

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción. | 7 |
| I Estudio teórico. | 11 |
| 2. Cálculo Teórico del campo magnético Creado por una Línea Aérea. | 13 |
| 2.1. Introducción. | 13 |
| 2.2. campo magnético creado por un conductor. | 13 |
| 2.2.1. campo magnético creado por un conductor rectilíneo. . . | 17 |
| 2.3. campo magnético creado por una línea con n conductores. . . . | 18 |
| 2.4. campo magnético creado por corrientes alternas. | 19 |
| 2.4.1. Elipses de inducción. | 21 |
| 2.4.1.1. Semiejes de la elipse de inducción. | 21 |
| 2.4.2. Representación gráfica de las elipses de inducción. | 22 |
| 2.5. Campos Magnéticos creados por dipolos eléctricos. | 23 |
| 3. Compensación del campo magnético Mediante Lazos Activos. | 27 |
| 3.1. Introducción. | 27 |
| 3.2. Métodos de compensación mediante lazos. | 28 |
| 3.2.1. Mitigación mediante lazos pasivos. | 28 |
| 3.2.2. Cálculo de la corriente inducida en el lazo. | 30 |
| 3.3. Mitigación mediante lazos activos. | 32 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| II | Cálculo y Diseño del Lazo de Corriente. | 35 |
| 4. | Objetivos y Alcance del Proyecto. | 37 |
| 4.1. | Introducción. | 37 |
| 4.2. | Campos Magnéticos y Salud. | 37 |
| 4.3. | Influencia de los Campos Magnéticos en el funcionamiento de equipos electrónicos. | 40 |
| 4.4. | Planteamiento del problema. Objetivos. | 40 |
| 4.5. | Procedimientos de mitigación. | 41 |
| 5. | Análisis y Determinación de la Configuración Óptima del La- zo. | 43 |
| 5.1. | Introducción. | 43 |
| 5.2. | Valores de carga de la línea Don Rodrigo–Pinar del Rey. | 45 |
| 5.2.1. | Monótona de consumo. | 48 |
| 5.3. | campo magnético generado por la Línea Don Rodrigo–Pinar del Rey en sus proximidades. | 49 |
| 5.4. | Criterios para selección y consideración de las soluciones. | 51 |
| 5.5. | Optimización para lazo de corriente vertical. | 54 |
| 5.5.1. | Análisis de lazos de corriente ubicados en posiciones próximas a la Red. | 57 |
| 5.5.2. | Ubicación del lazo en puntos intermedios entre el Punto de Medida y la Línea. | 63 |
| 5.5.3. | Ubicación del lazo en puntos próximos a la zona de estudio. | 71 |
| 5.5.4. | Ubicación del lazo en posiciones más alejadas de la línea que la Zona de Estudio. | 76 |
| 5.5.5. | Lazo de corriente dispuesto en posiciones $x > 0$ | 77 |
| 5.6. | Optimización para lazo de corriente horizontal. | 78 |
| 5.7. | Conclusiones y elección de la configuración óptima del lazo. | 80 |
| 5.7.1. | Comportamiento frente a variaciones de carga de la línea. | 80 |
| 5.8. | Apoyos del lazo de corriente. | 81 |
| 6. | Análisis del Consumo de Potencia. Compensación de Reacti- va. | 83 |
| 6.1. | Introducción. | 83 |
| 6.2. | Potencias para la Carga de Diseño. | 84 |
| 6.2.1. | Longitud del lazo. | 84 |
| 6.2.2. | Expresiones de cálculo. | 85 |
| 6.2.3. | Lazo de corriente con conductor Cardinal (LA-545). | 87 |

| | |
|---|------------|
| 6.2.4. Lazo de corriente con conductor Cóndor (LA-455). | 88 |
| 6.2.5. Lazo de corriente con conductor LA-180. | 89 |
| 6.2.6. Lazo de corriente con conductor LA-110. | 90 |
| 6.2.7. Resumen y conclusiones. | 90 |
| 6.3. Potencias para la Carga Máxima. | 91 |
| 6.4. Establecimiento de las condiciones de operación máximas. | 92 |
| 6.5. Coste de los conductores. | 94 |
| 6.6. Estrategias de compensación de reactiva. | 94 |
| 6.6.1. Criterio de evaluación de los costes parciales. | 99 |
| 6.6.2. Compensación serie: Modalidad A. | 101 |
| 6.6.3. Compensación serie: Modalidad B. | 102 |
| 6.6.4. Compensación paralelo. | 103 |
| | |
| 7. Análisis, Cálculo y Diseño del Medidor de Flujo Magnético. | 107 |
| 7.1. Introducción. Conceptos básicos. | 107 |
| 7.2. Relación funcional entre fuerza electromotriz de los sensores, y Campo Magnético. | 109 |
| 7.3. Diseño del esquema electrónico del medidor de flujo. | 111 |
| 7.4. Cálculo y diseño del filtro Paso-Bajo. | 113 |
| 7.5. Cálculo y diseño de las bobinas de medida. | 115 |
| 7.6. Componentes necesarios para la construcción del medidor de flujo. | 116 |
| | |
| 8. Diseño del Módulo de Análisis y Regulación. | 119 |
| 8.1. Introducción. | 119 |
| 8.2. Combinaciones posibles en las secuencias de fase de la línea, y análisis de las elipses de inducción. | 121 |
| 8.2.1. Herramienta de simulación “Elipses de Inducción”. | 123 |
| 8.2.2. Elipses de inducción para las diferentes combinaciones de las secuencias de fase. | 126 |
| 8.3. Análisis y tratamiento de las magnitudes obtenidas por el me- didor de flujo. | 135 |
| 8.3.1. Relación funcional entre las f.e.m. medidas y el grupo de secuencias de fase. | 136 |
| 8.4. Adimensionalización de los parámetros de selección respecto de las corrientes de línea. | 141 |
| 8.4.1. Correlación polinómica para aproximación de las curvas de los semiejes de la elipse. | 143 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 8.4.2. | Reducción del número de parámetros implicados en la correlación. | 145 |
| 8.5. | Uso y aplicación de las correlaciones. | 147 |
| 8.6. | Estudio de las posibilidades de correlación de las magnitudes medidas en un punto respecto a otro. | 147 |
| 8.7. | Conclusiones. | 149 |
| 9. | Cálculo y Diseño del Sistema de Alimentación y Control del Lazo. | 151 |
| 9.1. | Introducción. Modelo básico de alimentación y regulación. . . . | 151 |
| 9.2. | Cálculo de la instalación solar fotovoltaica. | 153 |
| 9.2.1. | Ubicación e inclinación de los módulos. | 153 |
| 9.2.2. | Cálculo de la instalación solar fotovoltaica. | 153 |
| 9.3. | Inversor DC-AC. | 156 |
| 9.3.1. | Parámetros de la modulación SPWM. | 158 |
| 9.3.2. | Selección de la estrategia de disparo. | 166 |
| 9.3.3. | Aplicación a la situación expuesta. | 167 |
| 9.3.4. | Modulación por corriente regulada. | 168 |
| 9.3.5. | Etapas del inversor. | 170 |
| 9.3.6. | Etaapa inversora. | 170 |
| 9.3.6.1. | Niveles de variación de las señales de control y referencia. | 172 |
| 9.3.6.2. | Señales de disparo. | 172 |
| 9.3.7. | Etaapa amplificadora. | 174 |
| 9.4. | Simulación del Inversor | 174 |
| 9.4.1. | Esquema principal del circuito de simulación. | 176 |
| 9.4.2. | Generación de las señales de control del inversor. | 177 |
| 9.4.3. | Compensación de reactiva. Control de la batería mediante la tensión de salida. | 179 |
| 9.4.4. | Esquema para el estudio de armónicos. | 179 |
| 9.5. | Resultados y representaciones gráficas. | 181 |
| 9.6. | Estudio de armónicos. | 188 |
| 9.7. | Tarjeta Controladora DSP. | 190 |
| 10. | Equipos y Componentes: Descripción y Características. | 193 |
| 10.1. | Módulo fotovoltaico BP-250. | 193 |
| 10.2. | Baterías acumuladoras CONCORDE. | 198 |
| 10.3. | Cables para las baterías. | 200 |

| | |
|---|------------|
| 10.4. Caja de combinadores y supresores de rayos. | 202 |
| 10.5. Tarjeta Controladora ezDSP TMS320LF2407 (SPECTRUM DIGITAL). | 204 |
| 10.6. Amperímetro bimetálico BIQC. | 204 |
| 11. Presupuesto Estimado. | 211 |
| | |
| III Apéndices | 215 |
| | |
| A. Código fuente de la herramienta “Elipses de Inducción”. | 217 |
| A.1. Módulo ModCalculos.bas. | 217 |
| A.2. Módulo modFO.bas. | 226 |
| A.3. Formulario Form1.frm (extracto). | 233 |
| A.4. Formulario frmFO.frm (extracto). | 238 |
| | |
| B. Código Fuente del Programa de Cálculo de Campos Magnéticos M.I.T. | 241 |
| B.1. Formulario mit.frm. | 241 |
| B.2. Formulario opt.frm. | 260 |
| B.3. Formulario log.frm. | 263 |
| B.4. Módulo CampoMagnetico.bas. | 265 |
| B.5. Módulo CampoLinea.bas (extracto). | 268 |
| | |
| C. Programa para Cálculo de Potencias. | 273 |
| C.1. Corrección para el cálculo de la inductancia propia del lazo. . . | 278 |
| | |
| D. Datos necesarios para el diseño de la instalación solar fotovoltaica. | 279 |
| D.1. Unidades utilizadas en cálculos de instalación fotovoltaica. . . . | 279 |
| D.2. Tabla de valores de radiación en la provincia de Sevilla. | 280 |

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN.

En 1831, Faraday realizó un experimento que cambiaría la historia del hombre. Enrolló una bobina de cable en torno a un segmento de un anillo de hierro, y una segunda bobina alrededor de otro segmento de anillo. Luego conectó la primera a una batería. Su razonamiento era que si enviaba una corriente a través de la primera bobina, crearía líneas magnéticas de fuerza, que se concentrarían en el anillo de hierro, en la segunda bobina. El experimento no se desarrolló tal como había imaginado Faraday. El flujo de corriente en la primera bobina no generó nada en la segunda. Pero Faraday observó que en el momento en que conectaba la corriente, el galvanómetro se movía lentamente, y hacía lo mismo, aunque en dirección opuesta, cuando cortaba la corriente. En seguida comprendió que lo que creaba la corriente era el movimiento de las líneas magnéticas de fuerza a través del cable, y no el magnetismo propiamente dicho.

ISAAC ASIMOV
(Nueva guía de la Ciencia)

Este Proyecto Fin de Carrera trata acerca de un modelo funcional para la mitigación de campos magnéticos en zonas próximas a una línea eléctrica de alta tensión, concretamente la línea Don Rodrigo–Pinar del Rey.

La presencia de campos magnéticos en las inmediaciones de una línea eléctrica, como consecuencia de las corrientes que circulan por la misma, pueden resultar molestos desde el punto de vista meramente técnico (interferencias con equipos de comunicación, malfuncionamiento de aparatos eléctricos o electrónicos, etc.) o desde un enfoque sanitario (la posibilidad de que los campos magnéticos puedan ser origen de cánceres linfáticos o de otra índole). Éste

es el motivo por el cual surge la necesidad de diseñar un sistema que sea capaz de mitigar los niveles de campo magnético en una determinada zona o región, en la cual se desean limitar éstos.

El cuerpo principal del texto está estructurado en dos partes bien diferenciadas.

En la primera parte, bajo el título ‘Estudio Teórico’, se recogen en dos capítulos los fundamentos básicos en los que se basará el diseño del compensador de Campo.

En el capítulo 2 se introducen las expresiones que se emplearán para calcular los valores del campo magnético generado por la línea eléctrica en un determinado punto, así como la evolución de los mismos, tanto temporal como espacialmente.

Posteriormente, en el capítulo 3 se presentan los métodos de compensación de campos magnéticos mediante el empleo de lazos. El método de compensación mediante lazos pasivos resulta de especial interés puesto que éste introduce casi todos los elementos que se verán involucrados en el método de compensación mediante lazos activos, que será el que se adopte como solución en este proyecto.

La segunda parte, mucho más extensa, comprende aquellos capítulos relacionados con el cálculo y diseño del sistema de mitigación, así como de la aplicación directa a la situación concreta a la que se desea dar solución.

De tal modo, en el capítulo 4 se describen los motivos que impulsan a la realización del proyecto, así como las condiciones de contorno que habrán de tenerse presentes a la hora de formular y resolver el problema de forma adecuada.

El capítulo 5 es el más extenso y uno de los más importantes, puesto que en él se recoge el proceso de análisis de la ubicación del lazo de forma que éste optimice los niveles de mitigación del campo magnético en la denominada ‘zona de estudio’. Para ello, se ha desarrollado una herramienta auxiliar capaz de analizar cientos de miles de posibles soluciones de disposición del lazo (no sólo la ubicación del mismo en el emplazamiento respecto de la línea, sino también la altura y separación que habrán de presentar los conductores del lazo), eligiendo de entre ellas aquellas que cumplen una serie de restricciones (niveles de mitigación superiores o iguales a un determinado valor umbral).

En el capítulo 6 se calcula el consumo de potencia por parte del lazo de corriente, y se estudia la posibilidad de empleo de un lazo de corriente con múltiples ‘arrollamientos’, sopesando de esta forma la posibilidad de empleo de conductores de menor sección y por lo tanto menores pérdidas, a costa

de un mayor número de vueltas del mismo (más longitud de conductor). En este capítulo, además, se analizará el problema de compensación de reactiva, así como las alternativas para afrontarlo.

En el capítulo 7 se realiza el diseño del medidor de flujo que se empleará para obtener las medidas de campo magnético que serán enviadas a la tarjeta procesadora DSP. El funcionamiento de este medidor de flujo será fundamentalmente como sensor: tomará medidas del campo magnético y las transmitirá al bloque de control del lazo para su actuación en consecuencia.

En el capítulo 8 se presentan los cálculos y análisis necesarios para, a partir de las señales procedentes de los sensores (sensor de corriente en el lazo y medidor de flujo desarrollado en el capítulo 7), obtener los valores de la corriente que habrá que suministrar al lazo para mantener el funcionamiento óptimo del mismo. Éste, por lo tanto, corresponderá con el esquema que habrá de seguir el programa que se le vuelque a la tarjeta DSP para análisis y generación de señales.

El capítulo 9 también es de suma importancia, puesto que en él se calcula y diseña todo el sistema de alimentación y control del lazo, prestando especial atención al inversor que se utilizará para adaptar las formas de onda de tensión y corriente a la entrada del lazo. Se analizará también el conexionado del inversor con la tarjeta DSP, así como el cableado entre ésta y los diferentes sensores que intervendrán en el equipo. También se establecerán las dimensiones y requerimientos correspondientes a la instalación solar fotovoltaica: número de paneles, capacidad de las baterías acumuladoras, etc.

En el capítulo 10 se introducirán las características y especificaciones técnicas de los diferentes componentes de que constará el sistema completo compensador de flujo.

Por último, se incluyen los apéndices que contendrán información adicional de importancia utilizada durante la elaboración del proyecto.

En el apéndice A se incluye el código fuente del programa realizado para la obtención de las elipses de inducción del capítulo 8.

En el apéndice B se muestra el código correspondiente al programa de cálculo de niveles de mitigación M.I.T. empleado para analizar y optimizar la ubicación y configuración del lazo de corriente, en el capítulo 5.

En el apéndice C se presentan las rutinas empleadas para el cálculo de las potencias consumidas por el lazo, de las que se hace uso en el capítulo 6.

Finalmente, en el apéndice D se incluye la tabla de radiación solar correspondiente a la provincia de Sevilla, empleada en el capítulo 9 para establecer la inclinación adecuada de los paneles fotovoltaicos. Además, se incluyen al-

Introducción

gunos datos de interés relacionados con la conversión de unidades utilizadas habitualmente en el campo de la energía solar.

Por supuesto, se acompaña una lista de referencias bibliográficas donde encontrar más información sobre la materia, así como las fuentes utilizadas para el desarrollo del proyecto. A lo largo del texto están indicadas las referencias que se han usado para elaborarlo.

Vera, Diciembre de 2003

Parte I
Estudio teórico.

Capítulo 2

CÁLCULO TEÓRICO DEL CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UNA LÍNEA AÉREA.

2.1. Introducción.

En este capítulo, el objetivo será proceder con el cálculo teórico, a nivel general, del campo magnético producido por la circulación de corriente a lo largo de una línea aérea. La idea es llegar a una solución matemática que modele de forma aceptable tal magnitud, con la finalidad de aplicar los resultados aquí obtenidos al caso particular que se tratará en el presente proyecto.

De tal forma, haciendo uso de los resultados que se obtengan en este capítulo, se determinará el campo magnético generado por la línea aérea que se considere aprovechando para ello los resultados que se obtengan en lo sucesivo.

2.2. campo magnético creado por un conductor.

Se comenzará, según lo indicado anteriormente, calculando el Campo Magnético generado por una línea aérea integrada por un único conductor, con el objetivo de llegar al resultado deseado partiendo de supuestos lo más sencillos posible. Para ello se considerará, a efectos de cálculo, un solo vano de la línea aérea. De tal forma, despreciaremos en cada punto el efecto del campo magnético producido en él por el resto de la línea, así como el efecto del suelo.

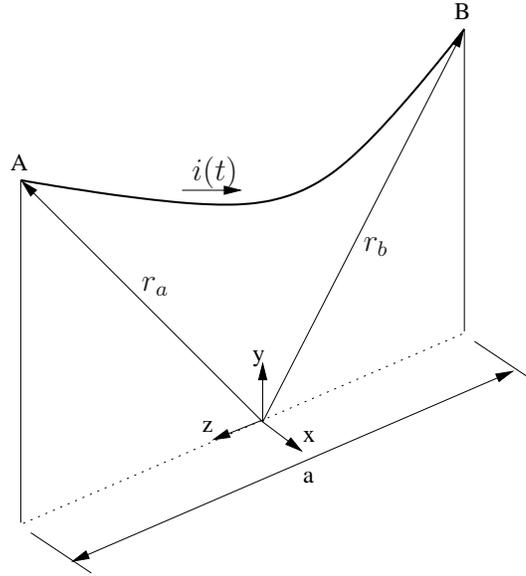


Figura 2.1: Vano básico considerado: corriente del conductor.

Se denominará a a la longitud del vano; h será la altura mínima del conductor con respecto al suelo, que, si los apoyos se encuentran nivelados, se dará justo en el centro del vano (a una distancia $a/2$ de cada apoyo). La flecha máxima del conductor será denominada f_m , y evidentemente también se dará en este mismo punto. La altura de los apoyos, h_a vendrá dada por tanto como la suma $h_a = h + f_m$.

La expresión de la que se partirá para calcular el campo magnético generado por el conductor de la figura 2.1, será la dada por la ley de Biot–Savart. Esta expresión permite calcular el campo magnético creado por el segmento de conductor comprendido entre dos puntos determinados. La forma matemática de esta ley viene dada por

$$\vec{B}_i(x, y, z, t) = \frac{\mu_o}{4 \cdot \pi} \int_{\vec{r}_a}^{\vec{r}_b} \frac{i_i(t) \cdot d\vec{r}_i \wedge (\vec{r} - \vec{r}_i)}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3} \quad (2.1)$$

donde $\vec{r} = (x, y, z)$ es el vector de posición del punto donde se desea calcular el campo magnético; $(\vec{r} - \vec{r}_i)$ es el vector que representa la distancia entre el punto de estudio y cada punto del conductor; μ_o es la permeabilidad magnética del vacío ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$); $i_i(t)$ es la intensidad que recorre el conductor, positiva en el sentido desde \vec{r}_a a \vec{r}_b .

Como se supondrá que la intensidad que circula por el conductor, $i_i(t)$, es

constante en el tiempo, se simplificará la notación denominándola como I_i .

Por tratarse de una línea aérea, la geometría del conductor vendrá dada por la expresión de la catenaria:

$$y_i = L \cdot \cosh\left(\frac{z_i}{L}\right) \quad (2.2)$$

siendo L la constante de la catenaria.

Teniendo presentes estas últimas consideraciones, a la hora de sustituir en la ecuación de Biot–Savart se obtendrán los siguientes términos:

$$d\vec{r}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \sinh(z_i/L) \\ 1 \end{bmatrix} \cdot dz_i \quad (2.3)$$

$$(\vec{r} - \vec{r}_i) = \begin{bmatrix} x \\ y - L \cosh(z_i/L) \\ z - z_i \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

con lo cual, el producto vectorial queda:

$$d\vec{r}_i \wedge (\vec{r} - \vec{r}_i) = \begin{bmatrix} (z - z_i) \cdot \sinh(z_i/L) - y + L \cdot \cosh(z_i/L) \\ x \\ -x \sinh(z_i/L) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

de forma que sustituyendo en (2.1) se obtiene:

$$\vec{B}_i(x, y, z) = \frac{\mu_o \cdot I_i}{4 \cdot \pi} \int_{z_A}^{z_B} \frac{1 \cdot d\vec{r}_i \wedge (\vec{r} - \vec{r}_i)}{[x^2 + (y - L \cosh(z_i/L))^2 + (z - z_i)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (2.6)$$

La resolución de la integral que figura en la expresión (2.6) resulta difícil y complicada debido a que el denominador dista mucho de ser lineal (evidenciado por la presencia de cosenos hiperbólicos al cubo). Ésto obliga a que el proceso de resolución que se adopte deba ser numérico.

Estas dificultades matemáticas hacen que se adopte como estrategia de resolución la consideración del conductor entre los dos apoyos como un elemento rectilíneo (evitando de este modo el modelado del cable mediante la catenaria). Además, para reducir en la medida de lo posible los errores de cálculo cometidos con esta aproximación, se considerará éste a una altura igual en cada momento

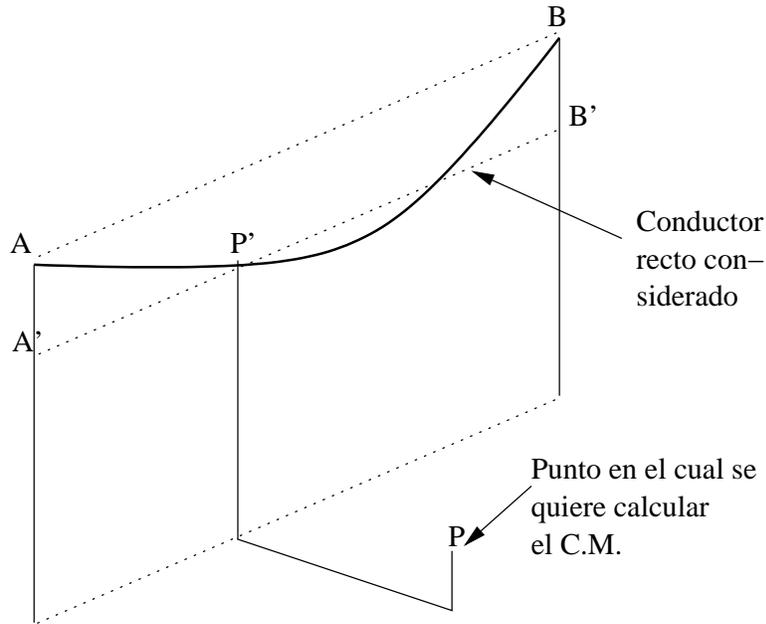


Figura 2.2: Vano básico considerado: consideración del conductor rectilíneo.

a la de la catenaria correspondiente a la coordenada z del punto en que se calcula el campo magnético. Ésto queda claramente ilustrado en la figura (2.2).

En virtud de lo comentado anteriormente, y observando la figura (2.2), si se quiere calcular el campo magnético que produce la línea en un punto P , se considerará como conductor de cálculo el rectilíneo correspondiente a los extremos A' y B' , a la altura de P' .

El motivo de efectuar esta aproximación con respecto a considerar la curva exacta de la catenaria es el hecho empírico de que en la realidad los valores de L son tales que la flecha en la catenaria es de un orden de magnitud mucho menor que la propia longitud del vano. Ésto se pone de manifiesto en la tabla siguiente.

| Vano (m) | Parámetro L (m) | Flecha máxima, vano a nivel (m) |
|----------|-------------------|---------------------------------|
| 300 | 1250 | 9 |
| 400 | 1335 | 15 |
| 400 | 1670 | 12 |

En ella se pone claramente de manifiesto que las longitudes de las flechas máximas son del orden del 3% de las longitudes de los vanos, con lo cual la

componente z de la catenaria será predominante frente a la longitud y , siendo buena la aproximación por conductor rectilíneo anteriormente comentada.

2.2.1. campo magnético creado por un conductor rectilíneo.

Tal y como se ha ido comentando en el presente apartado, se procederá al cálculo aproximado del campo magnético en un punto cercano al conductor, suponiendo para ello que la forma del mismo es completamente recta.

Bajo estas premisas, la expresión del campo magnético se puede obtener, análogamente a como se hizo en (2.6) de la siguiente forma:

$$d\vec{r}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot dz_i \quad (2.7)$$

$$(\vec{r} - \vec{r}_i) = \begin{bmatrix} x - x_i \\ y - y_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$d\vec{r}_i \wedge (\vec{r} - \vec{r}_i) = \begin{bmatrix} -(y - y_i) \\ (x - x_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\vec{B}_i(x, y, z) = \frac{\mu_o \cdot I_i}{4 \cdot \pi \cdot [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2]} \cdot$$

$$\cdot \left[\frac{z_B - z}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z_B - z)^2}} - \frac{z_A - z}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z_A - z)^2}} \right] \cdot$$

$$\cdot \begin{bmatrix} (y_i - y) \\ (x - x_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

La expresión (2.10) aporta una forma explícita de conocer el valor del campo magnético producido por un conductor rectilíneo en cualquier punto próximo a él.

Si se considera el conductor indefinido, es decir, no sólo el segmento comprendido entre los apoyos A y B , haciendo tender z_A a $-\infty$ y z_B a ∞ , el término entre corchetes de (2.10) queda reducido a:

$$\lim_{z_A \rightarrow -\infty} \left\{ \lim_{z_B \rightarrow \infty} Z \right\} = \frac{2}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (2.11)$$

donde el término Z es:

$$Z = \left[\frac{z_B - z}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z_B - z)^2}} - \frac{z_A - z}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z_A - z)^2}} \right]$$

La ventaja que presenta esta nueva simplificación es de suma importancia porque como se puede observar, ahora el campo magnético, bajo esta nueva configuración, no depende de la coordenada z , pudiéndose poner por tanto $\vec{B}_i = \vec{B}_i(x, y)$. De esta forma, el campo magnético en su forma definitiva para un conductor rectilíneo infinito queda como sigue:

$$\vec{B}_i(x, y) = \frac{\mu_o}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{2 \cdot I_i}{[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2]} \cdot \begin{bmatrix} (y_i - y) \\ (x - x_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

2.3. campo magnético creado por una línea con n conductores.

