Proyecto Final de Carrera

Ingeniería Industrial

DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DISEÑO Y ESTUDIO DEL CIRCUITO STEINMETZ

Anexo D: Utilización del Programa

Autor: Eduardo CARO HUERTAS
Director: Luis SAINZ SAPERA

Convocatoria: Mayo 2007 (plan 94)

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL DE BARCELONA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

SUMARIO

SUMARIO **3**

D UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA **4**

D.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA. 4

D.2 UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA. 5

D.3 DISEÑO Y ESTUDIO 6

D.3.1 Diseño del circuito. *6*

D.3.2 Análisis de sensibilidad. *9*

D.3.3 Estudio del error. *10*

D.3.4 Barra superior de menú *14*

D.4 RESPUESTA FRECUENCIAL 18

D.4.1 Respuesta frecuencial observado desde la red *18*

D.4.2 Respuesta frecuencial observado desde la carga no lineal. *27*

D.4.3 Barra superior de menú *36*

D.5 HERRAMIENTAS ADICIONALES 40

D.6 REFERENCIAS DEL ANEXO D. 40

D UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA

D.1 Requerimientos del sistema.

Los requerimientos que debe tener el equipo en el que vaya a ser utilizado el programa son:

- Procesador Pentium II®, Pentium III®, Pentium IV®, Pentium CoreDuo® o AMD®.
- Sistema operativo Microsoft® Windows 98®, Windows 2000®, Windows XP® o Windows Vista®
- Unidad lectora de CD-ROM.
- Mínimo de 256 MB de RAM; aunque es muy recomendable 512 MB.
- Espacio libre en disco mínimo de 200 MB. (150 MB para la instalación mínima del software requerido).
- Tarjeta gráfica de 8 bits (recomendable resolución de pantalla de 1024 x 768 píxeles y configuración de fuentes pequeñas).
- MATLAB 7® (o superior). No requiere *toolboxes* adicionales.

D.2 Utilización del programa.

Para ejecutar la aplicación, el ordenador ha de tener instalado el paquete Matlab® 7 (o versión superior), sin necesidad de la instalación previa de paquetes adicionales (*toolboxes*). Una vez abierto este programa, hemos de seleccionar, como directorio de trabajo (*Current Directory*), la carpeta 'Steinmetz'. Seguidamente, ejecutar la aplicación tecleando *Steinmetz* en la ventana de comandos (*Command Window*).

Tras una breve animación inicial, el programa muestra la ventana principal (ver Figura D.1), donde el usuario ha de escoger una de las dos aplicaciones: diseño y estudio del circuito Steinmetz, o estudio de la respuesta frecuencial.

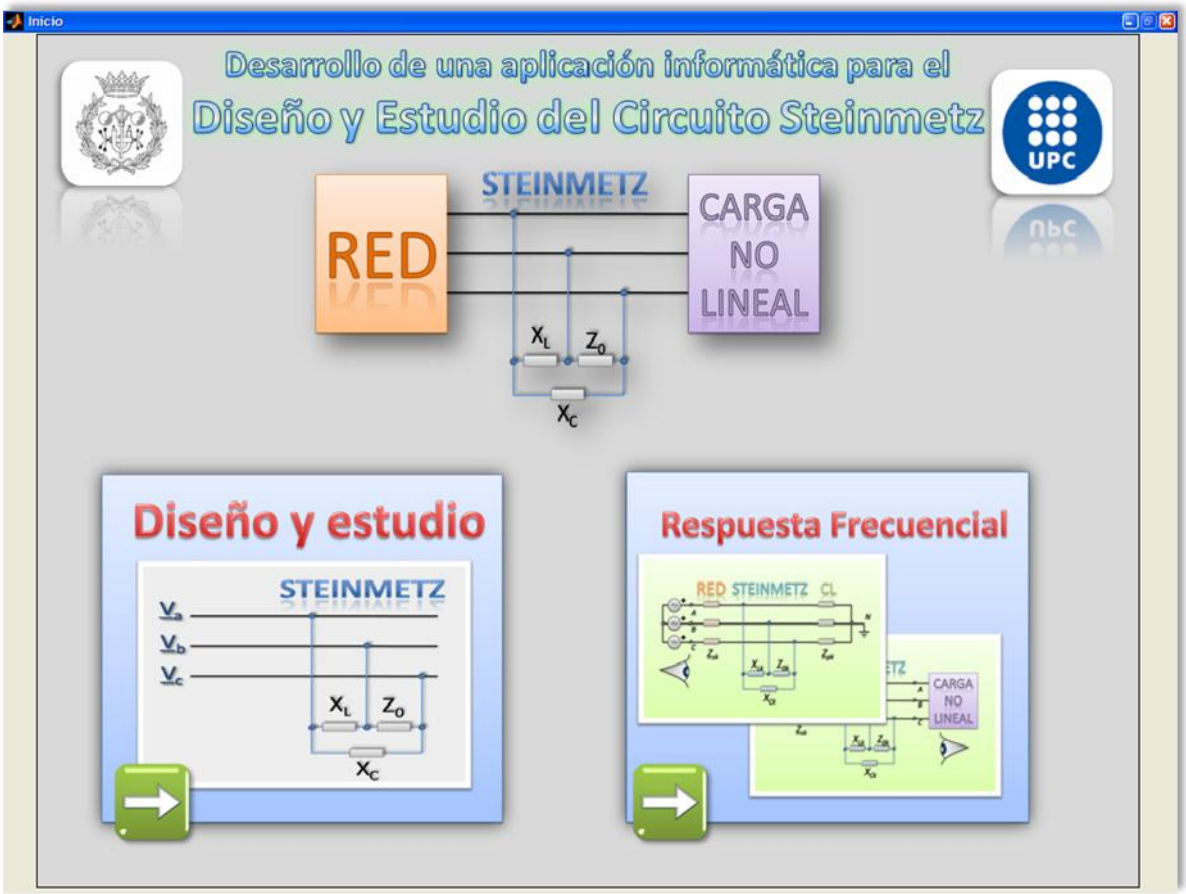

Figura D.1. Pantalla principal

A continuación se comentará con detalle el modo de utilización de cada una de estas dos partes.

D.3 Diseño y estudio

Se accede mediante el formulario principal, Figura D.1, clicando sobre el icono “Diseño y Estudio”. Seguidamente, tras una breve animación inicial, se muestra el menú inicial de esta parte del programa, mostrado en Figura D.2. Se ha de seleccionar, seguidamente, una de las dos opciones para el estudio:

- **Diseño del circuito**: Mediante esta pestaña, el usuario podrá diseñar el circuito Steinmetz para tensiones equilibradas o desequilibradas, y realizar análisis de sensibilidad para las diferentes variables del sistema.
- **Cálculo del error**: Mediante esta pestaña, el usuario podrá realizar el estudio de los errores cometidos al realizar la suposición de tensiones equilibradas.

Figura D.2. Menú inicial del Diseño y Estudio.

En los siguientes sub-apartados se comentará, con más detalle, cada uno de estos modos de funcionamiento.

D.3.1 Diseño del circuito.

Una vez seleccionado el botón “Diseño y Estudio” del menú principal se obtiene por pantalla la Figura D.2, clicando sobre “Diseño del Circuito” se muestra la Figura D.3, donde aparecen los paneles de parámetros que se comentan a continuación:

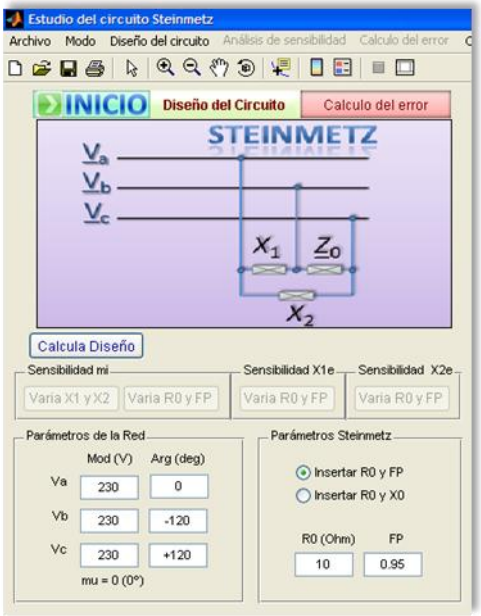

Figura D.3. Diseño del circuito Steinmetz: introducción de parámetros.

- **Parámetros de la Red**: Este panel define la tensión a la que se conecta el circuito Steinmetz. Se requieren seis parámetros: tres de ellos definen los módulos de las tensiones simples de cada una de las fases; los tres restantes definen el ángulo (en grados) de cada una de estas tensiones. Cada vez que se edita uno de estos campos, en la parte inferior de este mismo panel se actualiza el valor del coeficiente de desequilibrio de tensiones, m_u.
- **Parámetros Steinmetz**: Este panel define la carga monofásica conectada en estrella con las reactancias simetrizadoras que, en conjunto, definen el circuito Steinmetz. Los parámetros que definen esta carga son dos, los cuales son escogidos previamente por el usuario mediante los botones de selección (*radiobutton*): o bien R_0 y λ (en el programa se marca como *FP*) o bien R_0 y X_0. De cara a los estudios posteriores, es indiferente cuál de los dos modos se ha utilizado.

Una vez se han introducido los parámetros pertinentes, se presiona “Calcula Diseño”, y aparece la Figura D.4.

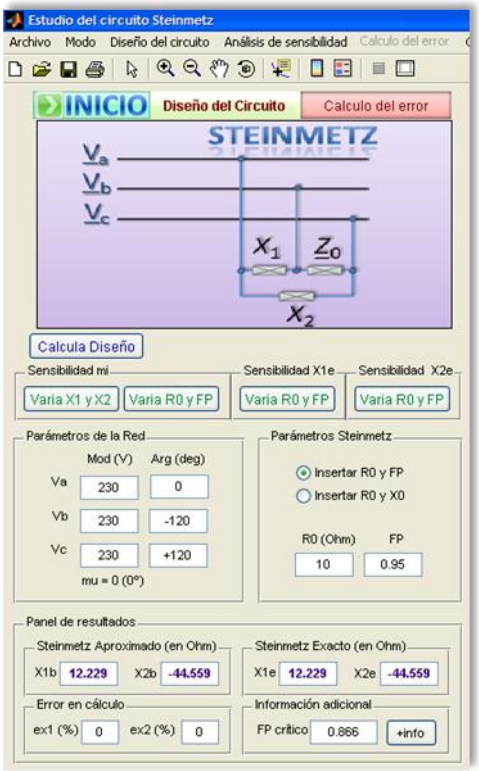

Figura D.4. Diseño del Circuito Steinmetz: panel de resultados.

Se observa que se han habilitado todos los botones del estudio de sensibilidad, y ha aparecido el panel de resultados, que se detalla a continuación:

- En la mitad superior izquierda se muestran los valores de las reactancias simetrizadoras por el procedimiento aproximado, X_{1b} y X_{2b}, es decir, suponiendo tensiones equilibradas (aunque en realidad no lo sean). Se observa que si el valor de X_{2b} es negativo, esta reactancia se trata de un condensador.
- En la mitad superior derecha se muestran los valores de las reactancias simetrizadoras calculadas teniendo en cuenta el desequilibrio de las tensiones, es decir, se calcula X_{1e} y X_{2e}. Se observa de nuevo que si el valor de X_{2e} es negativo, esta reactancia se trata de un condensador.
- En la mitad inferior izquierda se muestran los errores en el cálculo de las reactancias simetrizadoras al suponer tensiones equilibradas. En el ejemplo que se muestra en la Figura D.4 estos errores son nulos, ya que las tensiones introducidas son equilibradas.
- En la mitad inferior derecha se muestra el valor de $\lambda_{crítico}$, es decir, el valor límite de λ para el cual:
    - $\lambda > \lambda_{crítico}$ ⇨ La segunda reactancia simetrizadora es un condensador.
    - $\lambda < \lambda_{crítico}$ ⇨ La segunda reactancia simetrizadora es una bobina.
    - $\lambda = \lambda_{crítico}$ ⇨ No es necesario utilizar una segunda reactancia simetrizadora.

  En este mismo sub-panel aparece un botón etiquetado "+ info", el cual, al ser pulsado, muestra la gráfica que se muestra en la Figura D.5. En ella se muestran los valores que

toma la segunda reactancia simetrizadora frente a los factores de potencia de la carga monofásica. Se observa una asíntota vertical en cuando λ toma el valor $\lambda_{crítico}$. También se señala el punto actual.

