



Vicerrectorado de Docencia  
Negociado de Espacio Europeo de Educación Superior  
Universidad de Salamanca

Asunto: Informe de ejecución del  
Proyecto Innovación Docente ID 11/218

Título: Diseño y programación de herramientas informáticas para la  
docencia de instalaciones basadas en redes ramificadas.

Financiación: 650.00 €

Coordinador: Norberto Redondo Melchor.

Resumen del informe: El grado de cumplimiento de los objetivos propuestos ha sido  
muy elevado.

Se ha diseñado una hoja de cálculo y un breve manual de  
instrucciones para permitir la verificación de secciones  
eléctricas, mediante cálculo fasorial, según los criterios de  
caída de tensión, de intensidad admisible y de eficiencia  
energética.

Los alumnos la han utilizado durante el curso 2011/2012 en  
las siguientes asignaturas:

- Instalaciones Eléctricas Especiales
- Tecnología Energética
- Proyectos Fin de Carrera
- Trabajos Fin de Grado

Su valoración ha sido muy positiva. Y al facilitar el cálculo el  
alumno ha podido fijar más la atención sobre las  
consecuencias de cada diseño, que era el propósito principal  
de este Proyecto de Innovación.

La hoja y el manual se ofrecen en la página web de las citadas  
asignaturas ([www.usal.es/electricidad](http://www.usal.es/electricidad) - > Asignaturas).

Adjunto informe.

Salamanca, 29 de junio de 2012

Prof. Dr. Norberto Redondo Melchor / Coordinador del Proyecto  
Tel: 667 365 675



# HERRAMIENTA DE CÁLCULO FASORIAL DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS RAMIFICADAS

## INFORME DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE INNOVACIÓN DOCENTE ID 11/218

I. GRADO DE CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS PROPUESTOS.....	3
II. CALENDARIO SEGUIDO .....	4
III. OPINIÓN PERSONAL DE LOS DOCENTES PARTICIPANTES EN EL PROYECTO.....	5
IV. CONCLUSIÓN.....	6



## I. GRADO DE CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS PROPUESTOS

### OBJETIVO ÚNICO:

El alumno de ingeniería industrial deberá adquirir la competencia de poder programarse sus propias herramientas informáticas para resolver las instalaciones más frecuentes en su vida profesional, que son las basadas en redes ramificadas. Lo que implica adquirir previamente la competencia de diseñar y calcular con precisión dichas redes ramificadas.

### MÉTODO ELEGIDO:

Creación de una hoja de cálculo abierta, modificable por los alumnos, con programación basada en fórmulas sencillas sobre celdas en tablas, cuya lógica y contenido es totalmente transparente.

Puesta a disposición de los alumnos de la citada hoja de cálculo, para su empleo en las clases.

Incorporación de la estrategia docente en los apuntes de las asignaturas del área relacionadas con instalaciones y redes.

Objetivos propuestos	Grado de cumplimiento
1. Elaboración de apuntes en PDF explicando los algoritmos de resolución por ordenador de redes ramificadas (eléctricas, de fluidos, energéticas).	Conseguido. Véanse los apuntes de Tecnología Eléctrica Descargar de <a href="http://www.usal.es/electricidad">www.usal.es/electricidad</a>
2. Elaboración de apuntes en PDF explicando la implementación de los algoritmos en hojas de cálculo habituales ( <i>data worksheet</i> ).	Conseguido. Véanse los apuntes de Tecnología Eléctrica Descargar de <a href="http://www.usal.es/electricidad">www.usal.es/electricidad</a> , en la página de cada asignatura.
3. Programar varias hojas de cálculo con los algoritmos de resolución de redes de diversos tipos.	Conseguido. Está colgada en <a href="http://www.usal.es/electricidad">www.usal.es/electricidad</a> , en la página de cada asignatura.
4. Elaborar las correspondientes guías de uso en PDF de las aplicaciones contenidas en las <i>data sheet</i> anteriores.	Conseguido. Ver manual de uso adjunto a este informe. Está colgado en <a href="http://www.usal.es/electricidad">www.usal.es/electricidad</a> , en la página de cada asignatura.



## II. CALENDARIO SEGUIDO

- Petición del material necesario: antes del 15 de junio de 2011.
- Tramitación económica de los gastos: antes del 30 de julio de 2011.
- Elaboración del material: estuvo listo a principios del segundo semestre del curso 2011/2012.
- Memoria de las actividades realizadas: antes del 30 de junio de 2012.



### III. OPINIÓN PERSONAL DE LOS DOCENTES PARTICIPANTES EN EL PROYECTO

El grado de cumplimiento de los objetivos planteados ha sido muy elevado.

