MANUAL DE USUARIO SOFTWARE CEM-LT

Luis Felipe Imbachi Guerrero, Fredy Alexander Jiménez Rubio,

Diego Armando Giral Ramírez y Mario Alberto Rodríguez Barrera.

Índice

1. INSTALACIÓN **4**
1.1. Sistema operativo 4
1.2. Software adicional 4

2. ARCHIVOS Y PROCEDIMIENTOS DE INSTALACIÓN **6**
2.1. Archivos de instalación carpeta 6
2.2. Procedimiento de instalación 6

3. MANUAL DE USUARIO **7**
3.1. INTRODUCCIÓN 7

4. MENÚ PRINCIPAL **8**

5. USO DEL SOFTWARE MÓDULO DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN **13**
5.1. EJEMPLO PRÁCTICO N° 1 13
5.1.1. METODOLOGÍA PARA EL USO DE LA APLICACIÓN 14
5.1.2. RESULTADOS SOFTWARE CEM-LT EJEMPLO PRÁCTICO N°1 . 23
5.2. EJEMPLO PRÁCTICO N° 2 25
5.2.1. RESULTADOS SOFTWARE CEM-LT EJEMPLO PRÁCTICO N°2 . 26
5.3. EJEMPLO PRÁCTICO N° 3 27
5.3.1. RESULTADOS SOFTWARE CEM-LT EJEMPLO PRÁCTICO N°3 . 28
5.4. EJEMPLO PRÁCTICO N° 4 30
5.4.1. RESULTADOS SOFTWARE CEM-LT EJEMPLO PRÁCTICO N°4 . 31
5.5. EJEMPLO PRÁCTICO N° 5 33
5.5.1. RESULTADOS SOFTWARE CEM-LT EJEMPLO PRÁCTICO N°5 . 34
5.6. EJEMPLO PRÁCTICO N° 6 35
5.6.1. RESULTADOS SOFTWARE CEM-LT EJEMPLO PRÁCTICO N°6 . 36

6. USO DEL SOFTWARE MÓDULO DE CAMPO ELÉCTRICO **38**
6.1. EJEMPLO PRÁCTICO N°1 38
6.1.1. METODOLOGÍA PARA EL USO DE LA APLICACIÓN 39
6.1.2. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°1 52
6.2. EJEMPLO PRÁCTICO N°2 54
6.2.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°2 55
6.3. EJEMPLO PRÁCTICO N° 3 56
6.3.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°3 57
6.4. EJEMPLO PRÁCTICO N° 4 59
6.4.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°4 60
6.5. EJEMPLO PRÁCTICO N° 5 62
6.5.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°5 63

7. USO DEL SOFTWARE MÓDULO DE CAMPO MAGNÉTICO 65
7.1. EJEMPLO PRÁCTICO N°1 65
7.1.1. METODOLOGÍA PARA EL USO DE LA APLICACIÓN 65
7.1.2. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°1 78
7.2. EJEMPLO PRÁCTICO N° 2 80
7.2.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°2 81
7.3. EJEMPLO PRÁCTICO N° 3 83
7.3.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°3 84
7.4. EJEMPLO PRÁCTICO N° 4 86
7.4.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°4 87
7.5. EJEMPLO PRÁCTICO N° 5 89
7.5.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°5 90
7.6. EJEMPLO PRÁCTICO N° 6 92
7.6.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°6 93

8. CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE 95

1. INSTALACIÓN

1.1. Sistema operativo

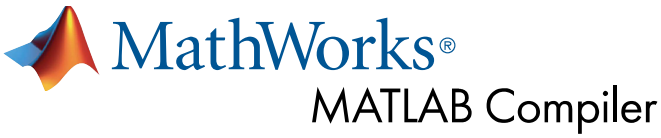
- Windows 8 y Windows 10 x 64bits (No funciona para 32bits).
- Linux: Bajo emulador (Wine).

1.2. Software adicional

MATLAB Runtime

- Verificar que MATLAB Runtime está instalado para la versión 9.9 (R2020b)
- Si MATLAB Compiler Runtime (MCR) no está instalado, tiene dos opciones:
  - Si tiene Matlab instalado, verifique la versión de Runtime, en la ventana de comandos de Matlab digite el comando ***mcrinstaller***, esta instrucción le mostrara la información acerca de la versión Runtime instalada, debe tener la versión instalada **9.9**.
  - Si la versión de Runtime es inferior a la 9.9 o no la tiene instalada, descargue la versión de Windows del Runtime de MATLAB para 64 bits desde el sitio Web de MathWorks:
    https://la.mathworks.com/products/compiler/matlab-runtime.html

Para más información sobre el Runtime de MATLAB y el instalador de MATLAB Runtime, véase "Documentación del instalador de MATLAB Runtime " del Centro de documentación de MathWorks.



MATLAB Runtime

Ejecute aplicaciones compiladas o componentes de MATLAB sin instalar MATLAB

MATLAB Runtime es un conjunto independiente de librerías compartidas que permite la ejecución de aplicaciones o componentes de MATLAB compilados. Cuando se utilizan conjuntamente, MATLAB, MATLAB Compiler y MATLAB Runtime le permiten crear y distribuir aplicaciones numéricas o componentes de software de forma rápida y segura.

Para descargar e instalar MATLAB Runtime:

1. Haga clic en la versión y la plataforma de la tabla de abajo correspondiente a la aplicación o el componente que esté usando. La versión de MATLAB Runtime está vinculada a la versión de MATLAB.

   Nota: Puede encontrar esta información en el archivo `readme.txt` que acompaña a la aplicación o el componente.

2. Guarde el archivo instalador de MATLAB Runtime en el ordenador en el que tiene previsto ejecutar la aplicación o el componente.

3. Haga doble clic en el instalador y siga las instrucciones que aparecen en el asistente de instalación.

Consulte más información en la documentación del instalador de MATLAB Runtime.

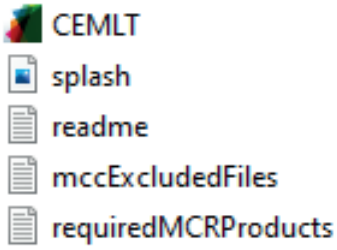
Figura 1: Documento del instalador de **MATLAB Runtime**

2. ARCHIVOS Y PROCEDIMIENTOS DE INSTALACIÓN

Nota: Si desea abrir la aplicación sin instalar el software en el ordenador, se recomienda ir a la carpeta **for_testing**

2.1. Archivos de instalación carpeta

1. **Ejecutable del software:** CEMLT.exe
2. **Documentación de interés:** readme.txt
3. **Imagen:**



2.2. Procedimiento de instalación

1. Verificar la versión de **MATLAB Runtime**
   - Si la versión es **9.9** no es necesario realizar ninguna instalación adicional.
   - Si la versión es inferior a la **9.9** descargue e instale la versión de Windows del Runtime de MATLAB para 64 bits desde el sitio Web de MathWorks: https://la.mathworks.com/products/compiler/matlab-runtime.html
2. Ejecutar el archivo **CEMLT.exe.** El software es un archivo portable, por lo tanto, no quedara instalado en el computador, cada vez que se requiera utilizar solo se debe ejecutar el archivo **CEMLT.exe.**

Dependiendo de las especificaciones técnicas del equipo, el software tardara un mayor o menor tiempo en abrir el programa.

3. MANUAL DE USUARIO

3.1. INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene como objetivo presentar al usuario la interfaz del **menú principal** y los módulos asociados a: **líneas de transmisión**, **campo eléctrico en líneas de transmisión** y **campo magnético en líneas de transmisión**. Que mediante una metodología en donde se ilustran imágenes tomadas de la aplicación **CEM-LT**, el usuario conozca acerca de la aplicación, como también pueda hacer un buen uso de la herramienta.

De igual forma se plantea una metodología que propone ejemplos prácticos para los diferentes módulos. Esta metodología se desarrolla para el ejemplo práctico N°1 de cada modulo, de esa forma para los demás ejemplos se muestran los resultados con el fin de que el usuario pueda replicar estos, haciendo uso del del software **CEM-LT**. Como método para verificar los valores que se obtuvieron en en cada ejemplo de los módulos de **campo eléctrico en líneas de transmisión** y **campo magnético en líneas de transmisión**, se hace uso de la herramienta computacional **COMSOL Multiphysics**, de la cual se presentan los resultados obtenidos para el cálculo del campo eléctrico y campo magnético en el estudio del dominio de la frecuencia.

4. MENÚ PRINCIPAL

Inicialmente al abrir la aplicación se muestra la ventana principal, en ella se encuentra el menú de la aplicación, el cual permitirá al usuario moverse por los diferentes módulos que componen el software **CEM-LT**. El menú principal se compone por dos paneles, uno de ellos es el panel del **Control de la Aplicación** y el otro es el panel del **Módulos CEM-LT**, en la Figura 2 se observa el menú principal.

De igual forma se proponen ejemplos prácticos con líneas en diferentes configuraciones y de circuito simple, considerando en algunos casos conductores de guarda, éstos ejemplos se desarrollaron previamente en software **CEM-LT**.



Figura 2: Menú principal software **CEM-LT**

La Figura 3 se observa la interfaz del panel **Control de la Aplicación**. A continuación se describen las características del primer panel el cual se compone por tres botones:

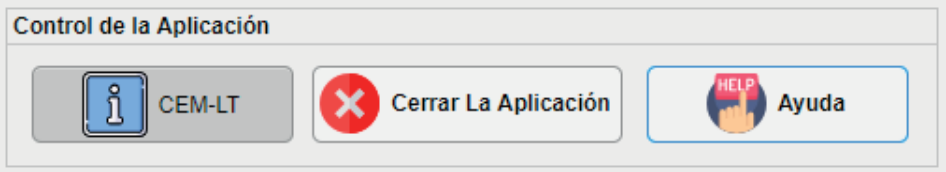


Figura 3: Interfaz del panel **Control de la Aplicación** en el menú principal

- Botón **CEM-LT** el cual muestra información acerca de los creadores de la aplicación, en la Figura 4 se aprecia la información que encontrara el usuario al dar clic sobre el botón **CEM-LT**.

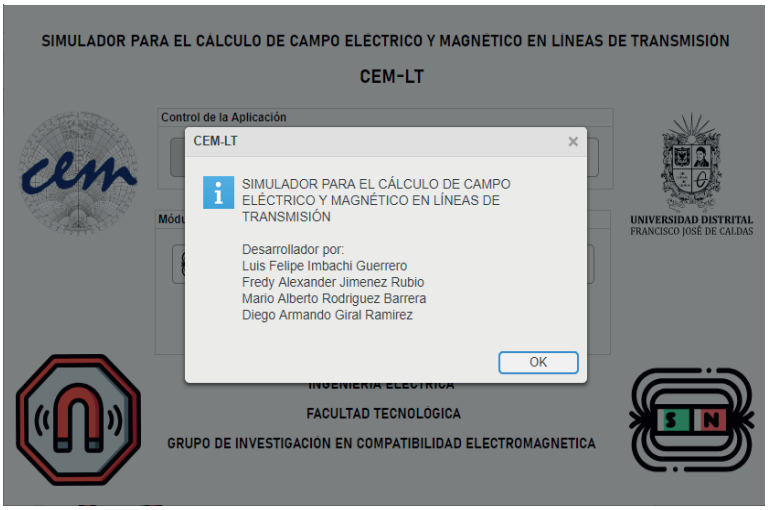


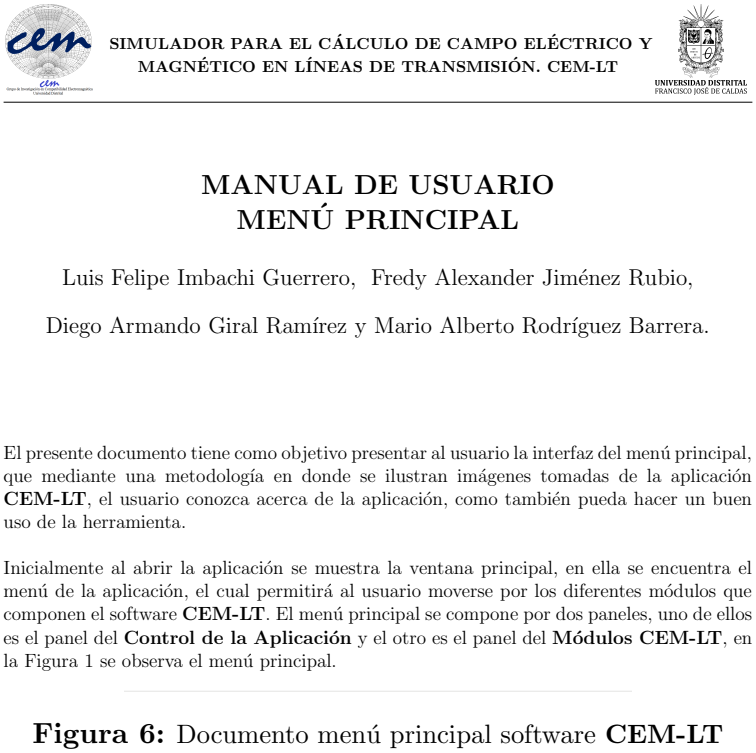
Figura 4: Mensaje información de los creadores software **CEM-LT**

- Botón **Cerrar la aplicación**, de igual forma al dar clic sobre éste botón se desplegara un mensaje de advertencia, el cual tiene como finalidad indicarle al usuario si realmente desea cerrar la aplicación Figura 5.



Figura 5: Mensaje cerrar aplicación software **CEM-LT**

- Botón **Ayuda**, al dar clic sobre éste botón permitirá que e usuario tenga acceso al presente documento, de esa forma el usuario podrá visualizar en un documento tipo **pdf** el manual de usuario para el menú principal, como se observa en la Figura 6.


SIMULADOR PARA EL CÁLCULO DE CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN. CEM-LT

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

MANUAL DE USUARIO
MENÚ PRINCIPAL

Luis Felipe Imbachi Guerrero, Fredy Alexander Jiménez Rubio,

Diego Armando Giral Ramírez y Mario Alberto Rodríguez Barrera.

El presente documento tiene como objetivo presentar al usuario la interfaz del menú principal, que mediante una metodología en donde se ilustran imágenes tomadas de la aplicación **CEM-LT**, el usuario conozca acerca de la aplicación, como también pueda hacer un buen uso de la herramienta.

Inicialmente al abrir la aplicación se muestra la ventana principal, en ella se encuentra el menú de la aplicación, el cual permitirá al usuario moverse por los diferentes módulos que componen el software **CEM-LT**. El menú principal se compone por dos paneles, uno de ellos es el panel del **Control de la Aplicación** y el otro es el panel del **Módulos CEM-LT**, en la Figura 1 se observa el menú principal.

Figura 6: Documento menú principal software **CEM-LT**

A continuación se describen las características del segundo panel que incluye el menú principal, en la Figura 7 se observa la interfaz del panel **Módulos CEM-LT**. Éste panel se compone por tres botones que permitirán al usuario acceder a cada modulo:



Figura 7: Interfaz del panel **Módulos CEM-LT** en el menú principal

- Botón **Módulo de Campo Eléctrico**, el usuario solo debe dar clic sobre el botón del modulo de campo eléctrico para que la aplicación lo direccione al destino seleccionado, la Figura 8 muestra la interfaz del modulo de campo eléctrico.

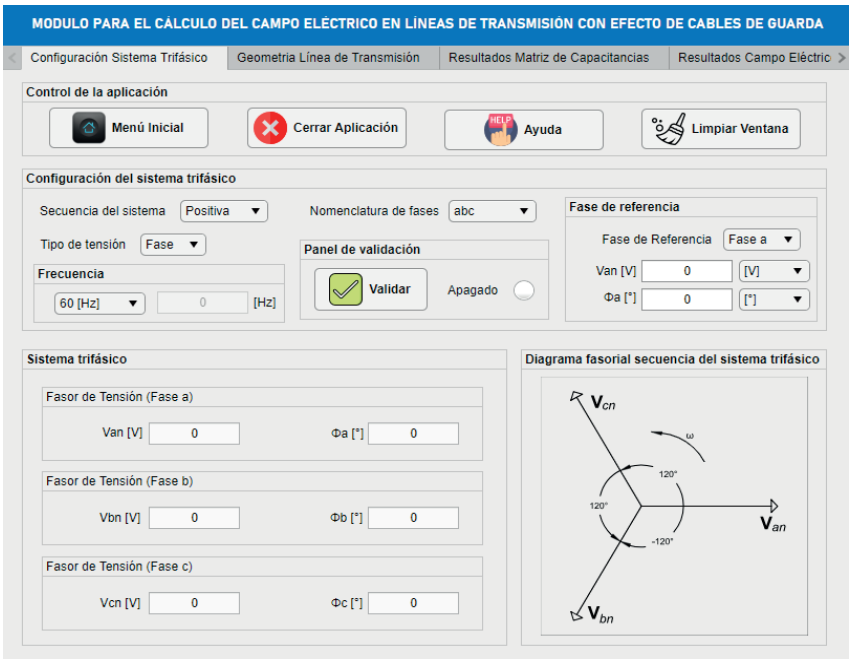


Figura 8: Interfaz del módulo de campo eléctrico

- Botón **Módulo de Campo Magnético**, el usuario solo debe dar clic sobre el botón del modulo de campo magnético para que la aplicación lo direccione al destino seleccionado, la Figura 9 muestra la interfaz del modulo de campo magnético.

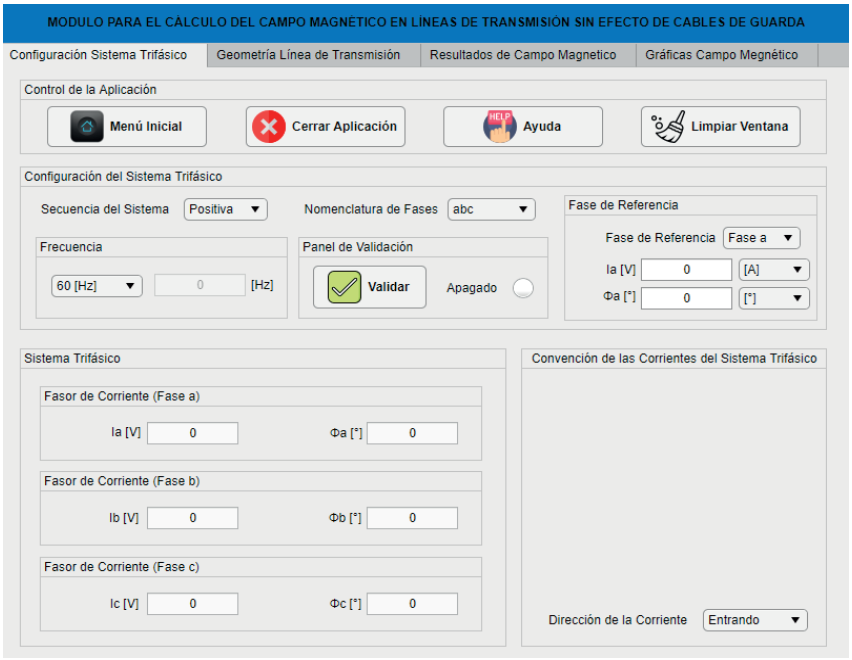


Figura 9: Interfaz del módulo de campo magnético

- Botón **Módulo de Línea de Transmisión**, el usuario solo debe dar clic sobre el botón del modulo de línea de transmisión para que la aplicación lo direccione al destino seleccionado, la Figura 10 muestra la interfaz del modulo de línea de transmisión.

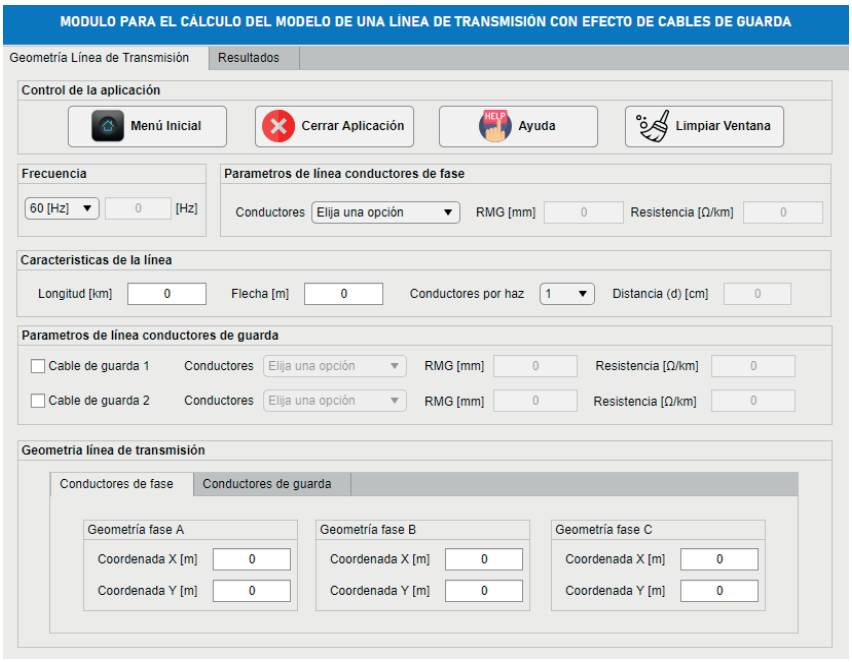


Figura 10: Interfaz del módulo de línea de transmisión

5. USO DEL SOFTWARE MÓDULO DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN

5.1. EJEMPLO PRÁCTICO N° 1

Considere una línea de transmisión, con la configuración mostrada en la Figura 11 la cual opera a una frecuencia de $60[Hz]$. La Tabla 1 presenta las características de los conductores de fase, la longitud de la línea es de $65[km]$ y la resistividad promedio de $100[\Omega - m]$ correspondiente a un terreno con tipo de suelo húmedo (tierra media).

Determine:

- Modelo serie por fase y su equivalente en redes de secuencia para una línea transpuesta y no transpuesta.
- Capacitancias por fase y su equivalente en redes de secuencia para una línea transpuesta y no transpuesta.
- Circuito equivalente para una línea transpuesta.

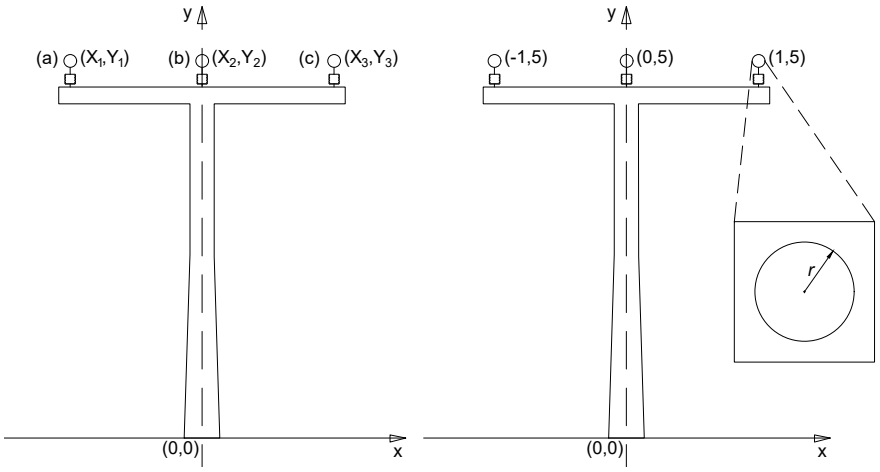


Figura 11: Torre de transmisión en configuración horizontal (Elaboración Propia)

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (30/7)	Eagle	$556,5$	$10,00$	$0,121\frac{\Omega}{km}$

Tabla 1: Características del conductor ejemplo práctico N°1.

5.1.1. METODOLOGÍA PARA EL USO DE LA APLICACIÓN

Paso 1: elegir el marco de referencia para el problema en cuestión, la Figura 12 muestra 3 posibles marcos de referencia que el usuario puede elegir. Cabe resaltar que la elección del mismo es totalmente arbitraria, el resultado será el mismo independientemente de la elección del marco de referencia, pero es absolutamente necesario establecerlo.

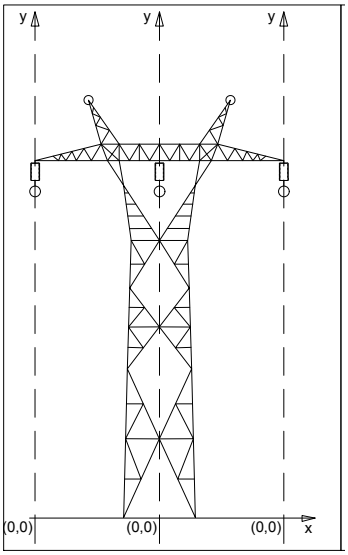


Figura 12: Marco de referencia Ejercicio práctico N°1 (Elaboración Propia)

NOTA Para efectos del presente ejercicio el marco de referencia elegido es tomar como eje de coordenadas **(0,0)** la fase central.

Paso 2: una vez se elige el marco de referencia de se procede a establecer una nomenclatura para identificar los conductores de fase, y así asignar las coordenadas según el marco de referencia y las distancias entre los conductores y tierra, tal como se muestra en la Figura 13.

Paso 3: Establecer las distancias entre los conductores de fase y la altura de ellos según el marco de referencia elegido Figura 11, la Tabla 2 presenta la información correspondiente a las coordenadas del ejemplo planteado.

Fase A [m]	Fase B [m]	Fase C [m]
$(-1,5)$	$(0,5)$	$(1,5)$

Tabla 2: Resumen de coordenadas conductores de fase ejemplo practico N° 1.

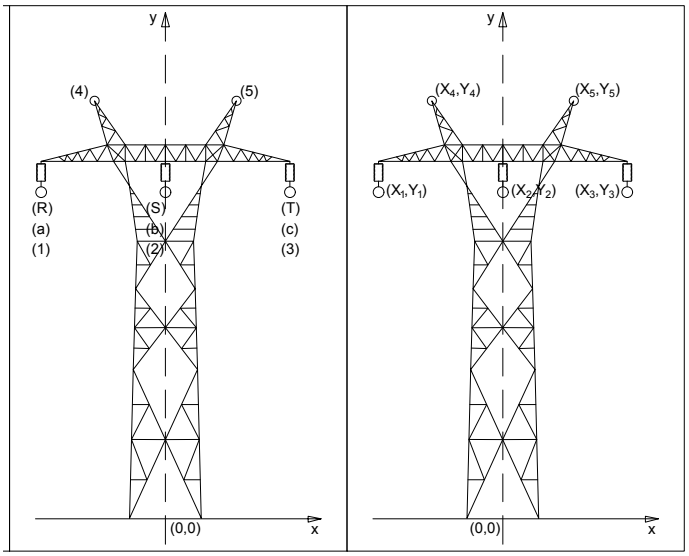


Figura 13: Nomenclatura para los conductores de fase, incluyendo la asignación de las coordenadas según el marco de referencia elegido en paso 1. (Elaboración Propia)

Paso 4: una vez establecidos los datos asociados a la geometría de la línea, se procede a ingresar los parámetros requeridos en la interfaz del modulo de línea de transmisión del programa **CEM-LT** .

Inicialmente la interfaz del modulo de línea de transmisión muestra la ventana de **Geometría línea de transmisión** como se observa en la Figura 14, ésta ventana cuenta con seis paneles los cuales se explicaran a continuación:

1. Panel **Control de la aplicación**, éste panel se compone por cuatro botones Figura 15:

   - Botón **Menú inicial**, al dar clic sobre éste botón el usuario podrá devolverse al menú principal de la aplicación.
   - Botón **Cerrar aplicación**, al dar clic sobre éste botón se desplegara un mensaje de advertencia, el cual tiene como finalidad indicarle al usuario si realmente desea cerrar la aplicación.
   - Botón **Ayuda**, al dar clic sobre éste botón permitirá que e usuario tenga acceso al manual de usuario para el módulo de línea de transmisión, el cual es un documento tipo **pdf**.
   - Botón **Limpiar ventana**, al dar clic sobre éste botón, la aplicación mostrara un mensaje que le indicara al usuario si desea volver cero los parámetros configurados.

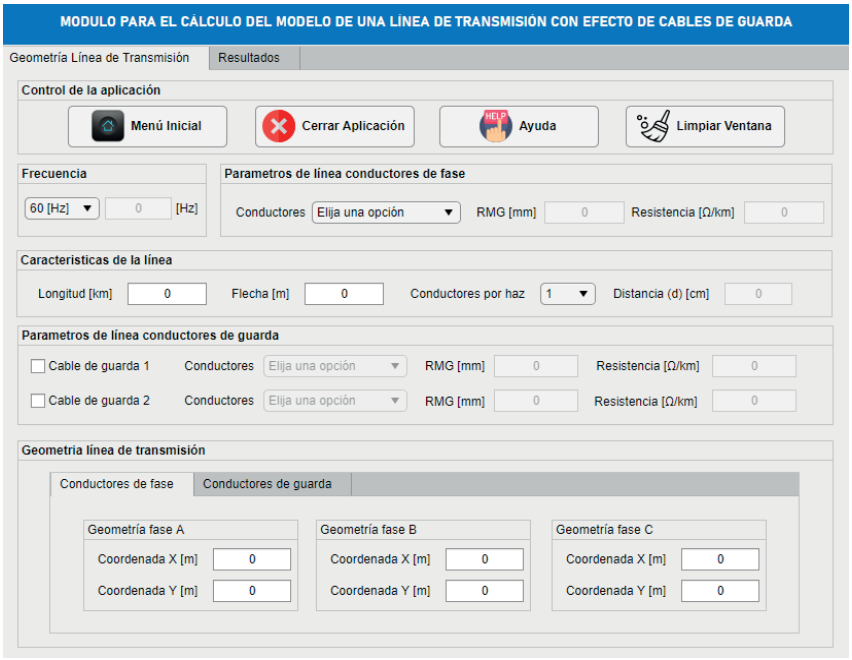


Figura 14: Interfaz ventana **Geometría línea de transmisión**.

