

Índice General

- 1. Resumen y objetivos del proyecto.**
- 2. Cálculo del campo magnético generado por una línea eléctrica aérea de alta tensión.**
- 3. Diseño de lazos pasivos.**
- 4. Diseño de lazos activos.**
- 5. Resolución del problema con Mitloop.**
- 6. Aplicación a algunos casos concretos.**
- 7. Conclusiones y futuras líneas de investigación**

Anexo A. Diagramas de flujo de MitLoop.

Anexo B. Capacidades equivalentes por conductor en lazos dobles con conductor común.

Capítulo 1

Resumen y objetivos del proyecto.

Este proyecto nace con la idea de sistematizar el diseño y análisis de lazos activos y lazos pasivos de mitigación del campo magnético generado por líneas eléctricas aéreas de alta tensión. El diseño de tales lazos no es un problema trivial ya que se debe definir la posición del lazo, composición del mismo y en el caso de lazos activos, también la intensidad inyectada; por ello, se recurre a la programación de una aplicación informática que permita dicho diseño y análisis de una manera automática, con el consiguiente ahorro de tiempo y esfuerzo.

La idea que subyace detrás del uso de lazos pasivos es que en ellos se inducen corrientes que generan un campo magnético que se opone al campo magnético que indujo dichas intensidades. Por otro lado los lazos activos, al forzar a que la intensidad que circula por ellos sea una determinada a elección del usuario, están más orientados a conseguir la disminución local del campo, en un punto y sus cercanías.

Naturalmente, para que esta aplicación sea atractiva para las empresas encargadas del diseño y mantenimiento de líneas eléctricas aéreas de alta tensión que se encuentren dentro de la categoría de líneas que se cubren con esta aplicación, el diseño y optimización ha de generar un resultado que no sea antieconómico. El software desarrollado en este proyecto fin de carrera incluye una función de generación de presupuestos, que si bien no debe ser tomado como algo vinculante, sí que proporciona una visión cercana a lo que será el coste final de la solución propuesta.

Salvo que se especifique lo contrario, las magnitudes estarán expresadas como sigue: longitudes en metros, el campo magnético en μT , las intensidades en amperios por fase (valor RMS), y los ángulos en radianes.

El proyecto fin de carrera se ha estructurado en capítulos, tal y como sigue:

- El capítulo 2 presenta el problema del cálculo del campo magnético generado por una línea de alta tensión, analizando también varias configuraciones típicas.
- En el capítulo 3 se introducen los lazos pasivos, analizando los tipos que se han considerado en el proyecto. Se obtiene la expresión de la intensidad inducida en función de la geometría y propiedades del lazo, y se hace un breve estudio sobre las disposiciones más adecuadas.
- El capítulo 4 aborda los lazos activos. En concreto se obtiene la expresión de la intensidad a inyectar en el lazo cuando se quiere minimizar el campo mitigado en un punto conocido.
- En el capítulo 5 se describe el funcionamiento de MitLoop: se describe con gran detalle la estructura de datos y variables con las que trabaja MitLoop.
- El capítulo 6 presenta dos casos tipo resueltos con MitLoop.
- El capítulo 7 expone las conclusiones y propone futuras líneas de investigación.

Capítulo 2

Cálculo del campo magnético generado por una línea eléctrica aérea de alta tensión

2.1 Introducción

En este capítulo se aborda el cálculo del campo magnético generado por una línea eléctrica aérea de alta tensión. Para ello se comienza estudiando el campo magnético generado por un conductor, para luego generalizarlo al de una línea. Así mismo, se hace un estudio de diversas configuraciones habituales de líneas para ver en qué grado se modifica el campo generado en función de la posición relativa de las fases.

2.2 Hipótesis empleadas en el cálculo del campo magnético.

2.2.1 Cálculo del campo magnético a partir de las ecuaciones de Maxwell

La obtención del campo magnético generado por una línea de alta tensión pasa por integrar las ecuaciones de Maxwell, lo que requiere la solución de ecuaciones diferenciales lineales en derivadas parciales (de segundo orden para coordenadas espaciales y tiempo).

Sin embargo es posible simplificar dicho cálculo, tal y como se propone en Cruz [1], obteniendo una formulación más sencilla, teniendo en cuenta que la frecuencia de la corriente es pequeña en las líneas objeto de estudio (50-60 Hz). Entonces, es posible

desacoplar los cálculos del campo magnético y eléctrico creados por la línea, de tal manera que el campo eléctrico es función exclusiva del potencial del conductor y el magnético de la corriente que circula por el mismo.

De esta manera, la tercera ecuación de Maxwell se simplifica como sigue:

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \Rightarrow \quad \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad (2.1)$$

Si consideramos una corriente uniforme y senoidal $i(t)$, de pulsación $\omega=2\pi f$, siendo f la frecuencia, que circula por un hilo rectilíneo de longitud infinita, la tercera ecuación de Maxwell queda, en forma integral:

$$\int_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = m_0 \int_S \left(J + j\omega \epsilon_0 \vec{E} \right) \cdot d\vec{s} \quad (2.2)$$

La solución exacta de (2.2), para el caso en que existe simetría axial y radial, viene dada por:

$$B_f = \frac{m_0 I k}{4} (J_1(kr) \sin(\omega t) - Y_1(kr) \cos(\omega t)) \quad (2.3)$$

siendo $k=\omega/c$, c la velocidad de la luz en el vacío e I la amplitud de la corriente. J_1 e Y_1 son las funciones de Bessel de orden 1, primera y segunda clase respectivamente.

Tras simplificar la expresión se llega a:

$$B_f = \frac{m_0 I \cos(\omega t)}{2pr} \quad (2.4)$$

Siguiendo a Cruz [1], para distancias alrededor de 1000 m respecto a la línea, el error cometido al emplear (2.4) en vez de (2.3) puede estimarse en un 0,0004%, error que disminuye conforme nos acercamos a la línea.

Por tanto en este proyecto se empleará la formulación aproximada.

2.2.2 Efecto de la tierra en el campo creado por líneas eléctricas aéreas

Un conductor por el que circula una intensidad $i(t)$ induce corrientes en cualquier otro conductor que se encuentre en sus proximidades; por ello, cabe esperar que si lo que se encuentra en sus proximidades es un medio continuo también conductor (como puede ser la tierra) , se induzcan intensidades también en él.

Existen diversas formulaciones para modelar el efecto de la tierra en el campo magnético generado por un conductor (por tanto también por una línea). Siguiendo a Cruz [1], el efecto de la tierra se puede despreciar para resistividades típicas del terreno (del orden de $100 \Omega m$) y distancias a la línea menores de 150 m, estando el error en esas condiciones por debajo del 3%, tal y como se puede apreciar en la figura 2.1:

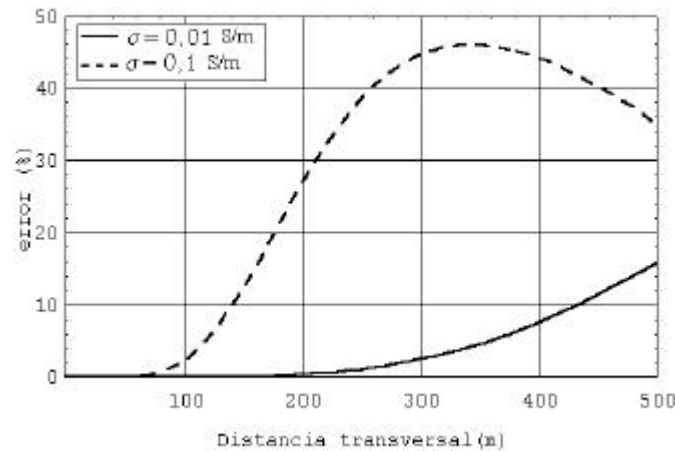


Figura 2.1 Variación del error con la distancia transversal a la línea

Por tanto, en este proyecto no se considerará el efecto de la tierra en el cálculo del campo magnético.

2.2.3 Modelo de conductor rectilíneo indefinido

Un conductor suspendido entre dos puntos describe una curva conocida como catenaria. Cabe preguntarse si el error cometido al sustituir dicha curva por una recta horizontal se puede asumir, ya que en tal caso los cálculos se simplifican notablemente.

Según Cruz [1], el error cometido es mínimo en el centro del vano y aumenta conforme nos acercamos a cualquiera de los postes que conforman el vano. En la figura 2.2 se puede observar el error cometido en función de la distancia transversal a la línea y la distancia al centro del vano:

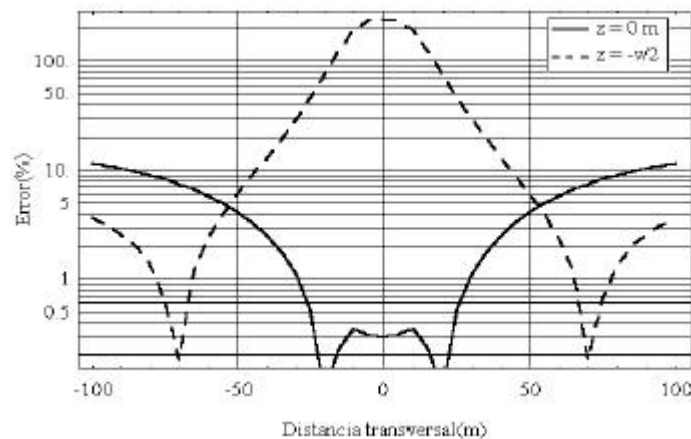


Figura 2.2 Evolución del error con la distancia transversal a la línea

donde v es la longitud del vano en cuestión.

Vemos que el error alcanza niveles inaceptables en los extremos del vano ($z = -v/2$); por ello la formulación adoptada en este proyecto será válida en la región cercana al centro del vano.

2.3 Campo magnético creado por un conductor rectilíneo indefinido

Sea un conductor rectilíneo y dirigido según la dirección del eje z , cuya posición viene definida por las coordenadas (x_i, y_i) . La geometría del problema puede verse en la figura 2.3.

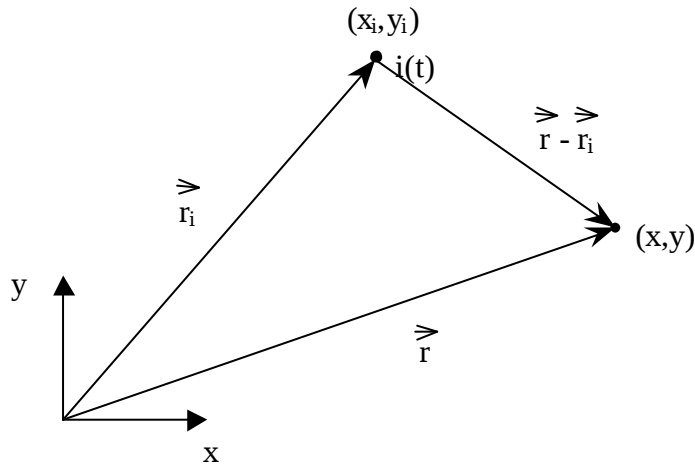


Figura 2.3 Geometría del problema.

Si por él circula una intensidad $i(t)$, el campo magnético generado en un punto genérico (x, y) vendrá dado por:

$$\vec{B}_i(x, y, z, t) = \frac{m_0}{4p} \int_{z_a}^{z_b} \frac{i(t) u_z \wedge (\vec{r} - \vec{r}_i)}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3} dz_i \quad (2.5)$$

Si se considera el conductor indefinido ($z_a \rightarrow -\infty, z_b \rightarrow \infty$), la expresión de (2.5) se simplifica quedando:

$$\vec{B}_i(\vec{r}, t) = \frac{m_0}{4p} \int_{z_a}^{z_b} \frac{i(t) u_z \wedge (\vec{r} - \vec{r}_i)}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3} dz_i = \frac{m_0}{4p} \frac{i(t) u_z \wedge (\vec{r} - \vec{r}_i)}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^2} \quad (2.6)$$

Para el caso de corriente senoidal de pulsación ω se tiene que:

$$i(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t + j) \quad (2.7)$$

por lo que el vector densidad de campo magnético puede expresarse como:

$$\begin{aligned} \vec{B}(x, y, t) &= b_x(\vec{r}, t) \vec{u}_x + b_y(\vec{r}, t) \vec{u}_y = \\ &= \sqrt{2}B_x(\vec{r}) \cos(\omega t + j_x) \vec{u}_x + \sqrt{2}B_y(\vec{r}) \cos(\omega t + j_y) \vec{u}_y \end{aligned} \quad (2.8)$$

Sustituyendo (2.6) en (2.8) y operando se tiene:

$$\vec{B}(x, y) = \begin{bmatrix} B_x(x, y) \\ B_y(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{m_0}{2p} \frac{I(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \cdot (\cos(j) + j \cdot \sin(j)) \\ \frac{m_0}{2p} \frac{I(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \cdot (\cos(j) + j \cdot \sin(j)) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

donde

$$m_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m.}$$

(x_i, y_i) : coordenadas del conductor

(x, y) : coordenadas del punto donde se calcula el campo

I, j : módulo y desfase de la intensidad que circula por el conductor

El campo creado por el conductor se obtiene representando en una gráfica $\text{Re}[B_x]$ frente a $\text{Re}[B_y]$. Como ejemplo vamos a representar el campo generado en el punto (0,1) por un conductor situado en el punto (0,20), por el que circula una

intensidad de 500 A y desfase nulo. En la figura 2.4 se puede apreciar la configuración utilizada, y en la figura 2.5 se tiene el resultado obtenido.

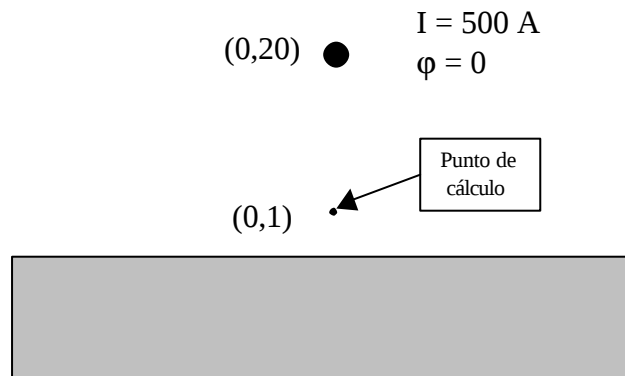


Figura 2.4 Geometría del caso considerado.

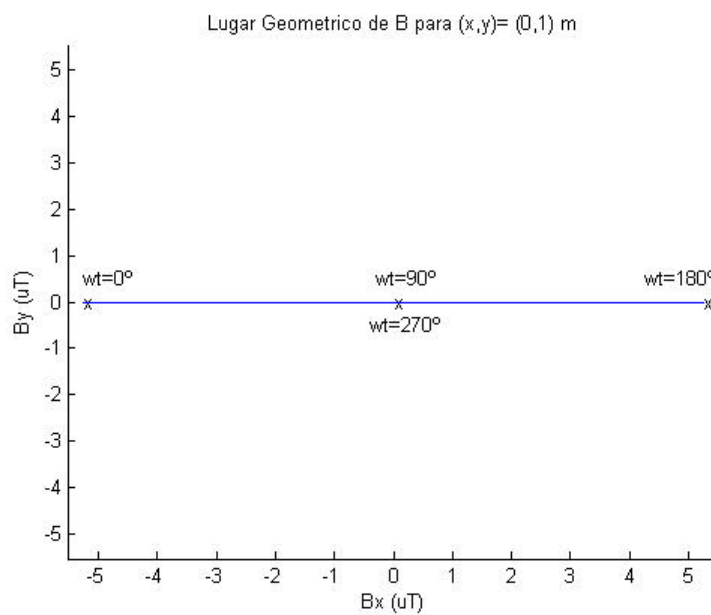


Figura 2.5. Evolución de B_y frente a B_x .

El lugar geométrico obtenido es una recta, por lo que se dice que el campo creado por un conductor está polarización linealmente.

2.4 Campo creado por una agrupación de conductores

En este punto damos el siguiente paso: estudiar el caso de múltiples conductores, basándonos en el caso resuelto en el apartado anterior. Para ello se va a adoptar el criterio de que el campo creado en un punto debido a la acción de varios conductores se calculará aplicando el principio de superposición al campo creado individualmente por cada uno de los conductores.

Así, si estamos interesados en obtener el campo magnético en un punto (x_j, y_j) debido a la presencia de n conductores situados en las posiciones (x_i, y_i) , con $i=1,2,\dots,n$ y por los que circula unas intensidades de módulo I_i y desfase ϕ_i , con $i=1,2,\dots,n$ se tiene:

$$\begin{aligned} \vec{B}_j(x, y) &= \sum_{i=1}^n \vec{B}_{j,i}(x, y) = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} B_{xj,i}(x, y) \\ B_{yj,i}(x, y) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \frac{m_0}{2p} \frac{I_i \cdot (y_j - y_i)}{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \cdot (\cos(+j_i) + j \cdot \sin(+j_i)) \\ \frac{m_0}{2p} \frac{I_i \cdot (x_j - x_i)}{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \cdot (\cos(+j_i) + j \cdot \sin(+j_i)) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.10)$$

donde

$\vec{B}_j(x, y)$: densidad de campo magnético total creado en el punto (x_j, y_j) .

$\vec{B}_{j,i}(x, y)$: Densidad de campo magnético creado en el punto (x_j, y_j) debido a la intensidad que circula por el conductor i .

$\vec{B}_{xj,i}(x, y)$: Densidad de campo magnético creado en el punto (x_j, y_j) en la dirección el eje x por la intensidad que circula por el conductor i .

x : cuando aparece como variable de la que depende una función, hace referencia tanto a las x_i como a las x_j .

y : análogo a x .

De la misma manera que cuando analizábamos la densidad de campo magnético generada por un conductor llegábamos a que su representación gráfica era una recta, vamos a analizar qué ocurre en el caso de una línea de n conductores.

Así, siguiendo a Cruz [1], tenemos que la densidad de campo magnético en un punto generada por n conductores se puede caracterizar por una elipse, cuyos semiejes mayor y menor (B_M y B_m , respectivamente) se pueden calcular en función de los valores de campo obtenidos B_x y B_y . Teniendo en cuenta que ambos son complejos, vendrán caracterizados por módulo y desfase ($B_x \angle j_x$ y $B_y \angle j_y$); así:

$$B_M^2 = \frac{1}{2}(B_x^2 + B_y^2) + \frac{1}{2}\sqrt{B_x^4 + B_y^4 + 2B_x^2 B_y^2 \cos(2j_x - 2j_y)} \quad (2.11)$$

$$B_m^2 = \frac{1}{2}(B_x^2 + B_y^2) - \frac{1}{2}\sqrt{B_x^4 + B_y^4 + 2B_x^2 B_y^2 \cos(2j_x - 2j_y)} \quad (2.12)$$

donde B_M representa el semieje mayor de la elipse y B_m el menor. Si tomamos una línea trifásica horizontal compuesta por fases simples y situadas en (-10,15), (0,15) y (10,15) m, por las que circula unas intensidades de $I_i(\varphi_i)$ dados por 500(120°), 500(0°) y 500(240°), y representamos la evolución de $\text{Re}[B_x]$ frente a $\text{Re}[B_y]$ para el campo calculado en los puntos (-10,1), (0,1) y (10,1) obtenemos las elipses de campo de las figuras 2.6a, 2.6b y 2.6c::

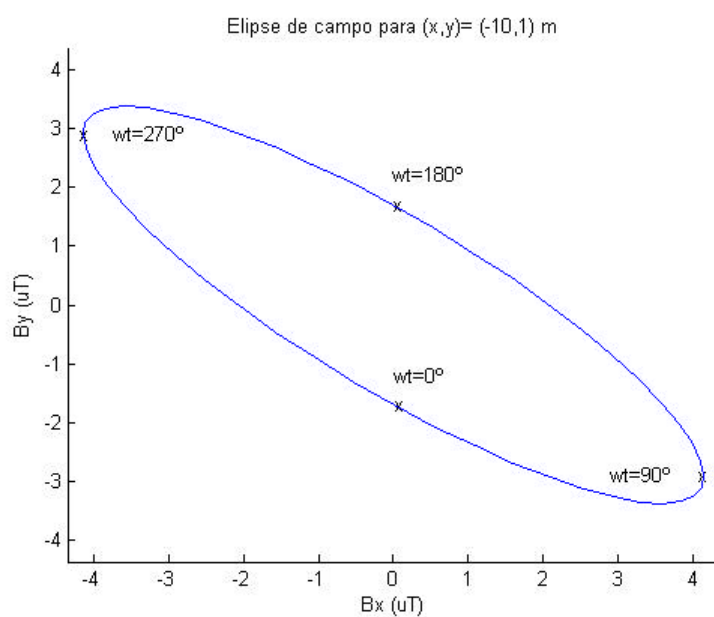


Figura 2.6a Elipse de campo para $(x,y)=(-10,1)$.

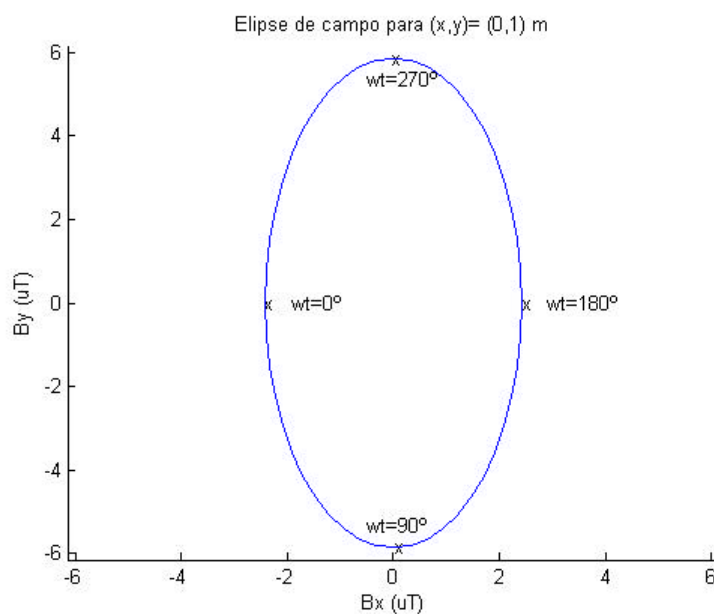


Figura 2.6b Elipse de campo para $(x,y)=(0,1)$.

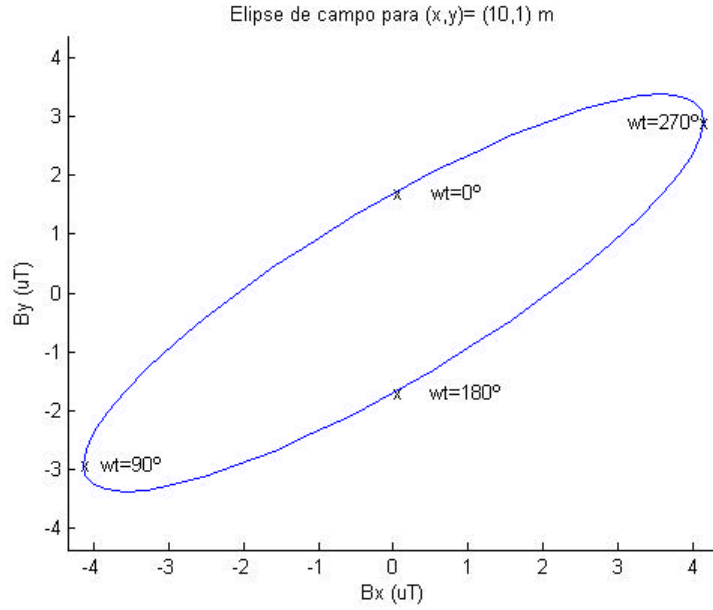


Figura 2.6c Elipse de campo para $(x,y)=(10,1)$.

Asimismo, cabe destacar que el sentido de giro del vector $\vec{B}(t)$ con el tiempo puede ser el de las agujas del reloj o el contrario. En nuestro caso es antihorario.

Como se ha visto, el campo inducido por un grupo de conductores en un punto se caracteriza por una elipse. Sin embargo, a la hora de realizar medidas de campo o bien comparar líneas entre sí es deseable tener un criterio más práctico, ya que los instrumentos que se emplean para la toma de medidas nos devolverán, en su inmensa mayoría, el valor escalar de la densidad de flujo (o inducción resultante).

La definición del valor escalar de la densidad de flujo es:

$$B_{rM} = \left| \vec{B} \right| = \sqrt{\vec{B} \cdot \vec{B}^*} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (2.13)$$

En este proyecto tomaremos este valor como referencia para medir la densidad de flujo.

2.4.1 Campo generado por línea trifásica equilibrada horizontal

Sea una línea trifásica equilibrada, compuesta por fases simples, esto es, un conductor por fase. Supongamos que las coordenadas de las fases vienen definidas por los pares (x_i, y_i) , donde $i=1,2,3$. El campo se va a evaluar a una altura sobre el nivel del suelo de 1 metro, ya que esa es la distancia típica para la toma de medidas en campo. Como intensidades de fase se han tomado:

$$I_p = [I_a, I_b, I_c] = [500 \angle 120^\circ, 500 \angle 0^\circ, 500 \angle 240^\circ] \quad (2.14)$$

Para calcular el campo se barrerá la variable x (distancia transversal al eje de la línea) entre -50 y 50 m, tomando como origen de coordenadas la proyección de la fase central en el suelo, resultando el esquema de la figura 2.7:

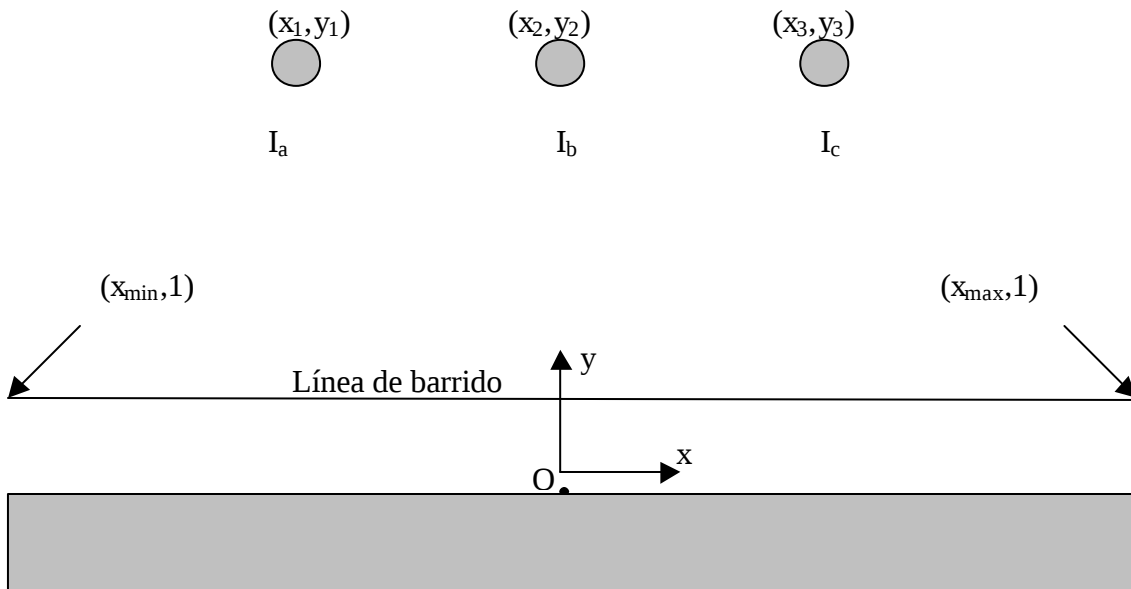


Figura 2.7 Disposición geométrica de la configuración estudiada.

Si particularizamos para fases en los puntos $(-10,15)$, $(0,15)$ y $(10,15)$:

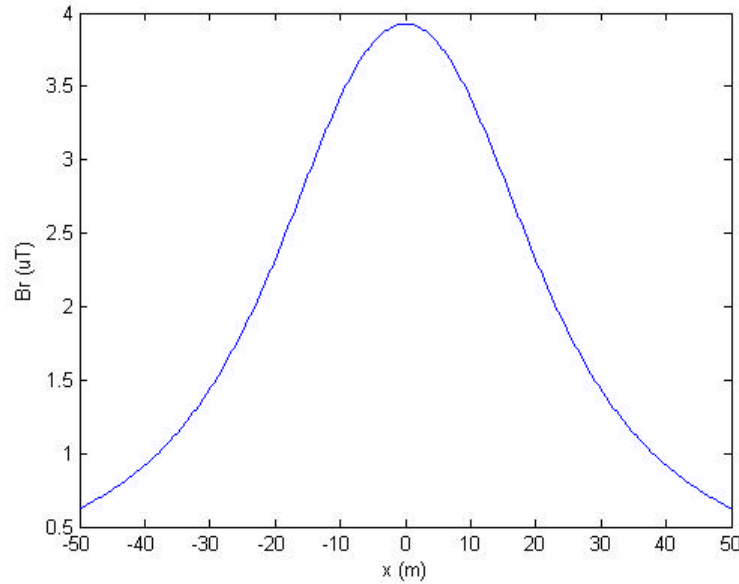


Figura 2.8 Campo magnético generado, línea trifásica horizontal.

2.4.2 Campo generado por línea trifásica equilibrada vertical

Tomando las mismas referencias que en el apartado anterior, estudiamos ahora el caso de una línea de fases simples con configuración vertical.

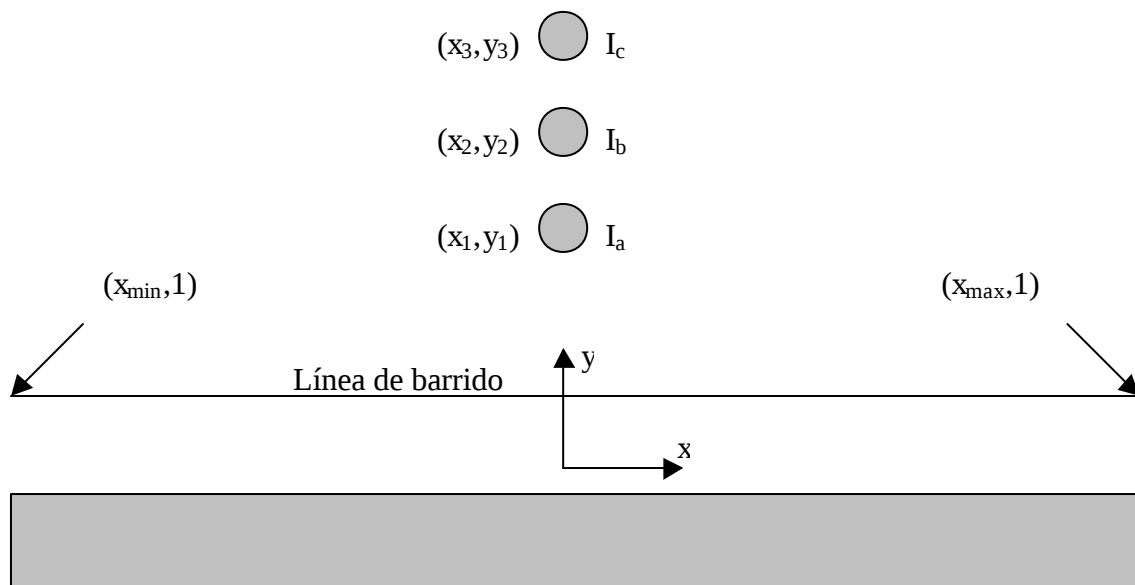


Figura 2.9 Configuración de la línea estudiada.

Las coordenadas de las fases serán ahora: (0,15), (0,20) y (0,25).

