}_2) \\ \underline{u}_4 &= 0 - \underline{v}_2 & \underline{i}_4 &= g4 \cdot \underline{u}_4 = g4 \cdot (-\underline{v}_2) \\ \underline{u}_5 &= \underline{v}_2 - \underline{v}_3 & \underline{i}_5 &= g5 \cdot \underline{u}_5 = g5 \cdot (\underline{v}_2 - \underline{v}_3) \\ \underline{u}_6 &= 0 - \underline{v}_3 & \underline{i}_6 &= g6 \cdot \underline{u}_6 = g6 \cdot (-\underline{v}_3) \\ \underline{u}_7 &= \underline{v}_1 - \underline{v}_3 & \underline{i}_7 &= j7 \end{aligned}$$

En este punto ya se conocen todas las tensiones y corrientes de las ramas del circuito.

3.2. Programación mediante Matlab del proceso automatizado para la resolución de circuitos tipo 1

Para poder abordar este tipo de circuitos de una forma más rápida y de una forma sencilla para el usuario se ha desarrollado un programa Matlab capaz de realizar los cálculos necesarios descritos en el apartado anterior. De igual forma que el programa de cálculo de la matriz Y_N , a partir de un fichero Excel donde se introducen los datos del circuito, ejecutando el programa y obteniendo un nuevo fichero con los resultados.

El programa correspondiente a este tipo de circuitos se encuentra en el Anexo B2.

Para poder mostrar el funcionamiento y los resultados del programa de un modo más visual y entendedor, se va realizar y comentar como se ejecuta mediante unos ejemplos de circuitos. En primer lugar y para cualquier circuito con el que se trabaje, se procede a analizarlo, identificar los nudos, establecer el nudo de referencia y la orientación de las ramas siguiendo las normas descritas en el principio de este capítulo número 3. A partir de ahora se añade un nuevo aspecto a tener en cuenta, la identificación de los elementos. La identificación de los elementos es un detalle que ayuda al usuario a poder encontrar en el fichero de salida de resultados los asociados a cada una de las ramas (elementos) del circuito. Esta identificación se tiene que hacer asignando un número a cada rama sin posibilidad de repetir ninguno.

A continuación, se muestra el proceso que hay que seguir para la resolución de circuitos a través del programa proporcionado resolviendo diversos circuitos. El primero de los circuitos de ejemplo se comentará de una forma más detallada y en el resto simplemente se recordarán los pasos, ya que el proceso de resolución de circuitos a través del programa se realiza de la misma forma.

3.2.1. Entrada de datos del circuito 3A

Se ha denominado 3A al siguiente circuito procedente de la referencia [4].

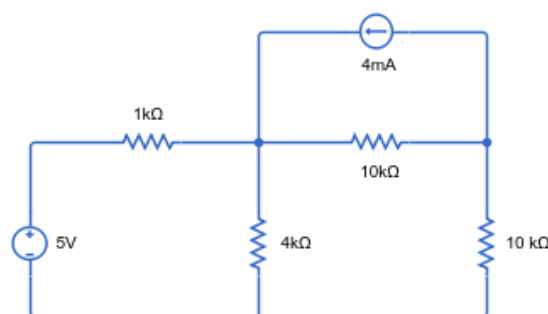


Figura 3.3. Circuito 3A.

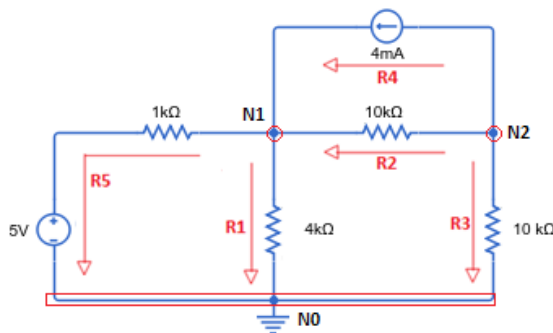


Figura 3.4. Preparación del circuito 3A para introducir sus datos en el fichero Excel.

Una vez realizada la preparación del circuito de forma manual, el siguiente paso es introducir los datos en la plantilla de Excel. Para ello se debe abrir la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 1*, la cual se aporta en el Anexo B1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, como por ejemplo en este caso en la columna X (ohm) de las impedancias, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito.

Tanto el valor de la corriente de las fuentes de corriente como de la tensión de las fuentes de tensión no puras deberán introducirse en notación polar.

A continuación, se muestra como se ha rellenado el fichero de datos de entrada.

Impedancias de dos terminales					
Id.	Nudo salida	Nudo entrada	Z		
elemento	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)	
1	1	0	4000	0	
2	2	1	10000	0	
3	2	0	10000	0	

Fuentes de corriente				
Id.	Nudo salida	Nudo entrada	J	
elemento	N+	N-	Mod J (A)	Arg J (°)
4	2	1	0.004	0

Fuentes de tensión no puras						
Id.	Nudo salida	Nudo entrada	E		Z	
elemento	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)	R (Ohm)	X (Ohm)
5	1	0	5	0	1000	0

Figura 3.5. Entrada de datos del circuito 3A.

Una vez introducidos todos los datos correctamente, el siguiente paso es guardar este documento que se ha modificado con el nombre del circuito, en este ejemplo se guarda como *Circuito_3A*.

3.2.2. Obtención del resultado del circuito 3A

Para la obtención del resultado hay que ejecutar el programa cuyo nombre es *Calculo_circuitos_T1.m*, una vez se inicia el programa pregunta al usuario a través de la MATLAB Command Window el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito. Especificando el nombre, el programa se ejecuta y genera como resultado un nuevo archivo Excel de nombre *Resul_XXX* siendo *XXX* el nombre del archivo del circuito. Siguiendo con el ejemplo en este caso se introduce *Circuito_3A* por lo que se obtienen los resultados en un nuevo archivo con el nombre de *Resul_Circuito_3A*.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

Trabajando de esta manera el usuario puede crear varios archivos Excel con nombres y datos de circuitos distintos y, ejecutándolos de uno en uno con el mismo programa, se obtiene archivo Excel con nombres y resultados de circuitos distintos.

El resultado que se obtiene con el ejemplo anterior es el siguiente:

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)
1	5.38461538	0	1	1	0	5.38461538	0	0.00134615	0	0.00724852	0
2	17.3076923	180	2	2	1	22.6923077	180	0.00226923	180	0.05149408	0
			3	2	0	17.3076923	180	0.00173077	180	0.02995562	0
			4	2	1	22.6923077	180	0.004	0	-0.09076923	0
			5	1	0	5.38461538	0	0.00038462	0	0.00207101	0

Figura 3.6. Resultados obtenidos del circuito 3A.

Se pueden observar todos los datos que se han descrito en las distintas columnas, así como la columna de la identidad del elemento con la que se pretende facilitar la localización y distinguir cada una de las ramas.

3.2.3. Entrada de datos del circuito 3B

Se ha denominado 3B al siguiente circuito procedente de la referencia [5].

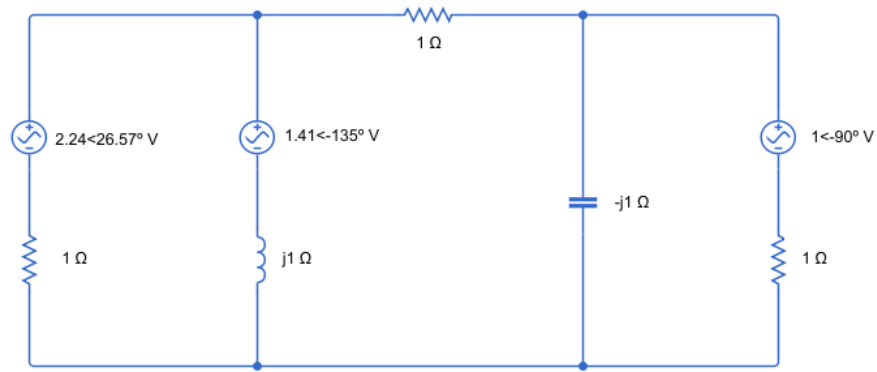


Figura 3.7. Circuito 3B.

1) Se realiza la preparación del circuito a partir del original.

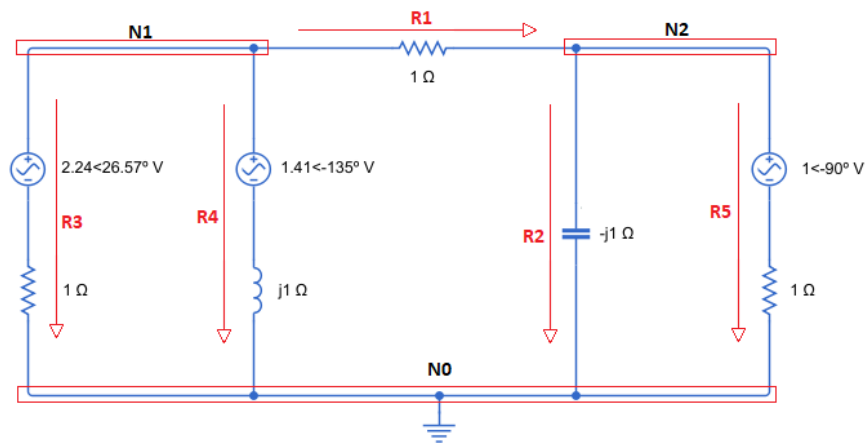


Figura 3.8. Preparación del circuito 3B para introducir sus datos en el fichero Excel.

2) Introducción de datos en la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 1*, la cual se aporta en el Anexo B1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito, en este caso el espacio correspondiente a las fuentes de corriente.

Tanto los valores de la corriente como de tensión de las fuentes que puedan encontrarse en el circuito deberán introducirse en notación polar.

Impedancias de dos terminales						
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	Z			
	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)		
1	1	2	1			0
2	2	0	0			-1

Fuentes de tensión no puras						
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	E		Z	
	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)	R (Ohm)	X (Ohm)
3	1	0	2.23606798	26.5650512	1	0
4	1	0	1.41421356	-135	0	1
5	2	0	1	-90	1	0

Figura 3.9. Entrada de datos del circuito 3B.

- 3) Guardar documento como *Circuito_3B*.

3.2.4. Obtención del resultado del circuito 3B

- 4) Ejecución del programa *Calculo_circuitos_T1.m* utilizando *Matlab*.
- 5) Especificar el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito a través de la Matlab Command Window para que el programa se ejecute: *Circuito_3B*.
- 6) Obtención del resultado a través de un nuevo archivo Excel generado de nombre *Resul_Circuito_3B*.

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)
1	1	90	1	1	2	1	90	1	90	1	0
2	2.0206E-15	-52.8152935	2	2	0	2.0206E-15	-52.8152935	2.0206E-15	37.1847065	0	-4.083E-30
			3	1	0	1	90	2	180	-7.1054E-15	-2
			4	1	0	1	90	2.23606798	-26.5650512	-1	2
			5	2	0	2.0206E-15	-52.8152935	1	90	-1.6098E-15	-1.2212E-15

Figura 3.10. Resultados obtenidos del circuito 3B.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

3.2.5. Entrada de datos del circuito 2A

Se trata del mismo circuito presentado en el subapartado 2.2.1.

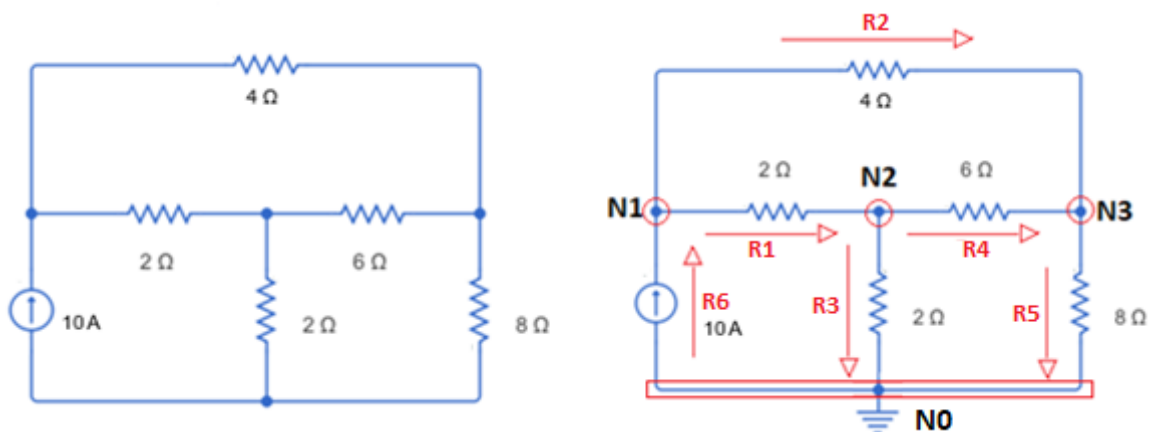


Figura 3.11. Circuito 2A y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

- 1) Se realiza la preparación del circuito a partir del original.
- 2) Introducción de datos en la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 1*, la cual se aporta en el Anexo B1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito, en este caso el espacio correspondiente a las fuentes de tensión no puras. Tanto los valores de la corriente como de tensión de las fuentes que puedan encontrarse en el circuito deberán introducirse en notación polar.

Impedancias de dos terminales					
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		Z
	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)	
1	1	2	2	0	
2	1	3	4	0	
3	2	0	2	0	
4	2	3	6	0	
5	3	0	8	0	

Fuentes de corriente					
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		J
	N+	N-	Mod J (A)	Arg J (°)	
6	0	1	10	0	

Figura 3.12. Entrada de datos del circuito 2A.

- 3) Guardar documento como *Circuito_2A*.

3.2.6. Obtención del resultado del circuito 2A

- 4) Ejecución del programa *Calculo_circuitos_T1.m* utilizando *Matlab*.
- 5) Especificar el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito a través de la Matlab Command Window para que el programa se ejecute: *Circuito_2A*.
- 6) Obtención del resultado a través de un nuevo archivo Excel generado de nombre *Resul_Circuito_2A*.

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)
1	29.7435897	0	1	1	2	14.3589744	0	7.17948718	0	103.090072	0
2	15.3846154	0	2	1	3	11.2820513	0	2.82051282	0	31.8211703	0
3	18.4615385	0	3	2	0	15.3846154	0	7.69230769	0	118.343195	0
			4	2	3	3.07692308	180	0.51282051	180	1.57790927	0
			5	3	0	18.4615385	0	2.30769231	0	42.6035503	0
			6	0	1	29.7435897	180	10	0	-297.435897	0

Figura 3.13. Resultados obtenidos del circuito 2A.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

3.2.7. Entrada de datos del circuito 2B

Se trata del mismo circuito presentado en el subapartado 2.2.3.

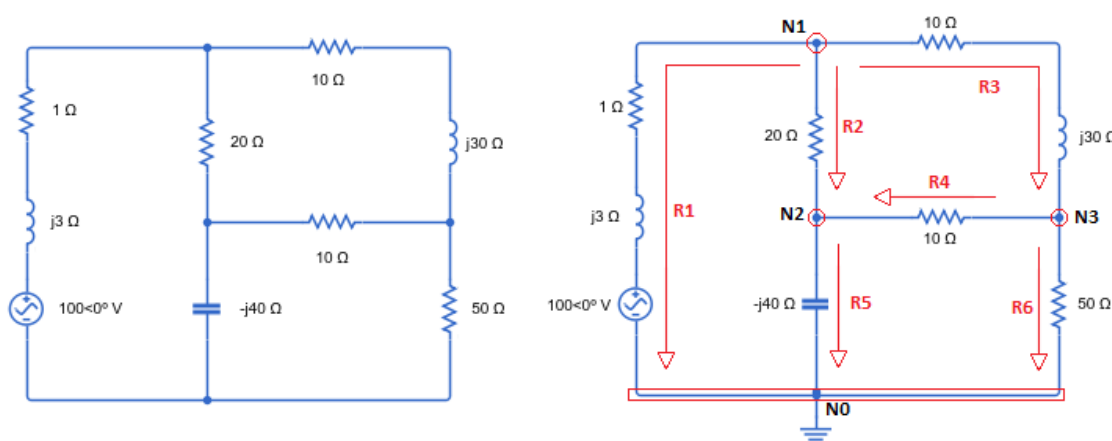


Figura 3.14. Circuito 2B y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

- 1) Se realiza la preparación del circuito a partir del original.

- 2) Introducción de datos en la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 1*, la cual se aporta en el Anexo B1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito, en este caso el espacio correspondiente a las fuentes de corriente. Tanto los valores de la corriente como de tensión de las fuentes que puedan encontrarse en el circuito deberán introducirse en notación polar.

Impedancias de dos terminales						
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		Z	
	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)		
1	1	2	20	0		
2	1	3	10	30		
3	3	2	10	0		
4	2	0	0	-40		
5	3	0	50	0		

Fuentes de tensión no puras						
Id. elemento	Nudo salida		E		Z	
	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)	R (Ohm)	X (Ohm)
6	1	0	100	0	1	3

Figura 3.15. Entrada de datos del circuito 2B.

- 3) Guardar documento como *Circuito_2B*.

3.2.8. Obtención del resultado del circuito 2B

- 4) Ejecución del programa *Calculo_circuitos_T1.m* utilizando *Matlab*.
 5) Especificar el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito a través de la Matlab Command Window para que el programa se ejecute: *Circuito_2B*.
 6) Obtención del resultado a través de un nuevo archivo Excel generado de nombre *Resul_Circuito_2B*.

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)
1	101.166341	-4.84744328	1	1	2	41.7105127	51.8691559	2.08552564	51.8691559	86.9883436	7.1054E-15
2	85.6914	-28.8582423	2	1	3	41.5664345	47.1055142	1.31444607	-24.459537	17.2776848	51.8330544
3	82.3352391	-28.2736118	3	3	2	3.46386954	137.105514	0.34638695	137.105514	1.19983922	1.1102E-16
			4	2	0	85.6914	-28.8582423	2.142285	61.1417577	0	-183.575401
			5	3	0	82.3352391	-28.2736118	1.64670478	-28.2736118	135.581832	0
			6	1	0	101.166341	-4.84744328	2.71532908	-156.189049	-241.0477	131.742347

Figura 3.16. Resultados obtenidos del circuito 2B.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

4. Método de los nudos ampliado: Circuitos tipo 2

Los circuitos de tipo 2 y 3, son la ampliación del método de los nudos clásico para poder afrontar circuitos con nuevos elementos que se van introduciendo. En este caso, aparecen las fuentes de corriente controladas por tensión. Por lo tanto, los circuitos tipo 2 son aquellos que pueden estar formados por los siguientes tipos de elementos:

- 1- Impedancias con valor distinto de cero o admitancias, de una sola pareja de terminales.
- 2- Fuentes de corriente
- 3- Fuentes de tensión no puras, es decir cuyo modelo Thévenin tiene impedancia no nula.
- 4- Fuentes de corriente controladas por tensión.

El procedimiento que se sigue para el desarrollo de este tipo de circuitos es idéntico al anterior salvo que además hay que tener en cuenta el elemento nuevo.

En primer lugar y como norma general se identifica cada uno de los nudos, se asigna el de referencia con el número 0 y el resto con valores del 1 al n , siendo n el número total de nudos del circuito menos 1. El segundo paso, asignar una orientación a cada una de las ramas del circuito, definiendo un sentido de recorrido para cada una de ellas que va desde donde parten hasta donde terminan. En último lugar definir una identificación, en este caso desde $R1$ hasta Rb siendo b el número total de ramas del circuito.

La orientación de las ramas se define teniendo en cuenta la naturaleza de los elementos que se encuentran dentro de las ramas, para ello hay que seguir las siguientes normas:

- a) Si la rama es una impedancia, la orientación de la flecha es indiferente.
- b) Si la rama es una fuente de corriente, la orientación de la flecha debe coincidir con la flecha de la fuente.
- c) Si la rama es una fuente de tensión no pura, la orientación de la flecha debe ir del positivo al negativo de la fuente.
- d) Si la rama es una fuente de corriente controlada por tensión, la orientación de la flecha debe coincidir con la flecha de la fuente.

4.1. Formulación del método de los nudos ampliado para circuitos tipo 2

Partiendo de la base de la teoría del método de los nudos clásico, en este primer tipo de método ampliado se incorporan los aspectos que hacen referencia a las fuentes de corriente controladas por tensión, cuyo esquema se muestra en la Figura 4.1.

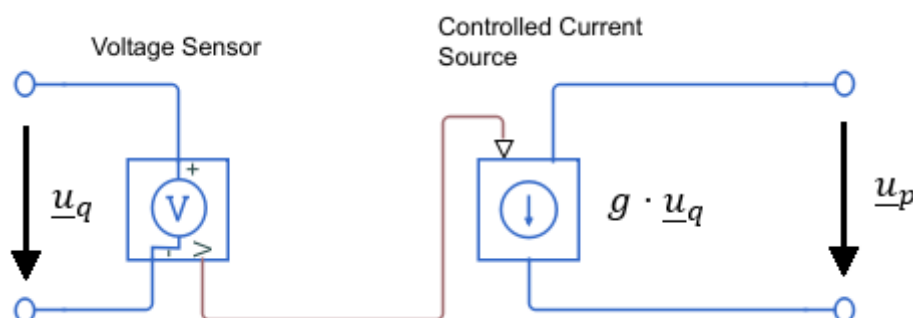


Figura 4.1. Esquema representación fuente de corriente controlada por tensión.

Siendo i_p :

$$\dot{i}_p = g \cdot u_q \quad (\text{Eq.4.1})$$

Donde g es la transconductancia de la fuente de corriente controlada por tensión en A/V.

Si en un circuito existen fuentes de corriente controladas por tensión, se incorporarán dichas fuentes como sigue (se expondrá la metodología considerando una única fuente, siendo extrapolable al caso múltiples fuentes).

Sean \underline{Y}_N , J_N las matrices de admitancias de nudo y de corrientes inyectadas sin considerar la fuente de corriente controlada por tensión y A_p la incidencia de dicha fuente. Entonces:

$$\underline{Y}_N \cdot V_N = J_N - g \cdot u_q \cdot A_p = J_N - g \cdot (A_p \cdot A'_q) \cdot V_N \quad (\text{Eq.4.2})$$

O bien,

$$(\underline{Y}_N + g \cdot A_p \cdot A'_q) \cdot V_N = J_N \quad (\text{Eq.4.3})$$

Que se escribe,

$$Y_N \cdot V_N = J_N \quad (\text{Eq.4.4})$$

En este caso, la matriz Y_N no es una matriz simétrica ya que

$$A_p \cdot A'_q \neq A_q \cdot A'_p \quad (\text{Eq.4.5})$$

A continuación, se muestra un ejercicio resuelto de forma manual hasta llegar a la obtención de tensiones de nudo para poder observar la aplicación de la modificación introducida. Se utiliza un circuito que se ha denominado 4A procedente de la referencia [2].

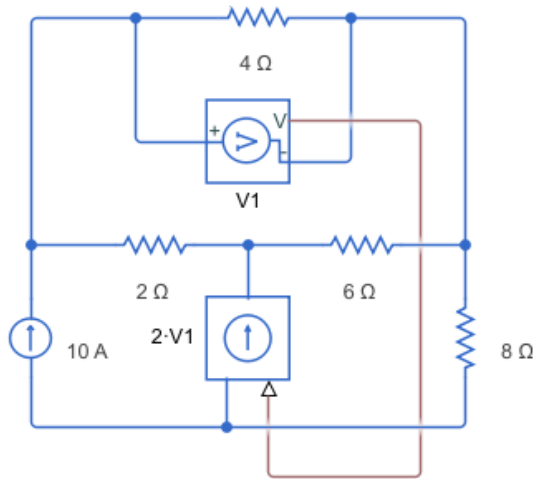


Figura 4.2. Circuito 4A.

Se procede a la preparación del circuito tal y como se ha descrito anteriormente, identificando los nudos, asignando las orientaciones y estableciendo la identificación de cada rama orientada.

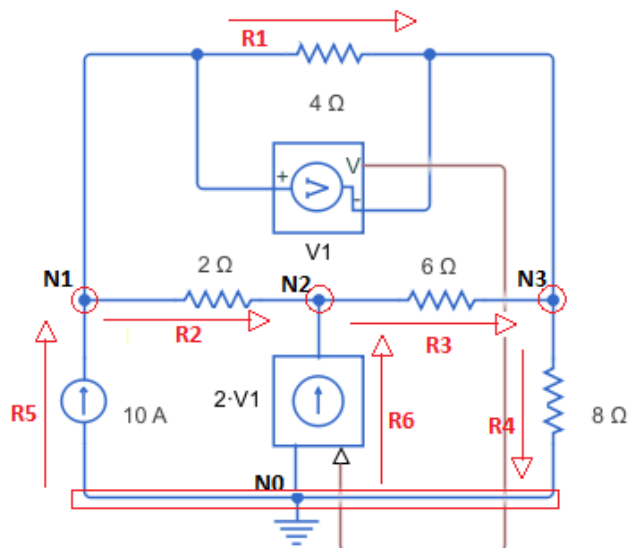


Figura 4.3. Preparación del circuito 4A para su resolución.

En primer lugar, una vez se tiene el circuito preparado el primer paso es hacer uso de la matriz de incidencia.

<i>Nudo</i>	<u>R1</u>	<u>R2</u>	<u>R3</u>	<u>R4</u>
N1	1	1	0	0
N2	0	-1	1	0
N3	-1	0	-1	1

Aplicando la *ecuación 3.2* se calcula la matriz Y_N .

$$Y_N = 4 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot [1 \ 0 \ -1] + 2 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [1 \ -1 \ 0] + 6 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot [0 \ 1 \ -1] + 8 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot [0 \ 0 \ 1]$$

$$Y_N = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} + \frac{1}{4} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{4} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} + \frac{1}{6} & -\frac{1}{6} \\ -\frac{1}{4} & -\frac{1}{6} & \frac{1}{4} + \frac{1}{6} + \frac{1}{8} \end{bmatrix}$$

A continuación, se calcula el vector columna correspondiente al vector de corrientes inyectadas en los nudos, para ello se utiliza la *ecuación 3.3* donde se introduce la incidencia de las fuentes de corriente y su valor, en caso de tener fuentes de tensión no puras se introduce su equivalente transformado a fuente de corriente incorporando también su incidencia junto al valor de la corriente. En este caso queda:

$$J_N = - \left[\begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot 10 \right] = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Llegados a este punto se aplica el procedimiento descrito que introduce las fuentes de corriente controladas por tensión utilizando la *ecuación 4.2*.