El funcionamiento de la herramienta de cálculo es incluso mejor al esperado. Así, por ejemplo:

- Se han introducido más características que las inicialmente pensadas, como la obtención automática de datos, o la comparación con tablas del Reglamento para Baja tensión, o la determinación de parámetros accesorios de las redes (características de conducciones, estimación de coeficientes de simultaneidad, etc.)
- Se ha conseguido una potencia de cálculo muy alta, probada en un ejemplo de 1600 tramos de red sin problemas.

La acogida por parte del alumnado de esta nueva estrategia docente ha sido muy favorable. Aunque no disponemos de estadísticas concretas, sí hemos comprobado que los alumnos de Proyectos fin de carrera / Trabajos fin de grado, han dejado prácticamente todos de usar el software comercial DMElect (pirateado por ellos) y han pasado a utilizar nuestra herramienta de cálculo con iguales o mejores resultados.

El resultado docente ha sido muy satisfactorio. De momento contamos con el ensayo en la asignatura de Tecnología Energética (2º cuatrimestre de este curso pasado 2012), donde se ha podido trabajar de lleno la eficiencia energética al contar con la herramienta que descargaba al profesor de la tediosa tarea de resolver los ejercicios previamente: la hoja daba resultados inmediatos a cada cambio de parámetros, y las clases resultaron mucho más útiles. Algunos alumnos incorporaron incluso la hoja en los trabajos que se pidieron para la evaluación de la asignatura.



#### IV. CONCLUSIÓN

El resultado del Proyecto de innovación docente ha sido excelente.

La experiencia adquirida ha sido satisfactoria por todos los conceptos, tanto para profesores como para alumnos.

Esto nos estimula a plantear el siguiente paso, que será el de crear la herramienta para redes malladas (que son las alternativas a las ramificadas) y que será de aplicación en la nueva asignatura de grado "Sistemas eléctricos de potencia" que ya se oferta para el segundo cuatrimestre del curso que viene 2013/2014.

Béjar, 29 de junio de 2012

Dr. Ing. Norberto Redondo Melchor  
Coordinador del proyecto.

Se adjunta Manual de la Herramienta de cálculo.



# HERRAMIENTA DE CÁLCULO FASORIAL DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS RAMIFICADAS

Dr. Norberto Redondo Melchor  
Dr. Félix Redondo Quintela  
Dr. Roberto Carlos Redondo Melchor  
Profesores del área de ingeniería eléctrica

I.	FUNDAMENTO TEÓRICO.....	2
A.	Cálculo eléctrico .....	2
1.	Procedimiento de cálculo .....	2
2.	Aplicación del procedimiento y tablas .....	3
3.	Ejemplo de análisis.....	3
II.	HERRAMIENTA DE CÁLCULO.....	6
A.	Significado de los datos en las tablas de resultados.....	6
B.	Utilización de la hoja de cálculo .....	8
1.	Introducción de los datos de la red.....	8
2.	Nudos de derivación sin carga asociada.....	9



## I. FUNDAMENTO TEÓRICO

### A. *Cálculo eléctrico*

Para determinar la sección de los conductores se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Intensidad máxima admisible por el cable.
- Caída de tensión.
- Pérdidas por calentamiento de los conductores (eficiencia energética).

La sección se calculará partiendo de la potencia que se ha de transportar, hallando la intensidad correspondiente y eligiendo el cable adecuado de acuerdo con los valores de intensidades máximas reglamentarias, que no pueden diferir de los datos suministrados por los fabricantes.

#### 1. Procedimiento de cálculo

Hablando del esquema unifilar de la red ramificada, llamaremos *tramo* a cada segmento comprendido entre dos *nudos*. Un *nudo* es, bien una bifurcación, bien un punto de suministro. En el segundo caso le corresponde una o varias *cargas*. Cada tramo se designará por su nudo inicial y final, cuidando de que no haya dos nudos iguales, porque se construiría así una red cerrada sobre sí misma que no se puede resolver con el método que sigue.

Las redes ramificadas se diseñan calculando las intensidades  $\vec{I}_R, \vec{I}_S, \vec{I}_T, \vec{I}_N$  que circulan por las fases y el neutro en cada tramo  $i$ . Se obtendrán sumando las intensidades absorbidas de cada fase por todas las cargas aguas abajo, es decir, las situadas en el nudo final del tramo y en cualquiera de los nudos siguientes, yendo hacia los brazos de la red. Así, la intensidad de una fase en el tramo  $i$  será la suma fasorial de las intensidades absorbidas por las cargas a ella conectadas aguas abajo, cuyo valor eficaz se calcula a partir de su potencia y su factor de potencia. La intensidad del neutro en ese tramo es la suma fasorial de las tres intensidades de fase en dicho tramo, es decir,  $\vec{I}_R + \vec{I}_S + \vec{I}_T = \vec{I}_N$ . Este valor se tendrá en cuenta para elegir la sección de los conductores por los criterios de intensidad admisible y de calentamiento (criterio a veces llamado *económico*).