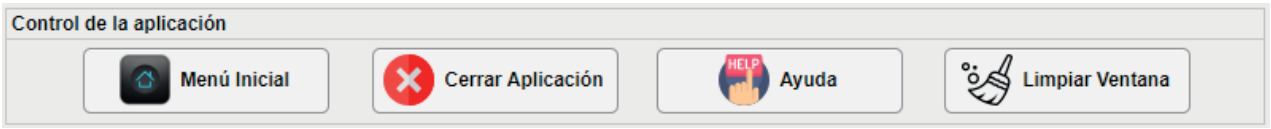


Figura 15: Panel **Control de la aplicación** de la ventana **Geometría línea de transmisión**.

2. Panel **Frecuencia**, el software permite seleccionar entre las frecuencias industriales **60 [Hz]** y **50[Hz]**, como también habilita la opción **Otra**, que ofrece la posibilidad de ingresar otro valor para la frecuencia del sistema Figura 16.

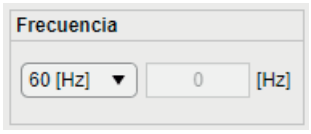


Figura 16: Panel **Frecuencia** de la ventana **Geometría línea de transmisión**.

3. Panel **Parámetros de línea conductores de fase** Figura 17, éste panel permite seleccionar dos opciones:

   - **Ingresar conductores**, ésta opción habilita las ventanas **RMG** y **Resistencia** del conductor, permitiendo que el usuario ingrese los valores de forma manual.
   - **Librería fabricante**, ésta opción despliega un ventana que tiene una librería de

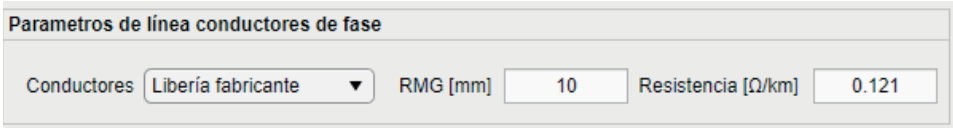


Figura 17: Panel **Parámetros de línea conductores de fase** de la ventana **Geometría línea de transmisión**.

conductores del fabricante **CENTELSA**.

El usuario solo debe seleccionar en el panel **Información relevante del conductor**, el tipo de cable (**AAC**, **AAAC**, **ACSR**, **ACSR/AW**), y automáticamente en la ventana inferior se van a cargar los conductores.

Para cargar el conductor, el usuario debe dar clic sobre el número que se encuentra en la primera columna de la tabla, luego ir al botón **Cargar conductor** y dar clic sobre él, para devolverse a la ventana de **Geometría línea de transmisión**, con los valores de **RMG** y **Resistencia** del conductor seleccionado en la librería.

Nota: La Figura 17 muestra los valores cargados de la **Librería de conductores**, y la Figura 18 muestran los datos seleccionados en la ventana **Librería de conductores** con los valores cargados para el ejemplo practico N°1.

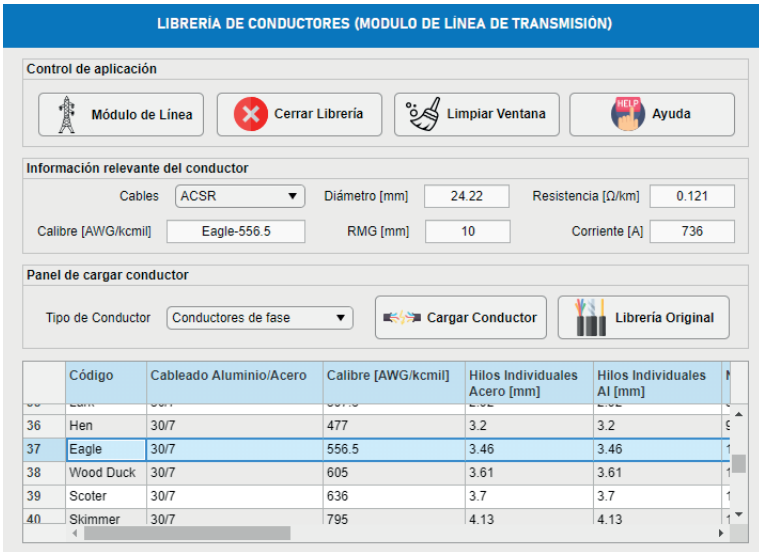


Figura 18: Ventana **Librería conductores** módulo de línea transmisión.

4. Panel **Características de la línea** Figura 19, éste panel permite que el usuario introduzca parámetros como: **longitud de la línea**, la **flecha** del conductor, también habilita la opción de introducir hasta diez **conductores por haz** y la **distancia** de separación de los conductores por haz.

   Nota: La Figura 19 muestra los valores configurados en el panel para el ejemplo práctico N°1.

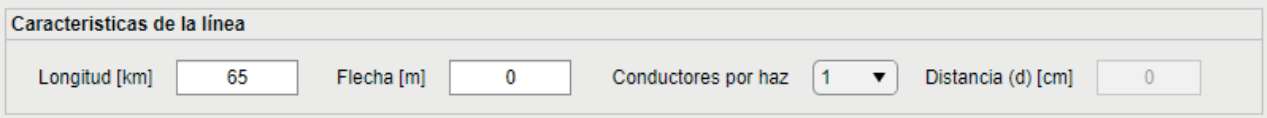


Figura 19: Panel **Características de la línea** de la ventana **Geometría línea de transmisión**.

5. Panel **Parámetros de línea conductores de guarda** Figura 20, éste panel permite que el usuario habilite si la configuración de la línea tiene uno o dos cables de guarda, de esa forma el usuario puede introducir los parámetros de la línea como el **RMG** y **Resistencia** eléctrica del conductor.

   Cabe resaltar que al seleccionar uno o dos cables de guarda en el panel de **Parámetros de línea conductores de guarda**, automáticamente en el panel de **Geometría de la línea** se habilitaran las ventanas que permiten ingresar las coordenadas de los conductores de guarda.

   Nota: Ya que la configuración de la línea de transmisión del ejemplo practico N°1, no contempla cables de guarda, no es necesario configurar el panel de la Figura 20.

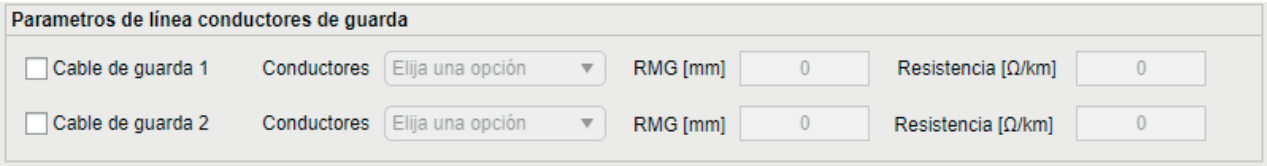


Figura 20: Panel **Parámetros de línea conductores de guarda** de la ventana **Geometría línea de transmisión**.

6. Panel **Geometría línea de transmisión** Figura 21, éste panel permite que el usuario ingrese las coordenadas de los conductores de fase y de guarda dependiendo el marco de referencia seleccionado.

   Nota: La Figura 21 muestra los valores correspondientes a las coordenadas de los conductores del ejemplo practico N°1.

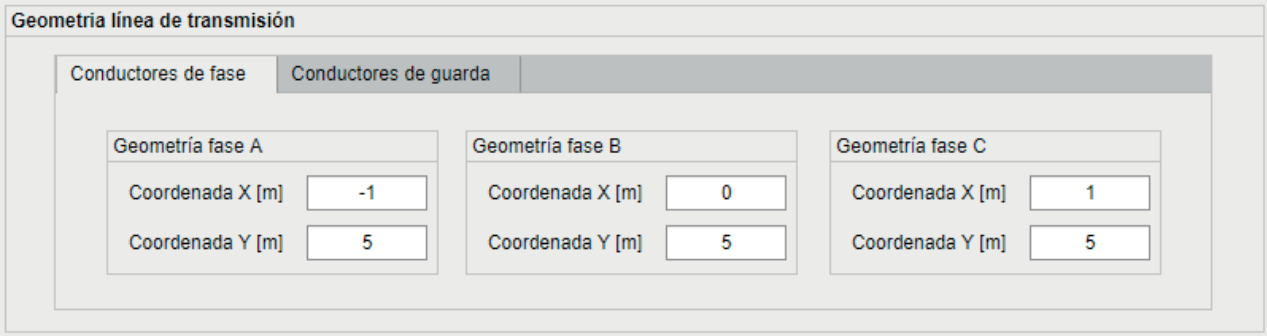


Figura 21: Panel **Geometría línea de transmisión** del modulo de la línea de transmisión.

Luego de haber parametrizado los paneles de la ventana de **Geometría línea de transmisión**, el usuario se debe de dirigir a la pestaña de **Resultados**, la Figura 22 muestra la ventana de **Resultados**, ésta se compone por un panel de **Control de la aplicación** visto anteriormente, otro panel de **Configuración de la línea** y una ventana en donde se visualizan los resultados obtenidos por el software **CEM-LT**.



Figura 22: Ventana **Resultados** del modulo de la línea de transmisión.

En el panel de **Configuración de la línea** Figura 23, se debe seleccionar el tipo de línea del sistema (**Transpuesta** ó **No transpuesta**), también es necesario configurar la **Resistividad del terreno**, para ésto se debe seleccionar el tipo de suelo de las opciones que se encuentran disponibles, automáticamente la aplicación va a cargar el valor relacionado a la opción escogida.

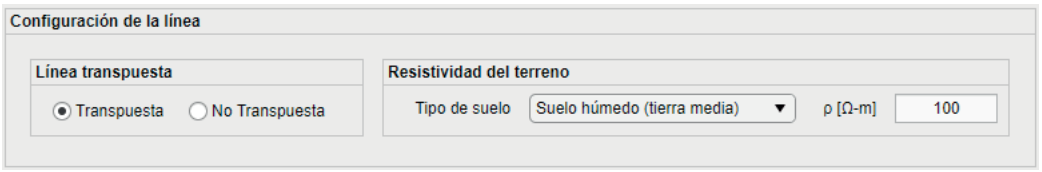


Figura 23: Panel **Configuración de línea** de la ventana **Resultados**.

Nota: La Figura 23 muestra los valores correspondientes a los parámetros dados en el ejemplo practico N°1.

Ya configurado el tipo de línea y la resistividad del terreno, el usuario se debe de dirigir al botón calcular y dar clic sobre él. En la parte inferior de la ventana de resultados se muestran los valores correspondientes a:

- Matriz de impedancias por fase $\mathbf{Z_{abc}}$



Figura 24: Resultados matriz $\mathbf{Z_{abc}}$ ejemplo práctico N°1

- Matriz de impedancias en equivalentes de secuencia $\mathbf{Z_{012}}$



Figura 25: Resultados matriz $\mathbf{Z_{012}}$ ejemplo práctico N°1

- Matriz de capacitancias por fase $\mathbf{C_{abc}}$



Figura 26: Resultados matriz $\mathbf{C_{abc}}$ ejemplo práctico N°1

- Matriz de capacitancias en equivalentes de secuencia $\mathbf{C_{012}}$

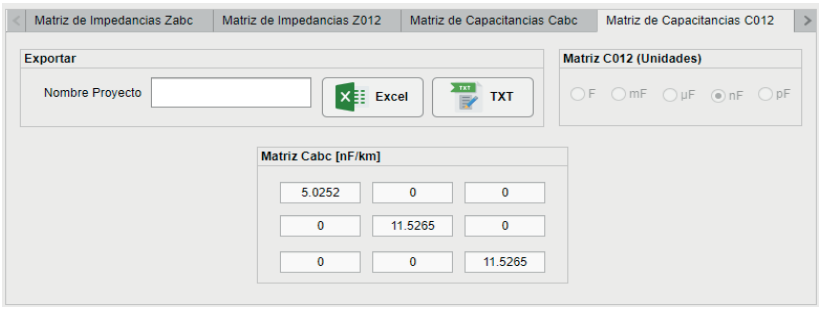


Figura 27: Resultados matriz $\mathbf{C_{012}}$ ejemplo práctico N°1

- Circuito equivalente del sistema, para la secuencia positiva, negativa y cero.

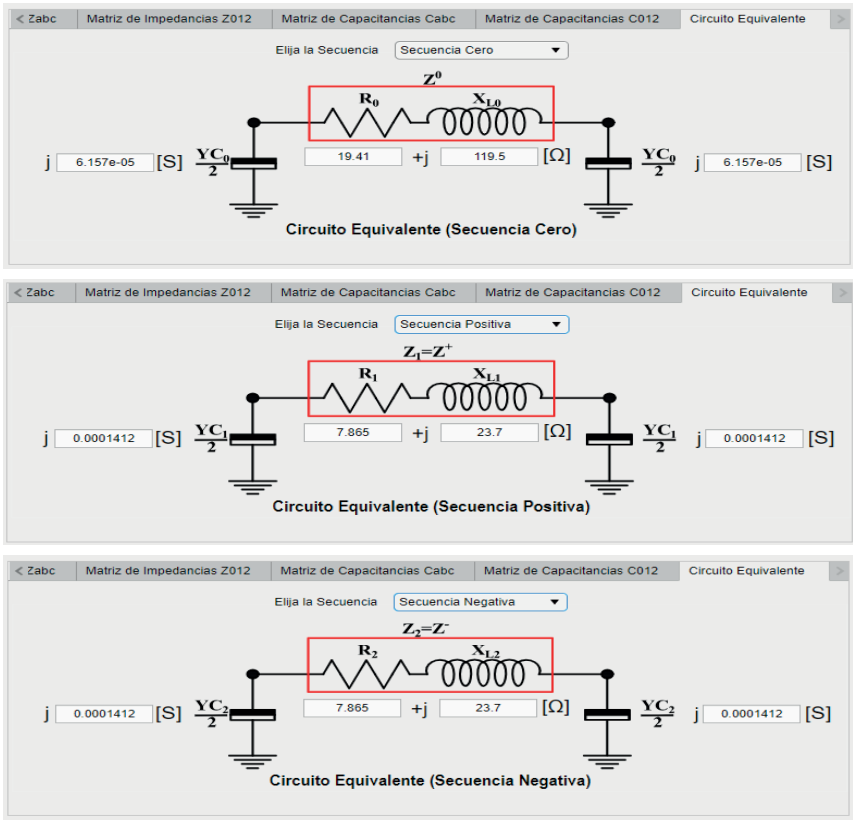


Figura 28: Circuitos equivalentes del sistema ejemplo práctico N°1

Finalmente si el usuario desea exportar los valores calculados, el usuario se debe de dirigir al panel **Exportar** Figura 29, en donde se le pide ingresar el **Nombre del Proyecto**, luego se debe de dirigir al tipo de archivo que desee, ya sea archivos tipo **Excel** ó **TXT**.

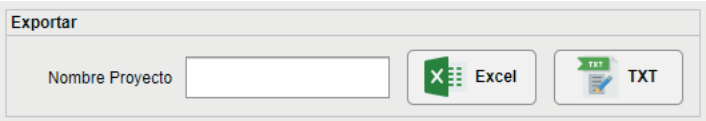


Figura 29: Panel **Exportar** de la ventana **Resultados**.

Al dar clic sobre el tipo de archivo seleccionado, se abrirá la ventana **Guardar como**, en donde se debe de seleccionar la ruta para guardar una carpeta creada automáticamente con el nombre **App CEM-LT**, que contiene una sub-carpeta con el **Nombre del Proyecto** dentro de ésta carpeta se encuentra el archivo exportado, luego de esto se mostrara un mensaje informativo de **Exportación exitosa**, el cual garantiza que el documento ha sido exportado.

5.1.2. RESULTADOS SOFTWARE CEM-LT EJEMPLO PRÁCTICO N°1

Línea transmisión transpuesta

Impedancias

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 0{,}1802 + \mathbf{j}0{,}8558 & 0{,}0592 + \mathbf{j}0{,}4912 & 0{,}0592 + \mathbf{j}0{,}4912 \\ 0{,}0592 + \mathbf{j}0{,}4912 & 0{,}1802 + \mathbf{j}0{,}8558 & 0{,}0592 + \mathbf{j}0{,}4912 \\ 0{,}0592 + \mathbf{j}0{,}4912 & 0{,}0592 + \mathbf{j}0{,}4912 & 0{,}1802 + \mathbf{j}0{,}8558 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km}\right]$$

$$[Z_{012}] = \begin{bmatrix} 0{,}2987 + \mathbf{j}1{,}8381 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}1210 + \mathbf{j}0{,}3646 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}1210 + \mathbf{j}0{,}3646 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km}\right]$$

Capacitancias

$$[C_{abc}] = \begin{bmatrix} 9,359 & -2,167 & -2,167 \\ -2,167 & 9,359 & -2,167 \\ -2,167 & -2,167 & 9,359 \end{bmatrix} \left[\frac{nF}{km}\right]$$

$$[C_{012}] = \begin{bmatrix} 5,03 & 0 & 0 \\ 0 & 11,53 & 0 \\ 0 & 0 & 11,53 \end{bmatrix} \left[\frac{nF}{km}\right]$$

Circuito equivalente

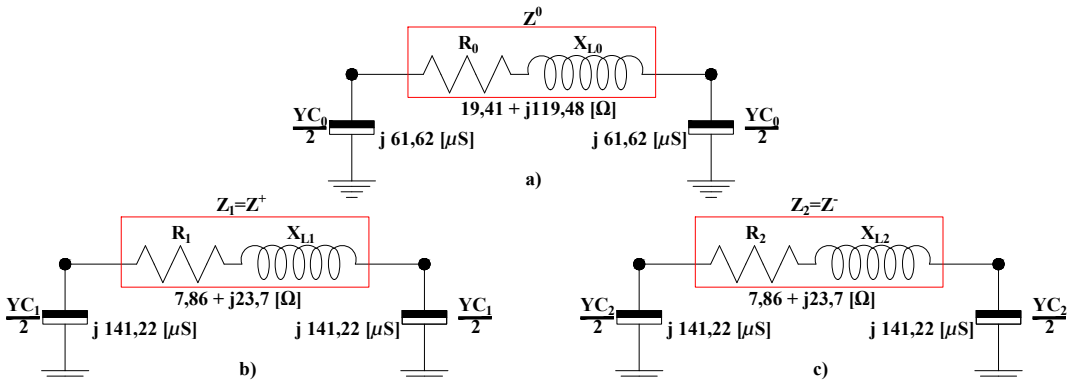


Figura 30: Circuito equivalente secuencia: **a)** cero, **b)** positiva **c)** negativa (Elaboración Propia)

Línea transmisión No transpuesta

Impedancias

$$\left[Z_{abc}\right] = \begin{bmatrix} 0{,}1802 + \mathbf{j}0{,}8558 & 0{,}0592 + \mathbf{j}0{,}5086 & 0{,}0592 + \mathbf{j}0{,}4563 \\ 0{,}0592 + \mathbf{j}0{,}5086 & 0{,}1802 + \mathbf{j}0{,}8558 & 0{,}0592 + \mathbf{j}0{,}5086 \\ 0{,}0592 + \mathbf{j}0{,}4563 & 0{,}0592 + \mathbf{j}0{,}5086 & 0{,}1802 + \mathbf{j}0{,}8558 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km}\right]$$

$$\left[Z_{012}\right] = \begin{bmatrix} 0{,}2987 + \mathbf{j}1{,}8381 & 0{,}0151 - \mathbf{j}0{,}0087 & -0{,}0151 - \mathbf{j}0{,}0087 \\ -0{,}0151 - \mathbf{j}0{,}0087 & 0{,}1210 + \mathbf{j}0{,}3646 & -0{,}0302 + \mathbf{j}0{,}0174 \\ 0{,}0151 - \mathbf{j}0{,}0087 & 0{,}0302 + \mathbf{j}0{,}0174 & 0{,}1210 + \mathbf{j}0{,}3646 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km}\right]$$

Capacitancias

$$\left[C_{abc}\right] = \begin{bmatrix} 9,246 & -2,657 & -1,293 \\ -2,657 & 9,828 & -2,657 \\ -1,293 & -2,657 & 9,246 \end{bmatrix} \left[\frac{nF}{km}\right]$$

$$\left[C_{012}\right] = \begin{bmatrix} 5,04 & 0{,}13 & 0{,}13 \\ 0{,}13 & 11,64 & -0{,}55 \\ 0{,}13 & -0{,}55 & 11,64 \end{bmatrix} \left[\frac{nF}{km}\right]$$

5.2. EJEMPLO PRÁCTICO N° 2

Considere una línea de transmisión, con la configuración mostrada en la Figura 31 la cual opera a una frecuencia de $60[Hz]$. La línea esta compuesta por 2 conductores en haz, con 1 cable de guarda. La Tabla 3 presenta las características de los conductores de fase y la Tabla 4 presenta las características de los conductores de guarda, la longitud de la línea es de $5[km]$ y la resistividad promedio de $100[\Omega - m]$. correspondiente a un terreno con tipo de suelo húmedo (tierra media).

Determine para una línea transpuesta:

- Modelo serie por fase y su equivalente en redes de secuencia.
- Capacitancias por fase y su equivalente en redes de secuencia.
- Circuito equivalente.

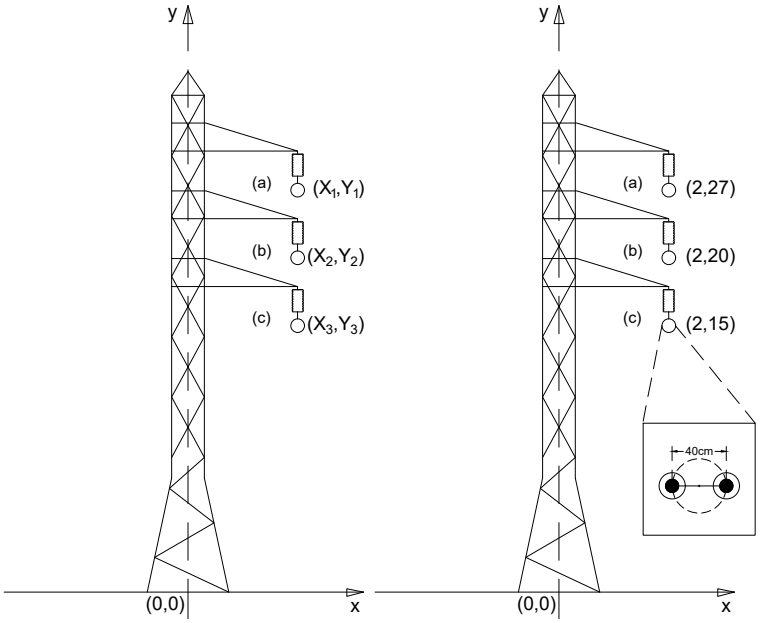


Figura 31: Torre de transmisión con 2 conductores en haz (Elaboración Propia)

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (24/7)	Rook	636	$9,96$	$0,107\frac{\Omega}{km}$

Tabla 3: Características del conductor de fase ejemplo práctico N°2.

Conductor de guarda				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
AAC (7)	Aster	2/0	$3,81$	$0,521\frac{\Omega}{km}$

Tabla 4: Características del conductor de guarda ejemplo práctico N°2.

Siguiendo la metodología para el uso de la aplicación (**CEM-LT**) descrita en el ejemplo práctico N°1, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el ejemplo práctico N°2.

5.2.1. RESULTADOS SOFTWARE CEM-LT EJEMPLO PRÁCTICO N°2

Línea transmisión transpuesta

Impedancias

$$\left[Z_{abc}\right] = \begin{bmatrix} 0{,}136 + \mathbf{j}0{,}61 & 0{,}082 + \mathbf{j}0{,}25 & 0{,}082 + \mathbf{j}0{,}25 \\ 0{,}082 + \mathbf{j}0{,}25 & 0{,}136 + \mathbf{j}0{,}61 & 0{,}082 + \mathbf{j}0{,}25 \\ 0{,}082 + \mathbf{j}0{,}25 & 0{,}082 + \mathbf{j}0{,}25 & 0{,}136 + \mathbf{j}0{,}61 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km}\right]$$

$$\left[Z_{012}\right] = \begin{bmatrix} 0{,}3006 + \mathbf{j}1{,}1108 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}053587 + \mathbf{j}0{,}3601 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}0535 + \mathbf{j}0{,}3601 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km}\right]$$

Capacitancias

$$\left[C_{abc}\right] = \begin{bmatrix} 9,858 & -1,826 & -1,826 \\ -1,826 & 9,858 & -1,826 \\ -1,826 & -1,826 & 9,858 \end{bmatrix} \left[\frac{nF}{km}\right]$$

$$\left[C_{012}\right] = \begin{bmatrix} 6,21 & 0 & 0 \\ 0 & 11,68 & 0 \\ 0 & 0 & 11,68 \end{bmatrix} \left[\frac{nF}{km}\right]$$

Circuito equivalente

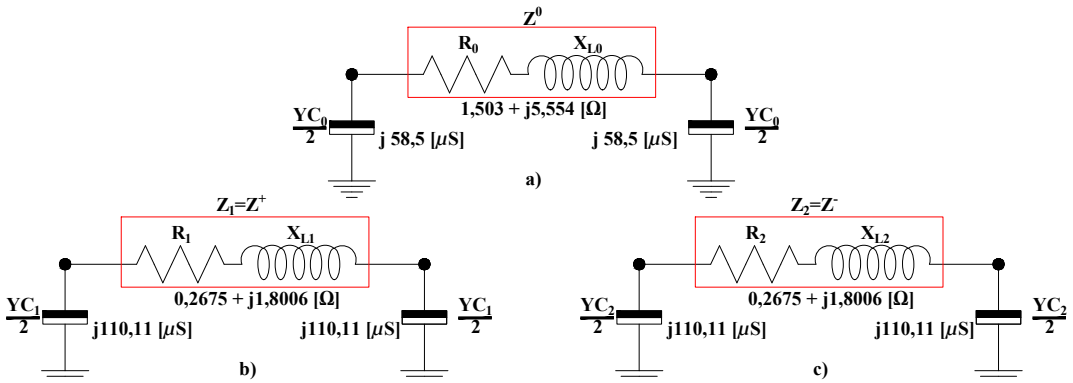


Figura 32: Circuito equivalente secuencia: **a)** cero, **b)** positiva **c)** negativa (Elaboración Propia)

5.3. EJEMPLO PRÁCTICO N° 3

Considere una línea de transmisión, con la configuración mostrada en la Figura 33 la cual opera a una frecuencia de $60[Hz]$. La línea esta compuesta por 3 conductores en haz, con 2 cables de guarda. La Tabla 5 presenta las características de los conductores de fase y la Tabla 6 presenta las características de los conductores de guarda, la longitud de la línea es de $1[km]$ y la resistividad promedio de $100[\Omega - m]$, correspondiente a un terreno con tipo de suelo húmedo (tierra media).

Determine:

- Modelo serie por fase y su equivalente en redes de secuencia para una línea transpuesta y no transpuesta.
- Capacitancias por fase y su equivalente en redes de secuencia para una línea transpuesta y no transpuesta.
- Circuito equivalente para una línea transpuesta.

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (6/1)	Sparrow	2	$2,58$	$1,10\frac{\Omega}{km}$

Tabla 5: Características del conductor ejemplo práctico N°3.

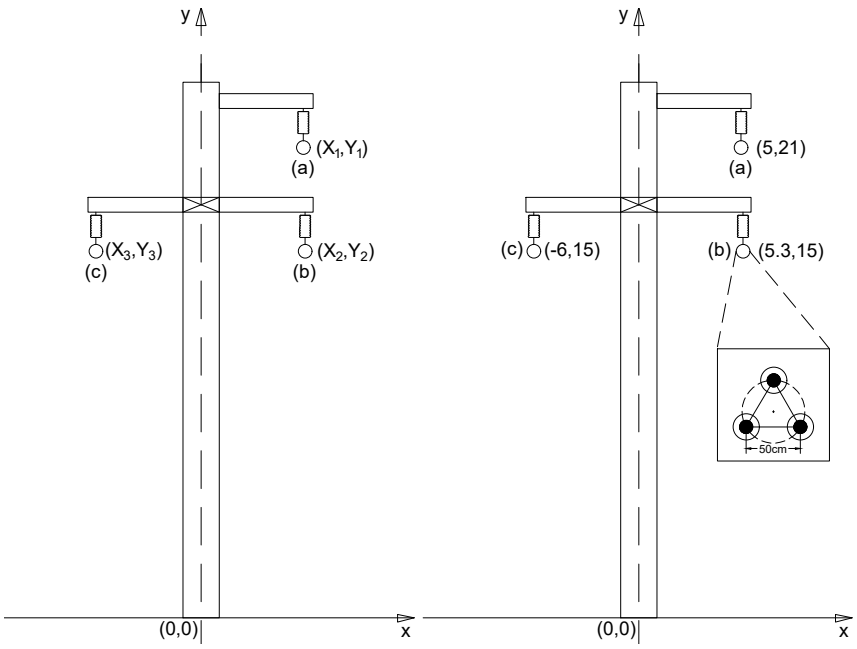


Figura 33: Torre de transmisión con 3 conductores en haz (Elaboración Propia)

Conductor de guarda				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
AAC (7)	Aster	2/0	$3,81$	$0,521\frac{\Omega}{km}$

Tabla 6: Características del conductor de guarda ejemplo práctico N°3.

Siguiendo la metodología para el uso de la aplicación (**CEM-LT**) descrita en el ejemplo práctico N°1, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el ejemplo práctico N°3.