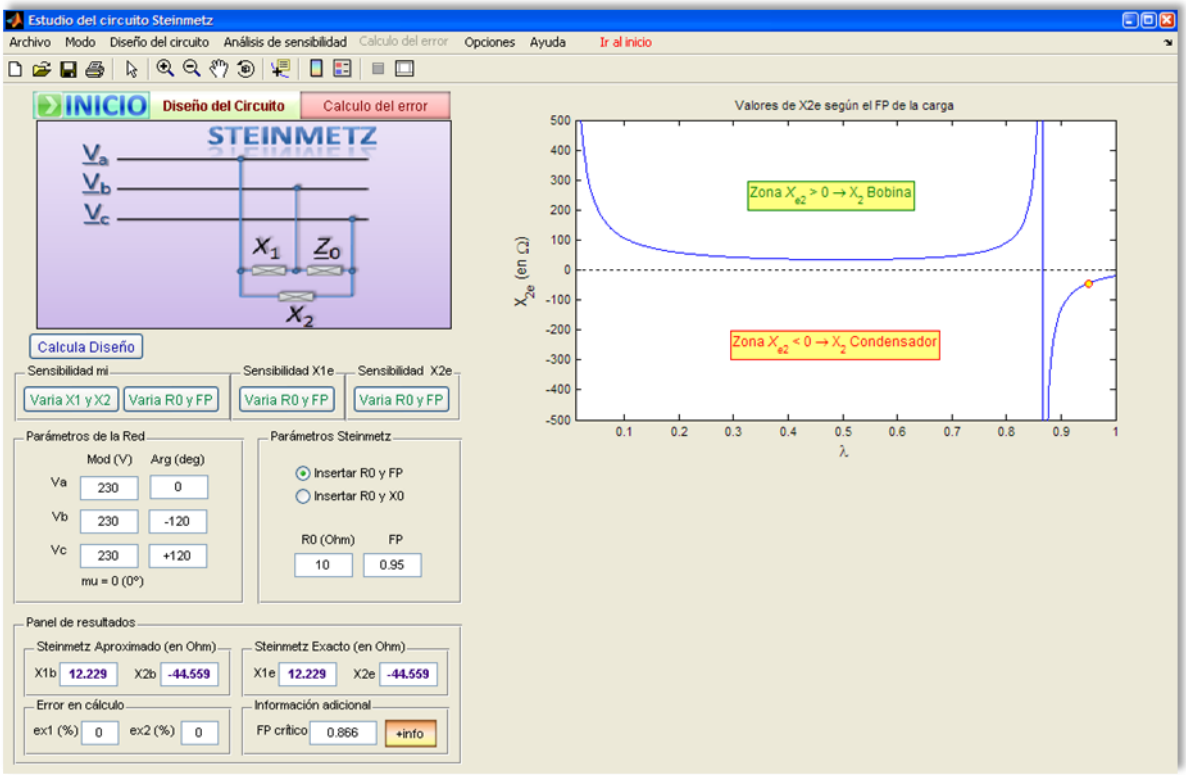

Figura D.5. Diseño del circuito Steinmetz: gráfico X_{2e} frente a λ.

D.3.2 Análisis de sensibilidad.

El análisis de sensibilidad se realiza desde la pantalla "Diseño del Circuito", ya que es necesario tener previamente ajustados los parámetros de la red, de la carga monofásica y de las reactancias simetrizadoras.

Este estudio de sensibilidad, fijadas las tensiones de alimentación, se divide en tres partes:

- Sensibilidad m_i: Analiza la variación del coeficiente de desequilibrio de corrientes, m_i, teniendo en cuenta la variación de:
  - X_{1e} y X_{2e}, es decir, varían los parámetros que definen las reactancias simetrizadoras. Esta variación se muestra en pu.
  - R_0 y λ, es decir, varían los parámetros que definen la carga. La variación de R_0 se muestra en pu, y la variación de λ corresponde al rango (0.85, …, 1).
- Sensibilidad X_{1e}: Analiza la variación porcentual del valor de la primera reactancia simetrizadora, X_{1e}, teniendo en cuenta la variación de R_0 y λ, es decir, los parámetros que definen la carga.

- Sensibilidad X_{2e}: Analiza la variación porcentual del valor de la segunda reactancia simetrizadora, X_{2e}, teniendo en cuenta la variación de R_0 y λ, es decir, los parámetros que definen la carga.

A todos estos estudios se accede mediante los botones correspondientes visualizados en la Figura D.5, obteniendo cada uno de los gráficos mostrados en la Figura D.6.

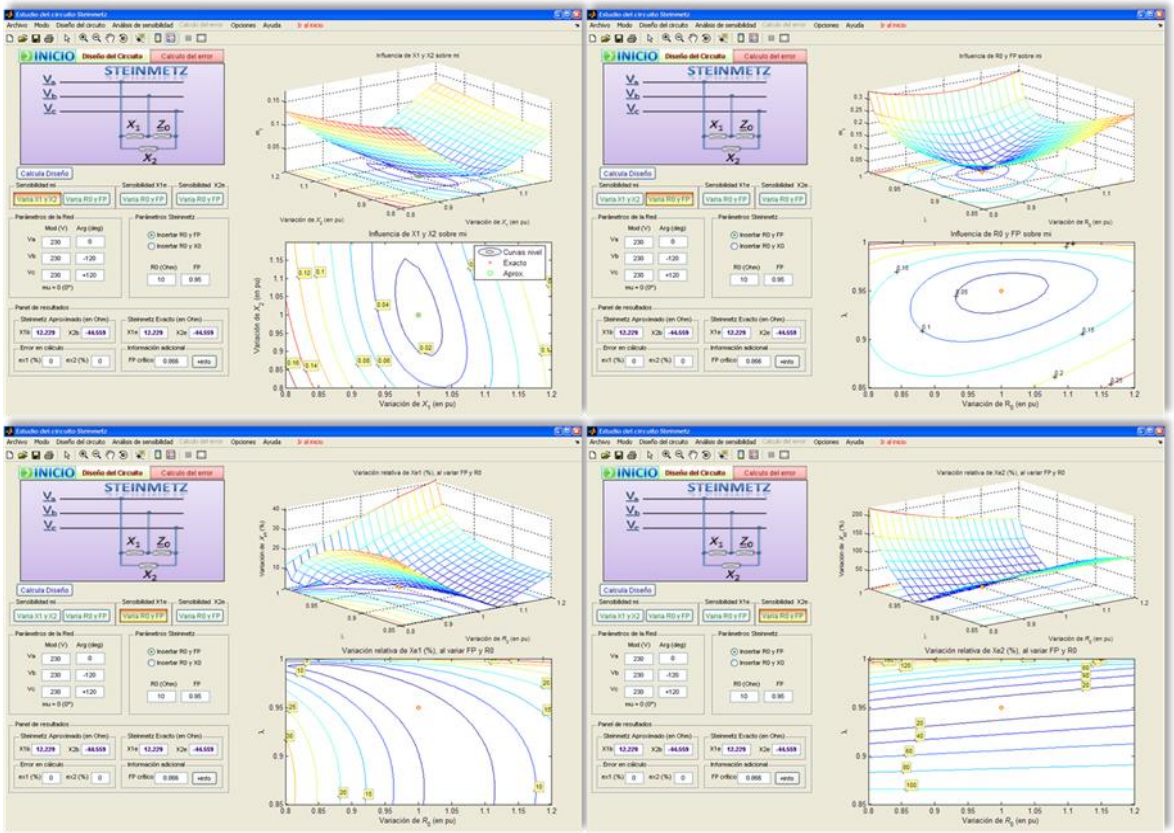

Figura D.6. Estudios de sensibilidad.

D.3.3 Estudio del error.

Como ya se ha comentado anteriormente, en el panel de resultados de la Figura D.4 aparece un sub-panel con los errores en el cálculo de las reactancias simetrizadoras al suponer tensiones equilibradas. En este apartado se estudiará con más detalle estos errores cometidos.

Pulsando “Cálculo de error”, se obtiene en pantalla la Figura D.7, donde aparece un panel nombrado “Parámetros de entrada”.

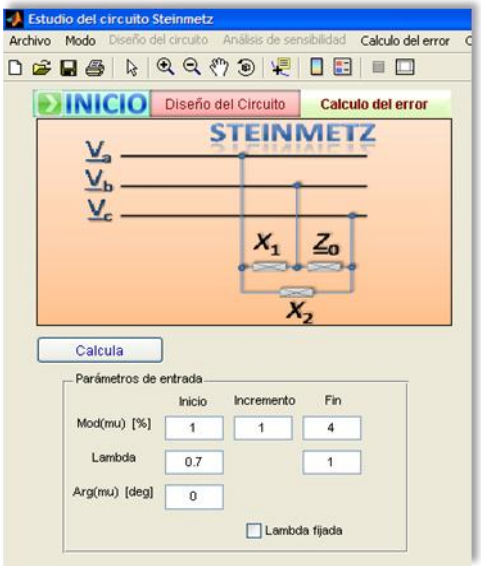

Figura D.7. Estudio del circuito Steinmetz: Cálculo del error.

En este panel aparecen los siguientes parámetros:

- $|\underline{m}_u|$ y Arg($\underline{m}_u$): Módulo y argumento del coeficiente de desequilibrio de las tensiones, $\underline{m}_u$.
- λ: Factor de potencia de la carga monofásica.

A partir de estos parámetros se puede calcular el error cometido en X_1 y X_2 por el procedimiento aproximado, es decir, X_{1b} y X_{2b} al suponer $\underline{m}_u = 0$. No es necesario, por tanto, conocer más información sobre la carga monofásica o sobre la red.

Para realizar este estudio, y debido a la imposibilidad de representar superficies cuatridimensionales, el usuario debe fijar una variable: o bien el argumento de $\underline{m}_u$ o bien λ.

Si se realiza el estudio de error fijando el argumento de $\underline{m}_u$, se obtienen los gráficos mostrados en la Figura D.8: se grafican e_{X1} y e_{X2} frente a λ, para diferentes valores de $|\underline{m}_u|$.

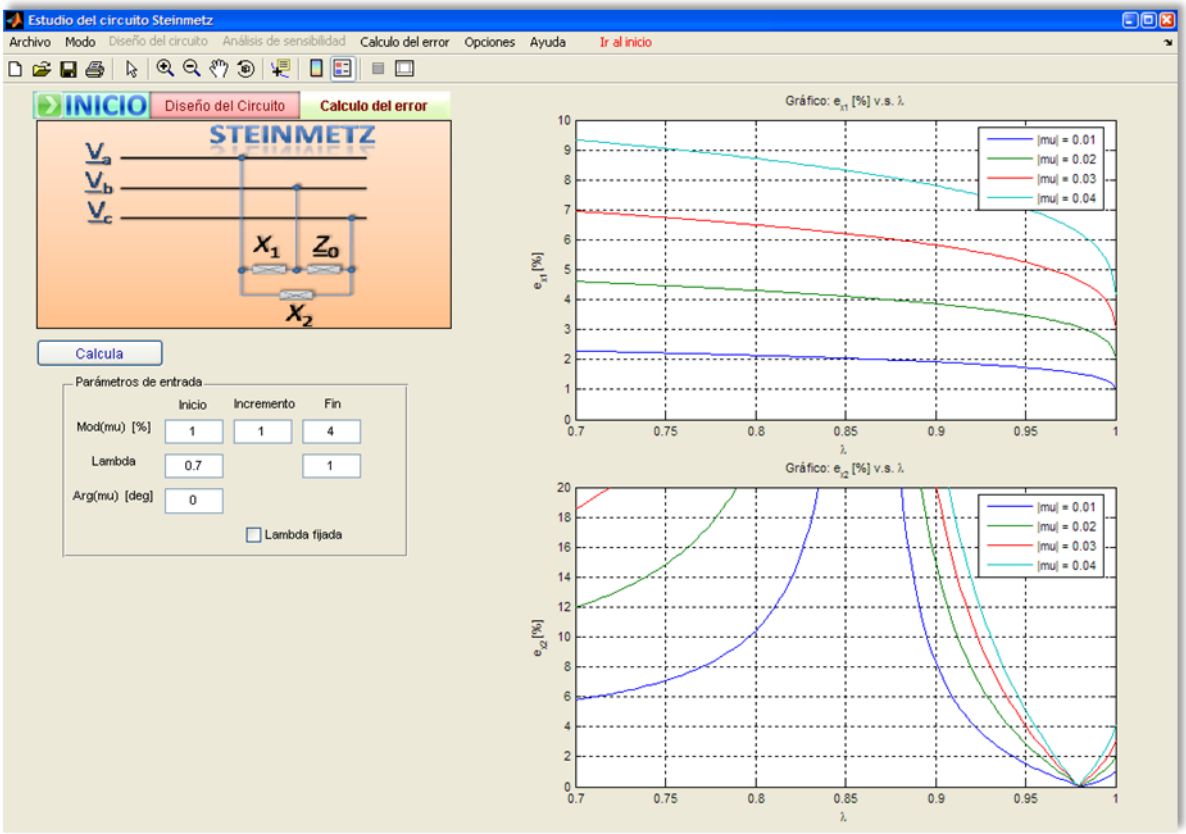

Figura D.8. Estudio del error con el argumento de $\underline{m}_u$ fijado.