Se puede apreciar en la figura que en este caso la curva es más alta y está más comprimida según el eje x. El pico de campo que se alcanza es aproximadamente un 25% mayor que en el caso horizontal.

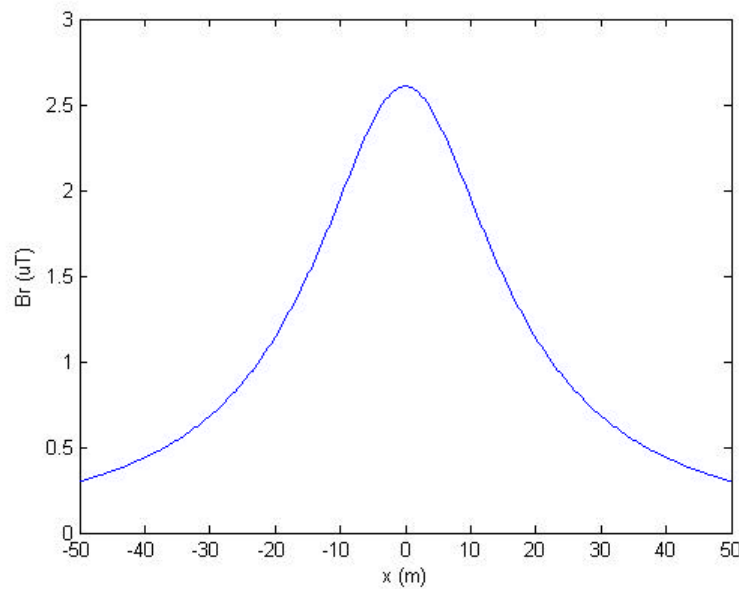


Figura 2.10 Campo magnético generado, línea trifásica vertical.

2.4.3 Campo generado por línea trifásica equilibrada tresbolillo

Estudiemos ahora el caso de una línea de fases simples con configuración en tresbolillo. Las coordenadas de las fases son (0,14), (5.2,17) y (0,20). Se han tomado de manera que la distancia entre dos fases cualesquiera sea constante.

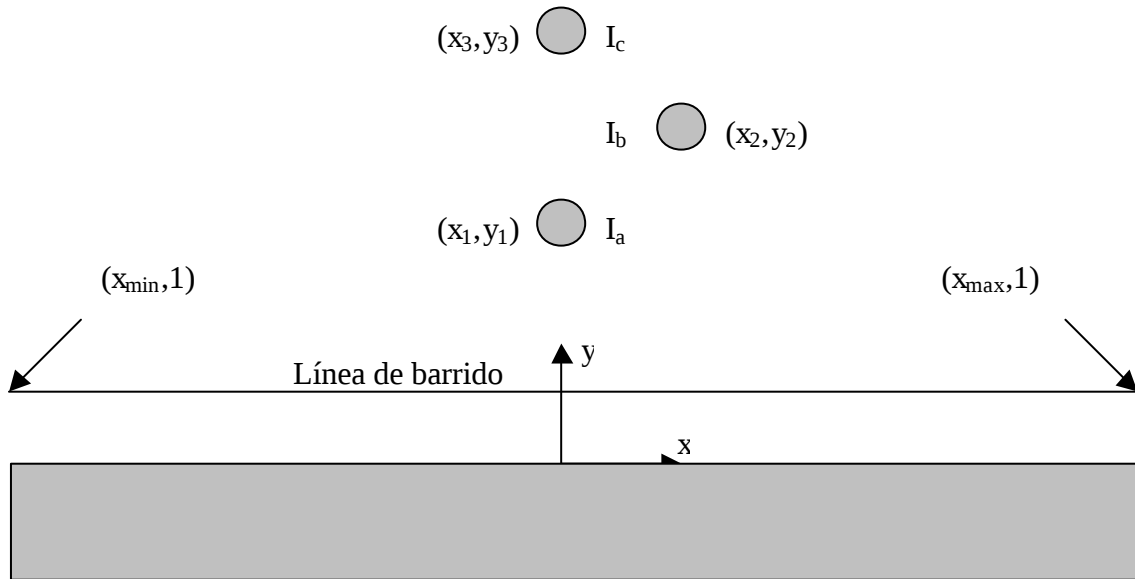


Figura 2.11 Configuración geométrica de la línea objeto de estudio.

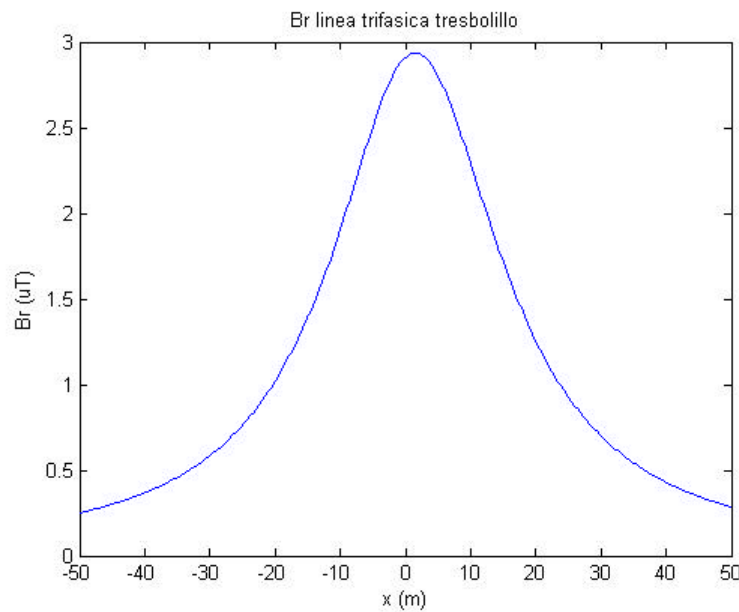


Figura 2.12 Campo magnético resultante.

Se aprecia que esta disposición de fases nos produce un campo similar en magnitud y forma al que se obtenía para el caso de fases con disposición vertical.

2.4.4 Campo creado por dos líneas trifásicas equilibradas horizontales.

Pasamos ahora a analizar el campo que se genera cuando se tienen dos líneas trifásicas equilibradas, considerando sólo secuencia directa. Por simplicidad supondremos que las líneas objeto del análisis se encuentran al mismo nivel, tal y como puede verse en la figura, en la que las coordenadas de cada fase son de la forma (x_{ij}, y_{ij}) , donde i representa la línea a la que pertenece la fase y $j = 1, 2, \dots, n$ con n =número de fases de la línea i .

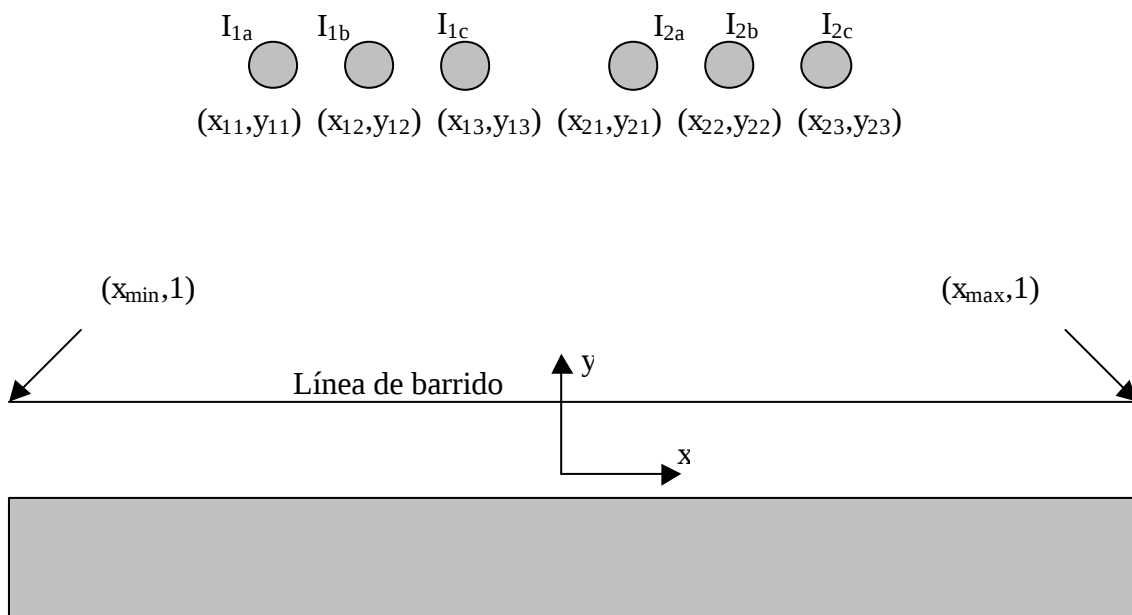


Figura 2.13. Configuración geométrica de las líneas.

Al simular dicha configuración se obtiene:

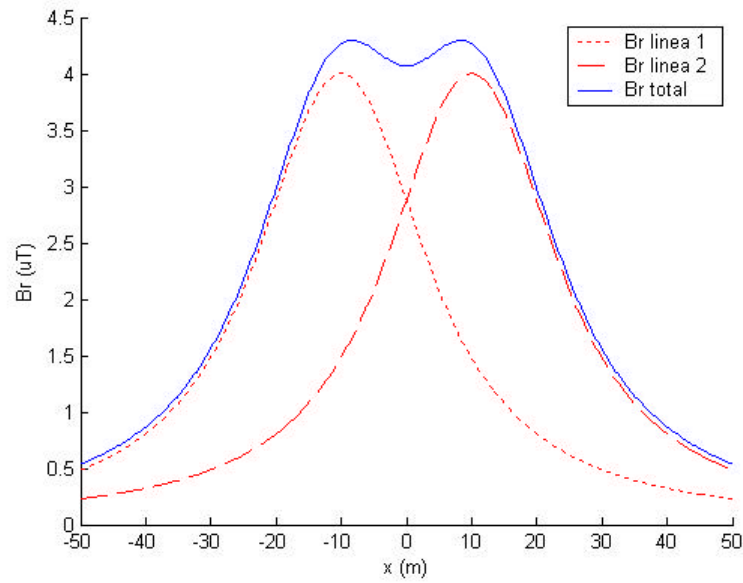


Figura 2.14 Campo magnético de cada línea y total.

Como se puede observar de la figura, la suma del campo generado por dos líneas no alcanza el doble del campo generado por una sola, ya que las magnitudes que se están sumando son vectoriales y no escalares.

2.4.5 Campo creado por dos líneas trifásicas equilibradas verticales.

Si ahora modificamos la disposición de los conductores del caso anterior a vertical, llegamos a la situación que se representa en la figura 2.15:

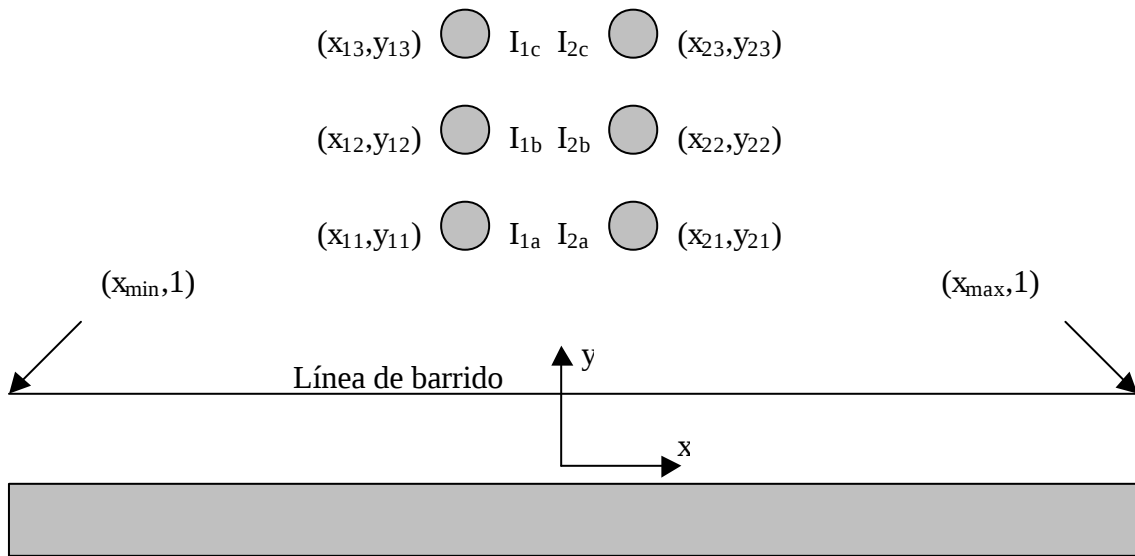


Figura 2.15 Configuración geométrica de las líneas.

Si tomamos las fases de la línea 1 situadas en $(-10,15)$, $(-10,20)$ y $(-10,25)$ con intensidades $500(120^\circ)$, $500(0^\circ)$ y $500(240^\circ)$, las de la línea 2 en $(10,15)$, $(10,20)$ y $(10,25)$ con intensidades $500(120^\circ)$, $500(0^\circ)$ y $500(240^\circ)$, y calculamos el campo total en el punto $(0,1)$:

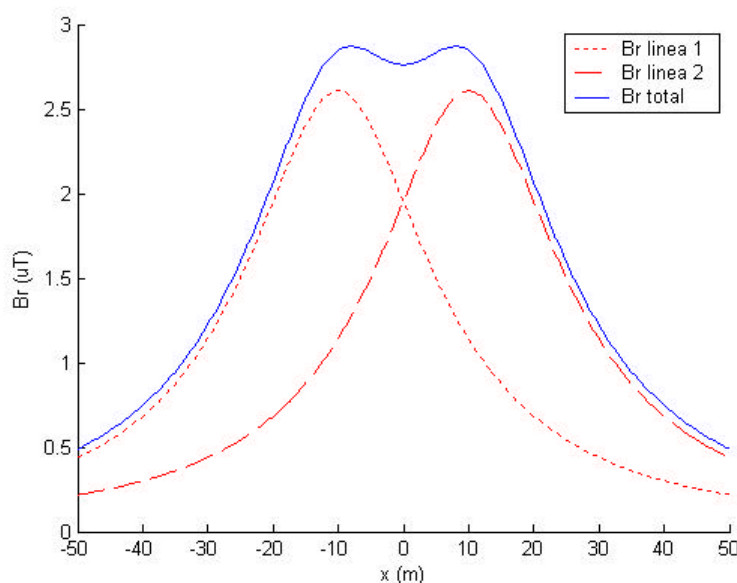


Figura 2.16 Campo magnético de cada línea y total.

Vemos que en este caso el campo creado es bastante menor que en el caso anterior (dos líneas horizontales).

2.4.6 Campo creado por líneas con fases compuestas

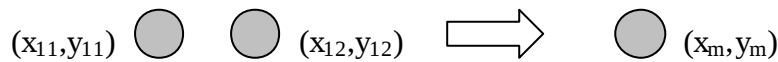
En muchas ocasiones las líneas contienen fases compuestas. Cabe preguntarse entonces si hay que calcular el campo debido a cada uno de los conductores de cada una de las fases de cada línea, o bien se puede hallar una configuración más simple y equivalente a la original, sabiendo que el error que se comete al sustituir la original por la aproximada es aceptable.

Para ello, vamos a analizar los errores cometidos al evaluar el campo cuando se consideran fases dúplex, tríplex y cuádruplex. La configuración que se tomará como equivalente es un conductor situado en el centro geométrico de la disposición original.

El módulo de la intensidad del conductor equivalente (intensidad de fase) será $|I_{fase}|=n \cdot |I_{cond}|$, donde n es el número de conductores componen la fase. El desfase del conductor equivalente será $\theta_{fase}=\theta_{cond}$, ya que por todos los conductores de una misma fase circula la misma intensidad.

Así, las configuraciones se simplifican como sigue:

- Caso Dúplex Horizontal:



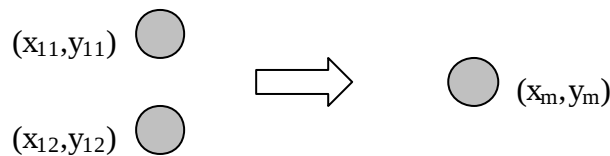
$$x_m = \frac{x_{11} + x_{12}}{2}$$

$$y_m = y_{11} = y_{12}$$

$$I_{fase} = 2 \cdot I_{cond}$$

$$q_{fase} = q_{cond}$$

- Caso Dúplex vertical:



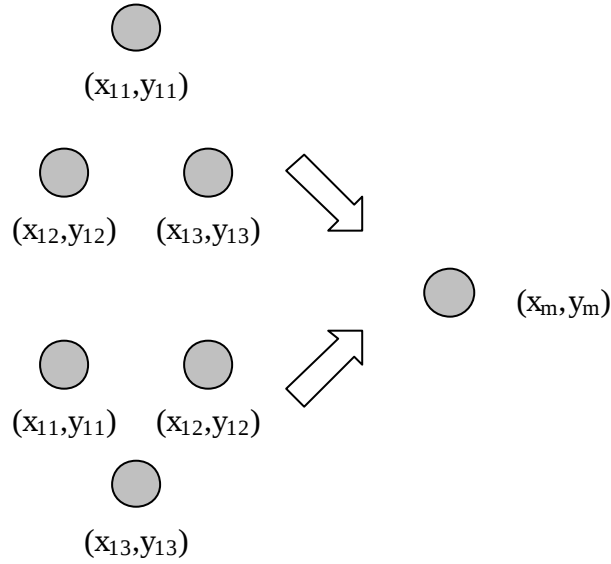
$$x_m = x_{11} = x_{12}$$

$$y_m = \frac{y_{11} + y_{12}}{2}$$

$$I_{fase} = 2 \cdot I_{cond}$$

$$q_{fase} = q_{cond}$$

- Fase Tríplex tipo 1 y tipo 2:



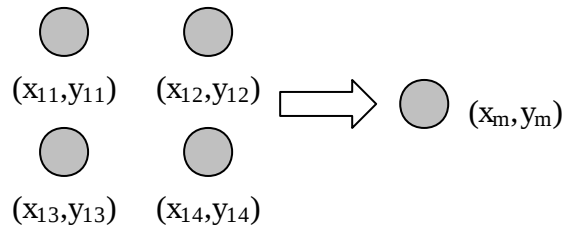
$$x_m = \frac{y_{11} + y_{12} + y_{13}}{3}$$

$$y_m = \frac{y_{11} + y_{12} + y_{13}}{3}$$

$$I_{fase} = 3I_{cond}$$

$$q_{fase} = q_{cond}$$

- Fase cuádruplex:



$$x_m = \frac{y_{11} + y_{12} + y_{13} + y_{14}}{4}$$

$$y_m = \frac{y_{11} + y_{12} + y_{13} + y_{14}}{4}$$

$$I_{fase} = 4I_{cond}$$

$$q_{fase} = q_{cond}$$

A continuación se presentan las comparaciones entre el campo calculado con la fase original y el campo obtenido con la aproximación. Se va a tomar, sin pérdida de generalidad, 0° como desfase:

- Fase dúplex horizontal:

Conductor 1: $x_{11}=-3$ m, $y_{11}=15$ m, $I_{11}=250$ A (rms), $\theta_{11}=0^\circ$

Conductor 2: $x_{12}=3$ m, $y_{12}=15$ m, $I_{12}=250$ A (rms), $\theta_{12}=0^\circ$

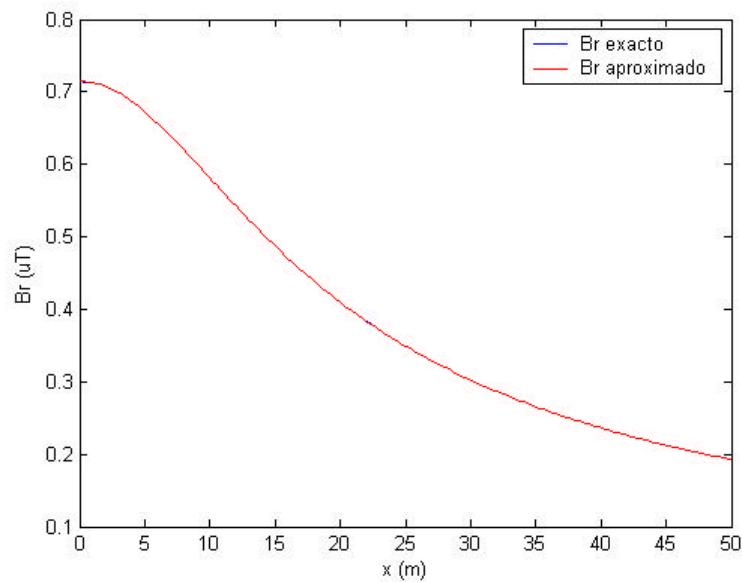


Figura 2.17 Campo exacto y aproximado fase dúplex horizontal.

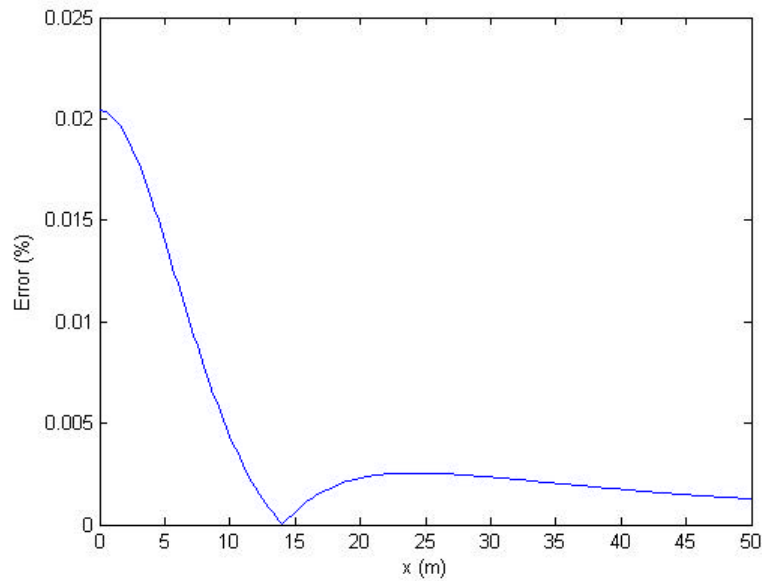


Figura 2.18 Error cometido al utilizar el campo aproximado fase dúplex horizontal.

- Fase dúplex vertical

Conductor 1: $x_{11}=0$ m, $y_{11}=12$ m, $I_{11}=250$ A (rms), $\theta_{11}=0^\circ$

Conductor 2: $x_{12}=0$ m, $y_{12}=15$ m, $I_{12}=250$ A (rms), $\theta_{12}=0^\circ$

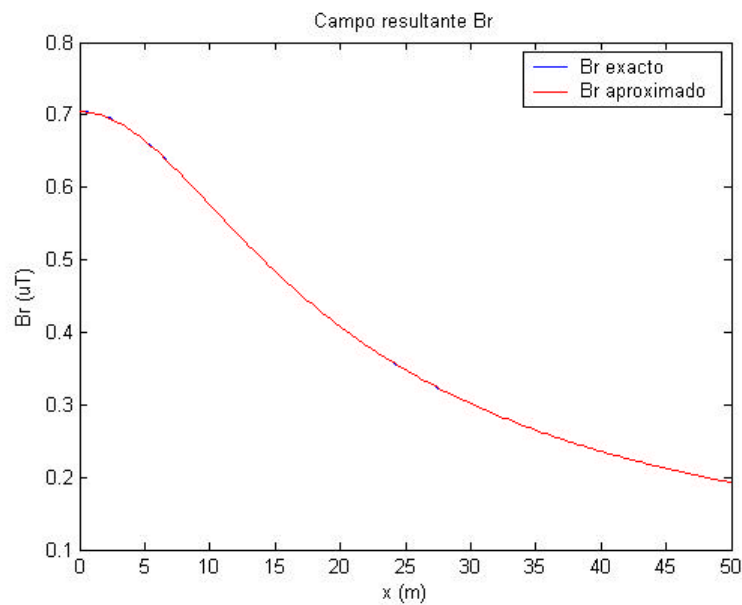


Figura 2.19 Campo exacto y aproximado fase dúplex vertical.

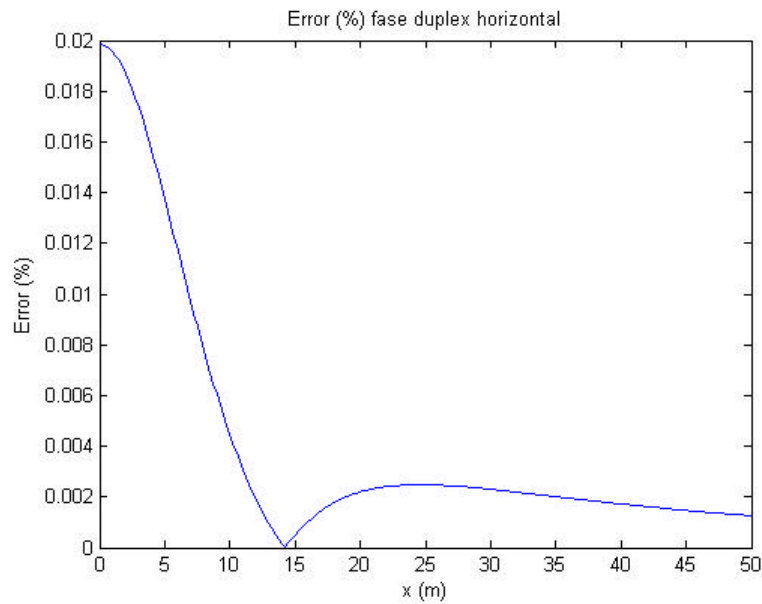


Figura 2.20 Error cometido al utilizar el campo aproximado, fase dúplex vertical.

- Fase Tríplex tipo I

Conductor 1: $x_{11} = 0$ m, $y_{11} = 15$ m, $I_{11} = 167$ A (rms), $\theta_{11} = 0^\circ$

Conductor 2: $x_{12} = -0.4$ m, $y_{12} = 14.7$ m, $I_{12} = 167$ A (rms), $\theta_{12} = 0^\circ$

Conductor 3: $x_{13} = 0.4$ m, $y_{13} = 14.7$ m, $I_{13} = 167$ A (rms), $\theta_{13} = 0^\circ$

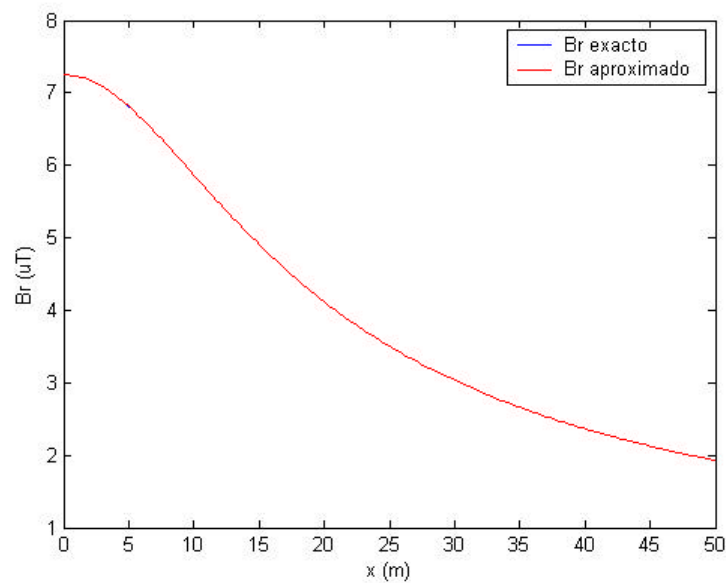


Figura 2.21 Campo exacto y aproximado, fase tríplex tipo I.

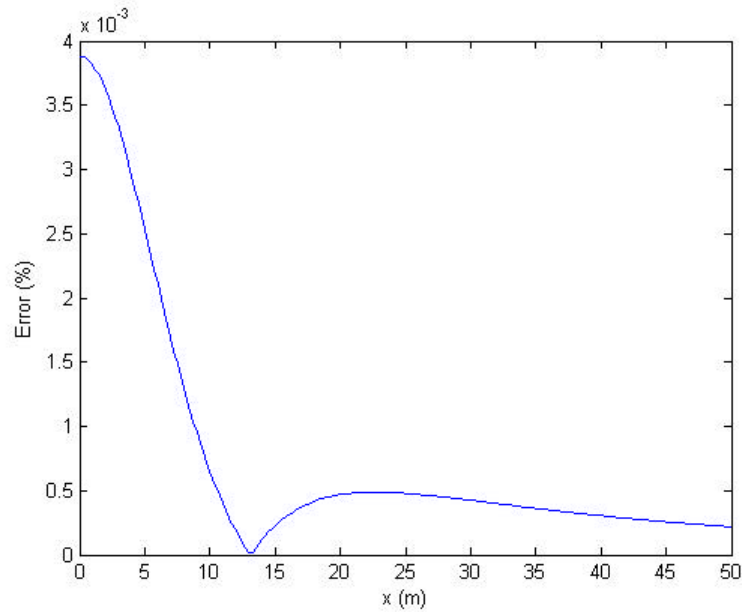


Figura 2.22 Error cometido al utilizar el campo aproximado, fase tríplex tipo I.

- Fase Tríplex tipo 2

Conductor 1: $x_{11} = -2$ m, $y_{11} = 15$ m, $I_{11} = 167$ A (rms), $\theta_{11} = 0^\circ$

Conductor 2: $x_{12} = 2$ m, $y_{12} = 5$ m, $I_{12} = 167$ A (rms), $\theta_{12} = 0^\circ$

Conductor 3: $x_{13} = 0$ m, $y_{13} = 11.5$ m, $I_{13} = 167$ A (rms), $\theta_{13} = 0^\circ$

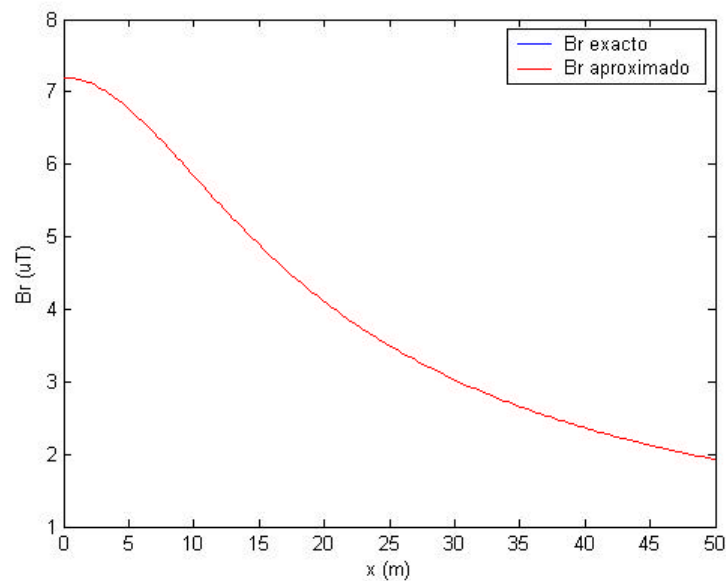


Figura 2.23 Campo exacto y aproximado fase tríplex tipo II.