En adelante llamaremos caída de tensión en cada tramo a la diferencia entre el fasor de la tensión al inicio del tramo y el fasor de la tensión en su final. Esas tensiones pueden ser entre fases, o entre fase y neutro: para una instalación de tres hilos, la caída de tensión entre la fase R y la S para el tramo  $i$ , por ejemplo, vale  $\vec{e}_{RS_i} = \vec{Z}_R \vec{I}_R + \vec{Z}_S \vec{I}_S$ ; y en una



instalación de cuatro hilos, la caída de tensión entre la fase R y el neutro, por ejemplo, para el tramo  $i$  vale  $\vec{e}_{RN_i} = \vec{Z}_{R_i} \vec{I}_{R_i} + \vec{Z}_{N_i} \vec{I}_{N_i}$ . Generalmente la impedancia de cada tramo (por ejemplo,  $\vec{Z}_{R_i}$ ) puede aproximarse a una resistencia de valor  $\bar{R}_{R_i} = \rho_i \frac{L_i}{S_i}$  porque, con las longitudes manejadas aquí, los efectos capacitivos e inductivos representan poco frente a los resistivos, y el error es despreciable.

Las caídas de tensión en cada tramo deben acumularse, esta vez aguas abajo, para obtener la caída de tensión entre el principio y el punto más desfavorable de la red, que es el valor que hay que contrastar con los límites reglamentarios.

## 2. Aplicación del procedimiento y tablas

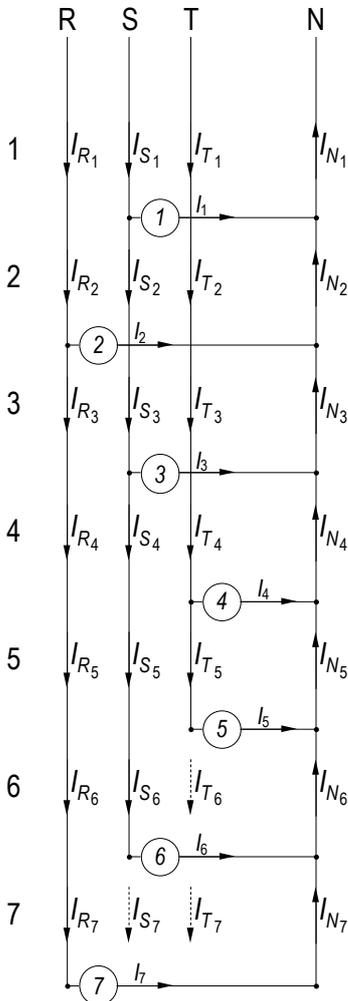
Como se ha visto, para resolver una red ramificada hay que acumular las intensidades aguas arriba, y las caídas de tensión hay que acumularlas aguas abajo, siguiendo en ambos casos las bifurcaciones que impone la red.

El procedimiento de cálculo descrito hasta aquí se lleva a cabo de la manera que se indica a continuación, por medio de una hoja de cálculo. Primero se explica la forma de actuar a partir de un ejemplo simplificado, y después se darán los detalles de los cálculos efectivamente realizados.

Es preciso observar que, para implementar estos cálculos en una hoja automática, es necesario emplear la función SUMAR.SI –o SUMASI, o sus variantes en cada idioma, dependiendo del programa–, que funcionará siempre que los tramos de la red hayan sido escrupulosamente identificados como se dijo más arriba. Las funciones SUMAR.SI o equivalentes están disponibles en las hojas de cálculo habituales en ofimática al menos desde el año 1998.

## 3. Ejemplo de análisis

El cálculo de las intensidades de cada tramo en el esquema siguiente, que es una suma fasorial en la que hay que ir acumulando valores aguas abajo, se obtiene muy fácilmente si se va de abajo a arriba. Así se ha construido la tabla que lo acompaña:

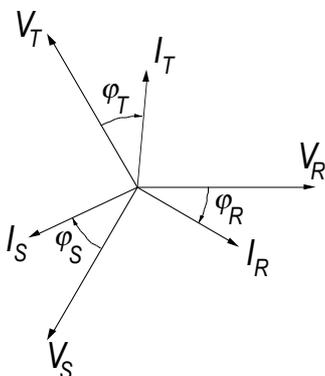


Red de cuatro hilos.  
 Las intensidades son fasores.