Si se realiza el estudio de error fijando el factor de potencia de la carga monofásica, λ, se obtienen los gráficos mostrados en la Figura D.9: se generan los gráficos de contorno de e_{X1} y e_{X2} frente la variación de $|\underline{m}_u|$ y del argumento de $\underline{m}_u$.

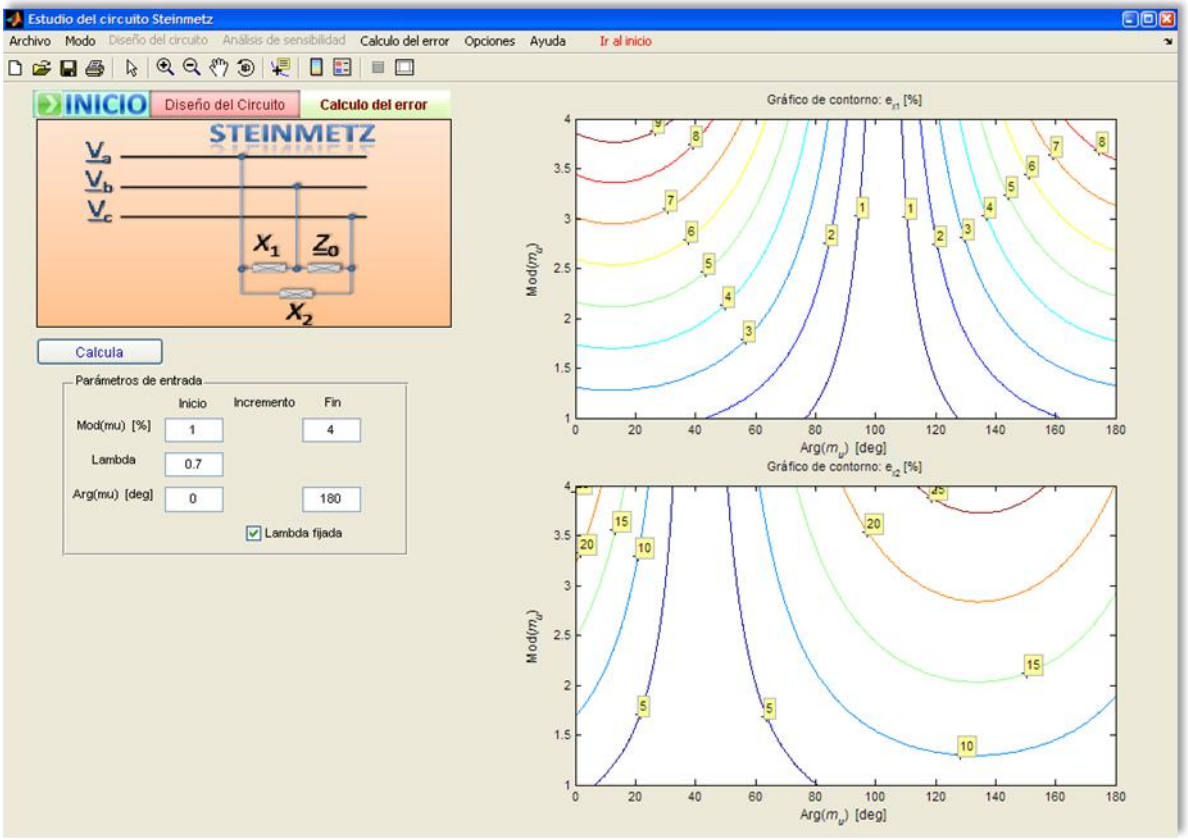

Figura D.9. Estudio del error con λ fijado.

D.3.4 Barra superior de menú

A lo largo de la ejecución de la aplicación, el programa ofrece una línea superior de comandos, conocida como "Barra superior de menú" (ver Figura D.10). En este apartado se comentará la funcionalidad de cada uno de los campos que la conforman para la parte "Diseño y Estudio".

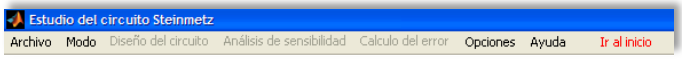

Figura D.10. Barra superior de menú.

- **Menú Archivo.** Consta, como la mayoría de programas, de las funciones propias para el manejo de configuración de datos y del salvado de imágenes (ver Figura D.11). A continuación se comenta cada campo:

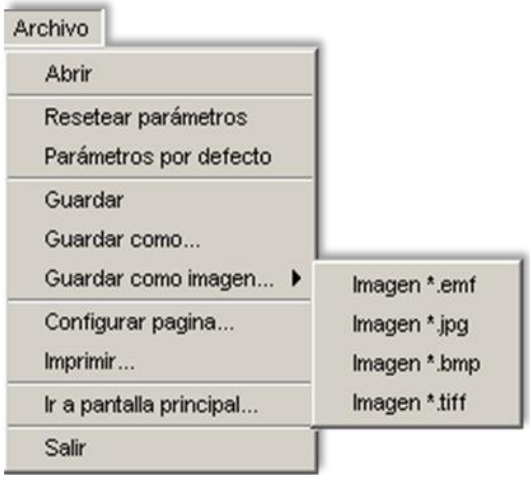

Figura D.11. Despliegue del menú Archivo

  - *Abrir.* Permite abrir una configuración de datos guardada previamente por el usuario. Por defecto, la busca en la carpeta "ArchUsuario".
  - *Resetear parámetros.* Configura a cero todos los parámetros numéricos del formulario, tanto los visibles como los no visibles.
  - *Parámetros por defecto.* Configura con los valores por defecto todos los parámetros numéricos del formulario, tanto los visibles como los no visibles.
  - *Guardar*. Guarda la configuración de parámetros actual. En caso de utilizar por primera vez, pregunta al usuario el directorio donde almacenarlo. Por defecto, se dirige a la carpeta "ArchUsuario".
  - *Guardar como imagen*. Este campo despliega una lista con los posibles formatos de imagen que el programa es capaz de salvar. Estos formatos son: *.emf, *.jpg, *.bmp y *.tiff.
  - *Configurar página*. Este comando, junto con el siguiente, permite configurar e imprimir la figura actual en cualquiera de las impresoras instaladas en el ordenador.
  - *Imprimir*. Este comando configura la impresión e imprime la figura actual en

cualquiera de las impresoras instaladas en el ordenador.

- Ir a pantalla principal. Cierra la actual figura y muestra el menú principal del programa.
- *Cerrar*. Cierra la aplicación.

- **Menú Modo.** Este campo permite seleccionar el tipo de estudio a realizar (ver Figura D.12):
  - *Diseño del circuito*. Al presionarlo, queda marcado con el símbolo ✓, y comienza el proceso de diseño del circuito Steinmetz y su análisis de sensibilidad.
  - *Cálculo del error*. Al presionarlo, queda marcado con el símbolo ✓, y comienza el proceso del estudio del error.

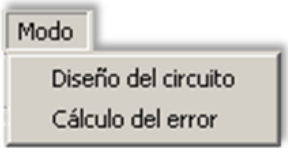

Figura D.12.Despliegue del menú Modo.

- **Menú Diseño del Circuito.** Este campo permite realizar el diseño del circuito Steinmetz (ver Figura D.13):
  - *Calcula (Paso 1 de 1)*: este comando ejecuta el motor interno del programa que calcula los valores de las reactancias simetrizadoras y la serie de parámetros adicionales mostrados en el panel de resultados.

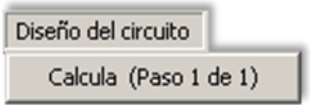

Figura D.13.Despliegue del menú Diseño del Circuito.

- **Menú Análisis de Sensibilidad.** Este campo permite realizar el análisis de sensibilidad (ver Figura D.14):

Figura D.14.Despliegue del menú Análisis de Sensibilidad.

  - *Calcula (Paso 1 de 1)*: este comando ejecuta el motor interno del programa que calcula los valores de las reactancias simetrizadoras y la serie de parámetros adicionales mostrados en el panel de resultados.
  - Sensibilidad m_i: Este campo despliega otra lista, con las cuales se analiza la variación del coeficiente de desequilibrio de corrientes, m_i, teniendo en cuenta la variación de:

- *Variación de* X_{1e} y X_{2e}, es decir, varían los parámetros que definen las reactancias simetrizadoras.
- *Variación de* R_0 y λ, es decir, varían los parámetros que definen la carga.

- Sensibilidad X_{1e} *al variar* R_0 *y* λ: Analiza la variación porcentual del valor de la primera reactancia simetrizadora, X_{1e}, teniendo en cuenta la variación de R_0 y λ, es decir, los parámetros que definen la carga.
- Sensibilidad X_{2e} *al variar* R_0 *y* λ: Analiza la variación porcentual del valor de la segunda reactancia simetrizadora, X_{2e}, teniendo en cuenta la variación de R_0 y λ, es decir, los parámetros que definen la carga.

- **Menú Diseño del Circuito.** Este campo permite realizar el estudio del error cometido al suponer equilibrio de tensiones (ver Figura D.15):

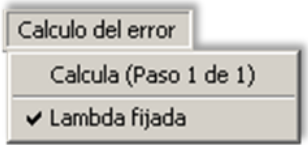

Figura D.15.Despliegue del menú Cálculo del Error.

- *Calcula (Paso 1 de 1)*: este comando ejecuta el motor interno del programa que genera los gráficos correspondientes a este estudio.
- *λ fijada*: este campo indica si se está realizando el estudio con el factor de potencia de la carga monofásica fijado (en caso afirmativo, se muestra con la etiqueta ✓).

- **Opciones.** Este menú muestra las opciones de la figura (ver Figura D.16).

Figura D.16. Despliegue del menú Opciones.

- *Editor de ejes.* Este campo ejecuta el subprograma que edita los valores de los tres ejes de cada gráfico. Para modificar el rango de los ejes, primero se ha de seleccionar el número de gráfico a modificar. Estos números aparecen en la imagen superior de la Figura D.17. Seguidamente se modifican los campos referentes a *X* e *Y* (si se trata de un gráfico bidimensional o de contorno) o los referentes a *X*, *Y* y *Z* (en caso de un gráfico de superficie).

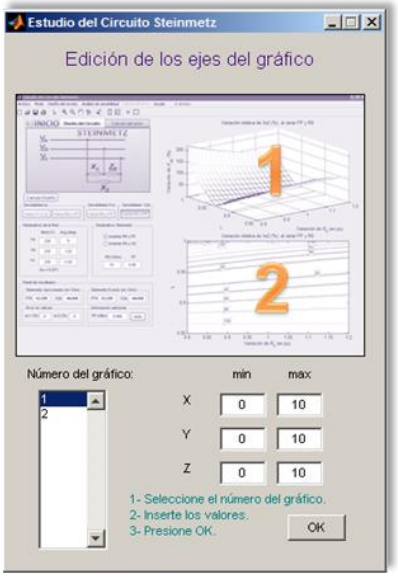

Figura D.17. Editor de los ejes de gráficos.

- *Barras de herramientas.* Este campo desactiva y oculta la barra de herramientas mostrada por defecto en la figura.
- *Barra menú adicional.* Este campo activa y visualiza la barra de menús generada por defecto por el programa. Mediante esta barra de comandos adicional, el usuario podrá editar o modificar cualquier característica de los gráficos mostrados: etiquetas, títulos, colores, tipos de líneas, puntos de vista,…

- **Ayuda.** Como la mayoría de programas, este menú proporciona documentación adicional sobre el programa (ver Figura D.18).

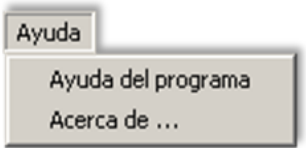

Figura D.18. Despliegue del menú Ayuda.

- *Ayuda del programa.* Este campo abre el fichero de ayuda del programa.
- *Acerca de… .* Este campo genera una ventana emergente con información adicional sobre el programa.

- **Ir al inicio.** Cierra la actual figura y muestra el menú principal del programa (ver Figura D.19).

Figura D.19. Menú Ir al Inicio.

D.4 Respuesta frecuencial

Se accede mediante el formulario principal, Figura D.1, clicando sobre el icono “Respuesta frecuencial”. Seguidamente, tras una breve animación inicial, se muestra el menú inicial de esta parte del programa, mostrado en Figura D.20. Se ha de seleccionar, seguidamente, desde donde se realizará el estudio del comportamiento del sistema: bien desde la red (por considerar que sus tensiones están distorsionadas) o bien desde la carga (por considerar que esta es no lineal).