Hasta ahora sólo se ha considerado un conductor como causa y origen del campo magnético en el entorno de una línea. Sin embargo la mayoría de las líneas de transporte se componen de varios conductores (normalmente tres o múltiplo de tres), con lo cual se hace necesario extender el cálculo anterior para el caso de que la línea se componga de más de un conductor.

De tal forma, partiendo de la expresión (2.12) que se obtuvo de la consideración de un único conductor, por extensión se puede llegar a:

- Un único conductor.

La expresión (2.12) se puede escribir en forma compacta como se muestra a continuación:

$$\vec{B}_i(\vec{r}) = \frac{\mu_o}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{I_i \vec{u}_z \wedge (\vec{r} - \vec{r}_i)}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^2} \quad (2.13)$$

donde ya se ha considerado el conductor rectilíneo indefinido.

- Línea compuesta por n conductores.

Extendiendo la expresión anterior para el caso de una línea compuesta por varios conductores rectilíneos indefinidos, se llega al campo magnético total como la superposición de los campos magnéticos de cada uno de los conductores:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \sum_{1 \leq k \leq n} \vec{B}_k(\vec{r}) = \frac{\mu_o}{2 \cdot \pi} \cdot \sum_{1 \leq k \leq n} \frac{I_k \vec{u}_z \wedge (\vec{r} - \vec{r}_k)}{|\vec{r} - \vec{r}_k|^2} \quad (2.14)$$

El problema se complica aún más si se tiene en cuenta que la intensidad real que circula por un conductor no es constante en el tiempo, sino que habitualmente presenta forma de onda senoidal (línea de transporte en alterna a 50 Hz) del tipo:

$$i_k(t) = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_k) \quad (2.15)$$

quedando por lo tanto el campo magnético dependiente también del tiempo como sigue: $\vec{B} = \vec{B}(\vec{r}, t)$.

A continuación se desarrollará una expresión del campo magnético considerando la intensidad de la forma anteriormente impuesta, con el fin de obtener la forma del campo magnético cercano a una línea eléctrica por la que circulan corrientes alternas.

2.4. campo magnético creado por corrientes alternas.

En virtud de lo comentado con anterioridad, se comenzará por poner el vector densidad de flujo (o vector campo magnético) en función de sus componentes según los ejes x e y como sigue:

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \begin{bmatrix} B_x(\vec{r}, t) \\ B_y(\vec{r}, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} \cdot B_x^e(\vec{r}) \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_x) \\ \sqrt{2} \cdot B_y^e(\vec{r}) \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_x) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

El vector anterior se puede escribir de la siguiente forma (considerando que se trata de un vector de componentes reales) como parte real de un vector complejo:

$$\vec{B} = \text{Re} \left\{ \left[\begin{array}{c} \sqrt{2} \cdot B_x^e \cdot e^{j\varphi_x} \cdot e^{j\omega t} \\ \sqrt{2} \cdot B_y^e \cdot e^{j\varphi_y} \cdot e^{j\omega t} \end{array} \right] \right\} \quad (2.17)$$

y denominando:

$$\mathbf{B}_x = B_x^e \cdot e^{j\varphi_x} \quad (2.18)$$

$$\mathbf{B}_y = B_y^e \cdot e^{j\varphi_y} \quad (2.19)$$

queda el vector en forma fasorial:

$$\vec{B} = \text{Re} \left\{ \left[\begin{array}{c} \sqrt{2} \cdot \mathbf{B}_x \cdot e^{j\omega t} \\ \sqrt{2} \cdot \mathbf{B}_y \cdot e^{j\omega t} \end{array} \right] \right\} \quad (2.20)$$

Se define el fasor, en valor eficaz, correspondiente a la inducción $\vec{B}(t)$ como:

$$\vec{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_x \\ \mathbf{B}_y \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Será conveniente expresar $\vec{\mathbf{B}}$ en sus componentes real e imaginaria:

$$\vec{\mathbf{B}} = \vec{\text{Re}}[\vec{\mathbf{B}}] + j \cdot \vec{\text{Im}}[\vec{\mathbf{B}}] \quad (2.22)$$

puesto que los vectores $\vec{\text{Re}}[\vec{\mathbf{B}}]$ y $\vec{\text{Im}}[\vec{\mathbf{B}}]$ pueden ser representados en el espacio, al estar compuestos por números reales.

Si las componentes \mathbf{B}_x y \mathbf{B}_y tienen igual desfase ($\varphi_x = \varphi_y$), o poseen desfases opuestos ($\varphi_x = \varphi_y \pm \pi$), entonces el máximo de la componente x de \vec{B} coincidirá en el tiempo con el máximo de la componente y , con lo que el extremo del vector campo recorrerá una recta (la elipse —que se verá más adelante— se colapsa en una línea). Ésto sucede con el campo creado por un único conductor, por dos conductores con intensidades iguales y opuestas (dipolo magnético), o por un número cualquiera de conductores con las corrientes en fase. Se dice entonces que el campo está *linealmente polarizado*.

2.4.1. Elipses de inducción.

A continuación se efectuará un análisis y una representación espacial de la forma que adopta la inducción magnética en las proximidades de los conductores de la línea. Ya se indicó con anterioridad cómo sería esta representación en el caso de que el campo se encontrara linealmente polarizado. Ahora, considerando que $\varphi_x - \varphi_y \neq \{0, \pm\pi\}$, el máximo de la componente x no coincidirá en el tiempo con el máximo de la componente y , por lo que el extremo de \vec{B} en lugar de recorrer una recta, ahora recorrerá una elipse, que se denominará **Elipse de Inducción**.

2.4.1.1. Semiejes de la elipse de inducción.

Del módulo del vector campo:

$$|\vec{B}(t)| = \sqrt{(B_x^e \cdot \cos(\omega t + \varphi_x))^2 + (B_y^e \cdot \cos(\omega t + \varphi_y))^2} \quad (2.23)$$

el instante en que el módulo de este vector es máximo o mínimo se obtiene sin más que derivar $|\vec{B}|^2$ respecto a ωt , e igualando a cero:

$$\frac{d|\vec{B}(t)|^2}{d\omega t} = (B_x^e)^2 \cdot \sin(2\omega t + 2\varphi_x) + (B_y^e)^2 \cdot \sin(2\omega t + 2\varphi_y) = 0 \quad (2.24)$$

Despejando de la expresión anterior el valor de ωt , se tiene que existen cuatro soluciones, cada una correspondiente a cada polo de la elipse:

$$\omega t_k = -\frac{1}{2} \arctan \frac{(B_x^e)^2 \sin(2\varphi_x) + (B_y^e)^2 \sin(2\varphi_y)}{(B_x^e)^2 \cos(2\varphi_x) + (B_y^e)^2 \cos(2\varphi_y)} + (k-1) \cdot \frac{\pi}{2} \quad (2.25)$$

para $k = 1, 2, 3, 4$.

Los semiejes mayor y menor vendrán dados respectivamente por:

$$B_M = |\vec{B}_M| = \max_k |\vec{B}(t_k)| \quad (2.26)$$

$$B_m = |\vec{B}_m| = \min_k |\vec{B}(t_k)| \quad (2.27)$$

Sustituyendo en (2.23) el valor de ωt obtenido en (2.25), con $k = 1$, se pueden obtener los valores explícitos de estos semiejes:

$$B_M^2 = \frac{1}{2}(B_x^2 + B_y^2) + \frac{1}{2} [B_x^4 + B_y^4 + 2B_x^2 B_y^2 \cos(2\varphi_x - 2\varphi_y)]^{\frac{1}{2}} \quad (2.28)$$

$$B_m^2 = \frac{1}{2}(B_x^2 + B_y^2) - \frac{1}{2} [B_x^4 + B_y^4 + 2B_x^2 B_y^2 \cos(2\varphi_x - 2\varphi_y)]^{\frac{1}{2}} \quad (2.29)$$

Donde, por simplicidad, se ha tomado la notación: $B_x^e = B_x$ y $B_y^e = B_y$. Un parámetro de importancia para definir completamente la elipsis de inducción es el ángulo que forma el semieje mayor respecto a la horizontal, al que se denominará θ_M , y vendrá dado a partir de las componentes de \vec{B}_M como:

$$\theta_M = \arctan \frac{B_{My}}{B_{Mx}} \quad (2.30)$$

2.4.2. Representación gráfica de las elipses de inducción.

Para una línea trifásica equilibrada, que es la situación en la que se pretende centrar el presente estudio, se tiene que una fase está desfasada con respecto a otra 120° . De tal forma, se tendrá que para unas corrientes de circulación por fase de módulo genérico I_m , las corrientes por fase vendrán dadas por:

$$I_A = I_m \angle 0 \quad (2.31)$$

$$I_B = I_m \angle 240 \quad (2.32)$$

$$I_C = I_m \angle 120 \quad (2.33)$$

Si la línea es horizontal (tal y como se viene suponiendo hasta el momento) y los conductores están equidistantes entre sí, en cada punto bajo ellos se tendrá un diferente valor para θ_M , en virtud de la expresión (2.25). Así, en un punto de observación situado justo debajo del conductor central, se tendrá un ángulo del semieje mayor $\theta_M = 90^\circ$. De tal forma, en esta situación concreta, la elipse de inducción vendrá representada como se muestra en la figura 2.3.

Según que el punto en el que se quiera representar la elipse de inducción se encuentre hacia valores positivos de x o negativos respecto del sistema de coordenadas establecido en la figura 2.1, es decir hacia un lado u otro del conductor central, la forma que adquirirá la elipse de inducción irá modificándose, ya que

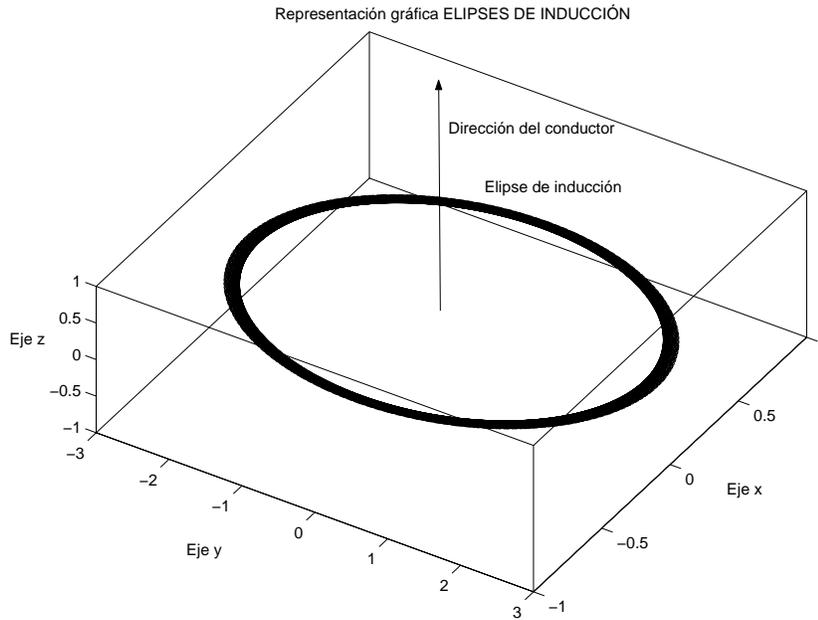


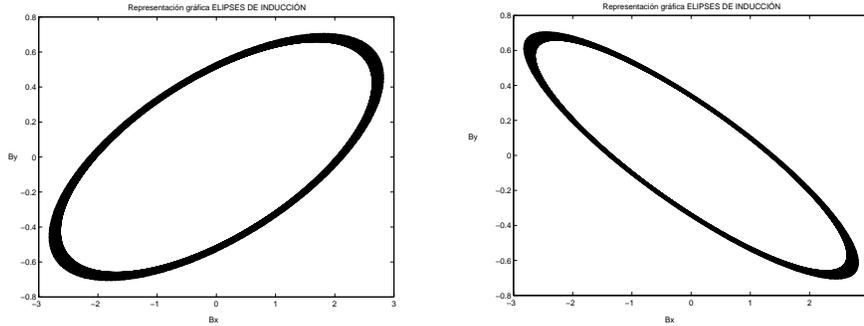
Figura 2.3: *Elipse de Inducción bajo el conductor central*

θ_M irá creciendo para valores positivos de x , y por contra disminuirá para valores negativos de x .

Para estas dos últimas situaciones genéricas se tendrán las representaciones gráficas de la figura 2.4. En la figura 2.4(a) se ha representado la elipse de inducción para valores de x negativos, mientras que en la figura 2.4(b) se ha hecho para valores positivos de x .

2.5. Campos Magnéticos creados por dipolos eléctricos.

Por motivos de cálculo, resultará sencillo desarrollar un método que permita establecer de forma metódica una serie de pasos hasta alcanzar como solución el campo magnético generado por una serie de conductores conocidos. Para tal efecto, se introducirá en este epígrafe el desarrollo realizado por Pedro Cruz [1], que será el fundamento en que se basará el programa de cálculo empleado en el capítulo 5 para obtener los valores de mitigación, eficiencia del lazo y corriente de inyección al mismo.



(a) Elipse de inducción para x negativos

(b) Elipse de inducción para x positivos

Figura 2.4: Elipses para valores de x distintos de 0

De tal forma, se partirá de los datos correspondientes a un dipolo de corriente definido por los vectores de posición de los conductores, \vec{r}_1 y \vec{r}_2 , así como la corriente alterna circulante por el mismo, $i(t)$. Ésto se muestra en la figura 2.5, así como el origen adoptado por conveniencia, según el cual $\vec{r}_1 = -\vec{r}_2$.

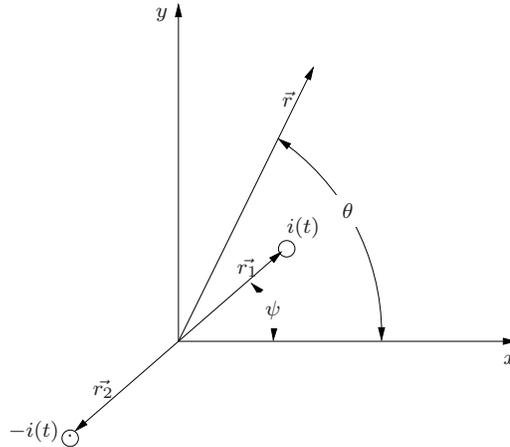


Figura 2.5: Dipolo magnético y punto \vec{r} donde se desea conocer el campo.

El fasor en valor eficaz del campo \vec{B} en el punto de medida definido por el vector de posición \vec{r} viene dado por la expresión (2.34):

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \mathbf{I}}{2\pi} \left[\frac{\vec{u}_2 \wedge (\vec{r} - \vec{r}_1)}{|\vec{r} - \vec{r}_1|^2} - \frac{\vec{u}_2 \wedge (\vec{r} - \vec{r}_2)}{|\vec{r} - \vec{r}_2|^2} \right] \tag{2.34}$$

donde \mathbf{I} representa el fasor en valor eficaz de $i(t)$.

$$\vec{\mathbf{M}} = \mathbf{I}(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = \mathbf{I}\vec{p} \quad (2.35)$$

Definiendo el momento magnético como se expresa en (2.35), y teniendo en cuenta que

$$\vec{r} = r \cos \theta \vec{u}_x + r \operatorname{sen} \theta \vec{u}_y \quad (2.36)$$

$$\vec{p} = p \cos \psi \vec{u}_x + p \operatorname{sen} \psi \vec{u}_y \quad (2.37)$$

así como que el módulo de $\vec{\mathbf{M}}$ es $\mathbf{M} = \mathbf{I}p$, se calculan los productos vectoriales de (2.34) como

$$\vec{u}_z \wedge \vec{r} = -r \operatorname{sen} \theta \vec{u}_x + r \cos \theta \vec{u}_y \quad (2.38)$$

$$\vec{u}_z \wedge \vec{p} = -p \operatorname{sen} \psi \vec{u}_x + p \cos \psi \vec{u}_y \quad (2.39)$$

se puede escribir la expresión (2.34) como se indica en (2.40) de forma matricial:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \mathbf{B}_x \\ \mathbf{B}_y \end{bmatrix} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{1}{(r^2 + \frac{p^2}{4})^2 - r^2 p^2 \cos^2(\theta - \psi)} \cdot \\ & \cdot \left(r^2 \begin{bmatrix} -\operatorname{sen} 2\theta & \cos 2\theta \\ \cos 2\theta & \operatorname{sen} 2\theta \end{bmatrix} + \frac{p^2}{4} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \mathbf{M}_x \\ \mathbf{M}_y \end{bmatrix} \quad (2.40) \end{aligned}$$

Esta expresión permite el cálculo de las componentes del vector $\vec{\mathbf{B}}$.

De tal forma, ya se tiene una idea cualitativa de la forma del campo magnético en puntos cercanos a los conductores eléctricos. Se sabe que el vector de campo magnético forma elipses con formas diferentes según el punto que se considere en el espacio. Por otra parte, con las expresiones desarrolladas en este capítulo, y partiendo de los datos de interés de una línea cualquiera, se puede particularizar para la misma, pudiéndose obtener el valor exacto del campo magnético en cualquier punto en la proximidad de la línea aérea.

En el próximo capítulo se analizará y estudiará un método concreto de compensación de campo magnético, a nivel genérico para, de la misma forma que los resultados obtenidos en el presente, poder aplicarlo al caso concreto objeto de estudio de este proyecto (que se llevará a cabo en los capítulos posteriores), y así dar con una herramienta genérica susceptible de particularización.

Capítulo 3

COMPENSACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO MEDIANTE LAZOS ACTIVOS.

3.1. Introducción.

En el capítulo 2 se estudió el campo magnético que generaba a su alrededor uno o varios conductores de corriente, y se pudo comprobar que la forma que adoptaba dicho campo magnético en las inmediaciones de las mismas era elíptica (las denominadas elipses de inducción), con orientación de los semiejes variable en función de la posición del punto donde se comprobara el campo, así como de la secuencia de fases que presenten dichos conductores. De tal forma, en las proximidades de la línea eléctrica se tendrá, para cada punto, un valor particular del campo magnético, el cual puede resultar indeseable tanto desde el punto de vista tecnológico como desde el punto de vista de los problemas que este hecho pueda derivar en la salud de los habitantes cercanos a la línea (éste será un punto que se tratará en profundidad en el capítulo 5).

Este campo magnético, como se consideró en el capítulo 2, tendrá componentes tanto en la dirección x (horizontal), como en la dirección y (vertical), y por ser las corrientes circulantes por los conductores de la línea alterna senoidal convenientemente desfasada de fase a fase, cada una de estas componentes estará compuesta por una parte *real* y otra *imaginaria*. Así, el campo magnético generado por la línea en un punto cualquiera próximo a ella, estará compuesto

por dos componentes ¹ diferentes del espacio, y cada una de ellas a su vez poseerá un valor complejo, susceptible de descomponerse en parte *real* e *imaginaria*.

Basándose en el principio de la *Inducción Electromagnética*, se tiene básicamente que, un conductor (cerrado) sometido a un campo magnético determinado experimenta una diferencia de potencial inducida la cual genera en dicho conductor unas corrientes, cuya circulación producirán a su vez otro campo magnético. De tal forma, realizando un diseño adecuado de este segundo conductor sometido a un campo magnético, es posible conseguir que el Campo Magnético que su corriente de circulación genere compense en parte el campo magnético original, reduciendo de tal forma su valor.

En las secciones siguientes, se contemplará en profundidad este fenómeno y su aplicación con la finalidad de mitigar el Campo Magnético en un punto o región.

3.2. Métodos de compensación mediante lazos.

Los métodos fundamentales de compensación de campo magnéticos generados por líneas eléctricas son los que emplean para ello lazos de conductores dispuestos en las proximidades de las mismas. Dependiendo de la configuración de estos lazos, la mitigación que se conseguirá será la denominada *Mitigación mediante lazos pasivos* y *Mitigación mediante lazos activos*.

Pedro Cruz [1] desarrolla ampliamente el estudio de ambos métodos en el capítulo 6. En los epígrafes siguientes, se intentará dar una idea básica, basada en dichos análisis, de la metodología empleada en cada caso, con especial ahínco en la mitigación mediante lazos activos, que será la que se emplee en el presente proyecto.

3.2.1. Mitigación mediante lazos pasivos.

Este método basa su funcionamiento en el empleo de lazos pasivos (sin alimentación externa) dispuestos en las cercanías de la línea eléctrica, con la

¹Esto es así considerando la longitud del vano lo suficientemente grande, así como los conductores completamente rectilíneos, con lo cual se considerarán solamente las componentes del campo según el plano perpendicular a los conductores de la línea que contiene el punto donde se estudia su valor.

finalidad de que las corrientes que se induzcan en los conductores del lazo como consecuencia del C.M. de la línea generen a su vez un C.M. capaz de compensar al primero en un punto o zona determinado.

Considerando esta alternativa como un caso particular de la mitigación mediante lazos activos, en la cual la corriente de lazo inyectada es nula, se aprovechará este apartado para introducir los valores de la corriente inducida en el lazo, que serán evidentemente válidos para el método de compensación mediante lazos activos.

Las hipótesis simplificadoras que se emplearán en el presente proyecto serán las mismas que considera [1]:

- Los conductores de fase son rectilíneos, paralelos e indefinidos.
- Los lazos se componen de cuatro tramos rectilíneos, paralelos dos a dos (es decir, formando rectángulos). Dos de ellos serán paralelos a la línea y los otros serán perpendiculares.
- La longitud de los tramos paralelos (longitud de lazo) se considerará mucho mayor que la longitud de los perpendiculares (anchura de lazo) siempre que la relación entre estas magnitudes lo permita. Ésto permite establecer las hipótesis simplificadoras:
 - ▷ La longitud de los lazos es infinita.
 - ▷ La Fuerza Electromotriz inducida en los tramos paralelos a la línea es mucho mayor que la inducida en los tramos perpendiculares, por lo que esta última puede ser despreciada.

En el caso de que la solución resultante presente una anchura de lazo del orden de la longitud, se procederá con los cálculos como se efectúa en el capítulo 6.

- Las distancias entre fases de la línea y conductores del lazo son al menos un orden de magnitud mayor que el radio del conductor. Ésto permite evitar efectos de proximidad entre conductores.
- La corriente que circula por la línea no dependerá de los fenómenos originados por la inserción del lazo, con lo cual se desestiman las posibles corrientes inducidas en las fases de la línea como consecuencia de la aparición del C.M. compensador generado por el lazo.
- Se considerará la tierra horizontal, homogénea e infinita.

3.2.2. Cálculo de la corriente inducida en el lazo.

Pedro Cruz [1] realiza el análisis y cálculo de la corriente inducida en dos lazos por una línea trifásica. Sin embargo, puesto que las características de la línea que se asumen en el presente proyecto son diferentes, y además se considerará un único lazo, se calcularán dichas corrientes inducidas en el mismo de forma análoga a como él lo hace en su tesis.

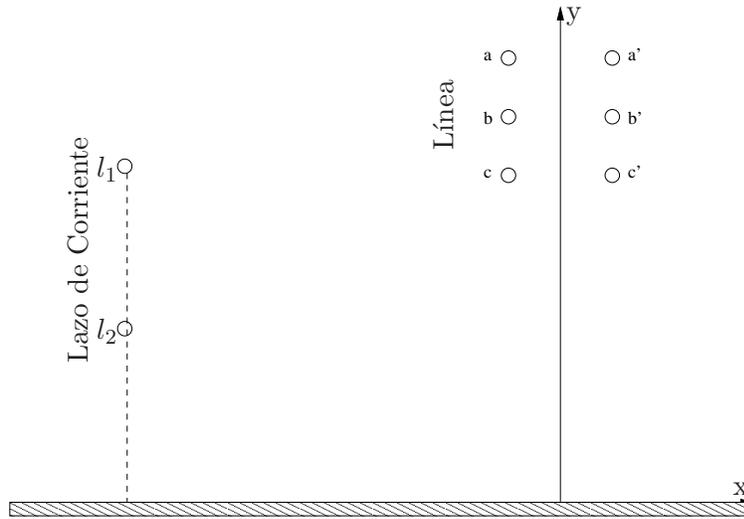


Figura 3.1: Esquema representativo de las fases de la línea y los conductores del lazo.

En la figura 3.1 se presenta un esquema de los conductores que componen las fases de la línea de doble circuito Don Rodrigo–Pinar del Rey, así como los correspondientes al lazo.

En virtud de la nomenclatura utilizada en esta figura, se definirán las distancias que se recogen en la tabla 3.1, las cuales servirán para componer la expresión que evaluará la f.e.m. inducida en el lazo.

En base a las hipótesis consideradas con anterioridad, la resistencia y reactancia del lazo se puede expresar como se indica en (3.1) y (3.2)²:

$$R_l = 2 \cdot R \cdot l_{lazo} \quad (3.1)$$

²En el caso de que no sean aplicables estas hipótesis porque la anchura y la longitud del lazo sean del mismo orden, para el cálculo de la reactancia se emplearán las expresiones 6.2 a 6.11.

$$X_l = l_{lazo} \cdot \frac{\omega\mu_0}{\pi} \log\left(\frac{s}{r_{gm}}\right) \quad (3.2)$$

donde l_{lazo} representa la longitud del lazo (correspondiente a los tramos del mismo paralelos a los conductores de la línea), s es la anchura del lazo y r_{gm} el radio geométrico medio del conductor.

De tal forma, la impedancia del lazo vendrá dada por:

$$Z_l = R_l + j \cdot X_l \quad (3.3)$$

Tabla 3.1: Nomenclatura y leyenda de las distancias existentes entre los conductores de la línea y el lazo.

| <i>Notación</i> | <i>Descripción</i> |
|-----------------|--|
| d_{1a} | distancia conductor 1 del lazo–fase a |
| d_{1b} | distancia conductor 1 del lazo–fase b |
| d_{1c} | distancia conductor 1 del lazo–fase c |
| d_{2a} | distancia conductor 2 del lazo–fase a |
| d_{2b} | distancia conductor 2 del lazo–fase b |
| d_{2c} | distancia conductor 2 del lazo–fase c |
| $d_{1a'}$ | distancia conductor 1 del lazo–fase a' |
| $d_{1b'}$ | distancia conductor 1 del lazo–fase b' |
| $d_{1c'}$ | distancia conductor 1 del lazo–fase c' |
| $d_{2a'}$ | distancia conductor 2 del lazo–fase a' |
| $d_{2b'}$ | distancia conductor 2 del lazo–fase b' |
| $d_{2c'}$ | distancia conductor 2 del lazo–fase c' |

Definiendo la constante k como sigue:

$$k = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \quad (3.4)$$

se establecen las siguientes inductancias mutuas:

$$X_i = k \cdot \log\left(\frac{d_{2i}}{d_{1i}}\right) \quad i = a, b, c, a', b', c' \quad (3.5)$$

Con ésto, la expresión que da el valor de la F.E.M. inducida en el lazo es

la correspondiente a (3.6):

$$E_p = -j \cdot ((X_a - X_b) \cdot I_a + (X_c - X_b) \cdot I_c + (X_{a'} - X_{b'}) \cdot I_{a'} + (X_{cp} - X_{bp}) \cdot I_{cp}) \quad (3.6)$$

De tal forma, puesto que los lazos pasivos se caracterizan por la ausencia de fuentes de potencia externas a los mismos, la corriente que circulará en este caso vendrá dado por el cociente de la expresión (3.7):

$$I_{lazo} = \frac{E_p}{Z_l} \quad (3.7)$$

3.3. Mitigación mediante lazos activos.

Como se ha comentado con anterioridad, éste será el sistema de mitigación que se empleará en el presente proyecto.