5.3.1. RESULTADOS SOFTWARE CEM-LT EJEMPLO PRÁCTICO N°3

Línea transmisión transpuesta

Impedancias

$$\left[Z_{abc}\right] = \begin{bmatrix} 0{,}4439 + \mathbf{j}0{,}5312 & 0{,}0773 + \mathbf{j}0{,}1770 & 0{,}0773 + \mathbf{j}0{,}1770 \\ 0{,}0773 + \mathbf{j}0{,}1770 & 0{,}4439 + \mathbf{j}0{,}5312 & 0{,}0773 + \mathbf{j}0{,}1770 \\ 0{,}0773 + \mathbf{j}0{,}1770 & 0{,}0773 + \mathbf{j}0{,}1770 & 0{,}4439 + \mathbf{j}0{,}5312 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km}\right]$$

$$\left[Z_{012}\right] = \begin{bmatrix} 0{,}5985 + \mathbf{j}0{,}8851 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}3667 + \mathbf{j}0{,}3542 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}3667 + \mathbf{j}0{,}3542 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km}\right]$$

Capacitancias

$$\left[C_{abc}\right] = \begin{bmatrix} 10{,}46 & -1,48 & -1,48 \\ -1,48 & 10{,}46 & -1,48 \\ -1,48 & -1,24 & 10{,}46 \end{bmatrix} \left[\frac{nF}{km}\right]$$

$$\left[C_{012}\right] = \begin{bmatrix} 7{,}5 & 0 & 0 \\ 0 & 11,94 & 0 \\ 0 & 0 & 11,94 \end{bmatrix} \left[\frac{nF}{km}\right]$$

Circuito equivalente

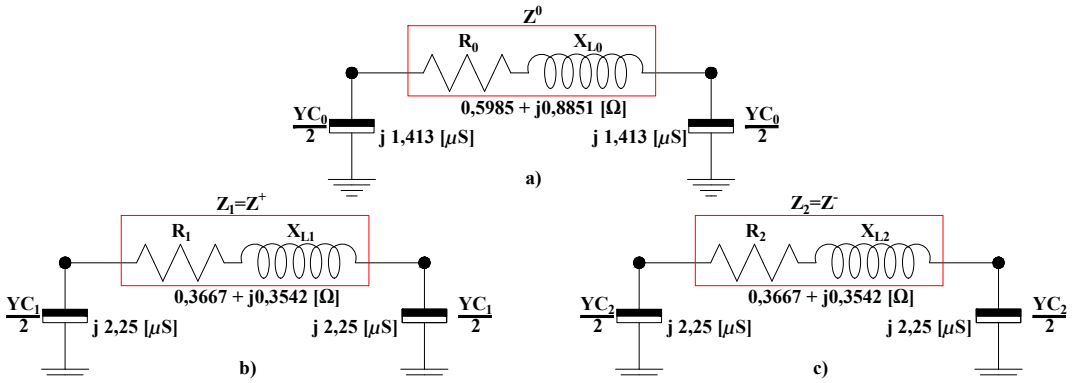


Figura 34: Circuito equivalente secuencia: **a)** cero, **b)** positiva **c)** negativa (Elaboración Propia)

Línea transmisión No transpuesta

Impedancias

$$\left[Z_{abc}\right] = \begin{bmatrix} 0{,}4538 + \mathbf{j}0{,}5006 & 0{,}0794 + \mathbf{j}0{,}2041 & 0{,}0782 + \mathbf{j}0{,}1505 \\ 0{,}0794 + \mathbf{j}0{,}2041 & 0{,}4402 + \mathbf{j}0{,}5440 & 0{,}0730 + \mathbf{j}0{,}1777 \\ 0{,}0782 + \mathbf{j}0{,}1505 & 0{,}0730 + \mathbf{j}0{,}1777 & 0{,}4397 + \mathbf{j}0{,}5457 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km}\right]$$

$$\left[Z_{012}\right] = \begin{bmatrix} 0{,}5984 + \mathbf{j}0{,}8851 & 0{,}0215 - \mathbf{j}0{,}0153 & -0{,}0084 - \mathbf{j}0{,}0144 \\ -0{,}0084 - \mathbf{j}0{,}0144 & 0{,}3676 + \mathbf{j}0{,}3526 & -0{,}0306 - \mathbf{j}0{,}0139 \\ 0{,}0215 - \mathbf{j}0{,}0153 & 0{,}0320 - \mathbf{j}0{,}0149 & 0{,}3676 + \mathbf{j}0{,}3526 \end{bmatrix} \left[\frac{\Omega}{km}\right]$$

Capacitancias

$$\left[C_{abc}\right] = \begin{bmatrix} 10{,}91 & -2,502 & -0{,}995 \\ -2,502 & 10{,}75 & -1,193 \\ -0,995 & -1,193 & 10,249 \end{bmatrix} \left[\frac{nF}{km}\right]$$

$$\left[C_{012}\right] = \begin{bmatrix} 7,514 & -0{,}0482 & -0{,}0482 \\ -0{,}0482 & 12,2087 & 0{,}5076 \\ -0{,}0482 & 0{,}5076 & 12,2087 \end{bmatrix} \left[\frac{nF}{km}\right]$$

5.4. EJEMPLO PRÁCTICO N° 4

Considere una línea de transmisión, con la configuración mostrada en la Figura 35 la cual opera a una frecuencia de $60[Hz]$. La Tabla 7 presenta las características de los conductores de fase, la longitud de la línea es de $10[km]$ y la resistividad promedio de $100[\Omega - m]$ correspondiente a un terreno con tipo de suelo húmedo (tierra media).

Determine para una línea transpuesta y no transpuesta:

- Modelo serie por fase y su equivalente en redes de secuencia.
- Capacitancias por fase y su equivalente en redes de secuencia.
- Circuito equivalente.

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (30/7)	Eagle	$556,5$	$10,00$	$0,121\frac{\Omega}{km}$

Tabla 7: Características del conductor ejemplo práctico N°4.

Siguiendo la metodología para el uso de la aplicación (**CEM-LT**) descrita en el ejemplo práctico N°1, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el ejemplo práctico N°4.

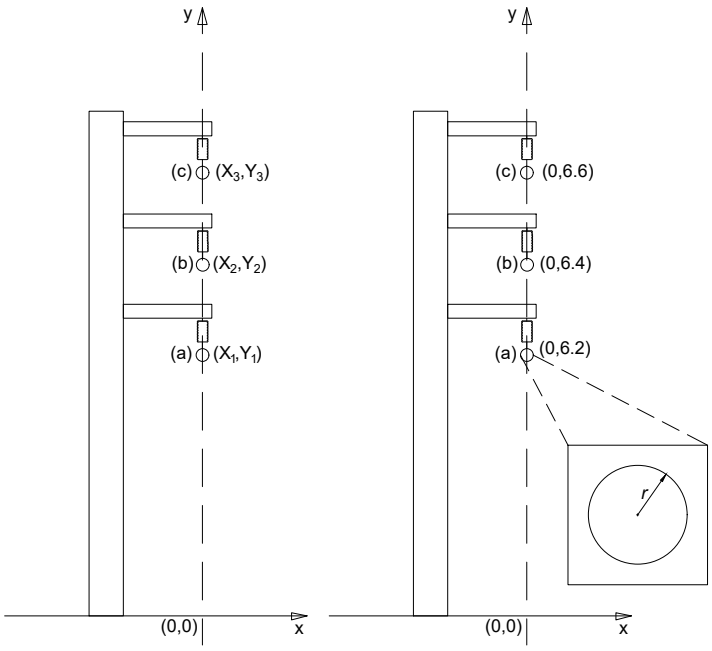


Figura 35: Torre de transmisión en configuración vertical (Elaboración Propia)

5.4.1. RESULTADOS SOFTWARE CEM-LT EJEMPLO PRÁCTICO N°4

Línea transmisión transpuesta

Impedancias

$$\left[Z_{abc}\right] = \begin{bmatrix} 1{,}802 + \mathbf{j}8{,}558 & 0{,}592 + \mathbf{j}6{,}125 & 0{,}592 + \mathbf{j}6{,}125 \\ 0{,}592 + \mathbf{j}6{,}125 & 1{,}802 + \mathbf{j}8{,}558 & 0{,}592 + \mathbf{j}6{,}125 \\ 0{,}592 + \mathbf{j}6{,}125 & 0{,}592 + \mathbf{j}6{,}125 & 1{,}802 + \mathbf{j}8{,}558 \end{bmatrix} [\Omega]$$

$$\left[Z_{012}\right] = \begin{bmatrix} 2{,}9865 + \mathbf{j}20{,}808 & 0 & 0 \\ 0 & 1{,}2100 + \mathbf{j}2{,}4329 & 0 \\ 0 & 0 & 1{,}2100 + \mathbf{j}2{,}4329 \end{bmatrix} [\Omega]$$

Capacitancias

$$\left[C_{abc}\right] = \begin{bmatrix} 127{,}3 & -45{,}1 & -45{,}1 \\ -45{,}1 & 127,3 & -45{,}1 \\ -45{,}1 & -45{,}1 & 127,3 \end{bmatrix} [nF]$$

$$\left[C_{012}\right] = \begin{bmatrix} 37{,}1 & 0 & 0 \\ 0 & 172{,}4 & 0 \\ 0 & 0 & 172{,}4 \end{bmatrix} [nF]$$

Circuito equivalente

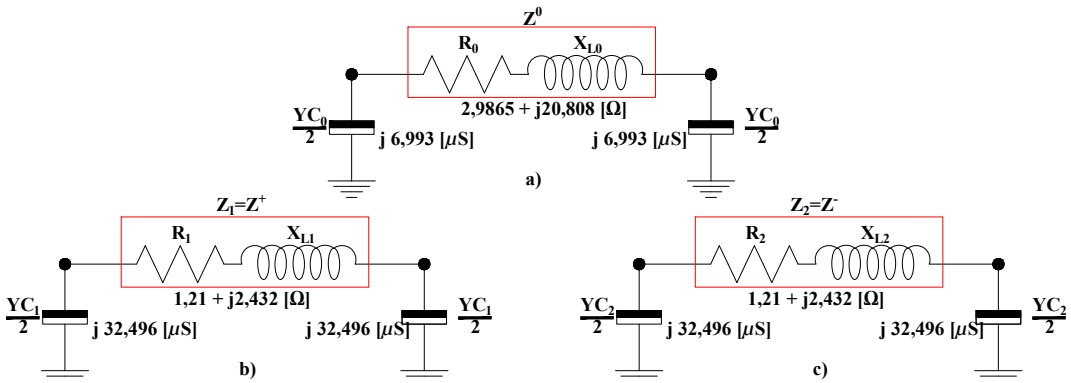


Figura 36: Circuito equivalente secuencia: **a)** cero, **b)** positiva **c)** negativa (Elaboración Propia)

Línea transmisión No transpuesta

Impedancias

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 1{,}8022 + \mathbf{j}8{,}5580 & 0{,}5922 + \mathbf{j}6{,}2992 & 0{,}5922 + \mathbf{j}5{,}7766 \\ 0{,}5922 + \mathbf{j}6{,}2992 & 1{,}8022 + \mathbf{j}8{,}5580 & 0{,}5922 + \mathbf{j}6{,}2992 \\ 0{,}5922 + \mathbf{j}5{,}7766 & 0{,}5922 + \mathbf{j}6{,}2992 & 1{,}8022 + \mathbf{j}8{,}5580 \end{bmatrix} [\Omega]$$

$$[Z_{012}] = \begin{bmatrix} 2{,}9865 + \mathbf{j}20{,}8080 & 0{,}1509 - \mathbf{j}0{,}0871 & -0{,}1509 - \mathbf{j}0{,}0871 \\ -0{,}1509 - \mathbf{j}0{,}0871 & 1{,}2100 + \mathbf{j}2{,}4329 & -0{,}3017 + \mathbf{j}0{,}1742 \\ 0{,}1509 - \mathbf{j}0{,}0871 & 0{,}3017 + \mathbf{j}0{,}1742 & 1{,}2100 + \mathbf{j}2{,}4329 \end{bmatrix} [\Omega]$$

Capacitancias

$$[C_{abc}] = \begin{bmatrix} 123,8 & -55,8 & -27,3 \\ -55,8 & 142,7 & -56,0 \\ -27,3 & -56,0 & 123,2 \end{bmatrix} [nF]$$

$$[C_{012}] = \begin{bmatrix} 37,2 & 1{,}8 & 1{,}8 \\ 1{,}8 & 176,3 & -12{,}7 \\ 1{,}8 & -12{,}7 & 176,3 \end{bmatrix} [nF]$$

5.5. EJEMPLO PRÁCTICO N° 5

Considere una línea de transmisión, con la configuración mostrada en la Figura 37 la cual opera a una frecuencia de $60[Hz]$. La Tabla 8 presenta las características de los conductores de fase, la longitud de la línea es de $50[km]$ y la resistividad promedio de $100[\Omega - m]$, correspondiente a un terreno con tipo de suelo húmedo (tierra media).

Determine para una línea transpuesta y no transpuesta:

- Modelo serie por fase y su equivalente en redes de secuencia.
- Capacitancias por fase y su equivalente en redes de secuencia.
- Circuito equivalente.

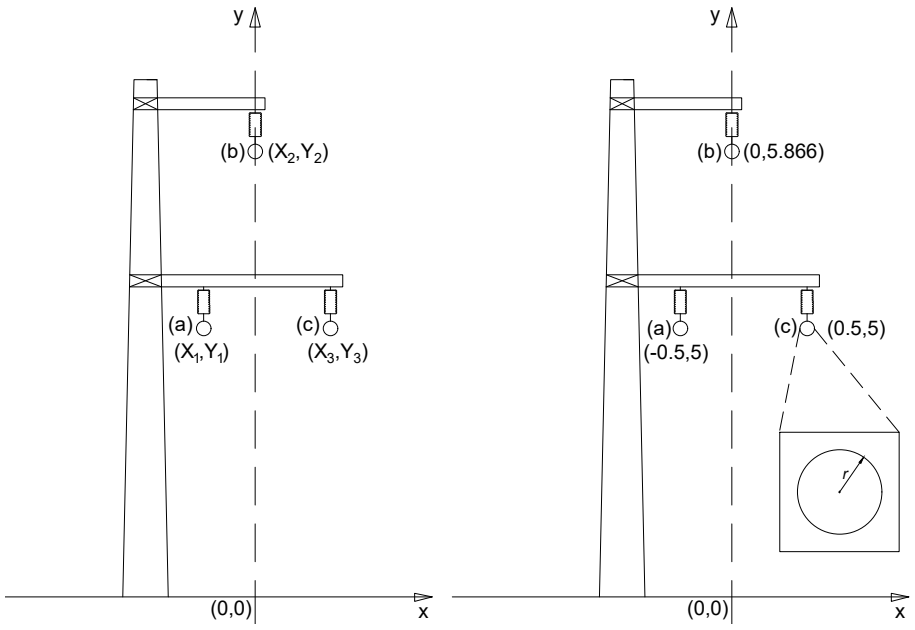


Figura 37: Torre de transmisión en configuración delta (Elaboración Propia)

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (30/7)	Eagle	$556,5$	$10,00$	$0,121\frac{\Omega}{km}$

Tabla 8: Características del conductor ejemplo práctico N°5.

Siguiendo la metodología para el uso de la aplicación (**CEM-LT**) descrita en el ejemplo práctico N°1, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el ejemplo práctico N°5.

5.5.1. RESULTADOS SOFTWARE CEM-LT EJEMPLO PRÁCTICO N°5

Línea transmisión transpuesta

Impedancias

$$\left[Z_{abc}\right] = \begin{bmatrix} 9{,}01 + \mathbf{j}42{,}789 & 2{,}96 + \mathbf{j}25{,}428 & 2{,}96 + \mathbf{j}25{,}428 \\ 2{,}96 + \mathbf{j}25{,}42 & 9{,}01 + \mathbf{j}42{,}789 & 2{,}96 + \mathbf{j}25{,}428 \\ 2{,}96 + \mathbf{j}25{,}428 & 2{,}96 + \mathbf{j}25{,}428 & 9{,}01 + \mathbf{j}42{,}789 \end{bmatrix} [\Omega]$$

$$\left[Z_{012}\right] = \begin{bmatrix} 14{,}93 + \mathbf{j}93{,}647 & 0 & 0 \\ 0 & 6{,}05 + \mathbf{j}17{,}36 & 0 \\ 0 & 0 & 6{,}05 + \mathbf{j}17{,}36 \end{bmatrix} [Omega]$$

Capacitancias

$$\left[C_{abc}\right] = \begin{bmatrix} 482{,}4 & -122,2 & -122,2 \\ -122,2 & 482{,}4 & -122,2 \\ -122,2 & -122,2 & 482{,}4 \end{bmatrix} [nF]$$

$$\left[C_{012}\right] = \begin{bmatrix} 238{,}1 & 0 & 0 \\ 0 & 604{,}6 & 0 \\ 0 & 0 & 604{,}6 \end{bmatrix} [nF]$$

Circuito equivalente

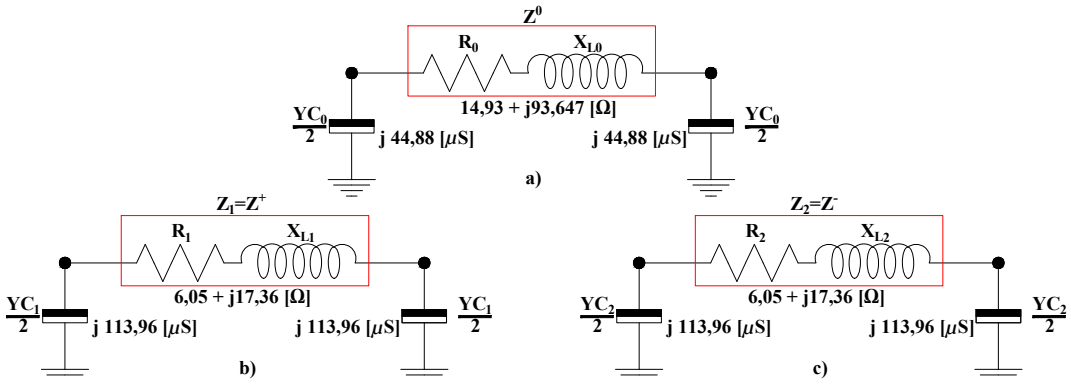


Figura 38: Circuito equivalente secuencia: **a)** cero, **b)** positiva **c)** negativa (Elaboración Propia)

Línea transmisión No transpuesta

Impedancias

$$\left[Z_{abc}\right] = \begin{bmatrix} 9{,}0109 + \mathbf{j}42{,}7898 & 2{,}9609 + \mathbf{j}25{,}4288 & 2{,}9609 + \mathbf{j}25{,}4287 \\ 2{,}9609 + \mathbf{j}25{,}4288 & 9{,}0109 + \mathbf{j}42{,}7898 & 2{,}9609 + \mathbf{j}25{,}4288 \\ 2{,}9609 + \mathbf{j}25{,}4287 & 2{,}9609 + \mathbf{j}25{,}4288 & 9{,}0109 + \mathbf{j}42{,}7898 \end{bmatrix} [\Omega]$$

$$\left[Z_{012}\right] = \begin{bmatrix} 14{,}9326 + \mathbf{j}93{,}6473 & 0 & 0 \\ 0 & 6{,}0500 + \mathbf{j}17{,}3610 & 0 \\ 0 & 0 & 6{,}0500 + \mathbf{j}17{,}3610 \end{bmatrix} [\Omega]$$

Capacitancias

$$\left[C_{abc}\right] = \begin{bmatrix} 485{,}2 & -123,5 & -119,4 \\ -123,5 & 477,0 & -123,5 \\ -119{,}4 & -123,5 & 485,2 \end{bmatrix} [nF]$$

$$\left[C_{012}\right] = \begin{bmatrix} 238{,}2 & 2{,}1 & 2{,}1 \\ 2{,}1 & 604,7 & 0 \\ 2{,}1 & 0 & 604,7 \end{bmatrix} [nF]$$

5.6. EJEMPLO PRÁCTICO N° 6

Considere una línea de transmisión, con la configuración mostrada en la Figura 39 la cual opera a una frecuencia de $60[Hz]$. La línea esta compuesta por 4 conductores en haz, con 2 cables de guarda. La Tabla 9 presenta las características de los conductores de fase y la Tabla 10 presenta las características de los conductores de guarda, la longitud de la línea es de $20[km]$ y la resistividad promedio de $100[\Omega - m]$, correspondiente a un terreno con tipo de suelo húmedo (tierra media).

Determine para una línea transpuesta:

- Modelo serie por fase y su equivalente en redes de secuencia.
- Capacitancias por fase y su equivalente en redes de secuencia.
- Circuito equivalente.

Siguiendo la metodología para el uso de la aplicación (**CEM-LT**) descrita en el ejemplo práctico N°1, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el ejemplo práctico N°6.

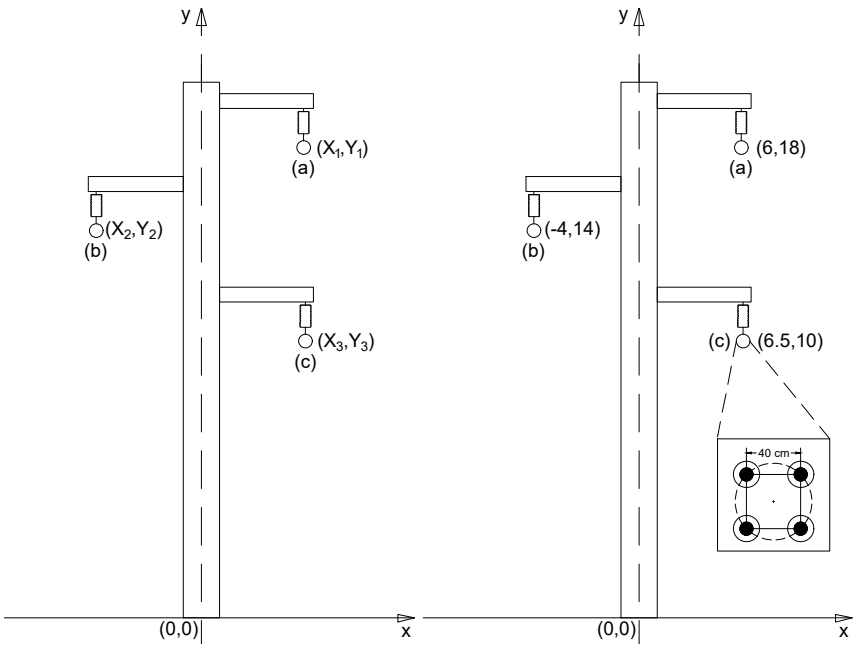


Figura 39: Torre de transmisión de con 4 conductores en haz (Elaboración Propia)

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (6/1)	Sparrow	2	$2,58$	$1,10\frac{\Omega}{km}$

Tabla 9: Características del conductor ejemplo práctico N°6.

Conductor de guarda				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
AAC (7)	Aster	2/0	$3,81$	$0,521\frac{\Omega}{km}$

Tabla 10: Características del conductor de guarda ejemplo práctico N°6.

5.6.1. RESULTADOS SOFTWARE CEM-LT EJEMPLO PRÁCTICO N°6

Línea transmisión transpuesta

Impedancias

$$\left[Z_{abc}\right] = \begin{bmatrix} 7{,}0715 + \mathbf{j}9{,}9201 & 1{,}5715 + \mathbf{j}3{,}3107 & 1{,}5715 + \mathbf{j}3{,}3107 \\ 1{,}5715 + \mathbf{j}3{,}3107 & 7{,}0715 + \mathbf{j}9{,}9201 & 1{,}5715 + \mathbf{j}3{,}3107 \\ 1{,}5715 + \mathbf{j}3{,}3107 & 1{,}5715 + \mathbf{j}3{,}3107 & 7{,}0715 + \mathbf{j}9{,}9201 \end{bmatrix} [\Omega]$$

$$\left[Z_{012}\right] = \begin{bmatrix} 10{,}2146 + \mathbf{j}16{,}5415 & 0 & 0 \\ 0 & 5{,}5 + \mathbf{j}6{,}6094 & 0 \\ 0 & 0 & 5{,}5 + \mathbf{j}6{,}6094 \end{bmatrix} [\Omega]$$

Capacitancias

$$\left[C_{abc}\right] = \begin{bmatrix} 229 & -28{,}4 & -28{,}4 \\ -28{,}4 & 229 & -28{,}4 \\ -28{,}4 & -28{,}4 & 229 \end{bmatrix} [nF]$$

$$\left[C_{012}\right] = \begin{bmatrix} 172{,}3 & 0 & 0 \\ 0 & 257{,}4 & 0 \\ 0 & 0 & 257{,}4 \end{bmatrix} [nF]$$

Circuito equivalente

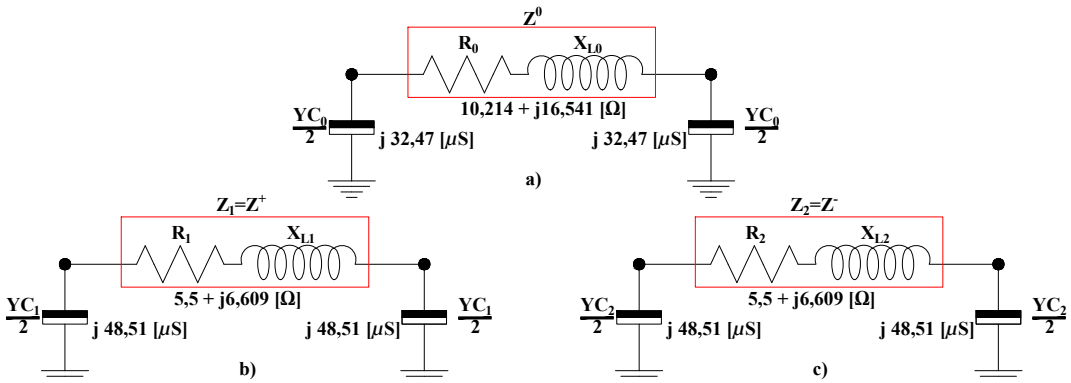


Figura 40: Circuito equivalente secuencia: **a)** cero, **b)** positiva **c)** negativa (Elaboración Propia)

6. USO DEL SOFTWARE MÓDULO DE CAMPO ELÉCTRICO

6.1. EJEMPLO PRÁCTICO N°1

Una línea de transmisión, tiene una tensión de fase de 48,8[kV] y opera a una frecuencia de 60[Hz], la línea esta compuesta por un conductor por fase y sin cables de guarda, La Tabla 11 presenta las características de los conductores de fase. Su disposición es horizontal y las distancias entre conductores y tierra son las que se muestran en la Figura 41.

Calcule el campo eléctrico en $P\,(0,1)$ y $P\,(1,1)$.

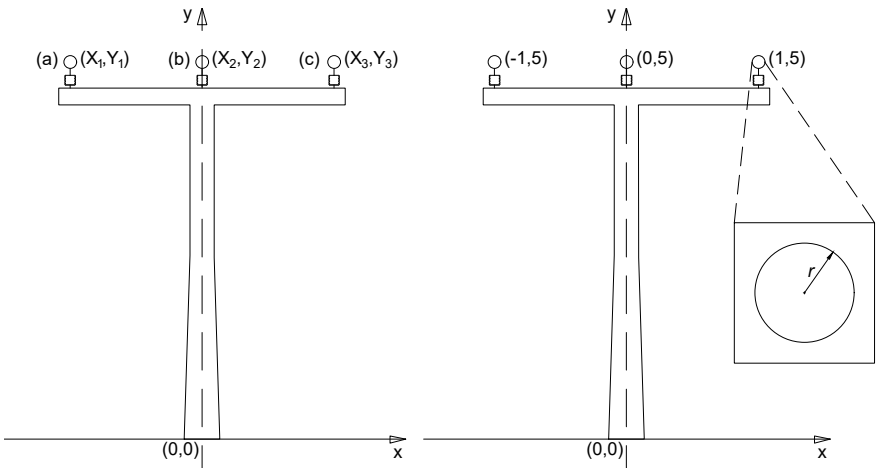


Figura 41: Torre de transmisión de 48,8[kV] configuración horizontal (Elaboración Propia)

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (30/7)	Eagle	$556,5$	$10,00$	$0,121\frac{\Omega}{km}$

Tabla 11: Características del conductor ejemplo práctico N°1.

6.1.1. METODOLOGÍA PARA EL USO DE LA APLICACIÓN

Paso 1: elegir el marco de referencia para el problema en cuestión, la Figura 42 muestra 3 posibles marcos de referencia que el usuario puede elegir. Cabe resaltar que la elección del mismo es totalmente arbitraria, el resultado será el mismo independientemente de la elección del marco de referencia, pero es absolutamente necesario establecerlo.

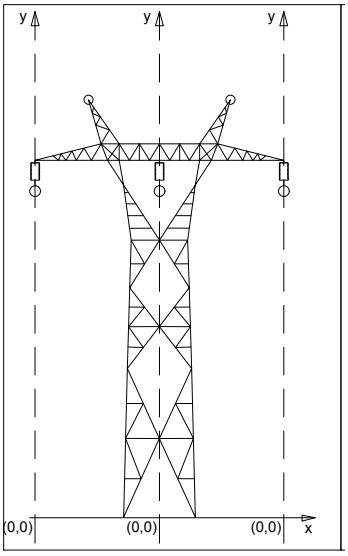


Figura 42: Marco de referencia ejercicio práctico N°1 (Elaboración Propia)

NOTA Para efectos del presente ejercicio el marco de referencia elegido es tomar como eje de coordenadas **(0,0)** la fase central.

Paso 2: una vez se elige el marco de referencia de se procede a establecer una nomenclatura para identificar los conductores de fase, y así asignar las coordenadas según el marco de referencia y las distancias entre los conductores y tierra, tal como se muestra en la Figura 43.

Paso 3: Establecer las distancias entre los conductores de fase y la altura de ellos según el marco de referencia elegido Figura 41, la Tabla 12 presenta la información correspondiente a las coordenadas del ejercicio planteado.

Fase A [m]	Fase B [m]	Fase C [m]
$(-1,5)$	$(0,5)$	$(1,5)$

Tabla 12: Resumen de las coordenadas de los conductores de fase ejercicio práctico N° 1.