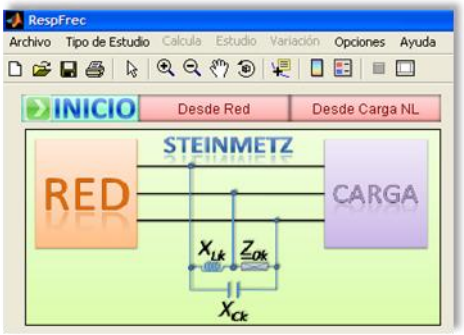

Figura D.20. Menú inicial del estudio de la Respuesta Frecuencial.

D.4.1 Respuesta frecuencial observado desde la red

Una vez seleccionado “Desde Red” en la Figura D.20, se abre el recuadro de parámetros, tal y como se muestra en Figura D.21. Estos valores se agrupan en cuatro elementos:

- **Red**. Caracteriza los parámetros de la red, la cual viene determinada por:
  - R_S/X_S: Corresponde a la resistencia normalizada de la red.
- **Carga**. Caracteriza los parámetros de la carga monofásica, la cual viene determinada por los siguientes valores:
  - R_0/X_S: Corresponde a la resistencia normalizada de la carga monofásica.
  - *FP*: Corresponde al factor de potencia de la carga monofásica.
- **Steinmetz**. Caracteriza los parámetros de la bobina y del condensador simetrizadores. Ambos campos no pueden ser modificados por el usuario, ya que el programa los calcula internamente a partir de la expresión mostrada en el capítulo correspondiente. Viene definido por dos parámetros:
  - X_L/X_S: Corresponde al valor de la inductancia simetrizadora normalizada.
  - X_C/X_S: Corresponde al valor de la capacidad simetrizadora normalizada.
- **CL**. Caracteriza los parámetros de la carga trifásica lineal, la cual viene determinada por los siguientes valores:
  - $|Z_{P1}|/X_S$: Corresponde al valor absoluto de la impedancia fundamental de la carga lineal trifásica normalizada.
  - FP_P: Corresponde al factor de potencia de la carga lineal trifásica.

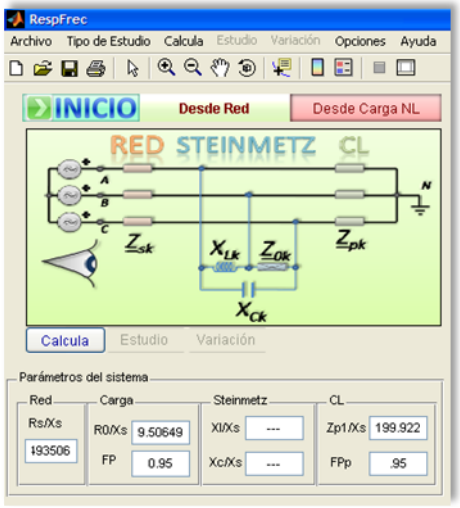

Figura D.21. Tabla de parámetros del estudio frecuencial observado desde la red

Una vez insertados los parámetros correspondientes, se pulsa sobre el botón “Calcula”. Seguidamente el programa crea una ventana emergente con el valor analítico de la localización de la resonancia serie, k_S. También se muestran los parámetros que definen la bobina y el condensador del circuito Steinmetz, señalado con color rojo sobre fondo amarillo. Aparecen también los siguientes gráficos:

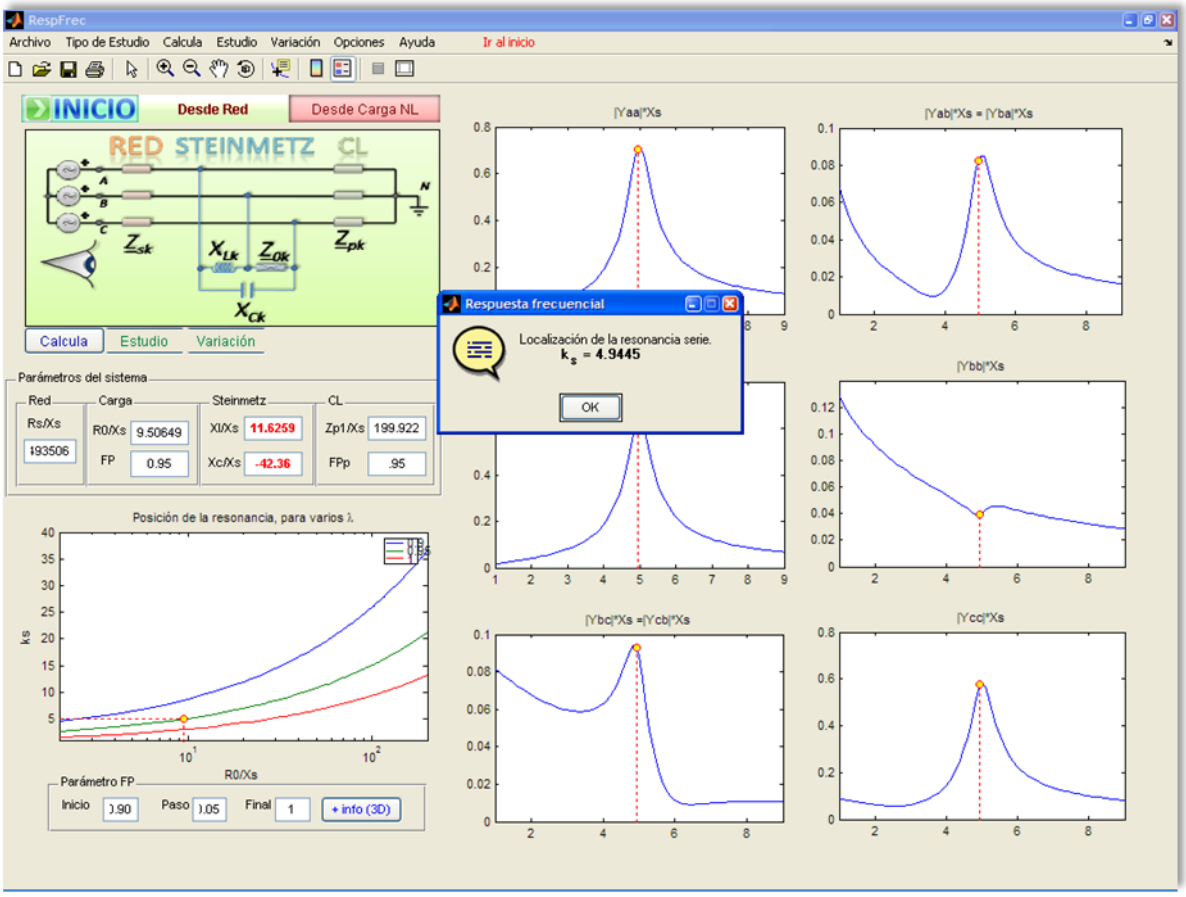

Figura D.22. Estudio frecuencial del sistema observado desde la red.

- En la mitad derecha de la imagen se exponen los 6 gráficos correspondientes a los módulos de las admitancias normalizadas, $\underline{\mathbf{Y}}_{Bk}\cdot X_S$. En ellos se sitúa la localización de la resonancia k_s calculada analíticamente.
- En la parte izquierda inferior de la imagen se expone el gráfico correspondiente a la localización de la resonancia analítica para varios factores de potencia, λ, calculada analíticamente. El punto señalador indica el punto donde se sitúa el actual valor de R_0/X_S. Bajo este gráfico se muestran los parámetros utilizados para crear el espaciamiento de λ, los cuales están habilitados para modificar por el usuario. (Una vez modificados, se ha de volver a pulsar el botón "Calcula").

Para obtener la superficie tridimensional generada por el valor de k_S al variar λ y R_0/X_S, se ha de pulsar el botón "+ info (3D)". Aparece la Figura D.23, donde se muestra el gráfico tridimensional y el gráfico de contorno. En este segundo gráfico se muestra, mediante un marcador amarillo, la posición actual para los parámetros λ y R_0/X_S.

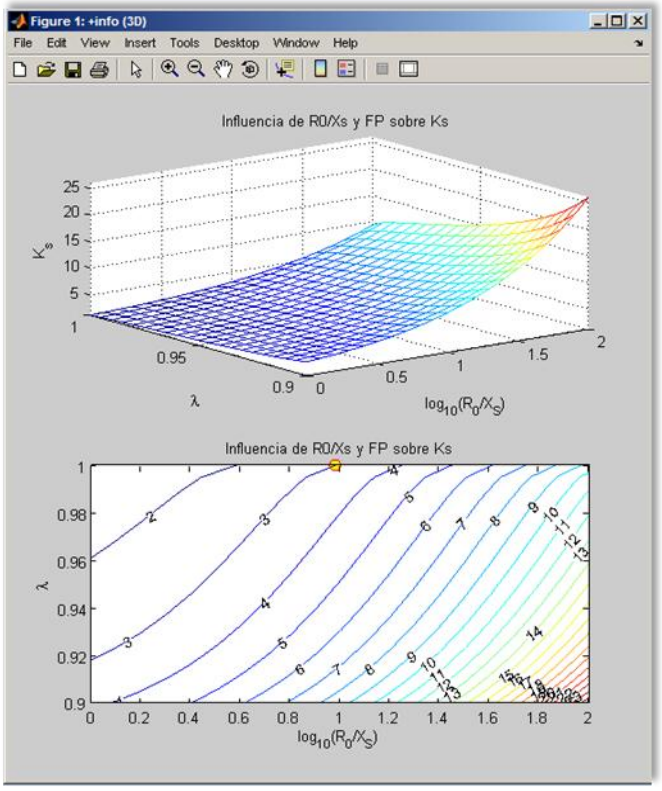

Figura D.23. Gráficos tridimensionales sobre la localización de k_S.

Una vez realizado el diseño del circuito, es decir, calculados los parámetros que definen el circuito simetrizador, el usuario puede realizar un estudio del sistema o una variación de parámetros.

Si el usuario selecciona “Estudio”, aparece en pantalla la Figura D.24, donde se presentan los parámetros que definen los contenidos armónicos de las tensiones de la alimentación que se consideran simétricas y equilibradas. Estos contenidos armónicos, también llamados *HD*, son interpretados como porcentajes sobre el armónico principal, el cual representa el 100%. Se observa que sólo aparecen los armónicos impares, ya que se supone simetría de semionda. Aparecen también dos nuevos botones adicionales:

- “+info”: La funcionalidad de este botón está, momentáneamente, deshabilitada. Se comentará su función posteriormente.
- “**>>**” : Este botón ejecuta el motor interno del programa, y ha de ser pulsado una vez insertados los datos.

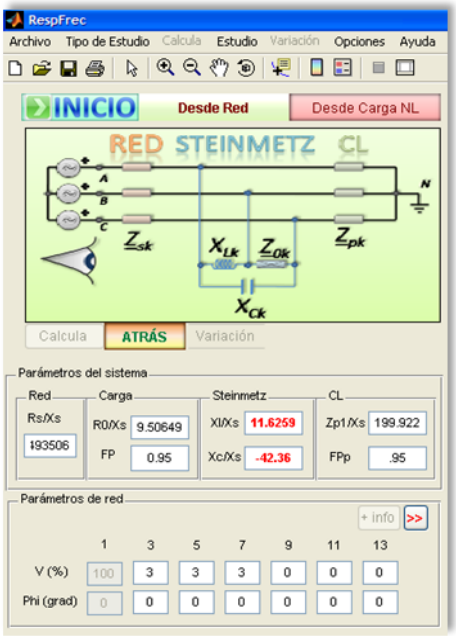

Figura D.24. Tabla de parámetros de la red, para el estudio frecuencial.

Una vez pulsado "**>>**", se generan los gráficos de la Figura D.25, que se comentan a continuación:

- Los dos gráficos superiores de la mitad derecha de la pantalla muestran las tensiones de las tres fases (ver Figura D.25): a la izquierda se muestra el gráfico de las formas de onda y a la derecha se muestra su distorsión armónica, HD_k, para cada uno de los siete primeros armónicos impares de las tres fases. En la parte derecha de este segundo gráfico se muestran la distorsión armónica total, *THD*, de cada una de las fases.
- Los dos gráficos intermedios de la mitad derecha de la pantalla muestran las tensiones V_{CN} (ver Figura D.25) de las tres fases: a la izquierda se muestra el gráfico de las formas de onda y a la derecha se muestra su distorsión armónica, HD_k, para cada uno de los siete primeros armónicos impares de las tres fases. En la parte derecha de este segundo gráfico se muestran la distorsión armónica total, *THD*, de cada una de las fases.
- Los dos gráficos inferiores de la mitad derecha de la pantalla muestran las corrientes I_{CN} (ver Figura D.25) de las tres fases: a la izquierda se muestra el gráfico de las formas de onda y a la derecha se muestra su distorsión armónica, HD_k, para cada uno de los siete primeros armónicos impares de las tres fases. En la parte derecha de este segundo gráfico se muestran la distorsión armónica total, *THD,* de cada una de las fases.