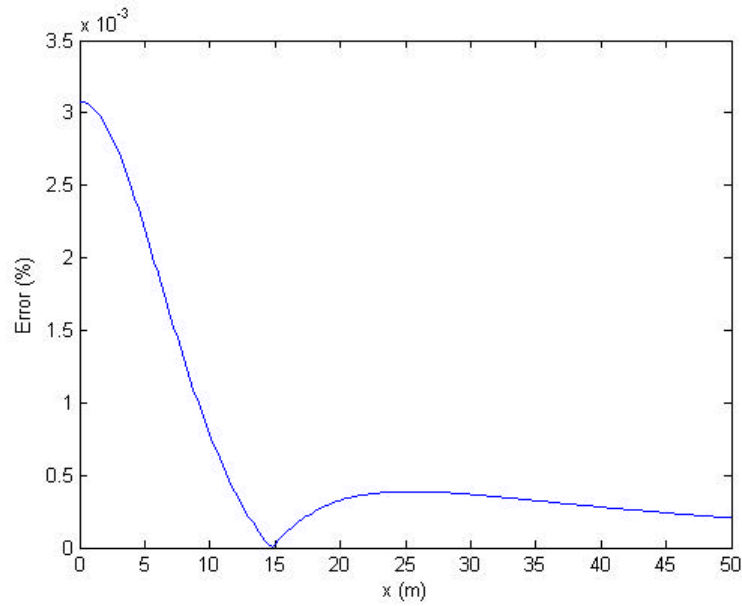


Figura 2.24 Error cometido al utilizar el campo aproximado.

- Fase Cuádruplex

Conductor 1: $x_{11} = -0.1$ m, $y_{11} = 15.1$ m, $I_{11} = 167$ A (rms), $\theta_{11} = 0^\circ$

Conductor 2: $x_{12} = 0.1$ m, $y_{12} = 15.1$ m, $I_{12} = 167$ A (rms), $\theta_{12} = 0^\circ$

Conductor 3: $x_{13} = -0.1$ m, $y_{13} = 14.9$ m, $I_{13} = 167$ A (rms), $\theta_{13} = 0^\circ$

Conductor 4: $x_{14} = 0.1$ m, $y_{14} = 14.9$ m, $I_{14} = 167$ A (rms), $\theta_{14} = 0^\circ$

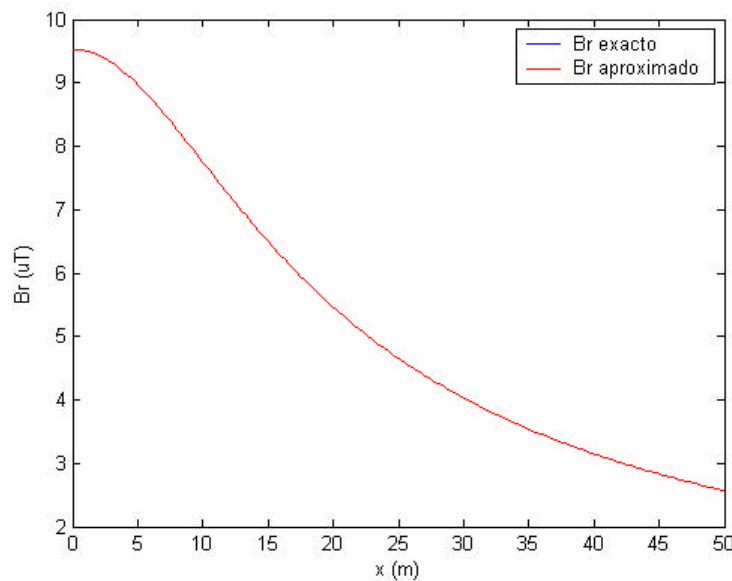


Figura 2.25 Campo exacto y aproximado fase cuádruplex.

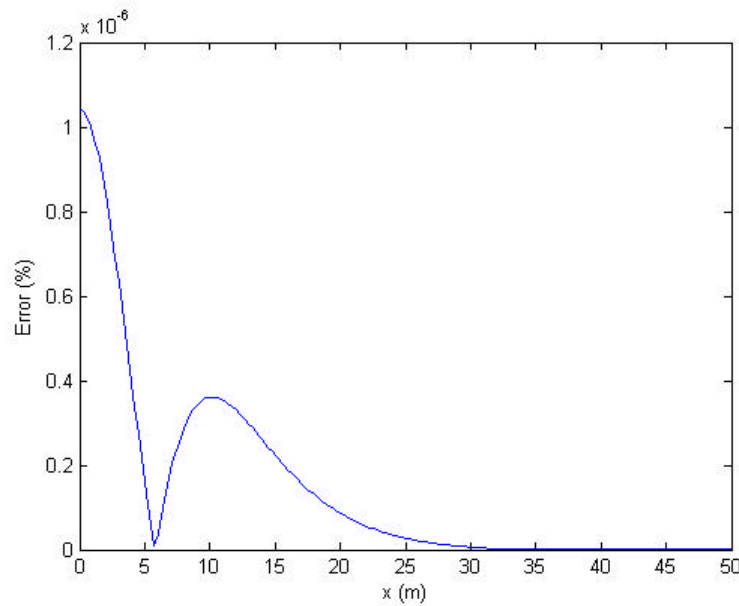


Figura 2.26 Error cometido al utilizar el campo aproximado

Como se puede observar de la batería de gráficas 2.17 a 2.26, el error cometido al aproximar los grupos de conductores por uno en el centro geométrico de la configuración original y por el que circula una intensidad suma de las que circulan por cada uno de los conductores que componen del grupo es muy pequeño, tanto menor cuanto más conductores forman la fase.

Por tanto en este proyecto se va a adoptar el criterio de sustituir las fases complejas por sus equivalentes simples. Este criterio se aplicará sólo para calcular el campo magnético, mientras que a la hora de pasarle los datos necesarios al módulo de optimización se tendrá en cuenta la geometría original, ya que en ese caso lo que nos interesa son las zonas en las que no está permitido colocar el lazo.

Capítulo 3. Diseño de lazos pasivos

3.1 Introducción

Existe en la sociedad una creciente preocupación por cualquier asunto que afecte directa o indirectamente al medio ambiente. La población está especialmente sensibilizada respecto a las emisiones electromagnéticas, a pesar de que hoy día no hay estudios rigurosos e independientes que demuestren el efecto perjudicial de los campos electromagnéticos sobre la salud de la población.

Partiendo de esa base y del hecho de que tampoco existe ningún estudio riguroso e independiente que demuestre que los campos magnéticos no sean perjudiciales para la salud humana, la postura que parece más razonable es ponerse del lado de la prevención; ello conduce a una pregunta lógica: ¿Es posible atenuar los campos magnéticos? La respuesta es sí, sin embargo hay que reformular la pregunta para que tome un sentido más práctico: ¿Es posible y no antieconómico atenuar dicho campo? Y es más ¿Existe más de una forma de disminuir dicho campo? De ser así, ¿Cuál de ellas es la óptima para cada caso?

A estas cuestiones se pretende dar respuesta en este capítulo y los siguientes.

El Legislador también se ha pronunciado al respecto, dotando de regulaciones sobre los niveles máximos de emisiones electromagnéticas permitidas; entre esta legislación se encuentra el Real Decreto 1066/2001, en cuyo anexo II se establecen

niveles de referencia para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos, de frecuencias comprendidas entre 0 y 300 GHz. En la figura 3.1 se muestran dichos límites:

Niveles de referencia para campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos (0 Hz-300 GHz, valores rms imperturbados)

Gama de frecuencia	Intensidad de campo E (V/m)	Intensidad de campo H (A/m)	Campo B (μT)	Densidad de potencia equivalente de onda plana (W/m²)
0-1 Hz	—	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	
1-8 Hz	10.000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	
8-25 Hz	10.000	$4.000/f$	$5.000/f$	
0,025-0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	—
0,8-3 kHz	$250/f$	5	6,25	—
3-150 kHz	87	5	6,25	—
0,15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	—
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	—
10-400 MHz	28	$0,73/f$	0,092	2
400-2.000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f/200$
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

Figura 3.1 Niveles de referencia para emisiones electromagnéticas. RD 1066/2001.

En nuestro caso, en que tratamos con líneas eléctricas aéreas de alta tensión, la frecuencia es de 50-60 Hz (fila 4 de la tabla), y dado que en este proyecto estamos trabajando en base a B, el valor límite que nos aplica es de:

$$B_{max,50} = \frac{5}{f} = \frac{5}{0,05} = 100 \text{ mT} \quad (3.1a)$$

$$B_{max,60} = \frac{5}{f} = \frac{5}{0,06} = 83.3 \text{ mT} \quad (3.1b)$$

En este capítulo y el siguiente se estudiarán las dos opciones existentes en la actualidad: lazos pasivos y activos. Se puede establecer una nueva categorización según sean lazos interiores (su planta solapa con la de la línea) o exteriores (la planta del lazo no solapa con la de la línea); en este proyecto sólo se considerarán los interiores, si bien todas las conclusiones que se alcancen serán aplicables a lazos exteriores cuyos lados mayores sean paralelos a la línea y los menores perpendiculares.

El conjunto de lazos pasivos lo forman todos aquellos en los que la corriente que circula por ellos es inducida exclusivamente por el campo magnético generado por la línea. El segundo grupo lo forman aquellos lazos a los que se coloca una fuente, de manera que la intensidad es controlable a voluntad y no depende de la inducción de la línea sobre el lazo.

Se va a establecer una restricción más para los tipos de lazo. Podemos dividirlos según la relación que exista entre la dimensión mayor de su lado mayor y la de su lado menor. Así, en este proyecto sólo se considerarán lazos cuya mayor dimensión de su lado mayor sea al menos un orden de magnitud mayor que la mayor dimensión de su lado menor.

Una vez analizados los tipos de lazos que se contemplan en este proyecto se va a obtener el método general de cálculo de los parámetros que definen a cada tipo, y luego se hará un barrido de dichos parámetros (para las configuraciones más habituales), es decir, se mantendrán todos los parámetros constantes excepto uno y se estudiará cómo varía la efectividad del lazo en función de cada uno de los parámetros que lo definen.

Con el objetivo de arrojar cierta luz sobre si existe una zona preferencial para la localización de los lazos pasivos, encaminado a obtener un buen rendimiento, y también a determinar el grado de influencia de la disposición de las fases en la mejor zona para situarlos, se ha añadido al final un barrido de dos parámetros simultáneos para las configuraciones más comunes de líneas.

3.2 Cálculo de la intensidad inducida en un lazo pasivo

En este apartado vamos a deducir la expresión que nos permitirá obtener la intensidad inducida en un lazo pasivo, conociendo la geometría del problema y el vector de intensidades de la línea generadora, expresadas en valores RMS.

Las hipótesis en que nos basaremos para estos cálculos son:

- Se emplearán las fases simples equivalentes en lugar de las originales (error < 0,025%).
- Los lazos se componen de dos tramos rectilíneos, paralelos dos a dos. De ellos, habrá dos (longitudinales, paralelos a la línea) que serán significativamente más largos que los otros dos (transversales, perpendiculares a la línea).
- La distancia existente entre cualquier conductor de fase y cualquier conductor de lazo es al menos un orden de magnitud mayor al radio del conductor. Con ello se consigue evitar efectos de proximidad entre conductores.
- La intensidad de la línea generadora de campo no se ve afectada por la presencia del lazo pasivo.

- No se considerará el efecto de la tierra (error $< 3\%$ a 150 m de distancia transversal de la línea, y menor conforme nos acercamos a la misma).

Con estas hipótesis se consigue que el problema pase de planteamiento tridimensional a bidimensional, ya que se elimina la coordenada z (en la dirección de la línea) de las ecuaciones del problema.

En general, consideraremos m fases por las que circulan las intensidades de fase senoidales I_{p_k} , y n lazos por los que circulan las intensidades $I_1, I_2, \dots, I_n$; la geometría de las líneas y de los lazos viene definida por las coordenadas de sus conductores.

En este proyecto, tanto para el caso de lazos pasivos como activos, se han considerado tres geometrías que se muestran en las figuras 3.2 a 3.4, y en las que se han representado sólo dos conductores de fase por motivos de claridad de las mismas.

- **Lazo simple:** se compone de dos conductores longitudinales (paralelos a la línea) y otros dos transversales en los extremos del vano.

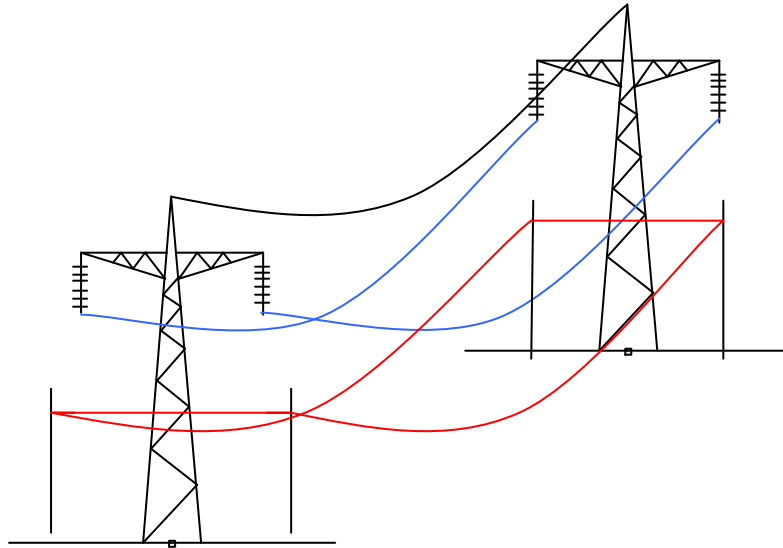


Figura 3.2 Lazo simple.

- **Lazo doble con un conductor común:** en este caso tenemos tres conductores longitudinales y dos transversales.

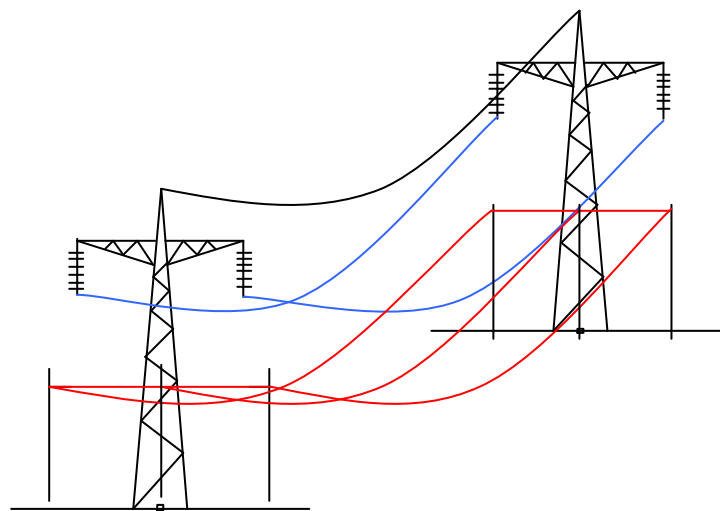


Figura 3.3 Lazo doble con conductor común

- **Lazo doble:** ahora se tiene en realidad dos lazos simples. Serán, por tanto, cuatro tramos longitudinales y cuatro transversales.

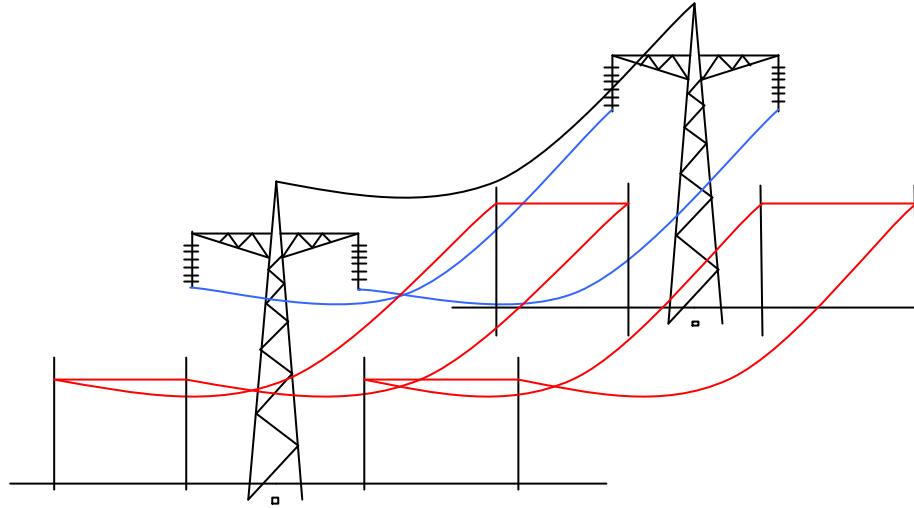


Figura 3.4 Lazo doble

Hay que destacar que ni siquiera se obliga a que los conductores de un lazo estén a la misma altura.

Retomando el planteamiento, el vector de intensidades de fases tendrá la forma general:

$$I_p = \begin{bmatrix} I_{p1} \\ \vdots \\ I_{pm} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

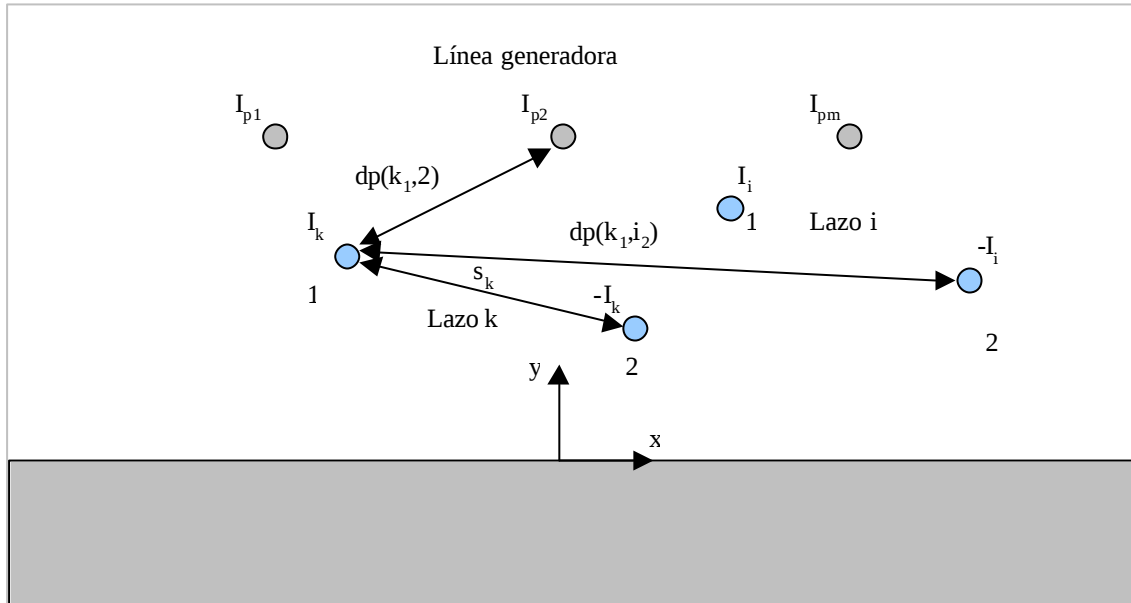


Figura 3.5 Geometría general del problema con lazos pasivos.

Cabe aclarar que las magnitudes fasoriales se representarán en **negrita**, las vectoriales con un vector, y las magnitudes por unidad de longitud con un apóstrofo.

La intensidad inducida en el lazo i (tomando como sentido positivo el sentido positivo del eje z) vendrá dada por:

$$\mathbf{I}_i = \frac{\mathbf{V}_i'}{R_i' + jX_i'} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{V}_i' = -j\omega \mathbf{f}_i' \quad (3.4)$$

siendo:

- ω : pulsación de la red (rad/s).
- V_i' : fuerza electromotriz inducida en el lazo por unidad de longitud.
- j_i' : flujo externo concatenado por el lazo i por unidad de longitud.
- R_i' : resistencia del lazo i por unidad de longitud.
- X_i' : inductancia propia del lazo i por unidad de longitud

X_i' se calcula mediante:

$$X_i' = j\omega \frac{\mu_0}{p} \ln \frac{s_i}{rgm_i} \quad (3.5)$$

siendo:

- μ_0 : permeabilidad magnética del vacío.
- s_i : distancia entre los conductores 1 y 2 del lazo i.
- rgm_i : radio geométrico medio del conductor que compone el lazo i.

La expresión que nos permite calcular V_i' , según Cruz [1], viene dada por:

$$V_i' = -j\omega j_i' = -j \cdot \left(\sum_{k=1}^m Xp_{ik}' I_{pk} + \sum_{l=1, l \neq i}^n (X_{il}' - X_{il}^{\otimes'}) I_l - X_{ii}^{\otimes'} I_i \right) \quad (3.6)$$

Si despreciamos el efecto de la tierra, la ecuación se simplifica quedando:

$$V_i' = -j\omega j_i' = -j \cdot \left(\sum_{k=1}^m Xp_{ik}' I_{pk} + \sum_{l=1, l \neq i}^n X_{il}' I_{pk} \right) \quad (3.7)$$

donde:

$$Xp_{ik}' = \omega \frac{\mu_0}{p} \ln \frac{dp(i2,k)}{dp(i1,k)}$$

$$X'_{il} - X^{\otimes'}_{il} = X'_{il} = w \frac{m_0}{p} \ln \frac{d(i1, l2) d(i2, l1)}{d(i1, l1) d(i2, l2)} \quad (3.8)$$

$$X'_{ii} = 0$$

estando las distancias definidas como:

- $dp(i1,k)$: distancia entre el conductor 1 del lazo i y el conductor k de la línea.
- $d(i2,l1)$: distancia entre el conductor 2 del lazo i y el conductor 1 de lazo l.

Es conveniente detenerse a reflexionar sobre el error que cometemos al calcular la intensidad inducida habiendo despreciado el efecto de la tierra. Así, siguiendo a Cruz [1], para frecuencias del orden de 50 Hz se tiene que para una línea trifásica horizontal, con 8,5 m de separación entre fases y 10 m de altura sobre el suelo, con un lazo de 20 m de anchura situado a 9 m de altura, se tiene un error en el cálculo de la intensidad inducida del 0,014%.

Por tanto, podemos asumir que el no tener en cuenta la tierra apenas nos va a afectar al cálculo de la intensidad inducida.

Sustituyendo ahora (3.7) en (3.3), las intensidades de los lazos pasivos resultan, en forma matricial:

$$\mathbf{I} = -(\mathbf{Z}')^{-1} \mathbf{Z}'_p \mathbf{I}_p \quad (3.9)$$

siendo:

$$\mathbf{Z}'_{ii} = \mathbf{R}'_i + j\mathbf{X}'_i \quad (3.10)$$

$$\mathbf{Z}'_{ik} = j\mathbf{X}'_{ik} \quad (3.11)$$

$$Zp'_{ik} = jXp'_{ik} \quad (3.12)$$

Llegados a este punto, vamos a desarrollar las expresiones (3.10) y (3.11) para los tres tipos de lazos que se consideran en este proyecto.

Supondremos que el conductor que compone el lazo i viene definido por su resistencia por unidad de longitud R'_i y por su radio geométrico medio (rgm_i).

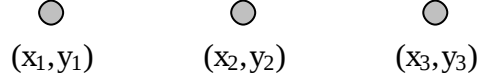
En el caso de lazo doble lo usual es utilizar el mismo tipo de conductor para ambos lazos, por lo que se tomará $R'_{lazo,1}=R'_{lazo,2}=R'$ y $rgm_1=rgm_2=rgm$.

- Lazo simple



$$Z' = Z'_{11} = R'_{lazo,1} + jX'_1 = 2R'_c + j\frac{m_0}{p} \ln \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{rgm_1} \quad (3.13)$$

- Lazo doble, conductor común



Tomando: $s_1 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$

$$s_2 = \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}$$

$$Z'_{11} = R'_{lazo,1} + jX'_{11} = 2R'_c + j \frac{m_0}{p} \ln \frac{s_1}{rgm} \quad (3.14)$$

$$Z'_{12} = R'_{cond,1} + jX'_{12} = R'_c + j \frac{m_0}{2p} \ln \frac{s_1 \cdot s_2}{rgm \cdot (s_1 + s_2)} \quad (3.15)$$

$$Z'_{21} = R'_{cond,2} + jX'_{21} = R'_c + j \frac{m_0}{2p} \ln \frac{s_2 \cdot s_1}{rgm \cdot (s_1 + s_2)} \quad (3.16)$$

$$Z'_{22} = R'_{lazo,2} + jX'_{22} = 2R'_c + j \frac{m_0}{p} \ln \frac{s_2}{rgm} \quad (3.17)$$

- Lazo doble



Tomando: $s_1 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$

$$s_2 = \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2}$$

$$Z'_{11} = R'_{lazo,1} + jX'_{11} = 2R'_c + j \frac{m_0}{p} \ln \frac{s_1}{rgm} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned}
Z'_{12} &= R'_{lazo,1} + jX'_{12} = \\
&= 2R'_C + j \frac{m_0}{p} \ln \frac{\sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2} \cdot \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2} \cdot \sqrt{(x_4 - x_2)^2 + (y_4 - y_2)^2}}
\end{aligned} \tag{3.19}$$

$$\begin{aligned}
Z'_{21} &= R'_{lazo,2} + jX'_{21} = \\
&= 2R'_C + j \frac{m_0}{p} \ln \frac{\sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2} \cdot \sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2}}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2} \cdot \sqrt{(x_4 - x_2)^2 + (y_4 - y_2)^2}}
\end{aligned} \tag{3.20}$$

$$Z'_{22} = R'_{lazo,2} + jX'_2 = 2R'_C + j \frac{m_0}{p} \ln \frac{s_2}{rgm} \tag{3.21}$$

Una vez que tenemos calculado las intensidades inducidas en el lazo, podemos obtener el campo magnético total sin más que aplicar superposición de nuevo al campo generado por la línea y el creado por el lazo.

$$\vec{B}_{total}(x, y, t) = \vec{B}_{fases}(x, y, t) + \vec{B}_{lazo}(x, y, t) \tag{3.22}$$

3.3 Compensación de lazos pasivos

Hasta ahora hemos calculado la intensidad inducida en un lazo pasivo, que venía caracterizado por su resistencia por unidad de longitud y su inductancia propia por unidad de longitud. Está claro que lo que nos interesa es aumentar la intensidad inducida todo lo que sea posible, ya que eso se traducirá en un mayor factor de reducción y por lo tanto en un menor campo final.

Ese objetivo es posible si conseguimos reducir su impedancia. En efecto, la tensión inducida en el lazo va a ser la misma que anteriormente, ya que la línea generadora no se ha modificado; ahora bien, si conseguimos reducir la impedancia del lazo tendremos una intensidad inducida mayor.

Este efecto puede conseguirse mediante inserción de un condensador en serie. En este proyecto se modelará como un condensador serie en cada uno de los conductores, tal y como se ve en la figura 3.6.

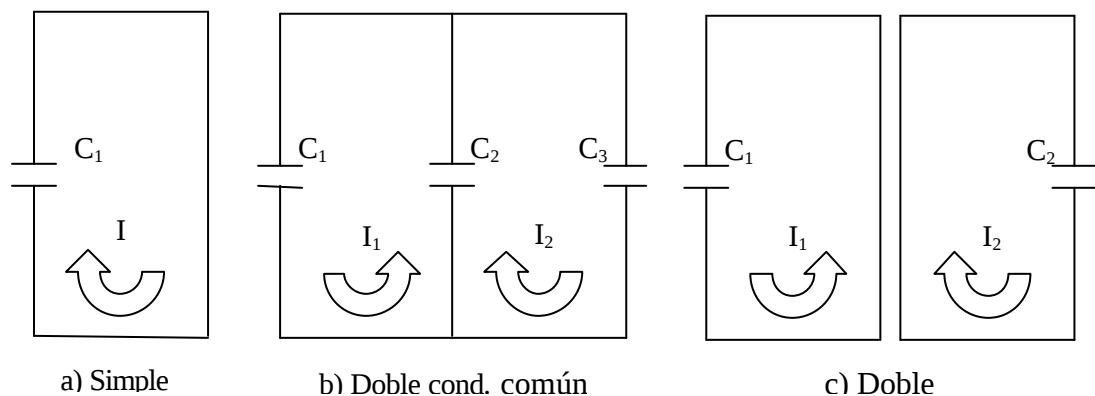


Figura 3.6 Lazos con compensación serie

En el caso de lazo simple y lazo doble los condensadores están asociados a cada uno de los lazos y simultáneamente a un conductor. Sin embargo en el caso de lazo doble con conductor común puede ser interesante obtener un circuito equivalente en el que lo que consideremos sea un condensador por lazo y no por conductor. Esta transformación se resuelve en el Anexo B.

Existe otra forma de expresar la compensación: mediante el factor de compensación, que se mueve entre 0 y 1 y representa la fracción de la reactancia original que es compensada por el condensador. Así, un factor de 0,3 implica que la reactancia propia del lazo disminuye en un 70%.

3.4 Cálculo del factor de reducción

Una vez que hemos obtenido el campo magnético total, tenemos que adoptar un criterio para determinar en qué grado hemos logrado el objetivo de mitigar el campo original. Para ello definimos el factor de reducción o de apantallado como:

$$FA = \frac{B_{r,original}}{B_{r,mitigado}} \quad (3.23)$$

Por su propia definición no se encuentra acotado, ya que según las condiciones del problema y la situación del lazo, puede ocurrir que el campo se amortigüe o, por el contrario, que el lazo aumente el campo en algunas zonas. Sin embargo, las situaciones que nos interesan son aquellas en las que el factor de reducción es mayor que 1, ya que implica reducción respecto al campo original.

3.5 Aplicación a algunos casos particulares

Vamos a aplicar lo desarrollado en este capítulo a algunas configuraciones comunes en líneas de transporte.

3.5.1 Línea horizontal con lazo al mismo nivel

Consideraremos una línea trifásica horizontal con distancia entre fases d y altura de fases h , y un lazo pasivo coplanar con ella, como se muestra en la figura 3.7.

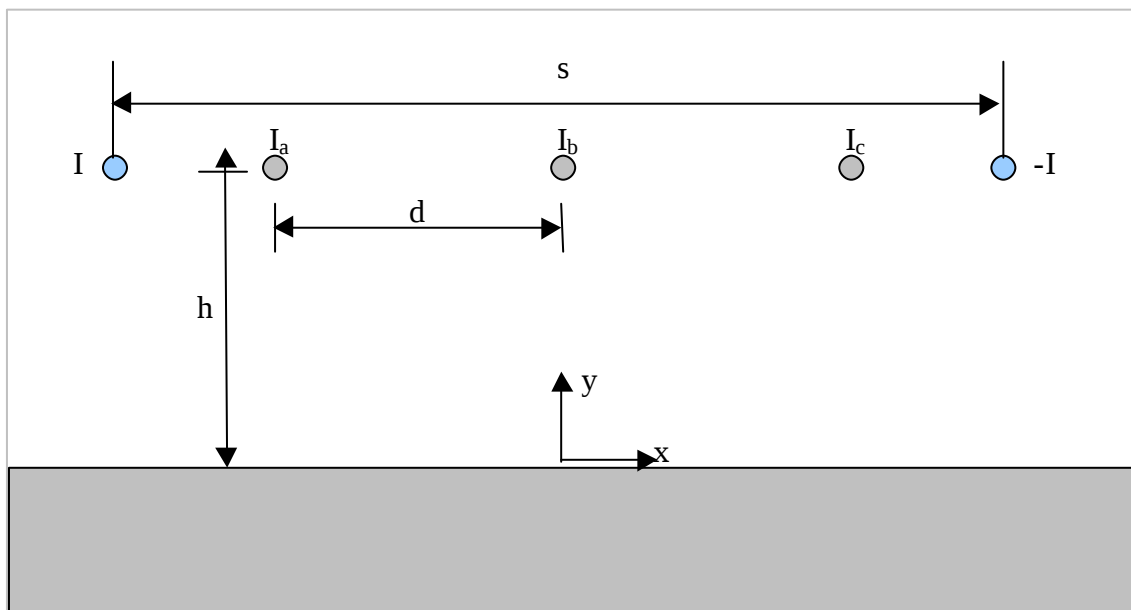


Figura 3.7 Geometría del problema propuesto.