Paso 4: una vez establecidos los datos asociados a la geometría de la línea, se procede a ingresar los parámetros requeridos en la interfaz del modulo de campo eléctrico del software.

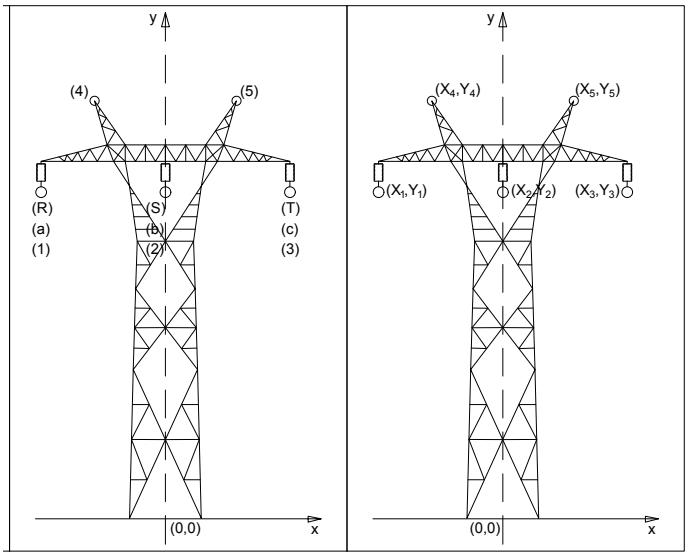


Figura 43: Nomenclatura para los conductores de fase, incluyendo la asignación de las coordenadas según el marco de referencia elegido en paso 1. (Elaboración Propia)

Inicialmente la interfaz del modulo de campo eléctrico muestra la ventana de **Configuración sistema trifásico**, ésta ventana cuenta con cuatro paneles,como se observa en la Figura 44, éstos se explican a continuación:

1. Panel **Control de la aplicación**, éste panel se compone por cuatro botones:

   - Botón **Menú inicial**, al dar clic sobre éste botón el usuario podrá devolverse al menú principal de la aplicación.
   - Botón **Cerrar aplicación**, al dar clic sobre éste botón se desplegara un mensaje de advertencia, el cual tiene como finalidad indicarle al usuario si realmente desea cerrar la aplicación.
   - Botón **Ayuda**, al dar clic sobre éste botón permitirá que el usuario tenga acceso al manual para el módulo de campo eléctrico, el cual es un documento tipo **pdf**.
   - Botón **Limpiar ventana**, al dar clic sobre éste botón, la aplicación mostrara un mensaje que le indicara al usuario si desea volver cero los parámetros configurados.

2. Panel **Configuración del sistema trifásico**, a continuación se explican algunas características importantes que se deben de tener en cuenta al momento de ingresar valores en la aplicación:

   - **Secuencia del sistema:** El software permite seleccionar entre las secuencias **Positiva** y **Negativa**, en donde solo es necesario ingresar el valor de tensión y ángulo para que el software automáticamente complete la secuencia. También se habilita la opción **Otra**, que ofrece la posibilidad de ingresar manualmente otros

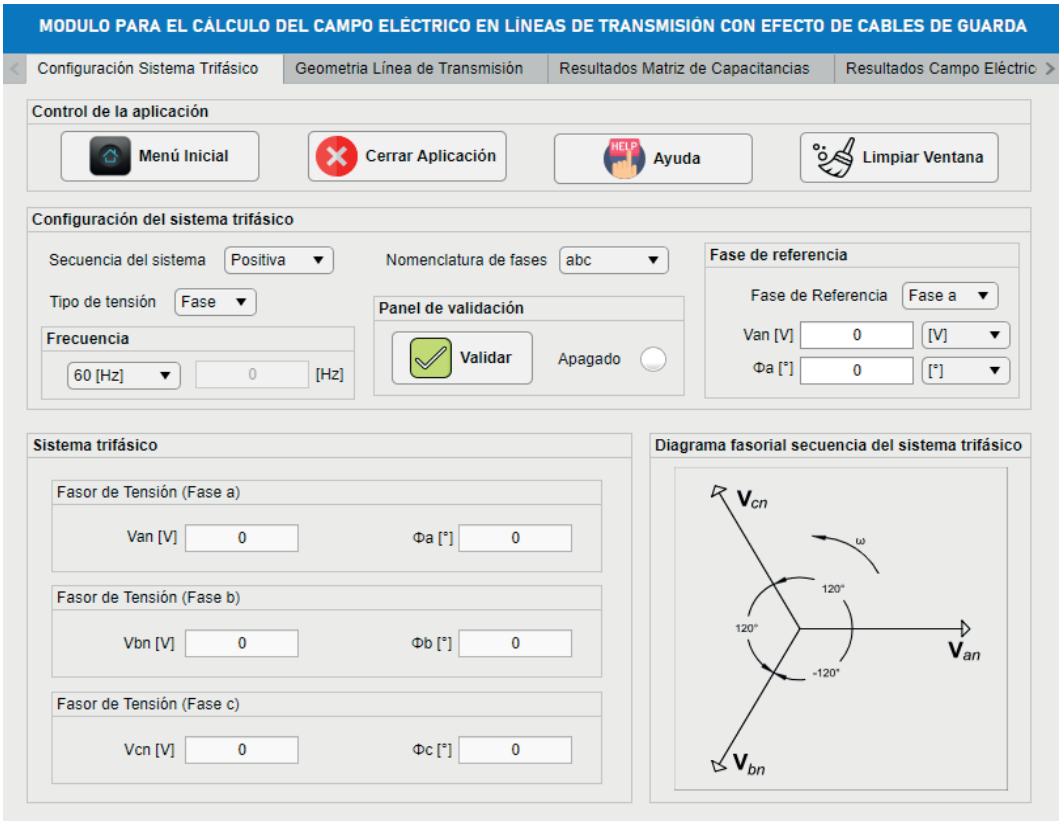


Figura 44: Interfaz ventana **Configuración sistema trifásico**.

valores de secuencia en magnitud y ángulo Figura 45.

Nota: las casillas de magnitud y ángulo de la ventana **Fase de referencia** solo estarán activas si el usuario elije la secuencia (**Positiva** ó **Negativa**), si el usuario elige la opción **Otra**, estas casillas quedaran deshabilitadas, pero a su vez en el panel **Sistema trifásico** las casillas de fasores de tensión (**Fase a**), (**Fase b**) y (**Fase c**) se habilitaran para ingresar los valores de magnitud y ángulo de tensión. Cabe destacar que estas casillas no estarán habilitadas para edición si el usuario elije una secuencia, ya sea (**Positiva** ó **Negativa**), en estos casos la aplicación asigna las magnitudes y ángulos en función de los valores que ingresa como magnitud y fase de referencia.

- **Frecuencia del sistema:** El software permite seleccionar entre las frecuencias industriales **60 [Hz]** y **50[Hz]**, como también habilita la opción **Otra**, que ofrece la posibilidad de ingresar otro valor para la frecuencia del sistema Figura 46.
- **Nomenclatura del sistema:** El software permite seleccionar la nomenclatura de los conductores de fase, ya sea: **abc**, **RST** ó $\mathbf{L_1L_2L_3}$ Figura 47.
- **Fase de referencia:** El software permite ingresar la fase de referencia que tenga el sistema, generalmente se toma la fase **a** para la nomenclatura de los conductores

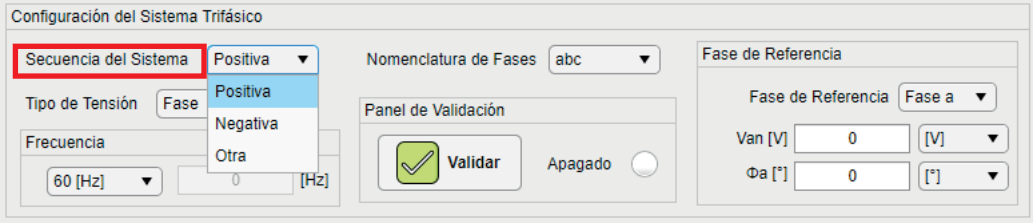


Figura 45: Secuencia del sistema

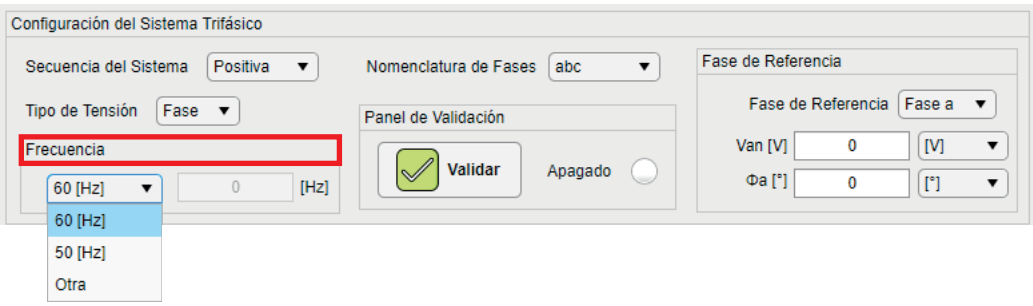


Figura 46: Frecuencia del sistema

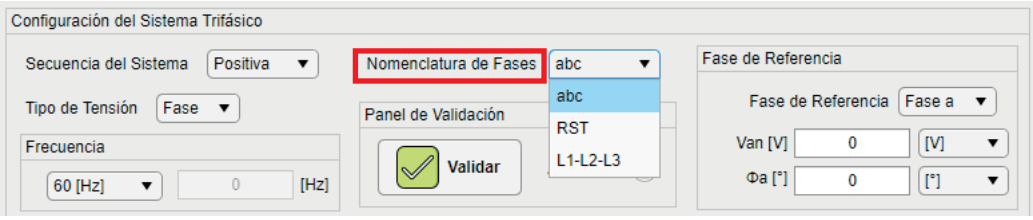


Figura 47: Nomenclatura del sistema

de fase **abc** Figura 48.

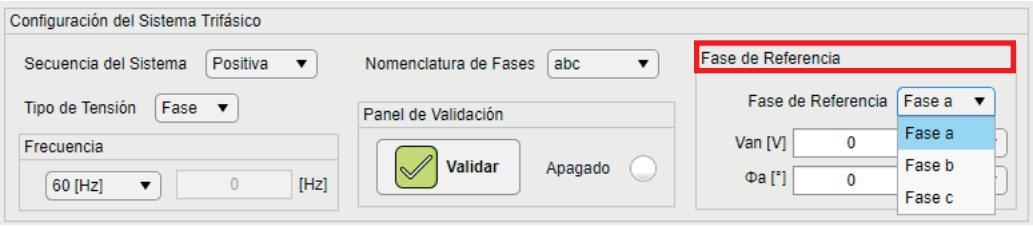


Figura 48: Fase de referencia del sistema

3. Panel **Sistema trifásico**, éste panel permite visualizar la secuencia de tensiones del sistema. Si en el panel **Configuración del sistema trifásico** la opción de **Secuencia del sistema** se encuentra en **Otra** el usuario podrá ingresar los valores de magnitud y ángulo de tensión en las casillas del panel **Sistema trifásico** para los fasores de tensión (**Fase a**), (**Fase b**) y (**Fase c**).

4. Panel **Diagrama fasorial secuencia del sistema trifásico**, éste panel permite que el usuario visualice la secuencia del sistema, ya sea para una tensión de línea ó de fase con las diferentes nomenclaturas de fase que el sistema tiene configuradas.

Nota: Si el usuario asigna un valor de cero a la magnitud y ángulo de referencia cuando se ha elegido una secuencia (**Positiva** ó **Negativa**), y se da clic en el botón **Validar** la aplicación mostrará un mensaje de advertencia, el cual se puede visualizar en la Figura 49, cabe resaltar que el error se corrige fácilmente si se asigna un valor distinto de cero en la magnitud de tensión de la fase de referencia, pues un ángulo cero es común y posible.

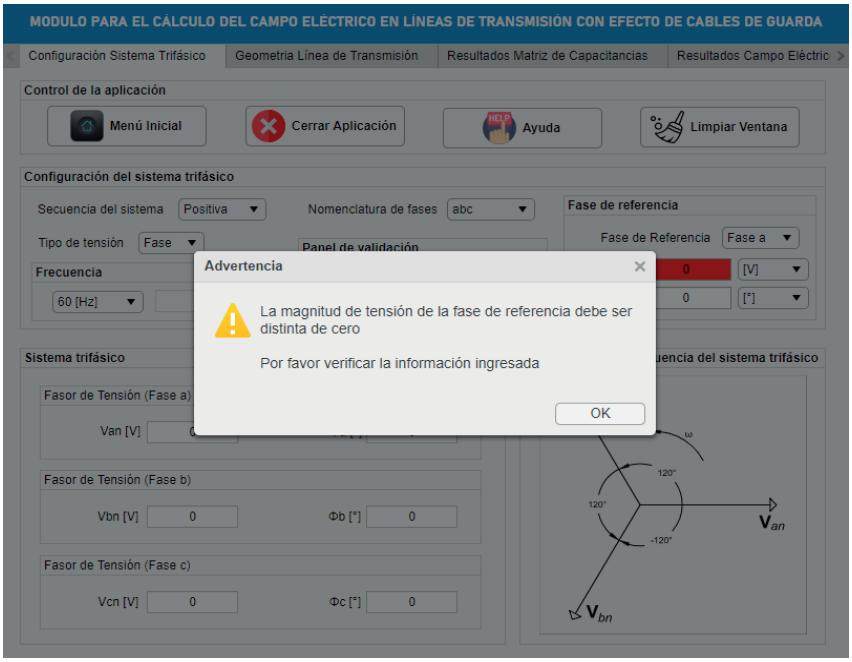


Figura 49: Configurando del sistema trifásico advertencia: 0[V] en la magnitud de referencia.

Una vez ingresado cada uno de los valores en los paneles del sistema trifásico, el usuaria debe dar clic sobre el botón **Validar**, el cual mostrara un mensaje informativo, que indica que el usuario ha ingresado de forma correcta los valores. la Figura 50 muestra el mensaje de configuración exitosa del sistema para el ejemplo práctico N°1.

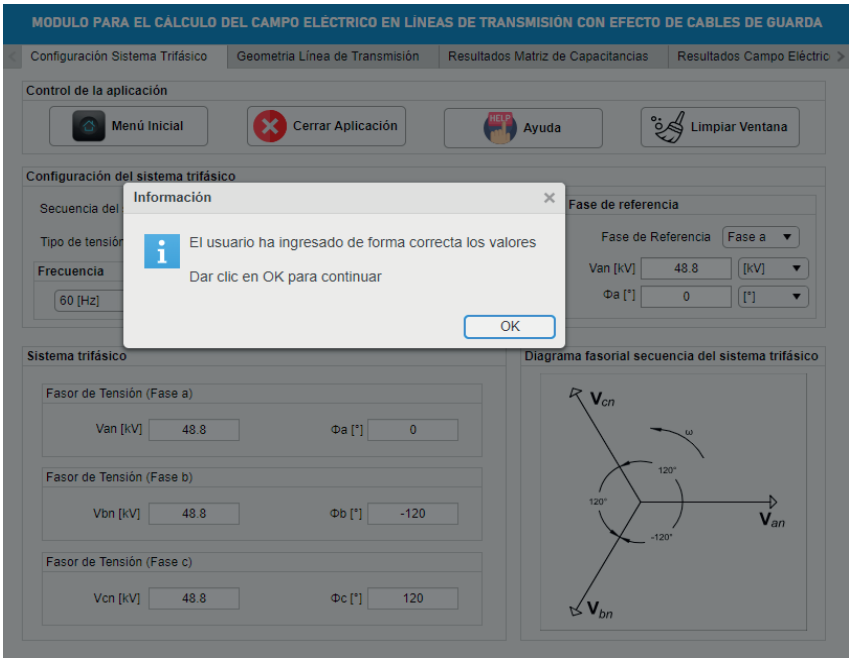


Figura 50: Mensaje de configuración exitosa del sistema trifásico ejemplo práctico N°1

Una vez finalizado el proceso de parametrizar la ventana de **Configuración sistema trifásico**, se continua a la ventana siguiente **Geometría línea de transmisión**, para la efectiva configuración de ésta ventana es necesario tener en cuenta los siguientes paneles:

1. Panel **Parámetros de línea conductores de fase** Figura 51, éste panel permite seleccionar dos opciones:

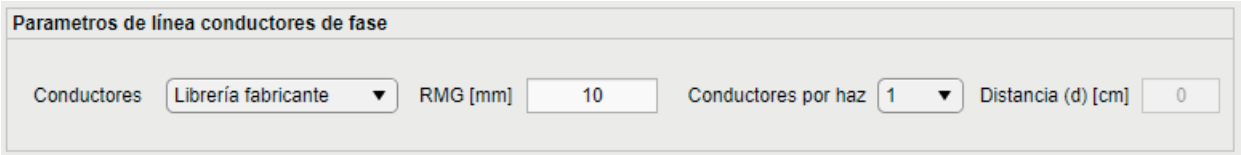


Figura 51: Panel **Parámetros de línea conductores de fase** de la ventana **Geometría línea de transmisión**.

- **Ingresar conductores**, ésta opción habilita la ventana **RMG** del conductor, permitiendo que el usuario ingrese el valor de forma manual.
- **Librería fabricante**, ésta opción despliega un ventana que tiene una librería de conductores del fabricante **CENTELSA**.

  El usuario solo debe seleccionar en el panel **Información relevante del conductor**, el tipo de cable (**AAC**, **AAAC**, **ACSR**, **ACSR/AW**), y automáticamente en la ventana inferior se van a cargar los conductores.

Para cargar el conductor, el usuario debe dar clic sobre el número que se encuentra en la primera columna de la tabla, luego ir al botón **Cargar conductor** y dar clic sobre él, para devolverse a la ventana de **Geometría línea de transmisión**, con el valor del **RMG** del conductor seleccionado en la librería.

Nota: La Figura 51 muestra los valores cargados de la **Librería de conductores**, y la Figura 52 muestran los datos seleccionados en la ventana **Librería de conductores** con los valores cargados para el ejemplo practico N°1.

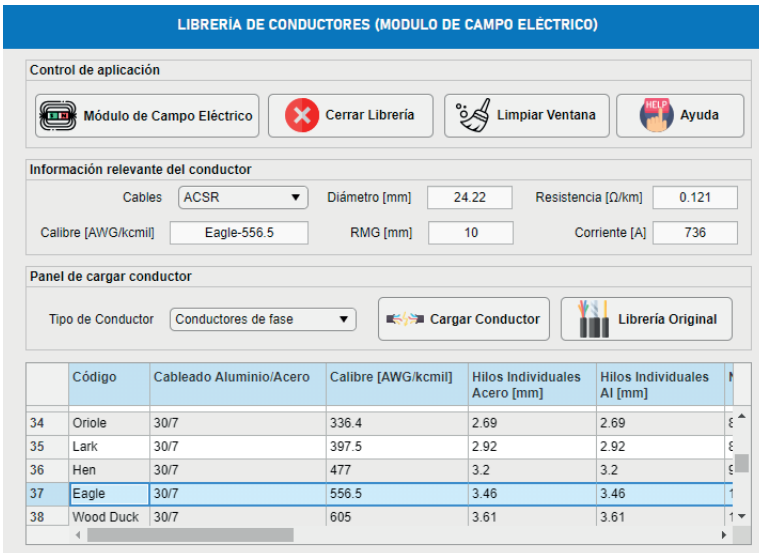


Figura 52: Ventana **Librería conductores** módulo de campo eléctrico.

2. Configure el panel **Parámetros de línea conductores de guarda** Figura 53, éste panel permite que el usuario habilite si la configuración de la línea tiene uno o dos cables de guarda, de esa forma el usuario puede introducir los parámetros de la línea como el **RMG** del conductor.

   Cabe resaltar que al seleccionar uno o dos cables de guarda en el panel de **Parámetros de línea conductores de guarda**, automáticamente en el panel de **Geometría de la línea** se habilitaran las ventanas que permiten ingresar las coordenadas de los conductores de guarda.

   Nota: Para el caso en particular del ejemplo práctico N°1, no se configura el panel de **Parámetros de línea conductores de guarda**, ya que el sistema no considera conductores de guarda.

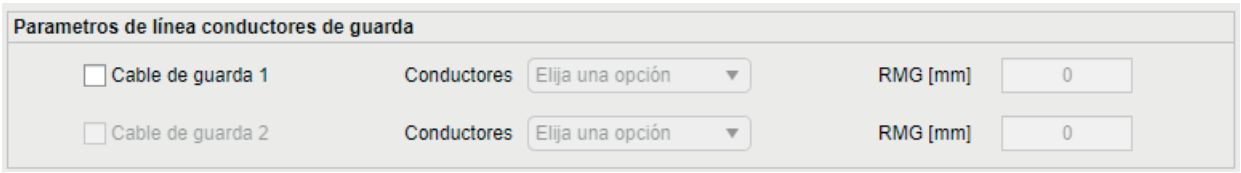


Figura 53: Panel **Parámetros de línea conductores de guarda** de la ventana **Geometría línea de transmisión**.

3. Configure el panel **Geometría línea de transmisión** Figura 54, éste panel permite que el usuario ingrese las coordenadas de los conductores de fase y de guarda dependiendo el marco de referencia seleccionado.

   Nota: La Figura 54 muestra los valores correspondientes a las coordenadas de los conductores del ejemplo practico N°1.

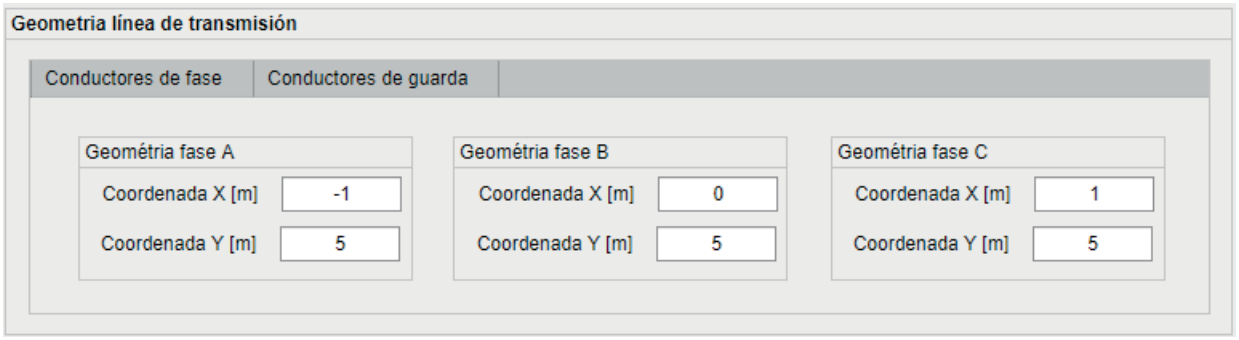


Figura 54: Panel **Geometría línea de transmisión** del modulo de campo eléctrico.

Una vez se ha configurado la ventana de **Geometría de la línea de transmisión**, el usuario puede ir a la ventana de **Resultados matriz de capacitancias** Figura 55, el usuario deberá configurar algunos parámetros que se relacionan a continuación, antes de obtener los resultados asociados a **campo eléctrico**.

1. Elija en el panel **Control de ventana de resultados** la configuración de la línea (**Transpuesta** ó **No Transpuesta**).

2. En el panel **Control de Ventana de Resultados** seleccione el prefijo que desee para la unida de Faradios, ya sea: **F**, **mF**, μ**F**, **nF** ó **pF**.

Es así como una vez se ha parametrizado el panel de **Control de ventana de resultados** se procede a calcular la matriz de capacitancias dando clic sobre el botón **Calcular**, el resultado para el ejemplo práctico N°1 se muestra en la Figura 56.



Figura 55: Ventana **Resultados matriz de capacitancias** del modulo de campo eléctrico.

Nota: Sí la línea de transmisión tiene un cable de guarda, los resultados de la matriz de capacitancias sera de **4X4**, sí la línea de transmisión tiene dos cables de guarda, los resultados de la matriz de capacitancias sera de **5X5**.

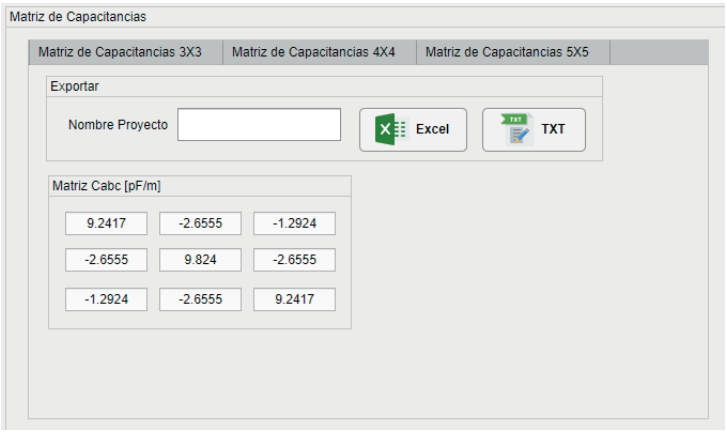


Figura 56: Resultados **Matriz de capacitancias** del modulo de campo eléctrico.

Sí el usuario desea exportar los valores calculados, el usuario se debe de dirigir al panel **Exportar**, en donde se le pide ingresar el **Nombre del Proyecto**, luego se debe de dirigir al tipo de archivo que desee, ya sea archivos tipo **Excel** ó **TXT**.

Al dar clic sobre el tipo de archivo seleccionado, se abrirá la ventana **Guardar como**, en donde se debe de seleccionar la ubicación para guardar una carpeta creada automáticamente

con el nombre **App CEM-LT**, que contiene una sub-carpeta con el **Nombre del proyecto** dentro de ésta carpeta se encuentra el archivo exportado, luego de esto se mostrara un mensaje informativo de **Exportación exitosa**, el cual garantiza que el documento ha sido exportado.

Una vez el usuario ha calculado la matriz de capacitancias es posible conocer los valores asociados al campo eléctrico parametrizando la ventana de **Resultados campo eléctrico**, de la siguiente forma:

1. En el panel **Control de ventana de resultados**, el usuario puede ingresar los valores asociados a la **Zona de servidumbre**, es importante tener en cuenta para cuantos pasos desea el usuario hacer el cálculo del campo eléctrico en la zona de servidumbre, ya que el número de puntos no puede superar un máximo de **30**,**000** puntos, ésto implica que al tomar más puntos el software tome un tiempo considerable para determinar el cálculo del campo eléctrico,de igual forma se recomienda que el usuario ingrese un valor entre **1** y **0**,**01**, para obtener una buena reproducción del comportamiento del campo eléctrico, ése se puede apreciar al graficar el campo eléctrico.

2. El usuario también puede seleccionar la variable de salida para la magnitud y las componentes del campo eléctrico, ya sea valor máximo $\mathbf{E_{máx}}$ ó valor eficaz $\mathbf{E_{rms}}$.

   Nota: dependiendo de la variable de salida que seleccione el usuario en la ventana de **Resultados de campo eléctrico**, al momento de graficar en la ventana de **Gráficas de campo eléctrico** solo le permitirá generar las gráficas para la variable de salida seleccionada anteriormente.

   Nota: dependiendo de la variable de salida que seleccione el usuario en la ventana de **Resultados de campo magnético**, al momento de graficar en la ventana de **Gráficas de campo magnético** solo le permitirá generar las gráficas para la variable de salida seleccionada anteriormente.

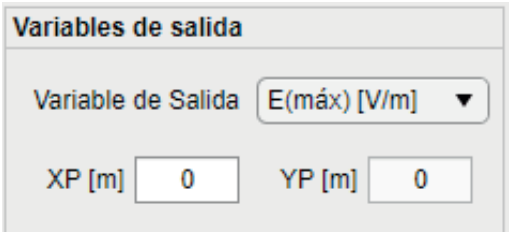


Figura 57: Variables de salida modulo campo eléctrico.

- **Nota Importante:** en la Figura 57, cuando el usuario elige como variable de salida $\mathbf{E_{máx}}$, el programa calculará la magnitud de la componente horizontal y vertical del campo eléctrico instantáneo.[1] Mientras que si la elección es $\mathbf{E_{rms}}$, el

[1]El campo eléctrico instantáneo en (V/m) es el campo eléctrico en cualquier instante de tiempo

programa calculará los valores eficaces asociados a la componente horizontal y vertical del campo eléctrico.

Es importante aclarar que para el cálculo de la magnitud del campo eléctrico instantáneo basta con aplicar la Ec.1.

$$\mathbf{E_{máx}} = \sqrt{(E_{x_{máx}})^2 + (E_{y_{máx}})^2} \ \left[\frac{V}{m}\right] \tag{1}$$

Mientras que para el cálculo de la magnitud del campo eléctrico como valor eficaz es necesario referirse a la definición del valor eficaz de una señal periódica la cual está dada por Ec.2

$$\mathbf{X_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x^2\, dt} \tag{2}$$

Si $\mathbf{E} = E_x \cos(\omega t + \theta)\, \mathbf{a}_x + E_y \cos(\omega t + \beta)\, \mathbf{a}_y$, donde:

$\mathbf{E}_x$: Es la componente horizontal del campo eléctrico instantáneo.

$\mathbf{E}_y$: Es la componente vertical del campo eléctrico instantáneo.

Entonces:

$$\mathbf{E_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(E_{x_{máx}})^2 + (E_{y_{máx}})^2} \ \left[\frac{V}{m}\right] \tag{3}$$

$$\mathbf{E_{rms}} = \sqrt{(E_{x_{rms}})^2 + (E_{y_{rms}})^2} \ \left[\frac{V}{m}\right] \tag{4}$$

$\mathbf{E}_{rms}$: Es el valor rms o eficaz de la magnitud del campo eléctrico total.

3. Es necesario que el usuario ingrese el **Punto de cálculo** en el cual desea hallar el campo eléctrico.

4. Luego de haber parametrizado los paneles correspondientes, el usuario debe de dar dos veces clic en el botón **Calcular**, uno es para generar los resultados de densidad de carga líneal, el segundo clic es para generar los resultados de campo eléctrico.