Un lazo activo, a diferencia del estudiado en el epígrafe 3.2.1, es alimentado, además de por la F.E.M. inducida, por una fuente externa al mismo. De tal forma, las hipótesis de trabajo introducidas en la sección 3.2.1, así como los resultados obtenidos hasta la expresión (3.6), siguen siendo válidos para este análisis.

Las ventajas que presenta este método frente al empleo de lazos pasivos son:

- Mejores niveles de mitigación.
- Mayor flexibilidad en la disposición del lazo.

Por contra, aparecen los inconvenientes siguientes:

- Incremento significativo del coste de instalación y mantenimiento.
- Necesidad de empleo de un sistema de control para adecuar en cada instante la intensidad inyectada con el campo que se pretende atenuar (se estudiará en el capítulo 9).

De tal forma, en esta situación, el problema que se plantea es determinar la posición del lazo de corriente, así como el módulo y desfase de la intensidad que será necesaria inyectar al mismo, de modo que se reduzca al máximo el campo magnético en una zona de interés.

El análisis que se expondrá a continuación es en esencia el que se puede encontrar en [1], sintetizado de modo que se aprovechen las conclusiones y resultados adecuados al problema actual en consideración.

Dado un punto x_0 en el que se desea minimizar el campo magnético, para cada configuración de lazo (ubicación y características propias) se tratará de determinar las componentes real e imaginaria de la corriente que será necesaria inyectar para tal efecto:

$$I = \text{Re}[I] + j \cdot \text{Im}[I] \quad (3.8)$$

La función que se desea minimizar es por tanto la que se indica en (3.9):

$$|\vec{B}_p(x_0) + \vec{B}_l(x_0)| \quad (3.9)$$

En (3.9) se ha empleado el subíndice p para aludir al campo magnético generado por la línea en el punto x_0 , mientras que el subíndice l a su vez indica el campo magnético generado por el lazo de corriente.

Teniendo en cuenta la expresión (2.40), componiendo los vectores \vec{B}_l y \vec{B}_p y derivando (3.9) e igualando a 0 para localizar el mínimo, se obtienen las soluciones:

$$\text{Re}[I] = \frac{-b_x \text{Re}[\vec{B}_p]_x - b_y \text{Re}[\vec{B}_p]_y}{b_x^2 + b_y^2} \quad (3.10)$$

$$\text{Im}[I] = \frac{-b_x \text{Im}[\vec{B}_p]_x - b_y \text{Im}[\vec{B}_p]_y}{b_x^2 + b_y^2} \quad (3.11)$$

donde

$$\begin{aligned} b_x &= [\vec{B}_l(I = 1\angle 0)]_x = \\ &= \frac{\mu_0 s}{2\pi \left(r^2 + \frac{s^2}{4}\right)^2 - r^2 s^2 \cos^2(\theta - \psi)} \left(r^2 \text{sen}(2\theta - \psi) - \frac{s^2}{4} \text{sen}\psi \right) \\ b_y &= [\vec{B}_l(I = 1\angle 0)]_y = \\ &= \frac{\mu_0 s}{2\pi \left(r^2 + \frac{s^2}{4}\right)^2 - r^2 s^2 \cos^2(\theta - \psi)} \left(r^2 \cos(2\theta - \psi) - \frac{s^2}{4} \cos\psi \right) \end{aligned}$$

En el caso de que se pretenda resolver el problema para minimizar los Campos Magnéticos en una serie de puntos discretos x_i con $i = 1, 2, \dots, n$, las expresiones que se emplearán en lugar de la (3.10) y (3.11), habrán de ser las (3.12) y (3.13)

$$\operatorname{Re}[I] = \frac{-\sum_{i=1}^n \left(b_{xi} \operatorname{Re}[B_p(\vec{x}_i)]_x + b_{yi} \operatorname{Re}[B_p(\vec{x}_i)]_y \right)}{\sum_{i=1}^n (b_{xi}^2 + b_{yi}^2)} \quad (3.12)$$

$$\operatorname{Im}[I] = \frac{-\sum_{i=1}^n \left(b_{xi} \operatorname{Im}[B_p(\vec{x}_i)]_x + b_{yi} \operatorname{Im}[B_p(\vec{x}_i)]_y \right)}{\sum_{i=1}^n (b_{xi}^2 + b_{yi}^2)} \quad (3.13)$$

siendo, por analogía, los valores de b_{xi} y b_{yi} los siguientes:

$$\begin{aligned} b_{xi} &= [\vec{B}_l(I = 1\angle 0, x_i)]_x \\ b_{yi} &= [\vec{B}_l(I = 1\angle 0, x_i)]_y \end{aligned}$$

Pedro Cruz [1] enumera las siguientes conclusiones (y algunas otras que no se considerarán en el presente proyecto) acerca del empleo y uso de lazos para la mitigación de Campos Magnéticos:

- La *resistencia* del conductor es un factor de importancia secundaria cuando el lazo es pasivo sin compensar, o **activo**. Este punto se verá con mayor profundidad en el capítulo 5.
- Las configuraciones que permiten una mayor reducción de campo con lazo pasivo y activo son las *coplanares* (horizontal y vertical, dependiendo del tipo de línea eléctrica), siendo muy sensible dicha reducción a la distancia lazo–fase. Esta afirmación se verá respaldada por el análisis y cálculos que se efectúen en el capítulo 5.
- El lazo activo permite obtener rendimientos del apantallado de casi el 100 % para configuraciones coplanares, en puntos alejados de la línea (100 metros). Para puntos cercanos a la línea la eficiencia está en torno a 0,2.

Parte II

**Cálculo y Diseño del Lazo de
Corriente.**

Capítulo 4

OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO.

En el presente capítulo se establecerán los objetivos y alcance del proyecto en curso; se indicará con precisión qué es lo que se pretende conseguir, los medios para llevarlo a cabo, así como los resultados que se obtendrán.

4.1. Introducción.

El actual capítulo tratará de describir los objetivos y motivaciones que conducen a la realización del presente proyecto. Se introducirán los caminos de análisis y resolución que se seguirán para la consecución de dichos objetivos, y se plantearán y discutirán los efectos consecuentes de la realización práctica del proyecto sobre los elementos del medio.

4.2. Campos Magnéticos y Salud.

La relación existente entre los campos magnéticos generados por líneas eléctricas y la salud de los individuos expuestos a ellos es un controvertido tema de debate y discusión puesto que no existe una posición clara y tajante a favor o en contra de tal relación por parte de estudiosos del tema. Existe una serie de indicios que parecen apuntar a tales fenómenos como causa directa de la aparición de enfermedades tales como leucemia, si bien las conclusiones de los estudios efectuados al respecto no las avalan.

Algunos autores como [10] presentan de forma sintética y resumida los resultados obtenidos por numerosos estudios al respecto, los cuales son tratados de forma más amplia y extensa por Moulder [12] y otros [11].

El estudio realizado en 1997 por el Instituto Nacional del Cáncer de los Estados Unidos, considerado el más amplio y concienzudo de los publicados, que analizó 638 casos de leucemia infantil ocurridos en nueve estados diferentes y que utilizó, además del código de cables, los métodos de caracterización de la exposición más precisos disponibles (medidas del campo medio ponderado durante 24 horas en las habitaciones de los niños y medidas puntuales en diferentes áreas de la vivienda y en su exterior), no halló un incremento en el riesgo de leucemia infantil asociado a las medidas del campo magnético efectuadas, ni a las viviendas caracterizadas por la configuración de cables más alta.

Hasta el momento no se han podido identificar los factores que pudieran explicar la asociación hallada en algunos estudios entre código de cables y leucemia infantil. No se cuenta con suficientes indicios para considerar la exposición a los campos electromagnéticos en el medio residencial como causante de la misma. Otros factores que podrían dar cuenta de esta asociación, tales como la antigüedad de la vivienda o la densidad de tráfico en sus inmediaciones, se correlacionan de forma más estrecha con los niveles altos de la clasificación de código que los propios campos magnéticos medidos.

Los datos epidemiológicos disponibles no aportan pruebas convincentes para establecer una relación entre el resto de los cánceres infantiles, y en especial del cáncer cerebral, y la exposición a los campos electromagnéticos, con independencia del método utilizado para su estimación. Tampoco se ha podido identificar una asociación entre cánceres infantiles y exposición laboral paterna. Los resultados aportados por los estudios sobre cáncer en el adulto en ambientes residenciales y laborales no muestran, en conjunto, incremento del riesgo de cáncer en relación con la exposición a campos electromagnéticos generados por las líneas eléctricas de alta tensión.

Las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud y la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) se basan, a la hora de limitar la exposición, en los efectos inmediatos y a corto plazo sobre la salud, tales como estimulación nerviosa y muscular, absorción de energía, descarga eléctrica y quemaduras producidas por el contacto con objetos conductores. A la frecuencia de 50–60 Hz, dichos efectos están relacionados con la densidad de corriente inducida en el organismo y se observan a partir de 10 mA/m^2 . Puesto que esta magnitud no es directamente medible, los límites

para el campo eléctrico y magnético externo se calculan a partir de modelos y cálculos aproximados de la corriente inducida en el cuerpo humano por campos externos, por lo que los valores recomendados varían ligeramente dependiendo del modelo y del factor de seguridad utilizados.

Con respecto a los posibles efectos a largo plazo, tales como un incremento en el riesgo de cáncer, la posición adoptada por los organismos que han formulado las distintas normas y recomendaciones es que, aunque la investigación epidemiológica ha proporcionado alguna indicación de posibles efectos carcinogénicos, los datos disponibles no son suficientes para servir como base sobre la que establecer límites de exposición.

Los límites recomendados por el ICNIRP para la exposición continua del público a campos de 50 Hz son de 100 μT para la inducción magnética y 5 kV/m para la intensidad de campo eléctrico. En el caso de exposición laboral, dichos límites son 500 μT y 10 kV/m, respectivamente. Estos límites han sido adoptados en la Propuesta de Recomendación del Consejo de las Comunidades Europeas COM (1998) 268.

No obstante, realizando un análisis de datos combinados, Ahlbom y col. informaron de que si se combinaban los nueve estudios que incluyeron medidas durante mucho tiempo del nivel de campo magnético, se hallaba una asociación estadísticamente significativa (riesgo relativo igual a 2) de leucemia infantil en los niños con una exposición promedio de 0.4 μT o superior.

Greenland y col. también efectuaron un estudio combinado, e informaron que si se combinaban los quince estudios en los que se midió o estimó el campo magnético, se encuentra una asociación estadísticamente significativa (riesgo relativo igual a 1.7) de leucemia infantil en los niños con una exposición promedio de 0.3 μT o superior.

En las *III Jornadas sobre Líneas Eléctrica y Medio Ambiente* celebradas en 1999 en Madrid, Moulder trató el tema y mostró las siguientes conclusiones:

“Existe una creencia muy extendida de que la exposición a líneas eléctricas está relacionada con el cáncer. Esta preocupación surge en gran medida de unos pocos estudios epidemiológicos que parecen establecer una relación entre el cáncer y el hecho de residir cerca de las líneas eléctricas. Sin embargo, las pruebas epidemiológicas de dicha relación no permiten llegar a la conclusión de que exista una relación causal. Además, una evaluación de la biofísica lleva a la conclusión de que los efectos biológicos no son factibles a la intensidad de campo presente en los entornos residenciales. En un caso como éste en el que las pruebas epidemiológicas para establecer una relación entre un agente y una enfermedad son débiles o inexistentes, y en el que los efectos son biofísica

y/o bioquímicamente implausibles, las pruebas de laboratorio son críticas para evaluar el riesgo.

La epidemiología y la biofísica, conjuntamente, llevan a la conclusión de que la asociación causa-efecto entre los campos generados por la líneas eléctricas y el cáncer no sólo no se ha demostrado, sino que es extremadamente improbable”.

Es por ello que, ante la duda y la posibilidad de que los estudios de Ahlbom y Greenland sean de fidelidad sostenible, se pretende establecer una limitación en los niveles de campo magnético en la zona de estudio, de modo que el valor máximo admisible sea de $0.3 \mu\text{T}$, manteniendo de este modo los valores más altos del campo magnético en torno al límite recomendado por diversas legislaciones nacionales europeas.

4.3. Influencia de los Campos Magnéticos en el funcionamiento de equipos electrónicos.

Se han introducido en el epígrafe 4.2 los motivos por los cuales la presencia de Campos Magnéticos generados por líneas eléctricas pueden resultar perjudiciales para la salud. Sin embargo, un efecto del que no cabe duda de que dichos Campos Magnéticos son los realmente responsables, es el de las interferencias y alteraciones en el funcionamiento de equipos electrónicos: sistemas de telefonía y telecomunicaciones, equipos informáticos, etc.

4.4. Planteamiento del problema. Objetivos.

El planteamiento del problema es el que se narra a continuación.

Se dispone de un edificio ubicado en las proximidades de una línea eléctrica de transporte de alta tensión, 400 kV, motivo por el cual, dicho edificio se encuentra sometido al campo magnético producido como consecuencia de la circulación de corrientes por la línea eléctrica. Se pretende obtener una mitigación o reducción de este campo magnético en una región determinada inscrita en la zona ocupada por el edificio, de manera que se obtenga en dicho área unos valores de campo magnético que no superen unos ciertos límites que serán establecidos.

Concretando, el edificio que se tratará en el actual estudio presentará la ubicación y dimensiones descritas en el plano P02, y las distancias relativas a

Tabla 4.1: Cotas de los conductores de la línea (m).

| C1{= C1'} | C2{= C2'} | C3{= C3'} |
|-----------|-----------|-----------|
| 30.03 | 22.88 | 14.07 |

la línea eléctrica corresponderán a las indicadas en el mismo plano. La línea de alta tensión será la línea Don Rodrigo–Pinar del Rey, cuya característica fundamental es que se trata de un tendido trifásico en doble circuito. Las dimensiones de los apoyos se pueden observar en el plano P01, si bien debido a la presencia de aisladores, y a la forma de la propia catenaria de los conductores, las alturas de los mismos serán las que se recogen en la tabla

El objetivo, en principio, se reduce a obtener los mejores niveles de mitigación en la zona de estudio con el menor coste posible, y la mayor independencia respecto de factores externos posible (es este último motivo el que propiciará el empleo de energía solar fotovoltaica para la alimentación del lazo de corriente). Ésto quiere decir que los efectos que acontezcan al resto de los puntos cercanos externos a dicha área de estudio, serán secundarios, si bien ésto no implica que carezcan totalmente de importancia.

En resumen, los objetivos del proyecto se pueden sintetizar en los dos puntos siguientes:

- Minimización de los niveles de campo magnético en la zona de estudio (o como mínimo conseguir acotarlos bajo unos límites establecidos).
- Minimización de la potencia que habrá que inyectar al lazo de corriente, con el consiguiente ahorro económico.

4.5. Procedimientos de mitigación.

Pedro Cruz analiza en [1] como métodos de mitigación de Campos Magnéticos generados por líneas eléctricas el empleo de lazos de corriente, tanto pasivos como activos. En particular, en el presente proyecto se contemplará y analizará la segunda alternativa: lazos de corriente activos. Ésta es la solución que analizan otros autores como [5], con ciertas variantes que se comentarán más adelante.

Se empleará, por tanto, como elemento de mitigación del campo magnético un lazo de corriente activo, que será alimentado mediante una serie de paneles fotovoltaicos, cuya salida será convenientemente regulada y tratada para asegurar la correcta adaptación de onda (ver figura 9.1).

A tal efecto, la labor que se desempeñará en lo sucesivo habrá de ser, a grandes rasgos, la que se recoge en los puntos siguientes:

- Diseño y cálculo de los parámetros que definen el lazo de corriente y su posición y ubicación con respecto de la línea eléctrica y el área de estudio. Obtención de la corriente que será necesaria inyectar al lazo para garantizar niveles de mitigación máximos en posiciones determinadas.
- Diseño y cálculo del sistema de medición de flujo magnético, que servirá como señal de referencia y control para la regulación de la alimentación del lazo. Análisis de las secuencias de fase de la línea en función de los valores de campo magnético generado por la misma.
- Diseño y cálculo del sistema de alimentación y control del lazo de corriente. Cálculo del equipo de energía solar fotovoltaica, inversores, reguladores, baterías de acumuladores, etc.

Capítulo 5

ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN ÓPTIMA DEL LAZO.

El primer estudio importante que se efectuará a lo largo del proyecto corresponderá a la determinación de la ubicación y configuración óptima del lazo de corriente. Con ésto se obtendrá la posición que teóricamente optimiza los niveles de mitigación bajo las condiciones de funcionamiento de la línea.

5.1. Introducción.

Una vez establecidas las bases teóricas sobre las que se apoyará el presente proyecto, se procederá con los cálculos y análisis pertinentes para la determinación de las magnitudes y configuración que presentará el lazo de corriente. De tal forma, se partirá de los datos correspondientes a la línea (Don Rodrigo–Pinar del Rey), así como los que determinan la posición del edificio en el cual se desea realizar la mitigación del campo magnético.

En epígrafes posteriores, se analizará como posibles soluciones de lazos de corriente el empleo de éstos en configuración horizontal y en configuración vertical, comparando tanto cualitativa como cuantitativamente los resultados que se obtengan. También se analizarán diferentes posiciones del lazo respecto a distancias diferentes de la mediana de la línea, y dentro de cada posición referida a dicha línea, se estudiará el comportamiento del lazo frente a variaciones de su anchura y altura.

Se analizarán soluciones para ubicaciones del lazo de corriente correspondientes a valores negativos del eje de abscisas, es decir, en la región correspondiente al sector que contiene a la Zona de Estudio y al Punto de Medida, y posteriormente se procederá de idéntica forma para situaciones que establezcan el lazo en el semieje positivo.

El trazado de la línea Don Rodrigo–Pinar del Rey se puede observar en la figura 5.1 (extracto de la Red Eléctrica de Transporte de RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA).



Figura 5.1: Trazado de la línea Don Rodrigo–Pinar del Rey.

El método de elección de la posición y configuración óptima consistirá en el análisis de los resultados obtenidos por el lazo, haciendo variable para cada valor de la distancia transversal a la línea, X_{lazo} , los valores de altura anchura

y configuración (horizontal o vertical), y eligiendo aquella que, en primera instancia, consiga un nivel de mitigación mayor. Además, puesto que debe encontrarse un equilibrio económico–tecnológico adecuado, se descartarán no sólo aquellas soluciones que presenten deficiencias en la compensación del C. M., sino también las que aun presentando buen comportamiento, éste se nutra a costa de un mayor consumo de potencia.

5.2. Valores de carga de la línea Don Rodrigo–Pinar del Rey.

Es imprescindible conocer con la mayor fiabilidad posible el comportamiento de la línea Don Rodrigo–Pinar del Rey para así poder predecir el régimen de funcionamiento óptimo que deberá seguir el lazo.

Para ello, se dispondrá de los datos de carga de la línea correspondientes al año 2002: los valores de carga de la línea que se tienen en cada hora. La representación gráfica correspondiente a estos valores se presenta en la figura 5.2.

A primera vista, se observa que el rango de funcionamiento o de variación de la carga de la línea es sumamente elevado, presentando en los instantes de mayor trabajo corrientes de hasta 700 A, así como momentos de conducción prácticamente nula. Sin embargo, a pesar de la apariencia caótica de la gráfica, se puede apreciar un comportamiento *medio* regular. Con el fin de aclarar la información que proporcionan estos datos, se han efectuado otras representaciones gráficas. En la figura 5.3 se muestra la evolución de la carga media mensual a lo largo del año. Se comprueba que el mes de mayor consumo es Septiembre, así como el de menor consumo es Mayo. Los meses de verano son aquellos en los que se produce mayor consumo, así como en primavera y otoño éste es moderado. En la figura 5.2 se han representados los valores de carga de la línea para días representativos de las estaciones del año: invierno, primavera, verano y otoño. En ellas se observa que los picos y los mínimos se encuentran, independientemente de la estación, aproximadamente en los mismos valores horarios.

A la hora de considerar una corriente representativa de la línea, a la que se dará el nombre de *Corriente de diseño*, se estudiará la mejor de entre las posibilidades recogidas en la tabla 5.1¹.

¹La corriente mínima de 1.44 A corresponde a situaciones de desconexión de la línea.

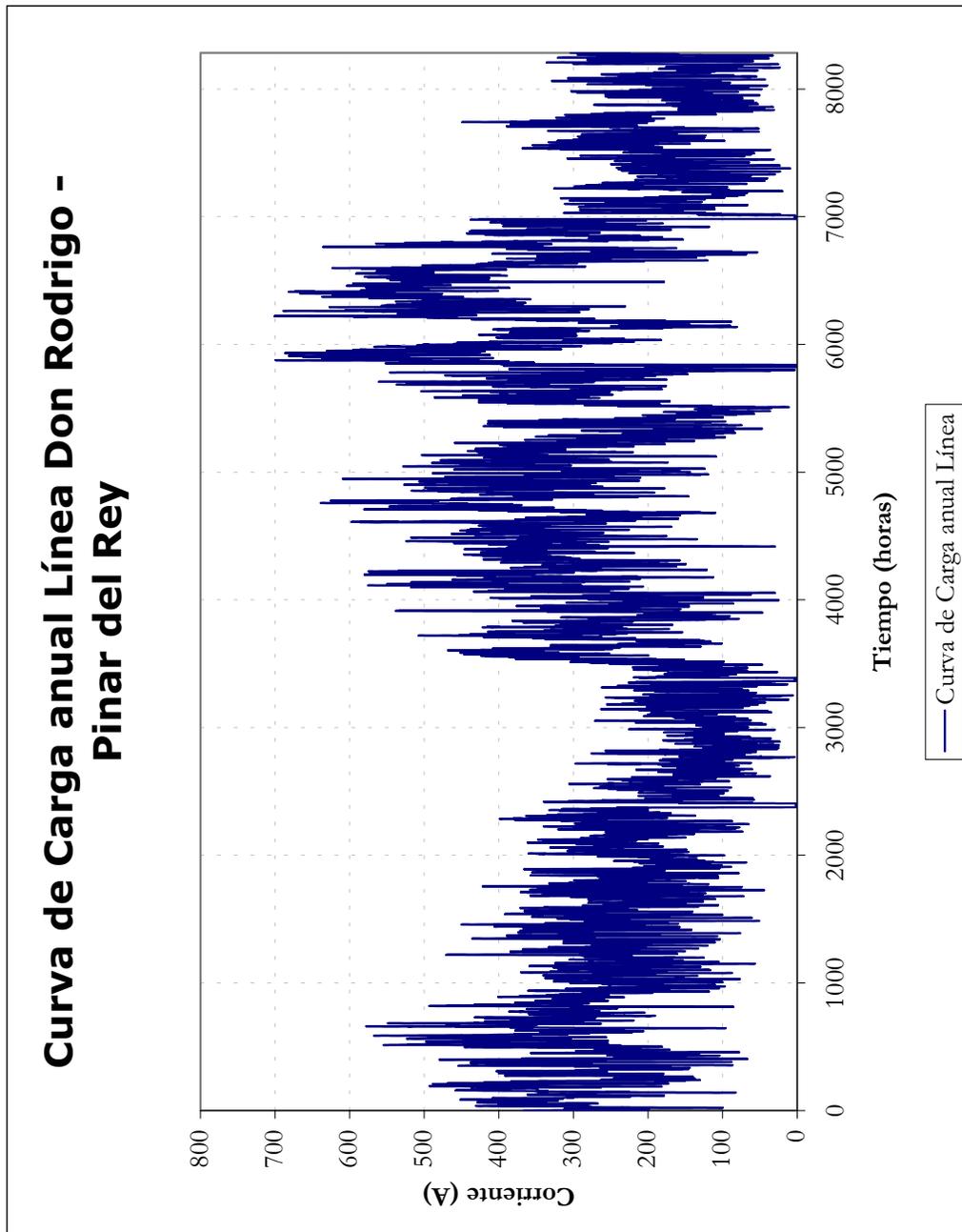


Figura 5.2: Curva anual de carga de la línea Don Rodrigo–Pinar del Rey, año 2002.

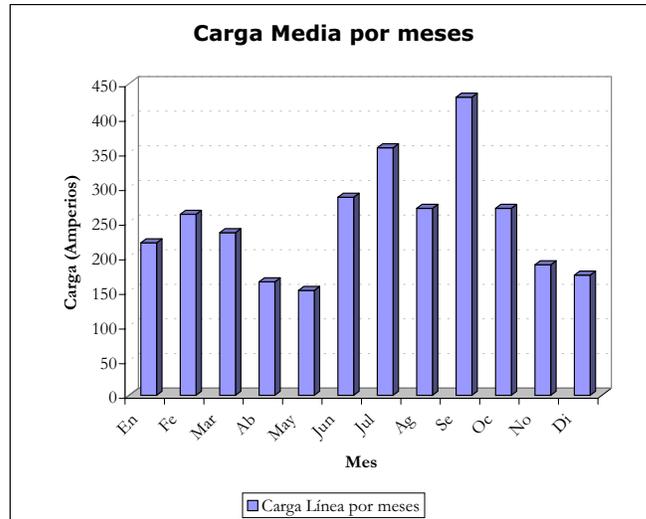


Figura 5.3: Curva de carga media por meses.

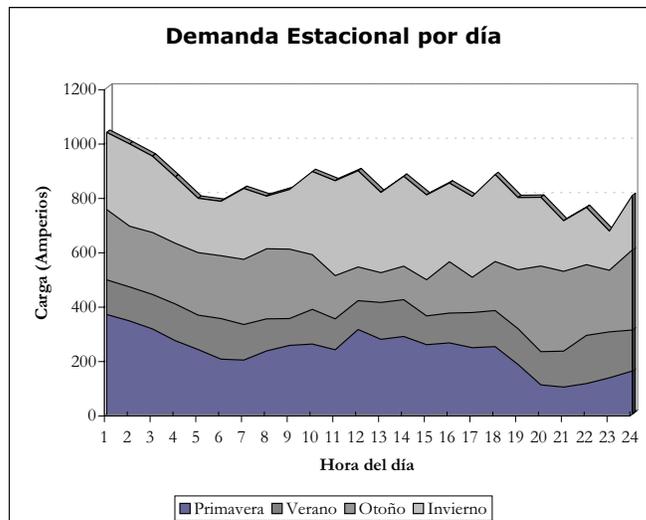


Figura 5.4: Curva de carga diaria para diferentes estaciones.