Vamos a particularizar este caso para valores típicos de líneas de transporte; en concreto se tomará: $d=8,5$ m, $h=25$ m, $s=30$ m, $I_a=I_b=I_c=500$ A (rms), $\theta_a=120^\circ$, $\theta_b=0^\circ$, $\theta_c=240^\circ$ y un lazo simple con LA-380 como conductor y separación entre conductores (s) de 30 m. El lazo se considera simétrico con respecto al eje vertical. Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 3.8 y 3.9: en la primera de ellas se ha representado el campo original, el creado por el lazo y el total, mientras que la segunda muestra el factor de reducción conseguido.

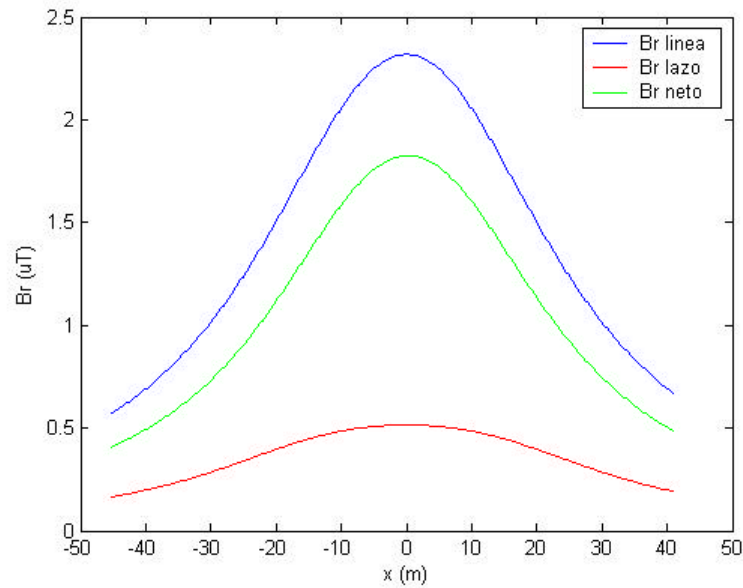


Figura 3.8 Campo original, del lazo y total.

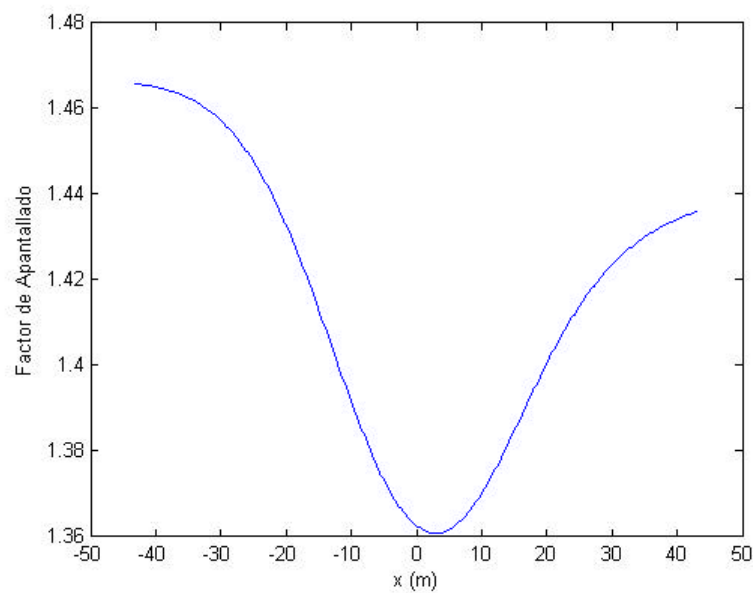


Figura 3.9 Factor de reducción para el caso planteado

Vemos que la reducción conseguida oscila entre un 25%-30%, mayor cuanto más nos alejamos transversalmente de la línea.

Si, para esta configuración, mantenemos constante la altura del lazo h (25 m), y efectuamos un barrido del parámetro s entre 1 y 100 m, se obtiene la gráfica 3.10, en la que se representa el valor máximo del factor de reducción para cada valor de separación s :

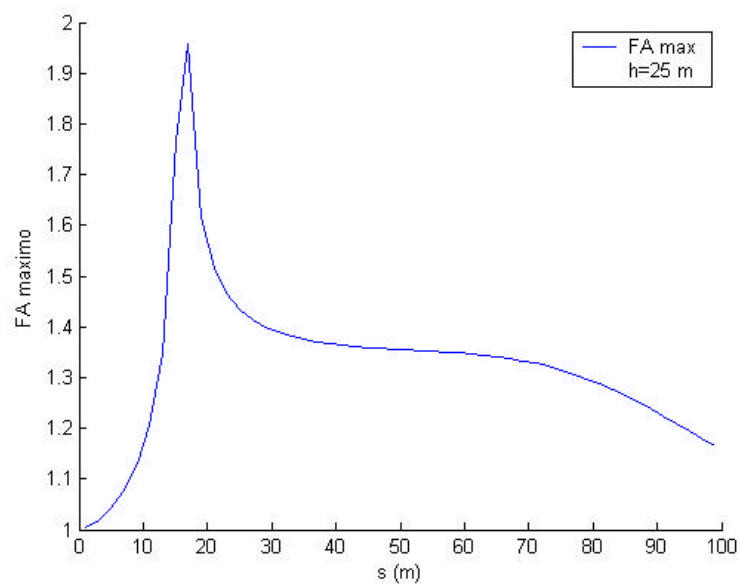


Figura 3.10 Factor de reducción máximo al variar s

Si ahora barremos h desde 5 m desde el suelo hasta 10 metros por encima de la línea:

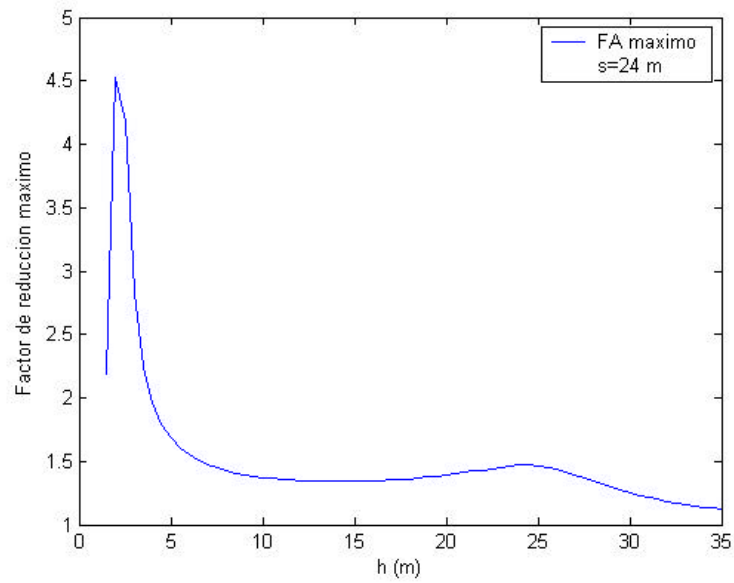


Figura 3.11 Variación del factor de reducción con h

Sin embargo, parece lógico eliminar del gráfico aquellos valores cuya altura sea menor a una altura determinada, ya que habrá que respetar una distancia mínima al terreno. Así, tomando 5 metros como distancia mínima típica se obtiene la gráfica 3.12.

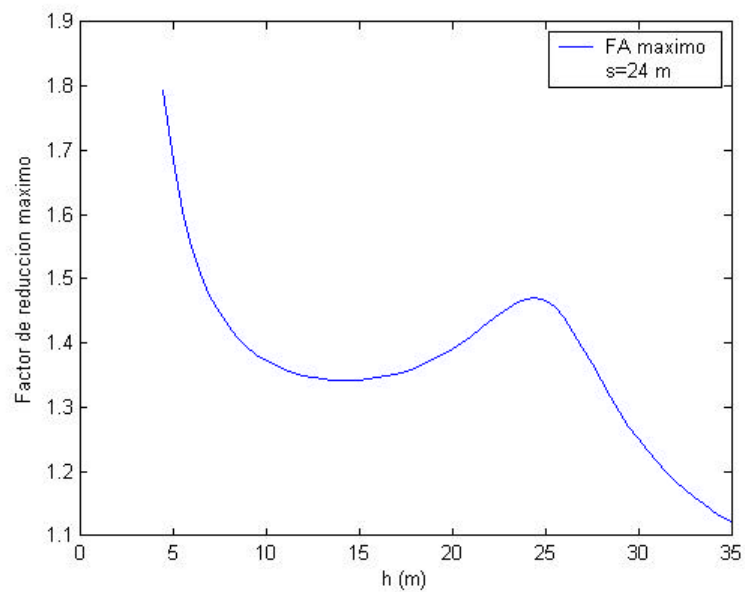


Figura 3.12 Variación del factor de reducción con h .

Aún se puede dar un paso más: si hacemos un barrido de ambos parámetros a la vez y hacemos una representación en 3-D del resultado, obtendremos una visión de cuál puede ser la mejor combinación de factores para conseguir el máximo factor de amortiguamiento. Por ahora no consideraremos compensación.

Así, para la configuración anterior se barre s desde 1 m hasta 20 metros más del ancho de la línea, y h del lazo desde 5 m del suelo hasta 10 metros por encima de la fase. Se ha utilizado unos conductores de fase situados en $(-8.5, 25)$, $(0, 25)$ y $(8.5, 25)$, por los que se han supuesto unas intensidades de $500(120^\circ)$, $500(0^\circ)$ y $500(240^\circ)$ A, rms.

Según la figura 3.13, la combinación de parámetros que proporciona el valor más alto de atenuación máxima se da aproximadamente cuando la separación del lazo es de unos 17 metros y la altura del mismo aproximadamente la misma que la línea (~ 25 m).

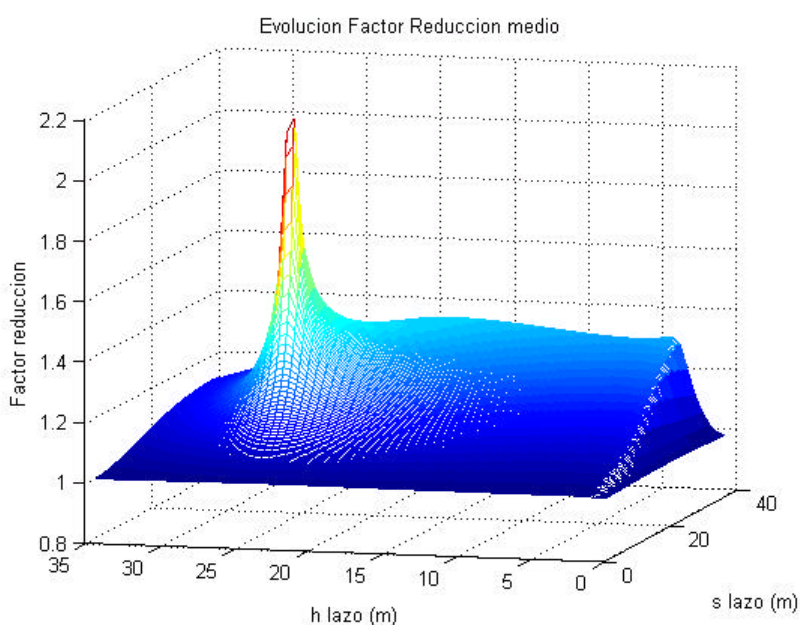


Figura 3.13 Variación del factor de reducción medio con s y h , línea horizontal.

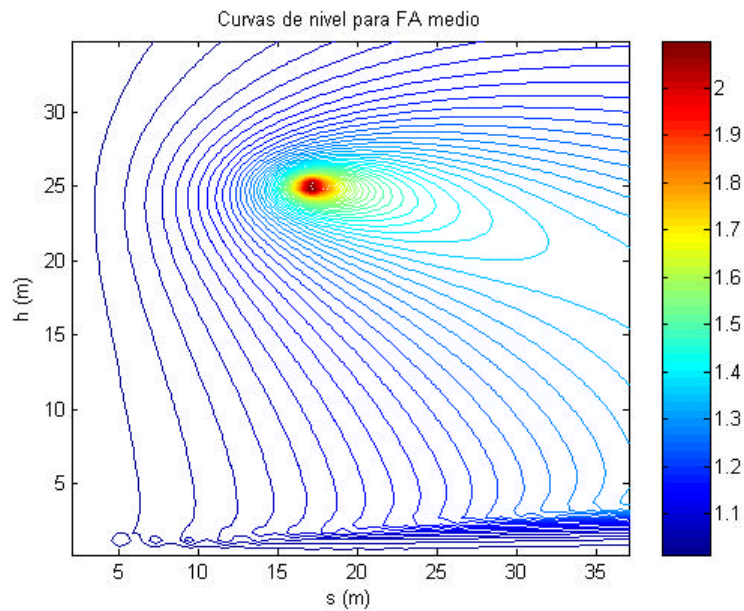


Figura 3.14 Representación en curvas de nivel.

Vemos como el máximo factor medio se consigue cuando los conductores del lazo tienden a ocupar las posiciones de los conductores exteriores de la línea, situación obviamente inviable en la realidad.

Si ahora resolvemos el mismo problema anterior, pero sustituyendo el lazo horizontal por otro cuyos conductores están en vertical, nos encontramos con la situación de la figura 3.15:

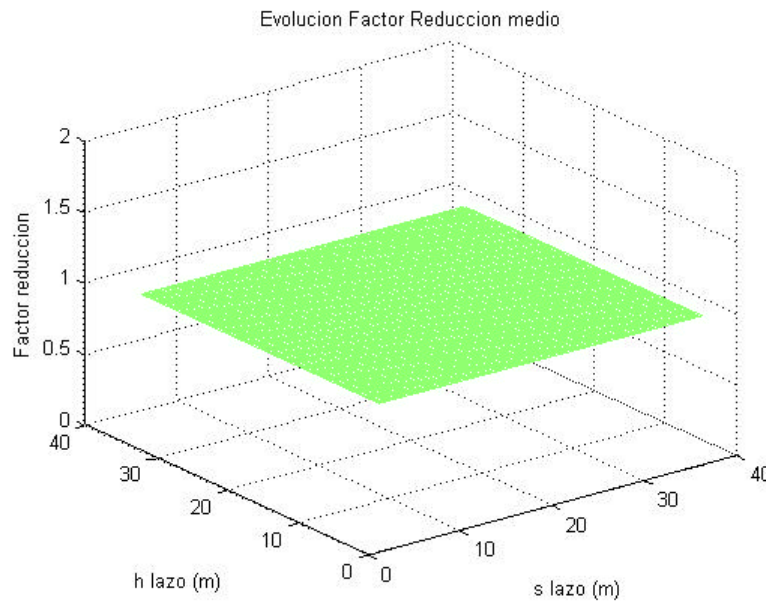


Figura 3.15 Variación del factor de reducción medio con s y h, línea horizontal

Vemos que la introducción del lazo no ha servido absolutamente para nada. Esto nos hace replantearnos la filosofía de colocación del lazo, puesto que vemos que si tratamos de replicar la forma y simetría (de haberla) de la línea, obtenemos un resultado más que aceptable, mientras que si nos vamos al extremo opuesto (ejemplo de línea horizontal y lazo vertical) el resultado es nefasto.

Por tanto, parece lógico pensar que los lazos pasivos óptimos, en general, vendrán definidos por una geometría similar a la de la línea cuyo campo mitigan.

Para el caso de línea trifásica vertical, con fases situadas en (0,15), (0,20) y (0,25), se recorre la coordenada x desde -50 a +50, y para cada uno de los valores haremos variar la separación de los conductores del lazo entre 0 y 40 metros. Nótese

que al ser ahora vertical el lazo, ahora la separación entre conductores se mide en vertical.

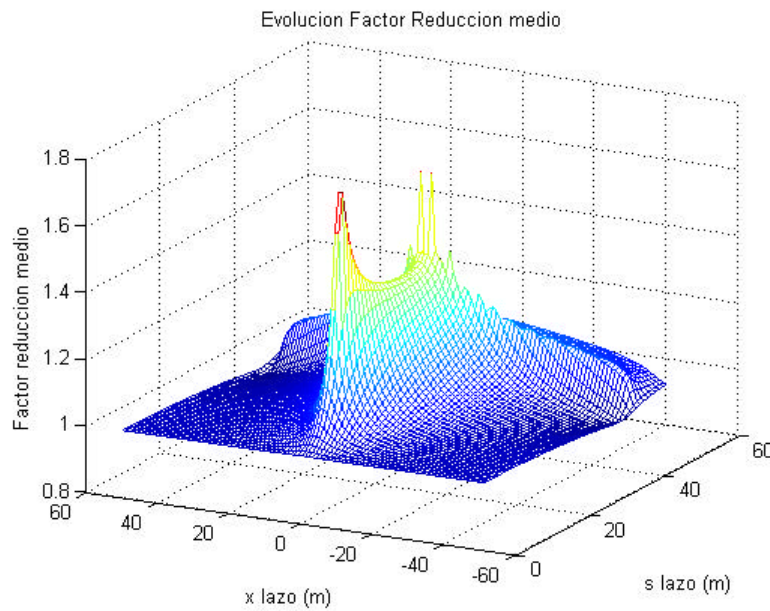


Figura 3.16 Variación del Factor de Reducción medio con x y s .

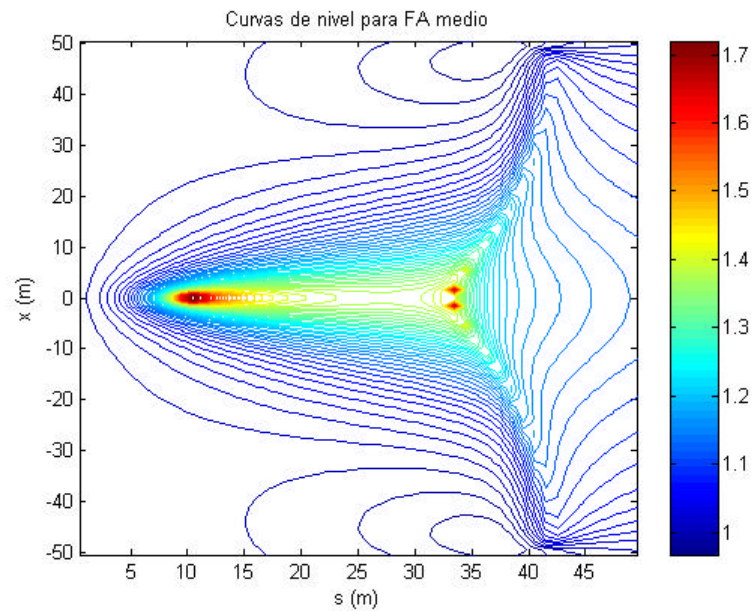


Figura 3.17 Representación en curvas de nivel.

Vemos como en este caso de línea vertical la distribución óptima, al igual que para el caso de línea horizontal, se produce cuando el lazo se sitúa en el mismo plano que las fases de la línea.

Sin embargo, obtenemos otro pico de alto factor de reducción cuando la separación entre conductores del lazo se acerca a los 35 metros.

Por último, para terminar con el análisis del lazo simple, vamos a estudiar qué ocurre con una línea en tresbolillo; el criterio para localizar las fases de esta línea es el mismo que se ha venido manejando en este proyecto: que la distancia entre fases sea siempre constante. Así, se han tomado las fases en (0,20), (0,26) y (5.2,23), por las que circulará unas intensidades 500(120°), 500(0°) y 500(240°) respectivamente.

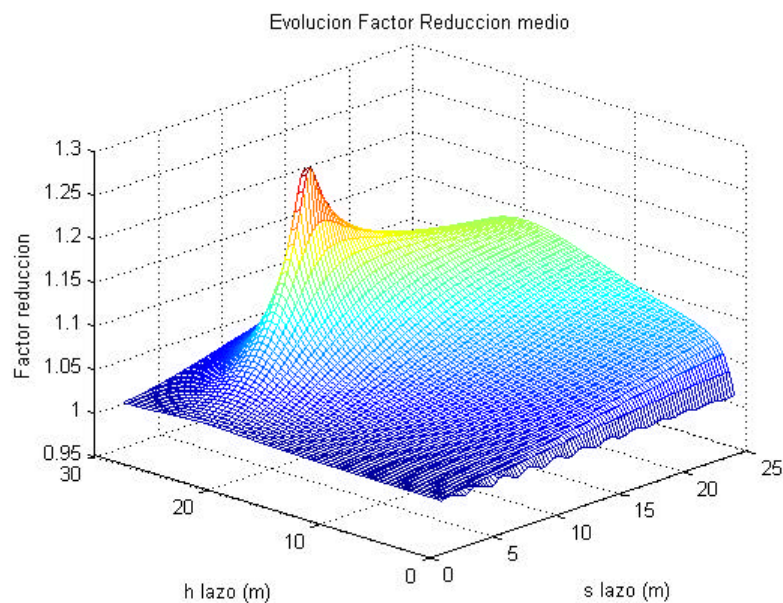


Figura 3.18 Variación del Factor de Reducción medio con h y s.

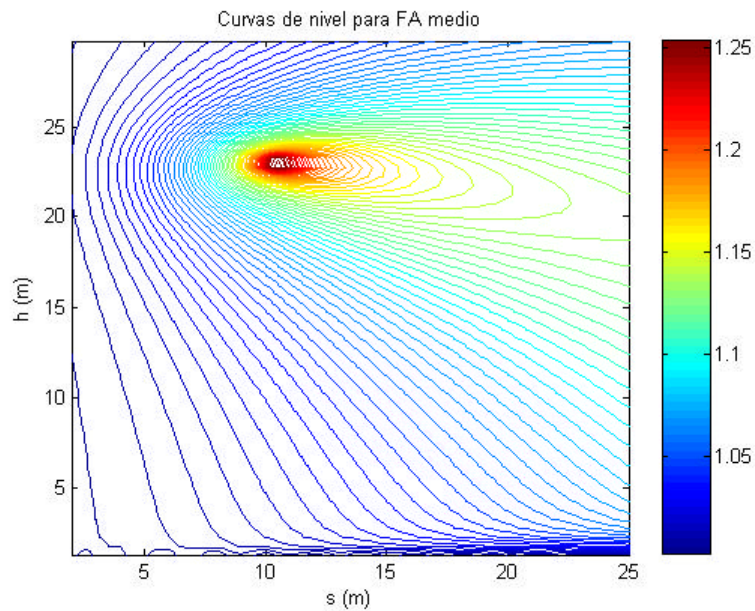


Figura 3.19 Representación en curvas de nivel.

En esta ocasión la mejor combinación de factores se da en el entorno del punto $(s,h)=(11,23)$. En estos casos en que la simetría no es total (como ocurría en los casos de línea horizontal o vertical) es posible que pueda mejorarse algo la solución si permitimos que el lazo no sea totalmente simétrico. Así, vamos a realizar un barrido asimétrico, más ceñido al punto donde parece estar la situación óptima, y por tanto permitiendo que la coordenada x de cada conductor del lazo varíe independientemente de la otra.

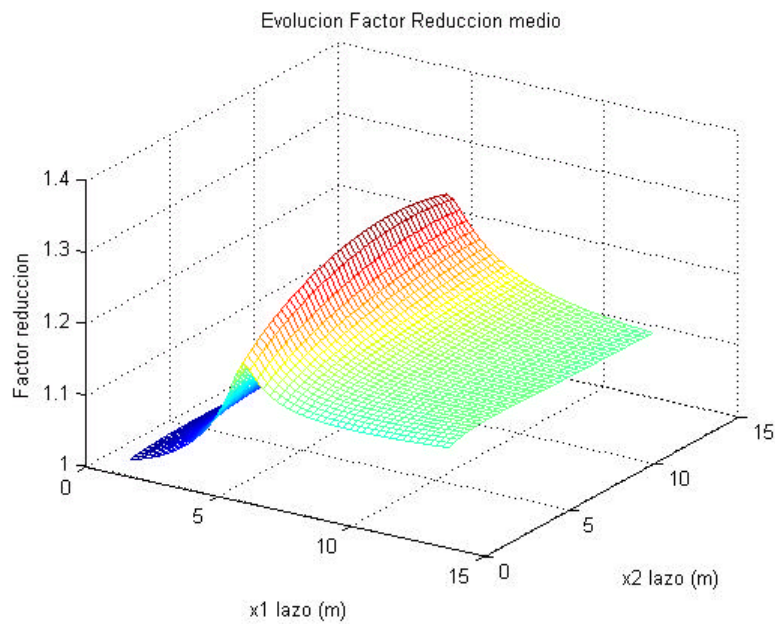


Figura 3.20 Variación del Factor de Reducción medio con x y s .

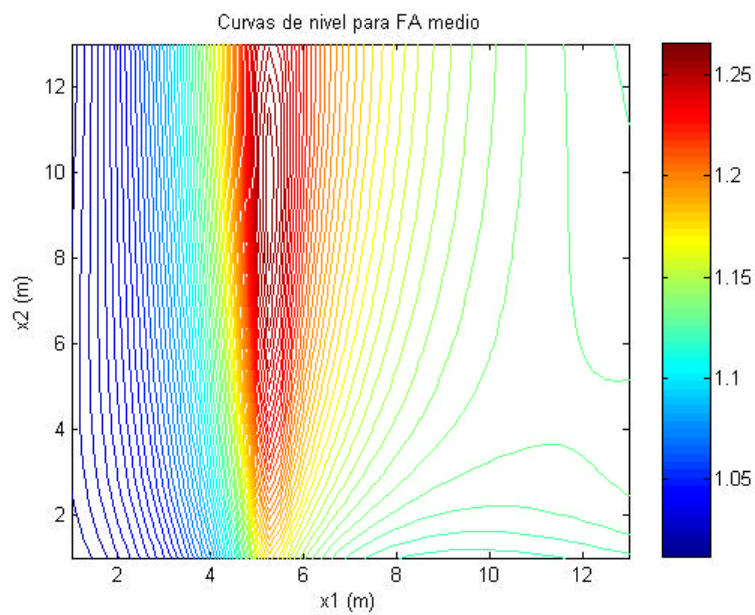


Figura 3.21 Representación en curvas de nivel.

Se puede apreciar como no influyen de igual manera las variaciones de la coordenada x de los dos conductores que forman el lazo, ya que de ser así la figura tendría cierta simetría esférica o cónica. De las dos coordenadas x , la que más afecta es

la que corresponde al conductor del lazo que se encuentra en el lado donde está el conductor de fase que no está en vertical con los demás.

A la vista de las gráficas anteriores, se pueden extraer dos conclusiones que pueden ser útiles a la hora de plantear un proceso de optimización de lazos pasivos:

- Parece existir una tendencia a que si exista simetría en la línea, también exista en el lazo. En concreto, para líneas horizontales y verticales el óptimo se obtiene en el mismo plano de la línea, con la separación mínima que permitan las restricciones del caso concreto que se trate.
- En los casos en que no hay simetría total de la línea, el lazo simple óptimo puede mejorarse respecto de la solución simétrica si se deja variar independientemente las coordenadas de sus conductores.

Queremos insistir en que alrededor de las fases existe una zona prohibida para los lazos (en general para cualquier objeto). Sin embargo ello no resta validez a los resultados obtenidos, ya que basta con eliminar de las gráficas la zona en que no se permita la colocación de los lazos, y buscar entre las combinaciones restantes el óptimo.

Además, estas conclusiones se han obtenido para lazos simples. Habría que estudiar con más detalle qué ocurre con lazos dobles (tanto con conductor común como sin él) y ver si este mismo comportamiento se puede generalizar.

Por último, vamos a presentar gráficamente el efecto de la compensación en el factor de reducción medio. Para ello lo aplicaremos al caso estudiado inicialmente de línea horizontal con lazo simple pasivo coplanario con ella. Así, reproduciendo en la figura 3.22 la figura 3.13 y comparándola con la obtenida al aplicar al lazo un factor de compensación de 0,6 p.u.(figura 3.23):

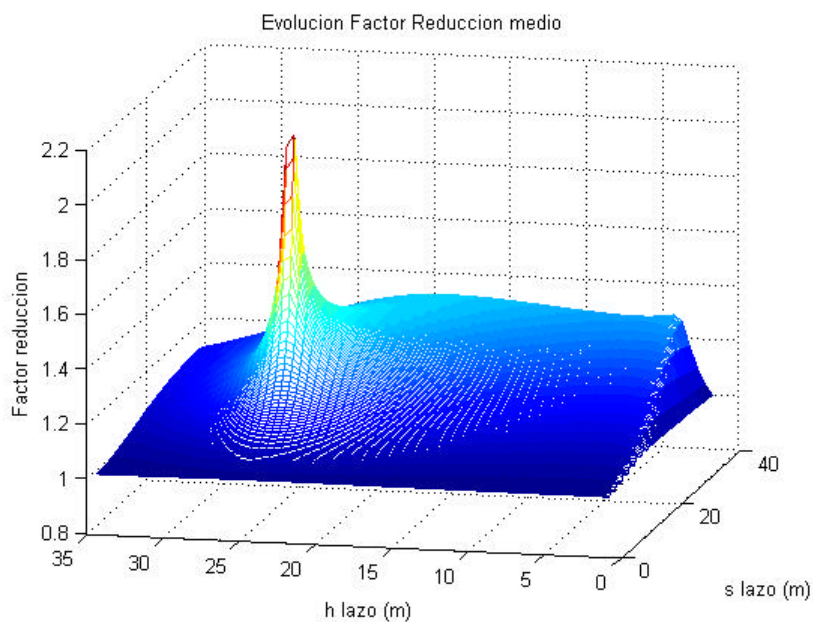


Figura 3.22 Variación del factor de reducción medio con s y h , sin compensar.

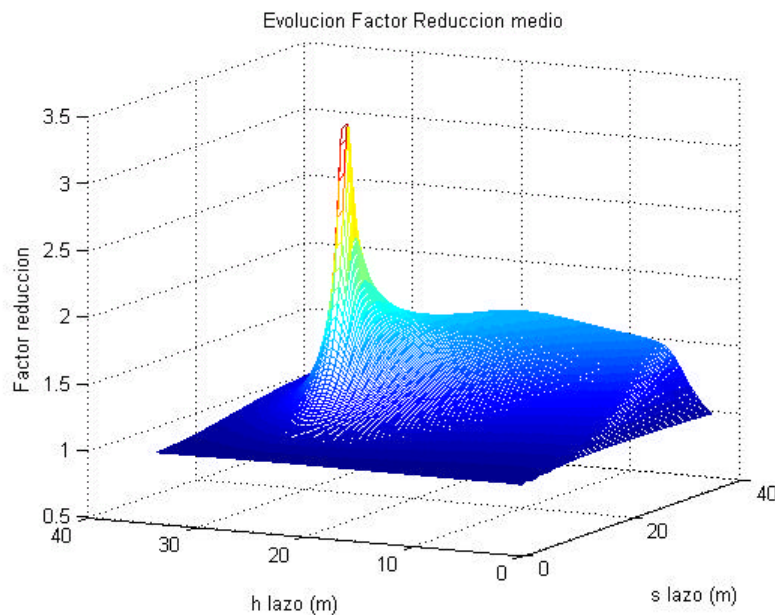


Figura 3.23 Variación del factor de reducción medio con s y h , compensado.

Vemos como claramente la compensación presenta un comportamiento netamente más favorable para la mitigación, no tanto porque la zona en que el lazo mejora su comportamiento sea más extensa, sino porque en la que ya era aceptable, ahora es aún mejor.