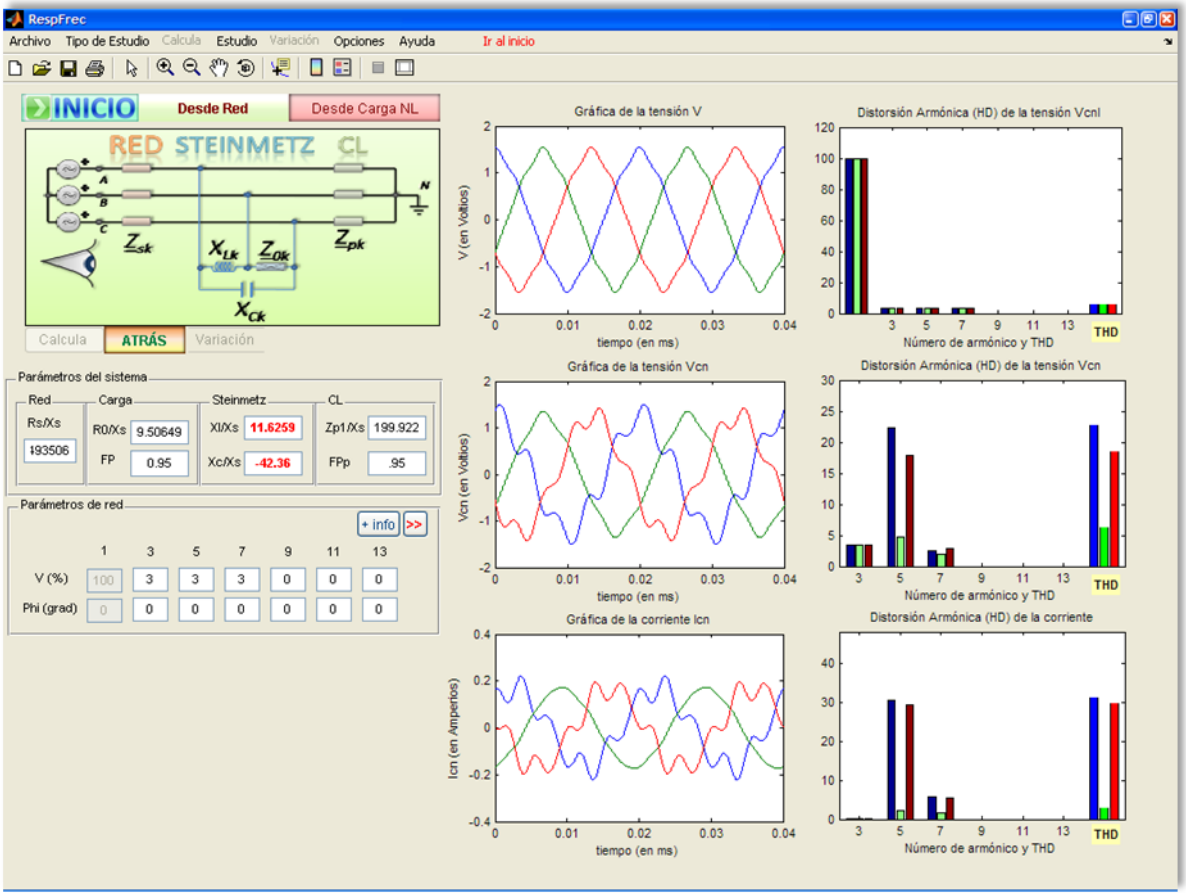

Figura D.25. Estudio de la respuesta frecuencial del sistema observado por la red.

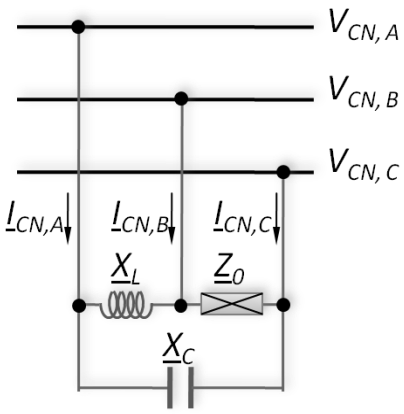

Figura D.26. Circuito Steinmetz, mostrando las tensiones V_{CN} y las corrientes I_{CN}.

Una vez ejecutado el estudio, se habilita automáticamente el botón "+ info", que proporciona al usuario los valores numéricos de las distorsiones armónicas de las tensiones V_{CN} y las corrientes I_{CN}. Pulsándolo, se obtiene la Figura D.27, donde no sólo se representan dichos valores, sino que también se muestran, mediante figuras coloreadas ("semáforos"), el nivel de HD_k para cada armónico.

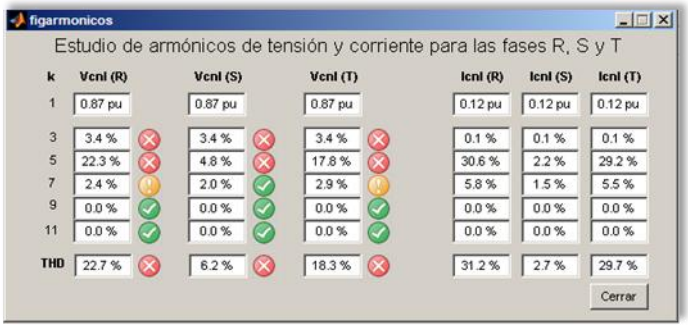

Figura D.27. Valores numéricos de las tensiones V_{CN} y las corrientes I_{CN}.

La asignación de los "semáforos" para cada uno de los valores está basada en la normativa IEEE Standard 519-1992 [1]. En la Tabla D.1 se muestra el criterio tomado:

Tabla D.1.Rango de valores

	Rango de distorsión armónica, HD_k	Rango de distorsión armónica total, THD
	$0\% < HD_k < 2\%$	$0\% < THD < 4\%$
	$2\% < HD_k < 3\%$	$4\% < THD < 5\%$
	$3\% < HD_k$	$5\% < THD$

Una vez acabado el estudio de la respuesta frecuencial del sistema observado desde la red, se deselecciona el botón "Estudio", de manera que se habilite el botón "Variación". Seguidamente se selecciona "Variación", y aparece la Figura D.28. En este apartado, el programa estudiará la respuesta frecuencial del sistema a partir de la variación de la capacidad del condensador simetrizador del circuito Steinmetz, mediante el parámetro d_C, explicado en el apartado correspondiente.

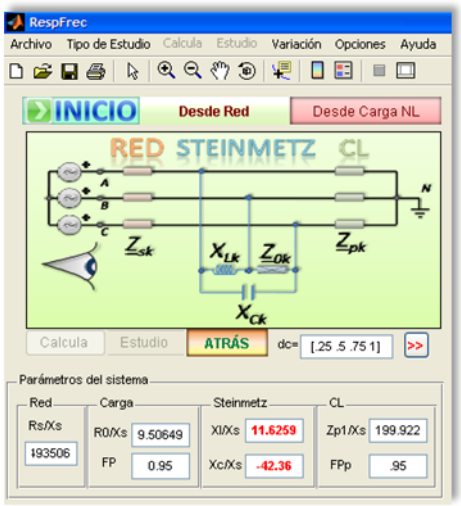

Figura D.28. Datos de entrada de la variación de parámetros para el estudio frecuencial del sistema observado desde la red.

Ha aparecido un nuevo campo con el rótulo "d_C =", donde se muestra un vector con cuatro valores por defecto de d_C. También se visualiza un botón etiquetado "**>>**", el cual ha de ser pulsado

cuando el usuario ha introducido los datos para continuar este estudio. Aparece la Figura D.29.

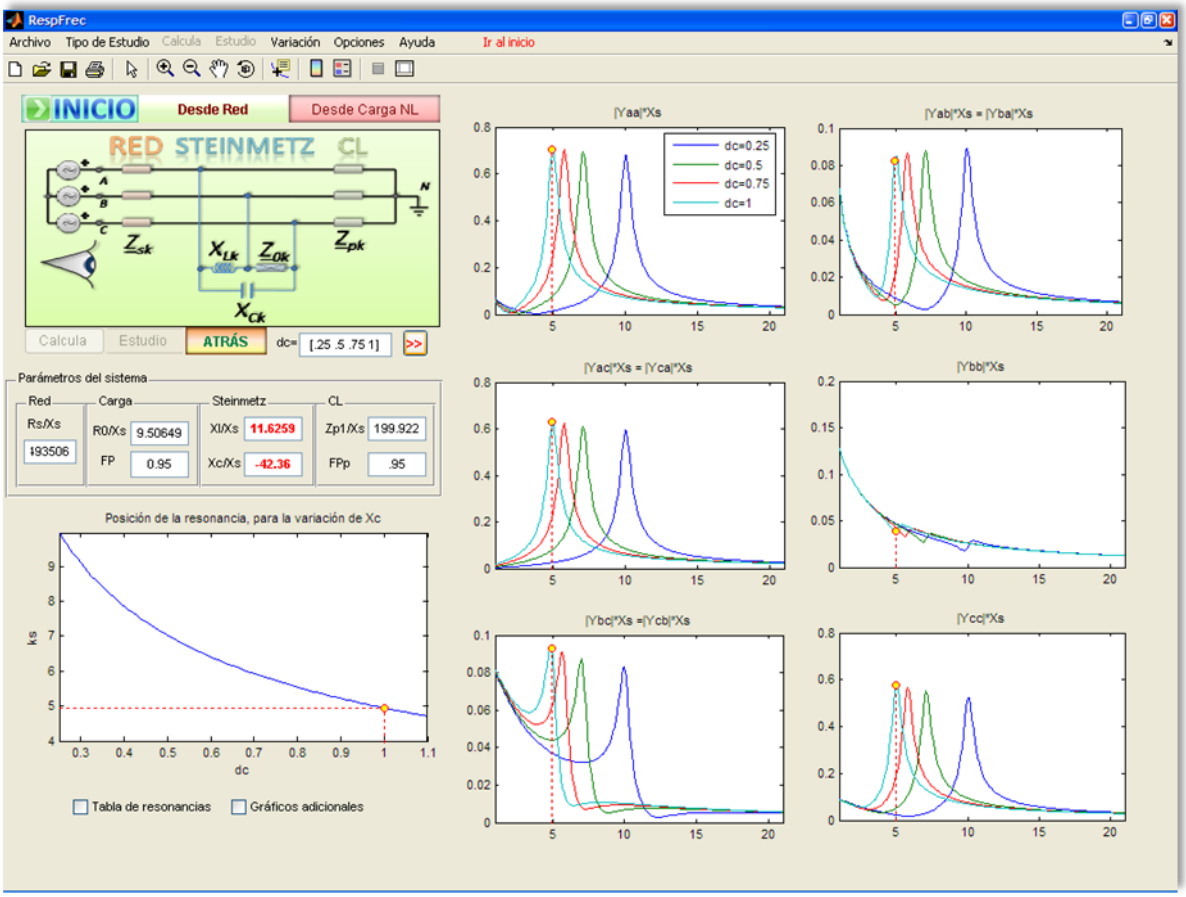

Figura D.29. Estudio frecuencial del sistema observado desde la red, para la variación de d_C.

- En la mitad derecha de la imagen se exponen los 6 gráficos correspondientes a los módulos de las admitancias normalizadas de $\underline{\mathbf{Y}}_{Bk}\cdot X_S$. En ellos se sitúa la localización de la resonancia k_s, calculada analíticamente. En cada gráfico se representan las curvas correspondientes a cada uno de los valores de d_C, tal y como se muestra en la leyenda.
- En la parte izquierda inferior de la imagen se expone el gráfico correspondiente a la localización de la resonancia analítica para el factor de potencia actual, λ, calculada analíticamente. El punto señalador indica el punto donde se sitúa el actual valor de d_C.

Bajo este tercer gráfico se muestran dos *checkboxes*, con las siguientes funcionalidades:

- **Tabla de resonancias:** genera una nueva figura donde se muestra una tabla como la de la Figura D.30, en la que se muestran los valores numéricos de la localización de la resonancia serie, k_S, para cada uno de los valores de d_C.

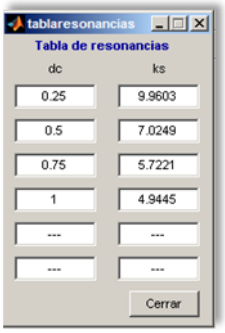

Figura D.30. Tabla de resonancias

- **Gráficos adicionales:** genera una nueva figura (ver Figura D.31), donde se muestran dos gráficos bidimensionales, con la localización de la resonancia serie, k_S, para valores genéricos de λ, d_C y R_0/X_S.