Tabla 5.1: Magnitudes representativas de la carga de la línea.

| Magnitud | Valor |
|----------------------------|----------|
| Corriente Máxima | 700,55 A |
| Corriente Media anual | 263,27 A |
| Corriente Mínima anual | 1,44 A |
| Corriente Promedio mensual | 250,658 |

La magnitud más representativa de la carga a que se encuentra sometida la línea al cabo del año es la *Corriente Media Anual*, la cual presenta la media aritmética de las cargas medidas en cada una de las horas del año. De tal forma, éste será el valor que se considerará como corriente de diseño de la línea. No obstante, también se tendrá en cuenta el valor de carga máxima anual, como más adelante se verá, para comprobar que el lazo de corriente se comporta según lo estimado incluso en situaciones tan desviadas de la media como es ésta.

5.2.1. Monótona de consumo.

En este epígrafe se analizará la curva correspondiente a la Monótona de Consumo de la línea Don Rodrigo–Pinar del Rey, figura 5.5.

La utilidad de esta curva radica en que muestra con sencillez los funcionamientos más probables. Ésto es así porque para cada valor de carga de la línea, establece el porcentaje de horas sobre el total que se tendrá una carga superior en dicha línea. Así, se observa que para valores de carga de, por ejemplo, 500 Amperios, sólo el 5.44 % del tiempo del ciclo considerado (en este caso un año) se tendrán cargas superiores en la línea. A su vez, para una carga de 0 A, se comprueba que el porcentaje de tener mayores cargas en la línea es del 100 %.

Estos datos serán de importancia a la hora de dimensionar la alimentación del lazo, puesto que es posible que convenga limitar el funcionamiento óptimo del lazo hasta valores de carga de la línea menores que los máximos reales, con el objeto de, a costa de dejar de cubrir pequeños períodos de funcionamiento a cargas elevadas, dimensionar el sistema de alimentación para valores de potencias menores. Ésto se analizará con mayor detenimiento en el capítulo 6.

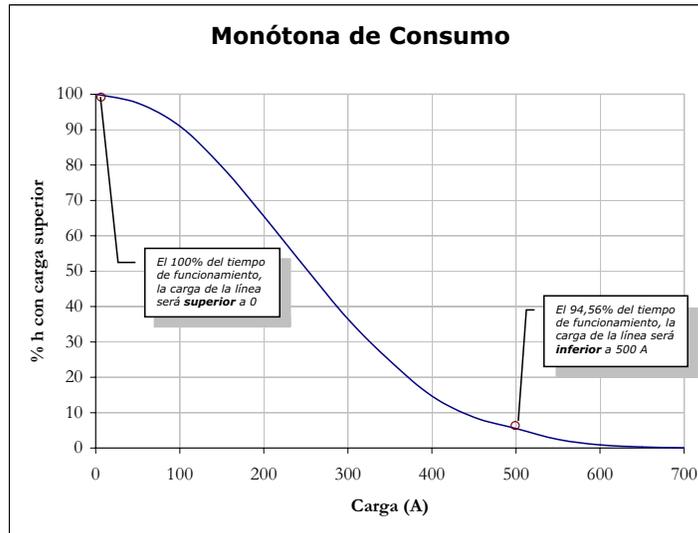


Figura 5.5: Monótona de consumo para la línea Don Rodrigo-Pinar del Rey

5.3. campo magnético generado por la Línea Don Rodrigo-Pinar del Rey en sus proximidades.

Una vez vistos los niveles de carga que soportará la línea Don Rodrigo-Pinar del Rey a lo largo de un año, surge la necesidad de estudiar la relación de la misma en relación a sus efectos en cuanto a lo que campo magnético se refiere. De tal forma, en este epígrafe se calcularán los valores teóricos de campo magnético que se tendrán en las proximidades de la línea dependiendo del valor de la corriente (carga) circulante por la misma.

En la figura 5.6 se recoge las representaciones gráficas correspondientes al campo magnético generado por la línea en los puntos próximos a ella en un radio de 100 metros para la *Carga Media Anual* (corriente de diseño) y para la *Carga Máxima*.

Se comprueba que para carga máxima el valor del campo magnético puede llegar incluso a triplicarse para algunos puntos, con respecto al producido con corriente de diseño.

Los valores de pico se dan justo en la abcisa en que se encuentran los

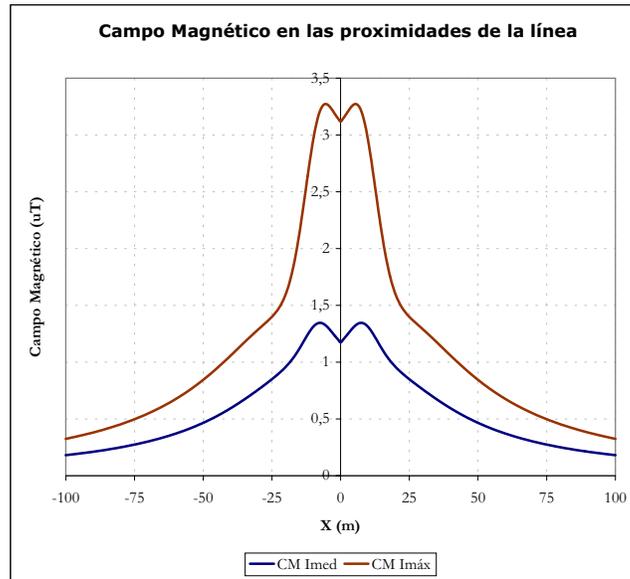


Figura 5.6: Curvas de campo magnético en las proximidades de la línea.

conductores de la línea, produciéndose una leve cancelación del CM en la mediana de la misma como consecuencia del solape del CM generado por uno y otro circuito. En la figura 5.7 se muestra un detalle de dicho campo magnético en los puntos que comprenden la zona de estudio. En ella se puede apreciar con mayor claridad los niveles de CM en dicha zona.

Las corrientes que se indican en las figuras 5.6 a 5.7 corresponden a las corrientes totales que circulan por la línea, o lo que es lo mismo, a la corriente que circularía por cada conductor si ésta fuese trifásica y compuesta por tres conductores.

No obstante, la línea Don Rodrigo–Pinar del Rey está compuesta por dos circuitos trifásicos, con tres conductores cada uno. De tal forma, se supondrá equilibrio entre fases de cada circuito, así como entre los circuitos mismos, con lo que se considerará que el valor eficaz de la corriente circulante por cada conductor será exactamente igual a la de cualquier otro que compone la línea. Ésto implica que, puesto que la línea considerada está compuesta de seis conductores, la corriente en cada uno de ellos corresponderá con la mitad de la considerada en las figuras indicadas previamente.

Todos los datos de carga de la línea Don Rodrigo–Pinar del Rey se encuen-

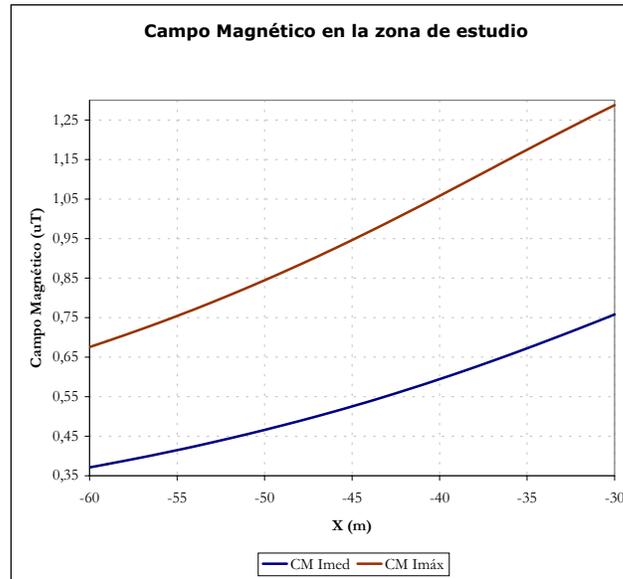


Figura 5.7: Curvas de campo magnético en las proximidades de la línea.

tran recogidos en el fichero D:\pfc_archivos\campo_mag\carga_línea.xls.

5.4. Criterios para selección y consideración de las soluciones.

Puesto que para realizar el análisis de las posiciones del lazo se considerarán muchas soluciones diferentes, será necesario establecer criterios, tanto para tomar en consideración diferentes soluciones previamente a su análisis, como para, una vez analizadas, cuantificar la bondad de los resultados arrojados por ellas. De tal forma, se incluirán bajo este epígrafe una serie de criterios y premisas que ayudarán a tener en cuenta unas soluciones, así como a descartar otras.

Las características que harán, a priori, de una ubicación del lazo aceptable son las siguientes:

- Valor del **C.M. resultante** en el *Punto de Medida*. El Punto de Medida es un punto perteneciente a la Zona de Estudio, cuya posición estratégica establece la mayor parte del mínimo de eficiencia dentro de dicha zona.

Así, una buena reducción del C.M. en el *Punto de Medida* hará prevér también unos buenos niveles de reducción en la **Zona de Estudio** (más adelante se verá que ésto no es del todo cierto, pero en primera aproximación y como criterio, es un factor que resulta de interés).

- Nivel de **Reducción del C.M.** que se alcance en toda la *Zona de Estudio*. Para facilitar la evaluación de este criterio, se definirá como **Nivel de Reducción de C.M. admisible** aquel que proporciona un C.M. resultante de valor *máximo* máximo de $0.3 \mu\text{T}$ en el punto de medida.
- Valor que adopte la **corriente que será necesaria inyectar al lazo** para obtener los niveles de reducción de C.M. correspondientes. Éste será un parámetro fundamental para la decisión de la ubicación del lazo, desde el punto de vista tanto económico como técnico, ya que a corrientes menores, se producirán menores pérdidas en los conductores del lazo, con la consiguiente posibilidad del uso de diferentes tipos de conductores, más económicos aunque con peores prestaciones, además de que los equipos de alimentación al lazo requerirán de un dimensionamiento inferior; menor cantidad de paneles fotovoltaicos, así como baterías de acumulación de capacidad menor. Así pues, éste será uno de los criterios de mayor entidad a la hora de elegir entre diferentes soluciones para la ubicación del lazo.
- **Dimensiones del Lazo de Corriente.** Éste es otro de los factores importantes a la hora de tomar en consideración unas u otras soluciones, debido a que para realizar los cálculos del campo magnético generado por el lazo, se han considerado solamente los dos tramos del conductor del mismo que son paralelos con respecto a los conductores de la Línea, despreciando los dos tramos perpendiculares (transversales) a tales efectos.

Además, **no** se tomarán en cuenta aquellas soluciones que presenten alguno de los conductores del lazo ubicados a cotas negativas, es decir “enterrados” bajo el nivel del suelo, debido a las características del terreno en que se ubicará el lazo de corriente. Por ello, se han escogido las referencias mostradas en la figura 5.8, que aseguran que para valores positivos tanto de H_{lazo} como de W_{lazo} no se producirá la situación descrita al principio del presente párrafo.

- **Dimensiones de los apoyos** sobre los que se dispondrá el Lazo de Corriente. Desde el punto de vista económico, resultará de interés apoyos

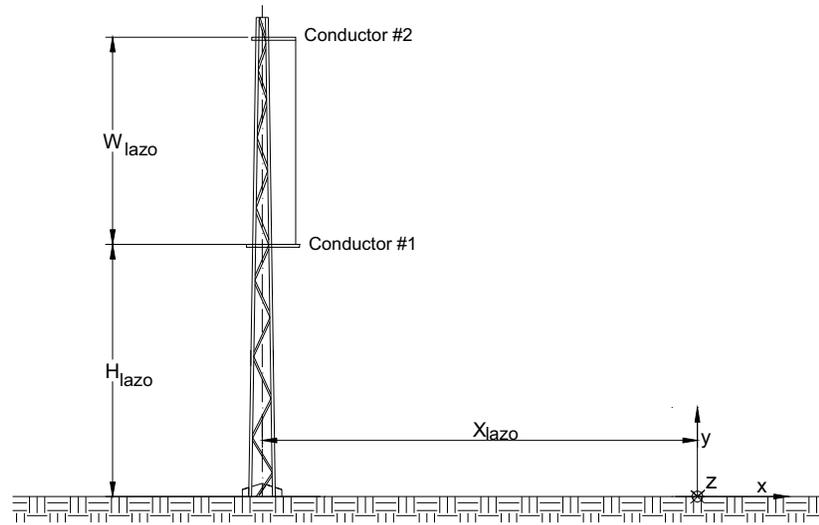


Figura 5.8: Esquema de las dimensiones y parámetros para el lazo con configuración vertical.

lo más bajos posibles, con el ahorro en material que ello supone; desde el punto de vista técnico, también interesarán apoyos que no sean muy elevados para reducir los fenómenos de pandeo que se producen en estructuras esbeltas, aunque tampoco habrán de ser éstos excesivamente pequeños, puesto que por el lazo podrán circular elevadas corrientes, lo cual hará que éste haya de ser dispuesto a una altura mínima del suelo como medida de protección, para evitar derivaciones, cortocircuitos etc.

En la figura 5.8 se muestran los parámetros que caracterizarán a un lazo con configuración vertical, parámetros que serán los que se usen en el estudio y análisis del lazo que aporte resultados óptimos.

Asimismo, en la figura 5.9 se contemplan la disposición de dichos parámetros para el caso de que la configuración del lazo sea horizontal.

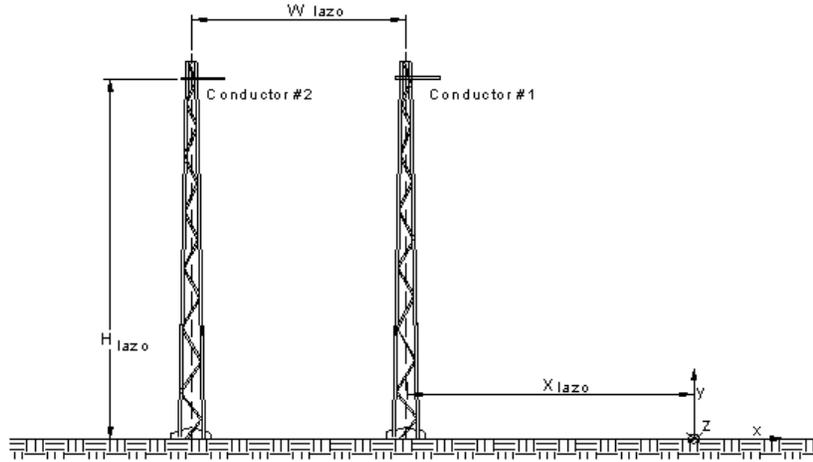


Figura 5.9: Esquema de las dimensiones y parámetros para el lazo con configuración horizontal.

5.5. Optimización para lazo de corriente vertical.

Se comenzará el análisis de la posición óptima del Lazo de corriente partiendo de la configuración vertical para el mismo, ya que como se indica en [1], para mitigar los C.M. generados por líneas configuradas en bandera (en este caso, en doble bandera, por tratarse de una línea de doble circuito), son más eficientes las configuraciones de lazo en esta disposición.

Recurriendo a la ayuda que puede prestar la herramienta Cálculo de Mitigación M.I.T. (apéndice A), programada específicamente para los cálculos que se incluyen en este capítulo, y estableciendo como parámetro geométrico característico del lazo la posición vertical del mismo, se analizarán 160000 posiciones diferentes, variando la distancia línea-lazo desde -0 metros hasta -100 metros. Se comenzará estudiando las ubicaciones del lazo comprendidas en el semieje negativo de abscisas (que es aquel que une el centro de la línea con el **Punto de Medida**). Posteriormente se realizará un estudio análogo de las posiciones sitas en el semieje positivo.

En la tabla TO se recogen los resultados de escoger la solución que optimiza la mitigación del C.M. en el Punto de Medida para diferentes valores de altura y anchura de lazo dada una misma posición X_{lazo} para el mismo. Para ello,

los valores de altura y anchura del lazo se han ido variando desde unos valores mínimos de 0 metros, hasta unos máximos de 40 metros para cada uno.

Hay que indicar que en la columna “mitigación” se han recogido los resultados correspondientes del cociente entre campo magnético resultante y campo magnético original:

$$CM_{resultante}/CM_{original}$$

Tabla TO: Tabla de soluciones que optimizan la reducción del C.M. para cada X_{lazo} .

| L_l | W_l | H_l | R |
|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 0 | 36 | 8 | 0,0921 | 25 | 17 | 2 | 0,2180 | 50 | 6 | 16 | 0,0907 | 75 | 16 | 38 | 0,2608 |
| 1 | 25 | 14 | 0,1238 | 26 | 4 | 7 | 0,1848 | 51 | 25 | 11 | 0,1509 | 76 | 17 | 39 | 0,2563 |
| 2 | 16 | 14 | 0,0954 | 27 | 5 | 6 | 0,1518 | 52 | 9 | 18 | 0,0942 | 77 | 18 | 35 | 0,2993 |
| 3 | 15 | 13 | 0,1180 | 28 | 2 | 7 | 0,1642 | 53 | 7 | 20 | 0,1166 | 78 | 17 | 38 | 0,2867 |
| 4 | 6 | 19 | 0,1294 | 29 | 8 | 4 | 0,1905 | 54 | 12 | 20 | 0,0987 | 79 | 18 | 39 | 0,2802 |
| 5 | 14 | 11 | 0,1316 | 30 | 2 | 6 | 0,1658 | 55 | 14 | 21 | 0,1093 | 80 | 38 | 39 | 0,3253 |
| 6 | 5 | 18 | 0,1679 | 31 | 5 | 4 | 0,2180 | 56 | 5 | 30 | 0,1228 | 81 | 39 | 39 | 0,3296 |
| 7 | 4 | 15 | 0,1226 | 32 | 3 | 4 | 0,1877 | 57 | 11 | 23 | 0,1271 | 82 | 40 | 39 | 0,3342 |
| 8 | 16 | 9 | 0,1873 | 33 | 4 | 3 | 0,1982 | 58 | 12 | 25 | 0,1168 | 83 | 20 | 34 | 0,3672 |
| 9 | 6 | 19 | 0,1576 | 34 | 6 | 2 | 0,2226 | 59 | 13 | 25 | 0,1313 | 84 | 20 | 38 | 0,3972 |
| 10 | 15 | 9 | 0,2047 | 35 | 2 | 3 | 0,2245 | 60 | 9 | 35 | 0,1072 | 85 | 21 | 33 | 0,3962 |
| 11 | 4 | 12 | 0,2335 | 36 | 3 | 2 | 0,2325 | 61 | 9 | 35 | 0,1206 | 86 | 21 | 32 | 0,4266 |
| 12 | 25 | 3 | 0,2528 | 37 | 2 | 2 | 0,2679 | 62 | 10 | 37 | 0,1150 | 87 | 21 | 37 | 0,4257 |
| 13 | 4 | 13 | 0,1802 | 38 | 3 | 2 | 0,3435 | 63 | 11 | 42 | 0,1064 | 88 | 21 | 36 | 0,4309 |
| 14 | 3 | 12 | 0,1595 | 39 | 2 | 2 | 0,7978 | 64 | 13 | 41 | 0,0931 | 89 | 22 | 37 | 0,4200 |
| 15 | 4 | 13 | 0,1388 | 40 | 9 | 2 | 0,9396 | 65 | 13 | 41 | 0,0996 | 90 | 21 | 33 | 0,4541 |
| 16 | 3 | 12 | 0,1526 | 41 | 3 | 2 | 0,2322 | 66 | 13 | 41 | 0,1080 | 91 | 22 | 34 | 0,4437 |
| 17 | 8 | 8 | 0,1633 | 42 | 7 | 3 | 0,2274 | 67 | 10 | 32 | 0,2161 | 92 | 23 | 34 | 0,4592 |
| 18 | 3 | 12 | 0,1305 | 43 | 4 | 5 | 0,2119 | 68 | 12 | 35 | 0,1825 | 93 | 24 | 35 | 0,4475 |
| 19 | 5 | 9 | 0,1426 | 44 | 2 | 7 | 0,1755 | 69 | 13 | 36 | 0,1787 | 94 | 24 | 33 | 0,4809 |
| 20 | 2 | 9 | 0,1849 | 45 | 4 | 9 | 0,1836 | 70 | 14 | 37 | 0,1866 | 95 | 25 | 34 | 0,4686 |
| 21 | 4 | 8 | 0,1400 | 46 | 30 | 6 | 0,1905 | 71 | 14 | 37 | 0,1976 | 96 | 26 | 32 | 0,4922 |
| 22 | 2 | 10 | 0,1662 | 47 | 2 | 12 | 0,1287 | 72 | 15 | 37 | 0,2109 | 97 | 27 | 31 | 0,5119 |
| 23 | 6 | 8 | 0,0987 | 48 | 16 | 10 | 0,1678 | 73 | 16 | 38 | 0,2081 | 98 | 23 | 42 | 0,5187 |
| 24 | 4 | 8 | 0,1889 | 49 | 2 | 20 | 0,1570 | 74 | 16 | 38 | 0,2276 | 99 | 28 | 31 | 0,5280 |

En la tabla TO, se ha denominado L_l a la distancia, en metros, que hay entre la mediana de la línea y el lazo de corriente. Su valor se ha escrito positivo, aunque hay que tener en cuenta que para estas posiciones de lazo, las posiciones corresponden a valores de X_l negativos. H_l representa la altura del

lazo, en metros; y W_l la anchura, también en metros. R es el cociente entre el C.M. resultante y el C.M. original.

De una primera inspección de los valores plasmados en la tabla TO, se puede observar que para ciertas posiciones, X_{lazo} , no es posible encontrar soluciones que consigan unos niveles de mitigación *admisibles* en el *Punto de Medida* (el C.M. resultante presenta valores en dicho punto superiores a los $0,3 \mu\text{T}$ que se ha establecido como cota).

De tal forma, considerando de entre las posibilidades expuestas en la tabla TO tan sólo aquellas que consiguen niveles de mitigación en el Punto de Medida inferiores o iguales a dichos niveles máximos, se confecciona la tabla TF, que será la que se tome como punto de partida para analizar soluciones y ubicaciones diferentes del lazo. En lo sucesivo, este paso se realizará directamente, presentando solamente aquellas soluciones que consiguen reducciones suficientes del C.M.

Tabla TF: Tabla de óptimos filtrados.

| L_l | W_l | H_l | R | L_l | W_l | H_l | R | L_l | W_l | H_l | R |
|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 0 | 36 | 8 | 0,0921 | 22 | 2 | 10 | 0,1662 | 52 | 9 | 18 | 0,0942 |
| 1 | 25 | 14 | 0,1238 | 23 | 6 | 8 | 0,0987 | 53 | 7 | 20 | 0,1166 |
| 2 | 16 | 14 | 0,0954 | 24 | 4 | 8 | 0,1889 | 54 | 12 | 20 | 0,0987 |
| 3 | 15 | 13 | 0,1180 | 25 | 17 | 2 | 0,2180 | 55 | 14 | 21 | 0,1093 |
| 4 | 6 | 19 | 0,1294 | 26 | 4 | 7 | 0,1848 | 56 | 5 | 30 | 0,1228 |
| 5 | 14 | 11 | 0,1316 | 27 | 5 | 6 | 0,1518 | 57 | 11 | 23 | 0,1271 |
| 6 | 5 | 18 | 0,1679 | 28 | 2 | 7 | 0,1642 | 58 | 12 | 25 | 0,1168 |
| 7 | 4 | 15 | 0,1226 | 29 | 8 | 4 | 0,1905 | 59 | 13 | 25 | 0,1313 |
| 8 | 16 | 9 | 0,1873 | 30 | 2 | 6 | 0,1658 | 60 | 9 | 35 | 0,1072 |
| 9 | 6 | 19 | 0,1576 | 32 | 3 | 4 | 0,1877 | 61 | 9 | 35 | 0,1206 |
| 13 | 4 | 13 | 0,1802 | 33 | 4 | 3 | 0,1982 | 62 | 10 | 37 | 0,1150 |
| 14 | 3 | 12 | 0,1595 | 44 | 2 | 7 | 0,1755 | 63 | 11 | 42 | 0,1064 |
| 15 | 4 | 13 | 0,1388 | 45 | 4 | 9 | 0,1836 | 64 | 13 | 41 | 0,0931 |
| 16 | 3 | 12 | 0,1526 | 46 | 30 | 6 | 0,1905 | 65 | 13 | 41 | 0,0996 |
| 17 | 8 | 8 | 0,1633 | 47 | 2 | 12 | 0,1287 | 66 | 13 | 41 | 0,1080 |
| 18 | 3 | 12 | 0,1305 | 48 | 16 | 10 | 0,1678 | 68 | 12 | 35 | 0,1825 |
| 19 | 5 | 9 | 0,1426 | 49 | 2 | 20 | 0,1570 | 69 | 13 | 36 | 0,1787 |
| 20 | 2 | 9 | 0,1849 | 50 | 6 | 16 | 0,0907 | 70 | 14 | 37 | 0,1866 |
| 21 | 4 | 8 | 0,1400 | 51 | 25 | 11 | 0,1509 | 71 | 14 | 37 | 0,1976 |

Para facilitar la labor de análisis y estudio de las diferentes soluciones mostradas en la tabla TF (y de otras que se verán más adelante), se dividirá el

rango de variación del valor de X_{lazo} en tres zonas claramente diferenciadas:

1. Aquellas soluciones que se dan para valores X_{lazo} positivos, es decir, configuraciones que ubican al lazo más alejado del *Punto de Medida* que la mediana de la Línea. Este tipo de soluciones, como caso particular se estudiarán aparte del resto.
2. Aquellas soluciones que comprenden configuraciones del lazo tales que X_{lazo} admite valores comprendidos en el tramo comprendido entre la mediana de la Línea y el *Punto de Medida*.
3. Las soluciones que presentan valores de X_{lazo} tales que sitúan al lazo más alejado de la línea que el *Punto de Medida*.

A su vez, la segunda de las zona se podrán descomponer en tres tramos en los cuales el comportamiento de las soluciones presenta ciertos rasgos concomitantes que facilitan el análisis de las mismas. Así, se considerarán los tres tramos siguientes:

1. X_{lazo} **próximo a la Línea eléctrica**. Se analizarán las soluciones que presentan puntos de ubicación del lazo con valores X_{lazo} variables desde 0 metros hasta -5 metros.
2. X_{lazo} **intermedio entre Línea y Punto de medida**. Comprenderá aquellas soluciones que sitúan al lazo entre $X_{lazo} = -15$ metros y $X_{lazo} = -24$ metros.
3. X_{lazo} **próximo al Punto de medida**. Para soluciones con X_{lazo} comprendida entre -25 y -35 metros.

5.5.1. Análisis de lazos de corriente ubicados en posiciones próximas a la Red.

Bajo este epígrafe se recogerán los resultados del análisis y estudio de soluciones que establecen el lazo de corriente en posiciones cercanas a la mediana de la Línea eléctrica.

Se comenzará por estudiar los casos recogidos en la tabla TF, y posteriormente se analizarán aquellos otros que, para la misma X_{lazo} , aun no presentando la reducción máxima en el *Punto de Medida*, suponen soluciones de interés.