   La Figura 58 muestra la ventana de **Resultados de campo eléctrico** para el ejemplo práctico N°1.

Sí el usuario desea exportar los valores calculados para verlos en **Excel** ó en documentos **.TXT**, el usuario debe de seguir el proceso descrito para ventana de **Resultados matriz de capacitancias**.

Finalmente si el usuario desea generar la gráfica resultante para el campo eléctrico, el usuario debe ir a la ventana **Gráficas campo eléctrico**, en ésta ventana el usuario puede modificar el color de la gráfica ó el grosor de la línea, también si el usuario desea puede incluir ó no



Figura 58: Resultados **Campo eléctrico**.

cuadricula en la gráfica. El panel de control de ejes permite que el usuario pueda ampliar alguna sección de la gráfica generada para poder analizarla con mas detalle.

Para generar la gráfica el usuario debe de seleccionar la variable a graficar, la aplicación permite graficar la magnitud **E**, para los valores máximos ó eficaces en la la zona de servidumbre, (**Nota:** si el usuario desea graficar la magnitud de $\mathbf{E_{máx}}$, debe seleccionar la misma variable de salida en la ventana de **Resultados de campo eléctrico** $\mathbf{E_{máx}}[V/m]$). La aplicación también permite graficar la componente horizontal y vertical para el campo eléctrico respecto al tiempo,(**Nota:** si el usuario desea generar la gráfica para la componente horizontal en su valor eficaz del campo eléctrico $\mathbf{E_{x_{rms}}}$, debe seleccionar en la ventana **Resultados de campo eléctrico** la variable de salida $\mathbf{E_{rms}}[V/m]$).

Al haber seleccionado la variable de salida, el usuario debe de ir al botón **Graficar** y dar clic sobre él. (**Nota:** Si el usuario no desea parametrizar el panel de control de ejes, la aplicación genera la gráfica por defecto, en cambio si el usuario desea cambiar el color de la gráfica, ó modificar el grosor de ésta, es necesario parametrizar el panel de control de ejes para generar la gráfica deseada, se sugiere que el usuario tome como referencia los valores de la gráfica generados por defecto de la aplicación. Para volver a generar la gráfica por defecto que genera la aplicación, el usuario debe ir a el botón **Limpiar ventana** en el panel de **control de aplicación** y volver a dar clic en el botón **Graficar**).

La Figura 59 muestra la interfaz del modulo para la ventana de **Gráficas de campo eléctrico**, en la imagen se aprecia la magnitud del campo eléctrico $\mathbf{E_{máx}}$ en la zona de

servidumbre para el ejemplo práctico N°1.

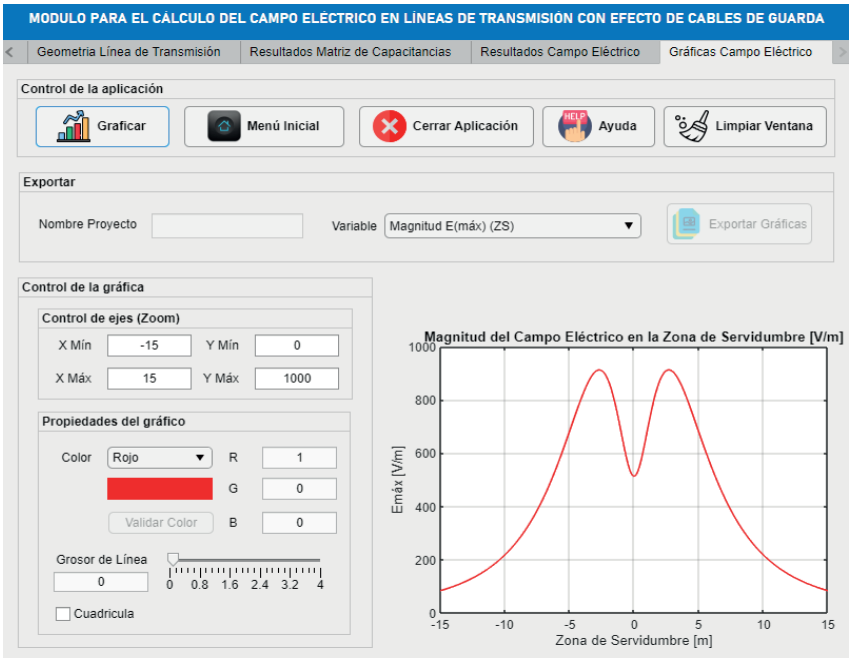


Figura 59: Ventana **Gráficas campo eléctrico**.

Sí el usuario desea exportar la gráfica, el usuario debe de asignarle un nombre al proyecto, luego ir al botón **Exportar gráfica**, se abrirá la ventana **Guardar como**, en donde se debe de seleccionar la ubicación en donde se guardara una carpeta creada automáticamente con el nombre **App CEM-LT**, que contiene una sub-carpeta con el **Nombre del proyecto** dentro de ésta carpeta se crean tres documentos, uno de ellos es un documento tipo **PNG**, otro **.fig** compatible con MATLAB, y otro es un documento **.eps** con un formato vectorizado Figura 60.

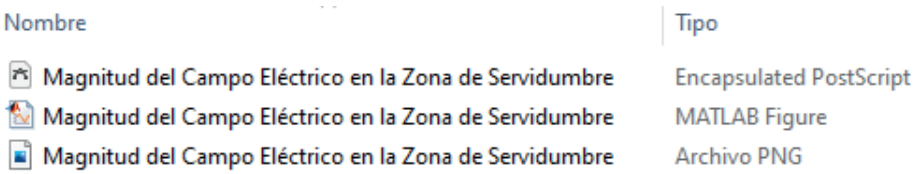


Figura 60: Archivos generados al exportar la gráfica

6.1.2. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°1

SOFTWARE CEM-LT

La Tabla 13 muestra los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°1, en los puntos **(0,1)** y **(1,1)** .

DENSIDAD DE CARGA LÍNEAL $\left[\frac{nC}{m}\right]$		
$\rho_{\mathbf{La}}$	$\rho_{\mathbf{Lb}}$	$\rho_{\mathbf{Lc}}$
$550{,}345 \angle 6{,}008°$	$608{,}997 \angle -120°$	$550{,}345 \angle 113{,}99°$

CAMPO ELÉCTRICO EN P(0,1) $\left[\frac{V}{m}\right]$		
$\mathbf{E_x}$	$\mathbf{E_y}$	$\mathbf{E_{rms}}$
$509{,}134 \angle -30°$	$61{,}963 \angle -120°$	362,668

CAMPO ELÉCTRICO EN P(1,1) $\left[\frac{V}{m}\right]$		
$\mathbf{E_x}$	$\mathbf{E_y}$	$\mathbf{E_{rms}}$
$404{,}387 \angle -38{,}146°$	$544{,}56 \angle -41{,}439°$	479,622

Tabla 13: Resultados ejemplo práctico N°1 software **CEM-LT**.

SOFTWARE COMSOL

Como método de verificación de los resultados obtenidos de campo eléctrico, se hace uso del software **COMSOL**, en donde la Tabla 14 muestra los valores de campo eléctrico simulados en el dominio de la frecuencia para el ejemplo practico N°1.

CAMPO ELÉCTRICO EN P(0,1) $\left[\frac{V}{m}\right]$		
$\mathbf{E_x}$	$\mathbf{E_y}$	$\mathbf{E}_{máx}$
$509{,}10 \angle -30{,}00°$	$62{,}956 \angle -119{,}99°$	512,97

CAMPO ELÉCTRICO EN P(1,1) $\left[\frac{V}{m}\right]$		
$\mathbf{E_x}$	$\mathbf{E_y}$	$\mathbf{E}_{máx}$
$404{,}37 \angle -38{,}157°$	$544{,}73 \angle -41{,}547°$	678,41

Tabla 14: Resultados ejemplo práctico N°1 software **COMSOL** en el dominio de la frecuencia.

La Figura 61 muestra el comportamiento del campo eléctrico en la zona de servidumbre, donde **a)** corresponde a la gráfica generada por el software **CEM-LT** y **b)** corresponde

a la gráfica generada por el software **COMSOL** en una simulación para el dominio de la frecuencia.

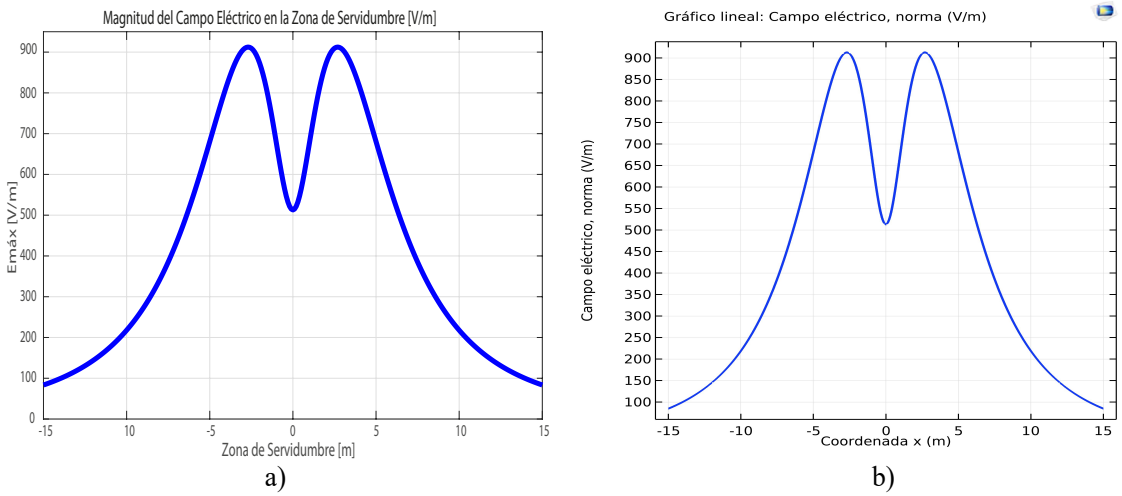


Figura 61: Comportamiento del campo eléctrico en zona de servidumbre generadas en los software: **a)** CEM-LT **b)** COMSOL

NOTA: Si desea replicar los resultados obtenidos en **COMSOL**, se recomienda la **GUÍA COMSOL MULTIPHYSICS - LÍNEA TRIFÁSICA CAMPO ELÉCTRICO - FRECUENCIA**,la cual es una guía desarrollada en el grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética **CEM** de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La guía presenta el procedimiento detallado para determinar cálculo del campo eléctrico en líneas de transmisión trifásicas, en el dominio de la frecuencia en el software **COMSOL**.

6.2. EJEMPLO PRÁCTICO N°2

Una línea de transmisión, tiene una tensión de fase de 34.5[kV] y opera a una frecuencia de 60[Hz],la disposición de la torre es vertical, la línea esta compuesta por un conductor por fase y sin cables de guarda. La Tabla 15 presenta las características de los conductores de fase y las distancias entre conductores y tierra son las que se muestran en la Figura 62.

Calcule el campo eléctrico en $P\,(0,1)$.

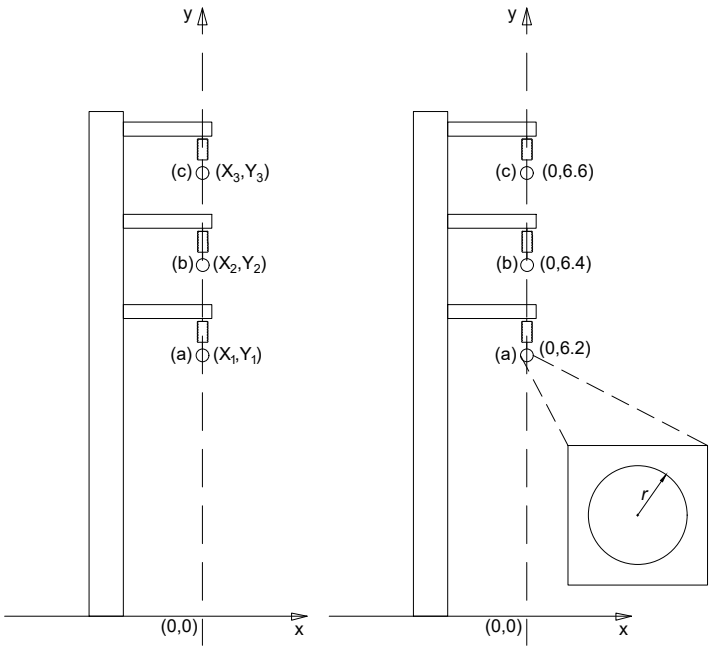


Figura 62: Torre de transmisión de 34,5[kV] configuración vertical (Elaboración Propia)

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (30/7)	Eagle	$556,5$	$10,00$	$0,121\frac{\Omega}{km}$

Tabla 15: Características del conductor ejemplo práctico N°2.

Siguiendo la **Metodología para el uso de la aplicación (CEM-LT)** descrita en el Ejemplo Práctico N°1, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°2.

6.2.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°2

SOFTWARE CEM-LT

La Tabla 16 muestra los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°2, en el punto **(0,1)**.

DENSIDAD DE CARGA LÍNEAL $\left[\frac{nC}{m}\right]$		
$\rho_{\mathbf{La}}$	$\rho_{\mathbf{Lb}}$	$\rho_{\mathbf{Lc}}$
$576{,}619 \angle 8{,}46°$	$684{,}977 \angle -119{,}93°$	$574{,}853 \angle 111{,}42°$

CAMPO ELÉCTRICO EN P(0,1) $\left[\frac{V}{m}\right]$		
$\mathbf{E_x}$	$\mathbf{E_y}$	$\mathbf{E_{rms}}$
$0 \angle 0°$	$266{,}256 \angle -164{,}54°$	188,27

Tabla 16: Resultados ejemplo práctico N°2 software **CEM-LT**.

SOFTWARE COMSOL

Como método de verificación de los resultados obtenidos de campo eléctrico, se hace uso del software **COMSOL**, en donde la Tabla 17 muestra los valores de campo eléctrico simulados en el dominio de la frecuencia para el ejemplo practico N°2.

CAMPO ELÉCTRICO EN P(0,1) $\left[\frac{V}{m}\right]$		
$\mathbf{E_x}$	$\mathbf{E_y}$	$\mathbf{E}_{máx}$
$680{,}1\ \mathrm{E}^{-6} \angle -15{,}9°$	$265{,}22 \angle -164{,}3°$	265,22

Tabla 17: Resultados ejemplo práctico N°2 software **COMSOL** en el dominio de la frecuencia.

La Figura 63 muestra el comportamiento del campo eléctrico en la zona de servidumbre, donde **a)** corresponde a la gráfica generada por el software **CEM-LT** y **b)** corresponde a la gráfica generada por el software **COMSOL** en una simulación para el dominio de la frecuencia.

NOTA: Si desea replicar los resultados obtenidos en **COMSOL**, se recomienda la **GUÍA COMSOL MULTIPHYSICS - LÍNEA TRIFÁSICA CAMPO ELÉCTRICO - FRECUENCIA**,la cual es una guía desarrollada en el grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética **CEM** de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La guía presenta el procedimiento detallado para determinar cálculo del campo eléctrico en líneas de transmisión trifásicas, en el dominio de la frecuencia en el software **COMSOL**.

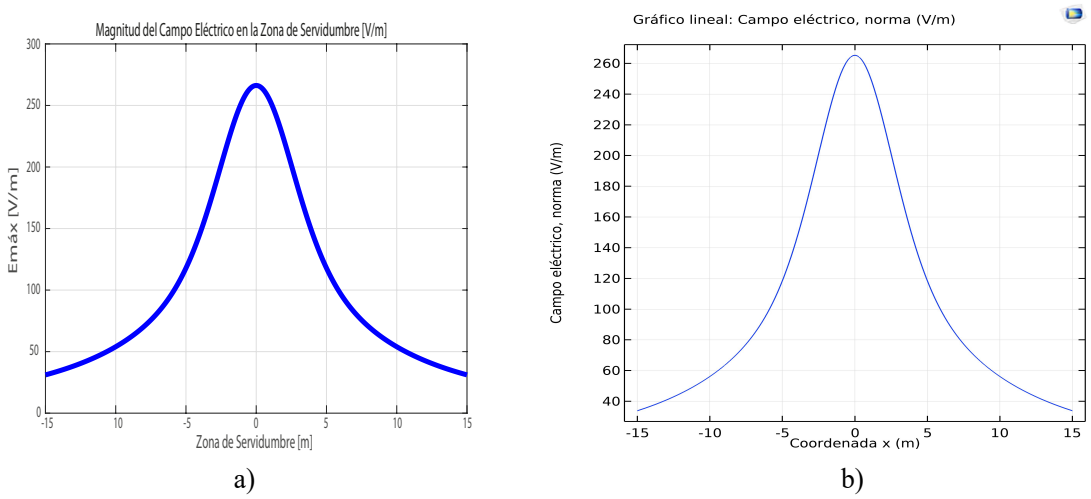


Figura 63: Comportamiento del campo eléctrico en zona de servidumbre generadas en los software: **a)** CEM-LT **b)** COMSOL

6.3. EJEMPLO PRÁCTICO N° 3

Una línea de transmisión, tiene una tensión de fase de 34.5[kV] y opera a una frecuencia de 60[Hz],la disposición de la torre es delta, la línea esta compuesta por un conductor por fase y sin cables de guarda. La Tabla 18 presenta las características de los conductores de fase y las distancias entre conductores y tierra son las que se muestran en la Figura 64.

Calcule el campo eléctrico en $P\,(0,1)$.

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (30/7)	Eagle	$556,5$	$10,00$	$0,121\frac{\Omega}{km}$

Tabla 18: Características del conductor ejemplo práctico N°3.

Siguiendo la **Metodología para el uso de la aplicación (CEM-LT)** descrita en el Ejemplo Práctico N°1, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°3.

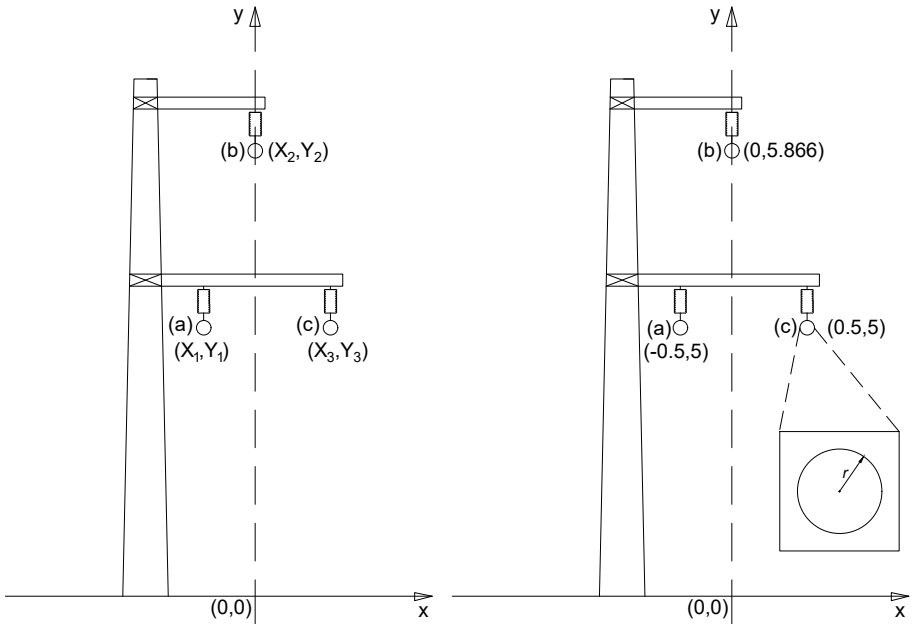


Figura 64: Torre de transmisión de 34,5[kV] configuración delta (Elaboración Propia)

6.3.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°3

SOFTWARE CEM-LT

La Tabla 19 muestra los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°3, en el punto **(0,1)**.

DENSIDAD DE CARGA LÍNEAL $\left[\frac{nC}{m}\right]$		
$\rho_{\mathbf{La}}$	$\rho_{\mathbf{Lb}}$	$\rho_{\mathbf{Lc}}$
$418{,}460 \angle 0{,}337°$	$414{,}198 \angle -120°$	$418{,}460 \angle 119{,}662°$

CAMPO ELÉCTRICO EN P(0,1) $\left[\frac{V}{m}\right]$		
$\mathbf{E_x}$	$\mathbf{E_y}$	$\mathbf{E_{rms}}$
$220{,}517 \angle -30°$	$513{,}927 \angle -120°$	395,442

Tabla 19: Resultados ejemplo práctico N°3 software **CEM-LT**.

SOFTWARE COMSOL

Como método de verificación de los resultados obtenidos de campo eléctrico, se hace uso del software **COMSOL**, en donde la Tabla 20 muestra los valores de campo eléctrico simulados en el dominio de la frecuencia para el ejemplo practico N°3.

CAMPO ELÉCTRICO EN P(0,1) $\left[\frac{V}{m}\right]$		
$\mathbf{E_x}$	$\mathbf{E_y}$	$\mathbf{E}_{máx}$
$220{,}48 \angle -30°$	$512{,}02 \angle -120°$	557,47

Tabla 20: Resultados ejemplo práctico N°3 software **COMSOL** en el dominio de la frecuencia.

La Figura 65 muestra el comportamiento del campo eléctrico en la zona de servidumbre, donde **a)** corresponde a la gráfica generada por el software **CEM-LT** y **b)** corresponde a la gráfica generada por el software **COMSOL** en una simulación para el dominio de la frecuencia.

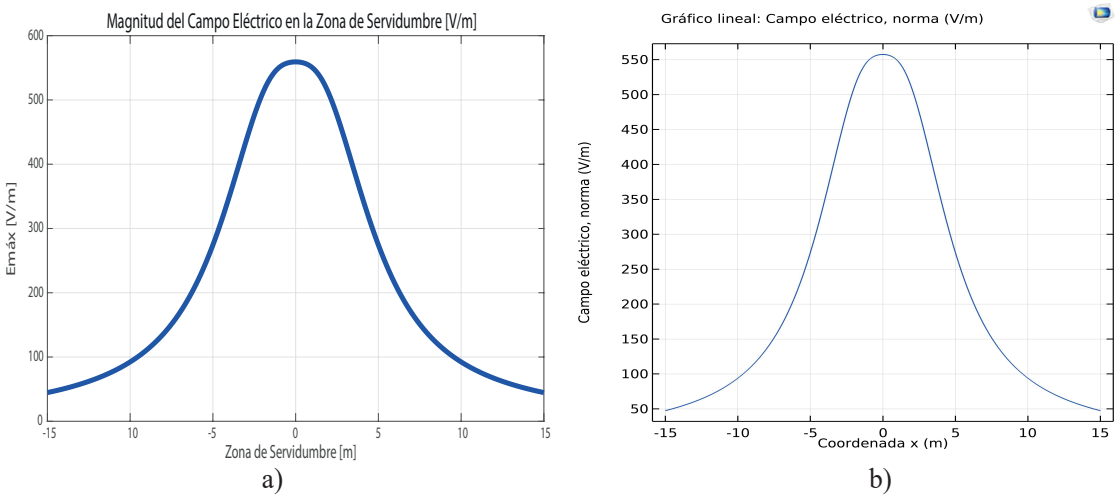


Figura 65: Comportamiento del campo eléctrico en zona de servidumbre generadas en los software: **a)** CEM-LT **b)** COMSOL

NOTA: Si desea replicar los resultados obtenidos en **COMSOL**, se recomienda la **GUÍA COMSOL MULTIPHYSICS - LÍNEA TRIFÁSICA CAMPO ELÉCTRICO - FRECUENCIA**,la cual es una guía desarrollada en el grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética **CEM** de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La guía presenta el procedimiento detallado para determinar cálculo del campo eléctrico en líneas de transmisión trifásicas, en el dominio de la frecuencia en el software **COMSOL**.

6.4. EJEMPLO PRÁCTICO N° 4

Una línea de transmisión, tiene una tensión de fase de 115[kV] y opera a una frecuencia de 60[Hz], la línea esta compuesta por 2 conductores en haz, con 1 cable de guarda. La Figura 66 presenta la configuración de los conductores y los cables de guarda. La Tabla 21 presenta las características de los conductores de fase, y la Tabla 22 presenta las características de los conductores de guarda.

Calcule el campo eléctrico en $P\,(5,1)$.

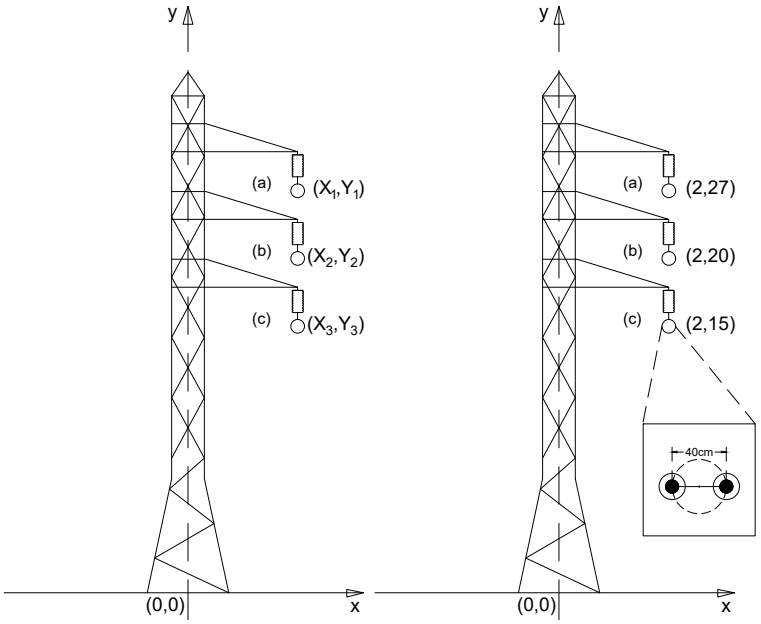


Figura 66: Torre de transmisión de 115[kV] con 2 conductores en haz (Elaboración Propia)

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (24/7)	Rook	636	$9,96$	$0,107\frac{\Omega}{km}$

Tabla 21: Características del conductor de fase ejemplo práctico N°4.

Siguiendo la **Metodología para el uso de la aplicación (CEM-LT)** descrita en el Ejemplo Práctico N°1, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°4.

Conductor de guarda				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
AAC (7)	Aster	2/0	$3,81$	$0,521\frac{\Omega}{km}$

Tabla 22: Características del conductor de guarda ejemplo práctico N°4.

6.4.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°4

SOFTWARE CEM-LT

La Tabla 23 muestra los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°4, en el punto **(5,1)**.

DENSIDAD DE CARGA LÍNEAL $\left[\frac{nC}{m}\right]$			
$\rho_{\mathbf{La}}$	$\rho_{\mathbf{Lb}}$	$\rho_{\mathbf{Lc}}$	$\rho_{\mathbf{g1}}$
$1311{,}559 \angle 4{,}94°$	$1451{,}112 \angle -117{,}75°$	$1384{,}916 \angle 112{,}955°$	$184{,}157 \angle 169{,}599°$

CAMPO ELÉCTRICO EN P(5,1) $\left[\frac{V}{m}\right]$		
$\mathbf{E_x}$	$\mathbf{E_y}$	$\mathbf{E_{rms}}$
$58{,}207 \angle 130{,}453°$	$1271{,}859 \angle -43{,}385°$	900,281

Tabla 23: Resultados ejemplo práctico N°4 software **CEM-LT**.

SOFTWARE COMSOL

Como método de verificación de los resultados obtenidos de campo eléctrico, se hace uso del software **COMSOL**, en donde la Tabla 24 muestra los valores de campo eléctrico simulados en el dominio de la frecuencia para el ejemplo practico N°4.

CAMPO ELÉCTRICO EN P(5,1) $\left[\frac{V}{m}\right]$		
$\mathbf{E_x}$	$\mathbf{E_y}$	$\mathbf{E}_{máx}$
$58{,}937 \angle 130{,}91°$	$1242 \angle -44{,}04°$	1243,4

Tabla 24: Resultados ejemplo práctico N°4 software **COMSOL** en el dominio de la frecuencia.

La Figura 67 muestra el comportamiento del campo eléctrico en la zona de servidumbre, donde **a)** corresponde a la gráfica generada por el software **CEM-LT** y **b)** corresponde a la gráfica generada por el software **COMSOL** en una simulación para el dominio de la frecuencia.

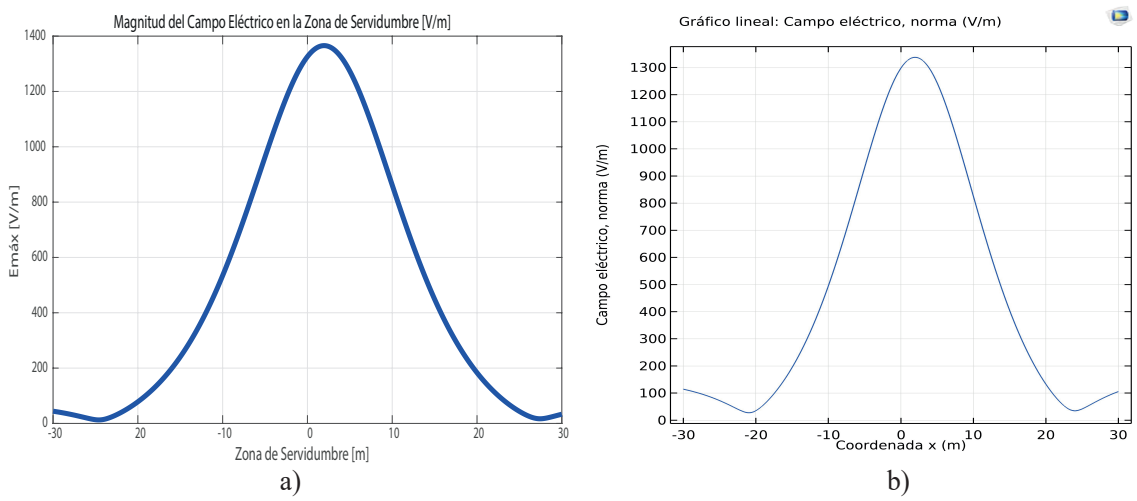


Figura 67: Comportamiento del campo eléctrico en zona de servidumbre generadas en los software: **a)** CEM-LT **b)** COMSOL

NOTA: Si desea replicar los resultados obtenidos en **COMSOL**, se recomienda la **GUÍA COMSOL MULTIPHYSICS - LÍNEA TRIFÁSICA CAMPO ELÉCTRICO - FASORES**,la cual es una guía desarrollada en el grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética **CEM** de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La guía presenta el procedimiento detallado para determinar cálculo del campo eléctrico en líneas de transmisión trifásicas, en el dominio de la frecuencia como del tiempo en el software **COMSOL**.