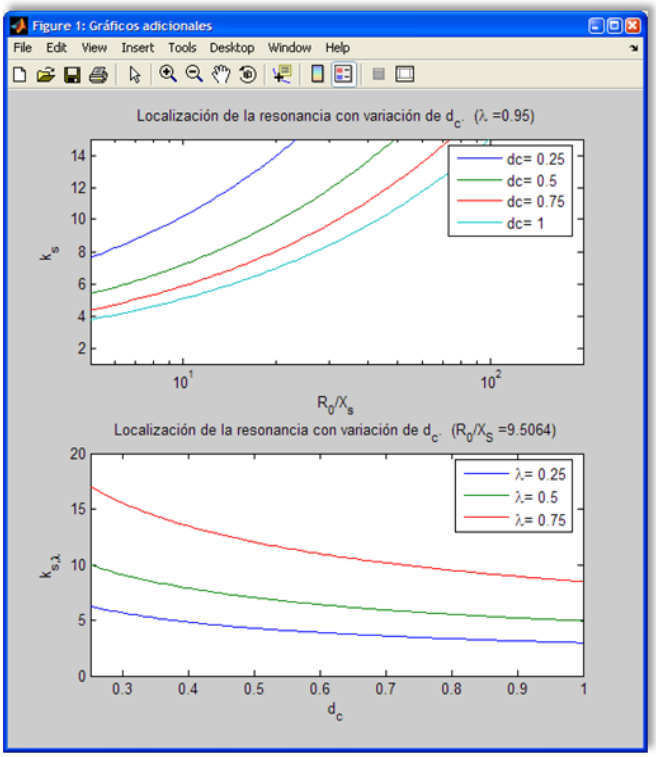

Figura D.31. Gráficos adicionales.

D.4.2 Respuesta frecuencial observado desde la carga no lineal.

Una vez seleccionado “Desde Carga NL” en la Figura D.20, se abre el recuadro de parámetros, tal y como se muestra en Figura D.32. Estos valores se agrupan en tres elementos:

- **Red**. Caracteriza los parámetros de la red, la cual viene determinada por:
  - R_S/X_S: Corresponde a la relación entre la resistencia y la reactancia de la red.
  - X_S/R_0: Corresponde a la reactancia normalizada de la red.
- **Carga**. Caracteriza los parámetros de la carga monofásica, la cual viene determinada por el siguiente:
  - *FP*: Corresponde al factor de potencia de la carga monofásica.
- **Steinmetz**. Caracteriza los parámetros de la bobina y del condensador simetrizadores. Ambos campos no pueden ser modificados por el usuario, ya que el programa los calcula internamente a partir de la expresión mostrada en el capítulo correspondiente. Viene definido por dos parámetros:
  - X_L/ R_0: Corresponde al valor de la inductancia simetrizadora normalizada.
  - X_C/ R_0: Corresponde al valor de la capacidad simetrizadora normalizada.

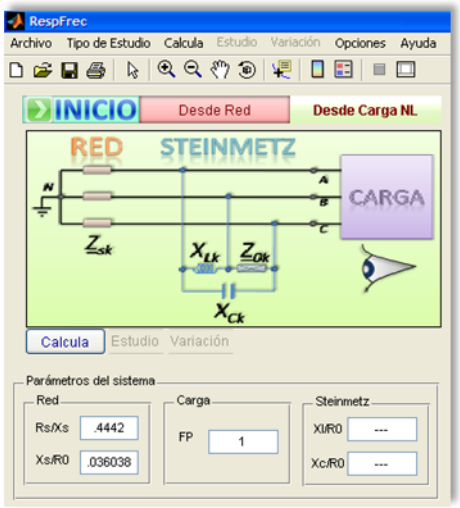

Figura D.32. Tabla de parámetros del estudio frecuencial observado desde la carga.

Una vez insertados los parámetros correspondientes, se pulsa sobre el botón “Calcula”. Seguidamente el programa crea una ventana emergente con el valor analítico de la localización de la resonancia serie, k_P. También se muestran los parámetros que definen la bobina y el condensador del circuito Steinmetz, señalado con color rojo sobre fondo amarillo. Aparecen también los siguientes gráficos:

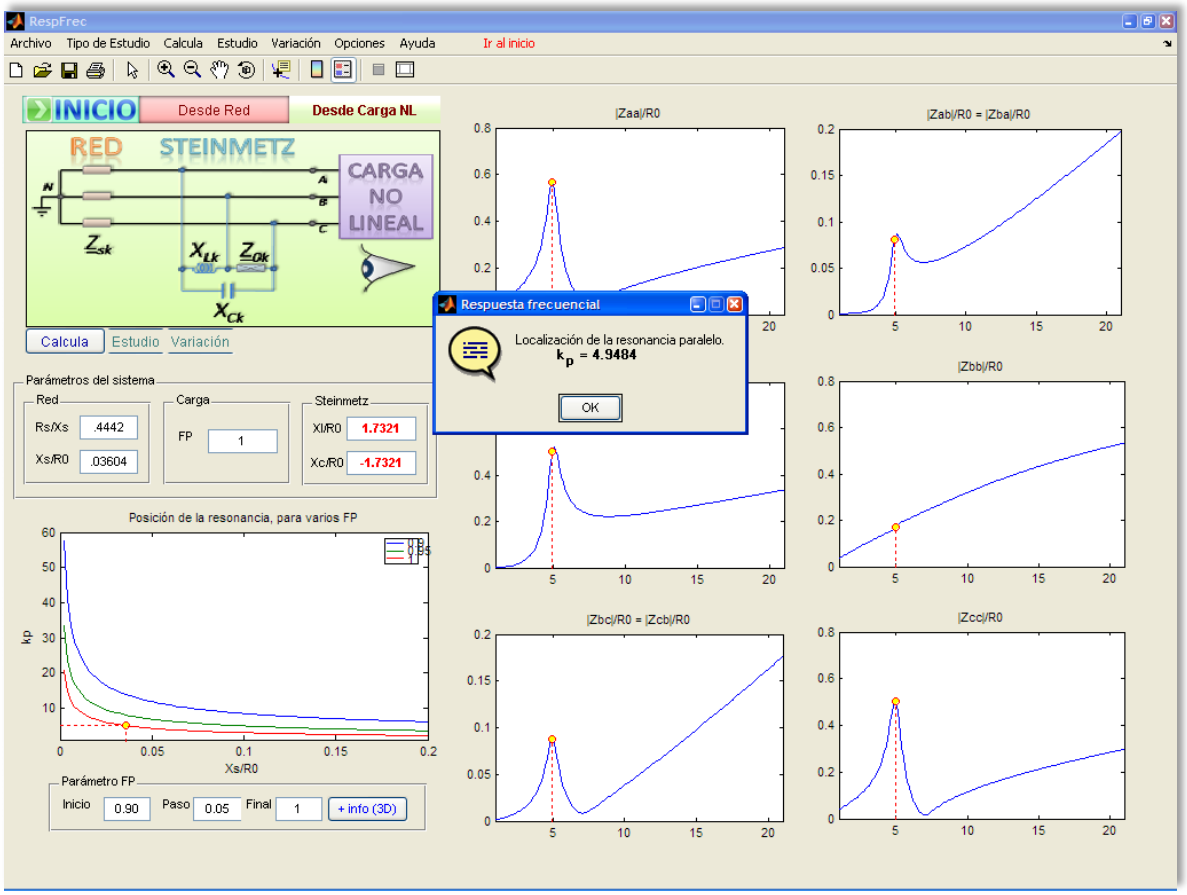

Figura D.33. Estudio frecuencial del sistema observado desde la carga.

- En la mitad derecha de la imagen se exponen los 6 gráficos correspondientes a los módulos de las impedancias normalizadas de $\underline{Z}_{Bk}/R_0$. En ellos se sitúa la localización de la resonancia k_p, calculado analíticamente.
- En la parte izquierda inferior de la imagen se expone el gráfico correspondiente a la localización de la resonancia analítica para varios factores de potencia, λ, calculados analíticamente. El punto señalador indica el punto donde se sitúa el actual valor de X_S/R_0. Bajo este gráfico se muestran los parámetros utilizados para crear el espaciamiento de λ, los cuales están habilitados para modificar por el usuario. (Una vez modificados, se ha de volver a pulsar el botón "Calcula").

Para obtener la superficie tridimensional generada por el valor de k_p al variar λ y X_S/R_0, se ha de pulsar el botón "+ info (3D)". Aparece la Figura D.34, donde se muestra el gráfico tridimensional y el gráfico de contorno. En este segundo gráfico se muestra, mediante un marcador amarillo, la posición actual para los parámetros λ y X_S/R_0.

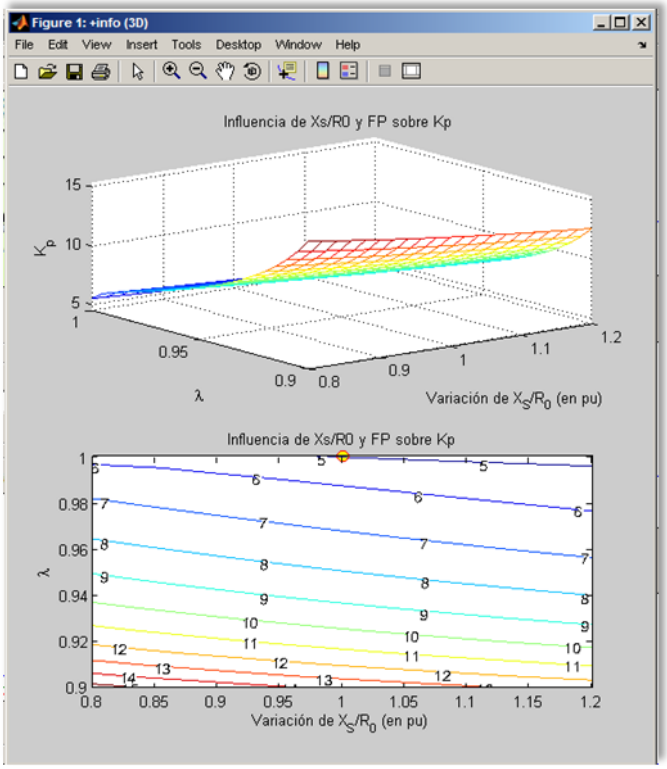

Figura D.34. Gráficos tridimensionales sobre la localización de k_p.

Una vez realizado el diseño del circuito, es decir, calculados los parámetros que definen el circuito simetrizador, el usuario puede realizar un estudio del sistema o una variación de parámetros.

Si el usuario selecciona “Estudio”, aparece en pantalla la Figura D.35, donde se visualizan cinco nuevos elementos:

- Lista desplegable: esta lista está compuesta por las cargas no lineales trifásicas que se pueden estudiar en la presente aplicación. Está formada por:
  - Cargador de baterías.
  - Rectificador monofásico no controlado.
  - Rectificador trifásico no controlado.
  - Lámpara de descarga.
  - Rectificador de seis pulsos.
- Campo “incS”: en él se ha de introducir el parámetro ΔS, es decir, el ratio S_{NL}/S_{TOT}, tal y como se comenta en el apartado correspondiente.
- Botón “+info”: La funcionalidad de este botón está, momentáneamente, deshabilitada. Se comentará su función posteriormente.
- Botón “Abrir figura”: La funcionalidad de este botón se habilita al seleccionar una carga no lineal. Al marcar este botón aparecerá una figura inferior con la topología eléctrica del circuito seleccionado.

- Botón "**>>**" : Este botón, habilitado al seleccionar una carga no lineal de la lista desplegable, ejecuta el motor interno del programa, y ha de ser pulsado una vez insertados los datos.

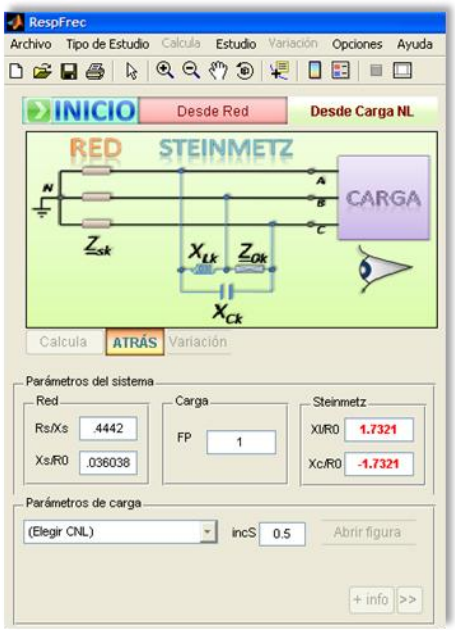

Figura D.35. Tabla de parámetros de la carga no lineal, para el estudio frecuencial.