Tabla 5.2: Resultados para lazo ubicado en las proximidades de la mediana de la línea.

| X_{lazo} | W_{lazo} | H_{lazo} | Mitigación | Corriente |
|-------------------|-------------------|-------------------|------------|-------------------------------|
| 0 | 36 | 8 | 0.0921 | $102,1566 + j \cdot 68,1044$ |
| -1 | 25 | 14 | 0.12385 | $122,6994 + j \cdot 92,0245$ |
| -2 | 16 | 14 | 0.0954 | $172,9107 + j \cdot 115,2738$ |
| -3 | 15 | 13 | 0,118 | $194,1748 + j \cdot 129,4498$ |
| -4 | 6 | 19 | 0.1294 | $384,6154 + j \cdot 192,3077$ |
| -5 | 14 | 11 | 0.1316 | $166,6667 + j \cdot 133,3333$ |

De tal forma, efectuando los cálculos pertinentes para los parámetros de lazo que optimizan la mitigación del C.M. en los cinco primeros metros contiguos a la mediana de la línea. Los resultados correspondientes se recogen en la tabla 5.2.

En la figura 5.10 se muestra la representación gráfica correspondiente al nivel de mitigación obtenido en los puntos próximos a la línea eléctrica (y a la zona de estudio) obtenida mediante la relación $CM_{\text{resultante}}/CM_{\text{original}}$, para la ubicación del lazo de corriente en $X_{\text{lazo}} = 0$.

Se puede comprobar que, en efecto, se obtienen los niveles mayores de reducción del C.M. justamente en el *Punto de Medida*, $(-40, y_m)$, mientras que para puntos situados en las proximidades de la mediana de la línea ($X=0$), justamente donde se encuentra el lazo dispuesto, la mitigación es “negativa”. Ésto es: en contra de lo que se pretende, en esta pequeña región la relación $CM_{\text{resultante}}/CM_{\text{original}}$ es superior a la unidad, con lo cual el C.M. final conseguido es aún mayor que el que se tenía previo a la ubicación del lazo.

Los niveles de mitigación en la zona de estudio, no obstante, son bastante buenos, como se puede apreciar en las figura 5.11 y 5.12.

En la figura 5.11 se muestra la curva de **Eficiencia** del lazo, la cual viene definida por la expresión

$$SF = \frac{CM_{\text{original}} - CM_{\text{resultante}}}{CM_{\text{original}}}$$

Para mostrar la evolución de los niveles de mitigación del Campo Magnético, se han calculado los valores de estas curvas para puntos de medida con cota +1 y +3 metros: $(-40, +1)$ y $(-40, +3)$ respectivamente.

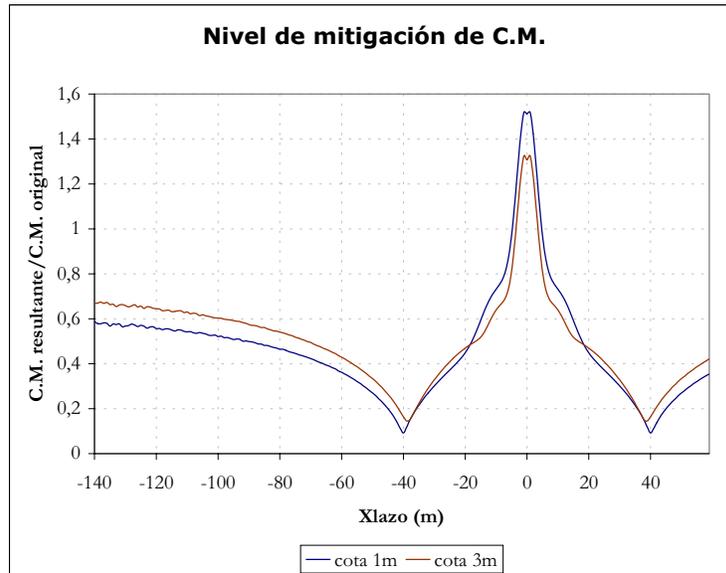


Figura 5.10: Nivel de mitigación para lazo de corriente ubicado en $X_{lazo} = 0$.

Otro detalle de importancia para esta primera solución ($X_{lazo} = 0$), es que, por ser el sistema *lazo-línea eléctrica* completamente simétrico respecto de la ordenada $x = 0$, los resultados arrojan valores iguales para puntos simétricamente dispuestos respecto de este eje (los resultados obtenidos para el punto $(-40, +1)$ son idénticos a los obtenidos para el $(+40, +1)$).

Para el resto de soluciones recogidas en la tabla 5.2, se presentan también las representaciones gráficas correspondientes a los Campos Magnéticos resultantes como curvas características de los niveles de mitigación alcanzados.

Se comprueba que para las soluciones correspondientes a $X_{lazo} = -4$ y -5 no se cumple la condición previa de cálculo que se establecía para garantizar niveles de C.M. resultantes menores a $0,3 \mu\text{T}$ en todos los puntos del dominio de estudio (área de estudio). Sin embargo, para el resto de soluciones analizadas, desde $X_{lazo} = 0$ hasta $X_{lazo} = -3$, dicha premisa se cumple sin problemas.

No obstante, el mayor de los problemas que presentan las soluciones que sitúan al lazo de corriente próximo a la mediana de la línea eléctrica, no son los niveles de mitigación, que, en mayor o menor medida suelen ser bastante buenos, sino la corriente que es necesario inyectar al lazo de corriente para conseguirlos, que en estas situaciones se presenta demasiado elevada (basta

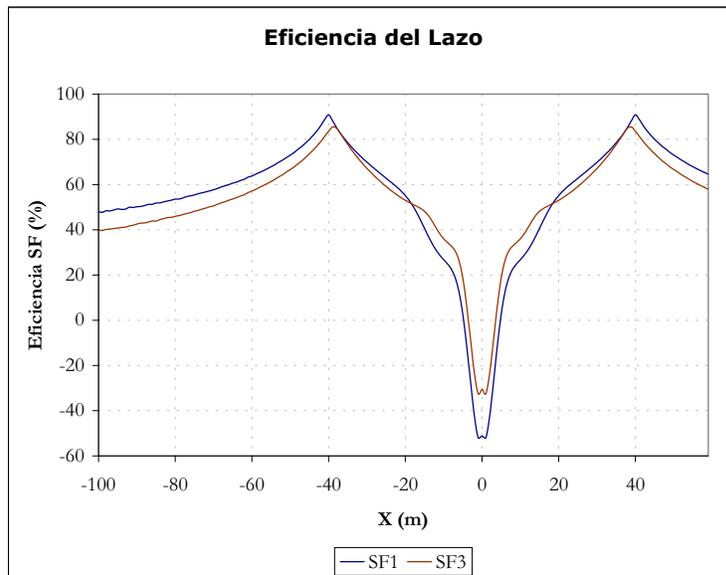


Figura 5.11: Eficiencia del lazo para $X_{lazo} = 0$.

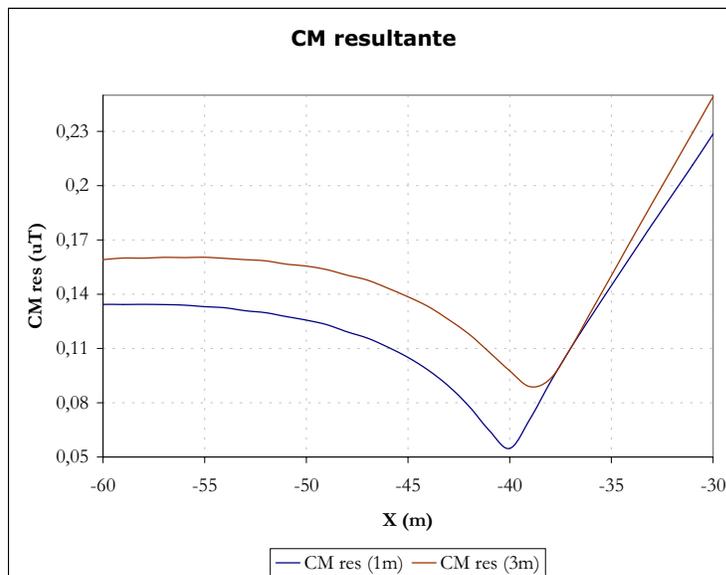


Figura 5.12: campo magnético resultante para lazo con $X_{lazo} = 0$.

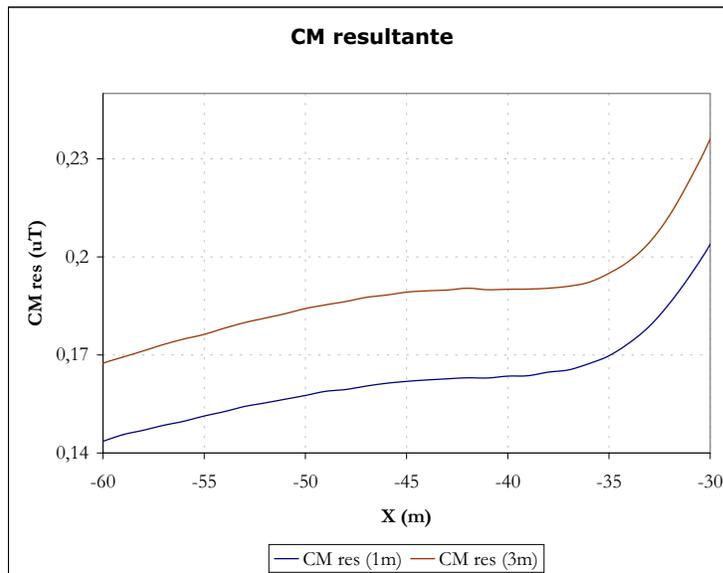


Figura 5.13: campo magnético resultante para lazo con $X_{lazo} = -1$.

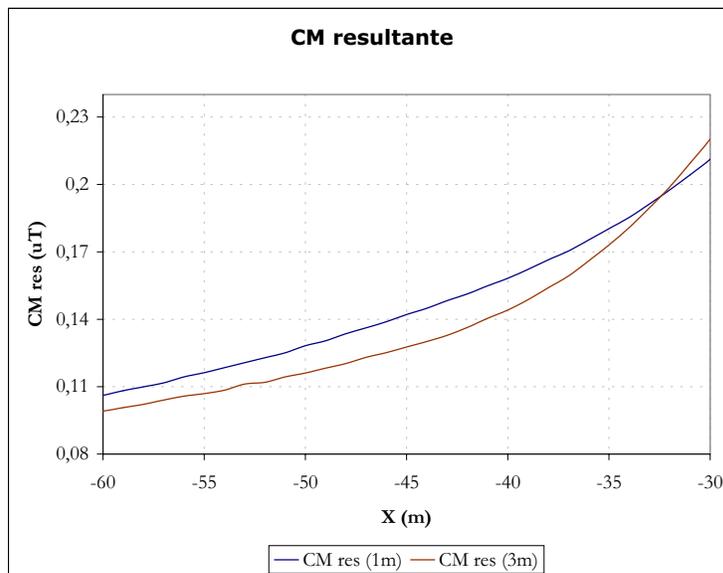


Figura 5.14: campo magnético resultante para lazo con $X_{lazo} = -2$.

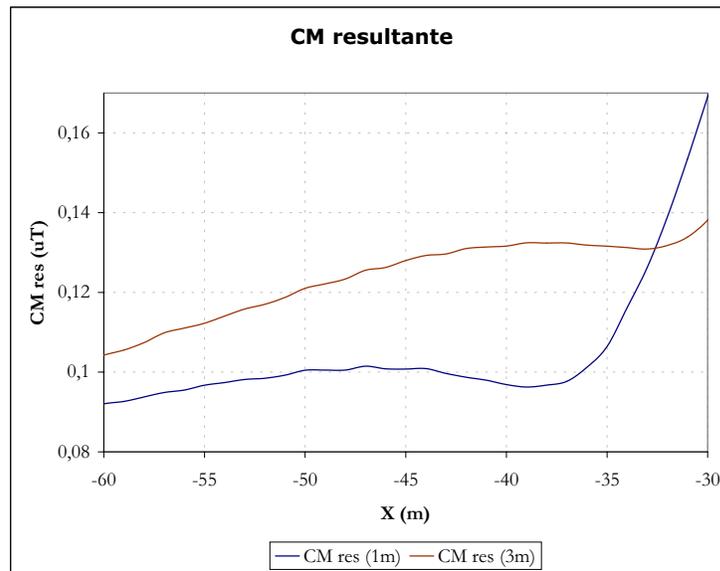


Figura 5.15: campo magnético resultante para lazo con $X_{lazo} = -3$.

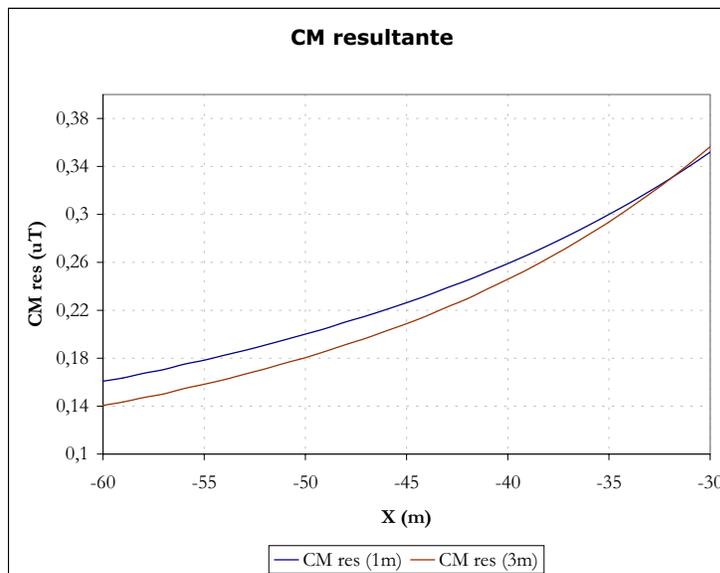


Figura 5.16: campo magnético resultante para lazo con $X_{lazo} = -4$.

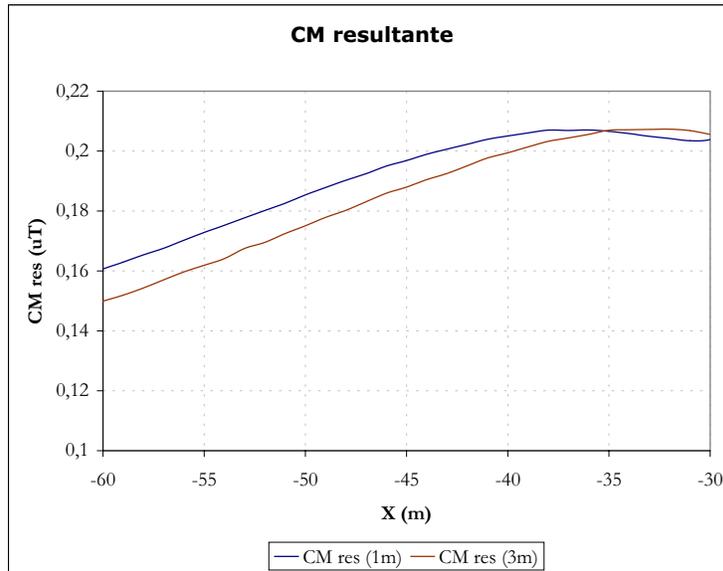


Figura 5.17: campo magnético resultante para lazo con $X_{lazo} = -5$.

observar la última columna de la tabla 5.2).

Analizando soluciones que, para las posiciones de lazo consideradas X_{lazo} , en las cuales no se obtengan los valores de mitigación óptimos en el punto de medida, se comprueba que los resultados son similares a los ya presentados, de forma que no se tendrán en consideración como firmes “candidatas” a la configuración final del lazo.

Otra característica que se puede observar para estas soluciones, es el hecho de que las dimensiones del lazo de corriente son demasiado elevadas: anchura y altura de lazo excesivas equivalen a apoyos del lazo más altos y caros, además de mayores longitudes de conductor para el lazo de corriente.

5.5.2. Ubicación del lazo en puntos intermedios entre el Punto de Medida y la Línea.

En este epígrafe se analizarán aquellas soluciones que sitúan al lazo de corriente en posiciones comprendidas entre $X_{lazo} = -15$ metros y $X_{lazo} = -24$ metros.

El procedimiento de análisis que se seguirá será el mismo que se utilizó para

ubicaciones de lazo próximas a la mediana de la línea: se analizarán aquellas soluciones que consiguen C.M. resultante mínimo en el Punto de Medida, y posteriormente se extenderán las consideraciones a soluciones que presenten valores admisibles de C.M. en dicho punto.

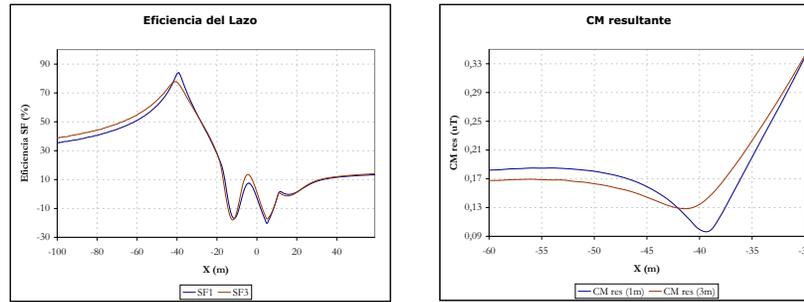
En la serie de figuras que se presenta desde 5.18 hasta 5.35 se muestran los resultados de mitigación del campo magnético para las configuraciones de lazo óptimas (las que se recogen en la tabla TF, que son aquellas figuras en las que tan solo se menciona el valor de la posición del lazo X_{lazo} , y los resultados correspondientes a otras soluciones alternativas que, si bien no presentan eficiencia de lazo máxima en el Punto de Medida, sí responden de forma efectiva a los objetivos establecidos. Además, para estas alternativas, en multitud de casos se consiguen resultados prácticamente igual de buenos desde el punto de vista de la compensación del Campo, pero con mejores comportamientos desde el punto de vista económico: menores corrientes de lazo. En la tabla 5.3 se recogen los valores del módulo de esta corriente.

Tabla 5.3: Corrientes correspondientes a las soluciones óptimas y alternativas.

| <i>Configuración</i> | I_l (A) | <i>Configuración</i> | I_l (A) |
|--------------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|
| $X_l = -15; W_l = 6; H_l = 14$ | 277.35 | $X_l = -20; W_l = 10; H_l = 6$ | 105.06 |
| $X_l = -16; W_l = 6; H_l = 13$ | 257.54 | $X_l = -21; W_l = 4; H_l = 8$ | 223.95 |
| $X_l = -17; W_l = 13; H_l = 7$ | 123.81 | $X_l = -21; W_l = 7; H_l = 9$ | 130.16 |
| $X_l = -17; W_l = 5; H_l = 11$ | 305.56 | $X_l = -22; W_l = 2; H_l = 10$ | 400.62 |
| $X_l = -18; W_l = 12; H_l = 7$ | 125.62 | $X_l = -22; W_l = 14; H_l = 4$ | 63.86 |
| $X_l = -18; W_l = 5; H_l = 12$ | 267.08 | $X_l = -23; W_l = 6; H_l = 8$ | 118.73 |
| $X_l = -19; W_l = 16; H_l = 5$ | 89,121 | $X_l = -23; W_l = 16; H_l = 3$ | 52,134 |
| $X_l = -19; W_l = 8; H_l = 10$ | 163.79 | $X_l = -24; W_l = 4; H_l = 8$ | 156.69 |
| $X_l = -20; W_l = 2; H_l = 9$ | 493.91 | $X_l = -24; W_l = 6; H_l = 8$ | 107.55 |

Se comprueba que, cuanto mayores son los valores de X_{lazo} , mayor es la pendiente de la curva de eficiencia (y de la curva de campo magnético) a la derecha del Punto de medida, con lo cual la forma de dicha representación en esta zona se hace más espigada, obteniéndose buenos resultados de forma excesivamente localizada. Éste será un fenómeno que se podrá observar con mayor claridad en los análisis de la zona siguiente (sección 5.5.3).

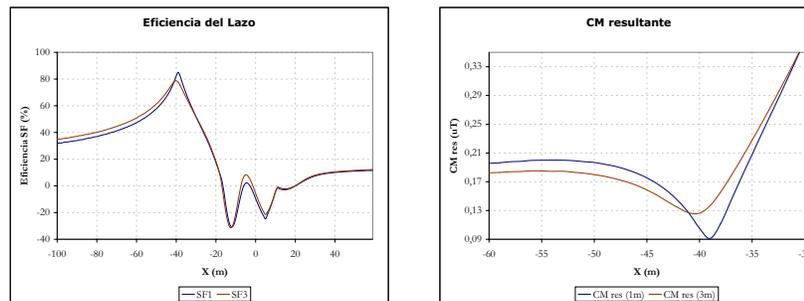
Debe tenerse en cuenta que por cada fase de la línea (en cada uno de los



(a) Eficiencia del lazo

(b) C.M. resultante

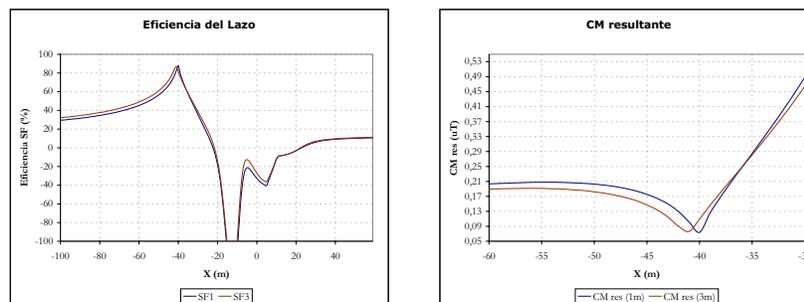
Figura 5.18: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -15$



(a) Eficiencia del lazo

(b) C.M. resultante

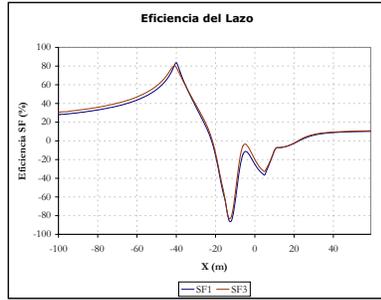
Figura 5.19: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -16$



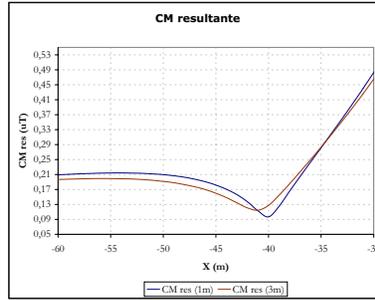
(a) Eficiencia del lazo

(b) C.M. resultante

Figura 5.20: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -17$

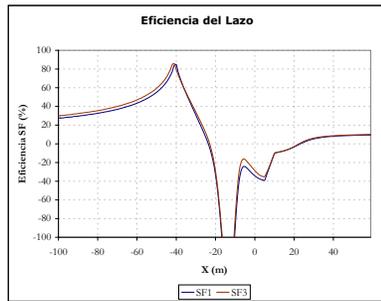


(a) Eficiencia del lazo

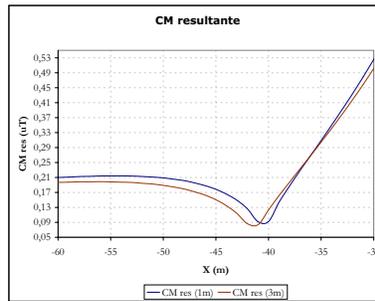


(b) C.M. resultante

Figura 5.21: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -17, W_{lazo} = 5, H_{lazo} = 11$

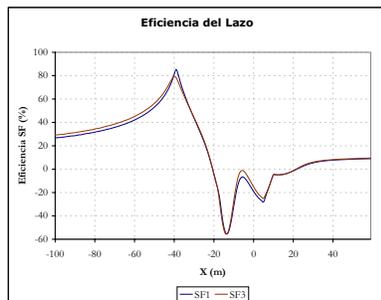


(a) Eficiencia del lazo

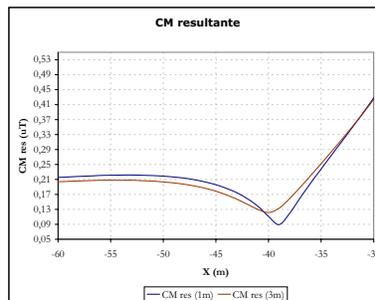


(b) C.M. resultante

Figura 5.22: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -18$

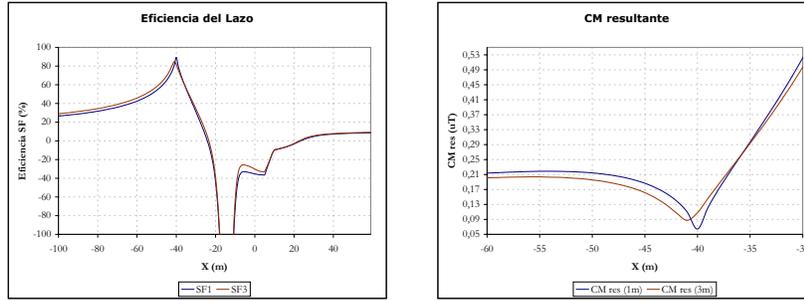


(a) Eficiencia del lazo



(b) C.M. resultante

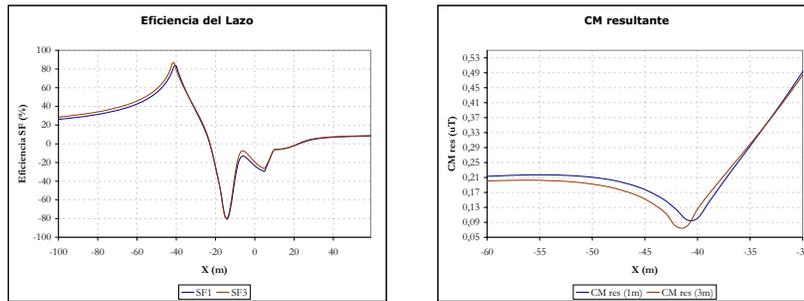
Figura 5.23: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -18, W_{lazo} = 5, H_{lazo} = 12$



(a) Eficiencia del lazo

(b) C.M. resultante

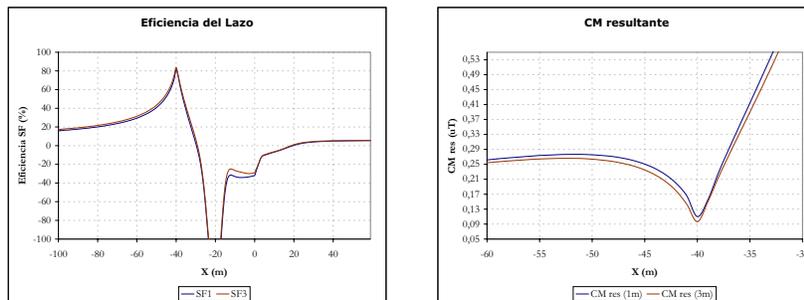
Figura 5.24: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -19$