Tramo	$\vec{I}_R$	$\vec{I}_S$	$\vec{I}_T$
1	$\vec{I}_2 + \vec{I}_7$	$\vec{I}_1 + \vec{I}_3 + \vec{I}_6$	$\vec{I}_4 + \vec{I}_5$
2	$\vec{I}_2 + \vec{I}_7$	$\vec{I}_3 + \vec{I}_6$	$\vec{I}_4 + \vec{I}_5$
3	$\vec{I}_7$	$\vec{I}_3 + \vec{I}_6$	$\vec{I}_4 + \vec{I}_5$
4	$\vec{I}_7$	$\vec{I}_6$	$\vec{I}_4 + \vec{I}_5$
5	$\vec{I}_7$	$\vec{I}_6$	$\vec{I}_5$
6	$\vec{I}_7$	$\vec{I}_6$	0
7	$\vec{I}_7$	0	0

De la tabla se obtiene inmediatamente cualquier intensidad de tramo, pues por ejemplo  $\vec{I}_{S_3} = \vec{I}_3 + \vec{I}_6$  (en la fila del tramo 3, columna S), etc. Pero la tabla sirve para ilustrar la ley o fórmula recurrente que da la manera de calcular cualquier intensidad de tramo: es la intensidad de la carga conectada en su final, si la hay, más la calculada para el tramo anterior.

La suma de las intensidades ha de ser fasorial. Nosotros hemos empleado el sistema de la figura adjunta, con la tensión simple  $\vec{V}_R$  como origen de fases. Se escribirán, según él, cada intensidad de cada fase, bien sea de una carga, bien de un tramo, y ya están listas para sumar. La expresión general correspondiente a cada fase es:



Sistema fasorial adoptado con la tensión entre R y N al inicio como origen de fases

$$\vec{I}_R = I_R \angle -\varphi_R = I_R \cos(-\varphi_R) + j I_R \sin(-\varphi_R)$$

$$\vec{I}_S = I_S \angle -120^\circ - \varphi_S = I_S \cos(-120^\circ - \varphi_S) + j I_S \sin(-120^\circ - \varphi_S)$$

$$\vec{I}_T = I_T \angle 120^\circ - \varphi_T = I_T \cos(120^\circ - \varphi_T) + j I_T \sin(120^\circ - \varphi_T)$$

Por cierto que, como ya se vio, la intensidad en el neutro en cada tramo es simplemente:

$$\vec{I}_{N_i} = \vec{I}_{R_i} + \vec{I}_{S_i} + \vec{I}_{T_i}$$

Las caídas de tensión en cada tramo se obtienen ahora de:



$$\vec{e}_{RN_i} = \vec{Z}_{R_i} \vec{I}_{R_i} + \vec{Z}_{N_i} \vec{I}_{N_i}$$

$$\vec{e}_{SN_i} = \vec{Z}_{S_i} \vec{I}_{S_i} + \vec{Z}_{N_i} \vec{I}_{N_i}$$

$$\vec{e}_{TN_i} = \vec{Z}_{T_i} \vec{I}_{T_i} + \vec{Z}_{N_i} \vec{I}_{N_i}$$

Y lo que procede es ir las restando siguiendo la red  
aguas abajo, que es lo que se ha hecho en la hoja  
de cálculo que se incluye y cuyo aspecto se muestra  
en el apartado siguiente.





- FIN Nudo final del tramo.
- P\_NOM Potencia nominal asignada a la carga conectada en el nudo FIN del tramo, si existe, en kW.
- COS\_FI Factor de potencia de la carga conectada en FIN, si existe.
- FC Factor corrector de la intensidad máxima absorbida por la carga, si existe. En este caso se utiliza para introducir el coeficiente de simultaneidad derivado de la aplicación de la ITC-BT 10 al número de suministros alimentado por cada línea.
- (A) mín Calibre mínimo de la protección normalizada que debería asociarse a la carga conectada en FIN, si existe.
- LONG Longitud del tramo INI-FIN, en m.
- FASE Fase o fases a la que se conecta la carga situada en FIN, valores R, S, T para cargas monofásicas, o RST para cargas trifásicas equilibradas.
- Config. Configuración del cableado a efectos de cálculo de la intensidad máxima admisible, según las diferentes tablas del RBT (ITC-BT 19, ITC-BT 07, etc.).
- C.corr. Coeficiente corrector de la intensidad máxima admisible. Usualmente 0'80 para cables subterráneos entubados.
- Cu/Al Conductividad del material: 35 para aluminio, 56 para cobre, en MSiemens/m.
- SECC Sección del conductor de fase, en mm<sup>2</sup>.
- IRBT Intensidad máxima admisible por el conductor, considerando los coeficientes anteriores, en A.
- %seg Porcentaje excedente de intensidad admisible, obtenido de la comparación de la máxima intensidad realmente transportada IMax(A) y la máxima admisible IRBT, en %.
- e\_V Máxima caída de tensión simple entre el origen de la instalación y el nudo FIN, en V.
- e\_% Porcentaje que representa la anterior e\_V respecto de la tensión simple del origen de la instalación, en V.