Por tanto, se puede concluir que, aunque existen mecanismos para mejorar el comportamiento de un lazo pasivo (compensación), a la hora de buscar un óptimo comportamiento y atenuación la decisión más crítica es la disposición de los conductores.

A continuación mostramos las gráficas obtenidas realizando los barridos paramétricos para los casos de lazo doble con conductor común:

Si tomamos una línea horizontal en $(-8.5, 25)$, $(0, 25)$ y $(8.5, 25)$ con intensidades de $500(120^\circ)$, $500(0^\circ)$ y $500(240^\circ)$ respectivamente:

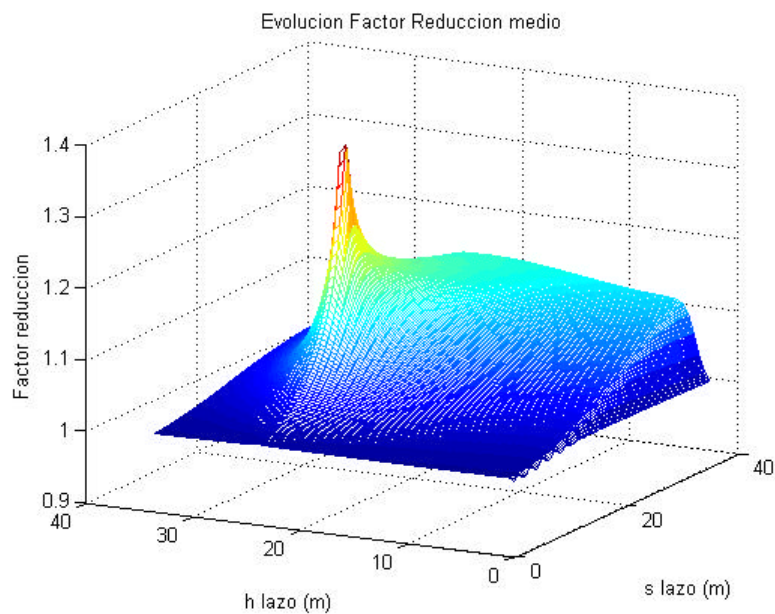
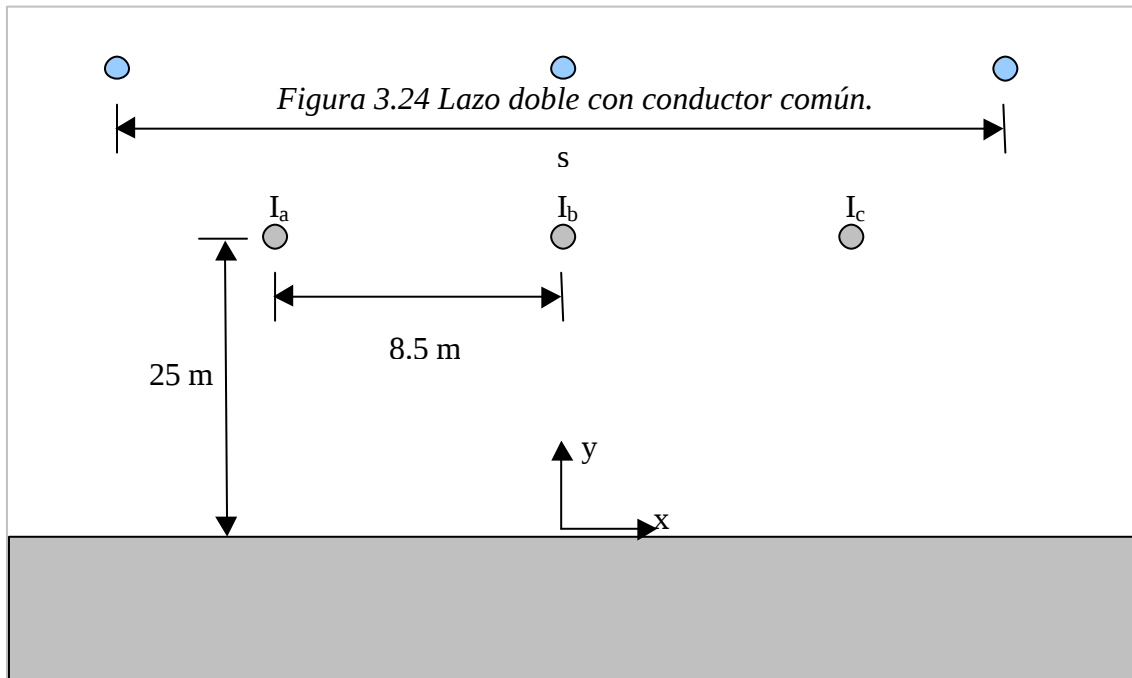


Figura 3.25 Variación factor de reducción medio, lazo doble con conductor común.

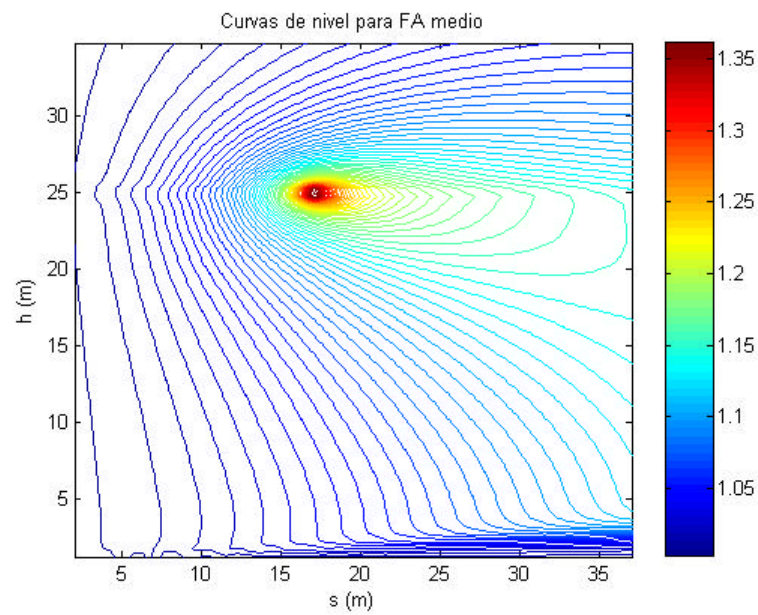


Figura 3.26 Representación en curvas de nivel.

Si la línea es vertical se tiene:

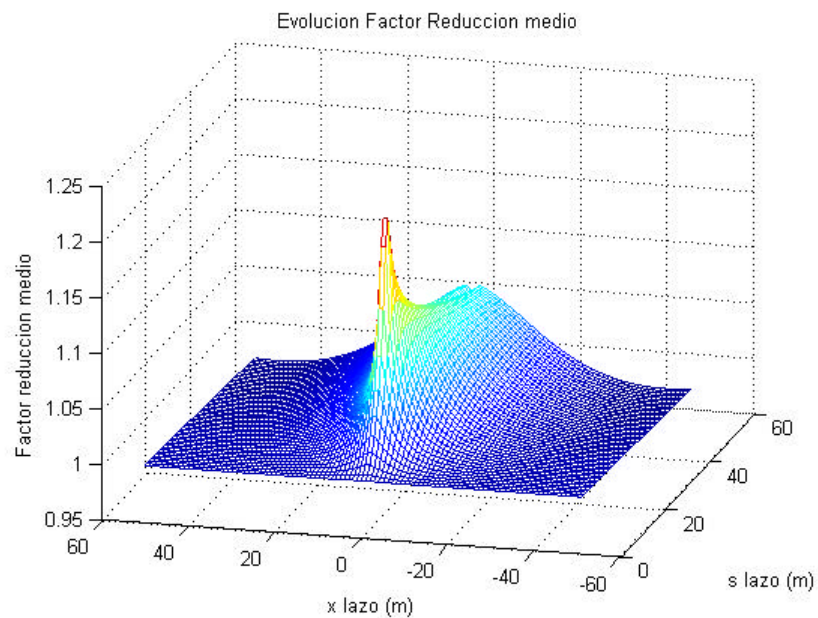


Figura 3.27 Variación factor de reducción medio, lazo doble sin conductor común.

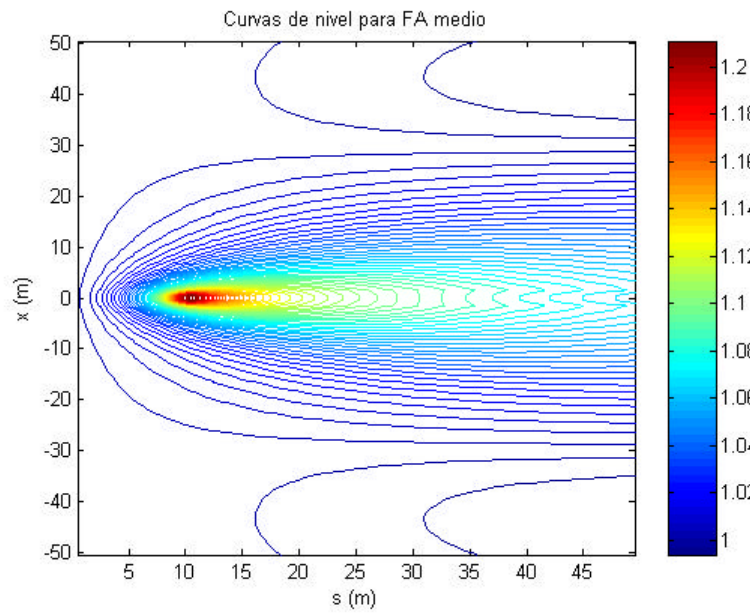


Figura 3.28 Representación en curvas de nivel.

Finalmente, para una línea tresbolillo, con fases en $(-5,25)$, $(5,25)$ y $(0,33.66)$:

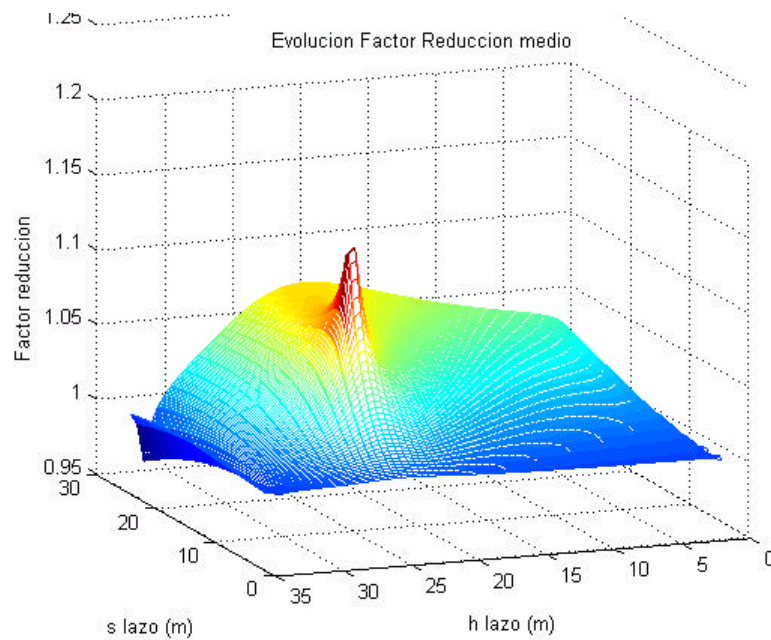


Figura 3.29 Variación factor de reducción medio, lazo doble con conductor común.

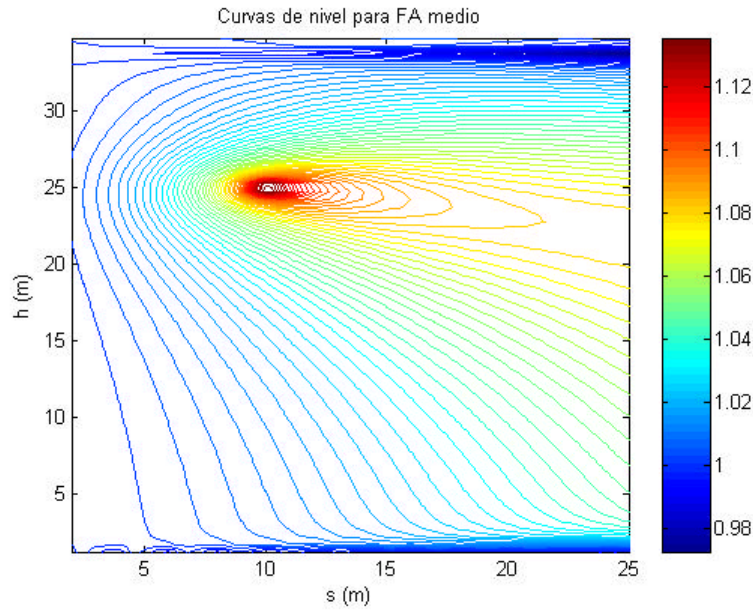


Figura 3.30 Representación en curvas de nivel.

Todo lo visto para las configuraciones analizadas sugiere que, en el caso de que sea necesario optimizar la posición de un lazo, puede no ser necesario analizar todas y cada una de las posibilidades; claramente se aprecia que existen unas zonas en el espacio, dependientes de la geometría de la línea generadora de campo magnético, en las que se dan los mayores factores de reducción.

Sin embargo, queda abierta una incógnita: hasta ahora cuando se han hecho los barridos de parámetros hemos trabajado con factores de reducción medios. Salta a la vista de cualquier mente medianamente ágil que no es suficiente criterio el escoger aquella combinación de factores geométricos que proporcionan un factor de reducción medio mayor, puesto que pueden darse casos de distribuciones muy heterogéneas, en las que se obtiene un rendimiento magnífico en un punto y desastroso en el resto, situación que se ve enmascarada si se emplea tan sólo el criterio de máximo valor medio.

De igual manera, los lazos dobles se han considerado simétricos en general (aunque en el caso de conductor común se varió asimétricamente la geometría de manera local), por lo que habría que hacer un estudio más general en el que se permitiera (y analizara) configuraciones no simétricas en un lazo.

Se propone completar el criterio empleado en este desarrollo teórico, de manera que se obtenga un criterio que no sólo tenga en cuenta el valor medio, sino que penalice de alguna manera la poca suavidad (o, en otras palabras, la alta desviación típica) de los valores de la curva de factor de reducción.

Capítulo 4. Diseño de lazos activos

4.1 Introducción

En el capítulo anterior vimos cómo los lazos pasivos nos permitían amortiguar el campo magnético con bastante efectividad, ya que se conseguían reducciones del 40% del campo original, llegando a picos de hasta el 50%, según la tipología de fases y lazo, y al empleo o no de compensación.

Así mismo, al final se vio que las mejores disposiciones estaban alrededor de ciertos valores de separación (s) y altura del lazo (h_{lazo}), y que los mejores valores medios de factor de reducción se producían en zonas que no eran independientes de la geometría de la línea generadora. Además la reducción, aunque variaba con la distancia transversal a la línea, poseía cierta homogeneidad que hacía que el efecto fuese apreciable hasta en distancias transversales del orden de 50 y 100 metros.

En este capítulo se van a introducir los lazos activos, que son aquellos a los que se les inyecta una intensidad independiente de influencias ajenas al lazo. Al igual que para lazos pasivos, debemos guiarnos por un criterio que nos permita determinar la intensidad óptima a inyectar. En este proyecto se seguirá a Cruz [1], y se tomará como criterio que el campo se minimice en un punto.

Al igual que en el capítulo anterior, se supondrá que el campo magnético generado por los lazos (activos en este caso) no va a afectar a la intensidad de la línea.

Nuestro problema se puede enunciar, por tanto, como:

Dado un punto (x_p, y_p) donde se quiere minimizar un campo magnético existente, y un lazo activo, con sus conductores situados en las posiciones (x_1, y_1) y (x_2, y_2) , determinar las componentes real $\text{Re}[\mathbf{I}]$ e imaginaria $\text{Im}[\mathbf{I}]$ de intensidad a inyectar en el lazo, de manera que se haga mínimo.

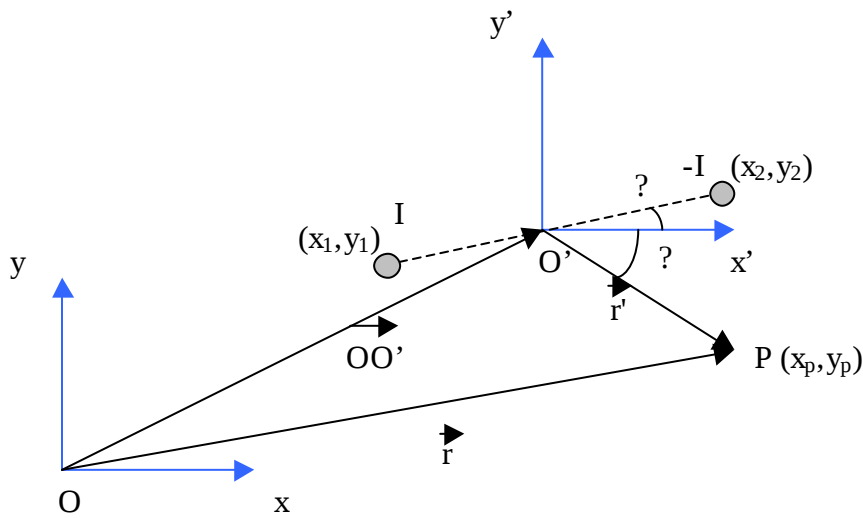


Figura 4.1 Geometría del problema del cálculo de un lazo activo simple

Como se puede observar en la figura, en principio tendríamos que trabajar con dos sistemas de coordenadas (locales y globales); en realidad no supone ninguna complicación adicional al cálculo, ya que tan sólo se trata de una traslación. Las coordenadas referidas al sistema de referencia local irán acompañadas de un apóstrofo (x', y') , mientras que las globales no lo llevarán (x, y) .

A continuación, y basándonos en el desarrollo que se realiza en Cruz [1], obtendremos la expresión de la intensidad a inyectar en un lazo simple definido por las

coordenadas globales de sus conductores, conociendo el punto (x_p, y_p) en el que se quiere minimizar el campo creado por líneas existentes.

Las componentes de dicha intensidad a inyectar se van a calcular en función de las coordenadas globales (x, y) :

$$\text{Re}[I] = \frac{-b_x \text{Re}\left[\vec{B}_P\right]_x - b_y \text{Re}\left[\vec{B}_P\right]_y}{b_x^2 + b_y^2} \quad (4.1)$$

$$\text{Im}[I] = \frac{-b_x \text{Im}\left[\vec{B}_P\right]_x - b_y \text{Im}\left[\vec{B}_P\right]_y}{b_x^2 + b_y^2} \quad (4.2)$$

donde:

$$b_x = \left[\vec{B}_l(\mathbf{I} = 1^{\angle 0}) \right]_x = \frac{m_0}{2p} \frac{s}{\left(r^2 + \frac{s^2}{4} \right) - r^2 s^2 \cos^2(q - y)} \left(r^2 \sin(2q - y) - \frac{s^2}{4} \sin y \right) \quad (4.3)$$

$$b_y = \left[\vec{B}_l(\mathbf{I} = 1^{\angle 0}) \right]_y = \frac{m_0}{2p} \frac{s}{\left(r^2 + \frac{s^2}{4} \right) - r^2 s^2 \cos^2(q - y)} \left(r^2 \cos(2q - y) - \frac{s^2}{4} \cos y \right) \quad (4.4)$$

$$s = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned}\vec{r}' &= \vec{r} - \vec{OO'} = \left(x_p - \frac{x_1 + x_2}{2}, y_p - \frac{y_1 - y_2}{2} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow \left| \vec{r}' \right|^2 &= \left(x_p - \frac{x_1 + x_2}{2} \right)^2 + \left(y_p - \frac{y_1 - y_2}{2} \right)^2\end{aligned}\quad (4.6)$$

$$q = \arctg\left(\frac{y'_p}{x'_p}\right) = \arctg\left(\frac{y_p - \frac{y_1 + y_2}{2}}{x_p - \frac{x_1 + x_2}{2}}\right)\quad (4.7)$$

$$\Psi = \arctg\left(\frac{y'_2}{x'_2}\right) = \arctg\left(\frac{y_2 - \frac{y_1 + y_2}{2}}{x_2 - \frac{x_1 + x_2}{2}}\right) = \arctg\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)\quad (4.8)$$

$\left[\vec{B}_p \right]_x$ y $\left[\vec{B}_p \right]_y$ son las componentes del campo creado por la línea en el punto

donde se quiere minimizar. En general serán magnitudes complejas. Su cálculo se realiza como se desarrolló en el capítulo 2.

El desarrollo anterior puede simplificarse, ya que en este proyecto la geometría de los lazos se define por las coordenadas de sus conductores. Por tanto, el cálculo de b_x y b_y puede simplificarse, considerando que los conductores del lazo se encuentran en (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , y el punto en el que se quiere minimizar el campo está dado por (x_p, y_p) .

Así, haciendo los cálculos según la expresión del campo magnético visto en el capítulo 2, las componentes del campo creado por el lazo vendrán dadas por:

$$B_{xr,lazo} = \frac{m_0 I}{2p} \left[\frac{y_P - y_1}{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_1)^2} \cos q + \frac{y_P - y_2}{(x_P - x_2)^2 + (y_P - y_2)^2} \cos(p + q) \right] \quad (4.9)$$

$$B_{xi,lazo} = \frac{m_0 I}{2p} \left[\frac{y_P - y_1}{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_1)^2} \sin q + \frac{y_P - y_2}{(x_P - x_2)^2 + (y_P - y_2)^2} \sin(p + q) \right] \quad (4.10)$$

$$B_{yr,lazo} = \frac{m_0 I}{2p} \left[\frac{x_P - x_1}{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_1)^2} \cos q + \frac{x_P - x_2}{(x_P - x_2)^2 + (y_P - y_2)^2} \cos(p + q) \right] \quad (4.11)$$

$$B_{yr,lazo} = \frac{m_0 I}{2p} \left[\frac{x_P - x_1}{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_1)^2} \sin q + \frac{x_P - x_2}{(x_P - x_2)^2 + (y_P - y_2)^2} \sin(p + q) \right] \quad (4.12)$$

Para el cálculo de b_x y b_y se supone que la intensidad que circula por el lazo activo es $I=1\angle 0$, luego las expresiones (4.9) a (4.12) se simplifican ($I=1$, $\theta=0$), y quedan:

$$B_{xr,lazo} = \frac{m_0}{2p} \left[\frac{y_P - y_1}{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_1)^2} - \frac{y_P - y_2}{(x_P - x_2)^2 + (y_P - y_2)^2} \right] \quad (4.13)$$

$$B_{xi,lazo} = 0 \quad (4.14)$$

$$B_{yr,lazo} = \frac{m_0}{2p} \left[\frac{x_P - x_1}{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_1)^2} - \frac{x_P - x_2}{(x_P - x_2)^2 + (y_P - y_2)^2} \right] \quad (4.15)$$

$$B_{yr,lazo} = 0 \quad (4.16)$$

Por tanto:

$$\begin{aligned}
b_x &= \left[\vec{B}_I (\mathbf{I} = 1 \angle 0) \right]_x = B_{xr, \text{lazo}} + j \cdot B_{xi, \text{lazo}} = \\
&= \frac{m_0}{2p} \left[\frac{y_P - y_1}{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_1)^2} - \frac{y_P - y_2}{(x_P - x_2)^2 + (y_P - y_2)^2} \right]
\end{aligned} \tag{4.17}$$

$$\begin{aligned}
b_y &= \left[\vec{B}_I (\mathbf{I} = 1 \angle 0) \right]_y = B_{yr, \text{lazo}} + j \cdot B_{yi, \text{lazo}} = \\
&= \frac{m_0}{2p} \left[\frac{x_P - x_1}{(x_P - x_1)^2 + (y_P - y_1)^2} - \frac{x_P - x_2}{(x_P - x_2)^2 + (y_P - y_2)^2} \right]
\end{aligned} \tag{4.18}$$

Las expresiones que nos proporcionan las componentes real e imaginaria de la intensidad óptima a inyectar en el lazo se obtienen sin más que sustituir (4.17) y (4.18) en (4.1) y (4.2).

Se ha obtenido una expresión de intensidad óptima para el caso de un lazo activo simple. Si fuese necesario optimizar un lazo doble, con o sin conductor común, el proceso se haría en dos pasos:

1. Se descompone el lazo doble en dos lazos simples, teniendo en cuenta las ecuaciones apropiadas para ello.
2. Se calcula la intensidad por el método descrito anteriormente para cada uno de los lazos.
3. El campo resultante se obtiene aplicando el principio de superposición.

Capítulo 5. Resolución del problema con Mitloop

Una vez establecida la base teórica sobre la que se sustenta el modelo, el siguiente paso es realizar su implementación. En este proyecto se ha realizado en dos partes: la referente a presentación e interacción con el usuario se ha realizado con Visual Basic 6 y prácticamente todo lo referente a cálculos con Matlab 6.5 Release 13.

En cuanto a la parte de Visual Basic, se han definido una serie de formularios que se encargan de recoger la información que el usuario proporciona, así como de realizar la validación de la misma. A continuación se hace una descripción de la función de cada uno de ellos, por orden alfabético:

- **‘About.frm’**

Contiene información sobre el autor del programa. Es tan sólo un formulario informativo.

- **‘Configura.frm’**

Desde este formulario podemos cambiar las opciones de configuración del programa.

- **‘Espere.frm’**

Su misión es mostrar un mensaje mientras MitLoop realiza los cálculos antes de escribir el informe en Excel.

- **‘Form2condhoriz’**

Se utiliza para que el usuario cree/modifique las fases dúplex horizontales.

- **‘Form2condvert’**

Ídem que el anterior para dúplex verticales.

- **‘Form3cond1’**

Este se utiliza para crear/modificar fases tríplex tipo I (un conductor abajo, dos arriba).

- **‘Form3cond2’**

Ídem que el anterior para fases tríplex II (un conductor arriba, dos abajo).

- **‘Form4cond’**

Este formulario se utiliza para crear/editar fases cuádruplex.

- **‘FormCampo’**

En este formulario se recoge la información necesaria para generar las gráficas y/o el informe en Excel: lazo a usar (en caso de que haya al menos uno definido), altura de cálculo del campo, etc.

- **‘FormConductor’**

Cuando sea necesario crear/editar una fase símplex, se utilizará este formulario.

- **‘FormLazoPasivo’**

Ídem que el anterior, pero para lazos pasivos. En este formulario se definen todos los parámetros geométricos, eléctricos y de cualquier otro tipo que se necesita para definir completamente un lazo pasivo.

- **‘FormLazoActivo’**

Al igual que para lazos pasivos, aquí se recogen todos los parámetros necesarios para definir un lazo activo.

- **‘FormLineaHorizontal’**

En este formulario se define una restricción de altura.

- **‘FormObstaculoNormal’**

Se utiliza para crear/editar obstáculos normales.

- **‘FormObstaculoElevado’**

En este formulario podemos crear/editar obstáculos cuya área prohibida esté apoyada en el suelo.

- **‘FormObstaculoElevadoI’**

En este otro se crean/editan obstáculos cuya área prohibida no esté apoyada en el suelo.

- **‘FormPropiedades’**

A través de este formulario se establecen/modifican las propiedades generales del proyecto (autor, fecha y descripción).

- **‘Login’**

Este formulario se llama al iniciar MitLoop y permite elegir el perfil de usuario, así como crear/modificar uno existente.

- **‘Presentación’**

Este formulario tan sólo funciona como pantalla de bienvenida de MitLoop, y permite escoger el idioma en que se desea el interfaz.

- **‘Principal’**

Este formulario es el principal del programa. Desde él se va llamando al resto de formularios así como a los procedimientos (descritos más adelante) necesarios durante la ejecución.

- **‘SelConductor’**

Cuando el usuario añade un lazo, se abre esta ventana para permitirle elegir el conductor que formará el lazo. También se utiliza cuando el usuario quiere cambiar el conductor actual de un lazo.

- **‘SelPoste’**

Este formulario se abrirá cuando el usuario esté creando un nuevo lazo, o bien cuando quiera cambiar el poste asignado a un lazo ya existente.

- **‘SelLazo’**

Con este formulario, una vez escogidos conductor y poste, se elige la geometría general del poste, para a continuación abrir el formulario adecuado con las casillas habilitadas o deshabilitadas según haya elegido el usuario.

Cada vez que se crea o se edita un lazo, fase u obstáculo, se validan los datos introducidos por el usuario. Se comprueba que no haya casillas necesarias vacías, que los valores introducidos sean valores numéricos válidos, y que no vayan en contra del sentido común.

Por otro lado, aún en la parte de Visual Basic, se han elaborado una serie de procedimientos agrupados en tres módulos, que realizan gran parte de las funciones del programa. Éstos son:

- “module1”: contiene los procedimientos de creación y gestión de fases, obstáculos y lazos, así como el código necesario para su borrado.
- “Campo”: en él se han agrupado todos aquellos procedimientos que intervienen en el cálculo del campo. Esta contribución es indirecta, ya que los cálculos en sí los realiza un fichero ejecutable externo, creado a partir de un fichero .m de Matlab, compilado y linkado utilizando la herramienta Matlab Compiler 3.00.

Los procedimientos contenidos en este módulo se encargan de escribir los ficheros necesarios para poder realizar el cálculo del campo magnético, y también de recoger la información que devuelve dicho ejecutable.

- “GenerarInforme” contiene todo el código necesario para generar un informe en Excel del proyecto con que se esté trabajando en MitLoop. Para una descripción con mayor detalle de dicho proceso se puede consultar el apartado 5.6.

5.1 Estructura de instalación del programa

5.1.1 Descripción

Cuando instalamos MitLoop en un equipo, se crean varias carpetas dentro de la localización elegida:

- Carpeta “perfiles”: En ella se almacenan los ficheros que contienen la configuración del programa preferida por cada usuario. Son ficheros de texto plano (extensión .txt), y su contenido es el valor de las variables que se recogen en la ventana configuración del programa. Todos los detalles se recogen en el apartado 5.4.
- Carpeta “database”: En ella se encuentran los ficheros de texto que se pueden utilizar en MitLoop para seleccionar los conductores y apoyos de los lazos. Por defecto MitLoop incorpora un archivo de texto con una serie de conductores (“conductores.txt”) y otro con postes (“postes.txt”). En el apartado 5.1.2 se definen los parámetros que existen en cada fichero, así como sus unidades.

Es posible ampliar esta biblioteca con todos los archivos que se quieran, tan sólo han de respetarse el orden de los parámetros y sus unidades.

- Carpeta “calculos”: En ella se encuentran localizados los archivos ejecutables y auxiliares necesarios para el cálculo del campo magnético, generado tanto por las líneas como por lazos. Cabe destacar que en esta carpeta, cada vez que se vaya a crear un archivo, se comprobará si existe otro del mismo nombre (independientemente de que sea de la sesión de trabajo actual o de una anterior) y en caso afirmativo, se borra. Esto se hace para evitar posibles interferencias entre proyectos.

En concreto podemos encontrar tres ficheros ejecutables: *Iactiva.exe*, *micampo.exe* y *micamponograficas.exe*

‘Iactiva.exe’: se utiliza cuando, al crear un nuevo lazo activo o editar uno ya existente, se desea que el programa calcule la intensidad a inyectar en el lazo activo, conocida la geometría de la línea y la posición del lazo, con el objetivo de minimizar el campo en un punto que el usuario debe indicar.

Previamente a la llamada al ejecutable *Iactiva*, se crean en la carpeta los archivos de texto que contienen la información necesaria para dichos cálculos:

- o En primer lugar se crea el archivo “fases.txt”, que contiene en cada línea una de las fases equivalentes presentes en las líneas del proyecto, calculadas tal y como se especificó en el capítulo 2.