(a) Eficiencia del lazo

(b) C.M. resultante

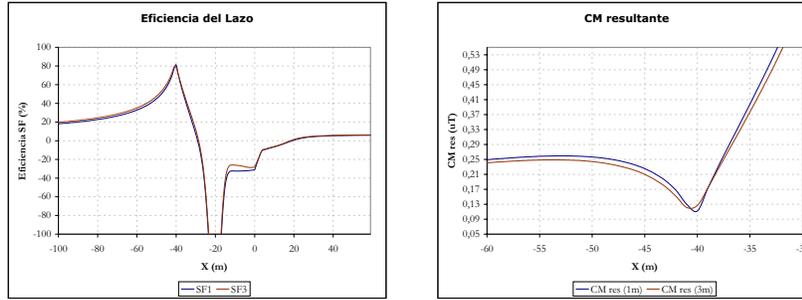
Figura 5.25: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -19, W_{lazo} = 8, H_{lazo} = 10$



(a) Eficiencia del lazo

(b) C.M. resultante

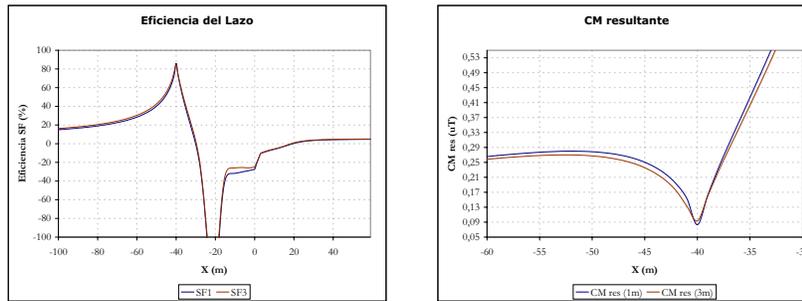
Figura 5.26: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -20$



(a) Eficiencia del lazo

(b) C.M. resultante

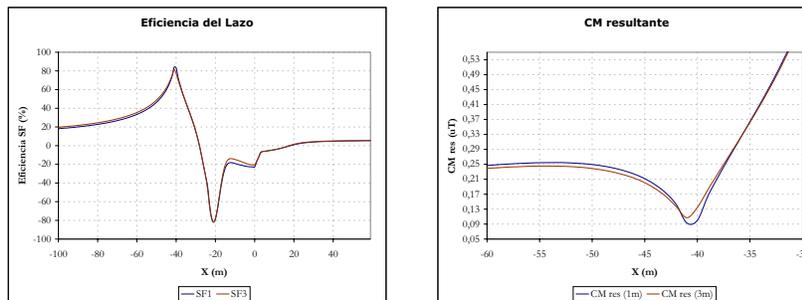
Figura 5.27: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -20, W_{lazo} = 10, H_{lazo} = 6$



(a) Eficiencia del lazo

(b) C.M. resultante

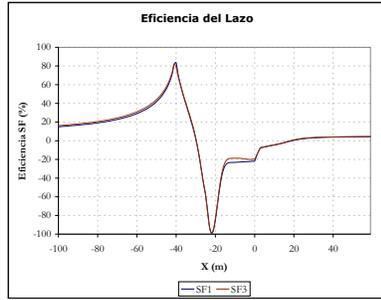
Figura 5.28: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -21$



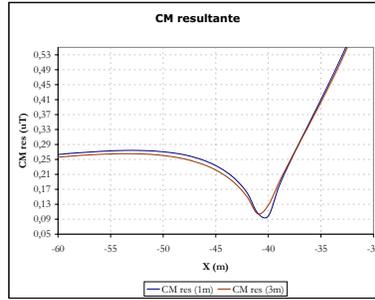
(a) Eficiencia del lazo

(b) C.M. resultante

Figura 5.29: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -21, W_{lazo} = 7, H_{lazo} = 9$



(a) Eficiencia del lazo

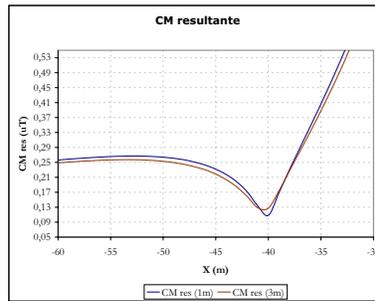


(b) C.M. resultante

Figura 5.30: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -22$

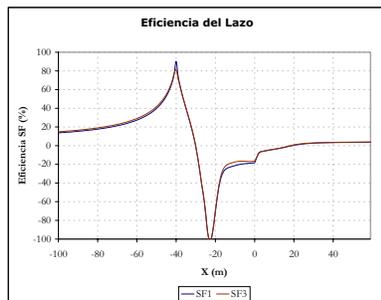


(a) Eficiencia del lazo

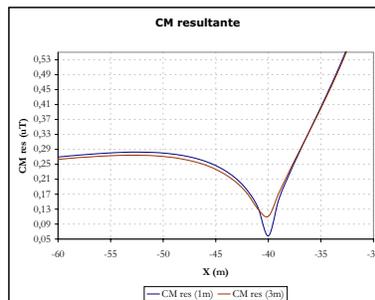


(b) C.M. resultante

Figura 5.31: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -22, W_{lazo} = 14, H_{lazo} = 4$

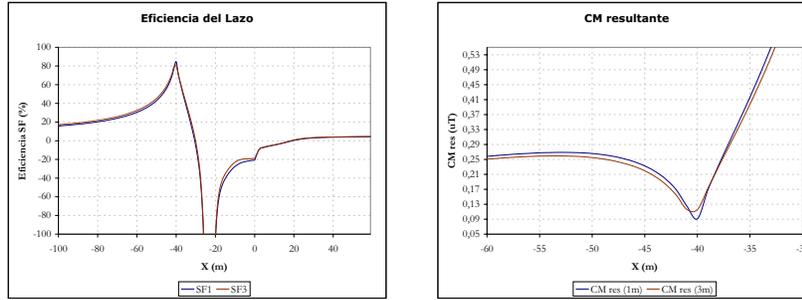


(a) Eficiencia del lazo



(b) C.M. resultante

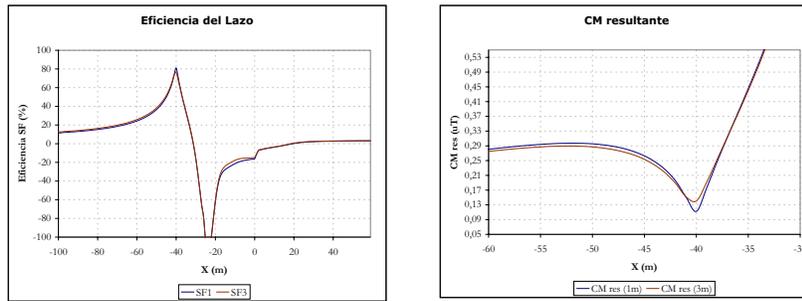
Figura 5.32: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -23$



(a) Eficiencia del lazo

(b) C.M. resultante

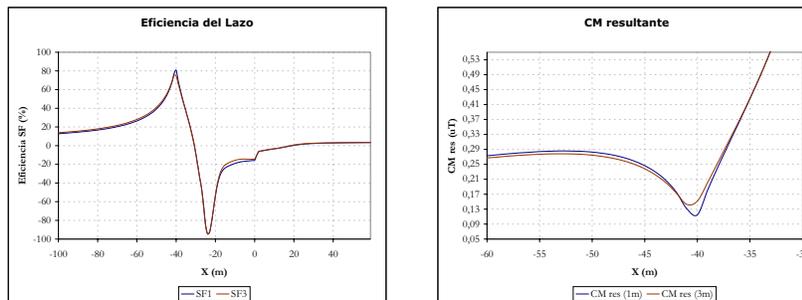
Figura 5.33: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -23, W_{lazo} = 16, H_{lazo} = 3$



(a) Eficiencia del lazo

(b) C.M. resultante

Figura 5.34: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -24$



(a) Eficiencia del lazo

(b) C.M. resultante

Figura 5.35: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -24, W_{lazo} = 6, H_{lazo} = 8$

dos circuitos de los que dispone), la corriente que circula se ha supuesto de módulo $I_f = 132$ A. En base a esto, no serán tomadas en consideración aquellas soluciones que requieran de un aporte al lazo de una corriente superior a ésta (esto no es más que un criterio para acotar las soluciones y alternativas posibles, con el fin de elegir aquellas que resulten más rentables).

Otro factor discriminatorio que se empleará también para descartar soluciones, es la *altura de los apoyos del lazo*, que vendrá dada como la suma $H_{lazo} + W_{lazo}$. Es conveniente conseguir soluciones que presenten los menores valores posibles de esta suma.

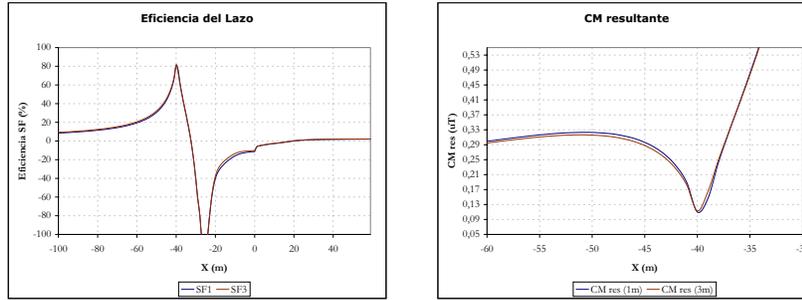
Teniendo esto presente, y observando las representaciones gráficas (desde 5.18 hasta 5.35), así como la tabla 5.3, se comprueba que las soluciones más aceptables de entre las consideradas son las que establecen la configuración del lazo en $X_l = -21; W_l = 7; H_l = 9$ y $X_l = -22; W_l = 14; H_l = 4$. Para valores superiores de X_{lazo} se comprueba que los niveles de mitigación en toda la zona de estudio se van haciendo peores, así como para valores inferiores de X_{lazo} las corrientes del lazo son demasiado elevadas.

5.5.3. Ubicación del lazo en puntos próximos a la zona de estudio.

En esta sección se analizarán las soluciones que colocan al lazo de corriente en posiciones próximas a la zona de estudio, dentro de la zona limitada por ésta y la línea eléctrica.

El primer dato de importancia que se extrae de la búsqueda de soluciones y alternativas para esta zona es que hay menos que cumplan el criterio inicial de buen nivel de mitigación en el punto de medida. Esto implica que las soluciones se van haciendo cada vez peores en cuanto a niveles de mitigación conforme X_{lazo} aumenta. Con los valores recogidos en la tabla 5.4 se ratifica este hecho.

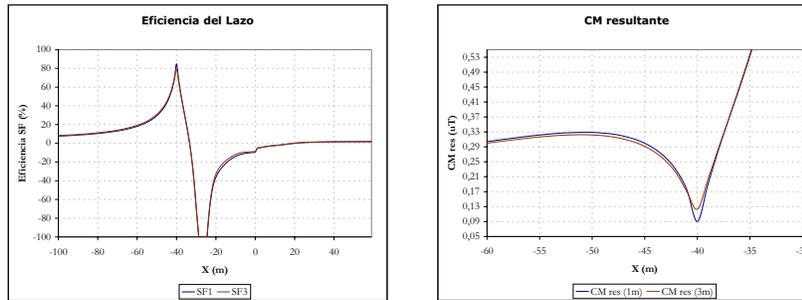
En las figuras 5.36 a 5.43 se presentan las representaciones de las curvas correspondientes a las eficiencias del lazo así como el campo magnético resultante para las diferentes alternativas de la tabla 5.4. Los cálculos han sido efectuados, de nuevo, para dos cotas significativas del punto de medida, 1 y 3 metros, con el objetivo de mostrar la evolución e influencia de este parámetro en los resultados.



(a) Eficiencia del lazo

(b) C.M. resultante

Figura 5.36: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -26$



(a) Eficiencia del lazo

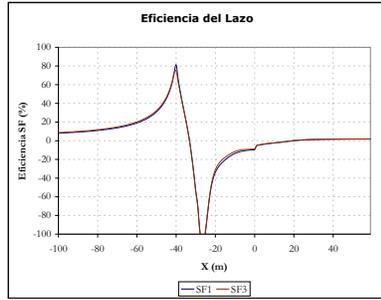
(b) C.M. resultante

Figura 5.37: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -27$

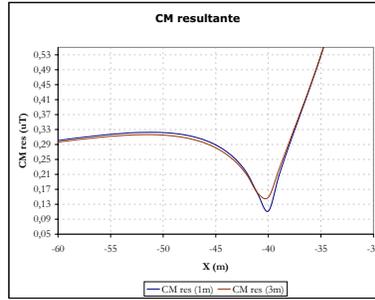
Tabla 5.4: Corrientes correspondientes a las soluciones óptimas y alternativas.

| Configuración | I_l (A) | Configuración | I_l (A) |
|-------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|
| $X_l = -26; W_l = 4; H_l = 7$ | 115.56 | $X_l = -30; W_l = 2; H_l = 6$ | 123.9 |
| $X_l = -27; W_l = 5; H_l = 6$ | 83.13 | $X_l = -30; W_l = 2; H_l = 5$ | 123.67 |
| $X_l = -27; W_l = 4; H_l = 7$ | 105.23 | $X_l = -32; W_l = 3; H_l = 4$ | 52.39 |
| $X_l = -29; W_l = 8; H_l = 4$ | 40.66 | $X_l = -33; W_l = 4; H_l = 3$ | 31.66 |

La primera conclusión que se extrae de la inspección de los resultados obtenidos para las soluciones de este epígrafe, es que el comportamiento de to-

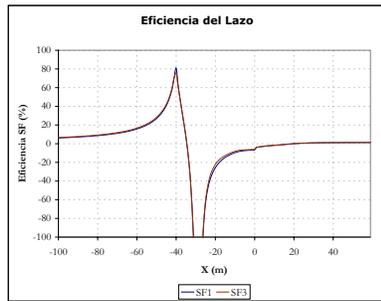


(a) Eficiencia del lazo

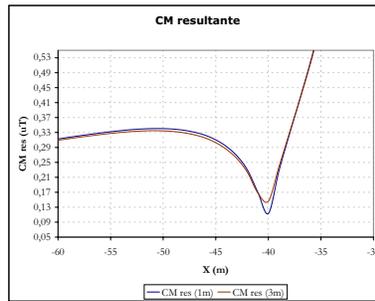


(b) C.M. resultante

Figura 5.38: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -27, W_{lazo} = 4, H_{lazo} = 7$

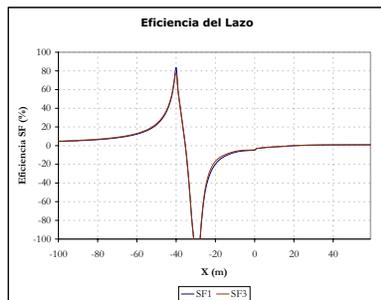


(a) Eficiencia del lazo

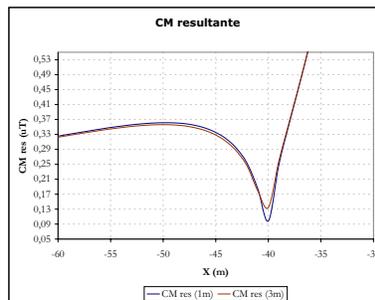


(b) C.M. resultante

Figura 5.39: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -29$

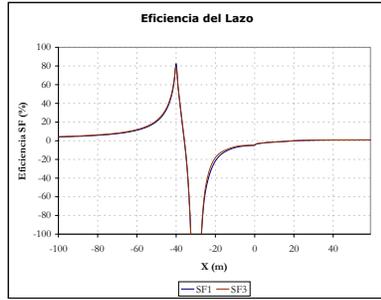


(a) Eficiencia del lazo

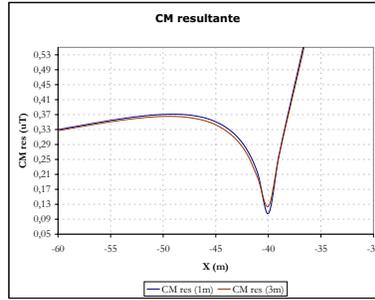


(b) C.M. resultante

Figura 5.40: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -30$

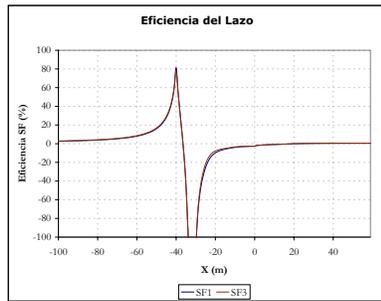


(a) Eficiencia del lazo

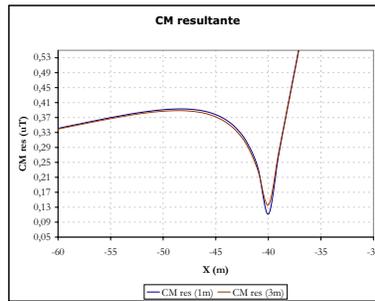


(b) C.M. resultante

Figura 5.41: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -30, W_{lazo} = 2, H_{lazo} = 5$

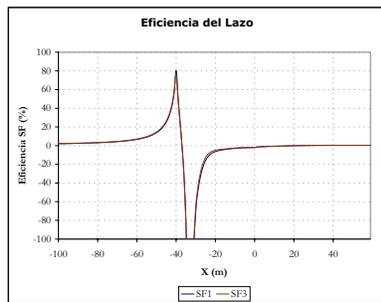


(a) Eficiencia del lazo

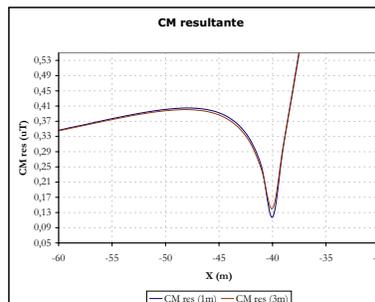


(b) C.M. resultante

Figura 5.42: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -32$



(a) Eficiencia del lazo



(b) C.M. resultante

Figura 5.43: Resultados para lazo en $X_{lazo} = -33$

das ellas es muy parecido, no siendo admisible ninguna de ellas por no conseguir los niveles de mitigación deseados en **toda** la zona de estudio. Se admitirían soluciones que presentasen discrepancias a este respecto, ofreciendo puntos en los cuales el valor del campo sobrepasase el límite superior, pero en este caso, el tramo en que dicho límite se ve violado es excesivamente alto (del orden de diez metros). Este hecho surge como consecuencia de la progresiva localización de los efectos de mitigación del lazo de corriente en torno al Punto de Medida: la reducción de campo en dicho punto y alrededores es muy buena, pero crece rápidamente (más conforme aumenta X_{lazo} al alejarse de él. El *pico* en la curva de eficiencia se vuelve cada vez más agudo, al tiempo que el mínimo (zona en la cual los efectos conseguidos son contrarios a los deseados: campo resultante mayor que el campo original) se hace mayor y más próximo también a la zona de estudio. Tales efectos se esquematizan con claridad en la figura 5.44.

Otro resultado de importancia es que los consumos de corriente por parte del lazo para este conjunto de soluciones es bastante más reducido que para el grupo estudiado en la sección 5.5.2, tal y como cabía esperar a la vista de la progresión que presentaba dicho parámetro en relación con X_{lazo} .

A pesar de ello, no se tomará en consideración ninguna de las alternativas correspondientes a este grupo, por la desventaja operacional que implican en cuanto a los niveles de mitigación.

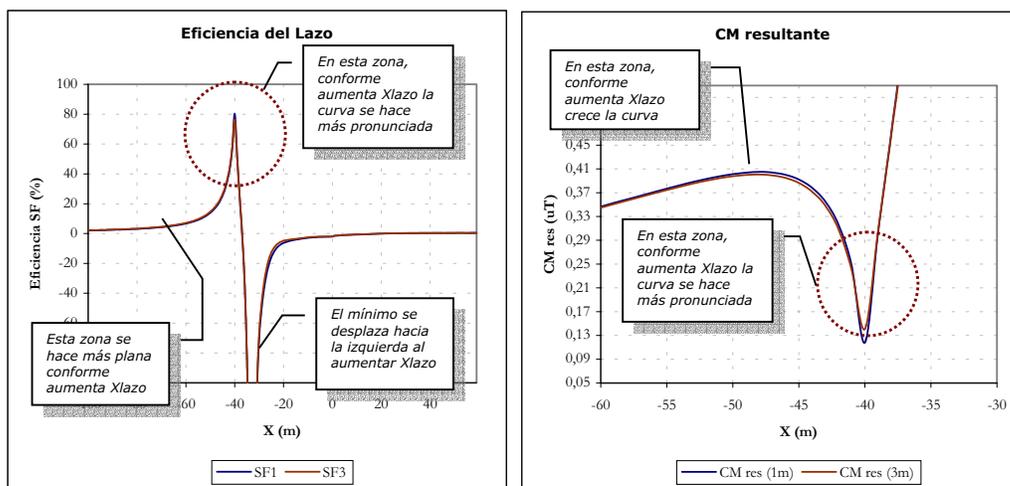


Figura 5.44: Esquema aclaratorio de la evolución de las curvas.

5.5.4. Ubicación del lazo en posiciones más alejadas de la línea que la Zona de Estudio.

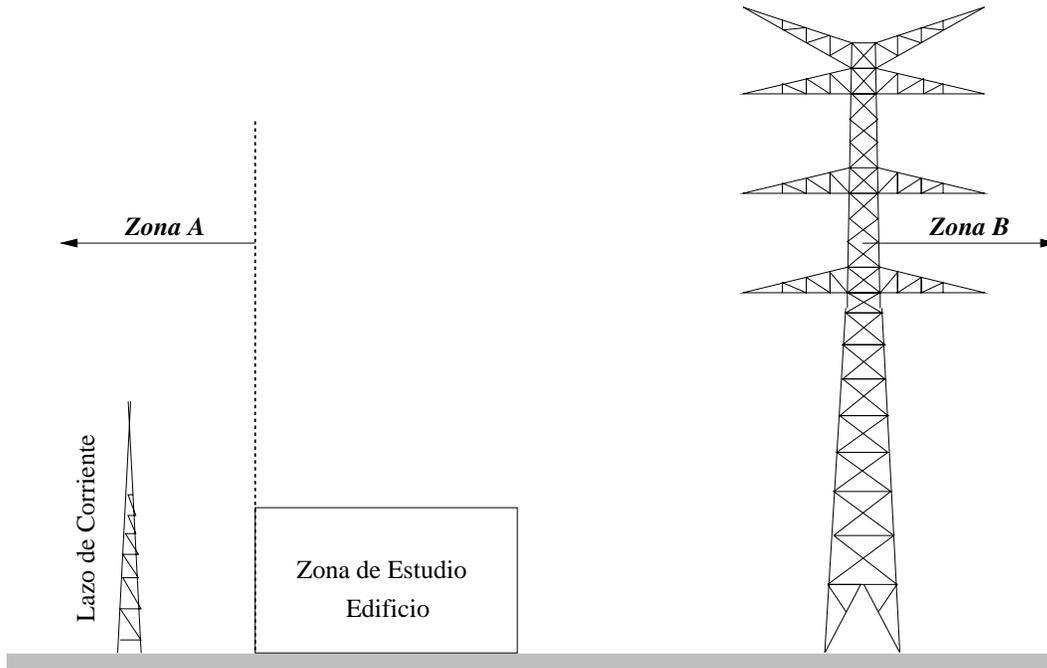
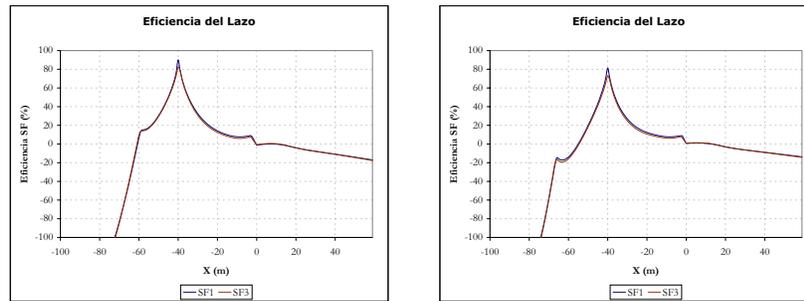


Figura 5.45: Esquema de la zona de estudio

En el presente epígrafe se analizarán aquellas soluciones que ubican al lazo de corriente más alejado de la línea eléctrica que la propia zona de estudio, la denominada “Zona A” en la figura 5.45.

Se comprobará que los resultados de mitigación no son buenos, con lo que se presentarán las curvas correspondientes a un par de casos representativos del comportamiento en esta zona, sin ahondar ni profundizar más.

En la figura 5.46(a) se muestra la eficiencia del lazo si éste se ubicara con los parámetros $X_l = -65$; $W_l = 13$; $H_l = 41$. Se observa la *caída abrupta* que ésta sufre para puntos que no se encuentran en las proximidades inmediatas del punto de medida. Además, ésta que es la que mejores niveles de mitigación presenta para $X_{lazo} = -65$, precisa de una altura de apoyos de al menos 55 metros, lo cual es un valor excesivo. Algo análogo sucede para la configuración $X_l = -70$; $W_l = 14$; $H_l = 37$, representada en 5.46(b). Otro factor que pone



(a) $X_l = -65; W_l = 13; H_l = 41$ (b) $X_l = -70; W_l = 14; H_l = 37$

Figura 5.46: Resultados para lazo en “Zona A”.

a estas soluciones en desventaja frente a las analizadas en los apartados anteriores. Concretamente, la solución que establece al lazo a 65 metros de la línea, requiere una corriente de 396.21 A; la que lo ubica a 70 metros de la línea requiere de una corriente de 324.82 A. Ambas son muy superiores a la “corriente de diseño” por fase de la línea.

De tal forma, se concluye que las soluciones y alternativas correspondientes a este grupo no presentan las ventajas suficientes como para ser tenidas en consideración.

5.5.5. Lazo de corriente dispuesto en posiciones $x > 0$.

El último tramo de estudio en la ubicación del lazo de corriente vertical se realizará para posiciones que adjudiquen al mismo valores de abcisa positivos, ésto es $x > 0$. Ésta es la denominada **Zona B** de la figura 5.45.

Este conjunto de soluciones no presentan ventajas sobre las ya estudiadas. De hecho, no se pueden considerar como válidas debido a que sólo presentan buenos niveles de mitigación a distancias línea–lazo de corriente muy pequeñas (lazo de corriente muy próximo a la línea), siendo los resultados correspondientes en estos casos muy parecidos a los que se obtuvieron para $X_{lazo} = 0$. Al alejar el lazo de la línea, los niveles de mitigación sufren importantes reducciones, y las configuraciones óptimas del lazo tienden a hacerlo excesivamente dimensionado: elevada anchura y altura de lazo. Por otra parte, las corrientes necesarias para optimizar su funcionamiento son del orden de tres veces superiores a las corrientes de fase de la línea.

Con objeto de ilustrar estos comentarios, se ha considerado la mejor de las

soluciones para un lazo que se ubicara a tan solo cuatro metros de la línea, en la *Zona B*. Las características del mismo son: $W_{lazo} = 15$ metros; $H_{lazo} = 20$ metros. La corriente que será necesario suministrarle para el funcionamiento óptimo, tendrá los siguientes valores complejos

$$I_l = 260,1156 + j \cdot 173,4104$$

La eficiencia del lazo para esta solución se muestra en la figura 5.47. En ella se puede observar que el comportamiento es relativamente bueno.