6.5. EJEMPLO PRÁCTICO N° 5

Una línea de transmisión, tiene una tensión de fase de 34.5[kV] y opera a una frecuencia de 60[Hz], la línea esta compuesta por 4 conductores en haz, con 2 cables de guarda. La Figura 68 presenta la configuración de los conductores y los cables de guarda.La Tabla 25 presenta las características de los conductores de fase, y la Tabla 26 presenta las características de los conductores de guarda.

Calcule el campo eléctrico en $P\,(0,1)$.

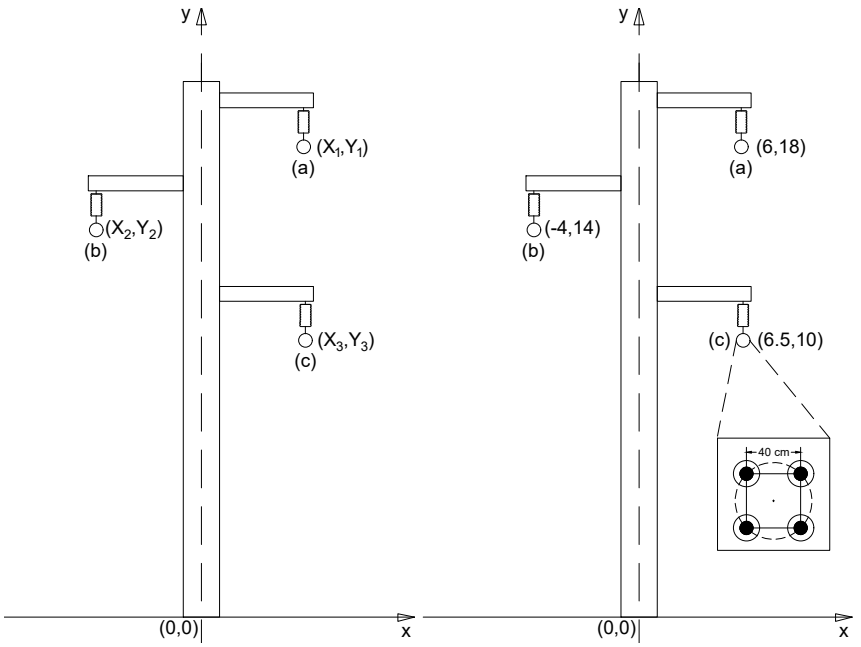


Figura 68: Torre de transmisión de 34.5[kV] con 4 conductores en haz (Elaboración Propia)

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (6/1)	Sparrow	2	$2,58$	$1,10\frac{\Omega}{km}$

Tabla 25: Características del conductor ejemplo práctico N°5.

Siguiendo la **Metodología para el uso de la aplicación (CEM-LT)** descrita en el Ejemplo Práctico N°1, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°5.

Conductor de guarda				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
AAC (7)	Aster	2/0	$3,81$	$0,521\frac{\Omega}{km}$

Tabla 26: Características del conductor de guarda ejemplo práctico N°5.

6.5.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°5

SOFTWARE CEM-LT

La Tabla 27 muestra los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°5, en el punto **(0,1)**.

DENSIDAD DE CARGA LÍNEAL $\left[\frac{nC}{m}\right]$		
$\rho_{\mathbf{La}}$	$\rho_{\mathbf{Lb}}$	$\rho_{\mathbf{Lc}}$
$455{,}972 \angle -2{,}974°$	$435{,}217 \angle -120{,}47°$	$463{,}338 \angle 123{,}372°$
$\rho_{\mathbf{g1}}$	$\rho_{\mathbf{g2}}$	
$33{,}151 \angle 92{,}348°$	$45{,}201 \angle 165{,}189°$	

CAMPO ELÉCTRICO EN P(0,1) $\left[\frac{V}{m}\right]$		
$\mathbf{E_x}$	$\mathbf{E_y}$	$\mathbf{E_{rms}}$
$122{,}653 \angle -84{,}094°$	$446{,}203 \angle -15{,}637°$	327,213

Tabla 27: Resultados ejemplo práctico N°5 software **CEM-LT**.

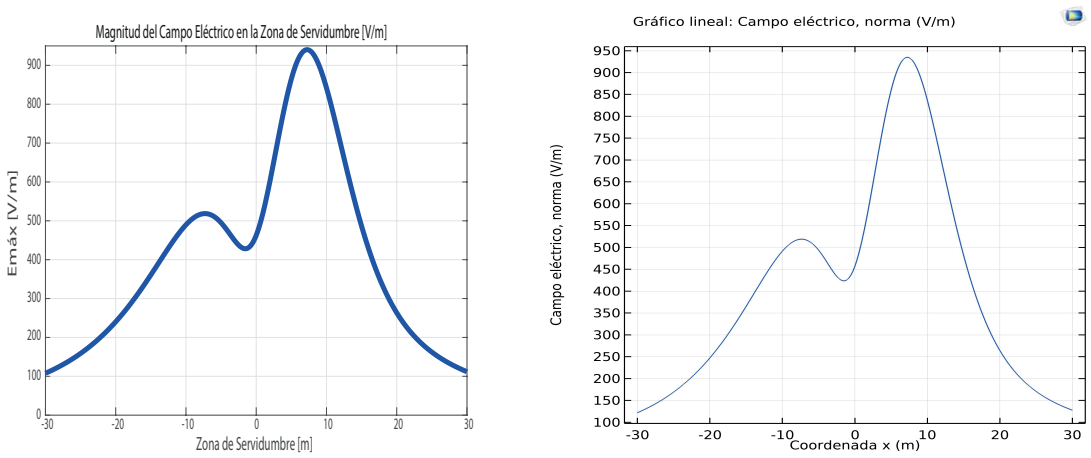
SOFTWARE COMSOL

Como método de verificación de los resultados obtenidos de campo eléctrico, se hace uso del software **COMSOL**, en donde la Tabla 28 muestra los valores de campo eléctrico simulados en el dominio de la frecuencia para el ejemplo practico N°5.

CAMPO ELÉCTRICO EN P(0,1) $\left[\frac{V}{m}\right]$		
$\mathbf{E_x}$	$\mathbf{E_y}$	$\mathbf{E}_{máx}$
$122{,}9 \angle -84{,}086°$	$440{,}07 \angle -15{,}399°$	456,91

Tabla 28: Resultados ejemplo práctico N°5 software **COMSOL** en el dominio de la frecuencia.

La Figura 69 muestra el comportamiento del campo eléctrico en la zona de servidumbre, donde **a)** corresponde a la gráfica generada por el software **CEM-LT** y **b)** corresponde a la gráfica generada por el software **COMSOL** en el dominio de la frecuencia.



a) b)

Figura 69: Comportamiento del campo eléctrico en zona de servidumbre generadas en los software: **a)** CEM-LT **b)** COMSOL

NOTA: Si desea replicar los resultados obtenidos en **COMSOL**, se recomienda la **GUÍA COMSOL MULTIPHYSICS - LÍNEA TRIFÁSICA CAMPO ELÉCTRICO - FRECUENCIA**,la cual es una guía desarrollada en el grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética **CEM** de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La guía presenta el procedimiento detallado para determinar cálculo del campo eléctrico en líneas de transmisión trifásicas, en el dominio de la frecuencia en el software **COMSOL**.

7. USO DEL SOFTWARE MÓDULO DE CAMPO MAGNÉTICO

7.1. EJEMPLO PRÁCTICO N°1

La línea de transmisión trifásica en configuración horizontal Figura 70 esta compuesta por un conductor por fase a una frecuencia de 60[Hz]. La Tabla 29 presenta las características de los conductores de fase, la Ec.5 muestra las corrientes de las líneas. Determine:

- La intensidad de campo magnético **H** y densidad de campo magnético **B** en $P\,(0,1)$.
- El valor eficaz de la intensidad de campo magnético **H** y valor eficaz de la densidad de campo magnético **B** en el punto indicado.

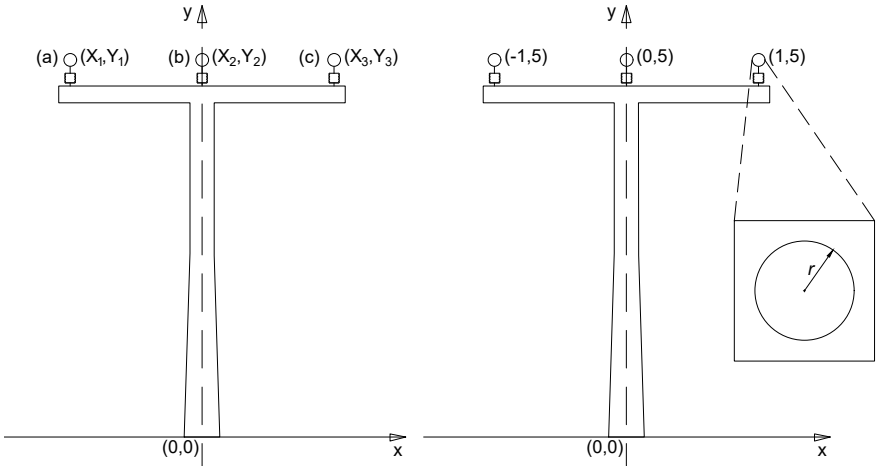


Figura 70: Torre de transmisión de configuración horizontal (Elaboración Propia)

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (30/7)	Eagle	$556,5$	$10,00$	$0,121\frac{\Omega}{km}$

Tabla 29: Características del conductor ejemplo práctico N°1.

$$\begin{aligned} i_a &= 1000\cos(\omega t)\ \ [A] \\ i_b &= 1000\cos(\omega t\ -120°)\ \ [A] \\ i_c &= 1000\cos(\omega t\ +120°)\ \ [A] \end{aligned} \tag{5}$$

7.1.1. METODOLOGÍA PARA EL USO DE LA APLICACIÓN

Paso 1: elegir el marco de referencia para el problema en cuestión, la Figura 71 muestra 3 posibles marcos de referencia que el usuario puede elegir. Cabe resaltar que la elección del

mismo es totalmente arbitraria, el resultado será el mismo independientemente de la elección del marco de referencia, pero es absolutamente necesario establecerlo.

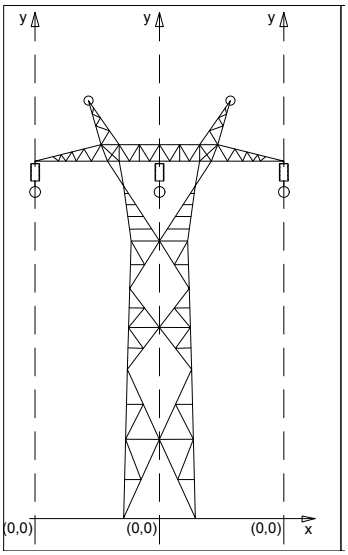


Figura 71: Marco de referencia ejercicio práctico N°1 (Elaboración Propia)

NOTA Para efectos del presente ejercicio el marco de referencia elegido es tomar como eje de coordenadas **(0,0)** la fase central.

Paso 2: una vez se elige el marco de referencia de se procede a establecer una nomenclatura para identificar los conductores de fase, y así asignar las coordenadas según el marco de referencia y las distancias entre los conductores y tierra, tal como se muestra en la Figura 72.

Paso 3: Establecer las distancias entre los conductores de fase y la altura de ellos según el marco de referencia elegido Figura 70, la Tabla 30 presenta la información correspondiente a las coordenadas del ejercicio planteado.

Fase A [m]	Fase B [m]	Fase C [m]
$(-1,5)$	$(0,5)$	$(1,5)$

Tabla 30: Resumen de las coordenadas de los conductores de fase ejercicio práctico N° 1.

Paso 4: una vez establecidos los datos asociados a la geometría de la línea, se procede a ingresar los parámetros requeridos en la interfaz del modulo de campo magnético del software.

Inicialmente la interfaz del modulo de campo magnético muestra la ventana de **Configuración sistema trifásico**, ésta ventana cuenta con cuatro paneles,como se observa en la Figura 73, éstos se explican a continuación:

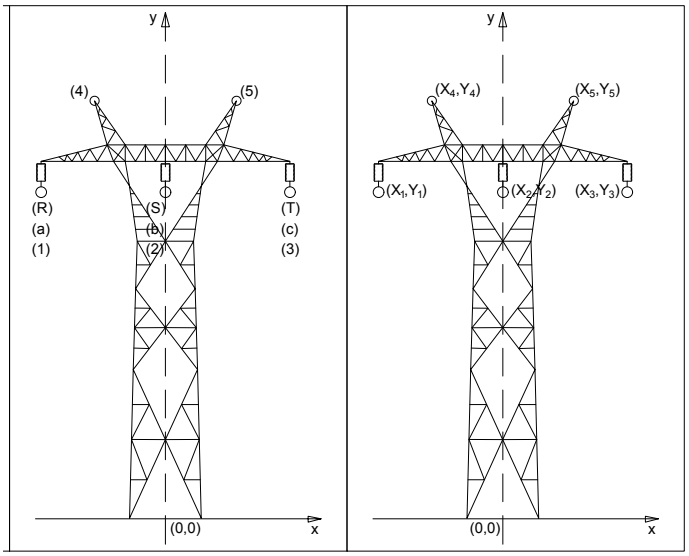


Figura 72: Nomenclatura para los conductores de fase, incluyendo la asignación de las coordenadas según el marco de referencia elegido en paso 1. (Elaboración Propia)

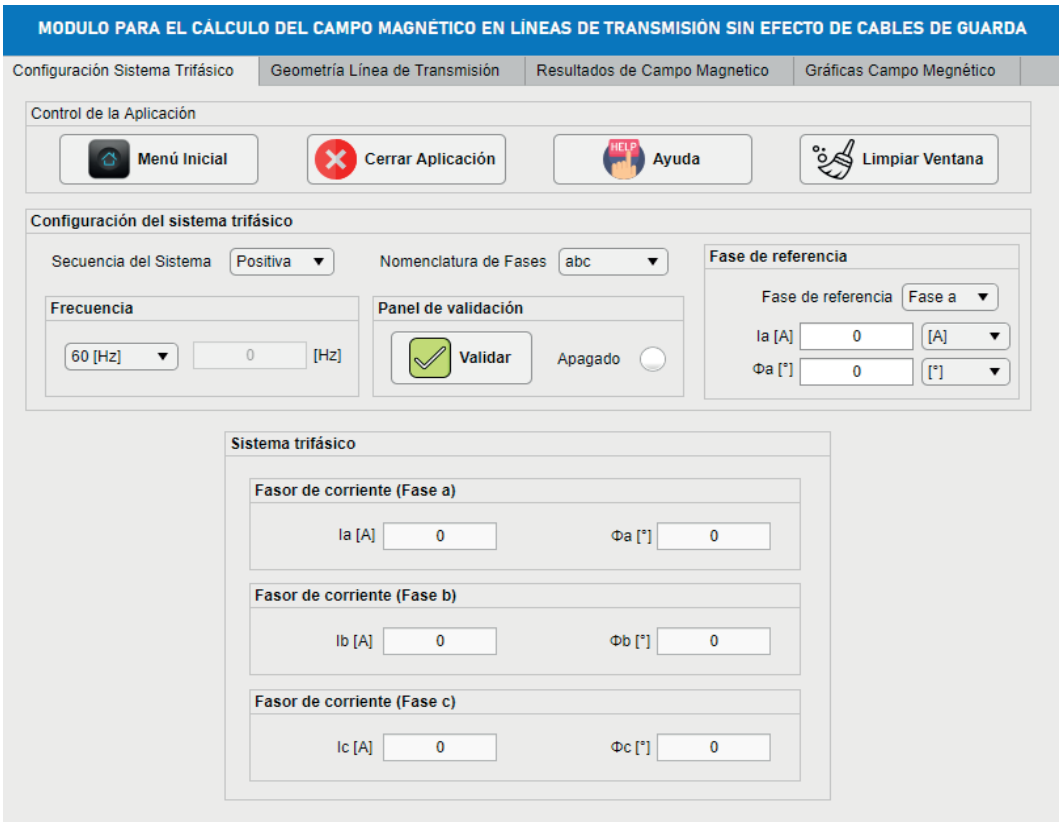


Figura 73: Interfaz ventana **Configuración sistema trifásico**.

1. Panel **Control de la aplicación**, éste panel se compone por cuatro botones:

   - Botón **Menú inicial**, al dar clic sobre éste botón el usuario podrá devolverse al menú principal de la aplicación.
   - Botón **Cerrar aplicación**, al dar clic sobre éste botón se desplegara un mensaje de advertencia, el cual tiene como finalidad indicarle al usuario si realmente desea cerrar la aplicación.
   - Botón **Ayuda**, al dar clic sobre éste botón permitirá que el usuario tenga acceso al manual para el módulo de campo magnético, el cual es un documento tipo **pdf**.
   - Botón **Limpiar ventana**, al dar clic sobre éste botón, la aplicación mostrara un mensaje que le indicara al usuario si desea volver cero los parámetros configurados.

2. Panel **Configuración del sistema trifásico**, a continuación se explican algunas características importantes que se deben de tener en cuenta al momento de ingresar valores en la aplicación:

   - **Secuencia del sistema:** El software permite seleccionar entre las secuencias **Positiva** y **Negativa**, en donde solo es necesario ingresar el valor de tensión y ángulo para que el software automáticamente complete la secuencia. También se habilita la opción **Otra**, que ofrece la posibilidad de ingresar manualmente otros valores de secuencia en magnitud y ángulo Figura 74.

     Nota: las casillas de magnitud y ángulo de la ventana **Fase de referencia** solo estarán activas si el usuario elije la secuencia (**Positiva** ó **Negativa**), si el usuario elige la opción **Otra**, estas casillas quedaran deshabilitadas, pero a su vez en el panel **Sistema trifásico** las casillas de fasores de corriente (**Fase a**), (**Fase b**) y (**Fase c**) se habilitaran para ingresar los valores de magnitud y ángulo de corriente. Cabe destacar que estas casillas no estarán habilitadas para edición si el usuario elije una secuencia, ya sea (**Positiva** ó **Negativa**), en estos casos la aplicación asigna las magnitudes y ángulos en función de los valores que ingresa como magnitud y fase de referencia.

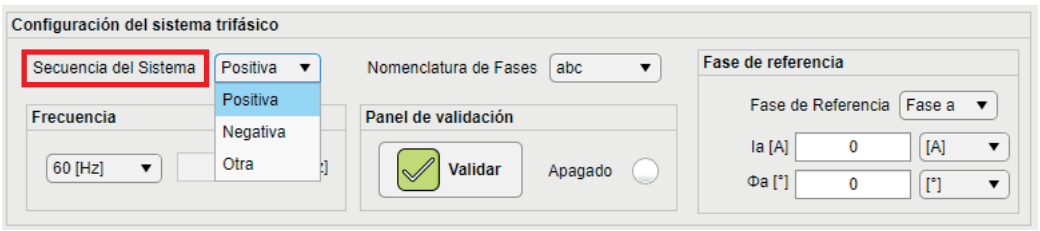


Figura 74: Secuencia del sistema

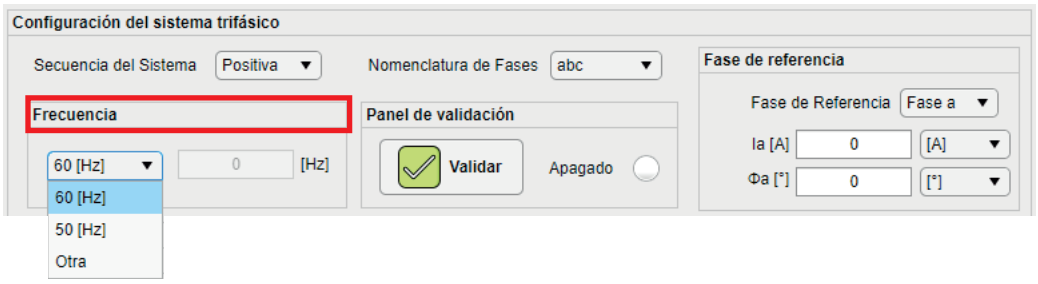


Figura 75: Frecuencia del sistema

- **Frecuencia del sistema:** El software permite seleccionar entre las frecuencias industriales **60 [Hz]** y **50[Hz]**, como también habilita la opción **Otra**, que ofrece la posibilidad de ingresar otro valor para la frecuencia del sistema Figura 75.
- **Nomenclatura del sistema:** El software permite seleccionar la nomenclatura de los conductores de fase, ya sea: **abc**, **RST** ó $\mathbf{L_1L_2L_3}$ Figura 76.

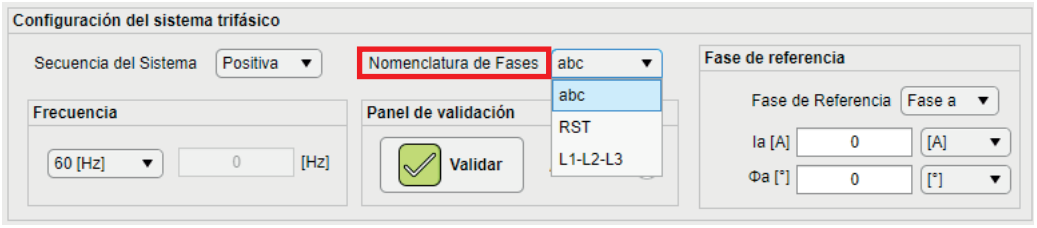


Figura 76: Nomenclatura del sistema

- **Fase de referencia:** El software permite ingresar la fase de referencia que tenga el sistema, generalmente se toma la fase **a** para la nomenclatura de los conductores de fase **abc** Figura 77.

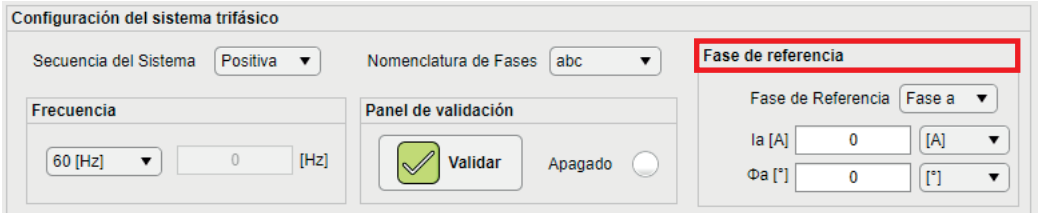


Figura 77: Fase de referencia del sistema

3. Panel **Sistema trifásico**, éste panel permite visualizar la secuencia de corrientes del sistema. Si en el panel **Configuración del sistema trifásico** la opción de **Secuencia del sistema** se encuentra en **Otra** el usuario podrá ingresar los valores de magnitud y ángulo de corrientes en las casillas del panel **Sistema trifásico** para los fasores de tensión (**Fase a**), (**Fase b**) y (**Fase c**).

Nota: Si el usuario asigna un valor de cero a la magnitud y ángulo de referencia cuando se ha elegido una secuencia (**Positiva** ó **Negativa**), y se da clic en el botón **Validar** la aplicación mostrará un mensaje de advertencia, el cual se puede visualizar en la Figura 78, cabe resaltar que el error se corrige fácilmente si se asigna un valor distinto de cero en la magnitud de corriente de referencia, pues un ángulo cero es común y posible.

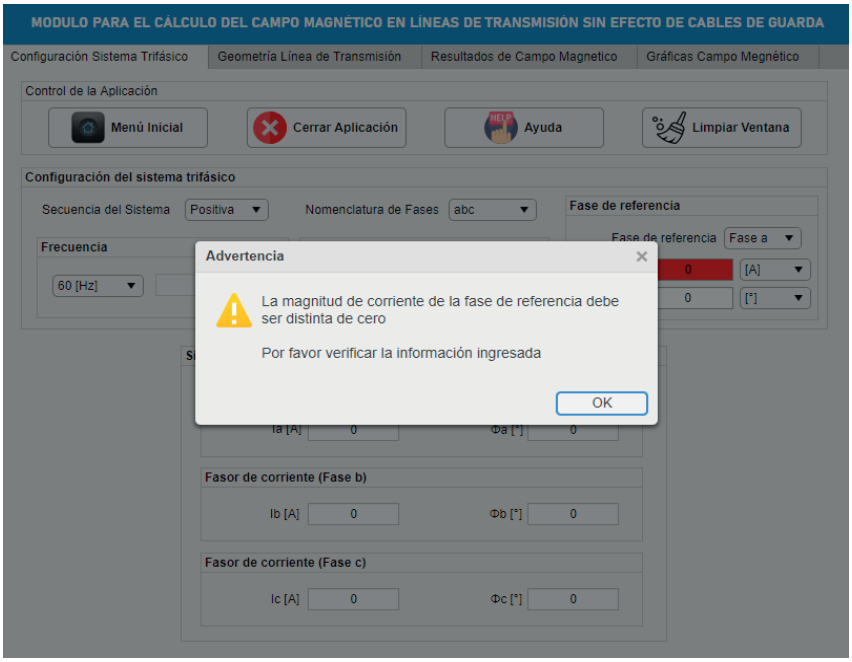


Figura 78: Configurando del sistema trifásico advertencia: 0[V] en la magnitud de referencia.

Una vez ingresado cada uno de los valores en los paneles del sistema trifásico, el usuaria debe dar clic sobre el botón **Validar**, el cual mostrara un mensaje informativo, que indica que el usuario ha ingresado de forma correcta los valores. la Figura 79 muestra el mensaje de configuración exitosa del sistema para el ejemplo práctico N°1.

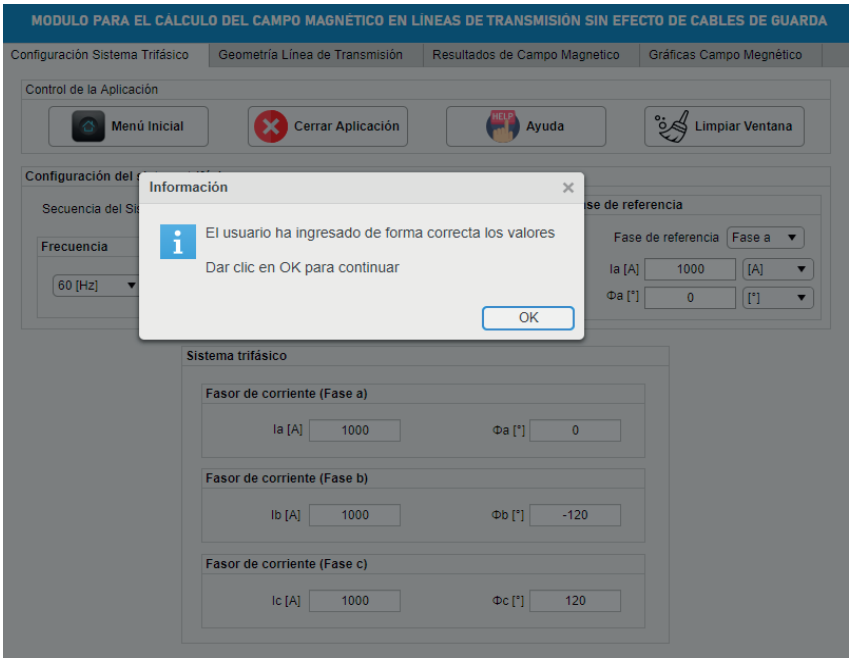


Figura 79: Mensaje de configuración exitosa del sistema trifásico ejemplo práctico N°1

Una vez finalizado el proceso de parametrizar la ventana de **Configuración sistema trifásico**, se continua a la ventana siguiente **Geometría línea de transmisión**, para la efectiva configuración de ésta ventana es necesario tener en cuenta los siguientes paneles:

1. Panel **Parámetros de línea conductores de fase** Figura 80, éste panel permite seleccionar dos opciones:



Figura 80: Panel **Parámetros de línea conductores de fase** de la ventana **Geometría línea de transmisión**.

   - **Ingresar conductores**, ésta opción habilita la ventana **RMG** del conductor, permitiendo que el usuario ingrese el valor de forma manual.
   - **Librería fabricante**, ésta opción despliega un ventana que tiene una librería de conductores del fabricante **CENTELSA**. El usuario solo debe seleccionar en el panel **Información relevante del conductor**, el tipo de cable (**AAC**, **AAAC**, **ACSR**, **ACSR/AW**), y automáticamente en la ventana inferior se van a cargar los conductores.

Para cargar el conductor, el usuario debe dar clic sobre el número que se encuentra en la primera columna de la tabla, luego ir al botón **Cargar conductor** y dar clic sobre él, para devolverse a la ventana de **Geometría línea de transmisión**, con el valor del **RMG** del conductor seleccionado en la librería.

Nota: La Figura 80 muestra los valores cargados de la **Librería de conductores**, y la Figura 81 muestran los datos seleccionados en la ventana **Librería de conductores** con los valores cargados para el ejemplo practico N°1.