La sintaxis de una línea de este archivo es:

`"xi;yi;intensidad;desfase"`

x_i e y_i representan la posición de la fase equivalente.

intensidad es la intensidad de fase que circula.

desfase es el desfase de la intensidad, expresado en grados.

- o En segundo lugar se crea el archivo "punto.txt", en el que simplemente se guardan la coordenada x e y del punto donde se quiere minimizar le campo, expresadas en metros y separadas por el símbolo ";", para evitar problemas con el símbolo utilizado para expresar la parte decimal de un número ("," en algunos sistemas y "." en otros)
- o En tercer lugar se crea el archivo que contendrá los datos del lazo activo del que se quiere conocer la intensidad a inyectar. Según el tipo de lazo de que se trate, la sintaxis es:

Lazo simple: `"2;x1;y1;x2;y2;"`

Lazo doble 3 conductores: `"3;x1;y1;x2;y2;x3;y3;"`

Lazo doble 4 conductores: `"4;x1;y1;x2;y2;x3;y3;x4;y4;"`

Como se puede apreciar, en este fichero tan sólo se guarda el número de conductores que forman el lazo, junto con las coordenadas de los conductores que lo forman.

- o Finalmente se crea el archivo de texto “path.txt”, en el que almacenaremos el path donde se desea que la función de Matlab nos devuelva el resultado.

Una vez tenemos los datos escritos en fichero de texto, se llama al ejecutable que calculará la intensidad óptima (o intensidades); a partir de ese momento MitLoop esperará hasta recibir la solución del ejecutable de cálculo de intensidad, que consistirá en:

- o En el caso de que el lazo que se haya calculado sea simple, sólo escribirá un fichero de texto que se llamará “Ioptima1.txt”, en el que se encuentra la intensidad óptima calculada según los datos que se le hayan pasado. El formato en que se graba dicho fichero es “|I|;desfase”.
- o Si el lazo resulta ser doble, se devuelven dos fichero de texto: “Ioptima1.txt” e “Ioptima2.txt”. Cada uno de ellos contiene la intensidad óptima calculada para los dos lazos simples en que podemos descomponer un lazo doble, tal y como se explicó en el capítulo 4. El formato de estos ficheros es análogo al del caso anterior.

‘micampo.exe’ se llama cuando el usuario pide los resultados del proyecto en curso. Este programa procesará los datos que el programa principal le pasa en forma de ficheros de texto. Los ficheros de texto que se crean antes de llamar al micampo.exe son:

- o **‘fases.txt’**: Este fichero contendrá las fases equivalentes a las existentes en el proyecto, una por cada fila del fichero. La estructura de cada fila es:

‘coordx;coordy;intensidad fase;desfase’

- o **‘activo.txt’** o **‘pasivo.txt’**: según el tipo de lazo que se elija, se creará un archivo u otro. En ellos se almacenará toda la información necesaria para el módulo de cálculo del campo. Así, según el tipo de lazo, la sintaxis de la línea que se guarda es:

Pasivo 2 conductores (lazo simple)

tipo ; x1 ; y1 ; x2 ; y2 ; R' ; rgm ; xc1 ; 1/0

Pasivo 3 conductores (lazo doble cond. común)

tipo ; x1 ; y1 ; x2 ; y2 ; x3 ; y3 ; R' ; rgm ; xc1 ; xc2 ; xc3 ; 1/0

Pasivo 4 conductores (lazo doble)

tipo ; x1 ; y1 ; x2 ; y2 ; x3 ; y3 ; x4 ; y4 ; R' ; rgm ; xc1 ; xc2 ; xc3 ; 1/0

Activo 2 conductores (lazo simple)

tipo ; x1 ; y1 ; x2 ; y2 ; I1 ; theta1

Activo 3 conductores (lazo doble cond. común)**tipo ; x1 ; y1 ; x2 ; y2 ; x3 ; y3 ; I1 ; theta1 ; I2 ; theta2****Activo 4 conductores (lazo doble)****tipo ; x1 ; y1 ; x2 ; y2 ; x3 ; y3 ; I1 ; theta1 ; I2 ; theta2**

donde

‘Tipo’ es el número de conductores que componen el lazo

‘xi ; yi’ son las coordenadas de cada uno de los conductores que componen el lazo

‘R’ ; rgm’ son los parámetros que definen a un conductor.

‘Xci’ es la compensación que se hace en el conductor i del lazo.

1/0 es una variable booleana; si está a 1 quiere decir que los valores de Xci son en pu, mientras que si está a 0 es porque nos lo dan en uF.

‘I_i ; theta_i’ representan los valores del módulo de la intensidad de fase y el desfase de la fase i.

Según la información que se le mande, MitLoop procederá a sacar por pantalla una o dos gráficas:

- o Una gráfica si en los datos enviados no existe ningún lazo, es decir, si no se ha creado el fichero “activo.txt” ni tampoco “pasivo.txt”. En dicha gráfica se representa el campo generado por la(s) línea(s) presentes en el proyecto.

- o Dos gráficas en caso de haber escogido un lazo:
 - La primera contendrá tres curvas: campo magnético original de la línea, campo creado por la intensidad inducida en el lazo (caso de lazo pasivo) o campo creado por la intensidad inyectada en el lazo (caso del lazo activo), y finalmente campo neto, suma de los dos anteriores.
 - La segunda presenta la evolución del factor de reducción (definido en el capítulo 2) en función de la coordenada x transversal a la línea.
- Carpeta “optimiza”: En ella se guardarán los ficheros de datos necesarios para el correcto funcionamiento del módulo de optimización. Cuando vaya a llamarse a dicho módulo se creará una serie de archivos:
 - o Un primer archivo llamado “fases.txt”, que contendrá las fases presentes en el problema. Se le pasarán todos los parámetros necesarios, a saber:
 - Coordenadas (x,y) de cada uno de los conductores que forman cada una de las fases.
 - Intensidad de fase y el desfase correspondiente.

- Diámetro prohibido, con lo que será posible conocer la zona prohibida para cada uno de los conductores.

o A continuación se grabará un archivo denominado “obstaculos.txt”, en el que se almacenarán todas las zonas prohibidas correspondientes a los obstáculos presentes en el proyecto. Como todas serán rectángulos, la sintaxis de cada línea de este fichero es la misma, independientemente del obstáculo del que provenga:

“x1;y1;x2;y2;x3;y3;x4;y4”

donde las coordenadas se calcularán según el elemento que corresponda.

- o Un archivo “conductores.txt” donde se grabará nombre, resistencia por unidad de longitud R' (Ω/m) y radio geométrico medio rgm (m) de cada uno de los conductores que el usuario haya elegido como candidatos para optimización, separando con “,” los valores de cada parámetro.
- o Otro archivo llamado “postes.txt”, que contiene todos los postes seleccionados: nombre, altura, esfuerzo máximo.

Como la función de optimización nos devolverá una serie de ficheros, previamente a llamarla borraremos esos fichero (si existen), ya que así nos aseguramos no tener interferencias (o ruido) de alguna ejecución anterior. Una

vez la llamemos y complete el proceso de optimización, nos devolverá los siguientes ficheros:

- “condoptimo.txt” contendrá el nombre, R’ y rgm del conductor óptimo de entre los que se le pasaron.
- “posteoptimo.txt”, en el que tendremos el poste óptimo para la solución.
- “posoptima.txt”, en el que encontraremos las localizaciones óptimas para cada uno de los conductores del lazo. Los valores estarán separados por “,” y habrá una línea por cada lazo.

‘micamponograficas’ es un módulo idéntico a ‘micampo.exe’, con la única salvedad de que al usuario no le presenta gráficas en pantalla.

5.2 Modelado de Fases, Obstáculos y Lazos

Comencemos analizando cómo se han modelado los distintos objetos que se consideran en MitLoop: fases, obstáculos y lazos. Salvo que se especifique lo contrario, las longitudes estarán expresadas en metros, los ángulos en grados sexagesimales, las intensidades en amperios RMS por fase.

5.2.1 Definición de Fases

En MitLoop se han definido las fases como objetos compuestos por varias partes, tal y como se aprecia en la figura 5.1:

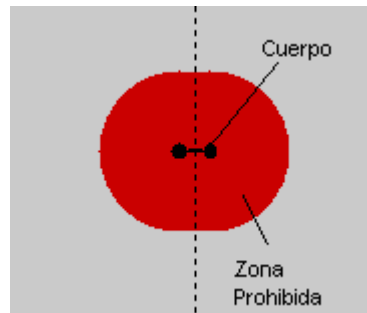


Figura 5.1 Partes de que se compone una fase, ejemplo fase dúplex horizontal.

- El conductor (o conductores) que la forma(n) (representado cada uno por un círculo negro en la ventana de trabajo del programa).
- una zona prohibida, que será circular para cada uno de los conductores que forman cada fase. Se representa en rojo en la ventana de trabajo del programa.
- Una estructura de datos que contiene la información de todos los parámetros que definen completa e inequívocamente al objeto, de los cuales se obtiene la información para determinar las dos zonas anteriormente descritas. Esta parte se puede modificar al editar el objeto.

Veamos los parámetros de cada una de las fases por separado:

- Fase símplex:

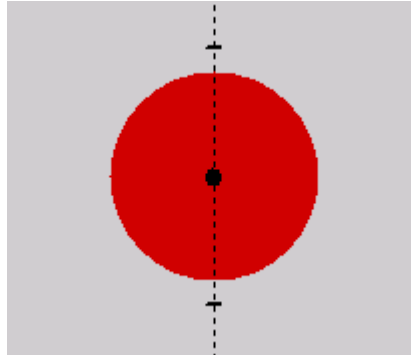


Figura 5.2 Fase símplex.

Sus parámetros son:

altura, coordx, diámetro, linea, numero, numeroglobal, intensidad, desfase, tipo

La descripción de cada parámetro es:

“altura” representa la altura de la fase respecto al suelo, en metros.

“coordx” es la distancia horizontal desde el origen de coordenadas hasta la fase, en metros.

“diámetro” contiene el diámetro de la zona prohibida asociada a la fase, en metros.

“linea” es un entero que vale 1 o 2 en función de a qué línea pertenezca la fase.

“numero” es un contador que establece un orden dentro de cada tipo de objeto. Por tanto, mientras que numeroglobal es único para cada objeto del proyecto, numero es único sólo entre los objetos de un mismo tipo.

Al igual que el anterior, al borrar algún objeto, se actualizan todos los parámetros “numero” del resto de objetos que sean del mismo tipo que el borrado.

“**numeroglobal**” es un contador que es común a todos los objetos presentes en el proyecto. Si durante la ejecución del programa se borra algún objeto, tanto este contador como “numero”, se actualizan automáticamente de manera que la numeración global de objetos siempre sea correlativa, sin saltos.

“**intensidad**” debe estar expresado en Amperios y valor eficaz; además debe ser el valor de intensidad de fase, nunca el de conductor (salvo lógicamente en el caso de una fase símplex, en que son idénticos).

“**desfase**” se debe introducir en grados, y así lo almacenará el programa.

“**tipo**” es una cadena que almacena el tipo de objeto, en este caso sería “conductor”

- Fases dúplex:

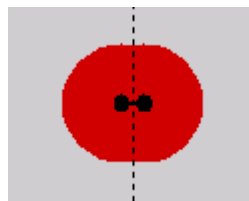


Figura 5.3. Fase Dúplex horizontal

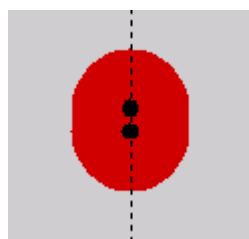


Figura 5.4 Fase Dúplex vertical

Para este tipo los parámetros que lo definen son:

coordx, coord., diametro1, diametro2, linea, numeroglobal, separacion, tipo, intensidad, desfase

“coordx” es la coordenada del conductor de la fase que se encuentre más a la izquierda o más abajo (ya que en este caso de dúplex tenemos dos configuraciones posibles: vertical y horizontal).

“coordy” es la coordenada y del mismo conductor que el del parámetro anterior.

“diametro1” es el diámetro del área prohibida del conductor 1 de la fase.

“diametro2” ídem que el anterior para el otro conductor.

“linea” ídem que en fase símplex.

“numeroglobal” ídem que en fase símplex.

“separacion” es la distancia que separa a los dos conductores de la fase. Puede ser vertical u horizontal según la configuración en que estemos.

“tipo” ídem que fase símplex. Aquí será “2condhoriz” o “2condvert” según la geometría.

“intensidad” ídem que fase símplex.

“desfase” ídem que fase símplex.

- Fase tríplex:

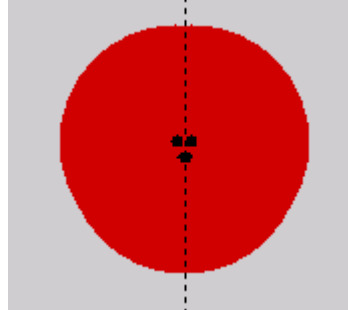


Figura 5.5 Fase Tríplex, primer tipo.

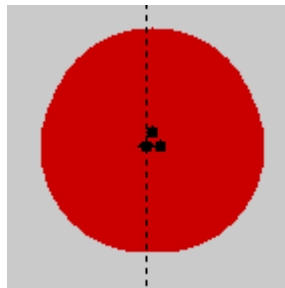


Figura 5.6 Fase tríplex, segundo tipo.

En este caso los parámetros son:

“*coordx*” ídem que en fase dúplex.

“*coordy*” ídem que en fase dúplex.

“*diametro1*” ídem que fase dúplex.

“*diametro2*” ídem que fase dúplex

“*diametro3*” análogamente a fase dúplex pero para el tercer conductor de esta configuración.

“*d*” es la distancia horizontal máxima entre dos conductores de la configuración.

“*h*” es la distancia vertical máxima entre dos conductores de la configuración.

“*linea*” ídem que fase dúplex.

“*numeroglobal*” ídem que fase dúplex.

“*tipo*” ídem que fase dúplex. En este caso la cadena que se escribe es “3conductores”.

“*intensidad*” ídem que fase dúplex.

“*desfase*” ídem que fase dúplex.

“*unoarriba*” es una variable booleana que determina cual de las dos configuraciones posibles es la de este caso. Si es “Verdadero” es que la configuración es la de un conductor arriba y dos abajo. En caso contrario será “Falso”.

- Fase cuádruplex:

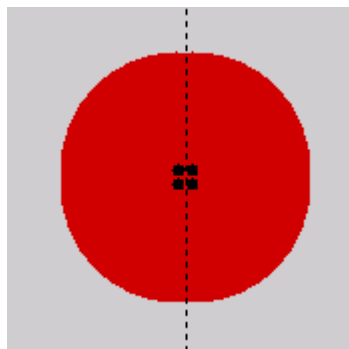


Figura 5.7 Fase cuádruplex.

En este caso los parámetros son:

“coordx” es el valor de la coordenada x del conductor que está situado en la posición inferior izquierda de la fase.

“coordy” es el valor de la coordenada y del mismo conductor anterior.

“diametro1” es el valor del diámetro prohibido del conductor situado en la posición superior izquierda.

“diametro2” ídem para el conductor en la posición superior derecha.

“diametro3” ídem para el conductor en la posición inferior izquierda.

“diametro4” ídem para el conductor en la posición inferior derecha.

“disth” es la distancia horizontal que separa a los conductores de la fase.

“distv” es la distancia vertical que separa a los conductores de la fase.

“linea” ídem que fase tríplex.

“numeroglobal” ídem que fase tríplex.

“tipo” ídem que fase tríplex. En este caso el texto que se escribe es “4cond”.

“intensidad” ídem que fase tríplex.

“desfase” ídem que fase tríplex.

5.2.2 Definición de Obstáculos

Los obstáculos que se han considerado en MitLoop se componen de cuerpo y zona prohibida. El cuerpo se representa con un rectángulo negro y la zona prohibida con un rectángulo rojo. Un ejemplo de zona lo tenemos en la figura 5.2:

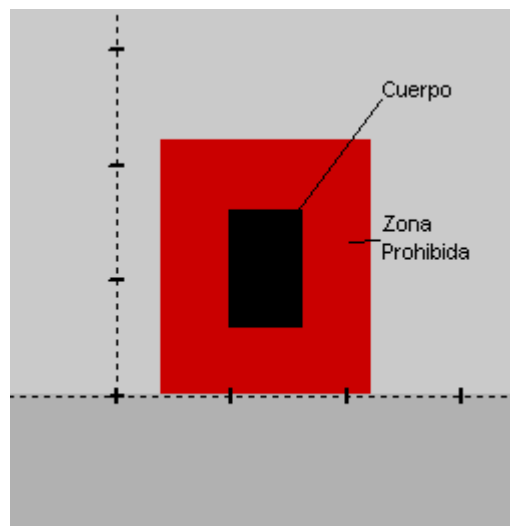


Figura 5.8 Ejemplo típico de obstáculo.

- Líneas horizontales.

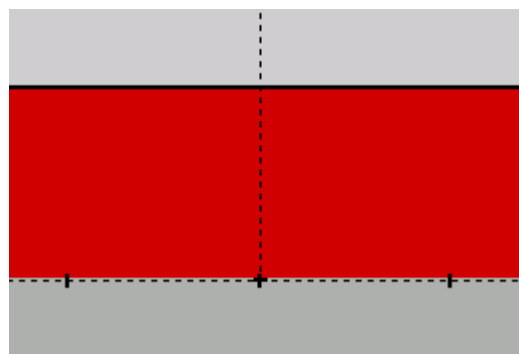


Figura 5.9 Línea Horizontal

Sus parámetros son:

Altura, numeroglobal, tipo

El significado de cada parámetro es:

“**altura**” representa la altura por debajo de la cual no está permitido que se sitúen los lazos.

“**numeroglobal**” es un contador que es común a todos los objetos presentes en el proyecto. Si durante la ejecución del programa se borra algún objeto, tanto este contador como “numero”, se actualizan automáticamente de manera que la numeración global de objetos siempre sea correlativa, sin saltos.

“**tipo**” es una descripción que el programa añade al final de la línea. Actualmente no se le da ningún uso, pero se ha añadido por si en el futuro se le diera alguna utilidad.

- Obstáculo apoyado en el suelo.

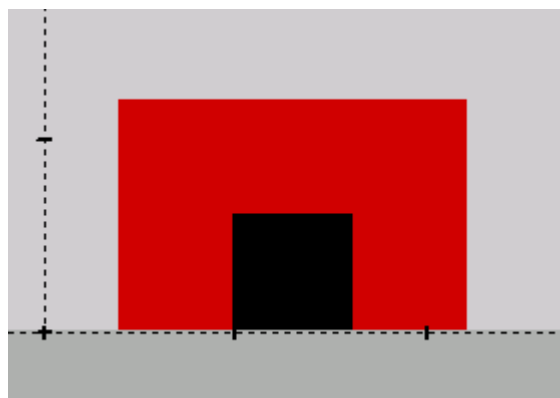


Figura 5.10 Obstáculo Normal.

altura, arriba, coordx, derecha, izquierda, numero, numeroglobal, tipo, anchura

“altura” es la altura del obstáculo, contada desde el suelo.

“arriba” es la altura de la zona prohibida, contada desde la parte superior del obstáculo.

“coordx” es la distancia horizontal desde el origen de coordenadas a la esquina inferior izquierda del obstáculo.

“derecha” es la distancia entre el borde derecho del obstáculo y el borde derecho del área prohibida.

“izquierda” es la distancia entre el borde izquierdo del obstáculo y el del área prohibida.

“numero” ídem que fase cuádruplex.

“numeroglobal” ídem que fase cuádruplex.

“tipo” ídem que fase cuádruplex.

“anchura” es la anchura del obstáculo.

- Obstáculo elevado

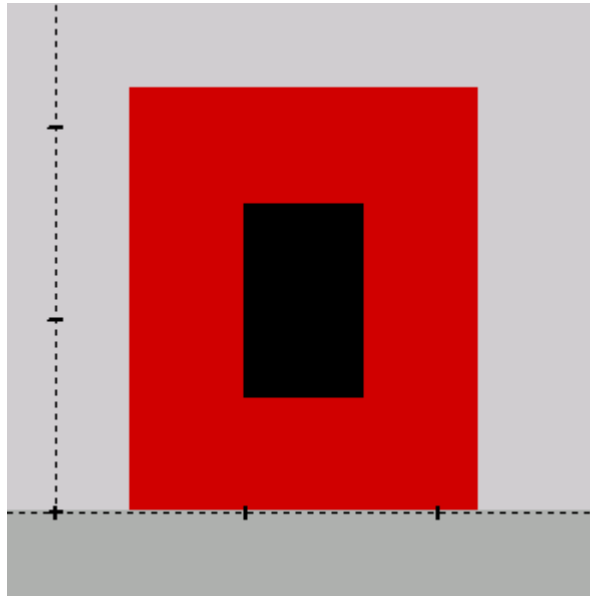


Figura 5.11 Obstáculo Elevado

Altura, alturaprohibida, anchura, apoyado, coordx, dcha, distanciaAlSuelo, inferior, izda, numeroglobal, tipo

“altura” es la altura del obstáculo, contada desde su base.

“alturaprohibida” es la altura de la zona prohibida, contada desde la zona superior del obstáculo.

“anchura” ídem que obstáculo normal.

“apoyado” es una variable booleana que si está a Verdadero indicará que el área prohibida está apoyada en el suelo.

“coordx” ídem que obstáculo normal.

“dcha” es la distancia que existe entre el borde derecho del obstáculo y del área prohibida.

“distanciaAlsuelo” contiene la distancia del borde inferior del área prohibida al suelo. Evidentemente debe ser mayor o igual a cero.

“inferior” es la distancia entre el borde inferior del obstáculo y el borde inferior del área prohibida.

“izda” contiene la distancia entre el borde izquierdo del área prohibida y el del obstáculo.

“numeroglobal” ídem que en obstáculo normal.

“tipo” ídem que obstáculo normal, en este caso la cadena que se grabaría es “Elevado”.

Hay que distinguir entre la representación gráfica de las fases y obstáculos, ya comentadas al principio de este punto, ya que no son totalmente análogas:

- Para el caso de fases, cada uno de sus conductores estará representado por dos elementos: un círculo negro de pequeño diámetro (constante para cualquier tipo de conductor) que estará situado donde indiquen las coordenadas del elemento, y otro círculo rojo concéntrico con el anterior, el cual representará la zona prohibida en que no puede encontrarse ningún otro elemento.
- En el caso de obstáculos habrá también una zona negra, si bien ahora será rectangular, y sus dimensiones se corresponderán con la del obstáculo real, aplicando el correspondiente factor de escala. La zona prohibida en estos casos se modela como un rectángulo que contiene al anterior.

En ambos casos, las zonas prohibidas se almacenan en un array dinámico denominado “ZonasProhibidas”; el contador en el que se almacena el número de zonas existentes se ha denominado “totalZonas”; los elementos de este array son instancias de un tipo de datos denominado “Zona”, el cual contiene los siguientes parámetros:

- “xminima”, “yminima”, “xmaxima”, “ymaxima”: estos cuatro valores representan exactamente la zona negra en caso de que ésta sea rectangular, y la aproximación rectangular que se obtiene en el caso de zonas negras circulares (conductores de fases) considerando el rectángulo de mínimo perímetro que contiene a la zona negra circular considerada.
- “dibujarSeñal”: variable booleana que estará a “Verdadero” si la zona negra a la que pertenece está solapando con otra zona negra. Esto tiene utilidad ya que el programa no impide que dos o más objetos se solapen, pero avisa por pantalla mediante un símbolo a la izquierda de una de las zonas solapadas (la primera según el orden cronológico de inserción).
- “tipo”: contiene una cadena que describe el tipo de objeto del que proviene la zona actual.
- “numero”: es la posición que ocupa el objeto del que proviene la zona negra en su array dinámico. Será por tanto el mismo valor de la variable “numero” del objeto del que proviene esta zona.

5.2.3 Definición de Lazos

Vamos a distinguir entre lazos de 2, 3 y 4 conductores, es decir: lazo simple, lazo doble con conductor común y lazo doble sin conductor común.

Lazo simple

“x1;y1” son las coordenadas del primer conductor del lazo.

“x2;y2” ídem para el segundo conductor.

“pasivo” variable booleana que será “Verdadero” si el lazo es pasivo y “Falso” si es activo.

“xc1” sólo si el lazo es pasivo se utilizará esta variable, que contiene el valor de la compensación que se introduce.

“I1;theta1” sólo se utiliza si el lazo es activo. Representan el módulo (rms) y desfase de la intensidad inyectada en el lazo.

“xcampo;ycampo” son las coordenadas del punto en el que se minimiza el campo. Sólo se utiliza en caso de lazo activo.

“Isugerida” es el valor de la intensidad que sugiere el programa.

“longitud” es el valor de la mayor de las dimensiones del lazo (la que es paralela a la dirección de la línea)

Lazo doble con conductor común

“x1;y1” ídem que para lazo simple.

“x2;y2” ídem que para lazo simple.

“x3;y3” son las coordenadas del tercer conductor del lazo.

“pasivo” ídem que para lazo simple.

“xc1;xc2;xc3” son las compensaciones por conductor. Sólo se utilizarán si el lazo es pasivo.

“I1;theta1;I2;theta2” son las intensidades (rms) y desfases (°) de cada uno de los lazos simples en que se descompone el doble. Sólo se utilizarán si el lazo es activo.

“xcampo;ycampo” son las coordenadas del punto en que se minimiza el campo.

“Isugerida” contiene el valor de la intensidad sugerida por el programa para minimizar el campo en el punto “xcampo;ycampo”. Sólo se utilizará en caso de lazo activo.

“longitud” íd que para el lazo anterior.

Lazo doble sin conductor común

“x1;y1;x2;y2;x3;y3;x4;y4” ídem que para lazo doble con conductor común, siendo (x4,y4) las coordenadas del nuevo conductor.

“pasivo” ídem que lazo doble con conductor común.

“I1;theta1” intensidad (rms) y desfase del lazo 1. Sólo se utilizará si el lazo es activo.

“I2;theta2” ídem anterior lazo 2. Sólo se utiliza en caso de lazo activo.

“xcampo;ycampo” ídem lazo doble con conductor común. Sólo se utilizarán si el lazo es activo.

“Isugerida” ídem que lazo doble con conductor común. Sólo se utilizará en caso de lazo activo.

“xc1;xc3” factores de compensación. Sólo se utilizarán en caso de lazo pasivo.

“longitud” íd que para el lazo anterior.

Cada vez que se defina una fase, obstáculo o lazo se deberá dar valor a cada uno de los parámetros correspondientes definidos anteriormente en 5.2.1, 5.2.2 y 5.2.3; antes de continuar con la ejecución del programa se efectuará una validación de los mismos. Las condiciones de validación son:

- No puede haber casillas que sean necesarias en blanco.
- En aquellas casillas en que deba haber un valor numérico, éste debe ser correcto.

- Los diámetros de zonas prohibidas circulares deben ser no negativos.
- Los bordes derechos no pueden estar a la izquierda de los bordes izquierdos.
Ídem con inferiores y superiores.
- En el caso de lazos, se permite el solape entre conductores de distintos lazos (aunque se avisa de tal circunstancia), sin embargo no se permite el solape de conductores del mismo lazo entre si.
- En el caso de lazos pasivos, la compensación debe tener un valor lógico (entre 0 y 1 pu o bien una cantidad no negativa si está expresada en uF/m).

5.3 Gestión de Fases, Obstáculos y Lazos

Para la gestión (creación, modificación y borrado) de objetos se han definido una serie de variables y arrays tanto en el código asociado al formulario principal como en el módulo “module1”. A continuación se describen:

Módulo principal:

- *Frecuencia:* contiene el valor de la frecuencia de la red (50 o 60 Hz.).
- *Autor:* Contiene el nombre del autor del proyecto.
- *Fecha:* Contiene la fecha del proyecto (la que introduzca el usuario, no tiene por qué ser la actual).

- *Descripción*: contiene una breve descripción del proyecto. La idea es que el texto que se almacene aquí sirva como referencia/resumen del proyecto.
- *NumeroLineas*: Variable que contiene el número de líneas generadoras de campo presentes en el proyecto actual.

Módulo Module1: En este módulo se realizan las funciones relacionadas con la gestión de fases, obstáculos y lazos.

- *TotalLineasHorizontales*: Variable que contiene el número total de restricciones tipo Línea Horizontal que hay en el proyecto.
- *Totalcond*: Variable que contiene el número total de fases simples que hay en el proyecto.
- *Totalcondmultiples*: variable que contiene el número total de fases dúplex que hay en el proyecto.
- *Total3cond*: variable que contiene el número total de fases triplex que hay en el proyecto.
- *Total4cond*: variable que contiene el número total de fases cuádruplex que hay en el proyecto.
- *Totalnorm*: variable que contiene el número total de obstáculos normales que hay en el proyecto.
- *Totalelevados*: variable que contiene el número total de obstáculos elevados (tanto de tipo I como de tipo II) que hay en el proyecto.
- *Totalzonas*: variable que contiene el número de zonas negras que existen en el proyecto (tantos elementos como objetos).

- TotalLazos: variable que contiene el número total de lazos que existen en el proyecto.
- LineasHorizontales(): Array dinámico que almacena las líneas horizontales que existen en el proyecto.
- ConductoresPictureBox(): Array dinámico que almacena las fases símplex que hay en el proyecto.
- conductoresMultiples(): Array dinámico que almacena las fases dúplex que hay en el proyecto.
- Tresconductores(): Array dinámico que almacena las fases triplex que hay en el proyecto.
- CuatroConductores(): Array dinámico que almacena las fases cuádruplex que hay en el proyecto.
- NormalesPictureBox(): Array dinámico que almacena los obstáculos normales que tenemos en el proyecto.
- ElevadosPictureBox(): Array dinámico que almacena los obstáculos elevados que tenemos en el proyecto.
- Lazos(): Array dinámico que almacena los lazos que hay en el proyecto.

Si se desea una visión más documentada de la interrelación de las variables, en los diagramas de flujo del anexo A se ha marcado las variables afectadas en cada paso.

Cada tipo de objetos tiene asociado un array dinámico (que contiene todos los objetos de ese tipo) y una estructura de datos que contiene el esquema y propiedades de cada tipo de datos. Así, en la siguiente tabla se recoge la correspondencia entre los tipos

de datos, los nombres que se les ha dado a las estructuras de datos y el array que los recoge:

<i>Objeto real</i>	<i>Estructura de datos</i>	<i>Contador local asociado</i>	<i>Array dinámico</i>
Fase simple	Conductor	Totalcond	ConductoresPictureBox()
Fase dúplex	dosconductores	totalcondmultiples	ConductoresMultiples()
Fase tríplex	trescond	total3cond	tresConductores()
Fase cuádruplex	cuatroCond	total4cond	cuatroConductores()
Línea Horizontal	LineaHorizontal	totalLineasHorizontales	LineasHorizontales()
Obstáculos normales	ObstaculoNormal	totalnorm	NormalesPictureBox()
Obstáculos elevados	ObstaculoElevado	totalelevados	ElevadosPictureBox()
Lazos	Lazo	totalLazos	Lazos()
Zonas Prohibidas	Zona	totalZonas	Zonas()

Módulo Campo: En este módulo, como ya se comentó, se realizan todas las operaciones necesarias para poder calcular el campo magnético del proyecto. Las variables principales que se definen son:

- ConductorFase: Es una estructura de datos que nos proporciona un modelo para las fases equivalentes. Contiene los parámetros:
 - X: Coordenada x del conductor equivalente.
 - Y: coordenada y del conductor equivalente.
 - linea: almacena la línea a la que pertenece el conductor equivalente.