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$A_q = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{u}_q = \underline{v}_1 - \underline{v}_3$$

$$\begin{bmatrix} 0,75 & -0,5 & -0,25 \\ -0,5 & 0,5 + \frac{1}{6} & -\frac{1}{6} \\ -0,25 & -\frac{1}{6} & 0,25 + \frac{1}{6} + 0,125 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - 2 \cdot (v_1 - v_3) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - 2 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [1 \quad 0 \quad -1] \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}$$

Usando directamente la ecuación 4.3 se obtiene:

$$\left(\begin{bmatrix} 0,75 & -0,5 & -0,25 \\ -0,5 & 0,5 + \frac{1}{6} & -\frac{1}{6} \\ -0,25 & -\frac{1}{6} & 0,25 + \frac{1}{6} + 0,125 \end{bmatrix} + 2 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [1 \quad 0 \quad -1] \right) \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Que es lo mismo que,

$$\begin{bmatrix} 0,75 & -0,5 & -0,25 \\ -0,5 - 2 & 0,5 + \frac{1}{6} & -\frac{1}{6} + 2 \\ -0,25 & -\frac{1}{6} & 0,25 + \frac{1}{6} + 0,125 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

De la resolución del sistema de ecuaciones finalmente obtenemos las tres tensiones de nudo.

$$v_1 = 71,111 < 180^\circ \text{ V}$$

$$v_2 = 95,556 < 180^\circ \text{ V}$$

$$v_3 = 62,222 < 180^\circ \text{ V}$$

Una vez llegados al punto en el que se conocen las tensiones de nudo (variables sin significado físico), es posible calcular las tensiones de rama y las corrientes de rama, para luego poder obtener las potencias consumidas por cada una de las ramas.

De acuerdo con la orientación especificada según el tipo de los elementos, en cada rama del circuito, la tensión de rama tiene el positivo en el nudo de salida y el negativo en el de llegada y, además, en cada una de ellas la corriente de rama sale del nudo de salida y va hacia el de llegada. En cada rama el producto de esa tensión de rama por la corriente de rama conjugada da lugar a la potencia compleja consumida por la rama. Esta potencia es consumida porque la corriente de rama entra por el positivo de la tensión de rama.

Dada una rama cualquiera del circuito cuyos extremos son N+ y N-, se cumple que:

- La tensión de rama es la diferencia entre la tensión del nudo N+ y la tensión del nudo N-

- Si la rama es una impedancia,

$$\text{Corriente de rama} = \frac{\text{Tensión de rama}}{\text{Impedancia de rama}} \quad (\text{Eq.4.6})$$

- Si la rama es una fuente de corriente, $\text{Corriente de rama} = \text{Corriente de la fuente}$
- Si la rama es una fuente de tensión no pura,

$$\text{Corriente de rama} = \frac{\text{Tensión de rama}}{\text{Impedancia de la fuente}} - \frac{\text{Tensión de la fuente}}{\text{Impedancia de la fuente}} \quad (\text{Eq.4.7})$$

- Si la rama es una fuente de corriente controlada por tensión,

$$\text{Corriente de rama} = \text{Transconductancia} \cdot$$

[Tensión del N + de la tensión de control – Tensión del N – de la tensión de control]

- Potencia compleja consumida por la rama,

$$S = \text{Tensión de rama} * \text{conj}(\text{Corriente de rama}) \quad (\text{Eq.4.9})$$

Con todo esto es posible calcular todas las tensiones, corriente y potencias de cada rama del circuito.

4.2. Programación mediante Matlab del proceso automatizado para la resolución de circuitos tipo 2

Partiendo de la misma base que en el caso anterior, y añadiendo las modificaciones necesarias se ha desarrollado un programa que automatiza la resolución de este tipo de circuitos.

El programa que corresponde a este tipo de circuitos se encuentra en el Anexo C2.

Para la demostración del funcionamiento se resuelve con el programa el circuito del apartado 4.1 (Circuito 4A) junto a tres ejemplos más con la finalidad de verificar la coincidencia de los resultados de las tensiones de nudo que se ha obtenido en el ejemplo resuelto de forma manual realizado anteriormente, así como mostrar la resolución de otros ejemplos de circuitos clasificados dentro de la categoría de circuitos tipo 2.

A continuación, se muestra el proceso que hay que seguir para la resolución de los circuitos a través del programa proporcionado. El primero de los circuitos de ejemplo se comenta de una forma más

detallada y en el resto se recuerda simplemente los pasos ya que el proceso de resolución de circuitos a través del programa se realiza de la misma forma.

4.2.1. Entrada de datos del circuito 4A

Recordamos el esquema del circuito con la correspondiente preparación una vez hecha la identificación de los nudos, la orientación y la asignación de identificación. Con todo esto se tienen todos los datos preparados para introducirse en el programa.

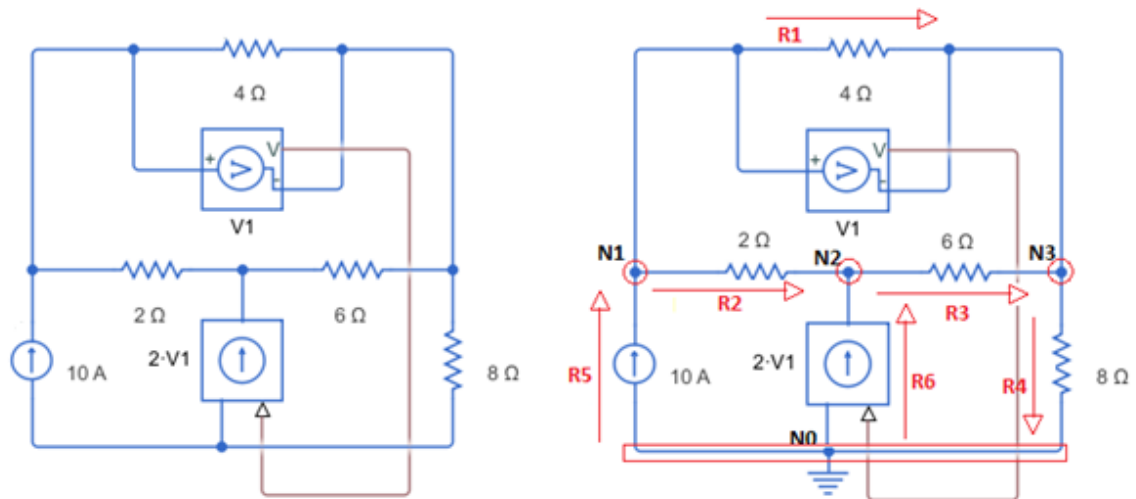


Figura 4.4. Circuito 4A y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

El siguiente paso es la introducción de los datos en la plantilla de Excel correspondiente. En este caso, se debe abrir la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 2*, la cual se aporta en el Anexo C1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado.

A parte de que es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten como se ha dicho anteriormente, en el caso de que no forme parte del circuito algún elemento de los que aparecen en la plantilla, en este caso simplemente se deberá dejar en blanco los espacios correspondientes al elemento que no aparezca.

A continuación, se muestra como se ha rellenado el fichero de datos de entrada del *Circuito 4A*.

Impedancias de dos terminales						
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		Z	
	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)		
1		1	3	4	0	
2		1	2	2	0	
3		2	3	6	0	
4		3	0	8	0	

Fuentes de corriente						
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		J	
	N+	N-	Mod J (A)	Arg J (°)		
5		0	1	10	0	

Fuentes de corriente controladas por tensión							
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		Transconductancia	N+ tensión de control	N- tensión de control
	N+	N-			g(A/V)	N+	N-
6	0	2			2	1	3

Figura 4.5. Entrada de datos del circuito 4A.

Estas son las casillas necesarias que se han rellenado con los datos del problema, como se ha comentado en el caso de que en un circuito no exista alguno de los elementos elemento de los que aparecen en la plantilla, las casillas correspondientes deberán dejarse vacías, en este caso las correspondientes a las fuentes de tensión no puras.

Una vez los datos están introducidos el siguiente paso es guardar el archivo Excel con el nombre del problema, en este caso se guarda como Circuito 4A.

4.2.2. Obtención del resultado del circuito 4A

Para obtener el resultado se debe repetir el mismo proceso que en todos los programas de los distintos tipos de circuitos.

Se ejecuta el programa cuyo nombre es *Calculo_circuitos_T2.m*, una vez se inicia el programa pregunta al usuario a través de la Matlab Command Window el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito. Especificando el nombre, en este caso *Circuito_4A* el programa se ejecuta y genera como resultado un nuevo archivo Excel de nombre *Resul_Circuito_4A*.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

El resultado que se obtiene con el ejemplo es el siguiente:

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)
1	71.1111111	180	1	1	3	8.8888889	180	2.2222222	180	19.7530864	0
2	95.5555556	180	2	1	2	24.4444444	0	12.2222222	0	298.765432	0
3	62.2222222	180	3	2	3	33.3333333	180	5.5555556	180	185.185185	0
			4	3	0	62.2222222	180	7.7777778	180	483.950617	0
			5	0	1	71.1111111	0	10	0	711.111111	0
			6	0	2	95.5555556	0	17.7777778	180	-1698.76543	0

Figura 4.6. Resultados obtenidos del circuito 4A.

Comparando los resultados de las tensiones de nudo obtenidas de forma manual anteriormente en el apartado 4.1 y los módulos y argumentos de las tensiones de nudo obtenidas con el programa se puede ver que coinciden. El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

4.2.3. Entrada de datos del circuito 4B

Se ha denominado 4B al siguiente circuito procedente de la referencia [6].

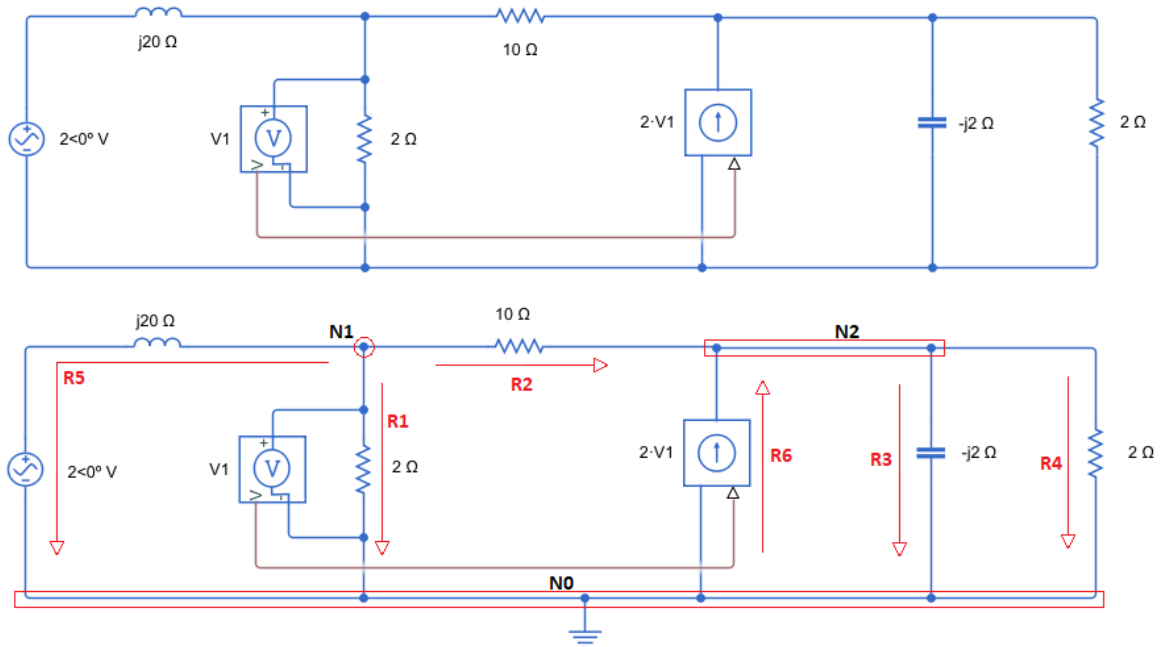


Figura 4.7. Circuito 4B y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

- 1) Se realiza la preparación del circuito a partir del original.

2) Introducción de datos en la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 2*, la cual se aporta en el Anexo C1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito.

Tanto los valores de la corriente como de tensión de las fuentes que puedan encontrarse en el circuito deberán introducirse en notación polar.

Impedancias de dos terminales						
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	Z			
	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)		
1	1	0	2	0		
2	1	2	10			
3	2	0	0	-2		
4	2	0	2	0		

Fuentes de tensión no puras						
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	E		Z	
	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)	R (Ohm)	X (Ohm)
5	1	0	2	0	0	20

Fuentes de corriente controladas por tensión						
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	Transconductancia	N+ tensión de control		N- tensión de control
	N+	N-	g(A/V)	N+	N-	N-
6	0	2	2	1		0

Figura 4.8. Entrada de datos del circuito 4B.

3) Guardar documento como *Circuito_4B*.

4.2.4. Obtención del resultado del circuito 4B

- 4) Ejecución del programa *Calculo_circuitos_T2.m* utilizando *Matlab*.
- 5) Especificar el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito a través de la Matlab Command Window para que el programa se ejecute: *Circuito_4B*.
- 6) Obtención del resultado a través de un nuevo archivo Excel generado de nombre *Resul_Circuito_4B*.

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAR)
1	0.24274053	-107.245214	1	1	0	0.24274053	-107.245214	0.12137027	-107.245214	0.02946148	0
2	0.65267455	-147.050785	2	1	2	0.49141384	14.5142663	0.04914138	14.5142663	0.02414876	8.6736E-19
			3	2	0	0.65267455	-147.050785	0.32633727	-57.0507849	0	-0.21299203
			4	2	0	0.65267455	-147.050785	0.32633727	-147.050785	0.21299203	0
			5	1	0	0.24274053	-107.245214	0.10424462	96.3841639	-0.02318281	0.01014248
			6	0	2	0.65267455	32.9492151	0.48548106	-107.245214	-0.24341946	0.20284955

Figura 4.9. Resultados obtenidos del circuito 4B.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

4.2.5. Entrada de datos del circuito 4C

Se ha denominado 4C al siguiente circuito procedente de la referencia [4].

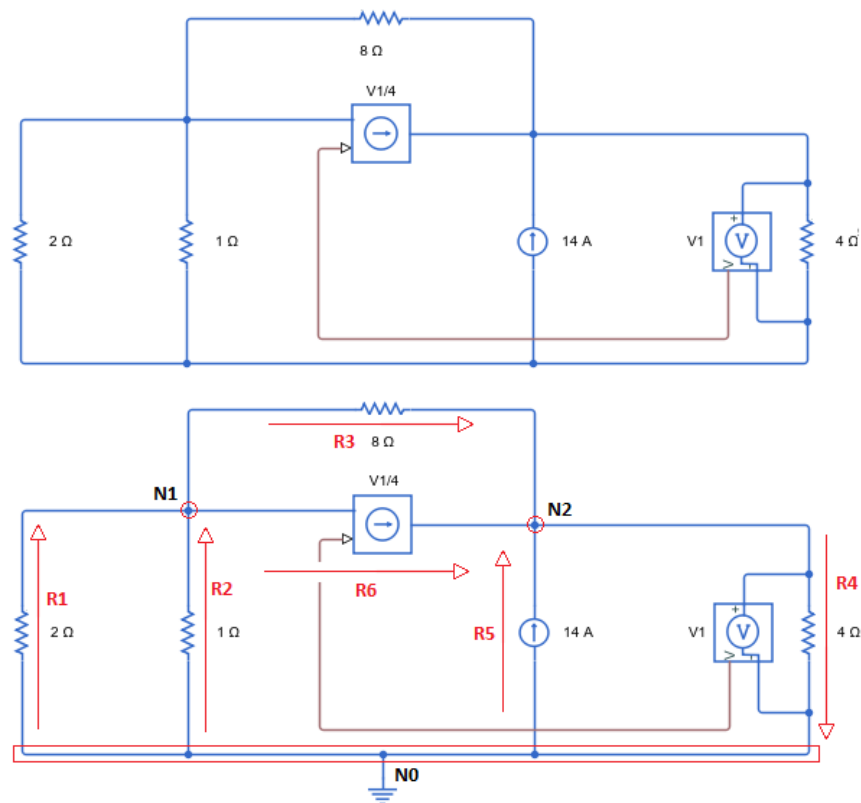


Figura 4.10. Circuito 4C y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

- 1) Se realiza la preparación del circuito a partir del original.
- 2) Introducción de datos en la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 2*, la cual se aporta en el Anexo C1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito.

Tanto los valores de la corriente como de tensión de las fuentes que puedan encontrarse en el circuito deberán introducirse en notación polar.

Impedancias de dos terminales						
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		Z	
	N+	N-	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)
1		0	1		2	0
2		0	1		1	0
3		1	2		8	0
4		2	0		4	0

Fuentes de corriente						
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		J	
	N+	N-	N+	N-	Mod J (A)	Arg J (°)
5		0	2		14	0

Fuentes de corriente controladas por tensión										
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		Transconductancia		N+ tensión de contro		N- tensión de control	
	N+	N-	N+	N-	g(A/V)	N+	N-			
6	1		2		0.25	2		0		

Figura 4.11. Entrada de datos del circuito 4C.

- 3) Guardar documento como *Circuito_4C*.

4.2.6. Obtención del resultado del circuito 4C

- 4) Ejecución del programa *Calculo_circuitos_T2.m* utilizando *Matlab*.
- 5) Especificar el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito a través de la Matlab Command Window para que el programa se ejecute: *Circuito_4C*.
- 6) Obtención del resultado a través de un nuevo archivo Excel generado de nombre *Resul_Circuito_4C*.

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)
1	8	180	1	0	1	8	0	4	0	32	0
2	104	0	2	0	1	8	0	8	0	64	0
			3	1	2	112	180	14	180	1568	0
			4	2	0	104	0	26	0	2704	0
			5	0	2	104	180	14	0	-1456	0
			6	1	2	112	180	26	0	-2912	0

Figura 4.12. Resultados obtenidos del circuito 4C.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

4.2.7. Entrada de datos del circuito 4D

Se ha denominado 4D al siguiente circuito procedente de la referencia [7].

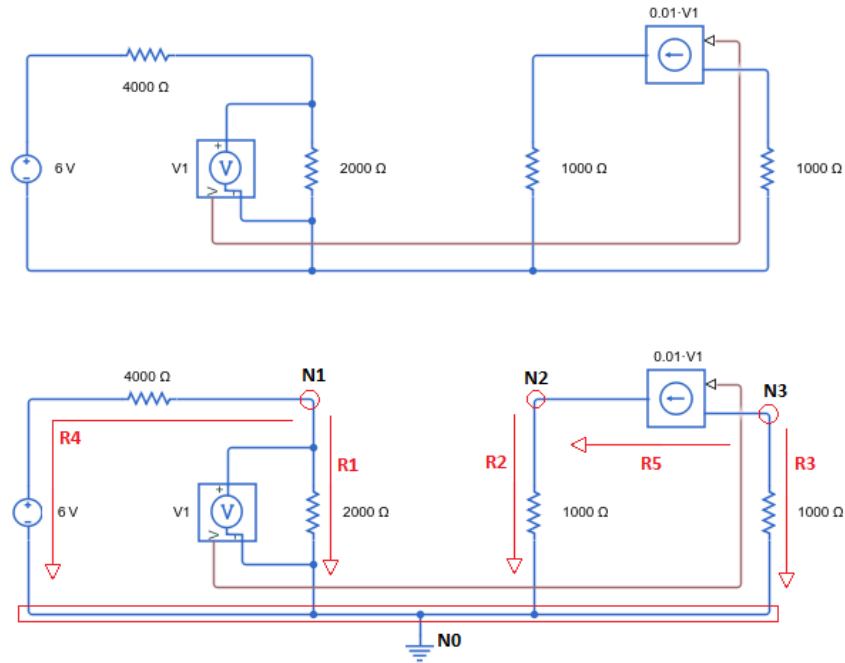


Figura 4.13. Circuito 4D y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

- 1) Se realiza la preparación del circuito a partir del original.
- 2) Introducción de datos en la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 2*, la cual se aporta en el Anexo C1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito.

Tanto los valores de la corriente como de tensión de las fuentes que puedan encontrarse en el circuito deberán introducirse en notación polar.

Impedancias de dos terminales						
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		Z	
	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)		
1	1	1	0	2000	0	
2	2	2	0	1000	0	
3	3	3	0	1000	0	

Fuentes de tensión no puras								
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		E		Z	
	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)	R (Ohm)	X (Ohm)		
4	1	0	6	0	4000	0		

Fuentes de corriente controladas por tensión							
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		Transconductancia g(A/V)	N+ tensión de control N- tensión de control	
	N+	N-	N+	N-		N+	N-
5	3	2	0.01	1	0		

Figura 4.14. Entrada de datos del circuito 4D.

- 3) Guardar documento como *Circuito_4D*.

4.2.8. Obtención del resultado del circuito 4D

- 4) Ejecución del programa *Calculo_circuitos_T2.m* utilizando *Matlab*.
- 5) Especificar el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito a través de la Matlab Command Window para que el programa se ejecute: *Circuito_4D*.
- 6) Obtención del resultado a través de un nuevo archivo Excel generado de nombre *Resul_Circuito_4D*.

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)
1	2	0	1	1	0	2	0	0.001	0	0.002	0
2	20	0	2	2	0	20	0	0.02	0	0.4	0
3	20	180	3	3	0	20	180	0.02	180	0.4	0
			4	1	0	2	0	0.001	180	-0.002	0
			5	3	2	40	180	0.02	0	-0.8	0

Figura 4.15. Resultados obtenidos del circuito 4D.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

5. Método de los nudos ampliado: Circuitos tipo 3

Los circuitos clasificados como tipo 3 son la última de las ampliaciones del método de los nudos clásico. En este caso se introducen dos tipos de elementos nuevos, las fuentes de tensión puras y los acoplamientos magnéticos entre bobinas. Este tipo de circuitos son aquellos que pueden estar formados por los siguientes elementos:

- 1- Impedancias con valor distinto de cero o admitancias, de una sola pareja de terminales.
- 2- Fuentes de corriente
- 3- Fuentes de tensión no puras, es decir cuyo modelo Thévenin tiene impedancia no nula.
- 4- Fuentes de corriente controladas por tensión.
- 5- Fuentes de tensión puras y/o acoplamientos magnéticos.

Para resolver circuitos de este tipo se clasifican los circuitos en tres grupos distinguiendo según los elementos que contengan. De modo que dentro del tipo 3 encontramos tres casos distintos.

- a) Caso 1: El circuito está formado por los elementos del tipo 2 y además solo fuentes de tensión puras. Esto lo convierte en un circuito tipo 3, caso 1.
- b) Caso 2: El circuito está formado por los elementos del tipo 2 y además solo acoplamientos magnéticos. Convirtiéndose en circuito tipo 3, caso 2.
- c) Caso 3: El circuito está formado por los elementos del tipo 2 y además fuentes de tensión puras y acoplamientos magnéticos. Circuito tipo 3, caso 3.

Independientemente del tipo de caso de circuito en el que se trabaje la resolución, se debe empezar del mismo modo. En primer lugar, la identificación de cada uno de los nudos, asignando uno de ellos como el nudo de referencia, el de tierra con el número 0 y el resto con valores del 1 al n , siendo n el número total de nudos del circuito. Seguidamente asignando una orientación a cada una de las ramas del circuito, definiendo un sentido del recorrido para cada una de ellas que va desde donde parten hasta donde terminan. Finalmente definiendo la identificación a las ramas, en este caso desde $R1$ hasta Rb siendo b el número total de ramas del circuito.

La orientación de las ramas se define teniendo en cuenta la naturaleza de cada elemento y para ello se sigue las normas siguientes:

- a) Si la rama es una impedancia, la orientación de la flecha es indiferente.
- b) Si la rama es una fuente de corriente, la orientación de la flecha debe coincidir con la flecha de la fuente.

- c) Si la rama es una fuente de tensión no pura, la orientación de la flecha debe ir del positivo al negativo de la fuente.
- d) Si la rama es una fuente de corriente controlada por tensión, la orientación de la flecha debe coincidir con la flecha de la fuente.
- e) Si la rama es una fuente de tensión pura, la orientación de la flecha debe ir del positivo al negativo de la fuente.
- f) Si dos ramas constituyen un acoplamiento magnético, la orientación de la flecha en la rama 1 debe ir del punto al no punto de la bobina 1 y la orientación de la flecha en la rama 2 debe ir del punto al no punto de la bobina 2.

5.1. Formulación del método de los nudos ampliado para circuitos tipo 3, caso1

Si en un circuito tipo 3 se tienen solo fuentes puras de tensión, se incorporarán dichas fuentes como sigue (se expondrá la metodología considerando una única fuente, siendo extrapolable al caso múltiples fuentes).

Sean Y_N , J_N las matrices de admitancias de nudo y de corrientes inyectadas sin considerar la fuente pura de tensión y A_g la incidencia de dicha fuente. Entonces:

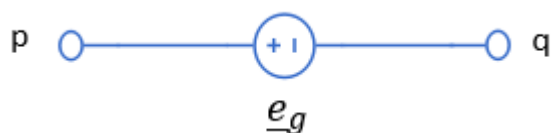


Figura 5.1. Representación de la rama de una fuente de tensión pura.

$$v_p - v_q = e_g \quad (\text{Eq.5.1})$$

$$Y_N \cdot V_N + A_g \cdot I_g = J_N \quad (\text{Eq.5.2})$$

$$A'_g \cdot V_N = e_g \quad (\text{Eq.5.3})$$

O bien,

$$\begin{bmatrix} Y_N & A_g \\ A'_g & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_N \\ I_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_N \\ e_g \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.5.4})$$

De donde se obtiene directamente la corriente consumida por la fuente pura de tensión (I_g).

A continuación se exponen los distintos pasos que se realizan para la resolución de un circuito que se ha denominado 5A procedente de la referencia [6]. Este circuito es de corriente alterna y contiene una fuente de tensión pura. Se muestra detalladamente el resultado de montar cada una de las matrices hasta llegar a montar el sistema para poder entender mejor el procedimiento.

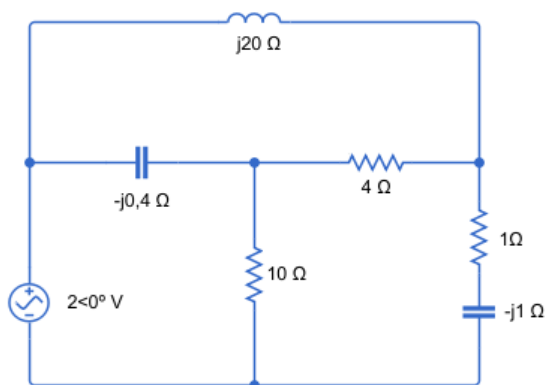


Figura 5.2. Circuito 5A.

Inicialmente, y como en todo tipo de circuitos se debe realizar la preparación del circuito tal y como se ha descrito en todos los apartados anteriores y teniendo en cuenta que la orientación de la flecha en el elemento nuevo como es la fuente de tensión pura, hay que asignar su orientación de modo que la flecha entre por el positivo de la fuente.

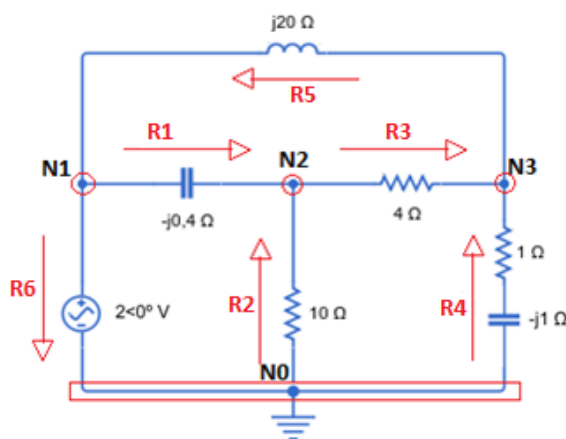


Figura 5.3. Preparación del circuito 5A para su resolución.