Al seleccionar cualquiera de las cargas no lineales, aparecen los campos que la definen. Estos valores han de insertarse normalizados. A continuación se muestran los parámetros para cada una de las cargas:

- Cargador de baterías.
  - R_L/X_L
  - V_b/V
- Rectificador monofásico no controlado.
  - R_L/X_L
  - x_{LN}
  - x_{CN}
- Rectificador trifásico no controlado.
  - R_L/X_L
  - x_{LN}
  - x_{CN}
- Lámpara de descarga.
  - R_L/X_L
  - U_E/V
- Rectificador de seis pulsos.
  - p_N
  - R_L/X_L

- x_{LN}

Cada uno de los parámetros anteriores se ha definido en el capítulo “Modelización de componentes”, en la sección “Modelización de cargas no lineales”.

Una vez pulsado “**>>**”, se generan los gráficos de la Figura D.36, que se comentan a continuación:

- Los dos gráficos superiores de la mitad derecha de la pantalla muestran las tensiones de las tres fases: a la izquierda se muestra el gráfico de las formas de onda y a la derecha se muestra su distorsión armónica, HD_k, para cada uno de los siete primeros armónicos impares de las tres fases. En la parte derecha de este segundo gráfico se muestran la distorsión armónica total*, THD*, de cada una de las fases.
- Los dos gráficos intermedios de la mitad derecha de la pantalla muestran las tensiones V_{CN} (ver Figura D.37) de las tres fases: a la izquierda se muestra el gráfico de las formas de onda y a la derecha se muestra su distorsión armónica, HD_k, para cada uno de los siete primeros armónicos impares de las tres fases. En la parte derecha de este segundo gráfico se muestran la distorsión armónica total, *THD*, de cada una de las fases.
- Los dos gráficos inferiores de la mitad derecha de la pantalla muestran las corrientes I_{CN} (ver Figura D.37) de las tres fases: a la izquierda se muestra el gráfico de las formas de onda y a la derecha se muestra su distorsión armónica, HD_k, para cada uno de los siete primeros armónicos impares de las tres fases. En la parte derecha de este segundo gráfico se muestran la distorsión armónica total, *THD,* de cada una de las fases.

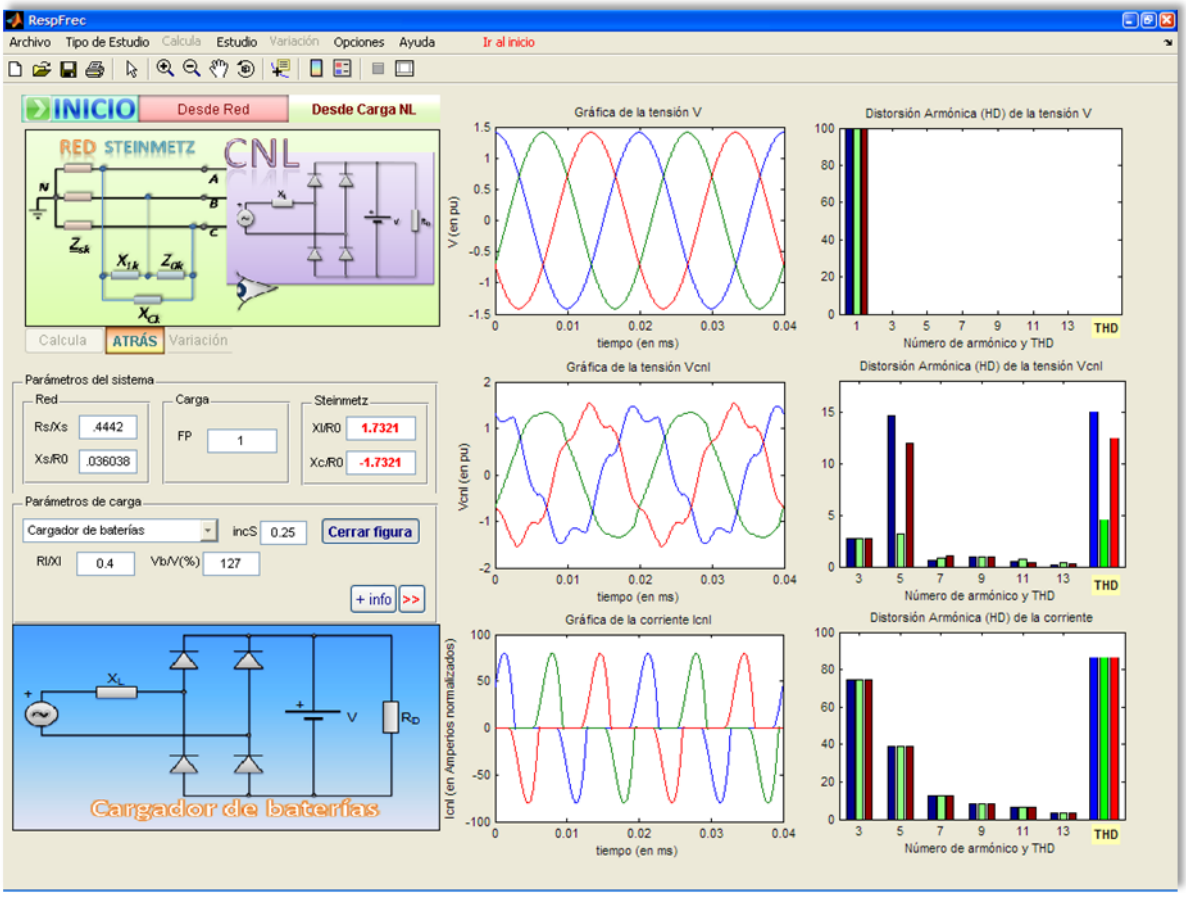

Figura D.36. Estudio de la respuesta frecuencial del sistema observado por la carga.

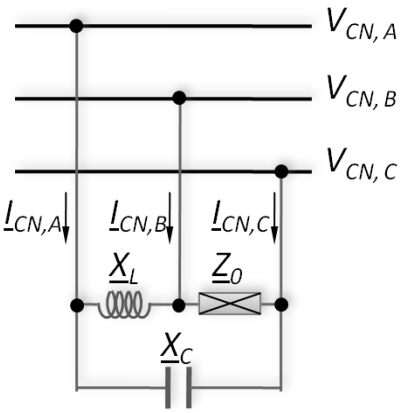

Figura D.37. Circuito Steinmetz, mostrando las tensiones V_{CN} y las corrientes I_{CN}.

Una vez ejecutado el estudio, se habilita automáticamente el botón "+ info", que proporciona al usuario los valores numéricos de las distorsiones armónicas de las tensiones V_{CN} y las corrientes I_{CN}. Pulsándolo, se obtiene la Figura D.38, donde no sólo se representan dichos valores, sino que también se muestran, mediante figuras coloreadas ("semáforos"), el nivel de HD_k para cada armónico. La asignación de los "semáforos" para cada uno de los valores está basada en la normativa IEE Standard 519-1992 [1]. En la Tabla D.1 se mostró el criterio tomado.

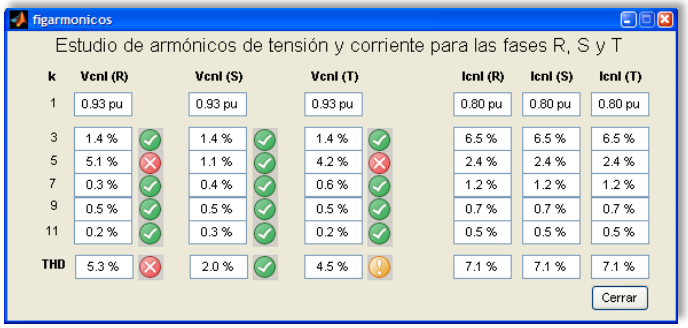

Figura D.38. Valores numéricos de las tensiones V_{CN} y las corrientes I_{CN}.

Una vez acabado el estudio de la respuesta frecuencial del sistema observado desde la carga, se deselecciona el botón "Estudio", de manera que se habilite el botón "Variación". Seguidamente se selecciona "Variación", y aparece la Figura D.39. En este apartado, el programa estudiará la respuesta frecuencial del sistema a partir de la variación bien de la capacidad del condensador simetrizador del circuito Steinmetz (mediante el parámetro d_C), o bien de la relación entre la resistencia y la reactancia de la red (mediante el parámetro R_S/X_S).

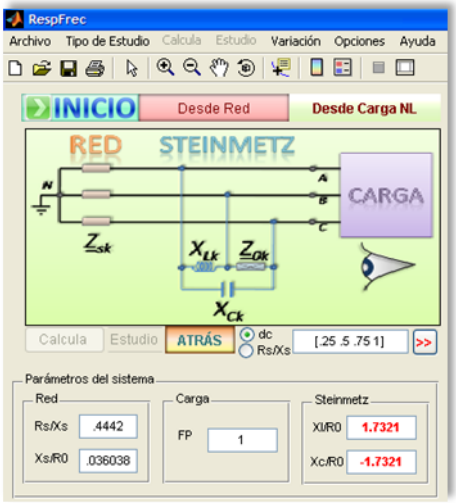

Figura D.39. Datos de entrada de la variación de parámetros para el estudio frecuencial del sistema observado desde la carga.

Ha aparecido un nuevo campo con el rótulo intercambiable (d_C o R_S/X_S), donde se muestra un vector con cuatro valores por defecto. También se visualiza un botón etiquetado "**>>**", el cual ha de ser pulsado cuando el usuario ha introducido los datos para continuar este estudio. Si se deja seleccionado d_C, aparece la Figura D.40.

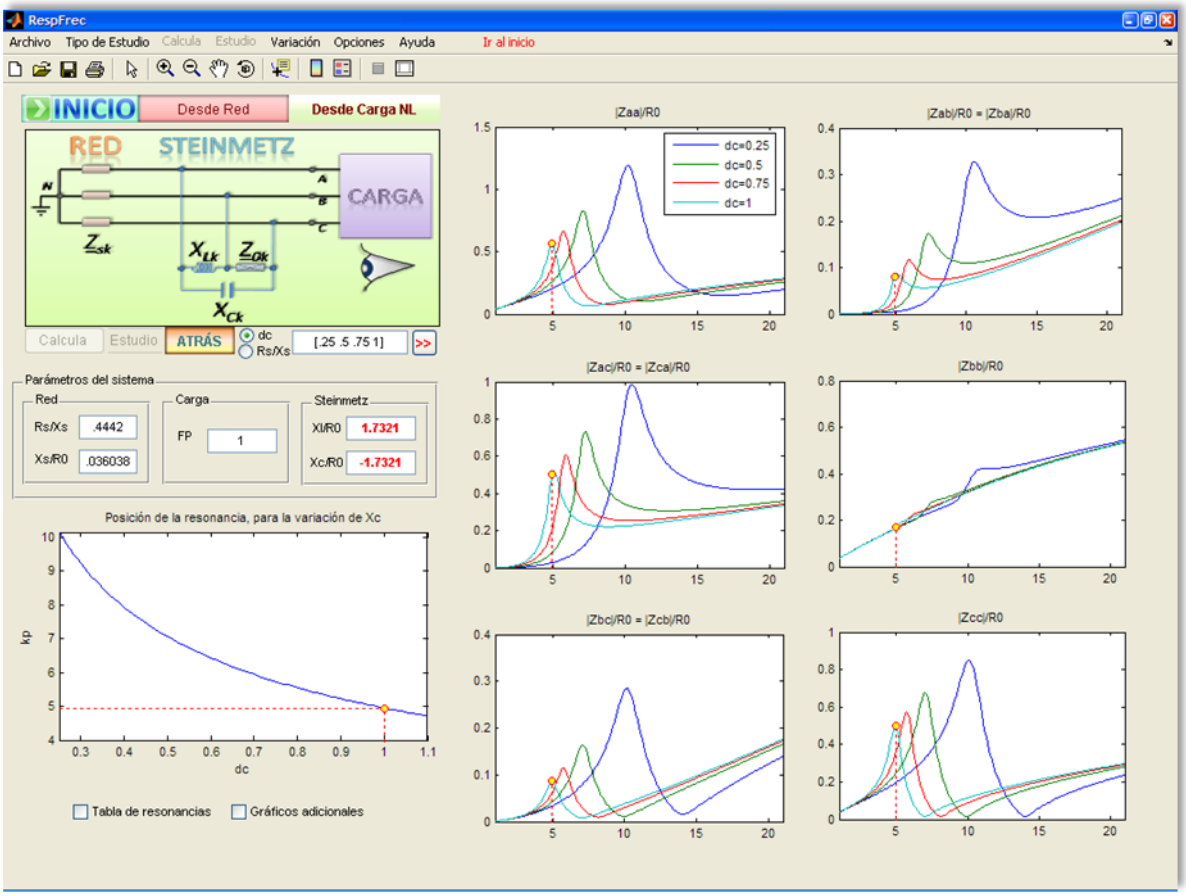

Figura D.40. Estudio frecuencial del sistema observado desde la carga, para la variación de d_C.