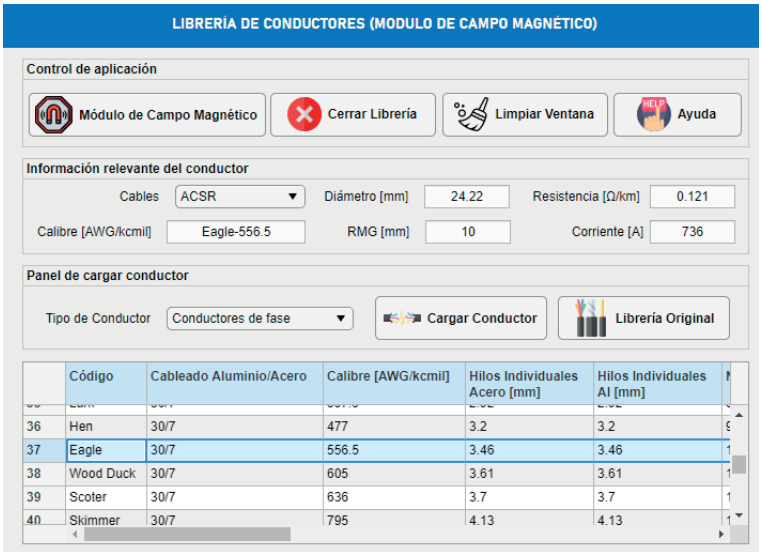


Figura 81: Ventana **Librería conductores** módulo de campo magnético.

2. Configure el panel **Geometría línea de transmisión** Figura 82, éste panel permite que el usuario ingrese las coordenadas de los conductores de fase dependiendo el marco de referencia seleccionado.

Nota: La Figura 82 muestra los valores correspondientes a las coordenadas de los conductores del ejemplo practico N°1.

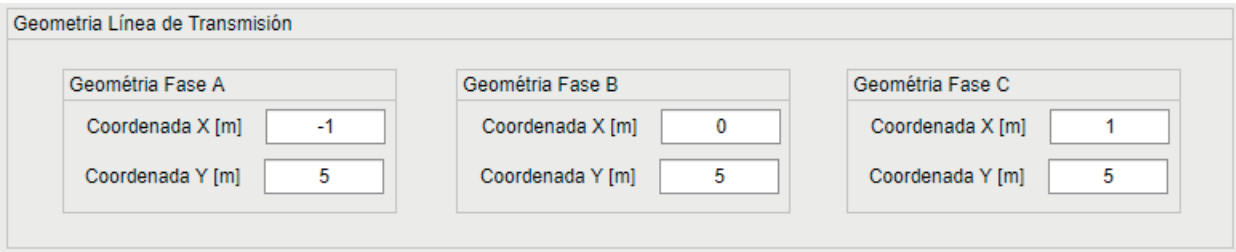


Figura 82: Panel **Geometría línea de transmisión** del modulo de campo magnético.

Una vez el usuario ha parametrizado la ventana de **Geometría línea de transmisión**, el usuario debe ir a la ventana **Resultados de campo magnético**, se debe configurar el panel de: **Control ventana de resultados** para conocer los valores asociados al campo magnético:

1. En el panel **Control de ventana de resultados**, el usuario puede ingresar los valores asociados a la **Zona de servidumbre**, es importante tener en cuenta para cuantos pasos desea el usuario hacer el cálculo del campo magnético en la zona de servidumbre, ya que el número de puntos no puede superar un máximo de **30**,**000** puntos, ésto implica que al tomar más puntos el software tome un tiempo considerable para determinar el cálculo del campo magnético,de igual forma se recomienda que el usuario ingrese un valor entre **1** y **0**,**01**, para obtener una buena reproducción del comportamiento del campo magnético, ése se puede apreciar al graficar el campo magnético.

2. El usuario también puede seleccionar la variable de salida para la magnitud y las componentes de intensidad de campo magnético y densidad de campo magnético, ya sea valor máximo $\mathbf{H_{máx}}, \mathbf{B_{máx}}$ ó valor eficaz $\mathbf{H_{rms}}, \mathbf{B_{rms}}$.

   Nota: dependiendo de la variable de salida que seleccione el usuario en la ventana de **Resultados de campo magnético**, al momento de graficar en la ventana de **Gráficas de campo magnético** solo le permitirá generar las gráficas para la variable de salida seleccionada anteriormente.

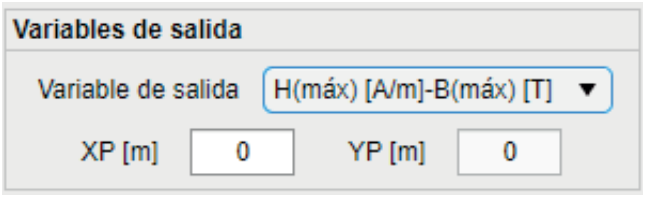


Figura 83: Variables de salida modulo campo magnético.

- **Nota Importante:** en la Figura 83, cuando el usuario elige como variable de salida $\mathbf{H_{máx}}$, el programa calculará la magnitud de la componente horizontal y vertical de la intensidad de campo magnético instantáneo.[2] Mientras que si la elección es $\mathbf{H_{rms}}$, el programa calculará los valores eficaces asociados a la componente horizontal y vertical de la intensidad de campo magnético.

  Es importante aclarar que para el cálculo de la magnitud de la intensidad de campo magnético instantáneo basta con aplicar la Ec.6.

$$\mathbf{H_{máx}} = \sqrt{(H_{x_{máx}})^2 + (H_{y_{máx}})^2} \ \left[\frac{A}{m}\right] \tag{6}$$

[2]La intensidad de campo magnético instantáneo en (A/m) es la intensidad de campo magnético en cualquier instante de tiempo

Mientras que para el cálculo de la magnitud de la intensidad de campo magnético como valor eficaz es necesario referirse a la definición del valor eficaz de una señal periódica la cual está dada por Ec.7.

$$\mathbf{X_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x^2\,dt} \tag{7}$$

Si $\mathbf{H} = H_x \cos(\omega t + \theta)\,\mathbf{a}_x + H_y \cos(\omega t + \beta)\,\mathbf{a}_y$, donde:
$\mathbf{H}_x$: Es la componente horizontal de la intensidad de campo magnético instantáneo.
$\mathbf{H}_y$: Es la componente vertical de la intensidad de campo magnético instantáneo.
Entonces:

$$\mathbf{H_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(H_{x_{máx}})^2 + (H_{y_{máx}})^2}\ \left[\frac{A}{m}\right] \tag{8}$$

$$\mathbf{H_{rms}} = \sqrt{(H_{x_{rms}})^2 + (H_{rms})^2}\ \left[\frac{A}{m}\right] \tag{9}$$

$\mathbf{H}_{rms}$: Es el valor rms o eficaz de la magnitud de la intensidad de campo magnético total.

3. Es necesario que el usuario ingrese el **Punto de cálculo** en el cual desea hallar el campo magnético.

4. Luego de haber parametrizado los paneles correspondientes, el usuario debe de dar clic en el botón **Calcular**, para generar los resultados asociados a la intensidad de campo magnético **H** y la densidad de campo magnético **B**. La Figura 84 muestra la ventana de **Resultados de campo magnético** para el ejemplo práctico N°1.

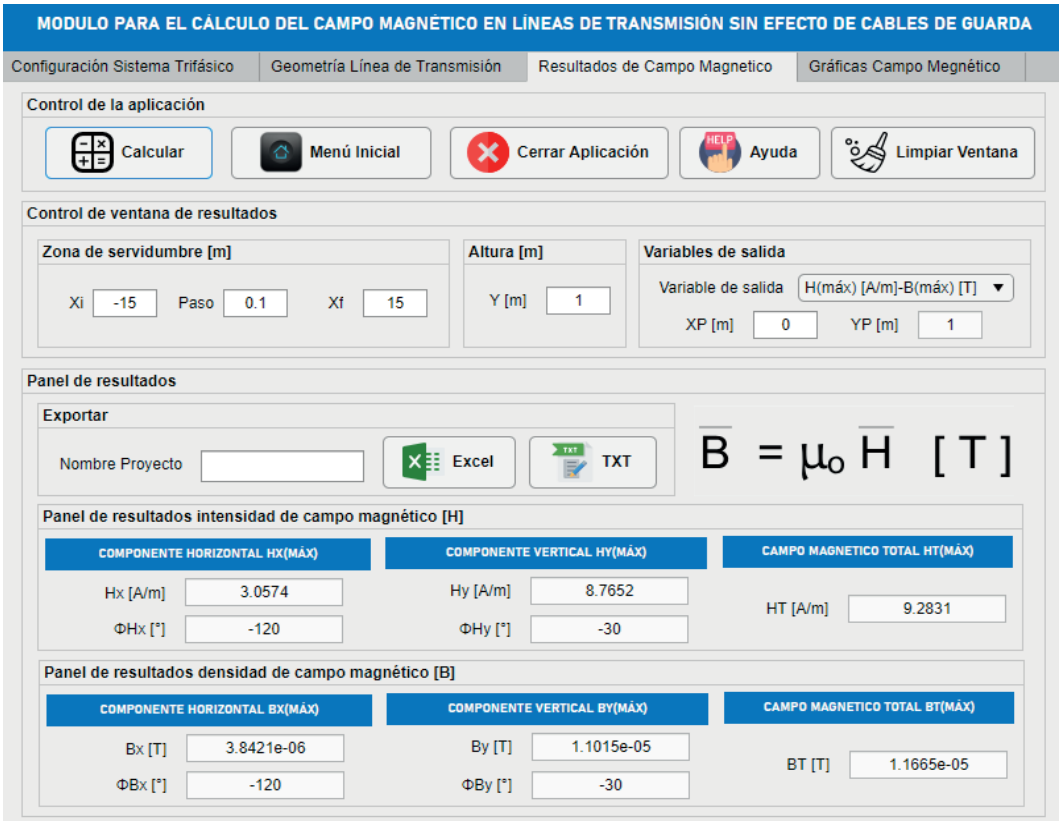


Figura 84: Resultados de campo magnético.

Sí el usuario desea exportar los valores calculados para verlos en **Excel** ó en documentos **.TXT**, el usuario se debe de dirigir al panel **Exportar**, en donde se le pide ingresar el **Nombre del Proyecto**, luego se debe de dirigir al tipo de archivo que desee, ya sea archivos tipo **Excel** ó **TXT**.

Al dar clic sobre el tipo de archivo seleccionado, se abrirá la ventana **Guardar como**, en donde se debe de seleccionar la ubicación para guardar una carpeta creada automáticamente con el nombre **App CEM-LT**, que contiene una sub-carpeta con el **Nombre del proyecto** dentro de ésta carpeta se encuentra el archivo exportado.

Finalmente si el usuario desea generar la gráfica resultante para el campo magnético, el usuario debe ir a la ventana **Gráficas campo magnético**, en ésta ventana se puede modificar el color de la gráfica ó el grosor de la línea, también si el usuario desea puede incluir ó no cuadricula en la gráfica. El panel de control de ejes permite que el usuario pueda ampliar alguna sección de la gráfica generada para poder analizarla con mas detalle.

Para generar la gráfica el usuario debe de seleccionar la variable a graficar, la aplicación permite graficar la magnitud **H** y **B**, para los valores máximos ó eficaces en la la zona de servidumbre, (**Nota:** si el usuario desea graficar la magnitud de $\mathbf{H_{máx}}$, debe seleccionar la misma variable de salida en la ventana de **Resultados de campo magnético** $\mathbf{H_{máx}}[A/m] - \mathbf{B_{máx}}[T]$). La aplicación también permite graficar la componente horizontal y vertical para la intensidad y la densidad de campo magnético, respecto al tiempo,(**Nota:** si el usuario desea generar la gráfica para la componente horizontal en su valor eficaz de la intensidad de campo magnético $\mathbf{H_{x_{rms}}}$, debe seleccionar en la ventana **Resultados de campo magnético** la variable de salida $\mathbf{H_{rms}}[A/m] - \mathbf{B_{rms}}[T]$).

Al haber seleccionado la variable de salida, el usuario debe de ir al botón **Graficar** y dar clic sobre él (**Nota:** No es necesario parametrizar el panel de control de ejes para generar la gráfica deseada). La Figura 85 muestra la interfaz del modulo para la ventana de **Gráficas de campo magnético**, en la imagen se aprecia la intensidad de campo magnético $\mathbf{H_{máx}}$ en la zona de servidumbre para el ejemplo práctico N°1.

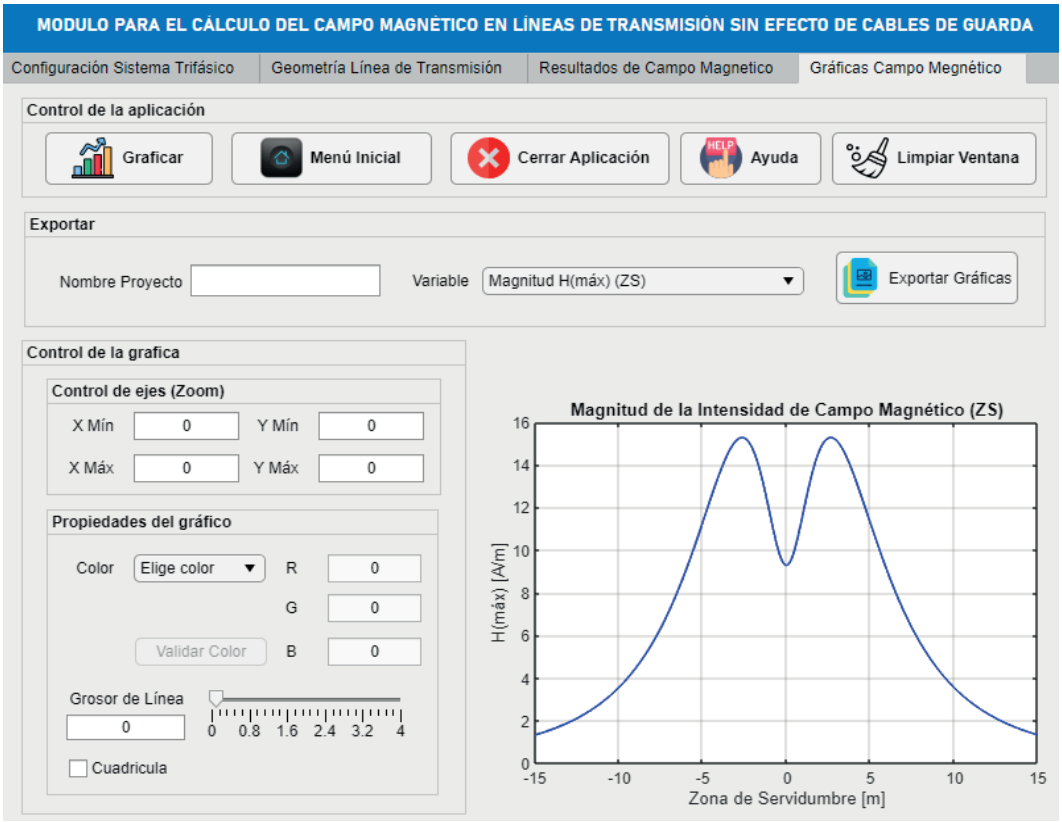


Figura 85: Gráfica intensidad de campo magnético en la zona de servidumbre $\mathbf{H_{máx}}$

Sí el usuario desea exportar la gráfica, el usuario debe de asignarle un nombre al proyecto, luego ir al botón **Exportar gráfica**, se abrirá la ventana **Guardar como**, en donde se debe de seleccionar la ubicación en donde se guardara una carpeta creada automáticamente con el nombre **App CEM-LT**, que contiene una sub-carpeta con el **Nombre del proyecto** dentro de ésta carpeta se crean tres documentos, uno de ellos es un documento tipo **PNG**, otro **.fig** compatible con MATLAB, y otro es un documento **.eps** con un formato vectorizado Figura 86.

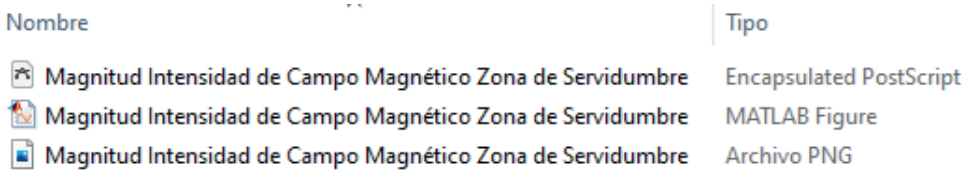


Figura 86: Archivos generados al exportar la gráfica

7.1.2. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°1

SOFTWARE CEM-LT

La Tabla 31 muestra los resultados para los valores máximos de [**H**] y [**B**], obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°1, en el punto **(0,1)**.

INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(0,1) $\left[\frac{A}{m}\right]$		
$\mathbf{H_x}$	$\mathbf{H_y}$	$\mathbf{H}_{máx}$
$3{,}0574 \angle -120°$	$8{,}7652 \angle -30°$	9,283

DENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(0,1) $[T]$		
$\mathbf{B_x}$	$\mathbf{B_y}$	$\mathbf{B}_{máx}$
$3{,}842\ \mathrm{E}^{-6} \angle -120°$	$11{,}015\ \mathrm{E}^{-6} \angle -30°$	$11{,}665\ \mathrm{E}^{-6}$

Tabla 31: Resultados de valores máximos [**H**] y [**B**], ejemplo práctico N°1 software **CEM-LT**.

SOFTWARE COMSOL

Como método de verificación de los resultados obtenidos de campo magnético, se hace uso del software **COMSOL**, donde la Tabla 32 muestra los valores de intensidad de campo magnético y densidad de campo magnético simulados en el dominio de la frecuencia.

INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(0,1) $\left[\frac{A}{m}\right]$		
$\mathbf{H_x}$	$\mathbf{H_y}$	$\mathbf{H}_{máx}$
$3{,}0653 \angle -120{,}49°$	$8{,}7577 \angle -30{,}02°$	9,278

DENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(0,1) $[T]$		
$\mathbf{B_x}$	$\mathbf{B_y}$	$\mathbf{B}_{máx}$
$3{,}852\mathrm{E}^{-6} \angle -120{,}49°$	$11{,}005\mathrm{E}^{-6} \angle -30{,}02°$	$11{,}66\mathrm{E}^{-6}$

Tabla 32: Resultados ejemplo práctico N°1 software **COMSOL** en el dominio de la frecuencia.

La Figura 87 muestra el comportamiento la intensidad campo magnético en la zona de servidumbre, donde **a)** corresponde a la gráfica generada por el software **CEM-LT** y **b)** corresponde a la gráfica generada por el software **COMSOL** en una simulación para el dominio de la frecuencia.

NOTA: Si desea replicar los resultados obtenidos en **COMSOL**, se recomienda la **GUÍA COMSOL MULTIPHYSICS - LÍNEA TRIFÁSICA CAMPO MAGNÉTICO - FRECUENCIA**, la cual es una guía desarrollada en el grupo de Investigación en

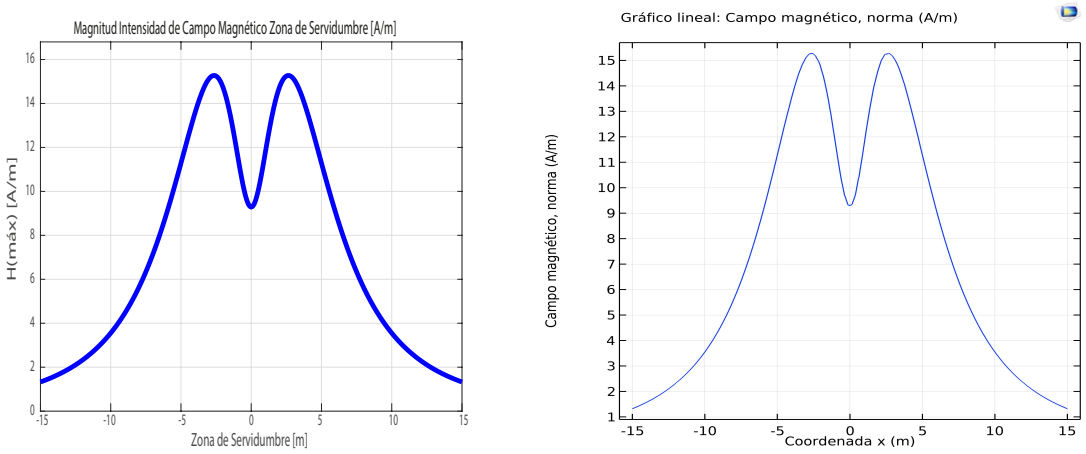


Figura 87: Comportamiento de la intensidad de campo magnético en zona de servidumbre generadas en los software: **a)** CEM-LT **b)** COMSOL

Compatibilidad Electromagnética **CEM** de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La guía presenta el procedimiento detallado para determinar cálculo del campo magnético en líneas de transmisión trifásicas, en el dominio de la frecuencia en el software **COMSOL**.

7.2. EJEMPLO PRÁCTICO N° 2

La línea de transmisión trifásica en configuración vertical Figura 88 esta compuesta por un conductor por fase a una frecuencia de 60[Hz]. La Tabla 33 presenta las características de los conductores de fase, la Ec.10 muestra las corrientes de las líneas. Determine:

- La intensidad de campo magnético **H** y densidad de campo magnético **B** en $P\,(2\ ,\ 6{,}4)$.
- El valor eficaz de la intensidad de campo magnético **H** y valor eficaz de la densidad de campo magnético **B** en el punto indicado.

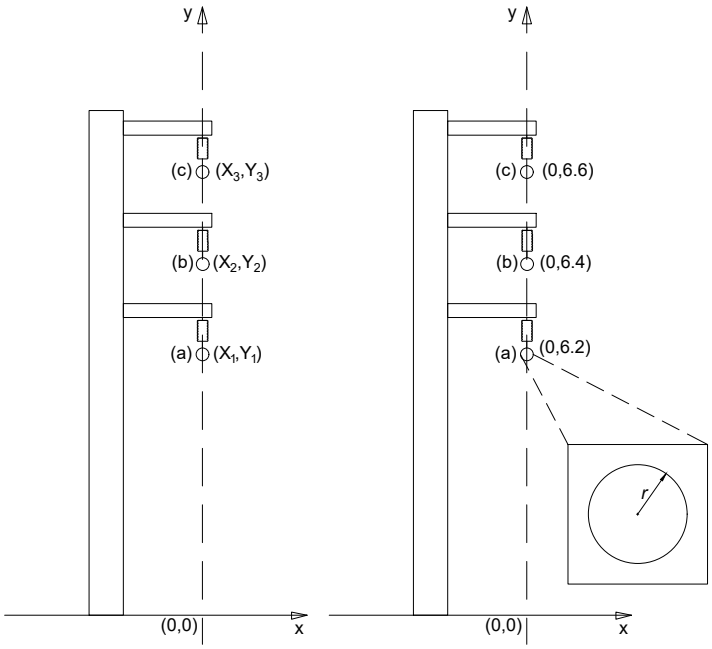


Figura 88: Torre de transmisión de 34,5[kV] configuración vertical (Elaboración Propia)

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (30/7)	Eagle	$556,5$	$10,00$	$0,121\frac{\Omega}{km}$

Tabla 33: Características del conductor ejemplo práctico N°2.

$$\begin{aligned} i_a &= 200\cos(\omega t)\ \ [A] \\ i_b &= 200\cos(\omega t\ -120°)\ \ [A] \\ i_c &= 200\cos(\omega t\ +120°)\ \ [A] \end{aligned} \tag{10}$$

Siguiendo la **Metodología para el uso de la aplicación (CEM-LT)** descrita en el Ejemplo Práctico N°1, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°2.

7.2.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°2

SOFTWARE CEM-LT

La Tabla 34 muestra los resultados para los valores máximos de [**H**] y [**B**] obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°2, en el punto **(2,6.4)**.

INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(2,6.4) $\left[\frac{A}{m}\right]$		
$\mathbf{H_x}$	$\mathbf{H_y}$	$\mathbf{H}_{máx}$
$2{,}666 \angle 149{,}98°$	$0{,}159 \angle -127{,}23°$	2,6715

DENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(2,6.4) $[T]$		
$\mathbf{B_x}$	$\mathbf{B_y}$	$\mathbf{B}_{máx}$
$3{,}351\ \mathrm{E}^{-6} \angle 149{,}98°$	$19{,}99\ \mathrm{E}^{-6} \angle -127{,}23°$	$3{,}357\ \mathrm{E}^{-6}$

Tabla 34: Resultados de valores máximos [**H**] y [**B**], ejemplo práctico N°2 software **CEM-LT**.

SOFTWARE COMSOL

Como método de verificación de los resultados obtenidos de campo magnético, se hace uso del software **COMSOL**, donde la Tabla 35 muestra los valores de intensidad de campo magnético y densidad de campo magnético simulados en el dominio de la frecuencia.

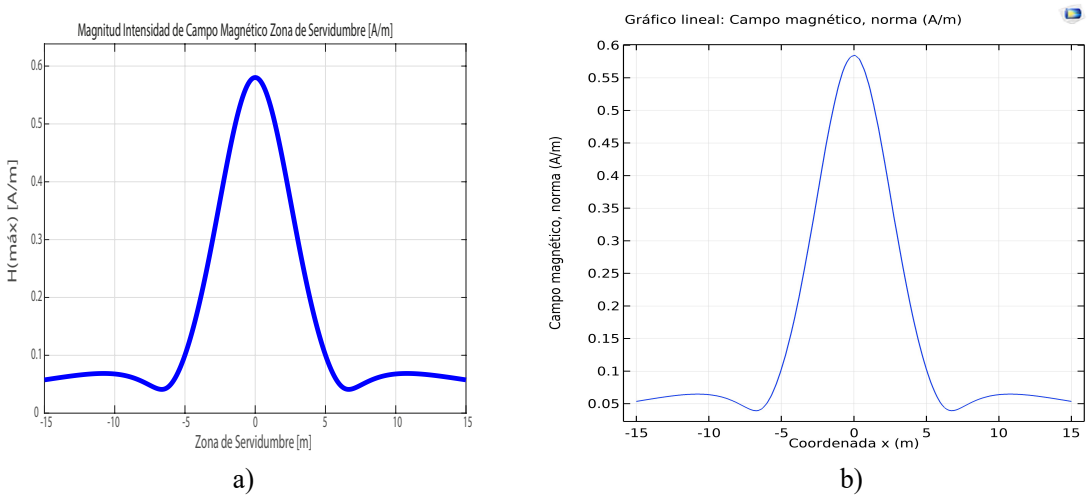
INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(2,6.4) $\left[\frac{A}{m}\right]$		
$\mathbf{H_x}$	$\mathbf{H_y}$	$\mathbf{H}_{máx}$
$2{,}664 \angle 149{,}99°$	$0{,}159 \angle -126{,}57°$	2,668

DENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(2,6.4) $[T]$		
$\mathbf{B_x}$	$\mathbf{B_y}$	$\mathbf{B}_{máx}$
$3{,}347\mathrm{E}^{-6} \angle 149{,}99°$	$0{,}2\mathrm{E}^{-6} \angle -126{,}57°$	$3{,}353\mathrm{E}^{-6}$

Tabla 35: Resultados ejemplo práctico N°2 software **COMSOL** en el dominio de la frecuencia.

La Figura 89 muestra el comportamiento la intensidad campo magnético en la zona de servidumbre, donde **a)** corresponde a la gráfica generada por el software **CEM-LT** y **b)** corresponde a la gráfica generada por el software **COMSOL** en una simulación para el dominio de la frecuencia.

NOTA: Si desea replicar los resultados obtenidos en **COMSOL**, se recomienda la **GUÍA COMSOL MULTIPHYSICS - LÍNEA TRIFÁSICA CAMPO MAGNÉTICO - FRECUENCIA**, la cual es una guía desarrollada en el grupo de Investigación en



a) b)

Figura 89: Comportamiento de la intensidad de campo magnético en zona de servidumbre generadas en los software: **a)** CEM-LT **b)** COMSOL

Compatibilidad Electromagnética **CEM** de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La guía presenta el procedimiento detallado para determinar cálculo del campo magnético en líneas de transmisión trifásicas, en el dominio de la frecuencia en el software **COMSOL**.

7.3. EJEMPLO PRÁCTICO N° 3

La línea de transmisión trifásica en configuración vertical Figura 90 esta compuesta por un conductor por fase a una frecuencia de 60[Hz]. La Tabla 36 presenta las características de los conductores de fase, la Ec.11 muestra las corrientes de las líneas. Determine:

- La intensidad de campo magnético **H** y densidad de campo magnético **B** en $P\,(0\ ,\ 1)$.
- El valor eficaz de la intensidad de campo magnético **H** y valor eficaz de la densidad de campo magnético **B** en el punto indicado.