Llegados a este punto es posible empezar a resolver.

La primera de las matrices que se necesita es la de admitancias, para ello se ha empleado el método de las matrices de incidencia mostradas en el capítulo 2 con la que resulta más fácil la obtención de la matriz Y_N .

$$Y_N = \begin{bmatrix} 2.45j & -2.5j & 0.05j \\ -2.5j & 0.35 + 2.5j & -0.25 \\ +0.05j & -0.25 & 0.75 + 0.45j \end{bmatrix}$$

A continuación, se construye la matriz A_g a partir de las incidencias de la rama de la fuente de tensión pura y se obtiene su matriz traspuesta.

$$A_g = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad A'_g = [1 \quad 0 \quad 0]$$

Una vez calculadas estas dos matrices es posible formar la primera parte del sistema. Inicialmente se sitúa la matriz de admitancias, seguidamente la matriz de incidencia de las fuentes de tensión y finalmente situaremos la traspuesta de esta matriz en el lugar correspondiente, finalmente se rellena con un cero el hueco que queda libre. Una vez realizado todo esto deberá quedar un sistema como el siguiente:

$$\begin{bmatrix} Y_N & A_g \\ A'_g & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 2.45j & -2.5j & 0.05j & 1 \\ -2.5j & 0.35 + 2.5j & -0.25j & 0 \\ 0.05j & -0.25 & 0.75 + 0.45j & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Seguidamente lugar se debe construir el vector de corrientes inyectadas en los nudos y tensión del generador. Para este circuito debe quedar así:

$$\begin{bmatrix} J_N \\ e_g \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ e_{g1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix}$$

Una vez se tienen las matrices que se acaban de obtener es posible calcular y resolver el sistema para así conocer el vector de potenciales de nudo y la corriente de rama de la fuente de tensión pura. Se llega al siguiente resultado.

$$\begin{bmatrix} V_N \\ I_g \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ I_{g1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 1.9356 + 0.2261j \\ 0.4488 - 0.3273j \\ 0.5816 - 0.0834j \end{bmatrix}$$

En este ejemplo en concreto como el circuito está formado por tres nudos sin contar el de referencia, las tres primeras posiciones corresponden a las tensiones de dichos nudos y la cuarta posición corresponde a la corriente consumida de la rama de la fuente de tensión pura.

Conocidas las tensiones de nudo (variables sin significado físico) y la corriente consumida por la fuente de tensión pura es posible calcular el resto las tensiones de rama y corrientes para poder obtener las potencias consumidas por cada una de las ramas.

De acuerdo con la orientación especificada según los elementos, en cada rama del circuito, la tensión de rama tiene el positivo en el nudo de salida y el negativo en el de llegada. Además, en cada una de ellas la corriente de rama sale del nudo de salida y va hacia el de llegada. En cada rama el producto de esa tensión de rama por la corriente conjugada de rama da lugar a la potencia compleja consumida por la rama.

Dada una rama cualquiera del circuito cuyos extremos son N+ y N-, se cumple que:

- La tensión de rama es la diferencia entre la tensión del nudo N+ y la tensión del nudo N-
- Si la rama es una impedancia,

$$\text{Corriente de rama} = \frac{\text{Tensión de rama}}{\text{Impedancia de rama}} \quad \text{(Eq.5.7)}$$

- Si la rama es una fuente de corriente, $\text{Corriente de rama} = \text{Corriente de la fuente}$
- Si la rama es una fuente de tensión no pura,

$$\text{Corriente de rama} = \frac{\text{Tensión de rama}}{\text{Impedancia de la fuente}} - \frac{\text{Tensión de la fuente}}{\text{Impedancia de la fuente}} \quad \text{(Eq.5.8)}$$

- Si la rama es una fuente de corriente controlada por tensión,

$$\text{Corriente de rama} = \text{Transconductancia} \cdot \quad \text{(Eq.5.9)}$$

[Tensión del N + de la tensión de control – Tensión del N – de la tensión de control]

- Si la rama es una fuente de tensión pura, la corriente de rama es la que sale de resolver el sistema lineal de ecuaciones.
- Potencia compleja consumida por la rama,

$$S = \text{Tensión de rama} * \text{conj}(\text{Corriente de rama}) \quad \text{(Eq.5.10)}$$

5.2. Programación mediante Matlab del proceso automatizado para la resolución de circuitos tipo 3, caso 1

De igual forma que en los circuitos clasificados como tipo 1 y tipo 2, se ha desarrollado un programa Matlab para poder abordar los circuitos de este tipo, de una forma que sea rápida y sencilla para el usuario. Este programa es capaz de tratar circuitos de cualquiera de los tres casos que se ha clasificado anteriormente, de modo que el mismo programa identifica el caso que corresponda cada circuito y realiza los cálculos correspondientes. Los datos del circuito se proporcionan al programa a través de una plantilla en un fichero Excel el cual hay que rellenar con los datos una vez realizada la preparación de los circuitos tal y como se ha mencionado varias veces durante el TFG. Una vez introducidos los datos se ejecuta el programa y se obtiene un nuevo fichero con los resultados.

El programa correspondiente a los circuitos tipo 3 se encuentra en el Anexo D2.

Para la demostración del funcionamiento se resuelve con el programa el circuito del apartado 5.1 (*Circuito 5A*) junto a tres ejemplos más con la finalidad de verificar la coincidencia de los resultados de las tensiones de nudo que se ha obtenido en el ejemplo resuelto de forma manual realizado anteriormente, así como mostrar la resolución de otros ejemplos de circuitos clasificados dentro de la categoría de circuitos tipo 3, caso 1.

A continuación, se muestra el proceso que hay que seguir para a resolución de los circuitos a través del programa proporcionado. El primero de los circuitos de ejemplo se comenta de una forma más detallada y en el resto de ellos, se recuerda los pasos del proceso de resolución ya que dicho proceso se realiza siempre de la misma forma.

5.2.1. Entrada de datos del circuito 5A

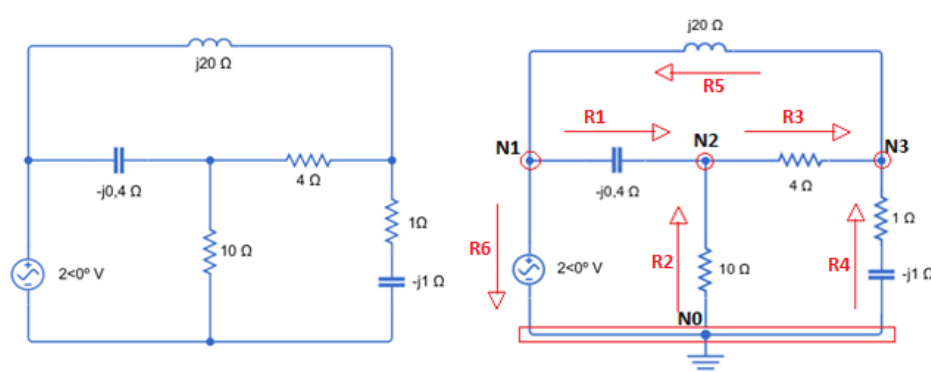


Figura 5.4. Circuito 5A y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

De igual forma que en ocasiones anteriores y partiendo del circuito original e independientemente del caso, se debe preparar el circuito tal y como se ha explicado y teniendo especial atención en la asignación de los sentidos según el tipo de elemento que contenga la rama. Una vez realizada la preparación se puede continuar con el siguiente paso.

Los datos del circuito deben introducirse en la plantilla Excel. Se debe abrir la plantilla proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 3*, la cual se aporta en el Anexo D1. Dentro del documento se encuentran las celdas vacías que se deben rellenar.

Hay que recordar que es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso que no se necesiten siempre que se haya utilizado alguna casilla correspondiente a algún elemento. En caso de que no aparezca en el circuito alguno de los elementos que se nombran en la plantilla las casillas correspondientes a dicho elemento se deberán dejar vacías.

A continuación, se muestra el fichero de datos de entrada correspondiente al circuito.

Impedancias de dos terminales					
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	Z		
	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)	
1	1	2	0	-0.4	
2	0	2	10	0	
3	2	3	4	0	
4	0	3	1	-1	
5	3	1	0	20	

Fuentes de tensión puras					
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	E		
	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)	
6	1	0	2	0	

Figura 5.5. Entrada de datos del circuito 5A.

En este caso, el circuito que se resuelve solamente está formado por ramas que contienen impedancias y una fuente de tensión pura, por lo tanto, se rellenan las casillas necesarias para introducir sus datos y todas las otras casillas que corresponden a otros elementos que no aparecen en este circuito se dejan vacías.

Una vez introducidos los datos correctamente, se guarda el documento que se ha modificado con el nombre del circuito, en este caso *Circuito_5A*.

5.2.2. Obtención del resultado del circuito 5A

Para ejecutar el programa se debe usar Matlab, una vez dentro se ejecuta el programa cuyo nombre es *Calculo_circuitos_T3*, una vez se inicia el programa pregunta al usuario a través de la Matlab Command Window el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito. Especificando el

nombre, el programa se ejecuta y genera como resultado un nuevo archivo Excel de nombre *Resul_Circuito_5A*.

El resultado que se obtiene al ejecutar el programa con el circuito anterior es el siguiente:

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)
1	2	1.7845E-16	1	1	2	0.23508981	-74.1059612	0.58772452	15.8940388	0	-0.13816805
2	1.94877942	6.66260536	2	0	2	1.94877942	-173.337395	0.19487794	-173.337395	0.37977412	0
3	0.55548802	-36.0974788	3	2	3	1.58641858	20.4151395	0.39660465	20.4151395	0.62918098	0
			4	0	3	0.55548802	143.902521	0.39278935	-171.097479	0.15428347	-0.15428347
			5	3	1	1.58530581	-168.086146	0.07926529	101.913854	0	0.12565973
			6	1	0	2	0	0.58756776	-171.840221	-1.16323858	0.16679179

Figura 5.6. Resultados obtenidos del circuito 5A.

Este archivo de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

Se puede observar todos los resultados correspondientes a los distintos elementos del circuito y comparar los resultados de las tensiones de nudo obtenidas anteriormente en el apartado 5.1. Hay que tener en cuenta que el resultado que proporciona el programa está en notación polar y anteriormente se ha calculado en notación cartesiana.

5.2.3. Entrada de datos del circuito 5B

Se ha denominado 5B al siguiente circuito procedente de la referencia [8].

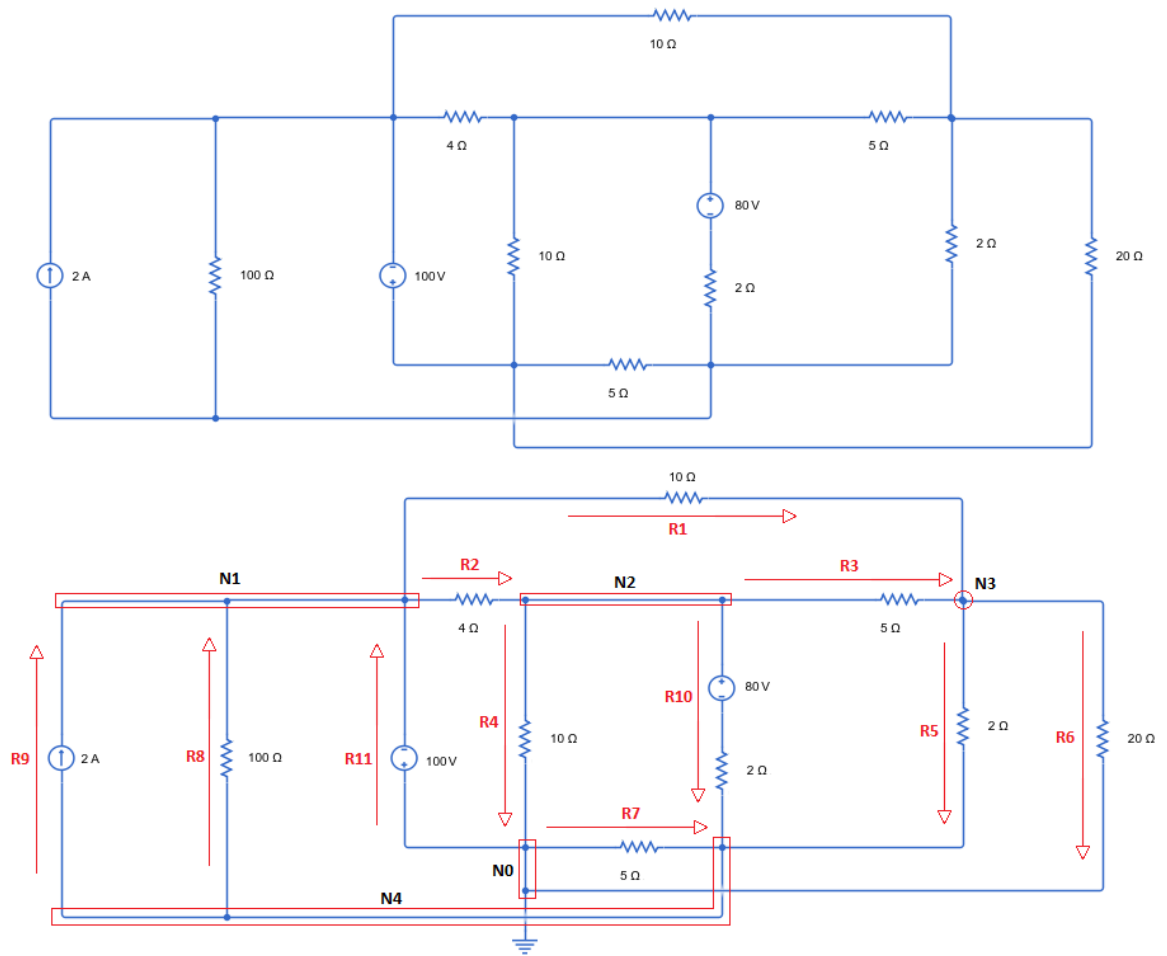


Figura 5.7. Circuito 5B y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

- 1) Se realiza la preparación del circuito a partir del original.
- 2) Introducción de datos en la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 3*, la cual se aporta en el Anexo D1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito.

Tanto los valores de la corriente como de tensión de las fuentes que puedan encontrarse en el circuito deberán introducirse en notación polar.

Impedancias de dos terminales						
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		Z	
	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)		
1	1	3	10	0		
2	1	2	4	0		
3	2	3	5	0		
4	2	0	10	0		
5	3	4	2	0		
6	3	0	20	0		
7	0	4	5	0		
8	4	1	100	0		

Fuentes de corriente						
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		J	
	N+	N-	Mod J (A)	Arg J (°)		
9	4	1	2	0		

Fuentes de tensión no puras								
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		E		Z	
	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)	R (Ohm)	X (Ohm)		
10	2	4	80	0	2	0		

Fuentes de tensión puras						
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		E	
	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)		
11	0	1	100	0		

Figura 5.8. Entrada de datos del circuito 5B.

3) Guardar documento como *Circuito_5B*.

5.2.4. Obtención del resultado del circuito 5B

- 4) Ejecución del programa *Calculo_circuitos_T3.m* utilizando *Matlab*.
- 5) Especificar el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito a través de la Matlab Command Window para que el programa se ejecute: *Circuito_5B*.
- 6) Obtención del resultado a través de un nuevo archivo Excel generado de nombre *Resul_Circuito_5B*.

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)
1	100	180	1	1	3	34.9433218	180	3.49433218	180	122.103574	0
2	34.6476097	180	2	1	2	65.3523903	180	16.3380976	180	1067.73373	0
3	65.0566782	180	3	2	3	30.4090685	0	6.0818137	0	184.942289	0
4	76.737309	180	4	2	0	34.6476097	180	3.46476097	180	120.045686	0
			5	3	4	11.6806309	0	5.84031543	0	68.2185686	0
			6	3	0	65.0566782	180	3.25283391	180	211.618569	0
			7	0	4	76.737309	0	15.3474618	0	1177.72292	0
			8	4	1	23.262691	0	0.23262691	0	5.41152792	0
			9	4	1	23.262691	0	2	0	46.525382	0
			10	2	4	42.0896994	0	18.9551503	180	-797.816578	0
			11	0	1	100	0	22.0650567	180	-2206.50567	0

Figura 5.9. Resultados obtenidos del circuito 5B.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

5.2.5. Entrada de datos del circuito 5C

Se ha denominado 5C al siguiente circuito procedente de la referencia [4].

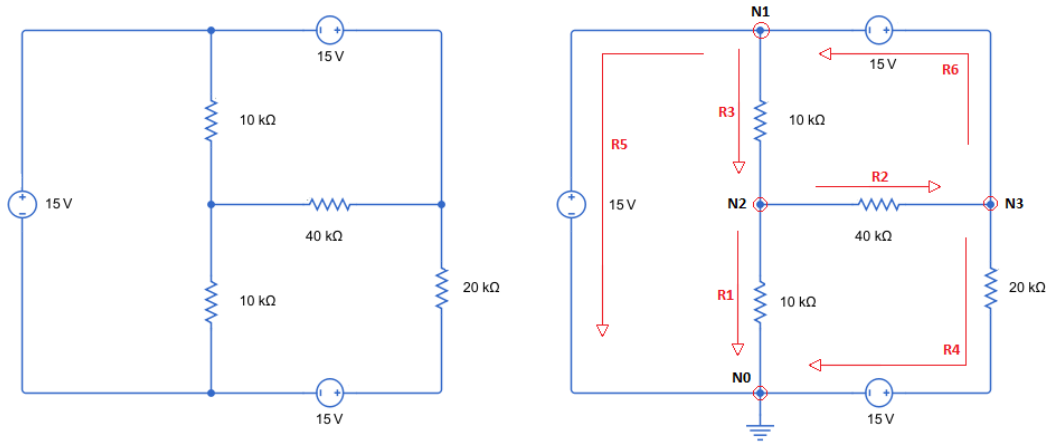


Figura 5.10. Circuito 5C y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

- 1) Se realiza la preparación del circuito a partir del original.
- 2) Introducción de datos en la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 3*, la cual se aporta en el Anexo D1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito.

Tanto los valores de la corriente como de tensión de las fuentes que puedan encontrarse en el circuito deberán introducirse en notación polar.

Impedancias de dos terminales						
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	Z			
	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)		
1	2	0	10000	0		
2	2	3	40000	0		
3	1	2	10000	0		

Fuentes de tensión no puras						
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	E		Z	
	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)	R (Ohm)	X (Ohm)
4	3	0	15	0	20000	0

Fuentes de tensión puras					
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	E		
	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)	
5	1	0	15		0
6	3	1	15		0

Figura 5.11. Entrada de datos del circuito 5C.

- 3) Guardar documento como *Circuito_5C*.

5.2.6. Obtención del resultado del circuito 5C

- 4) Ejecución del programa *Calculo_circuitos_T3.m* utilizando *Matlab*.
- 5) Especificar el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito a través de la Matlab Command Window para que el programa se ejecute: *Circuito_5C*.
- 6) Obtención del resultado a través de un nuevo archivo Excel generado de nombre *Resul_Circuito_5C*.

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)
1	15	0	1	2	0	10	0	0.001	0	0.01	0
2	10	0	2	2	3	20	180	0.0005	180	0.01	0
3	30	0	3	1	2	5	0	0.0005	0	0.0025	0
			4	3	0	30	0	0.00075	0	0.0225	0
			5	1	0	15	0	0.00175	180	-0.02625	0
			6	3	1	15	0	0.00125	180	-0.01875	0

Figura 5.12. Resultados obtenidos del circuito 5C.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

5.2.7. Entrada de datos del circuito 5D

Se ha denominado 5D al siguiente circuito procedente de la referencia [4].

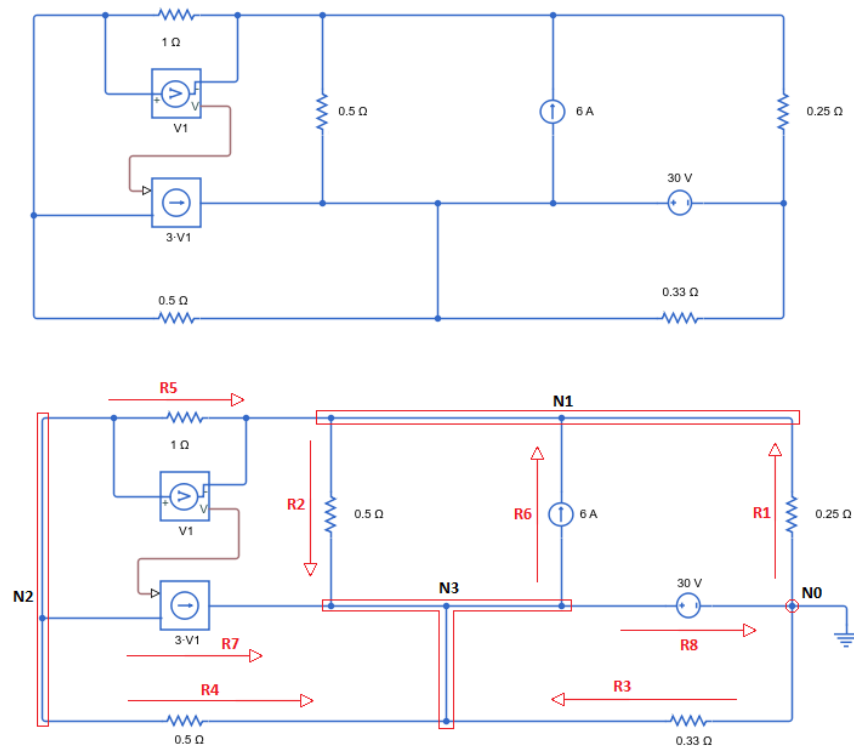


Figura 5.13. Circuito 5D y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

- 1) Se realiza la preparación del circuito a partir del original.
- 2) Introducción de datos en la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 3*, la cual se aporta en el Anexo D1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito.

Tanto los valores de la corriente como de tensión de las fuentes que puedan encontrarse en el circuito deberán introducirse en notación polar.

Impedancias de dos terminales						
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		Z	
	N+	N-	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)
1	0		1		0.25	0
2	1		3		0.5	0
3	0		3		0.33	0
4	2		3		0.5	0
5	2		1		1	0

Fuentes de corriente						
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		J	
	N+	N-	N+	N-	Mod J (A)	Arg J (°)
6	3		1		6	0

Fuentes de corriente controladas por tensión								
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		Transconductancia		N+ tensión de control	
	N+	N-	N+	N-	g(A/V)		N+	N-
7	2		3		3		2	1

Fuentes de tensión puras						
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		E	
	N+	N-	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)
8	3		0		30	0

Figura 5.14. Entrada de datos del circuito 5D.

3) Guardar documento como *Circuito_5D*.

5.2.8. Obtención del resultado del circuito 5D

- 4) Ejecución del programa *Calculo_circuitos_T3.m* utilizando *Matlab*.
- 5) Especificar el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito a través de la Matlab Command Window para que el programa se ejecute: *Circuito_5D*.
- 6) Obtención del resultado a través de un nuevo archivo Excel generado de nombre *Resul_Circuito_5D*.

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)
1	12	0	1	0	1	12	180	48	180	576	0
2	18	0	2	1	3	18	180	36	180	648	0
3	30	0	3	0	3	30	180	90	180	2700	0
			4	2	3	12	180	24	180	288	0
			5	2	1	6	0	6	0	36	0
			6	3	1	18	0	6	0	108	0
			7	2	3	12	180	18	0	-216	0
			8	3	0	30	0	138	180	-4140	0

Figura 5.15. Resultados obtenidos del circuito 5D.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

5.3. Formulación del método de los nudos ampliado para circuitos tipo 3, caso 2

Si en un circuito tipo 3 se tienen solo acoplamientos magnéticos, se incorporarán dichos acoplamientos como sigue (se expondrá la metodología considerando un único acoplamiento, siendo extrapolable al caso múltiples acoplamientos).

Usando la misma notación anterior y siendo A_m la incidencia de las ramas acopladas:

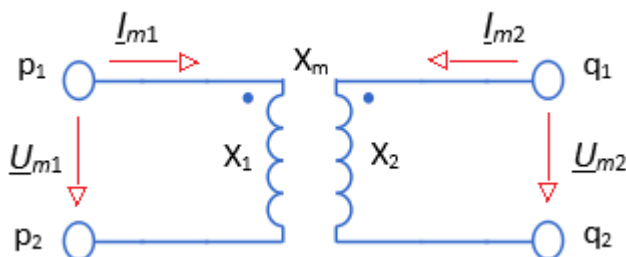


Figura 5.16. Representación del acoplamiento magnético entre dos bobinas.

$$\begin{bmatrix} Y_N & A_m \\ A'_m & -Z_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_N \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_N \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.5.5})$$

Donde,

$$Z_m = \begin{bmatrix} jX_1 & jX_m \\ jX_m & jX_2 \end{bmatrix} \quad I_m = \begin{bmatrix} I_{m1} \\ I_{m2} \end{bmatrix}$$

La matriz Z_m se construye teniendo en cuenta únicamente las bobinas del circuito que están acopladas con otras:

- Los coeficientes de la diagonal $Z_{mii} = jX_i$, donde X_i es la reactancia de la bobina i del acoplamiento.
- Los coeficientes de fuera de la diagonal $Z_{mij} = jX_m = Z_{mji}$, donde X_m es la reactancia de acoplamiento de la bobina i con la bobina j .

Del vector I_m se extraen directamente las corrientes de las ramas acopladas.

A continuación, se exponen los distintos pasos que se realizan para la resolución de un circuito que se ha denominado 5E procedente de la referencia [9], lo que permitirá visualizar como se llega a obtener el sistema matricial que se ha mostrado anteriormente.

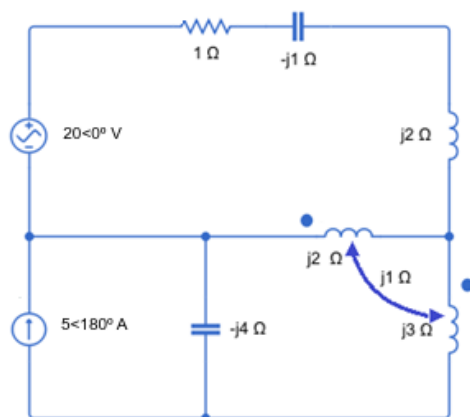


Figura 5.17. Circuito 5E.

Se procede a la preparación del circuito, tal y como se ha descrito y teniendo especial atención en la orientación de las ramas que contienen acoplamientos magnéticos, en ellas debe entrar la flecha por el lado en que se encuentra el punto en la bobina acoplada.