- En la mitad derecha de la imagen se exponen los 6 gráficos correspondientes a los módulos de las impedancias normalizadas de $\underline{\mathbf{Z}}_{Bk}/R_0$. En ellos se sitúa la localización de la resonancia k_p calculada analíticamente. En cada gráfico se representan las curvas correspondientes a cada uno de los valores de d_C, tal y como se muestra en la leyenda.
- En la parte izquierda inferior de la imagen se expone el gráfico correspondiente a la localización de la resonancia analítica para el factor de potencia actual, λ, calculada analíticamente. El punto señalador indica el punto donde se sitúa el actual valor de d_C.

Bajo este tercer gráfico se muestran dos *checkboxes*, con las siguientes funcionalidades:

- **Tabla de resonancias:** genera una nueva figura donde se muestra una tabla como la de la Figura D.41, en la que se muestran los valores numéricos de la localización de la resonancia paralelo, k_p, para cada uno de los valores de d_C. En caso de realizar este mismo estudio variando R_S/X_S, se operaría de la misma manera.

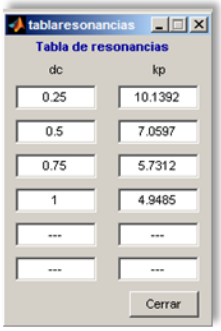

Figura D.41. Tabla de resonancias

- **Gráficos adicionales:** genera una nueva figura (ver Figura D.42), donde se muestran dos gráficos bidimensionales, con la localización de la resonancia serie, k_p, para valores genéricos de λ, d_C y X_S/R_0. Este *checkbox* sólo está activo en el caso de estudiar la variación del condensador, pues en el caso de la variación de la resistencia normalizada de la red, estos gráficos serían valores constantes.

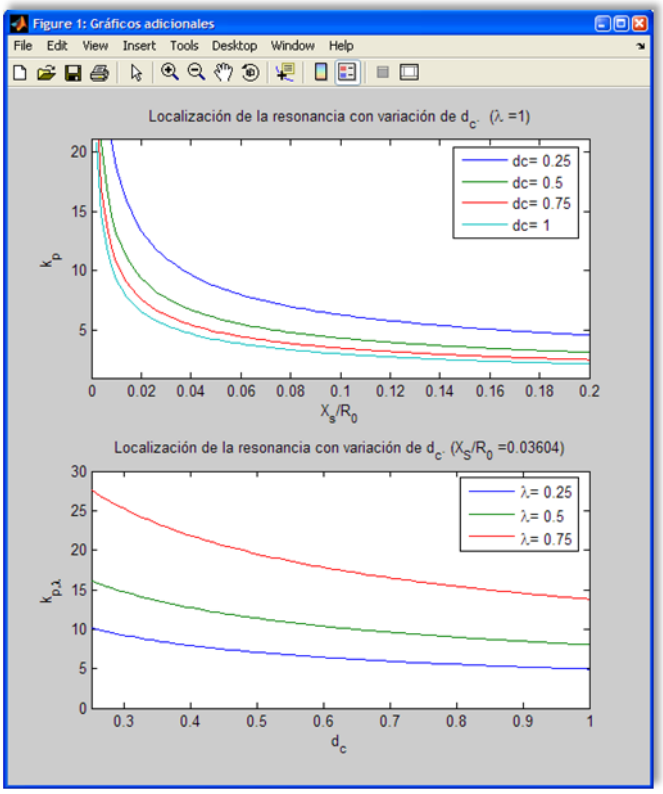

Figura D.42. Gráficos adicionales.

D.4.3 Barra superior de menú

A lo largo de la ejecución de la aplicación, el programa ofrece una línea superior de comandos, conocida como “Barra superior de menú” (ver Figura D.43). En este apartado se comentará la funcionalidad de cada uno de los campos que la conforman para la parte “Respuesta Frecuencial”.

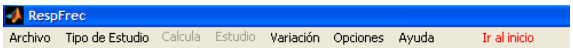

Figura D.43. Barra superior de menú.

- **Menú Archivo.** Consta, como la mayoría de programas, de las funciones propias para el manejo de configuración de datos y del salvado de imágenes (ver Figura D.44). A continuación se comenta cada campo:

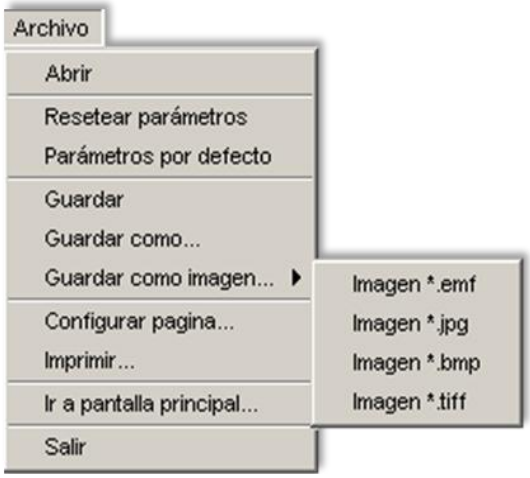

Figura D.44. Despliegue del menú Archivo

  - *Abrir.* Permite abrir una configuración de datos guardada previamente por el usuario. Por defecto, la busca en la carpeta “ArchUsuario”.
  - *Resetear parámetros.* Configura a cero todos los parámetros numéricos del formulario, tanto los visibles como los no visibles.
  - *Parámetros por defecto.* Configura con los valores por defecto todos los parámetros numéricos del formulario, tanto los visibles como los no visibles.
  - *Guardar*. Guarda la configuración de parámetros actual. En caso de utilizar por primera vez, pregunta al usuario el directorio donde almacenarlo. Por defecto, se dirige a la carpeta “ArchUsuario”.
  - *Guardar como imagen*. Este campo despliega una lista con los posibles formatos de imagen que el programa es capaz de salvar. Estos formatos son: *.emf, *.jpg, *.bmp y *.tiff.
  - *Configurar página*. Este comando, junto con el siguiente, permite configurar e imprimir la figura actual en cualquiera de las impresoras instaladas en el ordenador.
  - *Imprimir*. Este comando configura la impresión e imprime la figura actual en

cualquiera de las impresoras instaladas en el ordenador.

- Ir a pantalla principal. Cierra la actual figura y muestra el menú principal del programa.
- *Cerrar*. Cierra la aplicación.

- **Tipo de estudio.** Este campo permite seleccionar el tipo de estudio a efectuar (ver Figura D.45).

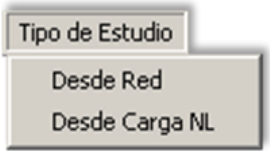

Figura D.45. Despliegue del menú Tipo de Estudio.

- *Desde Red.* Al presionarlo, queda este campo marcado con el símbolo ✓, y comienza el estudio frecuencial del sistema observado desde la red.
- *Desde Carga NL.* Al presionarlo, queda este campo marcado con el símbolo ✓, y comienza el estudio frecuencial del sistema observado desde la carga no lineal.

- **Calcula.** Este menú permite acceder a los campos referentes al cálculo del circuito Steinmetz (ver Figura D.46).

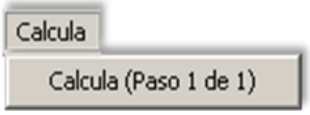

Figura D.46. Despliegue del menú Calcula.

- *Calcula (Paso 1 de 1).* Este campo ejecuta el motor interno del programa, de manera que se calculan los valores de las reactancias simetrizadoras y se generan los gráficos de impedancias o admitancias.

- **Estudio.** Este menú permite acceder a los campos referentes al estudio del circuito Steinmetz (ver Figura D.47).

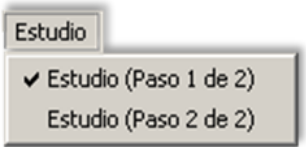

Figura D.47. Despliegue del menú Estudio.

- *Estudio (Paso 1 de 2).* Este campo abre el cuadro de parámetros para el estudio frecuencial, bien desde la red o bien desde la carga. Hasta que no es seleccionado, no se habilita el segundo campo.
- *Estudio (Paso 2 de 2).* Este campo ejecuta el motor interno del programa, de manera que se calculan y grafican las tensiones V, V_{CN} y las corrientes I_{CN}.

- **Variación.** Este menú permite acceder a los campos referentes al estudio frecuencial del circuito Steinmetz frente a la variación de parámetros (ver Figura D.48).

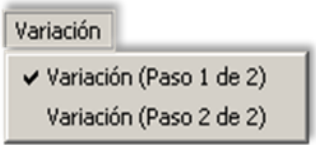

Figura D.48. Despliegue del menú Variación.

  - *Variación (Paso 1 de 2).* Este campo abre el cuadro de parámetros para el estudio frecuencial frente a la variación de parámetros, bien desde la red o bien desde la carga. Hasta que no es seleccionado, no se habilita el segundo campo.
  - *Variación (Paso 2 de 2).* Este campo ejecuta el motor interno del programa, de manera que se calculan y grafican las impedancias o admitancias del sistema en múltiples curvas, representando la variación de la variable seleccionada.
- **Opciones.** Este menú muestra las opciones de la figura (ver Figura D.49).

Figura D.49. Despliegue del menú Opciones.

  - *Editor de ejes.* Este campo ejecuta el subprograma que edita los valores de los tres ejes de cada gráfico. Para modificar el rango de los ejes, primero se ha de seleccionar el número de gráfico a modificar. Estos números aparecen en la imagen superior de la Figura D.50. Seguidamente se modifican los campos referentes a *X* e *Y* (si se trata de un gráfico bidimensional o de contorno) o los referentes a *X*, *Y* y *Z* (en caso de un gráfico de superficie).

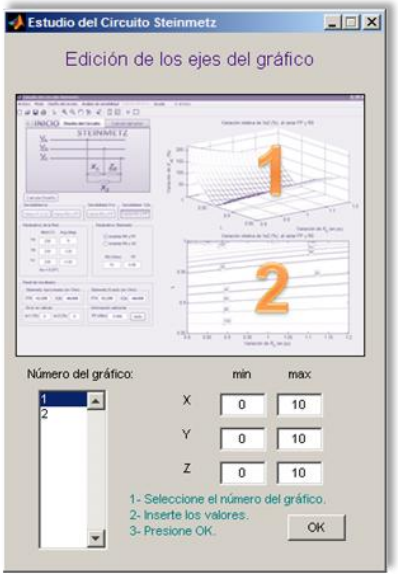

Figura D.50. Editor de los ejes de gráficos.

- *Barras de herramientas.* Este campo desactiva y oculta la barra de herramientas mostrada por defecto en la figura.
- *Barra menú adicional.* Este campo activa y visualiza la barra de menús generada por defecto por el programa. Mediante esta barra de comandos adicional, el usuario podrá editar o modificar cualquier característica de los gráficos mostrados: etiquetas, títulos, colores, tipos de líneas, puntos de vista,…

- **Ayuda.** Como la mayoría de programas, este menú proporciona documentación adicional sobre el programa (ver Figura D.51).

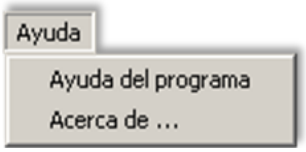

Figura D.51. Despliegue del menú Ayuda.

- *Ayuda del programa.* Este campo abre el fichero de ayuda del programa.
- *Acerca de… .* Este campo genera una ventana emergente con información adicional sobre el programa.

- **Ir al inicio.** Cierra la actual figura y muestra el menú principal del programa (ver Figura D.52).

Figura D.52. Menú Ir al Inicio.

D.5 Herramientas adicionales

Durante el trabajo con el programa, el usuario tiene a su disposición, en la mayoría de los formularios, la barra de herramientas (ver Figura D.53) que predetermina el Matlab®. A continuación explicamos el significado de cada uno de ellos.

Figura D.53. Barra de herramientas.

Grupo de iconos	Explicación
	Mediante estos iconos el usuario puede crear una nueva figura, abrir alguna previamente guardada, guardar la actual o abrir el diálogo de impresión de la actual figura. Para el manejo del presente programa no serán necesarios.
	Estos iconos permiten que el usuario explore los gráficos mostrados mediante zooms, desplazamientos y giros (este último para gráficos tridimensionales). Mediante el primer icono, el usuario puede restaurar el puntero al valor por defecto.
	Gracias a este icono, el usuario podrá conocer los valores de las coordenadas de cada uno de los puntos que conforman los gráficos, tanto bidimensionales como tridimensionales.
	Este grupo de iconos no representa gran utilidad en la presente aplicación. Los dos de la izquierda permiten insertar una leyenda o una barra de colores al eje actual. Los dos de la izquierda se utilizan para modificar la figura mostrada.

D.6 Referencias del Anexo D.

[1] IEEE Recommended Practises and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Standard 519-1992, 1992.