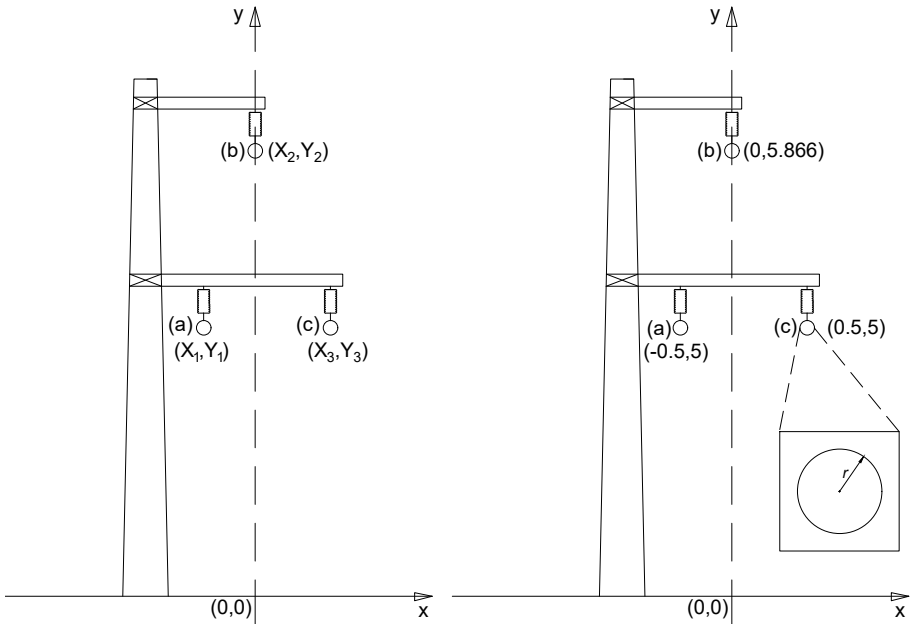


Figura 90: Torre de transmisión de 34,5[kV] configuración delta (Elaboración Propia)

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (30/7)	Eagle	$556,5$	$10,00$	$0,121\frac{\Omega}{km}$

Tabla 36: Características del conductor ejemplo práctico N°3.

$$\begin{aligned} i_a &= 1000\cos(\omega t)\ \ [A] \\ i_b &= 1000\cos(\omega t\ -120°)\ \ [A] \\ i_c &= 1000\cos(\omega t\ +120°)\ \ [A] \end{aligned} \tag{11}$$

Siguiendo la **Metodología para el uso de la aplicación (CEM-LT)** descrita en el Ejemplo Práctico N°1, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°3.

7.3.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°3

SOFTWARE CEM-LT

La Tabla 37 muestra los resultados para los valores máximos de [**H**] y [**B**], obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°3, en el punto **(0,1)**.

INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(0,1) $\left[\frac{A}{m}\right]$		
$\mathbf{H_x}$	$\mathbf{H_y}$	$\mathbf{H}_{máx}$
$9{,}6315 \angle 60°$	$4{,}6797 \angle -30°$	10,708

DENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(0,1) $[T]$		
$\mathbf{B_x}$	$\mathbf{B_y}$	$\mathbf{B}_{máx}$
$12{,}104\text{E}^{-6} \angle 60°$	$5{,}8807\text{E}^{-6} \angle -30°$	$13{,}457\text{E}^{-6}$

Tabla 37: Resultados de valores máximos [**H**] y [**B**], ejemplo práctico N°3 software **CEM-LT**.

SOFTWARE COMSOL

Como método de verificación de los resultados obtenidos de campo magnético, se hace uso del software **COMSOL**, donde la Tabla 38 muestra los valores de intensidad de campo magnético y densidad de campo magnético simulados en el dominio de la frecuencia.

INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(0,1) $\left[\frac{A}{m}\right]$		
$\mathbf{H_x}$	$\mathbf{H_y}$	$\mathbf{H}_{máx}$
$9{,}675 \angle 60{,}01°$	$4{,}693 \angle -29{,}98°$	10,753

DENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(0,1) $[T]$		
$\mathbf{B_x}$	$\mathbf{B_y}$	$\mathbf{B}_{máx}$
$12{,}158\text{E}^{-6} \angle 60{,}01°$	$5{,}897\text{E}^{-6} \angle -29{,}98°$	$13{,}513\text{E}^{-6}$

Tabla 38: Resultados ejemplo práctico N°3 software **COMSOL** en el dominio de la frecuencia.

La Figura 91 muestra el comportamiento la intensidad campo magnético en la zona de servidumbre, donde **a)** corresponde a la gráfica generada por el software **CEM-LT** y **b)** corresponde a la gráfica generada por el software **COMSOL** en una simulación para el dominio de la frecuencia.

NOTA: Si desea replicar los resultados obtenidos en **COMSOL**, se recomienda la **GUÍA COMSOL MULTIPHYSICS - LÍNEA TRIFÁSICA CAMPO MAGNÉTICO - FRECUENCIA**, la cual es una guía desarrollada en el grupo de Investigación en

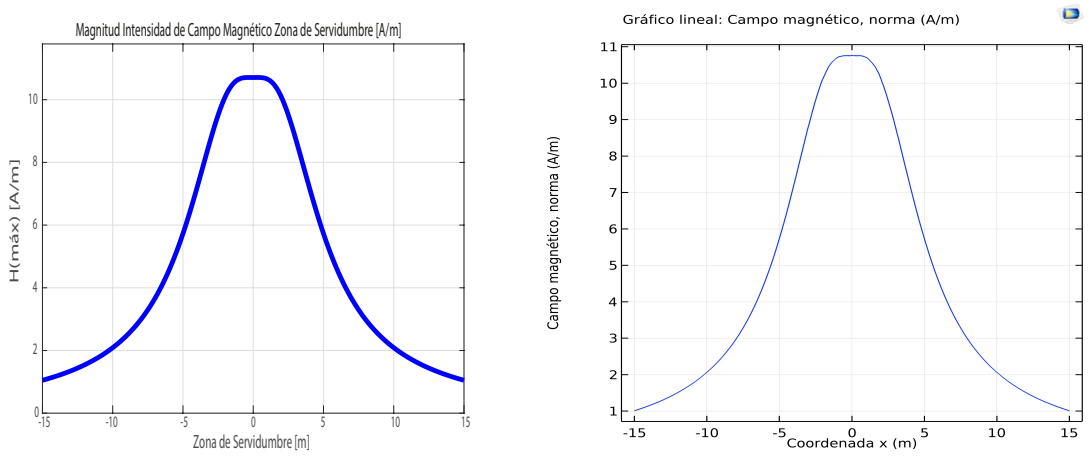


Figura 91: Comportamiento de la intensidad de campo magnético en zona de servidumbre generadas en los software: **a)** CEM-LT **b)** COMSOL

Compatibilidad Electromagnética **CEM** de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La guía presenta el procedimiento detallado para determinar cálculo del campo magnético en líneas de transmisión trifásicas, en el dominio de la frecuencia en el software **COMSOL**.

7.4. EJEMPLO PRÁCTICO N° 4

La línea de transmisión trifásica en configuración vertical Figura 92 esta compuesta por dos conductores por fase a una frecuencia de 60[Hz]. La Tabla 39 presenta las características de los conductores de fase, la Ec.12 muestra las corrientes de las líneas. Determine:

- La intensidad de campo magnético **H** y densidad de campo magnético **B** en $P\,(5\ ,\ 1)$.
- El valor eficaz de la intensidad de campo magnético **H** y valor eficaz de la densidad de campo magnético **B** en el punto indicado.

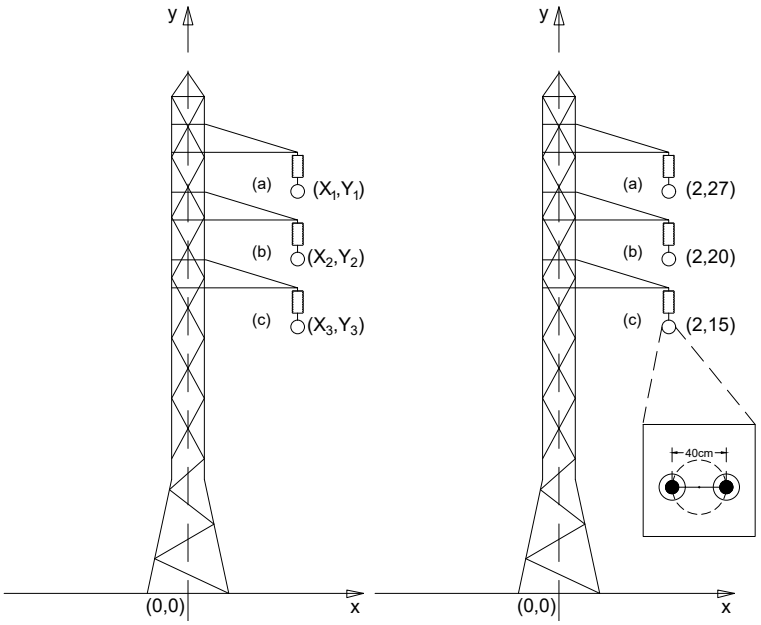


Figura 92: Torre de transmisión de 115[kV] con 2 conductores en haz (Elaboración Propia)

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (24/7)	Rook	636	$9,96$	$0,107\frac{\Omega}{km}$

Tabla 39: Características del conductor de fase ejemplo práctico N°4.

$$\begin{aligned} i_a &= 1000\cos(\omega t)\ \ [A] \\ i_b &= 1000\cos(\omega t\ -120°)\ \ [A] \\ i_c &= 1000\cos(\omega t\ +120°)\ \ [A] \end{aligned} \tag{12}$$

Siguiendo la **Metodología para el uso de la aplicación (CEM-LT)** descrita en el Ejemplo Práctico N°1, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°4.

7.4.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°4

SOFTWARE CEM-LT

La Tabla 40 muestra los resultados para los valores máximos de [**H**] y [**B**], obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°4, en el punto **(5,1)**.

INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(5,1) $\left[\frac{A}{m}\right]$		
$\mathbf{H_x}$	$\mathbf{H_y}$	$\mathbf{H}_{máx}$
7,651 $\angle$ 146,48°	0,383 $\angle$ 137,68°	7,66

DENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(5,1) $[T]$		
$\mathbf{B_x}$	$\mathbf{B_y}$	$\mathbf{B}_{máx}$
9,614E^{-6} $\angle$ 146,48°	0,481E^{-6} $\angle$ 137,68°	9,626

Tabla 40: Resultados de valores máximos [**H**] y [**B**], ejemplo práctico N°4 software **CEM-LT**.

SOFTWARE COMSOL

Como método de verificación de los resultados obtenidos de campo magnético, se hace uso del software **COMSOL**, donde la Tabla 41 muestra los valores de intensidad de campo magnético y densidad de campo magnético simulados en el dominio de la frecuencia.

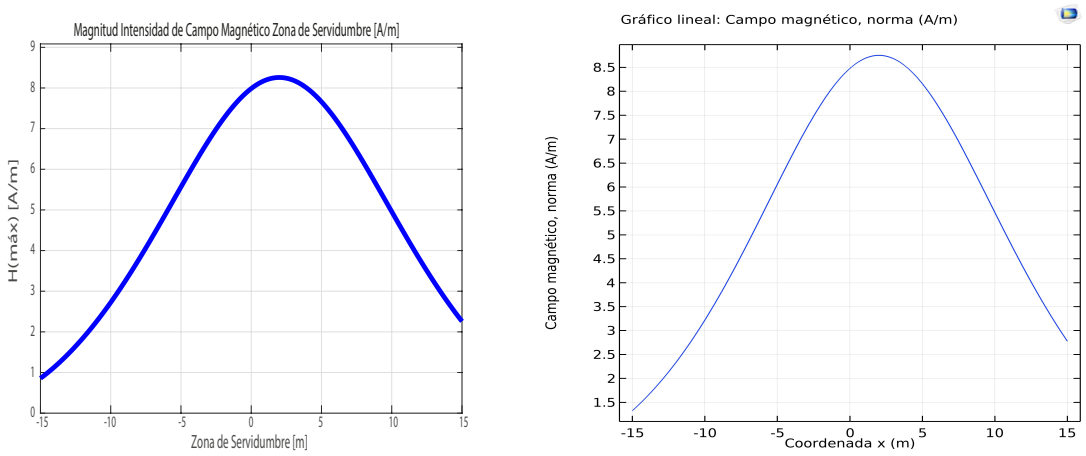
INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(5,1) $\left[\frac{A}{m}\right]$		
$\mathbf{H_x}$	$\mathbf{H_y}$	$\mathbf{H}_{máx}$
8,149 $\angle$ 146,96°	381,49E^{-3} $\angle$ 137,64°	8,158

DENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(5,1) $[T]$		
$\mathbf{B_x}$	$\mathbf{B_y}$	$\mathbf{B}_{máx}$
10,241E^{-6} $\angle$ 146,96°	0,479E^{-6} $\angle$ 137,64°	10,252E^{-6}

Tabla 41: Resultados ejemplo práctico N°4 software **COMSOL** en el dominio de la frecuencia.

La Figura 93 muestra el comportamiento la intensidad campo magnético en la zona de servidumbre, donde **a)** corresponde a la gráfica generada por el software **CEM-LT** y **b)** corresponde a la gráfica generada por el software **COMSOL** en una simulación para el dominio de la frecuencia.

NOTA: Si desea replicar los resultados obtenidos en **COMSOL**, se recomienda la **GUÍA COMSOL MULTIPHYSICS - LÍNEA TRIFÁSICA CAMPO MAGNÉTICO - FRECUENCIA**, la cual es una guía desarrollada en el grupo de Investigación en



a) b)

Figura 93: Comportamiento de la intensidad de campo magnético en zona de servidumbre generadas en los software: **a)** CEM-LT **b)** COMSOL

Compatibilidad Electromagnética **CEM** de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La guía presenta el procedimiento detallado para determinar cálculo del campo magnético en líneas de transmisión trifásicas, en el dominio de la frecuencia en el software **COMSOL**.

7.5. EJEMPLO PRÁCTICO N° 5

La línea de transmisión trifásica en configuración vertical Figura 94 esta compuesta por dos conductores por fase a una frecuencia de 60[Hz]. La Tabla 42 presenta las características de los conductores de fase, la Ec.13 muestra las corrientes de las líneas. Determine:

- La intensidad de campo magnético **H** y densidad de campo magnético **B** en el punto $P\,(0\ ,\ 1)$.
- El valor eficaz de la intensidad de campo magnético **H** y valor eficaz de la densidad de campo magnético **B** en el punto indicado.

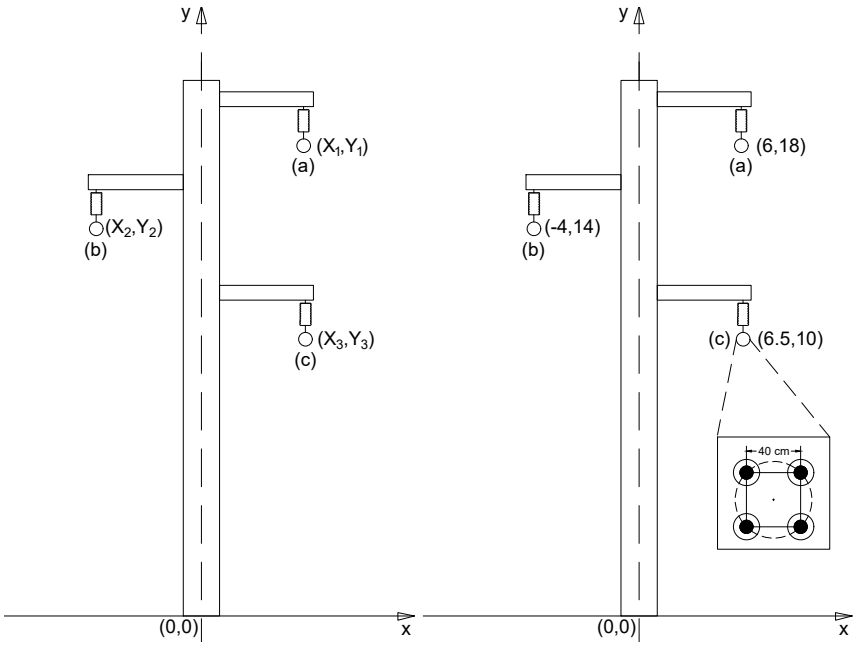


Figura 94: Torre de transmisión de 34.5[kV] con 4 conductores en haz (Elaboración Propia)

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (6/1)	Sparrow	2	$2,58$	$1,10\frac{\Omega}{km}$

Tabla 42: Características del conductor ejemplo práctico N°5.

$$\begin{aligned} i_a &= 1000\cos(\omega t)\ \ [A] \\ i_b &= 1000\cos(\omega t\ -120°)\ \ [A] \\ i_c &= 1000\cos(\omega t\ +120°)\ \ [A] \end{aligned} \tag{13}$$

Siguiendo la **Metodología para el uso de la aplicación (CEM-LT)** descrita en el Ejemplo Práctico N°1, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°5.

7.5.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°5

SOFTWARE CEM-LT

La Tabla 43 muestra los resultados para los valores máximos de [**H**] y [**B**], obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°5, en el punto **(0,1)**.

INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(0,1) $\left[\frac{A}{m}\right]$		
$\mathbf{H_x}$	$\mathbf{H_y}$	$\mathbf{H}_{máx}$
$5{,}877 \angle 169{,}33°$	$2{,}475 \angle -87{,}78°$	6,377

DENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(0,1) $[T]$		
$\mathbf{B_x}$	$\mathbf{B_y}$	$\mathbf{B}_{máx}$
$7{,}385\text{E}^{-6} \angle 169{,}33°$	$3{,}11\text{E}^{-6} \angle -87{,}786°$	$8{,}014\text{E}^{-6}$

Tabla 43: Resultados de valores máximos [**H**] y [**B**], ejemplo práctico N°5 software **CEM-LT**.

SOFTWARE COMSOL

Como método de verificación de los resultados obtenidos de campo magnético, se hace uso del software **COMSOL**, donde la Tabla 44 muestra los valores de intensidad de campo magnético y densidad de campo magnético simulados en el dominio de la frecuencia.

INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(0,1) $\left[\frac{A}{m}\right]$		
$\mathbf{H_x}$	$\mathbf{H_y}$	$\mathbf{H}_{máx}$
$6{,}216 \angle 168{,}26°$	$2{,}474 \angle -87{,}69°$	6,691

DENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(0,1) $[T]$		
$\mathbf{B_x}$	$\mathbf{B_y}$	$\mathbf{B}_{máx}$
$7{,}812\text{E}^{-6} \angle 168{,}26°$	$3{,}109\text{E}^{-6} \angle -87{,}69°$	$8{,}408\text{E}^{-6}$

Tabla 44: Resultados ejemplo práctico N°5 software **COMSOL** en el dominio de la frecuencia.

La Figura 95 muestra el comportamiento la intensidad campo magnético en la zona de servidumbre, donde **a)** corresponde a la gráfica generada por el software **CEM-LT** y **b)** corresponde a la gráfica generada por el software **COMSOL** en una simulación para el dominio de la frecuencia.

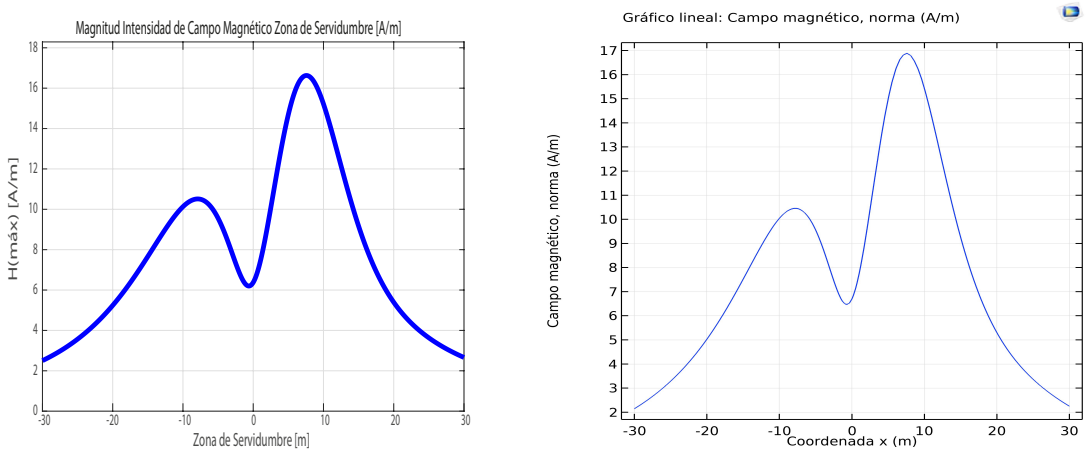


Figura 95: Comportamiento de la intensidad de campo magnético en zona de servidumbre generadas en los software: **a)** CEM-LT **b)** COMSOL

NOTA: Si desea replicar los resultados obtenidos en **COMSOL**, se recomienda la **GUÍA COMSOL MULTIPHYSICS - LÍNEA TRIFÁSICA CAMPO MAGNÉTICO - FRECUENCIA**, la cual es una guía desarrollada en el grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética **CEM** de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La guía presenta el procedimiento detallado para determinar cálculo del campo magnético en líneas de transmisión trifásicas, en el dominio de la frecuencia en el software **COMSOL**.

7.6. EJEMPLO PRÁCTICO N° 6

La línea de transmisión trifásica en configuración vertical Figura 96 esta compuesta por dos conductores por fase a una frecuencia de 60[Hz]. La Tabla 45 presenta las características de los conductores de fase, la Ec.14 muestra las corrientes de las líneas. Determine:

- La intensidad de campo magnético **H** y densidad de campo magnético **B** en $P\,(0\ ,\ 1)$.
- El valor eficaz de la intensidad de campo magnético **H** y valor eficaz de la densidad de campo magnético **B** en el punto indicado.

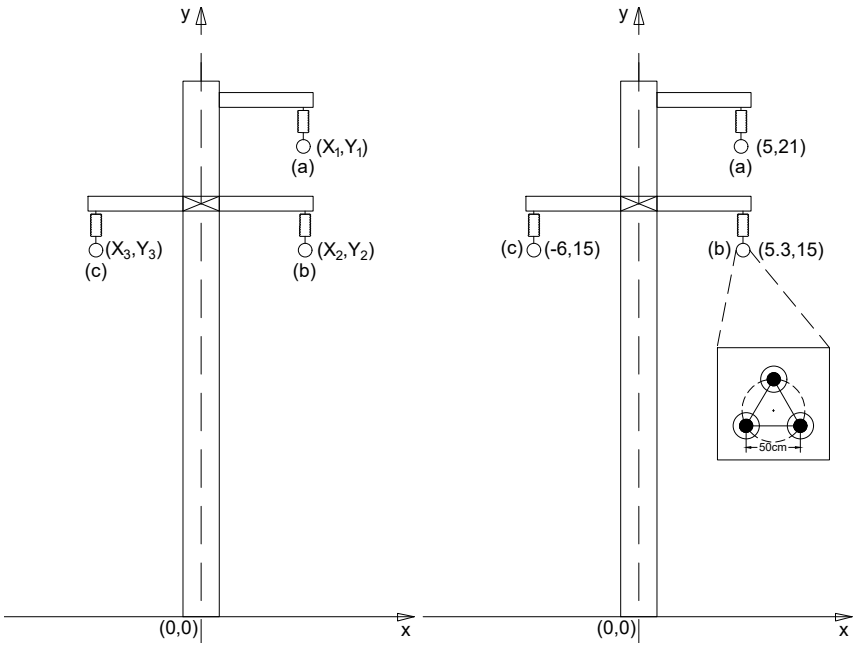


Figura 96: Torre de transmisión de 34.5[kV] con 3 conductores en haz (Elaboración Propia)

Conductor de fase				
Tipo de cable	Código	Calibre AWG/Kcmil	RMG $[mm]$	Resistencia Eléctrica $75°C$
ACSR (6/1)	Sparrow	2	$2,58$	$1,10\frac{\Omega}{km}$

Tabla 45: Características del conductor ejercicio práctico N°1.

$$\begin{aligned} i_a &= 1000\cos(\omega t)\ \ [A] \\ i_b &= 1000\cos(\omega t\ -120°)\ \ [A] \\ i_c &= 1000\cos(\omega t\ +120°)\ \ [A] \end{aligned} \tag{14}$$

Siguiendo la **Metodología para el uso de la aplicación (CEM-LT)** descrita en el Ejemplo Práctico N°1, a continuación se muestran los resultados obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°6.

7.6.1. RESULTADOS EJEMPLO PRÁCTICO N°6

SOFTWARE CEM-LT

La Tabla 46muestra los resultados para los valores máximos de **[H]** y **[B]**, obtenidos en la aplicación **CEM-LT** para el Ejemplo Práctico N°6, en el punto **(0,1)**.

INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(0,1) $\left[\frac{A}{m}\right]$		
$\mathbf{H_x}$	$\mathbf{H_y}$	$\mathbf{H}_{máx}$
$4{,}277 \angle 173{,}23°$	$1{,}459 \angle -103{,}24°$	4,519

DENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(0,1) $[T]$		
$\mathbf{B_x}$	$\mathbf{B_y}$	$\mathbf{B}_{máx}$
$5{,}374\text{E}^{-6} \angle 173{,}23°$	$1{,}834\text{E}^{-6} \angle -103{,}24°$	5,679

Tabla 46: Resultados de valores máximos **[H]** y **[B]**, ejemplo práctico N°6 software **CEM-LT**.

SOFTWARE COMSOL

Como método de verificación de los resultados obtenidos de campo magnético, se hace uso del software **COMSOL**, donde la Tabla 47 muestra los valores de intensidad de campo magnético y densidad de campo magnético simulados en el dominio de la frecuencia.

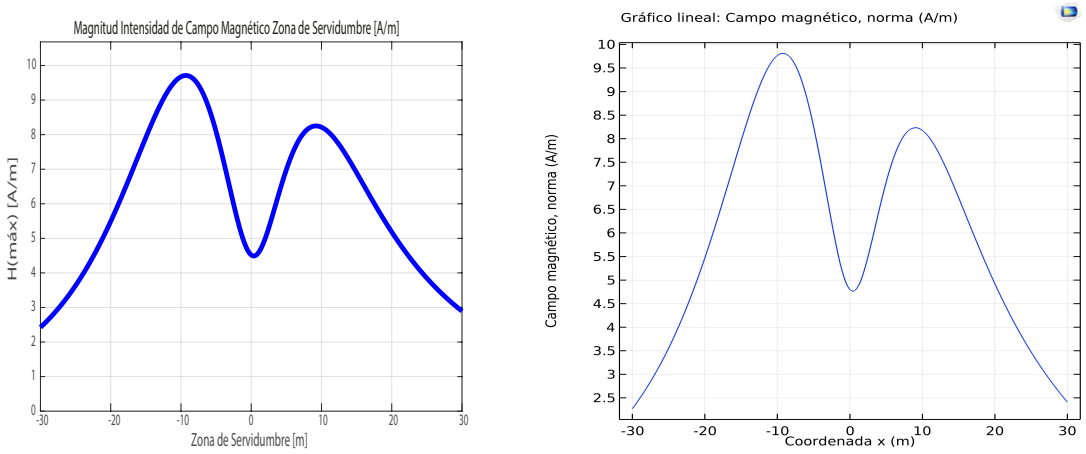
INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(0,1) $\left[\frac{A}{m}\right]$		
$\mathbf{H_x}$	$\mathbf{H_y}$	$\mathbf{H}_{máx}$
$4{,}572 \angle -173{,}65°$	$1{,}455 \angle 103{,}13°$	4,798

DENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO EN P(0,1) $[T]$		
$\mathbf{B_x}$	$\mathbf{B_y}$	$\mathbf{B}_{máx}$
$5{,}745\text{E}^{-6} \angle -173{,}65°$	$1{,}828\text{E}^{-6} \angle 103{,}13°$	$6{,}029\text{E}^{-6}$

Tabla 47: Resultados ejemplo práctico N°6 software **COMSOL** en el dominio de la frecuencia.

La Figura 97 muestra el comportamiento la intensidad campo magnético en la zona de servidumbre, donde **a)** corresponde a la gráfica generada por el software **CEM-LT** y **b)** corresponde a la gráfica generada por el software **COMSOL** en una simulación para el dominio de la frecuencia.

NOTA: Si desea replicar los resultados obtenidos en **COMSOL**, se recomienda la **GUÍA COMSOL MULTIPHYSICS - LÍNEA TRIFÁSICA CAMPO MAGNÉTICO - FRECUENCIA**, la cual es una guía desarrollada en el grupo de Investigación en



a) b)

Figura 97: Comportamiento de la intensidad de campo magnético en zona de servidumbre generadas en los software: **a)** CEM-LT **b)** COMSOL

Compatibilidad Electromagnética **CEM** de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La guía presenta el procedimiento detallado para determinar cálculo del campo magnético en líneas de transmisión trifásicas, en el dominio de la frecuencia en el software **COMSOL**.

8. CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE

Robustez: El peor problema que puede tener una aplicación es no contemplar los errores que se puedan tener y que la aplicación se detenga inesperadamente. Se han realizado múltiples pruebas para cada una de las funcionalidades del software y a pesar del tiempo de ejecución (debido a gran cantidad de información de las bases de datos) el software ha respondido satisfactoriamente.

Extensibilidad: Debido a la forma en que fue diseñada la aplicación, se puede añadir nuevas funcionalidades, actualmente están diseñados dos módulos: colaborativo y multiusuario para darle más posibilidades al usuario al momento de simular.

Desempeño: El software hace lo que tiene que hacer en el tiempo requerido, si no se considera el tiempo que le toma cargar las bases de datos (ya que este proceso es el que toma gran parte del tiempo de ejecución). Adicionalmente no desperdicia espacio en disco.

Usabilidad o Amigable al usuario: La aplicación fue desarrollada con una interfaz gráfica muy amigable, la cual se acompañan de mensajes que ayudan al usuario a detectar errores procedimentales.

Integridad: Todos los campos que se ingresan son para consulta, en ninguno de los casos se puede modificar la información de la aplicación, y todos los recursos que se usan son cargados desde la aplicación, por lo cual no existen problemas porque se carguen recursos erróneamente.

Portabilidad: La aplicación está diseñada para sistemas operativos Windows, sin necesidad de tener instalado Matlab, solo se necesita la versión de 64 bits de Windows del MCR para R2020b, que se puede descargar de la página web de Matlab.

Compatibilidad: El software funciona para Windows 8 en adelante y sistemas de 64 bits.

Mantenimiento: Debido a que todo el software se desarrolló a partir de funciones, el mantenimiento de este es sencillo de realizar. Las aplicaciones pueden manejar nuevas versiones dependiendo de las necesidades que presente el producto con el usuario, su desarrollo y dificultad del nuevo desarrollo depende de las nuevas necesidades.

Documentación: Se realizó el presente documento, el cual está conformado por un manual de instalación y un manual de usuario que incluye la descripción del funcionamiento del software.