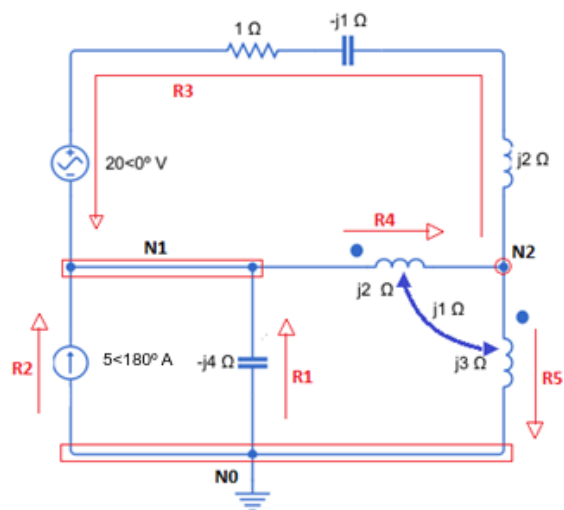


Figura 5.18. Preparación del circuito 5E para su resolución.

Una vez el circuito está preparado para realizar los cálculos en primer lugar se calcula la matriz de admitancias, mostrada a continuación.

$$Y_N = \begin{bmatrix} 0.5 - 0.25j & -0.5 + 0.5j \\ -0.5 + 0.5j & 0.5 - 0.5j \end{bmatrix}$$

El siguiente paso es montar la matriz de incidencia de los acoplamientos magnéticos (A_m), en este caso al tener dos bobinas acopladas tendrá un tamaño de dos columnas que corresponden al número de

bobinas acopladas y dos filas correspondientes al número de nudos del circuito sin contar el de referencia. También se muestra la matriz transpuesta que será necesaria.

$$A_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad A'_m = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Hay que tener en cuenta la matriz que relaciona la inductancia (Z_m) mutua entre las bobinas.

$$Z_m = \begin{bmatrix} jX_1 & jX_m \\ jX_m & jX_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 2j & 1j \\ 1j & 3j \end{bmatrix}$$

Con todo esto, es posible montar el primer término del sistema teniendo en cuenta la ubicación de cada submatriz.

$$\begin{bmatrix} Y_N & A_m \\ A'_m & -Z_m \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0.5 - 0.25j & -0.5 + 0.5j & 1 & 0 \\ -0.5 + 0.5j & 0.5 - 0.5j & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -2j & -1j \\ 0 & 1 & -1j & -3j \end{bmatrix}$$

Finalmente queda el vector de corrientes inyectados en los nudos, en este vector en las primeras posiciones se sitúan las corrientes inyectadas y los espacios sobrantes se rellenan con ceros.

$$\begin{bmatrix} J_N \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -15 + 10j \\ 10 - 10j \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ahora ya es posible realizar el cálculo del sistema para poder obtener el vector del que se extraen las tensiones de los nudos y las corrientes de las ramas con acoplamientos.

$$\begin{bmatrix} 0.5 - 0.25j & -0.5 + 0.5j & 1 & 0 \\ -0.5 + 0.5j & 0.5 - 0.5j & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -2j & -1j \\ 0 & 1 & -1j & -3j \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -15 + 10j \\ 10 - 10j \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -80 + 126.67j \\ -60 + 86.67j \\ 6.67 \\ 26.67 + 20j \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_N \\ I_m \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ I_{m1} \\ I_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -80 + 126.67j \\ -60 + 86.67j \\ 6.67 \\ 26.67 + 20j \end{bmatrix}$$

Obtenido este vector como resultado las dos primeras filas corresponden a las tensiones de los dos nudos, y seguidamente las corrientes de las bobinas acopladas.

Una vez conocidas las tensiones de nudo (variables sin significado físico), y las corrientes de las bobinas acopladas es posible calcular las tensiones de rama para luego poder obtener las potencias consumidas por cada una de las ramas.

De acuerdo con la orientación especificada según los elementos, en cada rama del circuito, la tensión de rama tiene el positivo en el nudo de salida y el negativo en el de llegada. Además, en cada una de ellas la corriente de rama sale del nudo de salida y va hacia el de llegada. En cada rama el producto de esa tensión de rama por la corriente de rama conjugada da lugar a la potencia compleja consumida por la rama.

Dada una rama cualquiera del circuito cuyos extremos son N+ y N-, se cumple que:

- La tensión de rama es la diferencia entre la tensión del nudo N+ y la tensión del nudo N-
- Si la rama es una impedancia,

$$\text{Corriente de rama} = \frac{\text{Tensión de rama}}{\text{Impedancia de rama}} \quad (\text{Eq.5.11})$$

- Si la rama es una fuente de corriente, $\text{Corriente de rama} = \text{Corriente de la fuente}$
- Si la rama es una fuente de tensión no pura,

$$\text{Corriente de rama} = \frac{\text{Tensión de rama}}{\text{Impedancia de la fuente}} - \frac{\text{Tensión de la fuente}}{\text{Impedancia de la fuente}} \quad (\text{Eq.5.12})$$

- Si la rama es una fuente de corriente controlada por tensión,

$$\text{Corriente de rama} = \text{Transconductancia} \cdot [\text{Tensión del N + de la tensión de control} - \text{Tensión del N - de la tensión de control}] \quad (\text{Eq.5.13})$$

[Tensión del N + de la tensión de control – Tensión del N – de la tensión de control]

- Si dos ramas constituyen un acoplamiento magnético, la corriente de rama 1 y la corriente de rama 2 son las que salen de resolver el sistema lineal de ecuaciones.
- Potencia compleja consumida por la rama,

$$S = \text{Tensión de rama} * \text{conj}(\text{Corriente de rama}) \quad (\text{Eq.5.14})$$

5.4. Programación mediante Matlab del proceso automatizado para la resolución de circuitos tipo 3, caso 2

Tal y como se ha comentado anteriormente, se ha desarrollado un programa Matlab para poder abordar los circuitos de tipo 3, de una forma que sea rápida y sencilla para el usuario. Este programa

es capaz de tratar circuitos de cualquiera de los tres casos que se ha clasificado anteriormente, de modo que el mismo programa se utiliza para la resolución de los tres casos que forman los circuitos de tipo 3, identifica el caso que corresponda cada circuito y realiza los cálculos correspondientes. De esta forma el usuario introducirá los datos del circuito al programa a través de una plantilla en un fichero Excel el cual hay que rellenar con los datos una vez realizada la preparación de los circuitos tal y como se ha mencionado varias veces. Una vez introducidos los datos se ejecuta el programa y se obtiene un nuevo fichero con los resultados.

El programa correspondiente a los circuitos tipo 3 se encuentra en el Anexo D2.

Para la demostración del funcionamiento se resuelve con el programa el circuito del apartado 5.3 (*Circuito 5E*) junto a cuatro ejemplos más con la finalidad de verificar la coincidencia de los resultados de las tensiones de nudo que se ha obtenido en el ejemplo resuelto de forma manual realizado anteriormente, así como mostrar la resolución de otros ejemplos de circuitos clasificados dentro de la categoría de circuitos tipo 3, caso 2.

A continuación, se muestra el proceso que hay que seguir para la resolución de los circuitos a través del programa proporcionado. El primero de los circuitos de ejemplo se comenta de una forma más detallada y en el resto de ellos, se recuerda los pasos del proceso de resolución ya que dicho proceso se realiza siempre de la misma forma.

5.4.1. Entrada de datos del circuito 5E

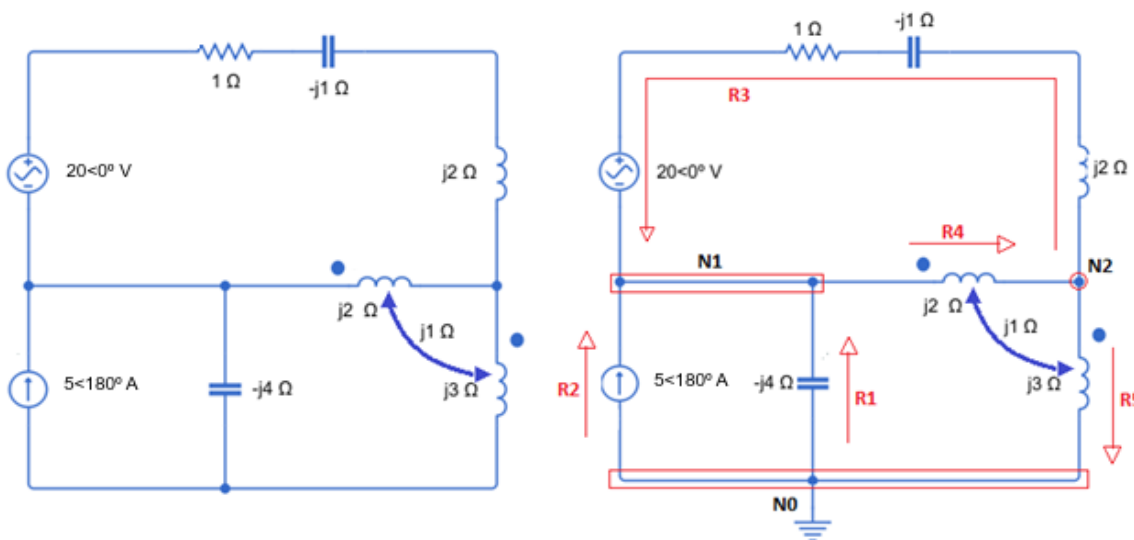


Figura 5.19. Circuito 5E y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

El siguiente problema independientemente que sea de un caso distinto la resolución a través del programa se realiza del mismo modo que el anterior. En primer lugar, realizar una correcta preparación del circuito a resolver para así disponer de los datos necesarios preparados para introducir en el fichero de plantilla Excel.

Los datos del circuito deben introducirse en la plantilla Excel nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 3*, la cual se aporta en el Anexo D1.

A continuación, se muestra el fichero de datos de entrada correspondiente al circuito:

Impedancias de dos terminales					
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		Z
	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)	
1	0	1	0	-4	

Fuentes de corriente					
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		J
	N+	N-	Mod J (A)	Arg J ($^{\circ}$)	
2	0	1	5	180	

Fuentes de tensión no puras						
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		E	Z
	N+	N-	Mod E (V)	Arg E ($^{\circ}$)	R (Ohm)	X (Ohm)
3	2	1	20	0	1	1

Acoplamientos magnéticos									
X acoplamiento Xm (Ohm)	Id. Bobina 1	Nudo salida		Nudo entrada		Id. Bobina 2	Nudo salida		X bobina 2 X2(Ohm)
		N+	N-	X1 (Ohm)	N+		N-		
1	4	1	2	2	5	2	0	3	

Figura 5.20. Entrada de datos del circuito 5E.

La entrada de datos de los acoplamientos magnéticos debe realizarse introduciendo en una misma fila las dos bobinas acopladas y diferenciadas por el identificador asignado por el usuario. En el caso de que una bobina forme parte de más de un acoplamiento se introducirá en una nueva fila de datos cada acoplamiento, repitiendo tanto el identificador como los datos de dicha bobina con su nuevo acoplamiento que sí será distinto.

Una vez introducidos los datos correctamente, se guarda el documento con el nombre del circuito, en este caso *Circuito_5E*.

5.4.2. Obtención del resultado del circuito 5E

A través de Matlab, se ejecuta el programa para circuitos de tipo 3 llamado *Calculo_circuitos_T3*, una vez se inicia el programa pregunta al usuario a través de la Matlab Command Window el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito. Se especifica el nombre y el programa se ejecuta. Una vez ejecutado se genera como resultado un nuevo archivo Excel de nombre *Resul_Circuito_5E*.

Este archivo de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

El resultado que se obtiene al ejecutar el programa con el circuito anterior es el siguiente:

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama		
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAR)	
1	149.8147	122.275644	1	1	0	1	149.8147	-57.7243557	37.4536751	32.2756443	0	-5611.11111
2	105.409255	124.695154	2	0	1	149.8147	-57.7243557	5	180	-400	633.333333	
			3	2	1	44.7213595	-63.4349488	28.2842712	-135	400	1200	
			4	1	2	44.7213595	116.565051	6.66666667	-2.3854E-15	-133.333333	266.666667	
			5	2	0	105.409255	124.695154	33.3333333	36.8698976	133.333333	3511.11111	

Figura 5.21. Resultados obtenidos del circuito 5E.

Se puede observar todos los resultados correspondientes a los distintos elementos del circuito y comparar los resultados de las tensiones de nudo obtenidas anteriormente en el apartado 5.3. Hay que tener en cuenta que el resultado que proporciona el programa está en notación polar y anteriormente se ha calculado en notación cartesiana.

5.4.3. Entrada de datos del circuito 5F

Se ha denominado 5F al siguiente circuito procedente de la referencia [10].

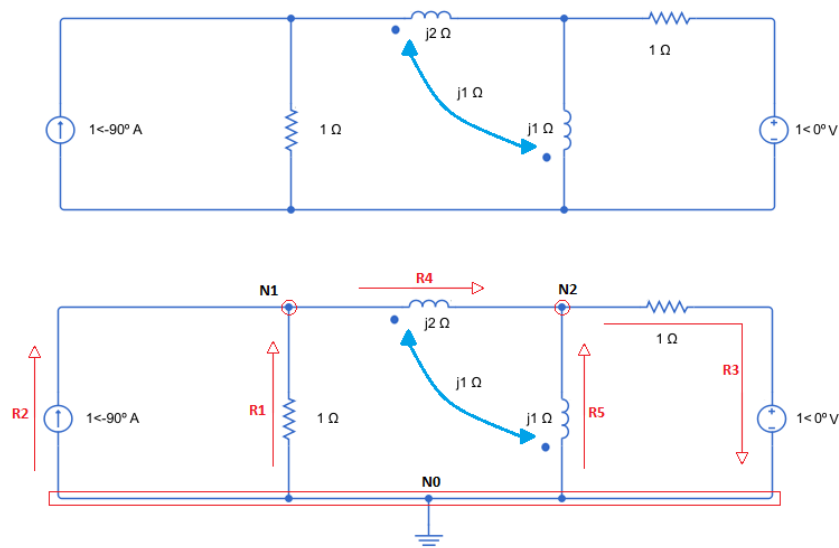


Figura 5.22. Circuito 5F y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

- 1) Se realiza la preparación del circuito a partir del original.

2) Introducción de datos en la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 3*, la cual se aporta en el Anexo D1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito.

Tanto los valores de la corriente como de tensión de las fuentes que puedan encontrarse en el circuito deberán introducirse en notación polar.

Impedancias de dos terminales									
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		Z				
	N+	N-	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)			
1		0	1		1				

Fuentes de corriente									
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		J				
	N+	N-	N+	N-	Mod J (A)	Arg J (°)			
2		0	1		1		-90		

Fuentes de tensión no puras									
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		E		Z		
	N+	N-	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)	R (Ohm)	X (Ohm)	
3	2		0		1		0	1	0

Acoplamiento magnéticos											
X acoplamiento Xm (Ohm)	Id. Bobina 1	Nudo salida		Nudo entrada		X bobina 1 X1 (Ohm)	Id. Bobina 2	Nudo salida		X bobina 2 X2(Ohm)	
		N+	N-	N+	N-						
1	4	1		2		2	5	0		2	1

Figura 5.23. Entrada de datos del circuito 5F.

3) Guardar documento como *Circuito_5F*.

5.4.4. Obtención del resultado del circuito 5F

- 4) Ejecución del programa *Calculo_circuitos_T3.m* utilizando *Matlab*.
- 5) Especificar el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito a través de la Matlab Command Window para que el programa se ejecute: *Circuito_5F*.
- 6) Obtención del resultado a través de un nuevo archivo Excel generado de nombre *Resul_Circuito_5F*.

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama		
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)	
1	0.70710678	-45		1	0	1	0.70710678	135	0.70710678	135	0.5	0
2	0.70710678	45		2	0	1	0.70710678	135	1	-90	-0.5	-0.5
				3	2	0	0.70710678	45	0.70710678	135	0	-0.5
				4	1	2	1	-90	0.70710678	-135	0.5	0.5
				5	0	2	0.70710678	-135	1	90	-0.5	0.5

Figura 5.24. Resultados obtenidos del circuito 5F.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

5.4.5. Entrada de datos del circuito 5G

Se ha denominado 5G al siguiente circuito procedente de la referencia [11].

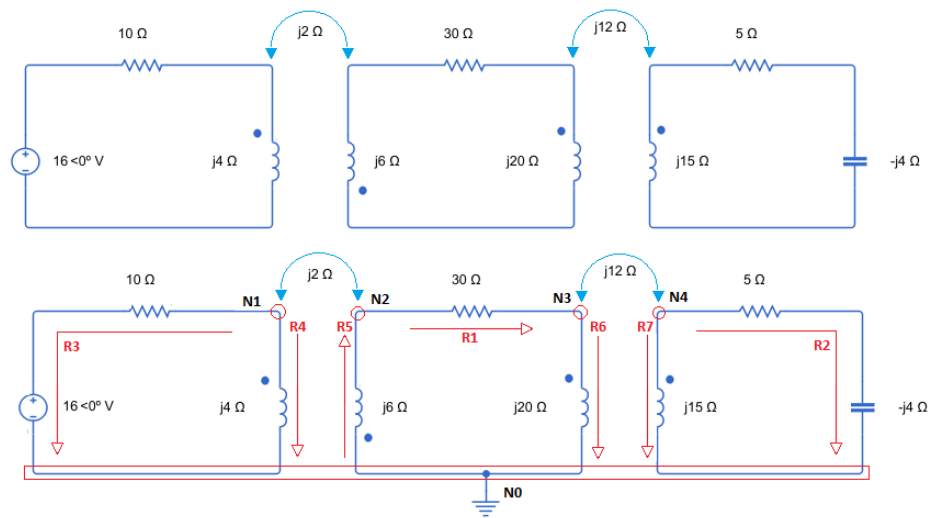


Figura 5.25. Circuito 5G y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

- 1) Se realiza la preparación del circuito a partir del original.
- 2) Introducción de datos en la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 3*, la cual se aporta en el Anexo D1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito.

Tanto los valores de la corriente como de tensión de las fuentes que puedan encontrarse en el circuito deberán introducirse en notación polar.

Impedancias de dos terminales					
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	Z		
	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)	
1	2	3	30	0	
2	4	0	5	-4	

Fuentes de tensión no puras					
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	E		Z
	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)	X (Ohm)
3	1	0	16	0	10

Acoplamientos magnéticos								
X acoplamiento Xm (Ohm)	Id. Bobina 1	Nudo salida	Nudo entrada	X bobina 1	Id. Bobina 2	Nudo salida	Nudo entrada	X bobina 2
		N+	N-	X1 (Ohm)		N+	N-	X2(Ohm)
2	4	1	0	4	5	0	2	6
12	6	3	0	20	7	4	0	15

Figura 5.26. Entrada de datos del circuito 5G.

- 3) Guardar documento como *Circuito_5G*.

5.4.6. Obtención del resultado del circuito 5G

- 4) Ejecución del programa *Calculo_circuitos_T3.m* utilizando *Matlab*.
- 5) Especificar el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito a través de la Matlab Command Window para que el programa se ejecute: *Circuito_5G*.
- 6) Obtención del resultado a través de un nuevo archivo Excel generado de nombre *Resul_Circuito_5G*.

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)
1	5.84163975	67.1979342	1	2	3	2.3249453	-134.854839	0.07749818	-134.854839	0.18017902	0
2	2.79847323	-120.175442	2	4	0	0.49281989	-149.070692	0.07696554	-110.410884	0.02961847	-0.02369478
3	0.80558896	-73.1760501	3	1	0	5.84163975	67.1979342	1.47539586	158.592768	-0.20979749	-8.61617729
4	0.49281989	-149.070692	4	1	0	5.84163975	67.1979342	1.47539586	-21.4072319	0.20979749	8.61617729
			6	3	0	0.80558896	-73.1760501	0.07749818	-134.854839	0.02961847	0.05495872
			5	0	2	2.79847323	59.8245581	0.07749818	-134.854839	-0.20979749	-0.05495872
			7	4	0	0.49281989	-149.070692	0.07696554	69.589116	-0.02961847	0.02369478

Figura 5.27. Resultados obtenidos del circuito 5G.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

5.4.7. Entrada de datos del circuito 5H

Se ha denominado 5H al siguiente circuito procedente de la referencia [11].

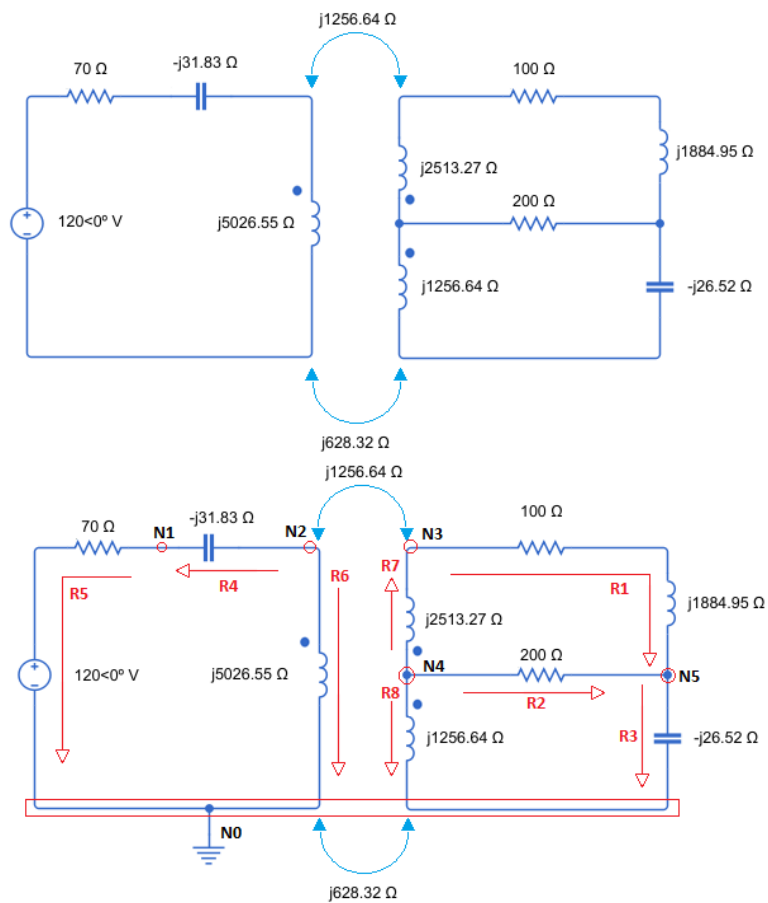


Figura 5.28. Circuito 5H y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

- 1) Se realiza la preparación del circuito a partir del original.
- 2) Introducción de datos en la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 3*, la cual se aporta en el Anexo D1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito.

Tanto los valores de la corriente como de tensión de las fuentes que puedan encontrarse en el circuito deberán introducirse en notación polar.

Impedancias de dos terminales							
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		Z		
	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)			
1	3	5	100	1884.955592			
2	4	5	200	0			
3	5	0	0	-26.52582385			
4	2	1	0	-31.83098862			

Fuentes de tensión no puras							
Id. elemento	Nudo salida		E		Z		
	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)	R (Ohm)	X (Ohm)	
5	1	0	120	0	70	0	

Acoplamiento magnéticos										
X acoplamiento Xm (Ohm)	Id. Bobina 1	Nudo salida		Nudo entrada		X bobina 1 X1 (Ohm)	Id. Bobina 2	Nudo salida		X bobina 2 X2(Ohm)
		N+	N-	N+	N-			N+	N-	
1256.637061	6	2	0	5026.548246	7	4	3	2513.274123		
628.3185307	6	2	0	5026.548246	8	4	0	1256.637061		

Figura 5.29. Entrada de datos del circuito 5H.

3) Guardar documento como *Circuito_5H*.

5.4.8. Obtención del resultado del circuito 5H

- 4) Ejecución del programa *Calculo_circuitos_T3.m* utilizando *Matlab*.
- 5) Especificar el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito a través de la Matlab Command Window para que el programa se ejecute: *Circuito_5H*.
- 6) Obtención del resultado a través de un nuevo archivo Excel generado de nombre *Resul_Circuito_5H*.

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)
1	119.926978	0.92232911	1	3	5	14.6066678	-172.015071	0.0077382	101.021718	0.00598797	0.11287054
2	120.805352	0.93472454	2	4	5	4.30068166	-75.1660747	0.02150341	-75.1660747	0.09247931	-3.4694E-18
3	14.9681284	-171.796319	3	5	0	0.3658424	-163.028253	0.01379193	-73.0282534	0	-0.00504567
4	4.3297907	-80.0096358	4	2	1	0.87875946	2.62661264	0.02760704	92.6266126	0	-0.02425995
5	0.3658424	-163.028253	5	1	0	119.926978	0.92232911	0.02760704	92.6266126	-0.09846728	-3.30936463
			6	2	0	120.805352	0.93472454	0.02760704	-87.3733874	0.09846728	3.33362458
			7	4	3	15.7109272	-7.78557255	0.0077382	101.021718	-0.03919385	-0.11508317
			8	4	0	4.3297907	-80.0096358	0.01379193	106.971747	-0.05927343	0.00725831

Figura 5.30. Resultados obtenidos del circuito 5H.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

5.4.9. Entrada de datos del circuito 51

Se ha denominado 51 al siguiente circuito procedente de la referencia [12].

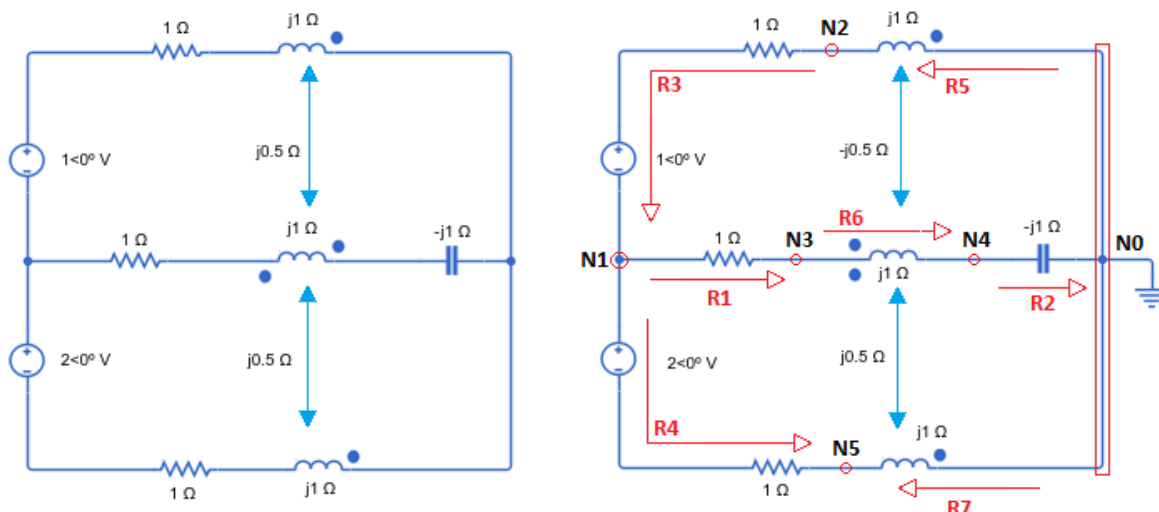


Figura 5.31. Circuito 51 y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel

- 1) Se realiza la preparación del circuito a partir del original.
- 2) Introducción de datos en la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 3*, la cual se aporta en el Anexo D1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito.