Intensidades en cada tramo					Resist. tramo	Tensión en cada nudo FIN								
Fase R	Fase S	Fase T	Neutro	Imax		Fase R + N	Fase S + N	Fase T + N	Valores eficaces					
R_RER	IMS	RES	IMT	RET	IMN	REN	IM	(A)	L/KS	ac_R_Reac_R	Imac_S_Reac_S	Imac_T_Reac_T	Ime_V_Re_V	Se_V_T

Intensidades en cada tramo:

- Fase R Valores reales e imaginarios del fasor de la intensidad que circula en el tramo INI-FIN por la fase R, en A.
- Fase S, T Idem, para las fases S y T, en A.
- Neutro Idem, para el conductor neutro, en A.
- Imax (A) Valor eficaz de la máxima intensidad que circula por alguna de las fases o el neutro en el tramo INI-FIN, en A.
- Resist. L/KS Impedancia del tramo INI-FIN, asimilada a una resistencia de valor proporcional a LONG e inversamente proporcional a la conductividad (Cu/Al) y a SECC, en  $\Omega$ .

Tensión en cada nudo FIN:

- Fase R+N Cálculo fasorial de la parte real e imaginaria de la caída de tensión debida a la impedancia y la intensidad de la fase R y el conductor neutro en el tramo INI-FIN, en V.
- Fase S+N Idem, para la fase S y el neutro, en V.
- Fase T+N Idem, para la fase T y el neutro, en V.

Valores eficaces:

- e\_V\_R Valor eficaz de la tensión simple en el nudo FIN, medida entre la fase R y el neutro, en V.
- e\_V\_S Idem para la fase S y el neutro, en V.
- e\_V\_T Idem para la fase T y el neutro, en V.



## B. Utilización de la hoja de cálculo

### 1. Introducción de los datos de la red

- Los tramos de la red se identifican con los nombres de sus nudos inicial (columna INI) y final (columna FIN), teniendo en cuenta que:
  - o Los nombres deben ser únicos para cada nudo de la red, y no es conveniente repetir nombres que se refieran a nudos distintos.
  - o Es preciso ser absolutamente escrupuloso con la introducción de los nombres, pues un espacio en blanco, o una mayúscula en lugar de minúscula, determinan un nombre diferente y la red no quedará bien definida.
  - o Los nombres pueden ser cualquier cadena de texto y números.
  - o No es necesario introducir los tramos en un orden determinado, pero es conveniente para luego localizar cada uno y optimizar los resultados.
  
- La red debe ser ramificada, nunca mallada:
  - o Por tanto, nunca deben definirse dos caminos para llegar al mismo nudo FIN.
  - o La red debe partir de un único origen, que se situará en la fila 15.
  - o La red debe tener un único tramo de origen (un "tronco de árbol" bien definido). Por ello el nudo de origen (INI celda B15) no admite derivación, y el nombre que se le asigne no puede volver a aparecer en toda la hoja.
  
- Se asignarán valores en las celdas no coloreadas. Las celdas con fondo de color son fórmulas que no deben ser alteradas.
  
- Hay indicaciones para los datos que deben introducirse en cada columna, que aparecen automáticamente al dejar reposar el puntero del ratón sobre la celda de encabezamiento.





la red.

- Potencias activa, reactiva y aparente que transitan por cada tramo, en kW, kVAr y kVA respectivamente.
- Potencia perdida por calentamiento de los conductores en cada tramo, en kW.

#### 4. Optimización

Esta hoja ha sido diseñada como herramienta para la docencia. Por ello la optimización debe ser efectuada por el alumno, que verá instantáneamente cómo se modifican los resultados de sus cálculos tras cada cambio de parámetros que introduzca.

No importa la cantidad de tramos que se calculen. La hoja se ha probado satisfactoriamente con 1600 tramos y funcionó bien en un ordenador de prestaciones medias como el que suele utilizar cualquier alumno.