- intensidad: contiene el valor de la intensidad de fase, rms.
- desfase: en °.

La posición del conductor equivalente, como ya se vio en el capítulo 2, se obtiene del mismo modo que si fuese el cálculo de centro de masas de la distribución de conductores.

- conductoresActivos(): Array dinámico que almacena todas las fases equivalentes como variables del tipo ConductorFase.

Módulo CreaInforme: Este módulo es el encargado de generar los informes en Excel.

Cuando se le llama, comprueba si dispone de suficientes datos para generar al menos un informe con un contenido mínimo (que se ha establecido en la presencia de, al menos, una línea válida).

Si es así, crea una nueva instancia de la aplicación informática Excel; a su primera hoja le asigna el nombre “Descripción”, y almacena primero los datos generales del proyecto, luego las líneas con las que se ha trabajado, los obstáculos, y por último los lazos, escribiendo toda aquella información de cada objeto que pueda resultar de interés.

En la segunda hoja colocará todos los datos numéricos a partir de los cuales se representa el campo. Es decir, llama al ejecutable “micamponograf.exe” si fuese necesario. Dicho ejecutable nos devolverá los ficheros txt que necesitamos, pero sin sacar gráficas por pantalla.

En esta misma hoja nos representará las mismas gráficas que nos mostraba MitLoop, con la ventaja de que ahora las podemos guardar (recordemos que la creación de aplicaciones stand-alone en Matlab tiene el inconveniente de que con sus gráficas no se puede copiar-pegar).

5.3 Ciclo de vida de objetos en MitLoop

En este apartado se va a desarrollar el ciclo de vida de los objetos que se consideran en MitLoop. Este ciclo de vida abarcará desde la creación del objeto, sus modificaciones e incluso su borrado, si procediese.

5.3.1 Creación de un nuevo objeto

Cuando el usuario crea un nuevo objeto introduciendo los valores de los parámetros en el formulario correspondiente se validan los datos; si esta validación es positiva se llama al procedimiento adecuado (dependiendo del tipo de objeto a crear) del módulo “module1”, el cual crea una instancia del tipo de datos apropiado (de entre los definidos en su cabecera), asignando a las propiedades del nuevo objeto los valores que tengan en el formulario.

Cada tipo de objetos tiene asignado un array dinámico (AD). Se les denomina dinámicos porque su dimensión (tamaño) es variable en tiempo de ejecución. El proceso que se realiza cuando se crea un nuevo objeto es:

- Una vez validados con resultado positivo los datos proporcionados por el usuario a través del formulario correspondiente, el procedimiento correspondiente del módulo “module1” comprueba si ya existen elementos del tipo del objeto añadido. Si no es así, crea el AD correspondiente, asignándole dimensión 1 y le añade el objeto en esa posición. Si ya existiesen objetos de ese tipo (contador local mayor de cero), aumenta en 1 la dimensión del AD que corresponda al tipo de objeto a añadir y se añade dicho objeto al AD correspondiente en su posición final.
- Se aumenta en uno el valor del contador global “elementos”, perteneciente a “module1”, que contiene el número total de objetos del proyecto actual.
- Posteriormente se llama al procedimiento “RedibujaImagen” del módulo “module1”, que es el encargado de dibujar los objetos en pantalla.

El parámetro numeroglobal, presente en todos los objetos, permite una identificación unívoca de los objetos introducidos, además de proporcionar una manera de recorrer los objetos por orden de inserción o bien de más reciente a más antiguo.

5.3.2 Edición de un objeto

Para la edición de un objeto ya existente, se hace doble click sobre él en la ventana de trabajo del programa. Mitloop abrirá el formulario correspondiente a ese tipo de objeto, y rellena las casillas del mismo con los valores almacenados en las variables del objeto. Cuando el usuario ha hecho lo que estime oportuno con los datos del formulario, se vuelven a validar y, si no hay errores, se actualizan los valores en el AD correspondiente.

5.3.3 Borrado de un objeto

Cuando el usuario selecciona la opción de borrado sobre un punto del área de trabajo, MitLoop lleva a cabo una serie de procesos:

- En primer lugar, se comprueba el color del punto donde se ha seleccionado borrar. Si corresponde a negro, es que existe al menos un elemento que contiene a ese punto, por lo que se llama al procedimiento “borraElementos” del módulo “Module1”, pasándole como parámetros las coordenadas actuales del ratón. Si por el contrario se corresponde con alguno de los colores de los lazos, se llama al procedimiento “borralazo” del mismo módulo.
- En ambos casos se recorren los arrays convenientes para comprobar si existe más de un elemento donde se ha pulsado, y si es así, se

avisará por pantalla del borrado de todos ellos, pidiendo confirmación al usuario.

- En caso afirmativo por parte del usuario, a continuación comprueba si la dimensión del array dinámico que contiene los objetos del tipo correspondiente al borrado es 1 o mayor. Esto se debe a que el método general de borrado de un objeto viene limitado por las órdenes que nos proporciona Visual Basic. Dicho método consiste en desplazar el elemento correspondiente del array a la última posición, para luego redimensionar el array a su dimensión menos 1, con lo que el último elemento se pierde.

Por tanto, si la dimensión del array es 1, directamente se borrará el array de memoria; esto no ocasionará ningún problema al crear más adelante un objeto del mismo tipo, ya que se cada vez que se crea un objeto se comprueba si el array existe, y si no se crea.

Si la dimensión es mayor que uno, se desplaza el elemento a borrar a la última posición y se redimensiona el array a su dimensión menos 1.

- Seguidamente se actualiza la variable “numeroglobal” de todos aquellos objetos cuyo valor de la variable sea mayor que el que se ha eliminado, ya que si se obvia este paso habrá un salto en la

numeración. A cada variable “numeroglobal” de cada objeto afectado se le resta uno.

- Por último se actualizan todas las variables “numero” de los objetos del mismo tipo del borrado, para evitar de nuevo saltos en la numeración.

5.4 Gestión de perfiles con MitLoop

En MitLoop los datos referentes a la configuración de los parámetros generales del programa se almacenan en ficheros con extensión “.usr”, localizados en la carpeta “perfiles”, la cual se encuentra dentro de la carpeta de instalación de MitLoop.

Los parámetros que se guardan son: límites del área real representada en pantalla (xminima, xmaxima, yminima, ymaxima), si se quieren grids o no (GridH, GridV, ambas booleanas), el valor en metros que representa el incremento entre líneas de grids (incrGridH, incrGridV), la altura mínima al suelo (alturaminima), y el valor en metros que corresponde al incremento de las marcas de los ejes (incrx, incry).

Por defecto, cada vez que se inicia, MitLoop comprueba si existe la carpeta “perfiles” y, si es así, si dentro de ella existe el perfil default. En caso de no existir la carpeta o el fichero, el programa los crea.

En cualquier momento durante la ejecución de MitLoop es posible cambiar de perfil cargando cualquier otro de los existentes o modificando el actual directamente mediante la ventana de configuración.

El esquema típico de un archivo de perfil de usuario es:

- Una primera línea que contiene la palabra ‘MitLoop’, seguido del número de versión de MitLoop con que ha sido creado el archivo.
- A continuación se graban los parámetros que definen el perfil de trabajo. Estos parámetros pueden ir en cualquier orden (sólo uno en cada línea) y son:

“anchura, xx”

“altura, yy”

“GridH, boolean”

“GridV, boolean”

“Alturaminima,h”

“incrx,ix”

“incry,iy”

Esta carpeta se complementa con el fichero “index.txt”, que no es más que un índice de los nombres de los perfiles existentes (a fin de cuentas los diferentes archivos que se encuentran en la carpeta perfiles).

Cuando el programa es ejecutado, comprobará que existan tanto dicho fichero como la carpeta y, de no ser así, creará la carpeta, creará en su interior el fichero asociado al perfil “Default” y creará el archivo “index.txt”.

5.5 Cálculo del campo magnético con MitLoop

Para calcular el campo se ha establecido la hipótesis de las fases equivalentes para fases múltiples, ya analizada en el capítulo 2. Los pasos que sigue MitLoop para calcular el campo magnético son:

- **Comprobar que las líneas están correctamente definidas:** Para ello se exige que exista al menos una línea y que contenga dos fases (línea monofásica) o tres fases (línea trifásica). La coherencia de los datos geométricos y eléctricos de dichas líneas se comprueban al ser creadas, por lo que no es necesario volver a hacerlo ahora.
- **Comprobar que la configuración de lazos no es errónea.** Para ello, si hay más de un lazo, pedirá al usuario que escoja sólo uno de entre ellos para resolver el proyecto. Si no hubiera lazos definidos, o no se selecciona ninguno, MitLoop avisará de que el campo calculado será debido sólo a la línea.
- **Obtener la configuración de fases equivalentes:** no se va a considerar las fases compuestas como tales, sino que se obtendrá una fase simple

equivalente para cada una de las fases compuestas, tal y como se detalló en el capítulo 2.

- **Calcular el campo creado por la(s) línea(s):** Para ello se aplicará el principio de superposición a los campos creados por cada una de las fases equivalentes calculadas en el apartado anterior.
- **Obtener el campo inducido por los lazos (debido a corriente inducida en caso de lazo pasivo y a corriente inyectada en caso de lazo activo), en el caso de que el usuario haya decidido emplear alguno:** En el capítulo 3 se vio el cálculo de la corriente inducida en un lazo activo, y en el capítulo 4 el de la corriente óptima a inyectar en el caso de lazo activo.
- **Obtener el campo resultante y representarlo gráficamente:** El campo se obtendrá como suma algebraica del campo creado por las líneas y el lazo. De esta parte se encargará el ejecutable “micampo.exe”, el cual se puede encontrar en la carpeta “calculos” dentro de la carpeta de instalación del MitLoop.

En caso de que alguna de las condiciones necesarias para poder realizar el cálculo no se cumpla, se avisará por pantalla y se abortará el proceso.

En Mitloop existen dos maneras de resolver los proyectos: mediante cálculo manual y mediante optimización. La optimización se lleva a cabo en un módulo desarrollado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla, y sólo es aplicable a lazos pasivos.

5.5.1 Cálculo manual

En esta modalidad de resolución el usuario es quien debe preocuparse de modificar los parámetros que definen al lazo (sea activo o pasivo) para obtener el óptimo o un resultado lo más cercano posible.

Para ello, se ha permitido en MitLoop que el usuario pueda disponer de varios lazos simultáneamente en cada proyecto. Sin embargo, a la hora de resolverlo (calcular el campo) el programa sólo permitirá elegir uno de entre todos los definidos.

Así, si estamos interesados en comparar el comportamiento de varios lazos una posible solución sería resolver cada uno y generar su informe correspondiente en Excel, tal y como se describe en 5.6.

5.5.2 Optimización

En este caso el usuario tendrá que definir un conjunto de conductores y de postes que se enviará al módulo de optimización. Los resultados que proporcionará son:

- Conductor óptimo de entre los seleccionados.
- Posición de los conductores que componen el lazo.
- Apoyos óptimos para el proyecto en cuestión.

Una vez el módulo de optimización devuelva los resultados, MitLoop procederá a actualizar las propiedades del objeto correspondiente y avisará al usuario de que ya está listo para calcular y presentar los resultados.

5.6. Informes en Excel

MitLoop dispone de un módulo integrado para generar informes en Excel, incluyendo gráficas del campo generado por la línea, por el lazo y el campo neto (o, por el contrario, sólo de la línea si no se hubiera considerado lazo). Así mismo, si se ha tenido en cuenta un lazo también presentará una gráfica del factor de reducción.

Se ha elegido esta manera de presentar los resultados ya que resulta extremadamente sencillo abrir Excel desde Visual Basic y manipular toda su estructura de objetos mediante Visual Basic for Applications (VBA).

Cada vez que se pida un informe, MitLoop comprobará si es posible crearlo con un mínimo de contenido. Así, comprobará los siguientes puntos antes de generar el informe:

- Primero escribirá en la carpeta “calculos” los siguientes ficheros, necesarios para el cálculo del campo:
 - “fases.txt”: Es un fichero de texto plano que contiene en cada línea los datos de una fase equivalente. El modelo de línea típico es:

“x1;y1;x2;y2;I;theta”

donde x_i , y_i están expresados en metros, la intensidad estará expresada en Amperios (RMS) y el ángulo en grados. Matlab efectuará las conversiones de unidades que precise.

- A continuación se borran los ficheros “activo.txt” y “pasivo.txt”, en la misma carpeta, por si existiesen previamente. Estos ficheros van a contener la información necesaria para el cálculo de la intensidad inducida (caso de lazo pasivo) o de la intensidad inyectada (caso de lazo activo). El prototipo de cada uno de estos ficheros es:

Caso pasivo: “x1;y1;x2;y2;x3;y3;x4;y4;R';rgm;xc1;xc2;xc3;1 o 0;”

Caso activo: “x1;y1;x2;y2;x3;y3;x4;y4;I1; ϕ_1 ;I2; ϕ_2 ;”

donde x_i e y_i representan las coordenadas geométricas de los conductores del lazo, R' es la resistencia por unidad de longitud del lazo, expresada en Ω/m , rgm es el radio geométrico medio del conductor de lazo (en m), x_{ci} representa bien el valor del condensador que se va a emplear (Ω/m si el último valor de la línea es 0 y en p.u. si es 1), y finalmente los términos (I_1, ϕ_1) e (I_2, ϕ_2) representan las intensidades por cada lazo (módulo y desfase).

Los valores de X_c que se utilizan son por lazo. En el caso de lazo pasivo doble con conductor común, el programa presupone que los valores que se le introducen son por conductor, y él realizará la conversión a valores por lazo según se vio en el anexo B.

Hay que recordar que entre los ficheros “activo.txt” y “pasivo.txt” en cada caso sólo uno estará presente, ya que recordemos que MitLoop limita a un solo lazo la resolución de cada proyecto.

- Finalmente se sobrescribe (o se crea, según el caso) el fichero “datos.txt”, que contiene información general necesaria para los cálculos; es un fichero de texto plano de una sola línea, en la que se almacenan los siguientes parámetros:

“frecuencia ; altura de cálculo del campo ; xmin ; xmax ; increm.x ;“

La frecuencia será 50 o 60 Hz (50 por defecto), la altura de cálculo será 1 metro por defecto, los valores de x_{min} y x_{max} los mismos que los de la ventana de trabajo justo cuando se llamó a los cálculos, y el incremento de x por defecto será 0.25 m.

- Para prever que el usuario no haya resuelto totalmente el proyecto antes de pedir el informe, MitLoop lo comprobará consultando la variable “Resuelto”, almacenada en el módulo principal. De no estar resuelto, ejecutará el fichero “micamponograf.exe”, situado en la carpeta “calculos” dentro de su ruta de

instalación. Éste ejecutable nos resolverá a través de los mismos ficheros de texto que generaría “micampo.exe” toda la información necesaria para el cálculo del campo magnético pero, a diferencia de “micampo.exe”, no presentará gráficas por pantalla, por lo que desde el punto de vista del usuario es transparente.

Capítulo 6. Algunos casos resueltos

Se van a resolver dos casos con MitLoop:

- En el primero de ellos se tomará una línea trifásica horizontal símplex, y se resolverá manualmente un lazo pasivo simple a nivel con la línea que, de acuerdo con Cruz [1], es la localización relativa óptima.
- En el segundo se resolverá el caso de dos líneas trifásicas horizontales de fases compuestas y un lazo doble activo con conductor común.

En el primer caso vamos a tomar las fases de la línea situadas en los puntos (-9,20), (0,20) y (9,20), por las que circula una intensidad de 500(120°) A(rms), 500(0°) A(rms), 500(240°) A(rms). El lazo pasivo estará situado en las coordenadas (-15,20), (15,20) y resolveremos sin y con compensación (0,6 pu). El conductor empleado será LA-380, cuya $R'=0,0857 \Omega/\text{km}$ y su $\text{rgm}=0,010277 \text{ m}$. Si introducimos estos datos en MitLoop, la ventana de trabajo nos quedará como sigue:

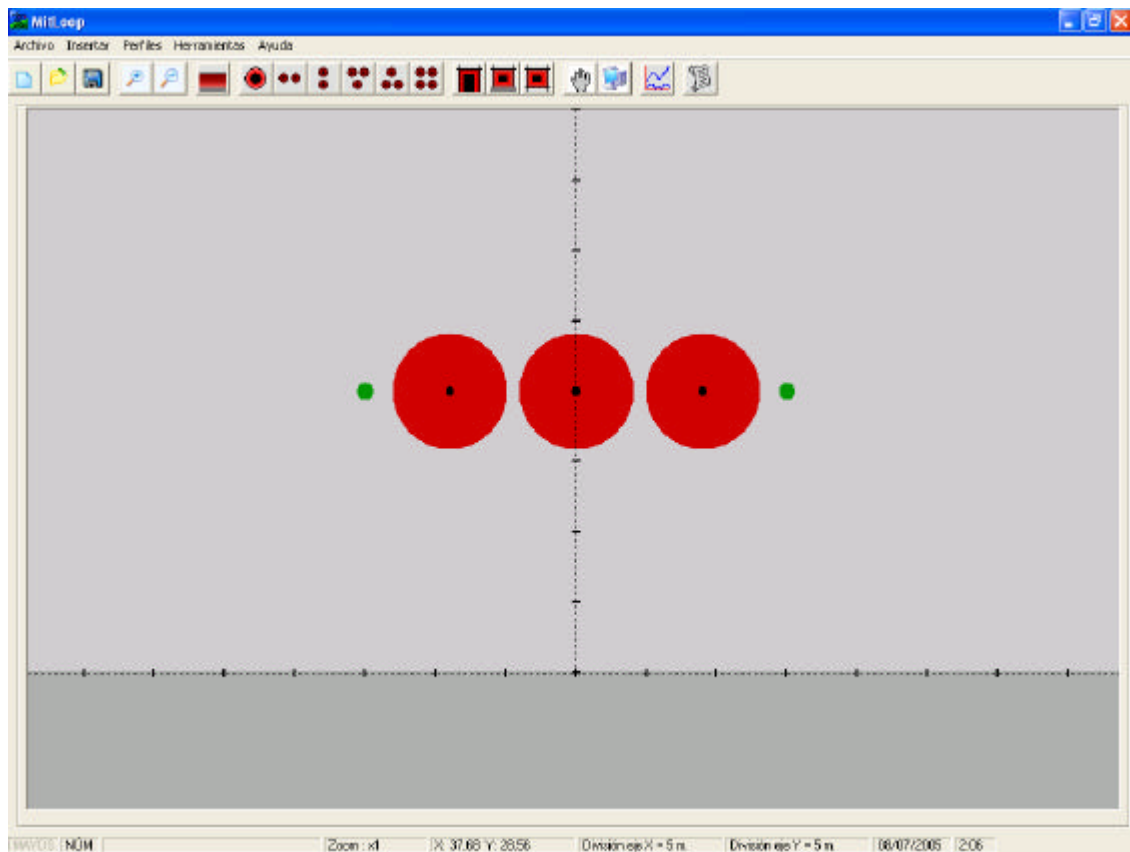


Figura 6.1 Ejemplo número 1.

A continuación, una vez definidas las fases y el lazo, pedimos a MitLoop que nos proporcione unos resultados preliminares en forma de gráficas:

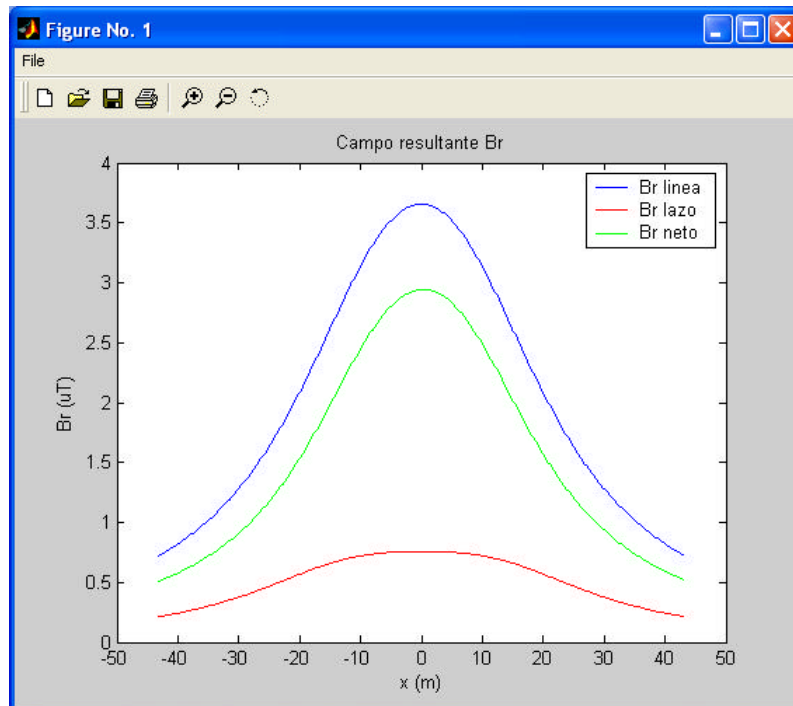


Figura 6.2 Campo original, del lazo y neto sin compensación.

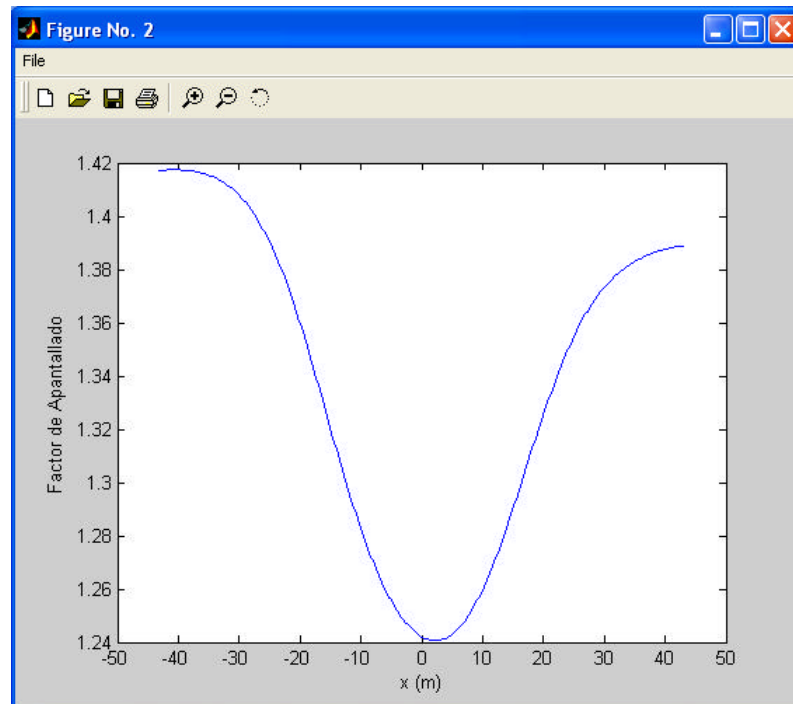


Figura 6.3 Factor de reducción sin compensación

Si ahora le aplicamos una compensación de 0,6 pu, los resultados son:

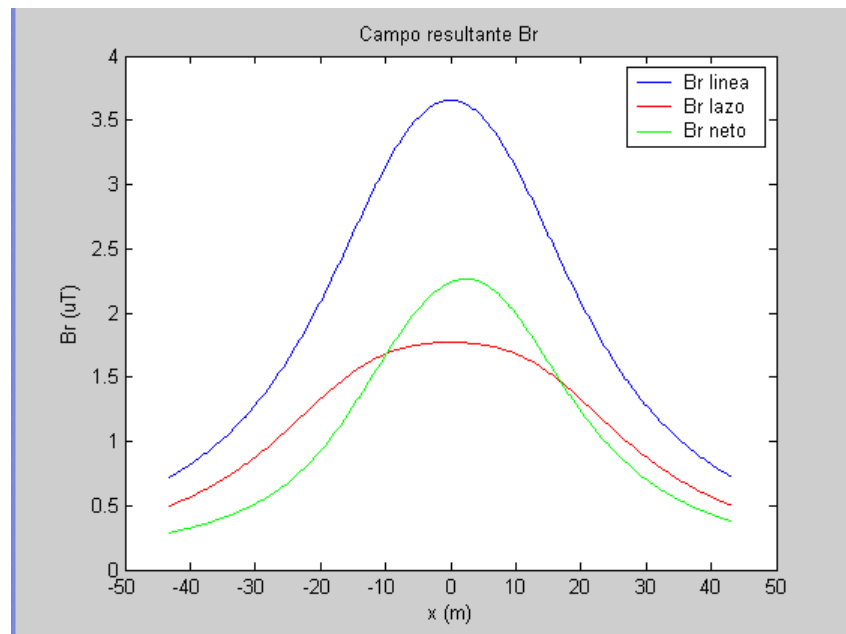


Figura 6.4 Campo original, del lazo y neto con compensación (0,6 pu).

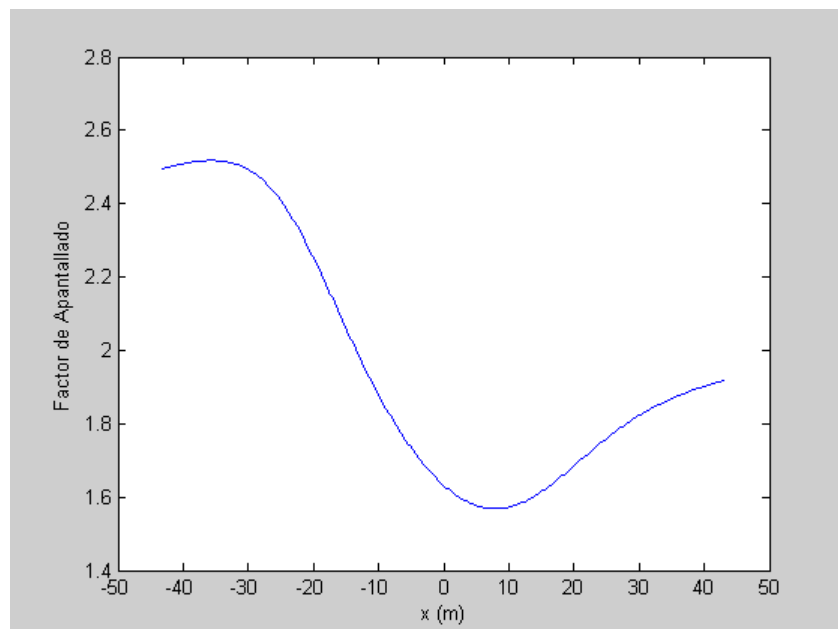


Figura 6.5 Factor de reducción con compensación(0,6 pu).

Una vez que vemos que los resultados parecen ser razonables, podemos pedirle el informe en Excel, por si queremos conservar todos los datos del proyecto de una forma más cómoda que con ficheros .cal.

El informe en Excel queda como se puede ver en las figuras 6.6 y 6.7.

DATOS GENERALES DEL PROYECTO												
Auton:												
Fecha:												
Descripción:												
LINEAS												
Linea 1		Linea 2										
	x(m)	y(m)	fase(A/RMS)	beta(m)		x(m)	y(m)	fase(A/RMS)	beta(m)			
Fase simple	-5.11	20.08	500.08	100.00								
Fase simple	0.11	20.08	500.08	0.00								
Fase simple	5.11	20.08	500.08	240.00								
Restricciones												
Tipo		Xmin(m)		Xmax(m)		Ymin(m)		Ymax(m)		Zonapoblada		
		Xmin(m)		Xmax(m)		Ymin(m)		Ymax(m)				
LAZOS PASIVOS												
Tipo		X1(m)	Y1(m)	X2(m)	Y2(m)	X3(m)	Y3(m)	X4(m)	Y4(m)	Coordenada	R' (centim)	rgm(m)
Simple		-15	28	5	30	N/A	N/A	N/A	N/A	LA-308	0.1057	8.880
LAZOS ACTIVOS												
Tipo		X1(m)	Y1(m)	X2(m)	Y2(m)	X3(m)	Y3(m)	X4(m)	Y4(m)	Coordenada	R' (centim)	rgm(m)
Costes Conexión												
Nombre		R'(centim)	Rgnd(m)	L(m)	Coste(m/m)	Coste(f)						
LA-308		0.1057	8.880	208	290.23325	64469						
Coste de Puente												
Nombre		Altura(m)	Coste(m/m)	Número	Coste(f)							
Holgón1		12	1508	4	6036							

Figura 6.6 Hoja de información del proyecto del informe Excel.

A pesar del zoom aplicado se puede apreciar como se han creado las distintas secciones que se mencionan en el capítulo 5.

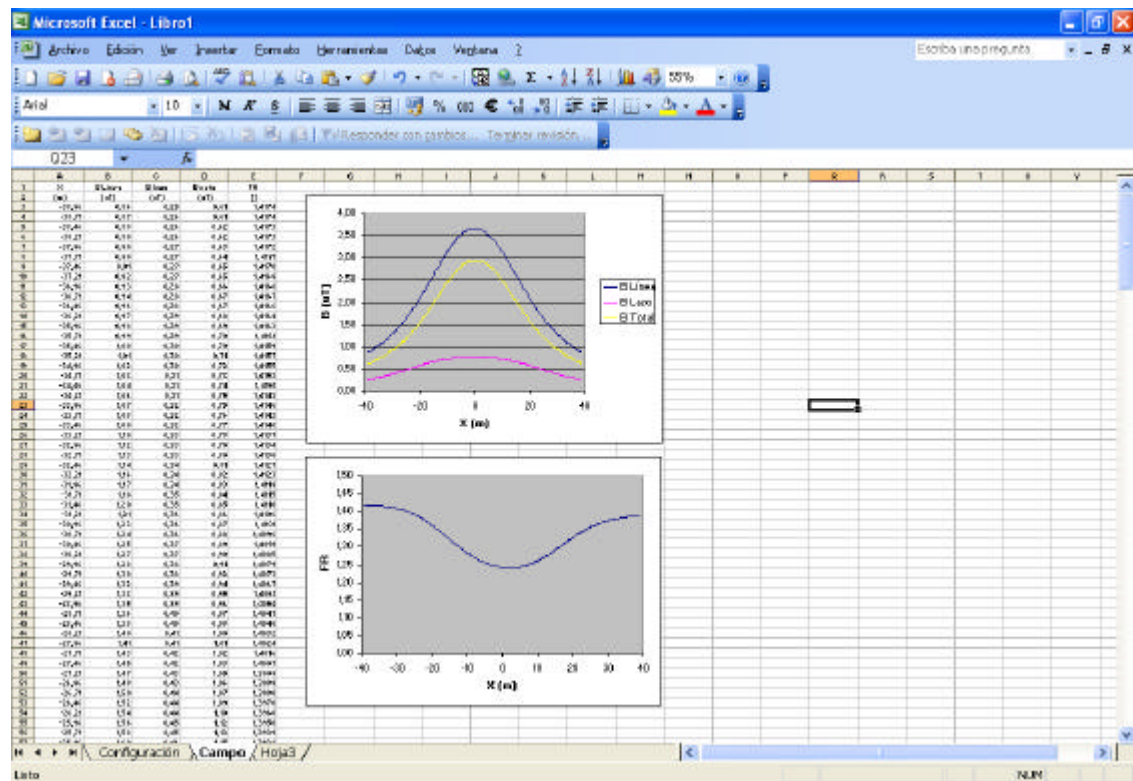


Figura 6.7 Hoja de resultados y gráficas del informe de Excel.