Tanto los valores de la corriente como de tensión de las fuentes que puedan encontrarse en el circuito deberán introducirse en notación polar.

Impedancias de dos terminales						
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	Z			
	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)		
1	1	3	1	0		
2	4	0	0	-1		

Fuentes de tensión no puras						
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	E		Z	
	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)	R (Ohm)	X (Ohm)
3	2	1	1	0	1	0
4	1	5	2	0	1	0

Acoplamiento magnético								
X acoplamiento Xm (Ohm)	Id. Bobina 1	Nudo salida	Nudo entrada	X bobina 1	Id. Bobina 2	Nudo salida	Nudo entrada	X bobina 2
		N+	N-	X1 (Ohm)		N+	N-	X2(Ohm)
-0.5	5	0	2	1	6	3	4	1
0.5	6	3	4	1	7	0	5	1

Figura 5.32. Entrada de datos del circuito 51.

- 3) Guardar documento como *Circuito_51*.

5.4.10. Obtención del resultado del circuito 51

- 4) Ejecución del programa *Calculo_circuitos_T3.m* utilizando *Matlab*.
- 5) Especificar el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito a través de la Matlab Command Window para que el programa se ejecute: *Circuito_51*.
- 6) Obtención del resultado a través de un nuevo archivo Excel generado de nombre *Resul_Circuito_51*.

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (º)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (º)	Mod I (A)	Arg I (º)	P (W)	Q (VAR)
1	0.5	36.8698976	1	1	3	0.4472136	-116.565051	0.4472136	-116.565051	0.2	0
2	0.92195445	49.3987054	2	4	0	0.4472136	153.434949	0.4472136	-116.565051	0	-0.2
3	0.92195445	49.3987054	3	2	1	0.4472136	63.4349488	0.89442719	153.434949	-5.5511E-17	-0.4
4	0.4472136	153.434949	4	1	5	1.61245155	29.7448813	1	126.869898	-0.2	-1.6
5	1.11803399	-153.434949	5	0	2	0.92195445	-130.601295	0.89442719	153.434949	0.2	0.8
			6	3	4	1.11803399	26.5650512	0.4472136	-116.565051	-0.4	0.3
			7	0	5	1.11803399	26.5650512	1	-53.1301024	0.2	1.1

Figura 5.33. Resultados obtenidos del circuito 51.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

5.5. Formulación del método de los nudos ampliado para circuitos tipo 3, caso 3

Finalmente, se resuelven circuitos tipo 3 que contienen tanto fuentes de tensión puras como acoplamientos magnéticos. El proceso de resolución con el que se trabaja es una combinación del de los dos casos anteriores.

Si un circuito tipo 3 contiene fuentes puras de tensión y acoplamientos magnéticos, el sistema matricial con el que se trabaja es el siguiente:

$$\begin{bmatrix} Y_N & A_m & A_g \\ A_m & -Z_m & 0 \\ A'_g & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_N \\ I_m \\ I_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_N \\ 0 \\ e_g \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.5.6})$$

El sistema tiene por orden (N.º nudos menos 1) + (N.º ramas acopladas) + (N.º fuentes puras de tensión).

Para resolver los circuitos que sean de este caso se usa el sistema matricial que se ha expuesto y con el que a través de su resolución se puede llegar a obtener las tensiones de los nudos, así como las corrientes de las fuentes de tensión puras y de las bobinas que formen acoplamientos magnéticos.

A continuación se exponen los distintos pasos que se realizan para la resolución de un circuito que se ha denominado 5J procedente de la referencia [13], lo que permitirá visualizar como se llega a obtener el sistema matricial que se ha mostrado anteriormente.

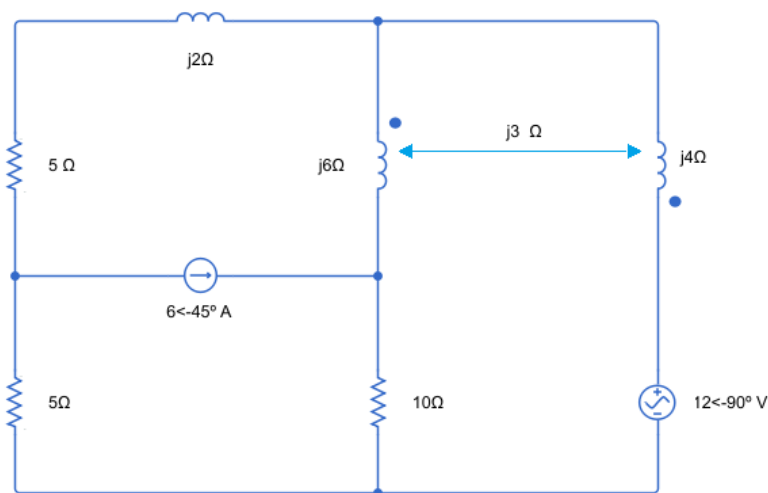


Figura 5.34. Circuito 5J.

En primer lugar, se realiza la preparación del circuito tal y como se ha descrito varias veces en distintos capítulos anteriores. Identificación de los nudos, asignando uno de ellos como el de referencia, el de tierra con el número 0 y el resto con valores del 1 al n , siendo n el número total de nudos del circuito menos 1. Asignar una orientación a cada una de las ramas del circuito definiendo un sentido de recorrido para cada una de ellas que va desde donde parten hasta donde terminan y teniendo en cuenta los criterios de la orientación. En último lugar definir la identificación de las ramas desde R1 hasta Rb, siendo b el número total de ramas del circuito

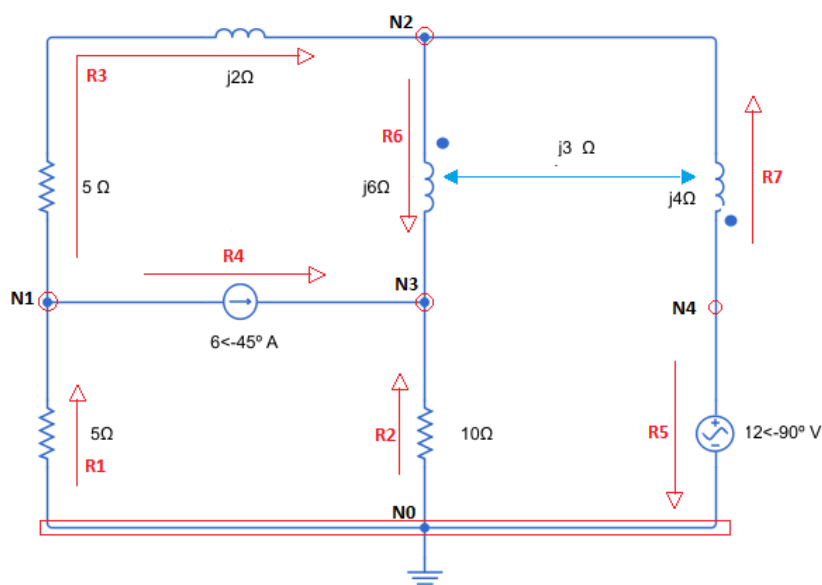


Figura 5.35. Preparación del circuito 5J para su resolución.

Una vez está preparado el circuito es posible realizar el cálculo para montar la matriz de admitancias y el resultado de la misma es el siguiente:

$$Y_N = \begin{bmatrix} 0.37224 - 0.069j & -0.1724 + 0.069j & 0 & 0 \\ -0.1724 + 0.069j & 0.1724 - 0.069j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

A continuación, la matriz de incidencia de los acoplamientos y su traspuesta.

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & -1 \\ -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A'_m = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

La matriz Z_m que se construye únicamente teniendo en cuenta las bobinas del circuito que forman acoplamientos y que relaciona la inductancia mutua entre ellas.

$$Z_m = \begin{bmatrix} 6j & 3j \\ 3j & 4j \end{bmatrix}$$

Seguidamente la matriz de incidencia de las fuentes de tensión puras y su traspuesta.

$$A_g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad A'_g = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

Una vez se conocen todas las matrices por separado simplemente se colocan ordenadamente para formar el primer término ecuación.

$$\begin{bmatrix} Y_N & A_m & A_g \\ A_m & -Z_m & 0 \\ A'_g & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0.3724 - 0.069j & -0.1724 + 0.069j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.1724 + 0.069j & 0.1724 - 0.069j & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & -6j & -3j & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & -3j & -4j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Finalmente queda montar el vector de corrientes inyectados en los nudos y de tensiones de las fuentes de tensión puras.

$$\begin{bmatrix} J_N \\ 0 \\ e_g \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \\ 0 \\ 0 \\ e_{g1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.2426 + 4.2426j \\ 0 \\ 4.2426 - 4.2426j \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -12j \end{bmatrix}$$

Una vez tenemos las matrices montadas es posible realizar el cálculo para conocer el valor de las incógnitas: las tensiones de nudo, las corrientes de las fuentes de tensión puras y las corrientes de las ramas que forman acoplamientos magnéticos. Desarrollando este sistema como se muestra se llega al resultado final.

$$\begin{bmatrix} 0.3724 - 0.069j & -0.1724 + 0.069j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.1724 + 0.069j & 0.1724 - 0.069j & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & -6j & -3j & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & -3j & -4j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -4.2426 + 4.2426j \\ 0 \\ 4.2426 - 4.2426j \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -12j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -9.7275 + 2.2409j \\ 9.3471 - 12.1371j \\ 29.4957 - 7.3908j \\ -12j \\ -1.2931 + 3.5036j \\ 1.0041 - 0.2909j \\ -1.0041 + 0.2909j \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_N \\ I_m \\ I_g \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ I_{m1} \\ I_{m2} \\ I_{g1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -9.7275 + 2.2409j \\ 9.3471 - 12.1371j \\ 29.4957 - 7.3908j \\ -12j \\ -1.2931 + 3.5036j \\ 1.0041 - 0.2909j \\ -1.0041 + 0.2909j \end{bmatrix}$$

En el vector resultante hay que diferenciar las filas correspondientes a los valores de las tensiones de nudo, las corrientes de los acoplamientos y de las fuentes de tensión en último lugar.

Conocidos estos valores resultantes es posible calcular las tensiones de rama y las corrientes que aún no se conocen, para luego poder obtener las potencias consumidas por cada una de las ramas.

Teniendo en cuenta con la orientación especificada según los elementos, en cada rama del circuito, la tensión de rama tiene el positivo en el nudo de salida y el negativo en el de llegada. Además, en cada una de ellas la corriente de rama sale del nudo de salida y va hacia el de llegada. En cada rama el producto de esa tensión de rama por la corriente de rama conjugada da lugar a la potencia compleja consumida por la rama.

Dada una rama cualquiera del circuito cuyos extremos son N+ y N-, se cumple que:

- La tensión de rama es la diferencia entre la tensión del nudo N+ y la tensión del nudo N-
- Si la rama es una impedancia,

$$\text{Corriente de rama} = \frac{\text{Tensión de rama}}{\text{Impedancia de rama}} \quad (\text{Eq.5.15})$$

- Si la rama es una fuente de corriente, $\text{Corriente de rama} = \text{Corriente de la fuente}$
- Si la rama es una fuente de tensión no pura,

Corriente de rama

$$= \frac{\text{Tensión de rama}}{\text{Impedancia de la fuente}} - \frac{\text{Tensión de la fuente}}{\text{Impedancia de la fuente}} \quad (\text{Eq.5.16})$$

- Si la rama es una fuente de corriente controlada por tensión,

$$\text{Corriente de rama} = \text{Transconductancia} \cdot [\text{Tensión del N + de la tensión de control} - \text{Tensión del N - de la tensión de control}] \quad (\text{Eq.5.17})$$

[Tensión del N + de la tensión de control – Tensión del N – de la tensión de control]

- Si dos ramas constituyen un acoplamiento magnético, la corriente de rama 1 y la corriente de rama 2 son las que salen de resolver el sistema lineal de ecuaciones.

- Si la rama es una fuente de tensión pura, la corriente de rama es la que sale de resolver el sistema lineal de ecuaciones.
- Potencia compleja consumida por la rama,

$$S = \text{Tensión de rama} * \text{conj}(\text{Corriente de rama}) \quad (\text{Eq.5.18})$$

5.6. Programación mediante Matlab del proceso automatizado para la resolución de circuitos tipo 3, caso 3

La resolución de circuitos tipo 3, caso 3 se realiza de igual forma que en los casos explicados anteriormente siendo el mismo programa utilizado para los circuitos de este tipo capaz de tratar los tres casos en que se ha clasificado los circuitos de tipo 3. Identifica el caso que según los datos que introduce el usuario para así realizar los cálculos correspondientes.

Se recuerda que los datos del circuito se proporcionan al programa a través de una plantilla en un fichero Excel el cual hay que rellenar con los datos una vez realizada la preparación de los circuitos del mismo modo que se ha mencionado varias veces durante el TFG. Una vez introducidos los datos se ejecuta el programa y se obtiene un nuevo fichero con los resultados.

El programa correspondiente a los circuitos tipo 3 se encuentra en el Anexo D2.

Para la demostración del funcionamiento se resuelve con el programa el circuito del apartado 5.5 (*Circuito 5J*) junto a tres ejemplos más con la finalidad de verificar la coincidencia de los resultados de las tensiones de nudo que se ha obtenido en el ejemplo resuelto de forma manual realizado anteriormente, así como mostrar la resolución de otros ejemplos de circuitos clasificados dentro de la categoría de circuitos tipo 3, caso 3.

A continuación, se resolverán circuitos a través del programa desarrollado para mostrar el procedimiento de introducción de los datos, la ejecución del programa y la obtención de los resultados y se podrán verificar los resultados con los obtenidos de forma manual anteriormente. El primero de los circuitos de ejemplo se comenta de una forma más detallada y en el resto de ellos, se recuerda los pasos del proceso de resolución ya que dicho proceso se realiza siempre de la misma forma.

5.6.1. Entrada de datos del circuito 5J

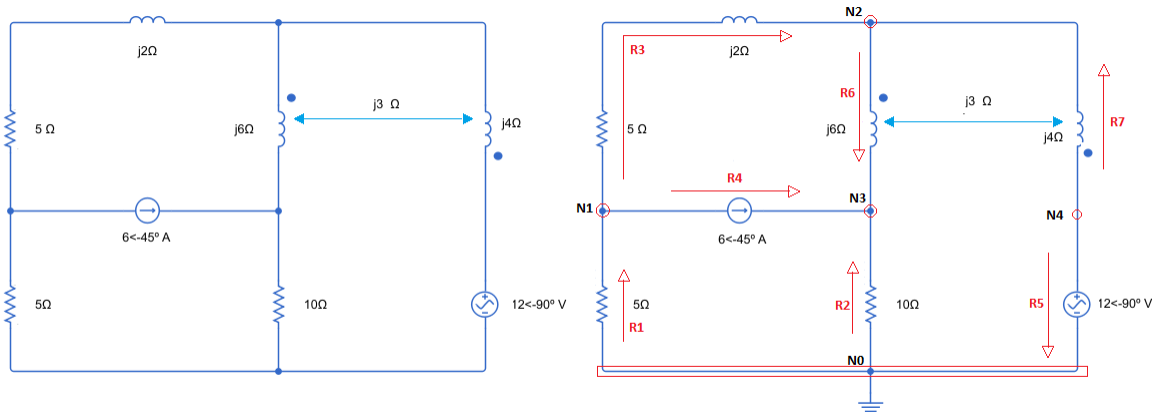


Figura 5.36. Circuito 5J y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

Para la realización de este último caso de los circuitos tipo 3, se siguen los mismos pasos que en todos los anteriores. En primer lugar, se prepara el circuito, poniendo especial atención con la orientación de las ramas. Una vez realizado este primer paso de forma manual se introducen todos los datos en el fichero de plantilla Excel para poder ejecutar el programa y obtener los resultados de forma automática.

Se introducen los datos en la plantilla Excel *Plantilla datos circuitos tipo 3*, la cual se aporta en el Anexo D1.

Los datos introducidos deben de quedar de la siguiente forma:

Impedancias de dos terminales					
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	Z		
	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)	
1	0	1	5	0	
2	0	3	10	0	
3	1	2	5	2	

Fuentes de corriente					
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	J		
	N+	N-	Mod J (A)	Arg J (°)	
4	1	3	6	-45	

Fuentes de tensión puras					
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	E		
	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)	
5	4	0	12	-90	

Acoplamiento magnético								
X acoplamiento Xm (Ohm)	Id. Bobina 1	Nudo salida	Nudo entrada	X bobina 1	Id. Bobina 2	Nudo salida	Nudo entrada	X bobina 2
		N+	N-	X1 (Ohm)		N+	N-	X2 (Ohm)
3	6	2	3	6	7	4	2	4

Figura 5.37. Entrada de datos del circuito 5J.

Una vez introducidos los datos tal y como se ha descrito múltiples veces se guarda el fichero con su correspondiente nombre, *Circuito_5J*, para proceder a la ejecución del programa.

5.6.2. Obtención del resultado del circuito 5J

En último lugar y a través de Matlab, se ejecuta el programa para circuitos de tipo 3 llamado *Calculo_circuitos_T3*. El programa pregunta al usuario a través de la Matlab Command Window el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito y especificando el nombre y el programa se ejecuta. Una vez ejecutado se genera como resultado un nuevo archivo Excel de nombre *Resul_Circuito_5J*.

Este archivo de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

El resultado que se obtiene al ejecutar el programa con el circuito anterior es el siguiente:

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)
1	9.98230444	167.027075	1	0	1	9.98230444	-12.9729251	1.99646089	-12.9729251	19.9292804	0
2	15.3191411	-52.3991773	2	0	3	30.4075942	165.932825	3.04075942	165.932825	92.4621783	0
3	30.4075942	-14.0671754	3	1	2	23.8865414	142.99184	4.43561938	121.190431	98.3735966	39.3494386
4	12	-90	4	1	3	40.3885281	166.203261	6	-45	-207.274276	-125.545887
			6	2	3	20.7001018	-166.745048	3.73455901	110.257764	9.4249659	76.729064
			7	4	2	9.34807898	179.159893	1.04535813	-16.1573486	-9.4249659	-2.58142754
			5	4	0	12	-90	1.04535813	163.842651	-3.4907792	12.0488117

Figura 5.38. Resultados obtenidos del circuito 5J

Se puede observar todos los resultados correspondientes a los distintos elementos del circuito y comparar los resultados de las tensiones de nudo obtenidas anteriormente en el apartado 5.5. Hay que tener en cuenta que el resultado que proporciona el programa está en notación polar y anteriormente se ha calculado en notación cartesiana.

5.6.3. Entrada de datos del circuito 5K

Se ha denominado 5K al siguiente circuito procedente de la referencia [9].

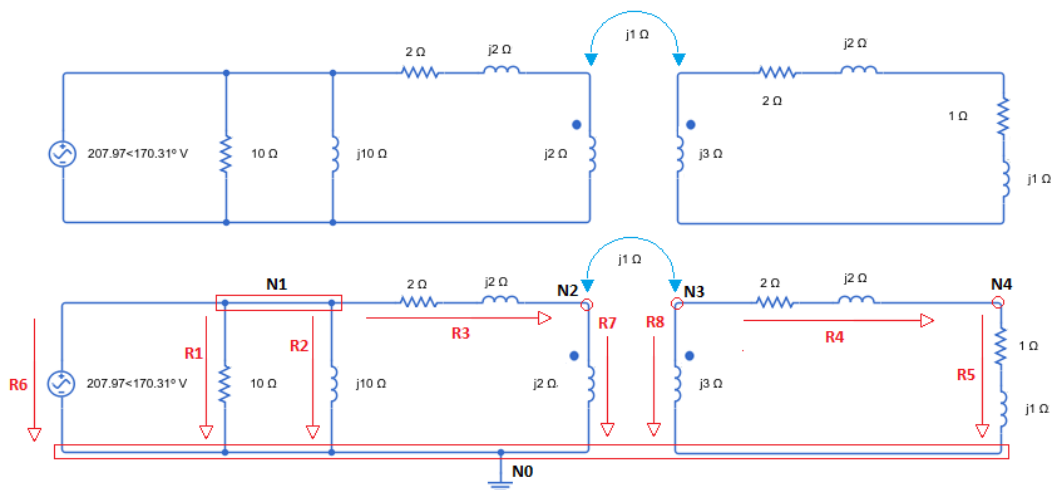


Figura 5.39. Circuito 5K y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

- 1) Se realiza la preparación del circuito a partir del original.
- 2) Introducción de datos en la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 3*, la cual se aporta en el Anexo D1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito.

Tanto los valores de la corriente como de tensión de las fuentes que puedan encontrarse en el circuito deberán introducirse en notación polar.

Impedancias de dos terminales					
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	Z		
	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)	
1	1	0	10	0	
2	1	0	0	10	
3	1	2	2	2	
4	3	4	2	2	
5	4	0	1	1	

Fuentes de tensión puras				
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	E	
	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)
6	1	0	207.97	170.31

Acoplamiento magnéticos								
X acoplamiento Xm (Ohm)	Id. Bobina 1	Nudo salida	Nudo entrada	X bobina 1	Id. Bobina 2	Nudo salida	Nudo entrada	X bobina 2
		N+	N-	X1 (Ohm)		N+	N-	X2(Ohm)
1	7	2	0	2	8	3	0	3

Figura 5.40. Entrada de datos del circuito 5K.

- 3) Guardar documento como *Circuito_5K*.

5.6.4. Obtención del resultado del circuito 5K

- 4) Ejecución del programa *Calculo_circuitos_T3.m* utilizando *Matlab*.
- 5) Especificar el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito a través de la Matlab Command Window para que el programa se ejecute: *Circuito_5K*.
- 6) Obtención del resultado a través de un nuevo archivo Excel generado de nombre *Resul_Circuito_5K*.

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama		
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)	
1	207.97	170.31	1	1	0	207.97	170.31	20.797	170.31	4325.15209	0	
2	88.6017835	-163.611673	2	1	0	207.97	170.31	20.797	80.31	0	4325.15209	
3	30.0005275	179.998787	3	1	2	134.166438	153.433735	47.4349989	108.433735	4500.15824	4500.15824	
4	10.0001758	179.998787	4	3	4	20.0003517	179.998787	7.07119214	134.998787	100.003517	100.003517	
				5	4	0	10.0001758	179.998787	7.07119214	134.998787	50.0017583	50.0017583
				7	2	0	88.6017835	-163.611673	47.4349989	108.433735	150.005275	4200.14769
				8	3	0	30.0005275	179.998787	7.07119214	-45.0012134	-150.005275	-150.005275
				6	1	0	207.97	170.31	76.0605248	-65.1208466	-8975.31561	-13025.458

Figura 5.41. Resultados obtenidos del circuito 5K.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

5.6.5. Entrada de datos del circuito 5L

Se ha denominado 5L al siguiente circuito procedente de la referencia [11].

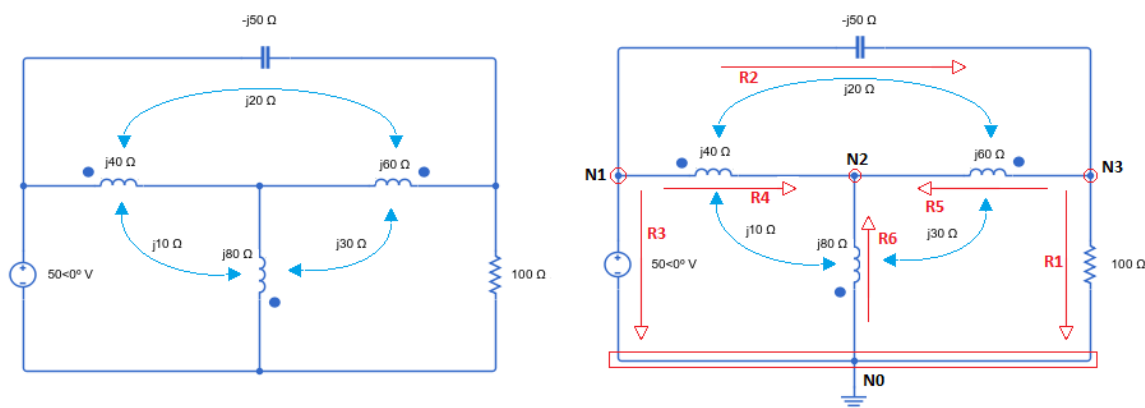


Figura 5.42. Circuito 5L y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

- 1) Se realiza la preparación del circuito a partir del original.
- 2) Introducción de datos en la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 3*, la cual se aporta en el Anexo D1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito.

Tanto los valores de la corriente como de tensión de las fuentes que puedan encontrarse en el circuito deberán introducirse en notación polar.

Impedancias de dos terminales									
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		Z				
	N+	N-	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)			
1		3		0	100	0			
2		1		3	0	-50			

Fuentes de tensión puras						
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		E	
	N+	N-	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)
3		1		0	50	0

Acoplamiento magnéticos										
X acoplamiento Xm (Ohm)	Id. Bobina 1	Nudo salida		Nudo entrada		X bobina 1 X1 (Ohm)	Id. Bobina 2	Nudo salida		X bobina 2 X2(Ohm)
		N+	N-	N+	N-			N+	N-	
20	4	1	2	40	5	3	2	60		
10	4	1	2	40	6	0	2	80		
30	6	0	2	80	5	3	2	60		

Figura 5.43. Entrada de datos del circuito 5L.

- 3) Guardar documento como *Circuito_5L*.

5.6.6. Obtención del resultado del circuito 5L

- 4) Ejecución del programa *Calculo_circuitos_T3.m* utilizando *Matlab*.
- 5) Especificar el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito a través de la Matlab Command Window para que el programa se ejecute: *Circuito_5L*.
- 6) Obtención del resultado a través de un nuevo archivo Excel generado de nombre *Resul_Circuito_5L*.

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)
1	50	0	1	3	0	30.6970307	105.255119	0.30697031	105.255119	9.42307692	0
2	28.5885937	10.8564133	2	1	3	65.1920241	-27.0185703	1.30384048	62.9814297	-7.1054E-15	-85
3	30.6970307	105.255119	4	1	2	22.5746624	-13.7994854	1.09632252	-111.614779	-3.36538462	24.5192308
			6	0	2	28.5885937	-169.143587	0.31008684	150.255119	6.73076923	5.76923077
			5	3	2	43.5227615	146.169502	1.09632252	52.1250163	-3.36538462	47.5961538
			3	1	0	50	0	0.2361551	-142.943472	-9.42307692	7.11538462

Figura 5.44. Resultados obtenidos del circuito 5L.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

5.6.7. Entrada de datos del circuito 5M

Se ha denominado 5M al siguiente circuito procedente de la referencia [11].