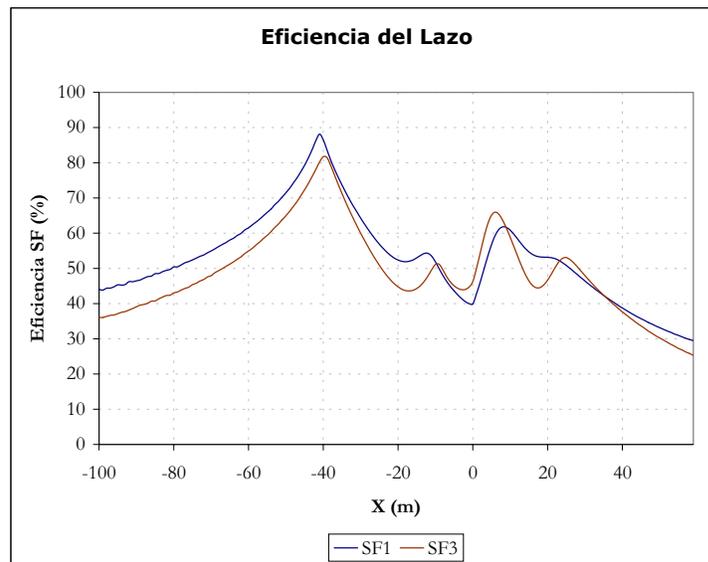


Figura 5.47: Eficiencia del lazo para $X_{lazo} = +4$

Para valores superiores a 4 metros no es posible encontrar soluciones que consigan niveles de mitigación en el Punto de Medida superiores al 75%.

5.6. Optimización para lazo de corriente horizontal.

Como concluye P. Cruz en [1], las configuraciones de lazo que optimizan los resultados de mitigación son aquellas que los definen coplanares con las fases de la línea. De tal forma, por tratarse ésta de una línea de doble circuito

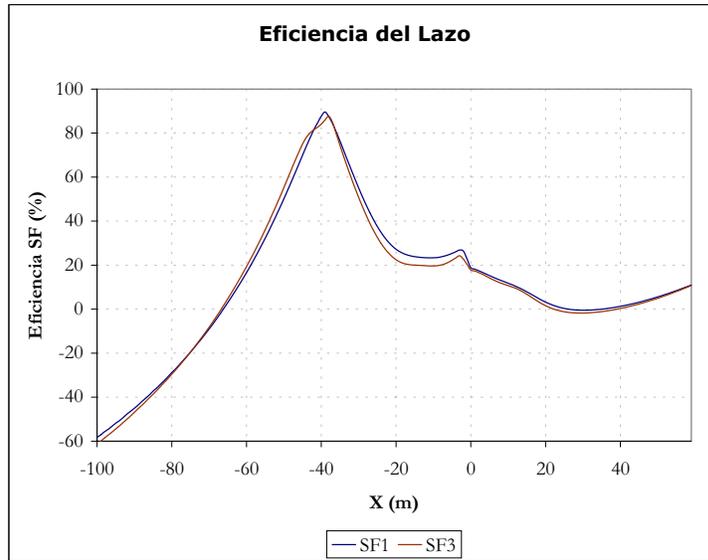


Figura 5.48: Eficiencia del lazo para configuración horizontal y $X_{lazo} = -30$

en bandera, la configuración adecuada será la vertical, que ha sido analizada con detenimiento en la sección 5.5. No obstante, se comprobará para este caso particular que el empleo de lazos de corriente horizontales, en efecto, no es adecuado.

Para valores de $X_{lazo} < 0$, los primeros resultados admisibles en el Punto de Medida se obtienen a partir de los 30 metros de la línea, y vienen caracterizados por unas alturas de lazo excesivamente elevadas, del orden de 40 metros. La corriente de lazo, además, cuatricula el valor de la corriente de fase de diseño de la línea. Por otro lado, el comportamiento del campo magnético frente a este tipo de lazos es bastante bueno.

Éste es el mejor resultado que presenta el empleo de lazos horizontales, puesto que conforme aumenta la distancia línea-lazo, si bien las dimensiones de los apoyos disminuyen, así como la corriente, los niveles de mitigación en puntos próximos al de medida se van haciendo peores, y además se experimentan fuertes aumentos de campo magnético en regiones próximas a la de estudio, llegando a alcanzar valores incluso doce veces superiores a los del campo magnético original.

Tabla 5.5: Soluciones consideradas.

| Solución | X_{lazo} | W_{lazo} | H_{lazo} | Corriente |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|
| Solución 1 | -21 | 7 | 9 | $108,3032 + j \cdot 72,2022$ |
| Solución 2 | -22 | 14 | 4 | $52,3149 + j \cdot 36,6205$ |

5.7. Conclusiones y elección de la configuración óptima del lazo.

De los estudios realizados en los epígrafes previos, se concluye que el lazo que presenta un comportamiento óptimo tanto desde el punto de vista técnico como económico ha de ser *vertical*, configuración para la cual se dedujo en la sección 5.5.2 que las mejores soluciones eran las que se recogen en la tabla 5.5.

La solución 1 presenta resultados de mitigación algo mejores que la solución 2, pero la corriente que es necesario inyectar a esta última es prácticamente la mitad de la que requiere la primera. Por otra parte, para cada arrollamiento, en la segunda solución se necesitan 14 metros más de conductor, y la altura de los apoyos ha de ser dos metros superior. Además, el conductor más próximo a tierra distará de ésta tan sólo cuatro metros. En principio, por las características del proyecto actual esto no supone ningún problema, por ser el emplazamiento del mismo una zona privada vallada.

De tal forma, se tomarán de momento como válidas ambas soluciones, y se analizarán desde el punto de vista económico en el capítulo 6, con la finalidad de escoger de entre ellas la que realmente resulte más beneficiosa en un compromiso entre capacidades técnicas y costes económicos.

5.7.1. Comportamiento frente a variaciones de carga de la línea.

Para el funcionamiento del lazo en el régimen correspondiente a la máxima carga de la línea, 700 A, se tiene un campo magnético medio para la solución 1 de $0.2657 \mu T$, mientras que para la solución 2 este valor asciende a $0.2943 \mu T$. Ambos valores se encuentran por debajo de la cota máxima admisible, con lo cual se asegura el correcto funcionamiento del lazo para ambas configuraciones.

Una vez definida la ubicación y forma del lazo de corriente, se procederá al

estudio de las potencias consumidas por el mismo, en función del tipo de conductor que se emplee, así como los métodos de compensación de reactiva mediante el empleo de baterías de condensadores. Este análisis se realizará en el capítulo 6.

5.8. Apoyos del lazo de corriente.

En la figura 5.49 se presenta la forma y dimensiones que se emplearán para los apoyos del lazo de corriente (montantes y diagonales de angulares).

Se han considerado unas cimentaciones para los apoyos de profundidad máxima 2.5 metros. Debido a que las tensiones a que se verán sometidos éstos, ésta es una profundidad tal vez sobredimensionada, pero, por otro lado, puesto que la altura de apoyos superará los 16 metros, conviene calcular estos valores con suficiente margen para asegurar la correcta fijación al suelo.

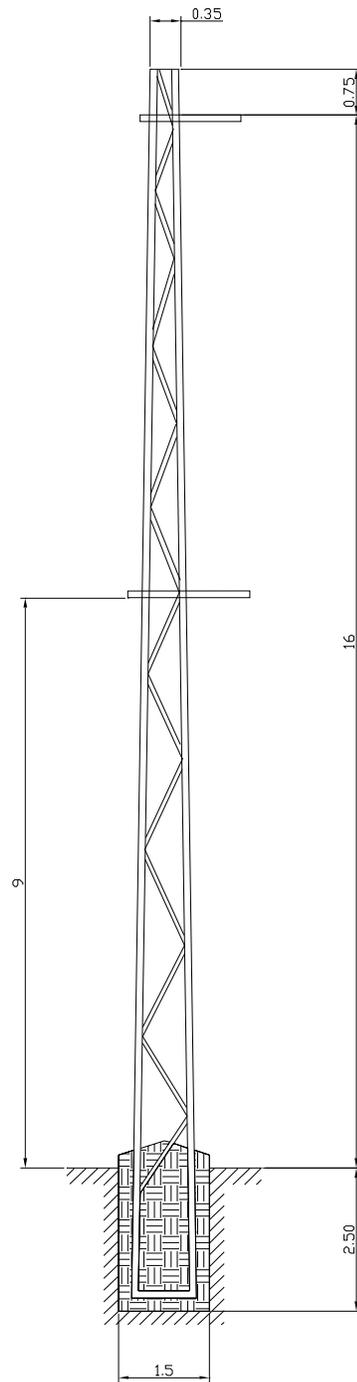


Figura 5.49: Esquema básico de los apoyos del lazo.

Capítulo 6

ANÁLISIS DEL CONSUMO DE POTENCIA. COMPENSACIÓN DE REACTIVA.

6.1. Introducción.

Una vez que se conocen todos los parámetros del lazo, así como los requerimientos de corriente del mismo, surge la necesidad de calcular dichos requerimientos en términos de potencia, activa y reactiva, con el fin de realizar de forma correcta el cálculo y el diseño del sistema de alimentación del lazo.

La forma en que se procederá será la siguiente: en una primera instancia, se determinará la potencia consumida por el lazo de corriente para una serie de conductores normalizados, y para la demanda de corriente correspondiente al funcionamiento de la línea con la *Carga de Diseño*, 264 A. Posteriormente, se estudiará la evolución de la potencia con la carga de la línea, hasta obtener el valor máximo estimado, correspondiente a 700 A de corriente por la línea.

Respecto a la compensación de reactiva, se analizarán las dos alternativas posibles de colocación del condensador: en *serie* o en *paralelo*, estudiando las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.

Se evaluarán los costes derivados del empleo de cada una de estas configuraciones, y se estudiará con detenimiento la posibilidad de compensación serie sin transformadores, compensación serie con transformadores y compensación paralelo.

Para ampliar las posibilidades, y así considerar alternativas lo más rentables y viables posible, se planteará el uso de un lazo de corriente con múltiples

*vuel*tas, de modo que la corriente en cada vuelta sea menor que para una única vuelta, y la corriente equivalente sea la misma, con la finalidad de poder utilizar conductores de menor radio geométrico medio, más económicos, aun con mayores exigencias de potencia. En función de ésto, el coste derivado del conductor aumentará (serán necesarios más metros de cable), al tiempo que los costes derivados de la potencia consumida por el lazo disminuirán (a menores corrientes por el conductor, menores pérdidas).

6.2. Potencias para la Carga de Diseño.

Hasta el momento no se ha tratado directamente el problema de la potencia que consume el lazo, sino que se ha establecido como magnitud orientativa a tal aspecto la corriente que se ha de inyectar al mismo. En función los valores que ésta alcanzase se disponía de una referencia cualitativa de la potencia que podría consumir el lazo. No obstante, es imprescindible conocer con exactitud los valores de potencia, tanto activa como reactiva, consumidos por el lazo, a efectos de dimensionar, diseñar y calcular el sistema de alimentación que se estudiará en el capítulo 9.

Resulta evidente que los valores de potencia consumida por el lazo no solo dependerá de la corriente que por éste circule, sino también del conductor que se emplee para la construcción del mismo. De tal forma, cada tipo de conductor tendrá asociada una resistividad específica que hará que las pérdidas se presenten variables en función de la elección del mismo.

A tal efecto, se considerarán cuatro tipos de conductor de diferentes características, y para cada uno de ellos se calcularán los valores de potencia y se discutirán las ventajas e inconvenientes que presenta su uso.

6.2.1. Longitud del lazo.

A la vista de las dimensiones consideradas para la zona de estudio, así com las distancias que la separan de la línea, y la longitud del vano de ésta última, se puede considerar como longitud válida del lazo para obtener una mitigación razonablemente constante para cada valor de abcisa, una que cubra completamente al edificio, y además permita despreciar los efectos de los extremos del lazo, permitiendo considerar los resultados para el caso de que se tratase de un lazo de longitud infinita como válidos para la situación real. Por ello, se establece la longitud del lazo en 30 metros.

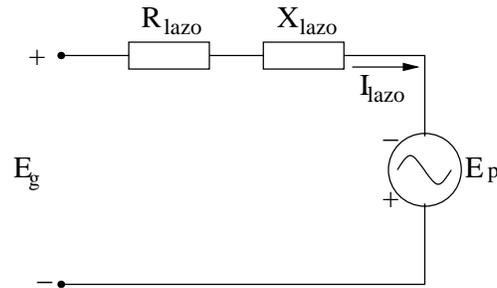


Figura 6.1: Esquema eléctrico del lazo.

Una vez conocidos todos los datos que definen al lazo de corriente, se procederá al cálculo de las potencias consumidas.

En el capítulo 3 se indicó que, para la realización de los cálculos se adoptaría como hipótesis simplificativa el que la anchura del lazo de corriente fuese despreciable frente a la longitud del mismo. Sin embargo, la solución obtenida arroja una configuración de lazo cuya anchura y longitud son del mismo orden. Se supondrán válidos los resultados correspondientes a los niveles de mitigación y corriente consumida, a pesar de no cumplirse esta hipótesis, pero para el cálculo de las potencias sí se tendrá en cuenta.

6.2.2. Expresiones de cálculo.

Tomando como esquema simplificado del lazo el que se muestra en la figura 6.1, debido fundamentalmente a que aún no se ha establecido una conexión definitiva del condensador compensador de reactiva para el mismo, se puede trabajar de forma genérica con las magnitudes que en ella se especifican: \$E_g\$, \$E_p\$ e \$I_l\$. Así, a la tensión en bornas del lazo de corriente se denominará \$E_g\$.

De tal forma, atendiendo a los sentidos de las tensiones y corrientes de la figura 6.1, el esquema del lazo se puede simbolizar mediante la expresión (6.1).

$$E_g = -E_p + I_l \cdot Z_{lazo} \tag{6.1}$$

siendo \$Z_{lazo} = R_{lazo} + j \cdot X_{lazo}\$ la impedancia del lazo.

El cálculo numérico correspondiente a los valores de potencia, se ha efectuado utilizando el programa en Matlab que se incluye en el apéndice C.

Ha de hacerse notar que las expresiones empleadas para el cálculo de la inductancia del lazo pueden considerarse válidas siempre y cuando el cociente

entre la longitud del lazo y su anchura sea superior o igual a 15. Bajo las actuales consideraciones, puesto que $l_{lazo} = 30$ m y $W_{lazo} = 7$ m, la relación entre estos valores no satisface dicha condición. De tal forma, el cálculo de la inductancia del lazo habrá que efectuarlo partiendo del flujo de campo magnético concatenado, tal y como se recoge en el Apéndice C de [1].

Brevemente, se introducen las expresiones que se emplearán para tal menester:

$$L_{lazo} = \frac{\phi_{cl}}{I_{lazo}} \quad (6.2)$$

donde ϕ_{cl} representa el flujo concatenado por el lazo, y L_{lazo} la inductancia propia.

$$L_{lazo} = L_i + L_e \quad (6.3)$$

$$L_i = \text{cte.} \quad a \ll W_{lazo} \quad (6.4)$$

$$L_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \ln \left(\frac{a}{r_{gm}} \right) \quad (6.5)$$

$$L_e = \frac{\phi_e}{I_{lazo}} = \frac{1}{I_{lazo}} (\phi_{e1} + \phi_{e2} + \phi_{e3} + \phi_{e4}) \quad (6.6)$$

$$\phi_{e1} = \int_{x_{1+a}}^{x_2} \int_{z_4}^{z_3} \vec{B}_1 dx dz \quad (6.7)$$

$$\phi_{e2} = \int_{x_1}^{x_{2-a}} \int_{z_4}^{z_3} \vec{B}_2 dx dz \quad (6.8)$$

$$\phi_{e3} = \int_{x_1}^{x_2} \int_{z_4}^{z_{3-a}} \vec{B}_3 dx dz \quad (6.9)$$

$$\phi_{e4} = \int_{x_1}^{x_2} \int_{z_{4+a}}^{z_3} \vec{B}_4 dx dz \quad (6.10)$$

$$\vec{B}_i(x, z) = \langle \text{Biot - Savart} \rangle = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{r_{iA}}^{r_{iB}} \frac{d\vec{r}_i \wedge (\vec{r} - \vec{r}_i)}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3} \quad (6.11)$$

La aplicación de la expresión (6.11) a cada conductor del lazo se efectúa de forma análoga a como se hace para el conductor 1:

$$\vec{B}_1(x, z) = \frac{\mu_0}{4\pi (x - x_1)^2} \cdot$$

$$\cdot \left(\frac{z_3 - z}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (z_3 - z)^2}} - \frac{z_4 - z}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (z_4 - z)^2}} \right) (x - x_1) \vec{u}_y$$

Teniendo estas expresiones en cuenta, se calculará la inductancia por unidad de longitud correspondiente al lazo de corriente para cada conductor. Como es de suponer, ésta presentará un valor superior al que se obtendría despreciando la anchura del lazo frente a su longitud.

6.2.3. Lazo de corriente con conductor Cardinal (LA-545).

Para poder comenzar con los cálculos de potencia, es imprescindible conocer las características del conductor con que se lleva a cabo la realización del lazo. Así, las propiedades de este conductor son las que se enumeran en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Características del conductor Cardinal (LA-545).

| Parámetro | Valor numérico |
|------------------------|---|
| Resistencia | $R = 0,062 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{m}$ |
| Radio | $a = 0,01521 \text{ m}$ |
| Radio geométrico medio | $R_{gm} = 0,08085 \cdot a = 0,0123 \text{ m}$ |
| Peso específico | $\gamma = 1,832 \frac{kg}{m}$ |
| Carga de rotura | $K_r = 5050 \text{ kg}$ |

Para la longitud del lazo l_{lazo} establecida en el epígrafe 6.2.1, los valores que se tienen para la resistencia e inductancia¹ del lazo son:

$$R_{lazo} = 0,0046 \ \Omega$$

$$X_{lazo} = 0,0269 \ \Omega$$

Teniendo en cuenta la expresión 6.1, se tiene:

$$E_g = -2,221 - j \cdot 2,257 \text{ V}$$

Así se obtiene el valor de la potencia compleja consumida por el lazo, y por tanto, la *Potencia Activa* y la *Potencia Reactiva*.

¹Teniendo en cuenta ya las expresiones del epígrafe 6.2.2, y la corrección de C.1

$$\begin{aligned}
 S_n &= 77,581 + j \cdot 455,128 \quad VA \\
 P &= 77,581 \quad W \\
 Q &= 455,128 \quad Var
 \end{aligned}$$

6.2.4. Lazo de corriente con conductor Córdor (LA-455).

Las características correspondientes a este conductor se recogen en la tabla 6.2.

Tabla 6.2: Características del conductor Córdor (LA-455).

| Parámetro | Valor numérico |
|------------------------|--|
| Resistencia | $R = 0,074 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{m}$ |
| Radio | $a = 0,01386 \text{ m}$ |
| Radio geométrico medio | $R_{gm} = 0,08085 \cdot a = 0,0112058 \text{ m}$ |
| Peso específico | $\gamma = 1,521 \frac{kg}{m}$ |
| Carga de rotura | $K_r = 4216,67 \text{ kg}$ |

Se puede comprobar que las características de este conductor son, desde el punto de vista eléctrico, peores, puesto que presenta un radio de sección de conductor menor que el del conductor LA-545. Ésto favorecerá la aparición de pérdidas en el conductor, con lo cual las potencias consumidas serán mayores. No obstante, desde el punto de vista técnico y económico, resulta ser una elección mejor, puesto que presenta menor peso específico (dimensionamiento de los apoyos más ligero y económico), con lo cual su precio es menor.

Los resultados que se obtienen para este tipo de conductor son:

$$\begin{aligned}
 R_{lazo} &= 0,0055 \quad \Omega \\
 X_{lazo} &= 0,0275 \quad \Omega
 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta la expresión 6.1, se tiene:

$$E_g = -2,3425 - j \cdot 2,2309 \quad V$$

Así se obtiene el valor de la potencia compleja consumida por el lazo, y por tanto, la *Potencia Activa* y la *Potencia Reactiva*.

$$\begin{aligned} S_n &= 92,626 + j \cdot 464,810 \quad VA \\ P &= 92,626 \quad W \\ Q &= 464,810 \quad Var \end{aligned}$$

6.2.5. Lazo de corriente con conductor LA-180.

Las propiedades de este conductor son las mostradas en la tabla 6.3.

Tabla 6.3: Características del conductor LA-180.

| Parámetro | Valor numérico |
|------------------------|---|
| Resistencia | $R = 0,196 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{m}$ |
| Radio | $a = 0,00875 \text{ m}$ |
| Radio geométrico medio | $R_{gm} = 0,8260 \cdot a = 0,0072275 \text{ m}$ |
| Peso específico | $\gamma = 0,676 \frac{kg}{m}$ |
| Carga de rotura | $K_r = 2173,33 \text{ kg}$ |

Los resultados que se obtienen para este tipo de conductor son:

$$\begin{aligned} R_{lazo} &= 0,0145 \quad \Omega \\ X_{lazo} &= 0,0297 \quad \Omega \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta la expresión 6.1, se tiene:

$$E_g = -3,4396 - j \cdot 1,7581 \quad V$$

Así se obtiene el valor de la potencia compleja consumida por el lazo, y por tanto, la *Potencia Activa* y la *Potencia Reactiva*.

$$\begin{aligned} S_n &= 245,585 + j \cdot 502,306 \quad VA \\ P &= 245,585 \quad W \\ Q &= 502,306 \quad Var \end{aligned}$$

6.2.6. Lazo de corriente con conductor LA-110.

Las propiedades de este conductor son las mostradas en la tabla 6.4.

Tabla 6.4: Características del conductor LA-110.

| Parámetro | Valor numérico |
|------------------------|--|
| Resistencia | $R = 0,31 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{m}$ |
| Radio | $a = 0,007 \text{ m}$ |
| Radio geométrico medio | $R_{gm} = 0,8260 \cdot a = 0,005782 \text{ m}$ |
| Peso específico | $\gamma = 0,433 \frac{kg}{m}$ |
| Carga de rotura | $K_r = 1466,67 \text{ kg}$ |

Los resultados que se obtienen para este tipo de conductor son:

$$R_{lazo} = 0,0229 \quad \Omega$$

$$X_{lazo} = 0,0311 \quad \Omega$$

Teniendo en cuenta la expresión 6.1, se tiene:

$$E_g = -4,414 - j \cdot 1,24 \quad V$$

Así se obtiene el valor de la potencia compleja consumida por el lazo, y por tanto, la *Potencia Activa* y la *Potencia Reactiva*.

$$S_n = 388,514 + j \cdot 526,196 \quad VA$$

$$P = 388,514 \quad W$$

$$Q = 526,196 \quad Var$$

6.2.7. Resumen y conclusiones.

Las conclusiones que se recogen de los resultados analizados en los epígrafes 6.2.3 a 6.2.6 básicamente ya han sido comentadas. No obstante, se resumirán y recogerán en los siguientes puntos:

- Cuanto menor es el diámetro del conductor, mayores son las potencias consumidas por el lazo, y menor es el peso específico. La elección del tipo de conductor se deberá al establecimiento de una solución de compromiso entre ambos efectos.
- Si bien conforme disminuye el radio del conductor aumentan las potencias, tanto activa como reactiva, se puede comprobar que la variación de potencia *activa* es mucho mayor que para la *reactiva*, de modo que la dependencia funcional de la primera respecto del tipo de conductor es más fuerte que la de la segunda. Ésto supone una ventaja, puesto que la dimensionalización del condensador de compensación para un tipo de conductor no variará demasiado con respecto del cálculo para otro.

En la tabla 6.5 se resumen los resultados obtenidos en función del tipo de conductor.

Tabla 6.5: *Tabla resumen de las potencias.*

| Conductor | P. Activa (W) | P. Reactiva (Var) |
|-----------|---------------|-------------------|
| LA-545 | 77.581 | 455.128 |
| LA-455 | 92.626 | 464.810 |
| LA-180 | 245.585 | 502.306 |
| LA-110 | 388.514 | 526.196 |

6.3. Potencias para la Carga Máxima.

En este apartado se procederá de forma análoga a como se hizo en el epígrafe 6.2, considerando ahora la corriente que será necesario inyectar al lazo para optimizar su funcionamiento en condiciones de carga máxima en la línea eléctrica ($I_{red} = 700$ A). Para ello, se considerará la corriente de lazo $I_{lazo} = 288,8087 + j \cdot 204,5728$ A (recogida en la tabla ??).

Los resultados para dicho régimen de funcionamiento se recogen en la tabla 6.7.

Se ha reservado la última columna para mostrar el cociente entre Potencia Reactiva y Potencia Activa, con la finalidad de dejar de manifiesto que en esta ocasión, así como en el régimen de funcionamiento de diseño, si bien Q

Tabla 6.6: *Tabla resumen de las potencias.*

| Conductor | P. Activa (W) | P. Reactiva (Var) | Q/P |
|-----------|---------------|-------------------|------|
| LA-545 | 574.313 | 3366.787 | 5.86 |
| LA-455 | 685.545 | 3438.373 | 5.02 |
| LA-180 | 1816.396 | 3715.584 | 2.05 |
| LA-110 | 2873.094 | 3892.205 | 1.35 |

es mayor que P , con la reducción del diámetro del conductor, P crece mucho más que Q .

6.4. Establecimiento de las condiciones de operación máximas.

Se ha considerado el régimen de funcionamiento para carga máxima de la línea. No obstante, dicho régimen se alcanzará en un porcentaje de veces muy pequeño, con lo cual, cabe la posibilidad de plantearse dimensionar el equipo de alimentación del lazo de corriente para una carga de la línea máxima más probable, que a pesar de no cubrir el funcionamiento en ciertos períodos (muy escasos), permite una dimensionalización del equipo de alimentación, y del lazo en sí más económico.

Recurriendo a la curva de la Monótona de Consumo, figura 5.5, introducida en el apartado 5.2.1, se comprueba que para valores de carga de la línea de 500 A, el 94.56 % del tiempo de funcionamiento de la misma, la carga será inferior o igual a ésta. Ello implica que, un dimensionamiento del lazo para trabajar en regímenes máximos de hasta 500 A de línea, permite una mitigación del campo magnético para el 94.56 % del período anual elegido. El 5.44 % restante, el lazo trabajará a su capacidad máxima, mientras que la que demanda la línea será mayor. En estos pequeños períodos de tiempo, puede admitirse un mal comportamiento del lazo.

A continuación, se calcularán las potencias para el caso de funcionamiento del lazo para carga de la línea de 500 A, con la finalidad de analizar la sensibilidad en estas potencias en función del límite de carga que se considere.