Para el segundo caso tomaremos la siguiente configuración:

Línea 1: fases en $(-15,20)$, $(-10,20)$, $(-5,20)$, con intensidades 500(120°), 500(0°) y 500(240°), respectivamente.

Línea 2: fases en $(5,20)$, $(10,20)$ y $(15,20)$, con intensidades de 500(120°), 500(0°) y 500(240°), respectivamente.

Lazo doble activo, con conductores situados en los puntos $(-15,15)$, $(-5,15)$, $(5,15)$, $(15,15)$, e intensidades inyectadas las recomendadas por el programa para minimizar el campo en el punto $(1,0)$.

El proyecto nos queda como se muestra en la figura 6.8.

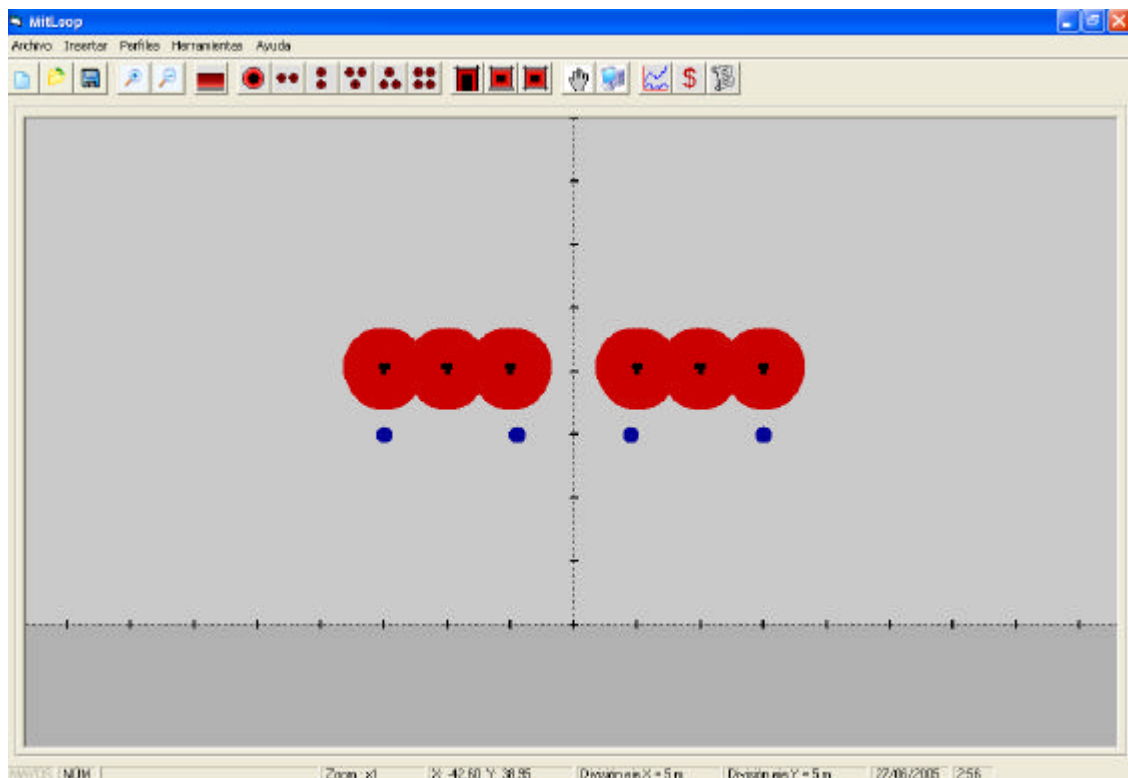


Figura 6.8 Ejemplo número 2.

Resolviendo el proyecto, se obtienen las gráficas 6.9 y 6.10:

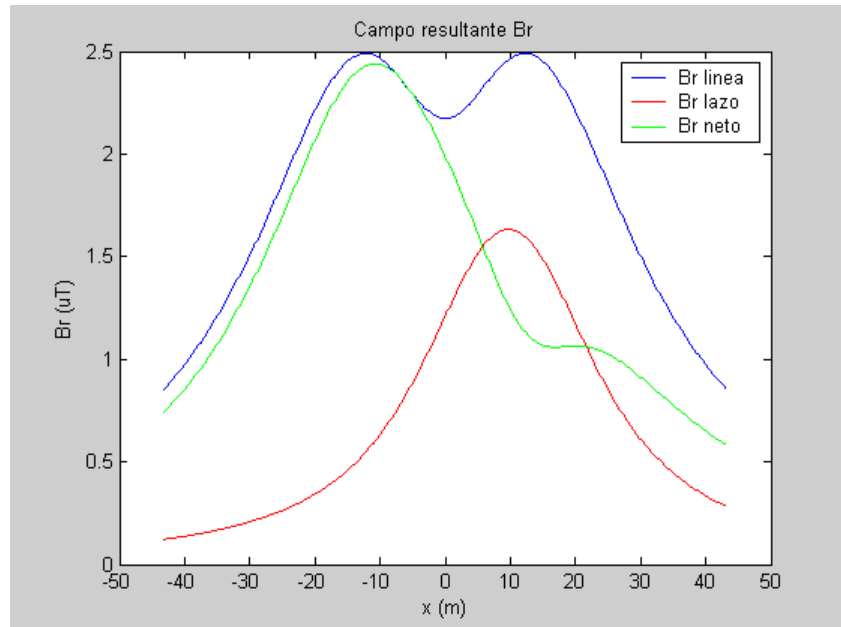


Figura 6.9 Campo original, del lazo y mitigado para lazo doble activo

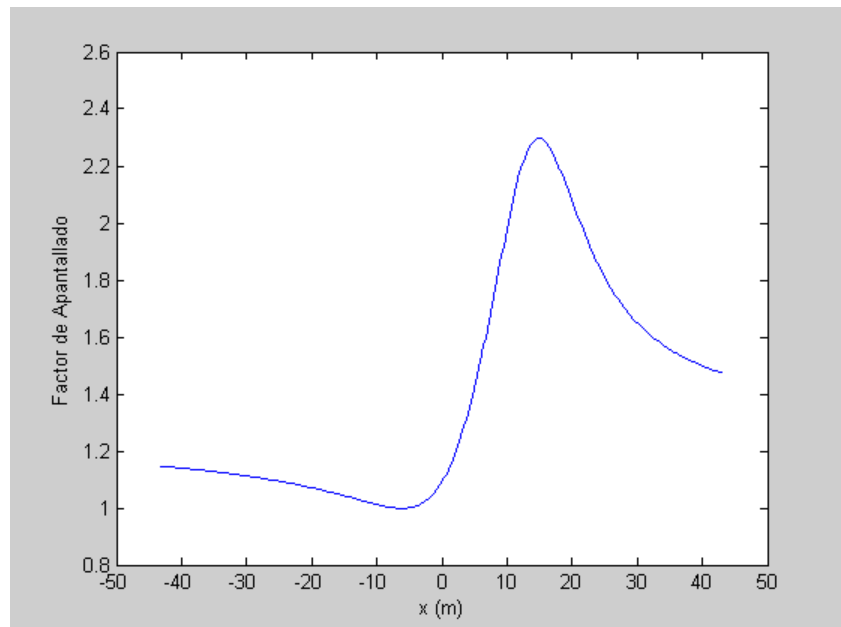


Figura 6.10 Factor de reducción para lazo doble activo

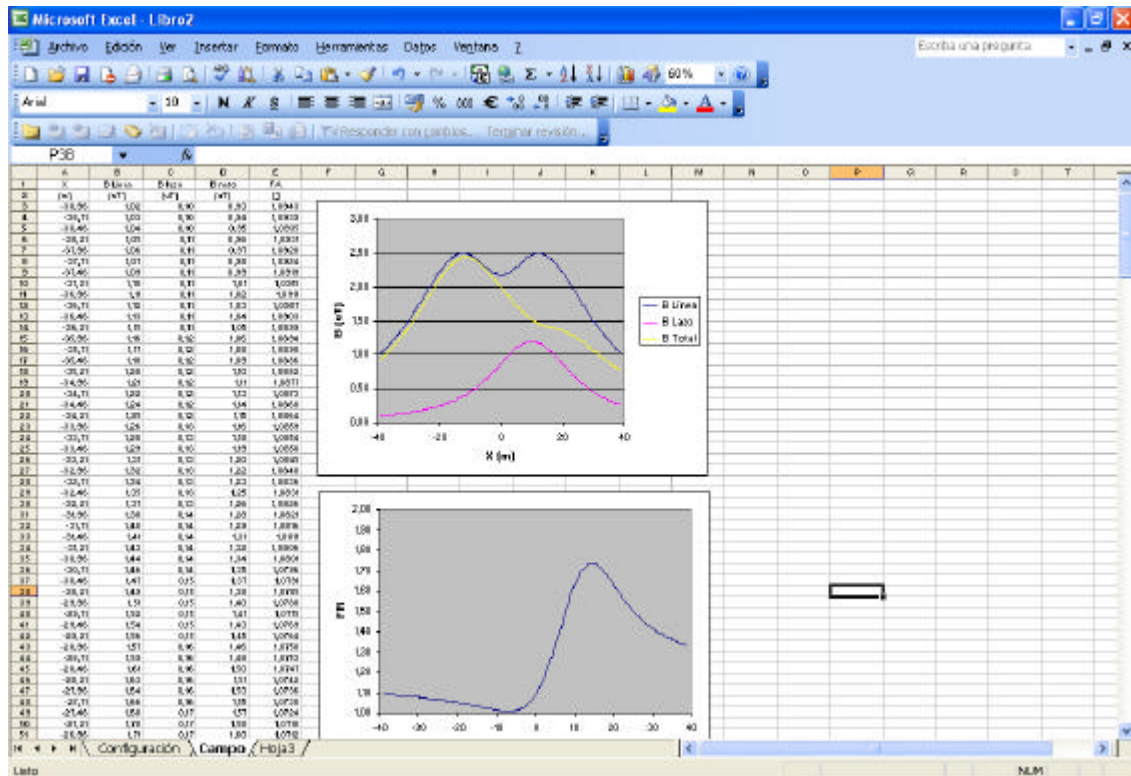


Figura 6.12 Hoja de resultados y gráficas del informe de Excel.

Capítulo 7. Conclusiones y futuras líneas de investigación.

En este proyecto se ha analizado el cálculo del campo magnético generado por líneas eléctricas aéreas de alta tensión y su mitigación mediante lazos, para lo que se han propuesto lazos activos y pasivos.

En el capítulo 2 se vio que, debido a las hipótesis de cálculo asumidas, era de esperar que el error cometido cerca del centro del vano fuese pequeño, creciendo rápidamente conforme nos acercábamos a los extremos del mismo, donde alcanzaba valores inaceptables a todas luces. Por el contrario, el error cometido al sustituir las fases compuestas por sus equivalentes simples era despreciable, incluso a pequeñas distancias transversales de la línea.

En cuanto a la idoneidad del tipo de lazo, a la hora de plantear una reducción del campo deslocalizada (entendiendo como tal que no nos ceñimos a un área concreta sino que buscamos minimizar el campo en general en todo el plano) son preferibles los lazos pasivos, mientras que si perseguimos reducir el campo en una zona concreta son preferibles los activos, ya que permiten disminuir el campo en las cercanías de un punto a elección del usuario.

Las principales limitaciones por las que se ve afectado este proyecto son, por tanto, el error cometido al alejarnos del centro del vanos en dirección longitudinal a la línea (consecuencia de la adopción del modelo de conductor rectilíneo infinito) y la

realización de cálculos en 2-D. Por tanto una primera línea de investigación y/o futura mejora sería realizar la implementación en 3-D, para lo cual se podría enfocar el modelo de conductor definido por la catenaria, sin adoptar simplificaciones.

Otra línea de mejora sería desarrollar el software en un entorno de desarrollo más actual, y sobre todo no tan limitado en cuanto a las operaciones matemáticas en el plano complejo y matricial, máxime cuando el problema que se va a abordar es 3-D. Lo ideal sería que este nuevo entorno de desarrollo no careciera de la facilidad para crear la parte de interacción con el usuario que proporciona Visual Studio.

Una tercera línea de mejora va encaminada en el sentido de la función de optimización realizada por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla. En efecto, del breve estudio realizado al final del capítulo 3, se pudo constatar que de los dos parámetros que definen a un lazo simple (distancia entre conductores s y altura h) los máximos factores de reducción se alcanzaban alrededor de unos rangos determinados de dichos parámetros, siendo claramente ineficientes en el resto de combinaciones.

Ello sugiere que quizás se deba restringir el proceso de optimización al entorno de unos valores de s y h que estarán en función de la geometría del problema (más concretamente de las líneas) consiguiendo así un notable ahorro de tiempo y esfuerzo en la determinación del óptimo.

Apéndice A. Diagramas de flujo de MitLoop

En este anexo se presentan los diagramas de flujo de los bloques en que se ha estructurado MitLoop. Aunque no es estrictamente necesario conocer este apéndice para el manejo diario de MitLoop, resulta de gran ayuda llegado el momento de ampliar la funcionalidad del programa, y también para seguir la traza de la ejecución en posibles depuraciones futuras.

Al estar programado en un entorno de desarrollo orientado a eventos, no es posible resumir el funcionamiento en un diagrama de flujo lineal (monodimensional). Por ello, no hay otra alternativa que descomponer el funcionamiento del programa en subprocesos que ocurran consecutivamente en el tiempo, y hacer diagramas de flujo parciales de cada uno de ellos partiendo desde una situación por defecto, que será el módulo principal.

A.1 Diagrama de flujo de inicio del programa

El diagrama de flujo que se adjunta en la siguiente página representa las acciones que MitLoop ejecuta desde que se arranca el programa hasta que se llega a la ventana principal.

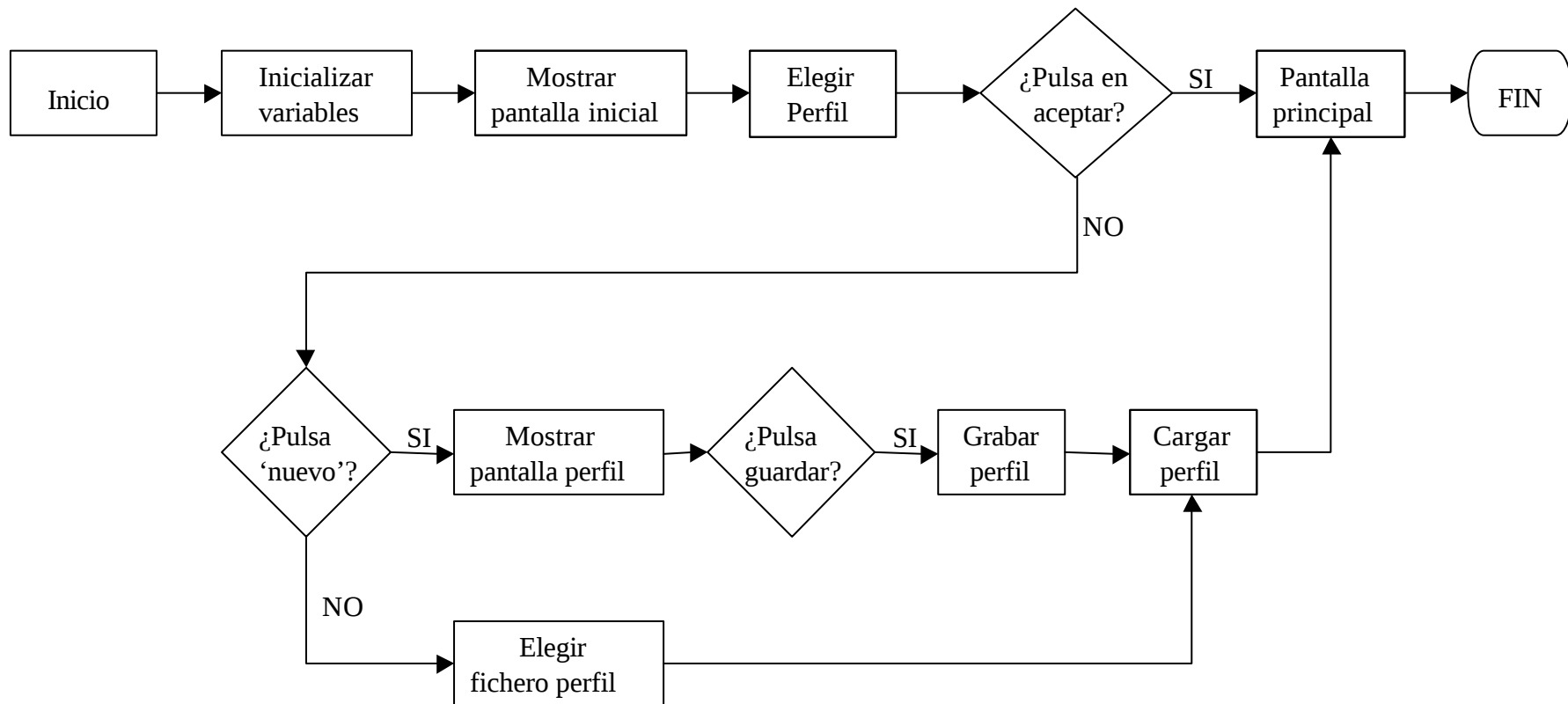


Diagrama B.1. Flujo de inicio del programa.

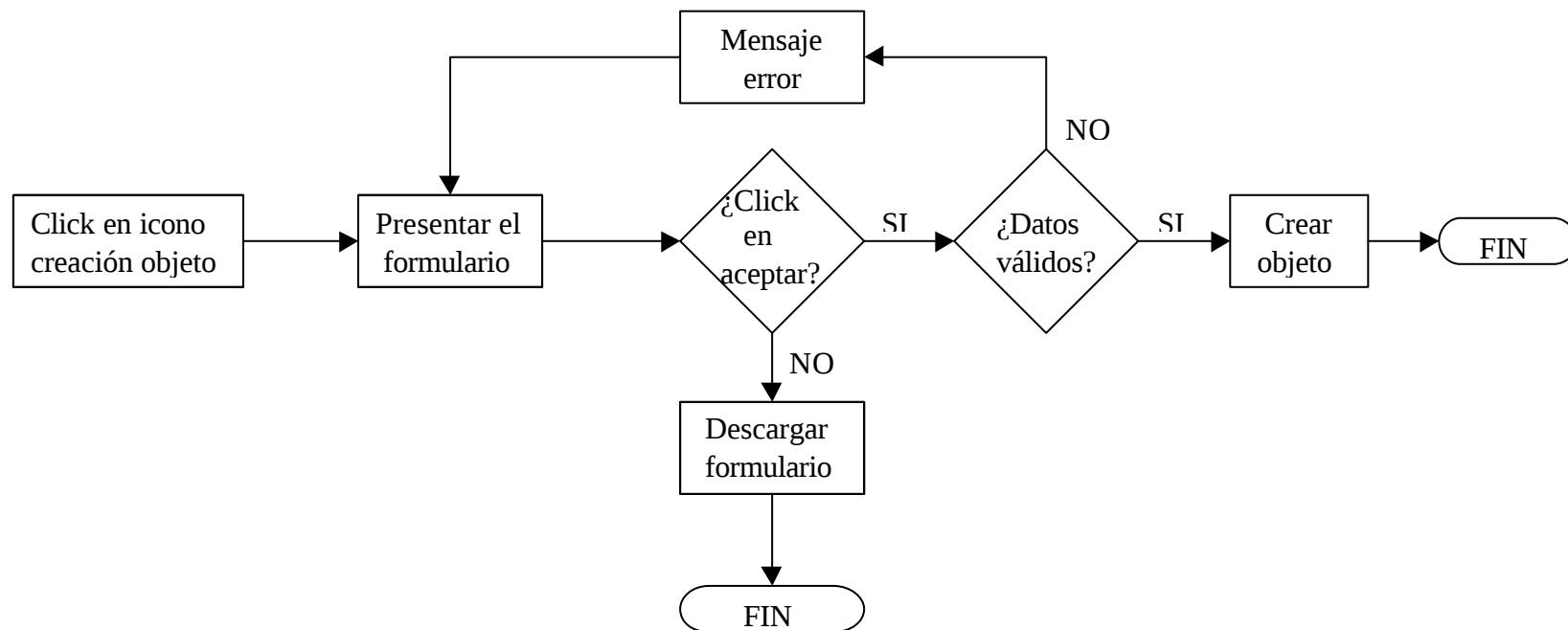


Diagrama B.2. Flujo de creación de objeto

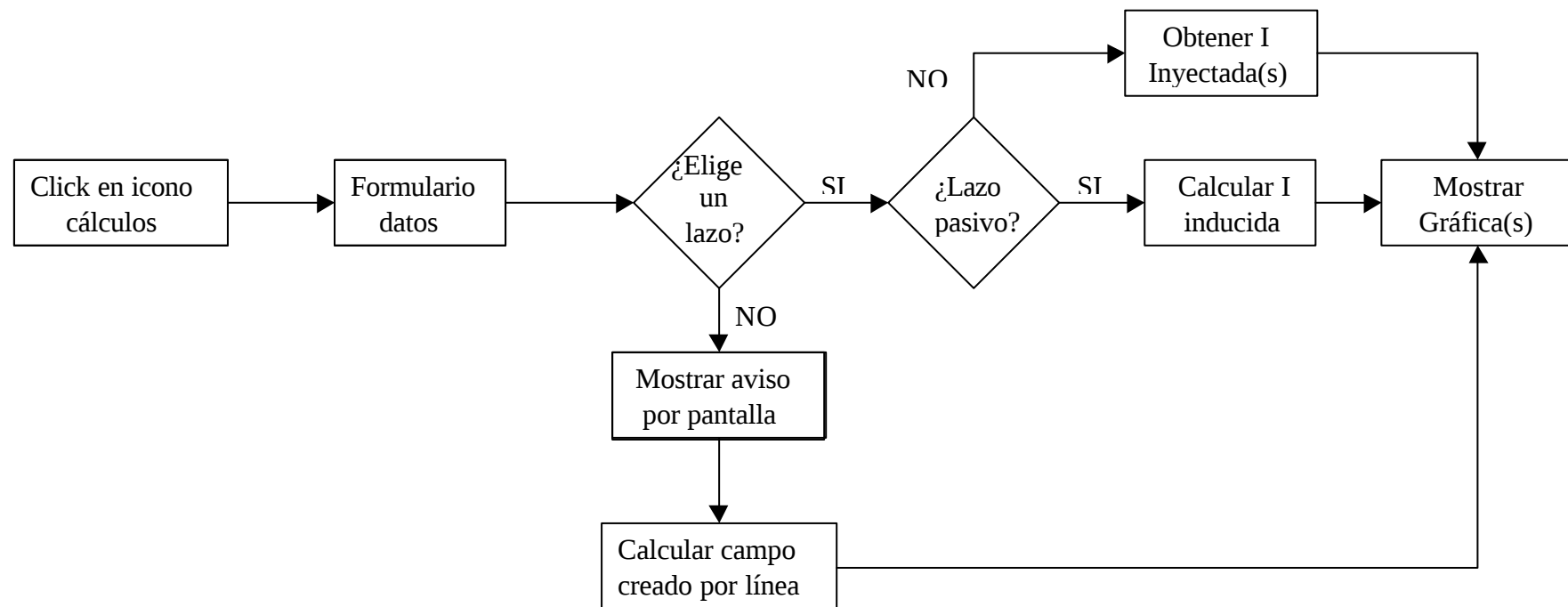


Diagrama B.3. Llamada a cálculos

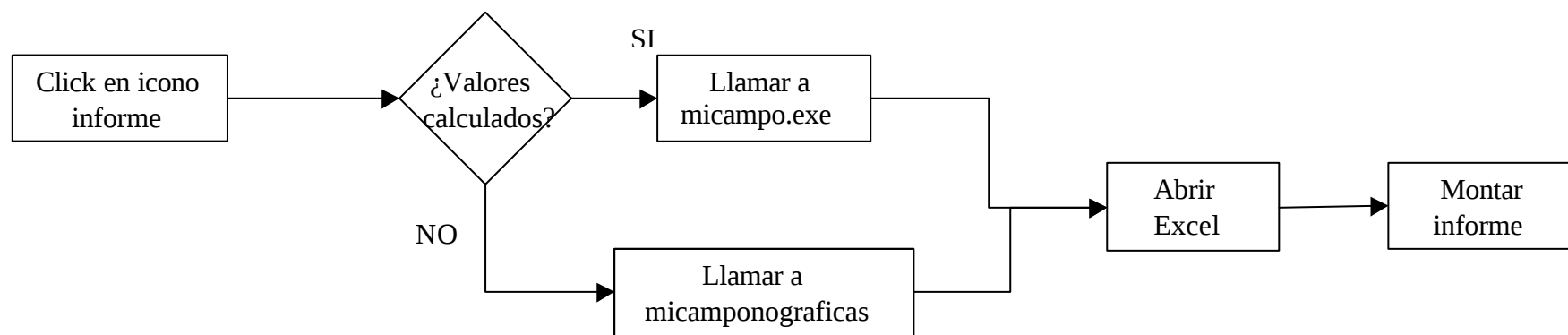


Diagrama B.4. Llamada a informe

Anexo B

Cálculo de la impedancia equivalente por conductor en el caso de lazos pasivos dobles con conductor común.

Sean 1,2,3 los conductores de lazo y a,b,c los de fase. El valor de las impedancias propias y mutuas de los conductores del lazo será ahora:

$$Z_{ii} = R_i + j\omega \frac{m_0}{2p} \ln \frac{D}{rgm_i} - j \frac{1}{\omega C_i} \quad i, j = 1,2,3 \quad (B.1)$$

$$Z_{ij} = j\omega \frac{m_0}{2p} \ln \frac{D}{d_{ij}} \quad i, j = 1,2,3 \quad (B.2)$$

La tensión inducida en el conductor i debido a los conductores de fase es:

$$V_i = -j\omega \frac{m_0}{2p} \left(I_a \ln \frac{D}{d_{ia}} + I_b \ln \frac{D}{d_{ib}} + I_c \ln \frac{D}{d_{ic}} \right) \quad (B.3)$$

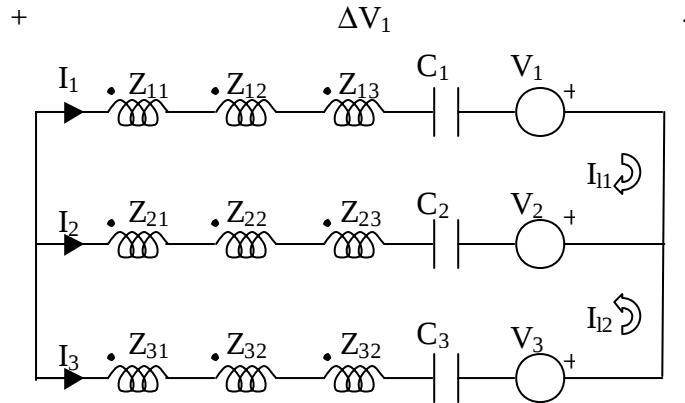


Figura B.1 Circuito original

Notas:

- Los condensadores C1, C2 y C3 permiten compensar la inductancia propia y mutua entre conductores.
- Las impedancias y tensiones son por unidad de longitud.
- Las capacidades tienen como unidad F·m, por lo que el valor de la capacidad final del condensador a instalar será:

$$C_i = C_{i,real} \cdot \text{longitud lazo} \quad (B.4)$$

La configuración equivalente que queremos hallar es:

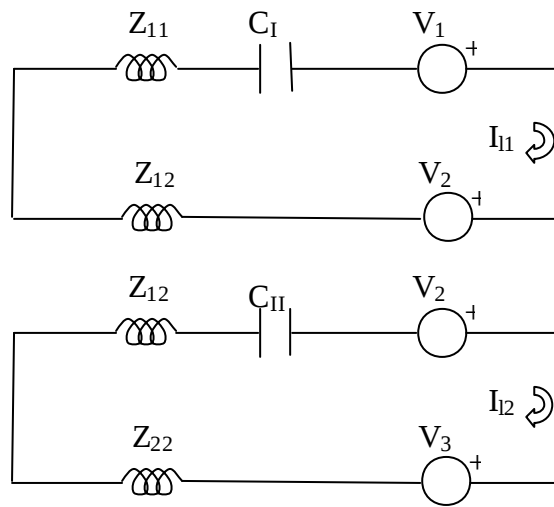


Figura B.2 Circuito equivalente por lazo

Las ecuaciones que imponemos son las de igualdad de caídas de tensión por las distintas ramas que componen el circuito. Así:

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 \quad (B.5)$$

$$\Delta V_2 = \Delta V_3 \quad (B.6)$$

Desarrollando (B.5) Y (B.6):

$$Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + Z_{13}I_3 - V_1 = Z_{12}I_1 + Z_{22}I_2 + Z_{23}I_3 - V_2 \quad (B.7)$$

$$Z_{33}I_3 + Z_{23}I_2 + Z_{13}I_1 - V_3 = Z_{12}I_1 + Z_{22}I_2 + Z_{23}I_3 - V_2 \quad (B.8)$$

Las relaciones entre intensidades de conductor y de lazo son:

$$I_1 = I_{l,1} \quad (B.9)$$

$$I_3 = I_{l,2} \quad (B.10)$$

$$I_2 = -I_{l,1} - I_{l,2} \quad (B.11)$$

Sustituyendo (B.8), (B.9) y (B.10) en (B.6) y (B.7):

$$Z_{11}I_{l,1} - Z_{12}(I_{l,1} + I_{l,2}) + Z_{13}I_{l,2} - V_1 = Z_{12}I_{l,1} - Z_{22}(I_{l,1} + I_{l,2}) + Z_{23}I_{l,2} - V_2 \quad (B.12)$$

$$Z_{33}I_{l,1} - Z_{23}(I_{l,1} + I_{l,2}) + Z_{13}I_{l,1} - V_3 = Z_{12}I_{l,1} - Z_{22}(I_{l,1} + I_{l,2}) + Z_{23}I_{l,2} - V_2 \quad (B.13)$$

$$(Z_{11} + Z_{22} - 2 \cdot Z_{12})I_{l,1} + (Z_{13} - Z_{23} - Z_{12} + Z_{22})I_{l,2} = V_1 - V_2 \quad (B.14)$$

$$(Z_{33} + Z_{22} - 2 \cdot Z_{23})I_{l,2} + (Z_{13} - Z_{23} - Z_{12} + Z_{22})I_{l,1} = V_3 - V_2 \quad (B.15)$$

Así, definiendo:

$$\begin{bmatrix} Z_{11,l} & Z_{12,l} \\ Z_{12,l} & Z_{22,l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{l,1} \\ I_{l,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{1,l} \\ V_{2,l} \end{bmatrix} \quad (B.16)$$

tenemos, finalmente:

$$Z_{11,l} = Z_{11} + Z_{22} - 2 \cdot Z_{12} = 2 \cdot R_1 + j\omega \frac{m_0}{p} \ln \frac{d_{12}}{rgm} - \frac{1}{j\omega} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \quad (B.17)$$

$$Z_{22,l} = Z_{22} + Z_{33} - 2Z_{23} = 2R_1 + j\omega \frac{m_0}{p} \ln \frac{d_{23}}{rgm} - j \frac{1}{\omega} \left(\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right) \quad (B.18)$$

$$Z_{12,l} = Z_{13} + Z_{23} - Z_{12} + Z_{22} = R_1 + j\omega \frac{m_0}{2p} \ln \frac{d_{12}d_{23}}{d_{13}rgm} - j \frac{1}{\omega C_2} \quad (B.19)$$

donde se ha supuesto $rgm_1=rgm_2=rgm_3=rgm$ y $R_1=R_2=R_3$, ya que es lo habitual.