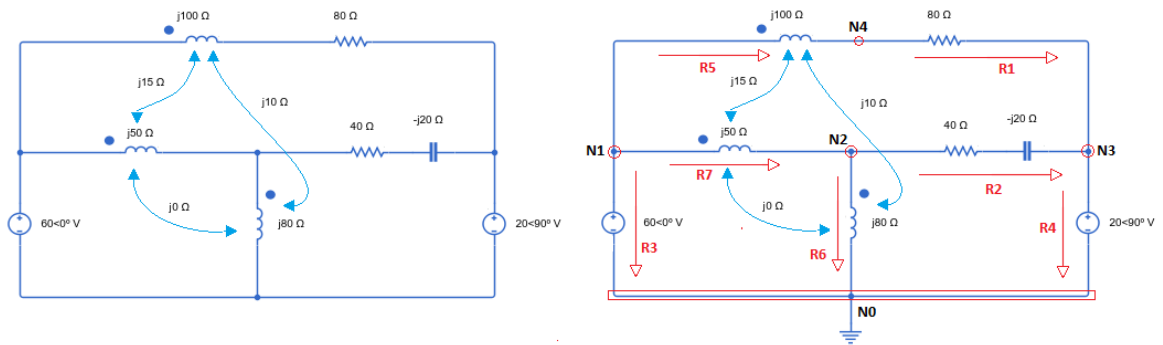


Figura 5.45. Circuito 5M y preparación para introducir sus datos en el fichero Excel.

- 1) Se realiza la preparación del circuito a partir del original.
- 2) Introducción de datos en la plantilla Excel proporcionada y nombrada como *Plantilla datos circuitos tipo 3*, la cual se aporta en el Anexo D1. Dentro del documento se deben rellenar las casillas que sean necesarias con los datos de circuito que se ha preparado. Es importante introducir ceros en los espacios vacíos en caso de que no se necesiten, así como dejar vacío todo el espacio correspondiente a un elemento en caso de que éste no forme parte del circuito.

Tanto los valores de la corriente como de tensión de las fuentes que puedan encontrarse en el circuito deberán introducirse en notación polar.

Impedancias de dos terminales						
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		Z	
	N+	N-	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)
1		4	3		80	0
2		2	3		40	-20

Fuentes de tensión puras						
Id. elemento	Nudo salida		Nudo entrada		E	
	N+	N-	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)
3		1	0		60	0
4		3	0		20	90

Acoplamiento magnéticos										
X acoplamiento Xm (Ohm)	Id. Bobina 1	Nudo salida		Nudo entrada		X bobina 1 X1 (Ohm)	Id. Bobina 2	Nudo salida		X bobina 2 X2 (Ohm)
		N+	N-	N+	N-			N+	N-	
10	5	1	4	100	6	2	0	2	0	80
15	5	1	4	100	7	1	2	1	2	50
0	7	1	2	50	6	2	0	2	0	80

Figura 5.46. Entrada de datos del circuito 5M.

- 3) Guardar documento como *Circuito_5M*.

5.6.8. Obtención del resultado del circuito 5M

- 4) Ejecución del programa *Calculo_circuitos_T3.m* utilizando *Matlab*.
- 5) Especificar el nombre del archivo Excel que contiene los datos del circuito a través de la Matlab Command Window para que el programa se ejecute: *Circuito_5M*.
- 6) Obtención del resultado a través de un nuevo archivo Excel generado de nombre *Resul_Circuito_5M*.

Nudo nº	Tensiones de nudo		Id. elemento	Nudos de rama		Tensiones de rama		Corrientes de rama		Potencias consumidas de rama	
	Mod V (V)	Arg V (°)		N+	N-	Mod U (V)	Arg U (°)	Mod I (A)	Arg I (°)	P (W)	Q (VAr)
1	60	0	1	4	3	32.5534439	-77.8534014	0.40691805	-77.8534014	13.2465839	-4.4409E-16
2	25.2912013	-58.0349921	2	2	3	43.5648748	-72.1010493	0.97414021	-45.5359982	37.9579663	-18.9789831
3	20	90	5	1	4	54.4497722	12.542646	0.40691805	-77.8534014	-0.15315253	22.1560658
4	13.6653084	-59.9174817	7	1	2	51.312198	24.7180172	0.90748431	-63.6041635	1.36339044	46.545051
			6	2	0	25.2912013	-58.0349921	0.30270107	-157.130682	-1.21023791	7.55940903
			3	1	0	60	0	1.30573032	111.996514	-29.3436915	-72.64091
			4	3	0	20	90	1.33585863	-54.9082489	-21.8608587	15.3593674

Figura 5.47. Resultados obtenidos del circuito 5M.

El archivo Excel de resultados contiene en columnas separadas las tensiones de nudo, las tensiones de elemento, las corrientes de elemento y las potencias complejas consumidas por elemento, indicando en las cabeceras de dichas columnas las unidades en que los resultados vienen dados.

6. Análisis del impacto ambiental

El impacto ambiental que se asocia a este proyecto, al ser un trabajo basado en un análisis, el estudio teórico y la aplicación de un método de cálculo para la resolución de circuitos eléctricos, así como la realización de un programa informático, no requiere ningún tipo de material ni herramienta especial. Dicho esto, se quiere transmitir que no se generan residuos contaminantes de forma directa a partir de la realización de este proyecto y no se deberá realizar ninguna gestión especial para tratar los residuos. Por otro lado, de una forma indirecta, sí que se han generado residuos contaminantes clasificándolos en distintos tipos:

- Residuos informáticos. Residuos materiales que provienen de equipos informáticos y de un solo uso, por ejemplo, la tinta de una impresora.
- Material de oficina. Materiales y herramientas que se usan para la escritura y el dibujo como pueden ser bolígrafos, papeles, subrayadores, etc.
- Consumo energético. Energía eléctrica consumida por los equipos eléctricos.

A continuación, se realiza un análisis de los desechos generados para obtener una estimación de los residuos contaminantes y poder realizar un cálculo de la huella de carbono que se genera con el desarrollo del proyecto.

6.1. Clasificación y análisis de los agentes con impacto ambiental

El objetivo de este apartado se basa en la determinación y clasificación de una forma detallada de los residuos contaminantes generados.

En el presente análisis no se considerarán algunos pequeños materiales cuyo uso es tan reducido o la cantidad consumida tan pequeña que se consideran despreciables. Entre los materiales que sí se consideran, en algunos de ellos se realiza una estimación de su uso por la dificultad de medir el consumo de dicho recurso.

Para cuantificar la energía consumida durante la realización de proyecto se considera un consumo medio de potencia de todos los equipos de 200 W y las horas de trabajo distribuidas en las distintas fases. Para la obtención del valor del consumo medio se tiene en cuenta la iluminación de la oficina y el equipo informático formado por un ordenador Sony, una pantalla auxiliar y una impresora cuyos cartuchos son de 5 ml siendo capaz de llegar a las 250 impresiones por cartucho.

En la siguiente tabla se detallan los consumibles utilizados en función de las fases del proyecto.

Tabla 6.1. Clasificación y análisis consumibles.

Fases	Residuos informáticos	Residuos de material de oficina	Consumo energético
Objetivos y alcance del proyecto	Despreciable	Despreciable	2,0 kWh
Búsqueda y estudio de conceptos teóricos	1,2 ml tinta	60 folios	10,0 kWh
Programación códigos Matlab	0,6 ml tinta	30 folios	36,0 kWh
Comprobaciones y validaciones de los resultados	Despreciable	Despreciable	16 kWh
Elaboración de la memoria del proyecto	2 ml tinta	100 folios	30 kWh
Proceso de impresión y encuadernación	4 ml tinta	200 folios	0,20 kWh
TOTAL	7,8 ml tinta = 2 cartuchos	390 folios	94,2 kWh

6.2. Cálculo de la huella de carbono

Se entiende como huella de carbono “la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto por un individuo, organización, evento o producto”. La huella de carbono de una organización, mide la totalidad de dichos gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto provenientes del desarrollo de la actividad de dicha organización.

El cálculo de la huella de carbono se realiza según el procedimiento detallado en el documento guía de la huella de carbono que pone a disposición el Ministerio para la Transición Ecológica [14].

Este proyecto en cuestión tal como se ha dicho anteriormente no presenta un tipo de emisiones de forma directa pero sí de forma indirecta. En referencia a las emisiones definidas en la guía se cuantifican las emisiones asociadas a la generación de electricidad consumida clasificadas en el apartado del alcance 2 de la guía y las emisiones provenientes de la fabricación de productos y servicios correspondientes al alcance 3.

Para la realización del cálculo de las emisiones indirectas generadas por el consumo eléctrico se debe conocer el consumo estimado, así como el MIX de la red.

Conociendo el consumo energético estimado de 94,2 kWh (tabla 6.1) y el MIX de la red eléctrica peninsular estimado en 241 g CO₂/kWh [15] el cálculo queda:

$$HdC_1 = 94,2 \text{ kWh} \cdot 241 \frac{\text{g CO}_2}{\text{kWh}} = 22,2 \text{ kg CO}_2 \quad (\text{Eq.6.1})$$

Las emisiones de alcance 3 son difíciles de cuantificar por la gran cantidad de procesos y productos que engloban la cadena de producción. Debido al reducido material de oficina empleado se menosprecia el valor de la huella de carbono correspondiente al alcance 3.

$$HdC_2 = 0 \text{ kg CO}_2 \quad (\text{Eq.6.2})$$

Finalmente, una vez analizados los productos utilizados durante el proyecto y su correspondiente cálculo de huella de carbono se obtiene el valor total de la huella producida de 22,2 kg CO₂ a partir de la suma de los dos coeficientes.

7. Presupuesto

El presente proyecto se basa en el estudio del método de los nudos ampliado, su aplicación a circuitos eléctricos y la realización de un programa de cálculo que facilita la resolución de circuitos. El desarrollo del programa puede estar demandado a petición de una empresa para poder disponer de una herramienta que ofrece una mayor seguridad en la obtención de resultados fiables, así como una reducción del tiempo de cálculo respecto a un método de resolución de forma manual. Se puede considerar como un trabajo hecho por parte de un autónomo quien quiere presentar su presupuesto.

En este apartado se realiza un análisis de los costes asociados al presente proyecto y se dividen en dos grupos: los costes asociados a los recursos humanos y los costes asociados a los recursos materiales.

7.1. Costes de los recursos humanos

Los costes asociados a los recursos humanos se calculan a través de la cantidad de horas invertidas por un ingeniero y el director del proyecto distribuidas en las distintas partes. En la tabla 7.1 se muestra concretamente los costes considerando el coste por hora del ingeniero es de 26 €/h y el coste del director de 50 €/h.

Tabla 7.1. Coste de los recursos humanos.

	Concepto	Dedicación (h)	Coste hora (€/h)	Subtotal (€)
Memoria y Anexo	Objetivos y alcance del proyecto	10	26	260
	Búsqueda y estudio de conceptos teóricos	50	26	1.300
	Programación códigos Matlab	180	26	4.680
	Comprobaciones y validaciones de los resultados	80	26	2.080
	Elaboración de la memoria del proyecto	150	26	3.900
	Proceso de impresión y encuadernación	1	26	26

Director Proyecto	Gestión y asesoramiento	30	50	1.500
TOTAL		501 h		13.746 €

El coste asociado a los recursos humanos equivale a 13.746 €.

7.2. Coste de los recursos materiales

Los costes asociados a los recursos materiales están formados por los bienes que se han utilizado para el desarrollo del proyecto. Todos ellos se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 7.2. Coste de los recursos materiales.

Concepto	Coste total (€)
Licencia "Matlab and Simulink Student Suite"	69
Microsoft Office 365 personal	69
Consumo eléctrico	12,52
Impresión y encuadernación	22
Material de oficina	16
Servicio de Internet	64
TOTAL	252,52 €

El coste asociado a los recursos materiales equivale a 252,52 €.

7.3. Costes totales

Finalmente se calculan los costes totales teniendo en cuenta los impuestos aplicables a la base.

Tabla 7.3. Costes totales del proyecto.

Concepto	Importe
Coste de los recursos humanos	13.746,00 €
Coste de los recursos materiales	252,52 €
Subtotal	13.998,52 €
IVA (21%)	2.939,69 €
TOTAL	16.938,21 €

El coste total del proyecto es de **16.938,21 €**.

Conclusiones

Una vez finalizado el trabajo de final de grado presentado en el presente documento, puedo afirmar que la realización de dicho proyecto me ha ayudado a recordar, familiarizar, estudiar y entender de una forma más profunda desde conceptos básicos hasta otros más complejos previamente estudiados en las asignaturas de Sistemas eléctricos (STE), Sistemas eléctricos de potencia (SEPEE) y Análisis de sistemas eléctricos de potencia (ASEPE). Como aportación adicional a los conocimientos adquiridos durante la realización de dichas asignaturas, he podido aprender nuevos conocimientos ampliando así el dominio sobre la resolución de circuitos eléctricos. En primer lugar y como base principal para la formulación del cálculo de la matriz Y_N , el método de las matrices de incidencia ha facilitado en gran medida su obtención. Posteriormente, con el estudio y la descripción del método de los nudos clásico, he asimilado y fundamentado con bases más sólidas conocimientos ya vistos durante las asignaturas cursadas. Finalmente, con el estudio y la descripción del método de los nudos ampliado, he adquirido nuevos conocimientos que me permiten poder afrontar y resolver una gama más amplia de circuitos eléctricos y de una forma más sencilla, siendo un temario fuera de los límites de las asignaturas cursadas.

El desarrollo de programas informáticos para la resolución de circuitos eléctricos ha sido una aportación extra y a la vez una demostración de aplicación de los conocimientos adquiridos. No solo ha supuesto el hecho de plasmar todos los nuevos conocimientos aprendidos, sino también un reto al que enfrentarme a la hora de crear códigos programados en *Matlab*. Estos códigos se han creado con la finalidad de que por sí solos calcularan los valores de tensiones, corrientes y potencias de los elementos de un circuito eléctrico a partir de los datos introducidos por el usuario, siendo un proceso automatizado y adaptable al número de datos de entrada de cualquier circuito. La utilización de estos códigos para la resolución de circuitos eléctricos puede afirmarse con garantías que permite la obtención de resultados correctos a través de un proceso de introducir los datos de entrada de forma sencilla. Todos los códigos desarrollados se presentan en los anexos del proyecto.

En último lugar, me gustaría comentar que el desarrollo del proyecto ha sido un proceso que me ha resultado gratificante tanto por el aprendizaje de los conocimientos referentes a los aspectos de ingeniería eléctrica, como por los resultados satisfactorios que he obtenido, y también por haber superado mis dudas y aprendido a desarrollar códigos y programas en *Matlab*, que siempre ha sido un ámbito en el que como estudiante no me he encontrado cómodo.

Como comentario final tengo que decir que he cumplido con los objetivos establecidos inicialmente, habiendo realizado las distintas fases del proyecto sin haber tenido problemas importantes, hecho que ha comportado que el desarrollo del proyecto fuera una buena experiencia.

Se intuyen por lo menos dos futuros trabajos finales de grado derivados del presente proyecto. El primero de ellos sería extender el método de los nudos ampliado a circuitos con elementos que quedaron fuera del alcance de este proyecto, tales como fuentes de corriente controladas por corriente, fuentes de tensión controladas por tensión, fuentes de tensión controladas por corriente, transformadores, etc. El segundo consistiría en desarrollar el método de las mallas ampliado y llevar a cabo su aplicación a circuitos eléctricos.

Bibliografía

- [1] “MathWorks - Creadores de MATLAB y Simulink - MATLAB y Simulink - MATLAB & Simulink.” [Online]. Available: https://es.mathworks.com/?s_tid=gn_logo. [Accessed: 1- Oct-2020].
- [2] J. A. García-Alzórriz Pardo, “Sistemas Eléctricos. Tema 2: Análisis de circuitos resistivos”, Asignatura Sistemas Eléctricos, EUETIB, DEE-UPC, 2014.
- [3] M. Salichs Vivancos, “Mètode dels nusos”, Asignatura Electrotecnia, ETSEIB, DEE-UPC, 1996.
- [4] C. R. Lindo Carrión, “Circuitos Eléctricos I. Capítulo III: Técnicas o Métodos de Análisis para Circuitos”, Asignatura Circuitos Eléctricos I.
- [5] M. A. Rodríguez Pozueta, “Resolución de circuitos de corriente alterna monofásica”, Colección: Electrotecnia para ingenieros no especialistas, DIEE-UC, 2010.
- [6] J. A. García-Alzórriz Pardo, “Sistemas Eléctricos. Tema 3: Régimen sinusoidal permanente. Sistemas monofásicos. Problemas”, Asignatura Sistemas Eléctricos, EUETIB, DEE-UPC, 2013.
- [7] J. Ramírez, “Circuitos Eléctricos I”, ULA, Mérida, Venezuela, 1991. [Online]. Available: https://www.eecis.udel.edu/~paredesj/docs/Guia_Circuitos_Electricos_Profesor_Jaime_Ramirez.pdf [Accessed: 2-Oct-2020]
- [8] M. Salichs Vivancos, “Extensión del método de los nudos para su aplicación a circuitos con fuentes puras”, Quaderns d'enginyeria, 1980, núm. 1, pp. 51-57.
- [9] M. A. García García, J. Mur Amada, N. El Halabi, I. Cristóbal Monreal, “Problemas de Fundamentos de Electrotecnia”, Colección: Textos Docentes (10), Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza, 2013.
- [10] C. Fernández Peris, M. A. Vicente Ripoll, “150 Problemas de Teoría de Circuitos. Exámenes Resueltos y Problemas Adicionales”, Universidad Miguel Hernández, Elche, Alicante. Editorial ECU. [Online]. Available: http://coolab.umh.es/circuitos/libro_150problemas.pdf [Accessed: 7-Nov-2020]
- [11] C. K. Alexander, M. N. O. Sadiku, “Fundamentos de circuitos eléctricos. Tercera edición”, McGraw-Hill Interamericana, México D.F., 2006.
- [12] X. Alabern, L. Humet, S. Iglesias, “Problemes de circuits elèctrics resolts i comentats”, Col·lecció: Tecno-Ciència (10), Estudis Universitaris de Vic, Eumo Editorial, 1992.

- [13] V. Barranco López, J. L. Olivares Olmedilla, T. Morales Leal, F. R. Lara Raya, M. Cañas Ramírez, D. Bullejos Martín, “Entorno Docente a través de Internet para asignaturas de Ingeniería Eléctrica. CirWeb”, Departamento de Electrotecnia y Electrónica, Universidad de Córdoba. [Online]. Available: http://www.uco.es/grupos/giie/cirweb/ejercicios/ej_tema_11/ej_tema_11_17.pdf
[Accessed: 9-Nov-2020]
- [14] “Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización”. [Online]. Available: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guia_huella_carbono_tcm30-479093.pdf
[Accessed: 12-Dic-2020]
- [15] “Factor de emisión de la energía eléctrica: el mix. Cambio climático.” [Online]. Available: https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors_demissio_associats_a_lenergia/.
[Accessed: 12-Dic-2020]

Anexo A. Programa Cálculo YN

A1. Plantilla_YN

Nudo salida	Nudo entrada	Z	
N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)

A2. Código para el cálculo de la matriz de admitancias de nudo (Y_N) a través del método de las matrices de incidencia mediante el uso de *Matlab*.

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\1.Programa C...\Calculo YN.m 1 of 2

```

1 function Calculo_YN
2 clear all
3 clc
4
5 disp(['Calculo YN'])
6
7 nomexcel=input('Escribe el nombre del fichero Excel que contiene las impedancias
del circuito:\n','s');
8 dades=xlsread(nomexcel);% N+ / N- / R / X
9
10
11 [a]=dades(:,1:2);% matriu rames orientades
12 [b]=dades(:,3);% matriu R
13 [c]=dades(:,4);%matriu X
14 Z=b+1*1i*c;
15 admitancia=1./Z; %Dades atmitancies
16 numnudos=max(max(a)); %num nudos del sistema
17
18 a1=size(a,1); %numero admitancies/num rames orientadas
19
20
21
22 %MATRIU INCIDENCIA
23 A=zeros(numnudos,a1);
24 for i=1:a1
25     ns=a(i,1); %ns nudo salida +
26     if ns>0
27         A(ns,i)=1;
28     end
29 end
30 end
31
32 for i=1:a1
33     nl=a(i,2); % nl nudo llegada -
34     if nl>0
35         A(nl,i)=-1;
36     end
37 end
38 A; %matriu incidència calculada
39
40
41 %%Càlcul YBUS
42 i=1;
43 resultat_YBUS=zeros(numnudos,numnudos);
44 while i<=a1
45     Y=admitancia(i);
46
47     Ak=A(:,i);
48     Akt=Ak';
49     Ybus=Y*(Ak*Akt);
50
51     resultat_YBUS=resultat_YBUS+Ybus;
52     i=i+1 ;
53
54 end

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\1.Programa C...\Calculo YN.m 2 of 2

```

55 ybus1=zeros(numnusus,numnusus*2);
56 resultat_YBUS;
57
58 h=1;
59 i=1;
60 k=1;
61
62 while k<=numnusus && h<= numnusus*2
63 yx=resultat_YBUS(i,k);
64 ybus1(i,h)=real(yx);
65 ybus1(i,h+1)=imag(yx);
66 i=i+1;
67     if i>numnusus
68         h=h+2;
69         k=k+1;
70         i=1;
71     end
72
73 end
74 ybus1;
75
76
77 [f]={'G(S)'} {'B(S)'};
78 [w]={'          Y'} {''};
79 repl=repmat(w,1,numnusus);
80 rep=repmat(f,1,numnusus);
81
82 formatSpec= 'Resul_%s.xlsx';
83 unitats={'YN (Siemens)'};
84 warning('off','MATLAB:xlswrite:AddSheet') %per evitar el warning al executar per
primer cop el programa
85 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),unitats,'Resultado YN','A1')
86 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),repl,'Resultado YN','A2')
87 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),rep,'Resultado YN','A3')
88 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),ybus1,'Resultado YN','A4')
89
90
91 fprintf('Consulta el fichero Excel de nombre Resul_%s para ver los resultados.\n',
nomexcel)
92 end

```


B2. Código de resolución de circuitos tipo 1 mediante el uso de *Matlab*.

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\2....\Calculo circuitos T1.m 1 of 6

```

1 function Calculo_circuitos_T1
2 clear all
3 clc
4
5 disp('Calculo circuitos tipo 1')
6
7 nomexcel=input('Escribe el nombre del fichero Excel que contiene los datos del
circuito:\n', 's');
8 dades=xlsread(nomexcel);% N+ / N- / R / X
9
10
11 [fontscorrent]=dades(:,6:10);%dades fonts de corrent N+ N- J
12 [fcorrent]=rmmissing(fontscorrent); % filtre per eliminar els elements buits de la
matriu
13 [modcorrent]=fcorrent(:,4);
14 [argcorrent]=fcorrent(:,5);
15 [correntcomplex]=modcorrent.*cosd(argcorrent)+1i.*modcorrent.*sind(argcorrent); %
Matriu de corrent amb modul i argument
16 [nusosicorrents]=[fcorrent(:,2:3) correntcomplex];
17 numfcorrent=size(fcorrent,1);
18 identfcor=fcorrent(:,1);
19
20 [~,t]=size(dades);
21 if t>10
22 [fontstensio]=dades(:,11:17); % Dades fonts de tensió N+ N- E R X
23 [ftensio]=rmmissing(fontstensio); % Filtre per eliminar els elements buits de la
matriu
24 [modtensio]=ftensio(:,4);
25 [argtensio]=ftensio(:,5);
26 [tensiocomplex]=modtensio.*cosd(argtensio)+1i.*modtensio.*sind(argtensio) ; %
Matriu de tensio amb modul i argument
27 [nusositensions]=[ftensio(:,2:3) tensiocomplex ftensio(:,6:7)];
28 numftensio=size(ftensio,1);
29
30 [ramesfontstensio]=ftensio(:,2:3);
31 [impfontstensio]=ftensio(:,6:7);
32 [impR]=impfontstensio(:,1);
33 [impX]=impfontstensio(:,2);
34
35 identftensio=ftensio(:,1);
36
37 else
38 [ramesfontstensio]=[];
39 [impR]=[];
40 [impX]=[];
41 numftensio=0;
42 identftensio=[];
43 end
44
45 [a0]=dades(:,2:3);
46 [a1]=rmmissing(a0); % matriu rames orientades amb filtre
47 [a]=[a1;ramesfontstensio]; % matriu rames orientades incorporant les de fonts
de tensio no pures
48
49 [b0]=dades(:,4);

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\2....\Calculo circuitos T1.m 2 of 6

```

50 [b1]=rmmissing(b0);           % matriu R amb filtre
51 [b]=[b1;impR];               % matriu rames orientades incorporant la R de les ✓
de fonts de tensio no pures
52 [c0]=dades(:,5);
53 [c1]=rmmissing(c0);         %matriu X
54 [c]=[c1;impX];             % matriu rames orientades incorporant les X de fonts de ✓
tensio no pures
55 Z=b+1i*c;
56 admitancia=1./Z; %Dades atmitancies
57 nnus=[a;dades(:,7:8)];
58 numnusus=max(max(nnus)); %num nusus del sistema
59
60 a2=size(a,1); %numero admitancies/num rames orientadas
61
62 %MATRIU INCIDENCIA
63 A=zeros(numnusus,a2);
64 for i=1:a2
65     ns=a(i,1); %ns nudo salida +
66     if ns>0
67         A(ns,i)=1;
68     end
69 end
70 end
71
72 for i=1:a2
73     nl=a(i,2); % nl nudo llegada -
74     if nl>0
75         A(nl,i)=-1;
76     end
77 end
78
79 A; % MATRIU INCIDÈNCIA calculada
80
81
82 %%%%%%%%% Càlcul YBUS
83 i=1;
84 resultat_YBUS=zeros(numnusus,numnusus);
85 while i<=a2
86     Y=admitancia(i);
87
88     Ak=A(:,i);
89     Akt=Ak';
90     Ybus=Y*(Ak*Akt);
91
92     resultat_YBUS=resultat_YBUS+Ybus;
93     i=i+1 ;
94
95 end
96
97 resultat_YBUS;
98
99
100
101 %%%%%%%%%CONSTRUCCIÓ VECTOR JN
102

```


C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\2....\Calculo circuitos T1.m 3 of 6

```

103 % part font de corrent
104 [Jn]=zeros(numnudos,1);
105
106 i=1;
107 while i<=numfcorrent
108     [Jn1]=zeros(numnudos,1);% matriu per fonts corrent
109     ns=fcorrent(i,2);%ns nudo salida +
110     if ns>0
111         Jn1(ns)=-correntcomplex(i) ;
112     end
113     nl=fcorrent(i,3); % nl nudo llegada -
114     if nl>0
115         Jn1(nl)=correntcomplex(i);
116     end
117     Jn=Jn1+Jn;
118     i=i+1;
119
120 end
121 Jn; %vector corrents nomes amb font de corrent
122
123 %part font model norton
124
125 %transformació fonts de tensió no pures en fonts de corrent no pures
126 i=1;
127 [Jn2]=zeros(numnudos,1);
128 while i<=numftensio
129     [Jn3]=zeros(numnudos,1);
130     Zth=nusositensions(i,4)+nusositensions(i,5)*1i;
131     Vth=nusositensions(i,3);
132     Inorton=Vth/Zth;
133
134     ns=ftensio(i,2);%ns nudo salida +
135     if ns>0
136         Jn3(ns)=Inorton ;
137     end
138     nl=ftensio(i,3); % nl nudo llegada -
139     if nl>0
140         Jn3(nl)=-Inorton;
141     end
142     i=i+1;
143     Jn2=Jn3+Jn2;
144 end
145 Jntotal=Jn2+Jn; %VECTOR CORRENTS INJECTATS ALS NUSOS
146
147
148 %CALCUL Vn=Yn^-1*Jn
149
150 Vn=inv(resultat_YBUS)*Jntotal; %Vector de potencials
151
152
153
154 %TENSIONS IMPEDANCIES
155 i=1;
156 [a3,~]=size(a1);
157 [Vimp]=zeros(a3,1);

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\2....\Calculo circuitos T1.m 4 of 6

```

158
159 while i<=a3 % num rames orientades
160     nl=a1(i,2);
161     if nl==0
162         V1=0;
163     else
164         V1=Vn(nl);
165     end
166
167     ns=a1(i,1);
168     if ns==0
169         Vs=0;
170     else
171         Vs=Vn(ns);
172     end
173
174     Vimp(i,1)=Vs-V1;
175     i=i+1;
176 end
177 Vimp;
178
179 %TENSIO FONTS DE CORRENT
180 i=1;
181 b1=fcorrent(:,2:3);
182 [a2,~]=size(b1);
183 Vfcor=zeros(a2,1);
184 while i<=a2
185     nl=b1(i,2);
186     if nl==0
187         V1=0;
188     else
189         V1=Vn(nl);
190     end
191
192     ns=b1(i,1);
193     if ns==0
194         Vs=0;
195     else
196         Vs=Vn(ns);
197     end
198
199     Vfcor(i,1)=Vs-V1;
200     i=i+1;
201 end
202 Vfcor;
203
204 %TENSIO FONTS DE TENSIO
205 i=1;
206 c1=ramesfontstensio;
207 [c0,~]=size(c1);
208 Vftensio=zeros(c0,1);
209 while i<=c0
210     nl=c1(i,2);
211     if nl==0
212         V1=0;

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\2....\Calculo circuitos T1.m 5 of 6

```

213         else
214             V1=Vn(n1);
215         end
216
217         ns=c1(i,1);
218         if ns==0
219             Vs=0;
220         else
221             Vs=Vn(ns);
222         end
223
224             Vftensio(i,1)=Vs-V1;
225         i=i+1;
226     end
227 Vftensio;
228
229 [tensions]=[Vimp;Vfcor;Vftensio];
230
231 %CORRENTS BRANQUES
232 %corrent impedancies
233 i=1;
234 [Iimp]=zeros(a3,1);
235 while i<=a3 % num rames orientades
236     Iimp(i,1)=Vimp(i,1)/Z(i,1);
237     i=i+1;
238 end
239 Iimp;
240
241 %corrent fonts corrent
242 i=1;
243 [Ifcorrent]=zeros(a2,1);
244 while i<=a2
245     Ifcorrent(i,1)=correntcomplex(i,1);
246     i=i+1;
247 end
248 Ifcorrent;
249
250 %Corrent fonts tensio no pures
251 [Iftensionp]=zeros(c0,1);
252 i=1;
253 while i<=c0
254     Iftensionp(i,1)=(Vftensio(i,1)/Z(a3+i,1))-(tensiocomplex(i,1)/Z(a3+i,1));
255     i=i+1;
256 end
257
258 [corrents]=[Iimp;Ifcorrent;Iftensionp];
259
260 %POTENCIES
261 [potcomplex]=tensions.*conj(corrents);
262
263 % EXCEL RESULTATS
264
265 formatSpec= 'Resul_%s.xlsx';
266 nusos=(1:numnusos)';
267 warning('off','MATLAB:xlswrite:AddSheet')

```



C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\2....\Calculo circuitos T1.m 6 of 6

```

268 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Nudo n°'},'Resultados','A3')
269 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),nusos,'Resultados','A4')
270
271
272
273 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Tensiones de nudo'},'Resultados','B2')
274 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Mod V (V)'},'Resultados','B3')
275 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Arg V (°)'},'Resultados','C3')
276 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),abs(Vn),'Resultados','B4')
277 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),angle(Vn)*180/pi,'Resultados','C4')
278
279
280
281
282 [nusos1]=[a1;b1;c1];
283 [identif]=[dades(:,1);identfcor;identftensio];
284 [identificador]=rmmissing(identif);
285 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Id.'},'Resultados','D2')
286 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),identificador,'Resultados','D4')
287 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'elemento'},'Resultados','D3')
288 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Nudos de rama'},'Resultados','E2')
289 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'N+'},'Resultados','E3')
290 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'N-'},'Resultados','F3')
291 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),nusos1,'Resultados','E4')
292
293
294
295 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Tensiones de rama'},'Resultados','G2')
296 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Mod U (V)'},'Resultados','G3')
297 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Arg U (°)'},'Resultados','H3')
298 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),abs(tensions),'Resultados','G4')
299 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),angle(tensions)*180/pi,'Resultados','H4')
300
301 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Corrientes de rama'},'Resultados','I2')
302 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Mod I (A)'},'Resultados','I3')
303 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Arg I (°)'},'Resultados','J3')
304 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),abs(corrents),'Resultados','I4')
305 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),angle(corrents)*180/pi,'Resultados','J4')
306
307 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Potencias consumidas de
rama'},'Resultados','K2')
308 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'P (W)'},'Resultados','K3')
309 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Q (VAr)'},'Resultados','L3')
310 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),real(potcomplex),'Resultados','K4')
311 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),imag(potcomplex),'Resultados','L4')
312
313 fprintf('Consulta el fitchero Excel de nombre Resul_%s para ver los resultados.
\n',nomexcel)
314
315
316 end

```

Anexo C. Programa circuitos tipo 2

C1. Plantilla datos circuitos tipo 2

Impedancias de dos terminales				
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	Z	
	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)

Fuentes de corriente				
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	J	
	N+	N-	Mod J (A)	Arg J (°)

Fuentes de tensión no puras						
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	E		Z	
	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (°)	R (Ohm)	X (Ohm)

Fuentes de corriente controladas por tensión					
Id. elemento	Nudo salida	Nudo entrada	Transconductancia	N+ tensión de control	N- tensión de control
	N+	N-	g(A/V)	N+	N-

C2. Código de resolución de circuitos tipo 2 mediante el uso de *Matlab*.

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\3...\Calculo_circuitos_T2.m 1 of 8

```

1 function Calculo_circuitos_T2
2 clear all
3 clc
4
5 disp('Calculo circuitos tipo 2')
6
7 nomexcel=input('Escribe el nombre del fichero Excel que contiene los datos del
circuito:\n','s');
8 dades=xlsread(nomexcel);% N+ / N- / R / X
9
10
11 [fontscorrent]=dades(:,6:10);%dades fonts de corrent N+ N- J
12 [fcorrent]=rmmissing(fontscorrent); % filtre per eliminar els elements buits de la
matriu
13 [modcorrent]=fcorrent(:,4);
14 [argcorrent]=fcorrent(:,5);
15 [correntcomplex]=modcorrent.*cosd(argcorrent)+1i.*modcorrent.*sind(argcorrent); %
Matriu de corrent amb modul i argument
16 [nusosicorrents]=[fcorrent(:,2:3) correntcomplex];
17 numfcorrent=size(fcorrent,1);
18 identfcor=fcorrent(:,1);
19
20 [~,t]=size(dades);
21
22 [fontstensio]=dades(:,11:17); % Dades fonts de tensió N+ N- E R X
23 [ftensio]=rmmissing(fontstensio); % Filtre per eliminar els elements buits de la
matriu
24 [modtensio]=ftensio(:,4);
25 [argtensio]=ftensio(:,5);
26 [tensiocomplex]=modtensio.*cosd(argtensio)+1i.*modtensio.*sind(argtensio) ; %
Matriu de tensio amb modul i argument
27 [nusositensions]=[ftensio(:,2:3) tensiocomplex ftensio(:,6:7)];
28 numftensio=size(ftensio,1);
29
30 [ramesfontstensio]=ftensio(:,2:3);
31 [impfontstensio]=ftensio(:,6:7);
32 [impR]=impfontstensio(:,1);
33 [impX]=impfontstensio(:,2);
34
35 identftensio=ftensio(:,1);
36
37
38 [a0]=dades(:,2:3);
39 [a1]=rmmissing(a0); % matriu rames orientades amb filtre
40 [a]=[a1;ramesfontstensio]; % matriu rames orientades incorporant les de fonts
de tensio no pures
41
42 [b0]=dades(:,4);
43 [b1]=rmmissing(b0); % matriu R amb filtre
44 [b]=[b1;impR]; % matriu rames orientades incorporant la R de les
de fonts de tensio no pures
45 [c0]=dades(:,5);
46 [c1]=rmmissing(c0); %matriu X
47 [c]=[c1;impX]; % matriu rames orientades incorporant les X de fonts de
tensio no pures

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\3....\Calculo_circuitos_T2.m 2 of 8

```

48 Z=b+1i*c;
49 admitancia=1./Z; %Dades atmitancies
50 nnus=[a;dades(:,7:8);dades(:,19:20)];
51 numnusus=max(max(nnus)); %num nusus del sistema
52
53
54 a2=size(a,1); % Num admitancies/num ramos orientadas
55
56 %MATRIU INCIDENCIA
57 A=zeros(numnusus,a2);
58 for i=1:a2
59     ns=a(i,1); % ns nudo salida +
60     if ns>0
61         A(ns,i)=1;
62     end
63 end
64 end
65
66 for i=1:a2
67     nl=a(i,2); % nl nudo llegada -
68     if nl>0
69         A(nl,i)=-1;
70     end
71 end
72
73 A; % MATRIU INCIDÈNCIA calculada
74
75
76 %%%%%%%%% Càlcul YBUS
77 i=1;
78 resultat_YBUS=zeros(numnusus,numnusus);
79 while i<=a2
80     Y=admitancia(i);
81
82     Ak=A(:,i);
83     Akt=Ak';
84     Ybus=Y*(Ak*Akt);
85
86     resultat_YBUS=resultat_YBUS+Ybus;
87     i=i+1 ;
88
89 end
90
91 resultat_YBUS;
92
93
94
95 %CONSTRUCCIÓ VECTOR JN
96
97
98 % part font de corrent
99 [Jn]=zeros(numnusus,1);
100
101 i=1;
102 while i<=numfcorrent

```


C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\3....\Calculo_circuitos_T2.m 3 of 8

```

103     [Jn1]=zeros(numnudos,1);% matriu per fonts corrent
104 ns=fcorrent(i,2);%ns nudo salida +
105     if ns>0
106         Jn1(ns)=-correntcomplex(i) ;
107     end
108 nl=fcorrent(i,3); % nl nudo llegada -
109     if nl>0
110         Jn1(nl)=correntcomplex(i);
111     end
112     Jn=Jn1+Jn;
113     i=i+1;
114
115 end
116 Jn; %vector corrents nomes amb font de corrent
117
118 %part font model norton
119
120 %transformació fonts de tensió no pures en fonts de corrent no pures
121 i=1;
122 [Jn2]=zeros(numnudos,1);
123 while i<=numftensio
124     [Jn3]=zeros(numnudos,1);
125     Zth=nusositensions(i,4)+nusositensions(i,5)*1i;
126     Vth=nusositensions(i,3);
127     Inorton=Vth/Zth;
128
129 ns=ftensio(i,2);%ns nudo salida +
130     if ns>0
131         Jn3(ns)=Inorton ;
132     end
133 nl=ftensio(i,3); % nl nudo llegada -
134     if nl>0
135         Jn3(nl)=-Inorton;
136     end
137     i=i+1;
138     Jn2=Jn3+Jn2;
139 end
140
141 %VECTOR DE CORRENT DE LA FONT DE CORRENT CONTROLADA PER TENSÍO
142 [fccpt1]=dades(:,19:23);
143 [fccpt]=rmmissing(fccpt1); %N+ N- transconductancia N+control N-control
144 identfccpt=dades(:,18);
145
146 [numfccpt,~]=size(fccpt);
147 [Yfccpt]=zeros(numnudos,numnudos);
148 [Yfccpt1]=zeros(numnudos,numnudos);
149 i=1;
150
151 while i<=numfccpt
152     nl=fccpt(i,2);
153     ns=fccpt(i,1);
154     nsc=fccpt(i,4);
155     nlc=fccpt(i,5);
156     if nl>0
157         if nsc>0

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\3....\Calculo circuitos T2.m 4 of 8

```

158     Yfccpt(nl, nsc)=-fccpt(i, 3);
159     end
160     if nlc>0
161     Yfccpt(nl, nlc)=fccpt(i, 3);
162     end
163 end
164 if ns>0
165     if nsc>0
166     Yfccpt(ns, nsc)=fccpt(i, 3);
167     end
168     if nlc>0
169     Yfccpt(ns, nlc)=-fccpt(i, 3);
170     end
171 end
172 i=i+1;
173 Yfccpt1=Yfccpt+Yfccpt1;
174 end
175 YBUS=resultat_YBUS+Yfccpt1;
176
177
178 Jntotal=Jn2+Jn; %VECTOR CORRENTS INJECTATS ALS NUSOS
179
180
181 %CALCUL Vn=Yn^-1*Jn
182
183 Vn=inv(YBUS)*Jntotal; % Vector de potencials
184
185
186
187 % TENSIONS IMPEDANCIES
188 i=1;
189 [a3, ~]=size(a1);
190 [Vimp]=zeros(a3, 1);
191
192 while i<=a3 % num rames orientades
193     nl=a1(i, 2);
194     if nl==0
195         V1=0;
196     else
197         V1=Vn(nl);
198     end
199
200     ns=a1(i, 1);
201     if ns==0
202         Vs=0;
203     else
204         Vs=Vn(ns);
205     end
206
207     Vimp(i, 1)=Vs-V1;
208     i=i+1;
209 end
210 Vimp;
211
212 %TENSIO FONTS DE CORRENT

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\3....\Calculo_circuitos_T2.m 5 of 8

```

213 i=1;
214 b1=fcorrent(:,2:3);
215 [a2,~]=size(b1);
216 Vfcor=zeros(a2,1);
217 while i<=a2
218     nl=b1(i,2);
219     if nl==0
220         V1=0;
221     else
222         V1=Vn(nl);
223     end
224
225     ns=b1(i,1);
226     if ns==0
227         Vs=0;
228     else
229         Vs=Vn(ns);
230     end
231
232     Vfcor(i,1)=Vs-V1;
233     i=i+1;
234 end
235 Vfcor;
236
237 %TENSIO FONTS DE TENSIO
238 i=1;
239 c1=ramesfontstensio;
240 [c0,~]=size(c1);
241 Vftensio=zeros(c0,1);
242 while i<=c0
243     nl=c1(i,2);
244     if nl==0
245         V1=0;
246     else
247         V1=Vn(nl);
248     end
249
250     ns=c1(i,1);
251     if ns==0
252         Vs=0;
253     else
254         Vs=Vn(ns);
255     end
256
257     Vftensio(i,1)=Vs-V1;
258     i=i+1;
259 end
260 Vftensio;
261
262 % TENSIO FONTS DE CORRENT CONTROLADES PER TENSIO
263 i=1;
264 t1=fccpt(:,1:2); % N+ N-
265
266 Vfccpt=zeros(numfccpt,1);
267 while i<=numfccpt

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\3....\Calculo circuitos T2.m 6 of 8

```

268     nl=t1(i,2);
269         if nl==0
270             V1=0;
271         else
272             V1=Vn(nl);
273         end
274
275     ns=t1(i,1);
276     if ns==0
277         Vs=0;
278     else
279         Vs=Vn(ns);
280     end
281
282     Vfccpt(i,1)=Vs-V1;
283     i=i+1;
284 end
285 Vfccpt; % Tensió branca font corrent controlada per tensió
286
287
288 [tensions]=[Vimp;Vfcor;Vftensio;Vfccpt]; % Matriu amb totes les tensions
289
290 %CORRENTS BRANQUES
291 %corrent impedancies
292 i=1;
293 [Iimp]=zeros(a3,1);
294 while i<=a3 % num rames orientades
295     Iimp(i,1)=Vimp(i,1)/Z(i,1);
296     i=i+1;
297 end
298 Iimp;
299
300 %corrent fonts corrent
301 i=1;
302 [Ifcorrent]=zeros(a2,1);
303 while i<=a2
304     Ifcorrent(i,1)=correntcomplex(i,1);
305     i=i+1;
306 end
307 Ifcorrent;
308
309 % Corrent fonts tensio no pures
310 [Iftensionp]=zeros(c0,1);
311 i=1;
312 while i<=c0
313     Iftensionp(i,1)=(Vftensio(i,1)/Z(a3+i,1))-(tensiocomplex(i,1)/Z(a3+i,1));
314     i=i+1;
315 end
316
317 % Corrent fonts corrent controlades per tensio
318 i=1;
319 [Ifccpt]=zeros(numfccpt,1);
320 while i<=numfccpt
321     ns=fccpt(i,4);
322     if ns==0

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\3....\Calculo_circuitos_T2.m 7 of 8

```

323     Vnns=0;
324     else
325         Vnns=Vn(ns);
326     end
327
328     nl=fccpt(i,5);
329     if nl==0
330         Vnnl=0;
331     else
332         Vnnl=Vn(nl);
333     end
334
335     Ifccpt(i,1)=fccpt(i,3)*(Vnns-Vnnl); %%%%%%% Corrent font de corrent
336     i=i+1;
337 end
338 Ifccpt;
339
340 [corrents]=[Iimp;Ifcorrent;Iftensionp;Ifccpt];
341
342 %POTÈNCIES
343
344 [potcomplex]=tensions.*conj(corrents);
345
346
347
348 % EXCEL RESULTATS
349
350 formatSpec= 'Resul_%s.xlsx';
351 nusos=(1:numnusos)';
352 warning('off','MATLAB:xlswrite:AddSheet')
353 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Nudo n°'},'Resultados','A3')
354 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),nusos,'Resultados','A4')
355
356
357 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Tensiones de nudo'},'Resultados','B2')
358 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Mod V (V)'},'Resultados','B3')
359 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Arg V (°)'},'Resultados','C3')
360 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),abs(Vn),'Resultados','B4')
361 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),angle(Vn)*180/pi,'Resultados','C4')
362
363
364 [nusos1]=[a1;b1;c1;t1];
365
366 [identif]=[dades(:,1);identfcor;identftensio;identfccpt];
367 [identificador]=rmmissing(identif);
368 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Id.'},'Resultados','D2')
369 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),identificador,'Resultados','D4')
370 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'elemento'},'Resultados','D3')
371 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Nudos de rama'},'Resultados','E2')
372 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'N+'},'Resultados','E3')
373 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'N-'},'Resultados','F3')
374 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),nusos1,'Resultados','E4')
375
376
377

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\3....\Calculo circuitos T2.m 8 of 8

```
378 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Tensiones de rama'},'Resultados','G2')
379 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Mod U (V)'},'Resultados','G3')
380 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Arg U (°)'},'Resultados','H3')
381 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),abs(tensions),'Resultados','G4')
382 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),angle(tensions)*180/pi,'Resultados','H4')
383
384 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Corrientes de rama'},'Resultados','I2')
385 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Mod I (A)'},'Resultados','I3')
386 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Arg I (°)'},'Resultados','J3')
387 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),abs(corrents),'Resultados','I4')
388 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),angle(corrents)*180/pi,'Resultados','J4')
389
390 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Potencias consumidas de
rama'},'Resultados','K2')
391 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'P (W)'},'Resultados','K3')
392 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Q (VAr)'},'Resultados','L3')
393 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),real(potcomplex),'Resultados','K4')
394 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),imag(potcomplex),'Resultados','L4')
395
396 fprintf('Consulta el fichero Excel de nombre Resul_%s para ver los resultados.
\n',nomexcel)
397
398
399 end
```

Anexo D. Programa circuitos tipo 3

D1. Plantilla datos circuitos tipo 3

Impedancias de dos terminales				
Id.	Nudo salida	Nudo entrada	Z	
elemento	N+	N-	R (Ohm)	X (Ohm)

Fuentes de corriente				
Id.	Nudo salida	Nudo entrada	J	
elemento	N+	N-	Mod J (A)	Arg J (º)

Fuentes de tensión no puras					
Id.	Nudo salida	Nudo entrada	E		Z
elemento	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (º)	R (Ohm) X (Ohm)

Fuentes de corriente controladas por tensión					
Id.	Nudo salida	Nudo entrada	Transconductancia	N+ tensión de control	N- tensión de control
elemento	N+	N-	g(A/V)	N+	N-

Fuentes de tensión puras				
Id.	Nudo salida	Nudo entrada	E	
elemento	N+	N-	Mod E (V)	Arg E (º)

Acoplamiento magnéticos								
X acoplamiento	Id.	Nudo salida	Nudo entrada	X bobina 1	Id.	Nudo salida	Nudo entrada	X bobina 2
Xm (Ohm)	Bobina 1	N+	N-	X1 (Ohm)	Bobina 2	N+	N-	X2(Ohm)

D2. Código de resolución de circuitos tipo 3 mediante el uso de *Matlab*.

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo_circuitos_T3.m 1 of 20

```

1 function Calculo_circuitos_T3
2 clear all
3 clc
4
5 disp('Calculo circuitos tipo 3')
6
7 nomexcel=input('Escribe el nombre del fichero Excel que contiene los datos del
circuito:\n','s');
8 dades=xlsread(nomexcel);% N+ / N- / R / X
9
10 [fontscorrent]=dades(:,6:10);%dades fonts de corrent N+ N- J
11 [fcorrent]=rmmissing(fontscorrent); % filtre per eliminar els elements buits de
la matriu
12 [modcorrent]=fcorrent(:,4);
13 [argcorrent]=fcorrent(:,5);
14 [correntcomplex]=modcorrent.*cosd(argcorrent)+1i.*modcorrent.*sind(argcorrent);
%Matriu de corrent amb modul i argument
15 [nusosicorrents]=[fcorrent(:,2:3) correntcomplex];
16 numfcorrent=size(fcorrent,1);
17 identfcor=fcorrent(:,1);
18
19 [~,t]=size(dades);
20
21 [fontstensio]=dades(:,11:17); % Dades fonts de tensió N+ N- E R X
22 [ftensio]=rmmissing(fontstensio); % Filtre per eliminar els elements buits de
la matriu
23 [modtensio]=ftensio(:,4);
24 [argtensio]=ftensio(:,5);
25 [tensiocomplex]=modtensio.*cosd(argtensio)+1i.*modtensio.*sind(argtensio) ;
Matriu de tensio amb modul i argument
26 [nusositensions]=[ftensio(:,2:3) tensiocomplex ftensio(:,6:7)];
27 numftensio=size(ftensio,1);
28
29 [ramesfontstensio]=ftensio(:,2:3);
30 [impfontstensio]=ftensio(:,6:7);
31 [impR]=impfontstensio(:,1);
32 [impX]=impfontstensio(:,2);
33
34 identftensio=ftensio(:,1);
35
36
37 afIcpt=dades(:,19:20);
38 if t<=28
39     aacop=[];
40 else
41     aacop=[dades(:,31:32);dades(:,35:36)];
42 end
43
44 afontpura=dades(:,25:26);
45
46
47 [A222]=[dades(:,2:3);dades(:,7:8);ramesfontstensio;afIcpt;afontpura;aacop];
48 A23=rmmissing(A222);
49 [a0]=dades(:,2:3);
50 [a1]=rmmissing(a0); % matriu rames orientades amb filtre

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo_circuitos_T3.m 2 of 20

```

51 [a]=[a1;ramesfontstensio];      % matriu rames orientades incorporant les de
fonts de tensio no pures
52 numnusus=max(max(A23));
53 [b0]=dades(:,4);
54 [b1]=rmmissing(b0);            % matriu R amb filtre
55 [b]=[b1;impR];                % matriu rames orientades incorporant la R de
les de fonts de tensio no pures
56 [c0]=dades(:,5);
57 [c1]=rmmissing(c0);           %matriu X
58 [c]=[c1;impX];                % matriu rames orientades incorporant les X de fonts de
tensio no pures
59 Z=b+li*c;
60 admitancia=1./Z; %Dades atmitancies
61
62
63
64 a2=size(a,1);                % Num admitancies/num rames orientadas
65
66 %MATRIU INCIDENCIA
67 A=zeros(numnusus,a2);
68 for i=1:a2
69     ns=a(i,1); % ns nudo salida +
70     if ns>0
71         A(ns,i)=1;
72
73     end
74 end
75
76 for i=1:a2
77     nl=a(i,2); % nl nudo llegada -
78     if nl>0
79         A(nl,i)=-1;
80     end
81 end
82
83 A; % MATRIU INCIDÈNCIA calculada
84
85
86 %%%%%%% Càlcul YBUS
87 i=1;
88 resultat_YBUS=zeros(numnusus,numnusus);
89 while i<=a2
90     Y=admitancia(i);
91
92     Ak=A(:,i);
93     Akt=Ak';
94     Ybus=Y+(Ak*Akt);
95
96     resultat_YBUS=resultat_YBUS+Ybus;
97     i=i+1 ;
98
99 end
100
101 resultat_YBUS;
102

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo circuitos T3.m 3 of 20

```

103
104
105 %CONSTRUCCIÓ VECTOR JN
106
107
108 % part font de corrent
109 [Jn]=zeros(numnudos,1);
110
111 i=1;
112 while i<=numfcorrent
113     [Jn1]=zeros(numnudos,1);% matriu per fonts corrent
114     ns=fcorrent(i,2);%ns nudo salida +
115     if ns>0
116         Jn1(ns)=-correntcomplex(i) ;
117     end
118     nl=fcorrent(i,3); % nl nudo llegada -
119     if nl>0
120         Jn1(nl)=correntcomplex(i);
121     end
122     Jn=Jn1+Jn;
123     i=i+1;
124
125 end
126 Jn; %vector corrents nomes amb font de corrent
127
128 %part font model norton
129
130 %transformació fonts de tensió no pures en fonts de corrent no pures
131 i=1;
132 [Jn2]=zeros(numnudos,1);
133 while i<=numftensio
134     [Jn3]=zeros(numnudos,1);
135     Zth=nusositensions(i,4)+nusositensions(i,5)*1i;
136     Vth=nusositensions(i,3);
137     Inorton=Vth/Zth;
138
139     ns=ftensio(i,2);%ns nudo salida +
140     if ns>0
141         Jn3(ns)=Inorton ;
142     end
143     nl=ftensio(i,3); % nl nudo llegada -
144     if nl>0
145         Jn3(nl)=-Inorton;
146     end
147     i=i+1;
148     Jn2=Jn3+Jn2;
149 end
150
151 %VECTOR DE CORRENT DE LA FONT DE CORRENT CONTROLADA PER TENSÍO
152 identfccpt=dades(:,18);
153 fccpt1=dades(:,19:23);
154 fccpt2=table(fccpt1);
155 fccpt3=rmmissing(fccpt2); %N+ N- transconductancia N+control N-control
156 fccpt=table2array(fccpt3);
157 [numfccpt,~]=size(fccpt);

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo circuitos T3.m	4 of 20
--	---------

```

158
159
160 [Yfccept]=zeros(numnusus,numnusus);
161 [Yfccept1]=zeros(numnusus,numnusus);
162 i=1;
163
164 while i<=numfccept
165     nl=fccept(i,2);
166     ns=fccept(i,1);
167     nsc=fccept(i,4);
168     nlc=fccept(i,5);
169     if nl>0
170         if nsc>0
171             Yfccept(nl,nsc)=-fccept(i,3);
172         end
173         if nlc>0
174             Yfccept(nl,nlc)=fccept(i,3);
175         end
176     end
177     if ns>0
178         if nsc>0
179             Yfccept(ns,nsc)=fccept(i,3);
180         end
181         if nlc>0
182             Yfccept(ns,nlc)=-fccept(i,3);
183         end
184     end
185     i=i+1;
186     Yfccept1=Yfccept+Yfccept1;
187 end
188 YBUS=resultat_YBUS+Yfccept1;
189
190
191
192 Jntotal=Jn2+Jn; %VECTOR CORRENTS INJECTATS ALS NUSOS
193
194
195 %%%%%%%%% IDENTIFICACIÓ DEL CAS (1,2,3) EN EL QUE ENS TROBEM
196
197 ftpures1=dades(:,25:28); %busqueda dades fonts de tensio pures
198 ftpures=rmmissing(ftpures1);
199 TF1=isempty(ftpures);
200 identftpures=dades(:,24);
201
202 if t>28
203     amag1=dades(:,29:37); %busqueda dades acoplaments magnetics
204     amag=rmmissing(amag1);
205     TF2=isempty(amag);
206 else
207     amag=[];
208     TF2=1;
209 end
210
211
212

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo circuitos T3.m 5 of 20

```

213 if TF1==0 && TF2==1          %***** CONDICIÓN CAS 1
214
215 % FONT TENSIÓ PURA
216 [modftpures]=ftpures(:,3);
217 [argftpures]=ftpures(:,4);
218 [ftpurescomplex]=modftpures.*cosd(argftpures)+1i.*modftpures.*sind(argftpures);
% Matriu de tensions fonts de tensio pures complexes
219 numftpures=size(ftpures,1);
220 [k1]=ftpures(:,1:2);
221 [Ag]=zeros(numnudos,numftpures);
222 i=1;
223 for i=1:numftpures
224     ns=ftpures(i,1); % ns nudo salida +
225     if ns>0
226         Ag(ns,i)=1;
227     end
228     i=i+1;
229 end
230
231 for i=1:numftpures
232     nl=ftpures(i,2); % nl nudo llegada -
233     if nl>0
234         Ag(nl,i)=-1;
235     end
236     i=i+1;
237 end
238 zer=zeros(numftpures); % Rellena de zeros el hueco que queda
239 K=[YBUS Ag;Ag.' zer];
240
241 L=[Jntotal;ftpurescomplex];
242
243
244
245 %CALCUL Vn=Yn^-1*Jn
246
247 VI=inv(K)*L; % Vector de potencials
248
249
250
251 % TENSIONS IMPEDANCIES
252 i=1;
253 [a3,~]=size(a1);
254 [Vimp]=zeros(a3,1);
255
256 while i<=a3          % num rames orientades
257     nl=a1(i,2);
258     if nl==0
259         V1=0;
260     else
261         V1=VI(nl);
262     end
263
264     ns=a1(i,1);
265     if ns==0
266         Vs=0;

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo_circuitos_T3.m	6 of 20
--	---------

```

267         else
268             Vs=VI(ns);
269         end
270
271             Vimp(i,1)=Vs-Vl;
272             i=i+1;
273     end
274     Vimp;
275
276 %TENSIO FONTS DE CORRENT
277 i=1;
278 b1=fcorrent(:,2:3);
279 [a2,~]=size(b1);
280 Vfcor=zeros(a2,1);
281 while i<=a2
282     nl=b1(i,2);
283     if nl==0
284         Vl=0;
285     else
286         Vl=VI(nl);
287     end
288
289     ns=b1(i,1);
290     if ns==0
291         Vs=0;
292     else
293         Vs=VI(ns);
294     end
295
296     Vfcor(i,1)=Vs-Vl;
297     i=i+1;
298 end
299 Vfcor;
300
301 %TENSIO FONTS DE TENSIO
302 i=1;
303 c1=ramesfontstensio;
304 [c0,~]=size(c1);
305 Vftensio=zeros(c0,1);
306 while i<=c0
307     nl=c1(i,2);
308     if nl==0
309         Vl=0;
310     else
311         Vl=VI(nl);
312     end
313
314     ns=c1(i,1);
315     if ns==0
316         Vs=0;
317     else
318         Vs=VI(ns);
319     end
320
321     Vftensio(i,1)=Vs-Vl;

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo circuitos T3.m 7 of 20

```

322     i=i+1;
323 end
324 Vftensio;
325
326 % TENSIO FONTS DE CORRENT CONTROLADES PER TENSIO
327 i=1;
328 t1=fccpt(:,1:2); % N+ N-
329
330 Vfccpt=zeros(numfccpt,1);
331 while i<=numfccpt
332     nl=t1(i,2);
333     if nl==0
334         V1=0;
335     else
336         V1=VI(nl);
337     end
338
339     ns=t1(i,1);
340     if ns==0
341         Vs=0;
342     else
343         Vs=VI(ns);
344     end
345
346     Vfccpt(i,1)=Vs-V1;
347     i=i+1;
348 end
349 Vfccpt; % Tensió branca font corrent controlada per tensió
350
351
352 [tensions]=[Vimp;Vfcor;Vftensio;Vfccpt;ftpurescomplex]; % Matriu amb totes les tensions
353
354 %CORRENTS BRANQUES
355 %corrent impedancies
356 i=1;
357 [Iimp]=zeros(a3,1);
358 while i<=a3 % num rames orientades
359     Iimp(i,1)=Vimp(i,1)/Z(i,1);
360     i=i+1;
361 end
362 Iimp;
363
364 %corrent fonts corrent
365 i=1;
366 [Ifcorrent]=zeros(a2,1);
367 while i<=a2
368     Ifcorrent(i,1)=correntcomplex(i,1);
369     i=i+1;
370 end
371 Ifcorrent;
372
373 % Corrent fonts tensio no pures
374 [Iftensionp]=zeros(c0,1);
375 i=1;

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo circuitos T3.m 8 of 20

```

376 while i<=c0
377     Iftensionp(i,1)=(Vftensio(i,1)/Z(a3+i,1))-(tensiocomplex(i,1)/Z(a3+i,1));
378     i=i+1;
379 end
380
381 % Corrent fonts corrent controlades per tensio
382 i=1;
383 [Ifccpt]=zeros(numfccpt,1);
384 while i<=numfccpt
385     ns=fccpt(i,4);
386     if ns==0
387         Vnns=0;
388     else
389         Vnns=VI(ns);
390     end
391
392     nl=fccpt(i,5);
393     if nl==0
394         Vnnl=0;
395     else
396         Vnnl=VI(nl);
397     end
398
399     Ifccpt(i,1)=fccpt(i,3)*(Vnns-Vnnl); % Corrent font de corrent
400     i=i+1;
401 end
402 Ifccpt;
403
404 %CORRENT FONT DE TENSIÓ PURA
405 [Ifftp]=VI(numnusus+1:numnusus+numftpures);
406
407 [corrents]=[Iimp;Ifcorrent;Iftensionp;Ifccpt;Ifftp];
408
409 %POTÈNCIES
410
411 [potcomplex]=tensions.*conj(corrents);
412
413 %%%
414 JJ=[];
415
416 end
417 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FINAL CONDICIÓN CAS 1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
418
419
420 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CONDICIÓN CAS 2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
421
422 if TF1==1 && TF2==0
423 % ACOPLAMENTOS
424 N1=[amag(:,3);amag(:,7)];
425 N2=[amag(:,4);amag(:,8)];
426 X=[amag(:,5);amag(:,9)];
427 IdB=[amag(:,2);amag(:,6)];
428 A1=table(N1,N2,X,IdB);
429 J=unique(A1,'stable');
430 J1=table2array(J);

```



```

431 JJ=J1(:,4);
432 [numbacop,~]=size(J);           %numero de bobines acoplades
433 [numacoplaments,~]=size(amag);
434 [k1]=J1(:,1:2);           %es per afegir els nusos al resultat del excel
435 [J2]=J1(:,3:4);
436
437
438 [Am]=zeros(numnusos,numbacop);
439
440 i=1;
441 for i=1:numbacop
442     ns=J1(i,1); % ns nudo salida x1+
443     if ns>0
444         Am(ns,i)=1;
445     end
446
447     nl=J1(i,2); % nl nudo llegada
448     if nl>0
449         Am(nl,i)=-1;
450     end
451     i=i+1;
452 end
453 Am; %INCIDENCIAS ACOPLAMENTS
454
455 Zm1=diag(J1(:,3)); %procés montar matriu Zm
456
457 i=1;
458 while i<=numacoplaments
459     x1=[amag(i,5),amag(i,2)];
460     x2=[amag(i,9),amag(i,6)];
461     xm1=amag(i,1);
462
463     j=1;
464     while j<=numbacop
465         if J2(j,)==x1
466             j;
467             break
468         else
469             j=j+1;
470         end
471     end
472     k=1;
473     while k<=numbacop
474         if J2(k,)==x2
475             k;
476             break
477         else
478             k=k+1;
479         end
480     end
481
482     Zm1(j,k)=xm1;
483     Zm1(k,j)=xm1;
484     i=i+1;
485 end

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo circuitos T3.m 10 of 20

```

486
487 Zm1;
488
489
490 [Zm]=-Zm1*1i;
491 K=[YBUS Am;Am.' Zm];
492
493 zer=zeros(numbacop,1);%vector de zeros per unir al Jn
494
495 L=[Jntotal;zer];
496
497 %CALCUL Vn=Yn^-1*Jn
498
499 VI=inv(K)*L; % Vector de potencials
500
501
502 % TENSIONS IMPEDANCIES
503 i=1;
504 [a3,~]=size(a1);
505 [Vimp]=zeros(a3,1);
506
507 while i<=a3           % num rames orientades
508     nl=a1(i,2);
509     if nl==0
510         Vl=0;
511     else
512         Vl=VI(nl);
513     end
514
515     ns=a1(i,1);
516     if ns==0
517         Vs=0;
518     else
519         Vs=VI(ns);
520     end
521
522     Vimp(i,1)=Vs-Vl;
523     i=i+1;
524 end
525 Vimp;
526
527 %TENSIO FONTS DE CORRENT
528 i=1;
529 b1=fcorrent(:,2:3);
530 [a2,~]=size(b1);
531 Vfcor=zeros(a2,1);
532 while i<=a2
533     nl=b1(i,2);
534     if nl==0
535         Vl=0;
536     else
537         Vl=VI(nl);
538     end
539
540     ns=b1(i,1);

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo circuitos T3.m 11 of 20

```

541     if ns==0
542         Vs=0;
543     else
544         Vs=VI(ns);
545     end
546
547         Vfcor(i,1)=Vs-Vl;
548     i=i+1;
549 end
550 Vfcor;
551
552 %TENSIO FONTS DE TENSIO no pura
553 i=1;
554 c1=ramesfontstensio;
555 [c0,~]=size(c1);
556 Vftensio=zeros(c0,1);
557 while i<=c0
558     nl=c1(i,2);
559     if nl==0
560         Vl=0;
561     else
562         Vl=VI(nl);
563     end
564
565     ns=c1(i,1);
566     if ns==0
567         Vs=0;
568     else
569         Vs=VI(ns);
570     end
571
572     Vftensio(i,1)=Vs-Vl;
573     i=i+1;
574 end
575 Vftensio;
576
577 % TENSIO FONTS DE CORRENT CONTROLADES PER TENSIO
578 i=1;
579 t1=fccpt(:,1:2); % N+ N-
580
581 Vfccpt=zeros(numfccpt,1);
582 while i<=numfccpt
583     nl=t1(i,2);
584     if nl==0
585         Vl=0;
586     else
587         Vl=VI(nl);
588     end
589
590     ns=t1(i,1);
591     if ns==0
592         Vs=0;
593     else
594         Vs=VI(ns);
595     end

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo circuitos T3.m	12 of 20
--	----------

```

596
597     Vfccpt(i,1)=Vs-Vl;
598     i=i+1;
599 end
600 Vfccpt; % Tensió branca font corrent controlada per tensió
601
602 % TENSIO BRANQUES QUE FORMEN ACOPLAMENTS
603 i=1;
604 [a3,~]=size(a1);
605 [Vacop]=zeros(numbacop,1);
606
607 while i<=numbacop
608     nl=J1(i,2);
609     if nl==0
610         Vl=0;
611     else
612         Vl=VI(nl);
613     end
614
615     ns=J1(i,1);
616     if ns==0
617         Vs=0;
618     else
619         Vs=VI(ns);
620     end
621
622     Vacop(i,1)=Vs-Vl;
623     i=i+1;
624 end
625 Vacop;
626
627 [tensions]=[Vimp;Vfcor;Vftensio;Vfccpt;Vacop]; % Matriu amb totes les tensions
628
629 %CORRENTS BRANQUES
630 %corrent impedancies
631 i=1;
632 [Iimp]=zeros(a3,1);
633 while i<=a3 % num rames orientades
634     Iimp(i,1)=Vimp(i,1)/Z(i,1);
635     i=i+1;
636 end
637 Iimp;
638
639 %corrent fonts corrent
640 i=1;
641 [Ifcorrent]=zeros(a2,1);
642 while i<=a2
643     Ifcorrent(i,1)=correntcomplex(i,1);
644     i=i+1;
645 end
646 Ifcorrent;
647
648 % Corrent fonts tensio no pures
649 [Iftensionp]=zeros(c0,1);
650 i=1;

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo circuitos T3.m 13 of 20

```

651 while i<=c0
652     Iftensionp(i,1)=(Vftensio(i,1)/Z(a3+i,1))- (tensiocomplex(i,1)/Z(a3+i,1));
653     i=i+1;
654 end
655
656 % Corrent fonts corrent controlades per tensio
657 i=1;
658 [Ifccpt]=zeros(numfccpt,1);
659 while i<=numfccpt
660     ns=fccpt(i,4);
661     if ns==0
662         Vnns=0;
663     else
664         Vnns=VI(ns);
665     end
666
667     nl=fccpt(i,5);
668     if nl==0
669         Vnnl=0;
670     else
671         Vnnl=VI(nl);
672     end
673
674     Ifccpt(i,1)=fccpt(i,3)*(Vnns-Vnnl); % Corrent font de corrent
675     i=i+1;
676 end
677 Ifccpt;
678
679 %CORRENT BRANQUES AMB ACOPLAMENTS MAGNÉTICS
680 [Iacop]=VI(numnusus+1:numnusus+numbacop);
681
682
683 [corrents]=[Iimp;Ifcorrent;Iftensionp;Ifccpt;Iacop];
684
685 %POTÈNCIES
686
687 [potcomplex]=tensions.*conj(corrents);
688
689
690 end %%%%%%%%% FINAL CONDICIÓN CAS 2
691
692 if TF1==0 && TF2==0 %%%%%%%%% CONDICIÓN CAS 3
693 % FONT TENSIÓ PURA
694 [modftpures]=ftpures(:,3);
695 [argftpures]=ftpures(:,4);
696 [ftpurescomplex]=modftpures.*cosd(argftpures)+1i.*modftpures.*sind(argftpures);
% Matriu de tensions fonts de tensio pures complexes
697 numftpures=size(ftpures,1);
698 [k11]=ftpures(:,1:2);
699 [Ag]=zeros(numnusus,numftpures);
700 i=1;
701 for i=1:numftpures
702     ns=ftpures(i,1); % ns nudo salida +
703     if ns>0
704         Ag(ns,i)=1;

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo_circuitos_T3.m 14 of 20

```

705     end
706     i=i+1;
707 end
708
709 for i=1:numftpures
710     nl=ftpures(i,2); % nl nudo llegada -
711     if nl>0
712         Ag(nl,i)=-1;
713     end
714     i=i+1;
715 end
716 Ag;
717
718 % ACOPLAMENTOS
719 N1=[amag(:,3);amag(:,7)];
720 N2=[amag(:,4);amag(:,8)];
721 X=[amag(:,5);amag(:,9)];
722 IdB=[amag(:,2);amag(:,6)];
723 A1=table(N1,N2,X,IdB);
724 J=unique(A1,'stable');
725 J1=table2array(J);
726 JJ=J1(:,4);
727 [numbacop,~]=size(J);           %numero de bobines acoplades
728 [numacoplaments,~]=size(amag);
729 [k12]=J1(:,1:2);           %es per afegir els nusos al resultat del excel
730 [J2]=J1(:,3:4);
731 [k1]=[k12;k11];
732
733 [Am]=zeros(numnusos,numbacop);
734
735 i=1;
736 for i=1:numbacop
737     ns=J1(i,1); % ns nudo salida x1+
738     if ns>0
739         Am(ns,i)=1;
740     end
741
742     nl=J1(i,2); % nl nudo llegada
743     if nl>0
744         Am(nl,i)=-1;
745     end
746     i=i+1;
747 end
748 Am;
749
750 Zm1=diag(J1(:,3)); %procés montar matriu Zm
751
752 i=1;
753 while i<=numacoplaments
754     x1=[amag(i,5),amag(i,2)];
755     x2=[amag(i,9),amag(i,6)];
756     xm1=amag(i,1);
757
758     j=1;
759     while j<=numbacop

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo circuitos T3.m 15 of 20

```

760     if J2(j,:) == x1
761         j;
762         break
763     else
764         j=j+1;
765     end
766 end
767 k=1;
768 while k<=numbaco
769     if J2(k,:) == x2
770         k;
771         break
772     else
773         k=k+1;
774     end
775 end
776
777 Zm1(j,k)=x1;
778 Zm1(k,j)=x1;
779 i=i+1;
780 end
781
782 Zm1;
783 [Zm]= -Zm1*1i;
784
785 [~,zAm]=size(Am);
786 [~,zAg]=size(Ag);
787 zer1=zeros(zAm,zAg);
788 zer2=zeros(zAg,zAm);
789 K=[YBUS Am Ag; Am.' Zm zer1; Ag.' zer1.' zer2];
790
791 zer=zeros(zAm,1);
792 L=[Jntotal;zer;ftpurescomplex]; %Vector JN amb acoplament i font de tensio pura
793
794
795
796
797 %CALCUL Vn=Yn^-1*Jn
798
799 VI=inv(K)*L; % Vector de potencials
800
801
802
803 % TENSIONS IMPEDANCIES
804 i=1;
805 [a3,~]=size(a1);
806 [Vimp]=zeros(a3,1);
807
808 while i<=a3 % num rames orientades
809     nl=a1(i,2);
810     if nl==0
811         V1=0;
812     else
813         V1=VI(nl);
814     end

```

```
C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo_circuitos_T3.m 16 of 20
```

```
815
816     ns=a1(i,1);
817     if ns==0
818         Vs=0;
819     else
820         Vs=VI(ns);
821     end
822
823     Vimp(i,1)=Vs-Vl;
824     i=i+1;
825 end
826 Vimp;
827
828 %TENSIO FONTS DE CORRENT
829 i=1;
830 b1=fcorrent(:,2:3);
831 [a2,~]=size(b1);
832 Vfcor=zeros(a2,1);
833 while i<=a2
834     nl=b1(i,2);
835     if nl==0
836         Vl=0;
837     else
838         Vl=VI(nl);
839     end
840
841     ns=b1(i,1);
842     if ns==0
843         Vs=0;
844     else
845         Vs=VI(ns);
846     end
847
848     Vfcor(i,1)=Vs-Vl;
849     i=i+1;
850 end
851 Vfcor;
852
853 %TENSIO FONTS DE TENSIO no pura
854 i=1;
855 c1=ramesfontstensio;
856 [c0,~]=size(c1);
857 Vftensio=zeros(c0,1);
858 while i<=c0
859     nl=c1(i,2);
860     if nl==0
861         Vl=0;
862     else
863         Vl=VI(nl);
864     end
865
866     ns=c1(i,1);
867     if ns==0
868         Vs=0;
869     else
```


C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo circuitos T3.m 17 of 20

```

870     Vs=VI(ns);
871     end
872
873     Vftensio(i,1)=Vs-Vl;
874     i=i+1;
875 end
876 Vftensio;
877
878 % TENSIO FONTS DE CORRENT CONTROLADES PER TENSIO
879 i=1;
880 t1=fccept(:,1:2); % N+ N-
881
882 Vfcept=zeros(numfccept,1);
883 while i<=numfccept
884     nl=t1(i,2);
885     if nl==0
886         Vl=0;
887     else
888         Vl=VI(nl);
889     end
890
891     ns=t1(i,1);
892     if ns==0
893         Vs=0;
894     else
895         Vs=VI(ns);
896     end
897
898     Vfcept(i,1)=Vs-Vl;
899     i=i+1;
900 end
901 Vfcept; % Tensió branca font corrent controlada per tensió
902
903 % TENSIO BRANQUES QUE FORMEN ACOPLAMENTS
904 i=1;
905 [a3,~]=size(a1);
906 [Vacop]=zeros(numbacop,1);
907
908 while i<=numbacop
909     nl=J1(i,2);
910     if nl==0
911         Vl=0;
912     else
913         Vl=VI(nl);
914     end
915
916     ns=J1(i,1);
917     if ns==0
918         Vs=0;
919     else
920         Vs=VI(ns);
921     end
922
923     Vacop(i,1)=Vs-Vl;
924     i=i+1;

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo circuitos T3.m 18 of 20

```

925 end
926 Vacop;
927
928
929 [tensions]=[Vimp;Vfcor;Vftensio;Vfccpt;Vacop;ftpurescomplex]; % Matriu amb totes
les tensions
930
931 %CORRENTS BRANQUES
932 %corrent impedancies
933 i=1;
934 [Iimp]=zeros(a3,1);
935 while i<=a3 % num rames orientades
936     Iimp(i,1)=Vimp(i,1)/Z(i,1);
937     i=i+1;
938 end
939 Iimp;
940
941 %corrent fonts corrent
942 i=1;
943 [Ifcorrent]=zeros(a2,1);
944 while i<=a2
945     Ifcorrent(i,1)=correntcomplex(i,1);
946     i=i+1;
947 end
948 Ifcorrent;
949
950 % Corrent fonts tensio no pures
951 [Iftensionp]=zeros(c0,1);
952 i=1;
953 while i<=c0
954     Iftensionp(i,1)=(Vftensio(i,1)/Z(a3+i,1))-(tensiocomplex(i,1)/Z(a3+i,1));
955     i=i+1;
956 end
957
958 % Corrent fonts corrent controlades per tensio
959 i=1;
960 [Ifccpt]=zeros(numfccpt,1);
961 while i<=numfccpt
962     ns=fccpt(i,4);
963     if ns==0
964         Vnns=0;
965     else
966         Vnns=VI(ns);
967     end
968
969     nl=fccpt(i,5);
970     if nl==0
971         Vnnl=0;
972     else
973         Vnnl=VI(nl);
974     end
975
976     Ifccpt(i,1)=fccpt(i,3)*(Vnns-Vnnl); % Corrent font de corrent
977     i=i+1;
978 end

```

C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo circuitos T3.m 19 of 20

```

979 Ifcct;
980
981 %CORRENT BRANQUES AMB ACOPLAMENTS MAGNÉTICS
982 [Iacop]=VI(numnusus+1:numnusus+numbacop);
983 Iacop;
984
985 %CORRENT FONT DE TENSIÓ PURA
986 filaIftp=numnusus+zAm;
987 [Iftp]=VI(filaIftp+1:filaIftp+zAg);
988 Iftp;
989
990
991 [corrents]=[Iimp;Ifcorrent;Iftensionp;Ifcct;Iacop;Iftp];
992
993 %POTÈNCIES
994
995 [potcomplex]=tensions.*conj(corrents);
996
997 end          %%%%%%%%% FINAL CONDICIÓN CAS 3
998
999
1000 % EXCEL RESULTATS
1001
1002 formatSpec= 'Resul_%s.xlsx';
1003 nusos=(1:numnusus)';
1004 warning('off','MATLAB:xlswrite:AddSheet')
1005 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Nudo n°'},'Resultados','A3')
1006 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),nusos,'Resultados','A4')
1007
1008 Vnus=VI(1:numnusus);
1009 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Tensiones de nudo'},'Resultados','B2')
1010 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Mod V (V)'},'Resultados','B3')
1011 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Arg V (°)'},'Resultados','C3')
1012 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),abs(Vnus),'Resultados','B4')
1013 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),angle(Vnus)*180/pi,'Resultados','C4')
1014
1015
1016 [nusos1]=[a1;b1;c1;t1;k1];
1017
1018
1019 [identif]=[dades(:,1);identfcor;identftensio;identfcct;JJ;identftpures];
1020 [identificador]=rmmissing(identif);
1021 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Id.'},'Resultados','D2')
1022 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),identificador,'Resultados','D4')
1023 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'elemento'},'Resultados','D3')
1024 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Nudos de rama'},'Resultados','E2')
1025 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'N+'},'Resultados','E3')
1026 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'N-'},'Resultados','F3')
1027 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),nusos1,'Resultados','E4')
1028
1029
1030
1031 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Tensiones de rama'},'Resultados','G2')
1032 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Mod U (V)'},'Resultados','G3')
1033 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Arg U (°)'},'Resultados','H3')

```

```
C:\Users\FERRAN\Desktop\TFG\...\Calculo_circuitos_T3.m 20 of 20
```

```
1034 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),abs(tensions),'Resultados','G4')
1035 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),angle(tensions)*180/pi,'Resultados','H4')
1036
1037 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Corrientes de rama'},'Resultados','I2')
1038 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Mod I (A)'},'Resultados','I3')
1039 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Arg I (°)'},'Resultados','J3')
1040 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),abs(corrents),'Resultados','I4')
1041 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),angle(corrents)*180/pi,'Resultados','J4')
1042
1043 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Potencias consumidas de
rama'},'Resultados','K2')
1044 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'P (W)'},'Resultados','K3')
1045 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),{'Q (VAr)'},'Resultados','L3')
1046 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),real(potcomplex),'Resultados','K4')
1047 xlswrite(sprintf(formatSpec,nomexcel),imag(potcomplex),'Resultados','L4')
1048
1049 fprintf('Consulta el fichero Excel de nombre Resul_%s para ver los resultados.
\n',nomexcel)
1050
1051
1052 end
```