La tabla 6.7 pone de manifiesto que conforme disminuye la sección de conductor, no sólo aumentan las potencias activa y reactiva, sino que también

Tabla 6.7: *Tabla resumen de las potencias a carga de la línea de 500A.*

| Conductor | P. Activa (W) | P. Reactiva (Var) | P. Aparente (VA) |
|-----------|---------------|-------------------|------------------|
| LA-545 | 304.042 | 1782.407 | 1808.153 |
| LA-455 | 362.937 | 1820.310 | 1856.14 |
| LA-180 | 961.700 | 1967.088 | 2189.59 |
| LA-110 | 1521.2 | 2060.605 | 2561.28 |

aumenta el cociente $\frac{Q}{P}$, luego la reactiva consumida crecerá más con la reducción de sección del conductor que la activa consumida.

Por otro lado, de diseñar el lazo de corriente para funcionamiento máximo a 700 A de carga de la línea, el consumo de reactiva es casi del doble que para un límite del régimen a 500 A. Para la activa, la diferencia es también casi del doble. A medida que se introduzcan nuevos arrollamientos al lazo de corriente (sección 6.6.1), dichos valores de potencia, en términos absolutos irán perdiendo importancia; no así la relación, que seguirá siendo de aproximadamente la mitad de la reducción de la potencia, de emplear como punto de operación máximo para el lazo de corriente el correspondiente a carga de 500 A en la línea con respecto al de 700 A.

Esto implica que, a costa de dejar sin cubrir aproximadamente un 5% del período de funcionamiento de la línea, los consumos de potencia pueden reducirse aproximadamente a la mitad, con la ventaja que ello conlleva en cuanto al diseño de paneles fotovoltaicos, acumuladores de energía y condensadores de compensación de reactiva.

De tal forma, se concluirá que el régimen de funcionamiento máximo que asumirá el lazo de corriente con garantías de mitigación admisibles será el correspondiente a 500 A de carga en la línea.

En la figura 6.2 se muestra el campo magnético correspondiente al generado por la línea en condiciones de máxima carga, así como el campo magnético resultante de la aplicación al lazo de la corriente correspondiente al régimen de funcionamiento máximo admitido para el mismo (es decir, la corriente óptima para un régimen de carga de la línea de 500 A). Se comprueba que, a pesar de no ser tan buenos estos resultados como los que se obtendrían con el lazo funcionando con la corriente, se consigue una aceptable reducción del Campo, del orden del 50% del original.

El campo magnético medio en la zona de estudio para el caso de carga

máxima en la línea, y lazo funcionando para condiciones máximas de operación correspondientes a 500 A, es de $0.3408 \mu T$, algo superior a la máxima establecida. El valor medio del campo en dicha zona permanecerá inferior a los $0.3 \mu T$ hasta cargas de línea de 645 A. De tal forma el diseño considerado garantiza buen comportamiento del lazo no sólo hasta niveles de carga de la línea de 500 A, sino hasta niveles de carga de 645 A, reduciéndose aún más el rango de cargas de línea para las cuales no se cumple la restricción del campo resultante.

Esto favorece la decisión de adoptar como condición máxima de operación del lazo aquella que responde con eficacia ante una carga de línea de 500 A.

6.5. Coste de los conductores.

En este apartado se introducirán los costes que suponen el empleo de uno u otro tipo de conductor. En la tabla 6.8 se recogen los costes derivados de la utilización de cada clase de conductor.

Como resulta evidente, conforme es menor el diámetro de conductor, el peso del mismo por metro lineal se reduce, con lo cual el coste también es menor.

Tabla 6.8: Tabla de costes en función del tipo de conductor.

| | l_1 (m) | Ptas/m | Euro/m | Euro Total | Ptas Total |
|---------------|-----------|--------|------------|------------|------------|
| LA-545 | 74 | 622,88 | 3,7435842 | 277,02523 | 46093,12 |
| LA-455 | 74 | 517,14 | 3,108074 | 229,997476 | 38268,36 |
| LA-180 | 74 | 229,84 | 1,38136622 | 102,2211 | 17008,16 |
| LA-110 | 74 | 147,22 | 0,88481002 | 65,4759415 | 10894,28 |

6.6. Estrategias de compensación de reactiva.

En hasta esta sección, han sido efectuados los cálculos para la solución 1 que se obtuvo en la sección 5.7. El procedimiento para la solución 2 es análogo, y en los cálculos de costes estimados que se abordarán en esta sección se tendrán en cuenta.

Se ha comprobado que el mayor consumo de potencia por parte de la carga se efectúa en forma de reactiva (consumo de reactiva mayor que de activa), y puesto que los paneles fotovoltaicos así como las baterías de acumulación

realizan un aporte de potencia bajo continua, la compensación de reactiva a la carga después del rizado de tensión mediante el inversor supone una tarea de suma importancia.

En [4] se sugiere el empleo de compensación paralelo, puesto que para las longitudes de lazo que se utilizan en ese estudio (200 metros), en el caso de compensación serie la caída en el lazo se torna elevada, de modo que la tensión a que se encuentra sometido el condensador es reducida, haciendo inviable tal configuración. En el presente estudio, puesto que se evalúan las características para el funcionamiento de un lazo de corriente cuyas dimensiones son bastante más reducidas (30 metros de longitud, por 7 metros de anchura, en el caso de la solución 1), se tomará en consideración el empleo de la compensación serie, con la intención de sopesar las ventajas e inconvenientes de esta estrategia de compensación frente a la que sitúa la batería de condensadores en paralelo.

De tal forma, se estudiarán y analizarán las siguientes alternativas:

1. **Compensación Serie [modalidad A].** Establece el método de compensación situando una batería de condensadores en serie con el lazo de corriente. En esta modalidad, se tendrá una tensión de entrada en el conjunto lazo-batería de condensadores de valor máximo igual al proporcionado por los paneles fotovoltaicos, es decir, 24 V. El objeto de la consideración de esta configuración responde a la necesidad de análisis del sistema sin empleo de ningún tipo de transformadores, a costa de unos mayores valores de capacidad de los condensadores, con la finalidad de determinar la viabilidad en una u otra situación. El esquema que se empleará en esta situación, será por tanto el mostrado en la figura 6.3.
2. **Compensación Serie [modalidad B].** Este método de compensación también establece la batería de compensación en serie con el lazo de corriente. Para que las capacidades sean menores, se opta por elevar la tensión de alimentación al grupo, con lo cual será necesario el empleo de un transformador elevador de 24V/220V a la salida del inversor. Se estudiará por tanto si el incremento del coste introducido como consecuencia del transformador se compensa con la reducción de la capacidad de la batería de condensadores. El esquema correspondiente a este modelo se muestra en la figura 6.4.
3. **Compensación Paralelo.** En este caso, la batería de condensadores se situará en paralelo, a la salida del inversor. Para que las dimensiones de ésta sean razonables, así como para que las tensiones a que se encuentre

sometida se ajusten a los valores para los cuales han sido diseñado estos condensadores, se elevará la tensión de alimentación a la batería a 220 V empleando para ello un transformador elevador de 24V/220V. Y para ajustar la tensión de alimentación al lazo a los niveles adecuados para obtener las corrientes necesarias, se empleará un transformador reductor de 220V/6V. El esquema correspondiente a este modelo se muestra en la figura 6.5.

Para llevar a cabo estos análisis, habrá de tenerse en cuenta la posibilidad de empleo de un lazo de corriente con múltiples arrollamientos de conductor. Hasta ahora se ha supuesto que el lazo de corriente está compuesto por un conductor formando un circuito cerrado, de forma rectangular, con dos lados paralelos a los conductores de la línea y los otros dos perpendiculares. Se ha asumido que sólo existe una vuelta de conductor (un arrollamiento), que es la que compone el lazo. En este apartado se contemplará la posibilidad de utilizar lazos compuestos por varios arrollamientos de conductor, de modo que cada uno de ellos asuma una corriente menor que la equivalente, con el fin de así poder aprovechar conductores de menor diámetro aun con la posibilidad de obtener iguales o menores pérdidas. Esta idea se esquematiza en la figura 6.6.

Si se practican n vueltas al conductor, como se indica en la figura, la corriente que habrá de conseguirse por éste habrá de ser de valor I_l/n , para conseguir un campo magnético equivalente al generado por el lazo de una sola vuelta estudiado con anterioridad.

Puesto que la corriente que circula por el lazo, atendiendo al modelo de la figura 6.1, viene dada por:

$$I_l = \frac{V}{Z} = \frac{V}{R_l + j \cdot X_l}$$

siendo V el valor de la tensión en bornas del lazo de corriente.

Estas consideraciones son de vital importancia para la elección de la estrategia de compensación, puesto que conforme disminuyen las corrientes que circulan por el lazo (I_l/n), los consumos de reactiva se van haciendo menores también. Además, en el caso de compensación serie, para conseguir corrientes elevadas de lazo, se precisa que el condensador (o batería de condensadores) introduzca impedancias pequeñas, lo que supone importantes capacidades; al disminuir la corriente de circulación, los valores de capacidad admitirán márgenes más amplios.

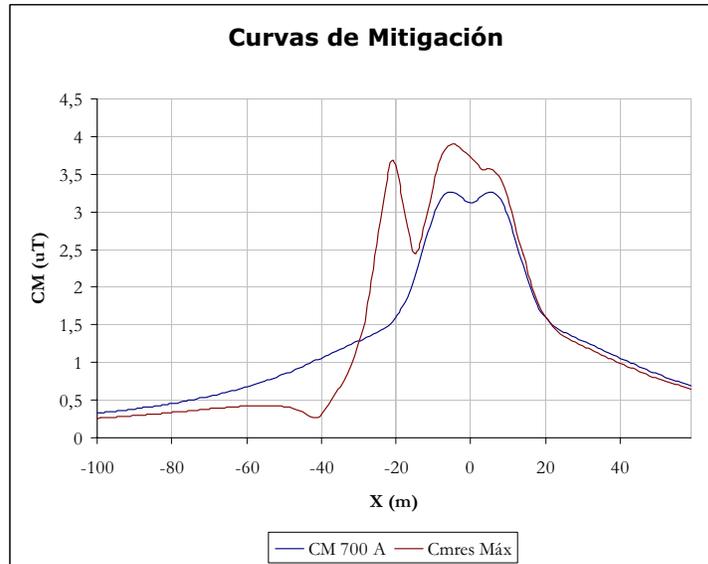


Figura 6.2: Campos Magnéticos original para 700 A de carga y resultante con lazo funcionando para optimizar carga de 500 A.

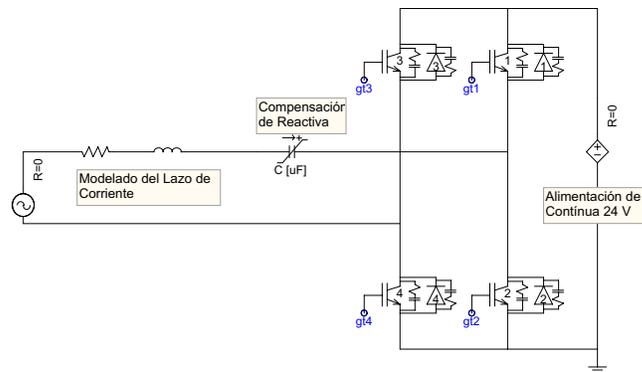


Figura 6.3: Esquema de compensación serie, modalidad A.

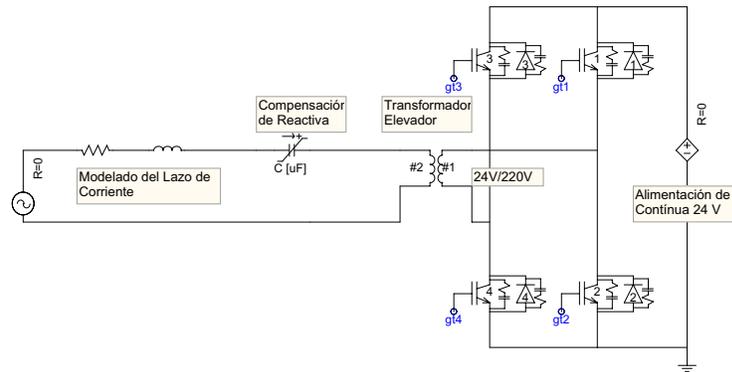


Figura 6.4: Esquema de compensación serie, modalidad B.

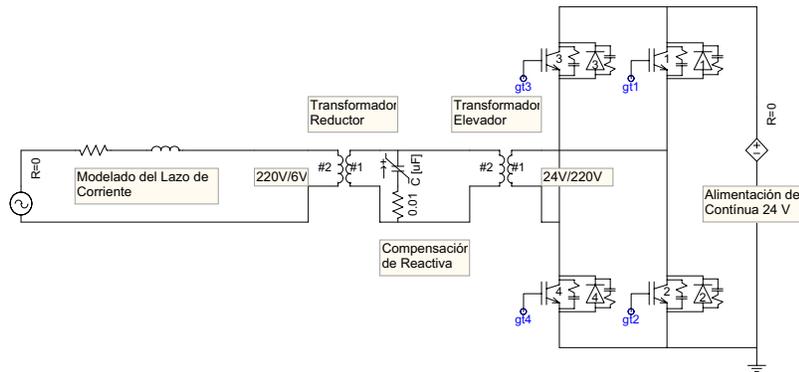


Figura 6.5: Esquema de compensación paralelo.

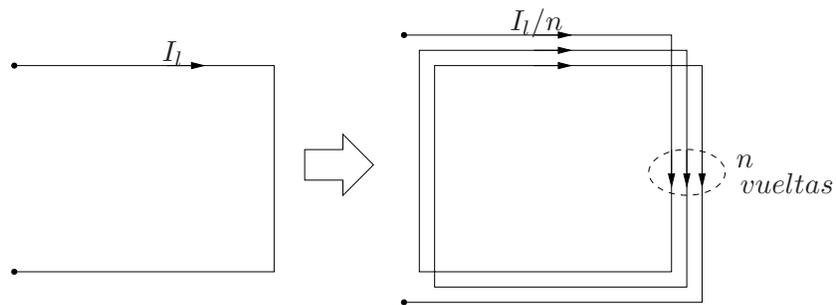


Figura 6.6: Esquema de lazo equivalente con múltiples vueltas.

En la tabla 6.7 se recogen los valores de las potencias consumidas por el lazo en función del tipo de conductor empleado, así como del número de arrollamientos del mismo.

Tabla 6.7: Potencias consumidas por el lazo de corriente (solución 1).

| n | LA-545 | | LA-455 | | LA-180 | | LA-110 | |
|----|---------|----------|---------|----------|---------|----------|----------|----------|
| | P (W) | Q (Var) | P (W) | Q (Var) | P (W) | Q (Var) | P (W) | Q (Var) |
| 1 | 304,042 | 1782,410 | 362,937 | 1820,310 | 961,700 | 1967,090 | 1521,200 | 2060,610 |
| 2 | 152,021 | 891,205 | 181,469 | 910,155 | 480,850 | 983,545 | 760,600 | 1030,305 |
| 3 | 101,347 | 594,137 | 120,979 | 606,770 | 320,567 | 655,697 | 507,067 | 686,870 |
| 4 | 76,011 | 445,603 | 90,734 | 455,078 | 240,425 | 491,773 | 380,300 | 515,153 |
| 5 | 60,808 | 356,482 | 72,587 | 364,062 | 192,340 | 393,418 | 304,240 | 412,122 |
| 6 | 50,674 | 297,068 | 60,490 | 303,385 | 160,283 | 327,848 | 253,533 | 343,435 |
| 7 | 43,435 | 254,630 | 51,848 | 260,044 | 137,386 | 281,013 | 217,314 | 294,373 |
| 8 | 38,005 | 222,801 | 45,367 | 227,539 | 120,213 | 245,886 | 190,150 | 257,576 |
| 9 | 33,782 | 198,046 | 40,326 | 202,257 | 106,856 | 218,566 | 169,022 | 228,957 |
| 10 | 30,404 | 178,241 | 36,294 | 182,031 | 96,170 | 196,709 | 152,120 | 206,061 |
| 11 | 27,640 | 162,037 | 32,994 | 165,483 | 87,427 | 178,826 | 138,291 | 187,328 |
| 12 | 25,337 | 148,534 | 30,245 | 151,693 | 80,142 | 163,924 | 126,767 | 171,718 |
| 13 | 23,388 | 137,108 | 27,918 | 140,024 | 73,977 | 151,315 | 117,015 | 158,508 |
| 14 | 21,717 | 127,315 | 25,924 | 130,022 | 68,693 | 140,506 | 108,657 | 147,186 |
| 15 | 20,269 | 118,827 | 24,196 | 121,354 | 64,113 | 131,139 | 101,413 | 137,374 |

6.6.1. Criterio de evaluación de los costes parciales.

En este epígrafe se indicarán los criterios y parámetros utilizados para estimar los costes parciales derivados del empleo de cada alternativa, en función del tipo de estrategia de compensación (serie o paralelo), del número de arrollamientos, de la potencia consumida por el lazo y del tipo de conductor.

Así, en estos cálculos se considerarán básicamente los costes procedentes de aquellos elementos que varían de una alternativa a otra. Quiere decirse que en ellos no se incluyen los costes consecuentes del empleo de elementos y aparatos comunes para todos ellos, como pueden ser la tarjeta DSP, o el *medidor de flujo*.

La elección de los parámetros para evaluar los costes derivados de cada unidad considerada se describe en los siguientes puntos:

- **Coste de los condensadores, K_F .** La lista de precios de condensadores que se ha empleado para evaluar los costes de los mismos, se corresponde con el fichero adjunto con nombre: `...\pfc_archivos\equipos\Capacitor $A Price List.htm` y representa un extracto del sitio web: <http://www.me-au.com>. Se emplearán, con objeto de facilitar la discretización de la capacidad total de la batería², condensadores de capacidad máxima $20 \mu F$. Así pues, el coste de cada unidad de éstas se establecerá en 15.40 €. De tal forma, el coste específico derivado de la batería de condensadores valdrá:

$$K_F = 0,77 \frac{\text{Euro}}{\mu F}$$

- **Coste del conductor, K_{CD} .** Los costes específicos en función del tipo de conductor empleado son los que se muestran en la tabla 6.8.
- **Coste de generación de Potencia, K_P .** Cada panel fotovoltaico de 50 W tiene un precio de 670 €. Para calcular el número de paneles fotovoltaicos necesarios se aplican las expresiones indicadas en el apartado 9.2. Puesto que habrá que considerar el coste de la batería, que habrá de ser mayor cuanto mayor sea la potencia consumida, así como el incremento que supone el empleo de conductores de diferentes secciones, se tomará como magnitud característica la denominada “*Potencia Solar*”, que será mayor que la de consumo real, puesto que incluirá aquella que ha de suministrarse a dicha batería para asegurar el régimen de funcionamiento. Para introducir el coste de los elementos adicionales (conductores) y de la misma batería, se multiplicará al coeficiente por 1.25 (las variaciones de precio de la batería de acumulación no son demasiado significativas en los rangos de potencias en que se trabaja). De tal forma,

$$K_P = 13,4 \cdot 1,25 = 16,75 \frac{\text{Euro}}{W}$$

- **Costes de los transformadores, K_T .** Los precios de los transformadores de potencia han sido consultados a la empresa fabricante de transformadores *a medida* AVISOR S.A. (<http://www.avisor.com>), y a partir de ellos, se ha conseguido una regla aproximativa que establece

²Así, habilitando o deshabilitando unidades, será posible el ajuste de la fase de la corriente del lazo en función de la corriente de referencia que se obtenga en cada instante.

el precio de un transformador cualquiera conocidos sus niveles de tensión así como la potencia nominal del mismo:

$$K_T = 7,407 \cdot 10^{-4} \cdot S_n^2 + 33,34425 \text{ Euros}$$

6.6.2. Compensación serie: Modalidad A.

El esquema que se empleará en esta situación es el que se muestra en la figura 6.3. Se plantea, pues, la alimentación al sistema compuesto por el lazo y la batería de condensadores directamente desde la salida del inversor, sin el empleo de ningún transformador auxiliar. Los cálculos realizados para lazos con múltiples arrollamientos y este tipo de configuración se recogen en la hoja de cálculo ... \pfc_archivos\v_comp\comp_serie_MA.xls. Resumiendo los resultados obtenidos, se completan la tabla 6.8, en la que se recogen los valores de capacidad necesarios, y la tabla 6.9, en la que se muestran los costes asociados a cada solución.

Tabla 6.8: Capacidad de la batería de condensadores para compensación serie, modalidad A.

| n | CAPACIDAD BATERÍA (µF) | | | | | | | |
|----|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | LA-545 | | LA-455 | | LA-180 | | LA-110 | |
| | SOL 1 | SOL 2 | SOL 1 | SOL 2 | SOL 1 | SOL 2 | SOL 1 | SOL 2 |
| 1 | 48300,609 | 16357,470 | 48859,726 | 16421,108 | 57158,525 | 17263,500 | 58329,714 | 17368,831 |
| 2 | 24150,305 | 8178,735 | 24429,863 | 8210,554 | 28579,263 | 8631,750 | 29164,857 | 8684,415 |
| 3 | 16100,203 | 5452,490 | 16286,575 | 5473,703 | 19052,842 | 5754,500 | 19443,238 | 5789,610 |
| 4 | 12075,152 | 4089,367 | 12214,931 | 4105,277 | 14289,631 | 4315,875 | 14582,428 | 4342,208 |
| 5 | 9660,122 | 3271,494 | 9771,945 | 3284,222 | 11431,705 | 3452,700 | 11665,943 | 3473,766 |
| 6 | 8050,102 | 2726,245 | 8143,288 | 2736,851 | 9526,421 | 2877,250 | 9721,619 | 2894,805 |
| 7 | 6900,087 | 2336,781 | 6979,961 | 2345,873 | 8165,504 | 2466,214 | 8332,816 | 2481,262 |
| 8 | 6037,576 | 2044,684 | 6107,466 | 2052,638 | 7144,816 | 2157,938 | 7291,214 | 2171,104 |
| 9 | 5366,734 | 1817,497 | 5428,858 | 1824,568 | 6350,947 | 1918,167 | 6481,079 | 1929,870 |
| 10 | 4830,061 | 1635,747 | 4885,973 | 1642,111 | 5715,853 | 1726,350 | 5832,971 | 1736,883 |
| 11 | 4390,964 | 1487,043 | 4441,793 | 1492,828 | 5196,230 | 1569,409 | 5302,701 | 1578,985 |
| 12 | 4025,051 | 1363,122 | 4071,644 | 1368,426 | 4763,210 | 1438,625 | 4860,809 | 1447,403 |
| 13 | 3715,431 | 1258,267 | 3758,440 | 1263,162 | 4396,810 | 1327,962 | 4486,901 | 1336,064 |
| 14 | 3450,044 | 1168,391 | 3489,980 | 1172,936 | 4082,752 | 1233,107 | 4166,408 | 1240,631 |
| 15 | 3220,041 | 1090,498 | 3257,315 | 1094,741 | 3810,568 | 1150,900 | 3888,648 | 1157,922 |

Se comprueba en 6.8 que las dimensiones de la batería de condensadores para esta modalidad de estrategia de compensación, son bastante elevadas. La mejor de las opciones consideradas desde el punto de vista económico es la que

Tabla 6.9: Costes estimados para compensación serie, modalidad A.

| n | COSTES PARCIALES ESTIMADOS, Ke (€) | | | | | | | |
|----|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| | LA-545 | | LA-455 | | LA-180 | | LA-110 | |
| | SOL 1 | SOL 2 | SOL 1 | SOL 2 | SOL 1 | SOL 2 | SOL 1 | SOL 2 |
| 1 | 56408,260 | 22205,173 | 60460,506 | 23995,934 | 104021,704 | 42769,090 | 139739,848 | 59884,504 |
| 2 | 28619,670 | 11596,742 | 30575,241 | 12408,223 | 52164,184 | 21566,886 | 69968,138 | 30059,047 |
| 3 | 19541,490 | 8280,222 | 20766,814 | 8727,989 | 34946,491 | 14580,524 | 46754,552 | 20169,137 |
| 4 | 15140,914 | 6786,681 | 15977,597 | 7024,624 | 26388,755 | 11148,123 | 35180,497 | 15263,113 |
| 5 | 12611,379 | 6022,331 | 13196,063 | 6112,006 | 21295,002 | 9137,307 | 28262,254 | 12350,645 |
| 6 | 11017,364 | 5622,577 | 11418,371 | 5594,762 | 17933,240 | 7837,283 | 23671,918 | 10434,953 |
| 7 | 9957,932 | 5431,163 | 10214,303 | 5303,447 | 15561,188 | 6943,426 | 20411,813 | 9088,849 |
| 8 | 9232,615 | 5369,961 | 9368,750 | 5153,336 | 13807,704 | 6303,423 | 17983,104 | 8098,736 |
| 9 | 8730,041 | 5395,569 | 8762,207 | 5097,362 | 12466,599 | 5832,656 | 16108,658 | 7345,952 |
| 10 | 8383,387 | 5481,942 | 8322,971 | 5107,283 | 11414,159 | 5480,355 | 14622,197 | 6759,297 |
| 11 | 8150,130 | 5612,508 | 8005,413 | 5165,129 | 10571,658 | 5214,210 | 13417,905 | 6293,463 |
| 12 | 8001,920 | 5776,220 | 7779,114 | 5258,917 | 9886,610 | 5012,683 | 12425,242 | 5918,246 |
| 13 | 7919,130 | 5965,427 | 7623,012 | 5380,354 | 9322,680 | 4860,862 | 11595,370 | 5612,733 |
| 14 | 7887,743 | 6174,668 | 7522,068 | 5523,515 | 8853,915 | 4748,095 | 10893,404 | 5361,989 |
| 15 | 7897,478 | 6399,934 | 7465,248 | 5684,055 | 8461,282 | 4666,572 | 10293,764 | 5155,059 |

establece el número de arrollamientos en 15, utilizando para ello conductor tipo LA-455. También se comprueba que, en efecto, el valor de esta capacidad va disminuyendo conforme aumenta el número de vueltas, aunque esta variación es cada vez menor.

Puesto que, como se comprueba en el esquema de la figura 6.3, no se emplea ningún transformador, la expresión de evaluación del Coste parcial estimado se corresponde con la expresión 6.12.

$$K_E = K_F \cdot C_B + K_{CD} \cdot L_{CD} + K_P \cdot P_{solar} \quad (6.12)$$

En 6.12, C_B representa el valor de la capacidad de la batería de condensadores, L_{CD} es la longitud total de conductor empleada y P_{solar} representa el consumo de potencia solar.

6.6.3. Compensación serie: Modalidad B.

Análogamente a como se hizo en la sección 6.6.2, se calcularán los costes parciales para esta configuración. En este caso, se emplea un transformador elevador a la salida del inversor con la finalidad de obtener valores más pequeños

de la capacidad de la batería de condensadores (ver figura 6.4). Los valores que se obtienen en este caso para la capacidad de dicha batería se muestran en la tabla 6.10. A su vez, los resultados correspondientes a los costes parciales estimados se recogen en la tabla 6.11.

Tabla 6.10: Capacidad de la batería de condensadores para compensación serie, modalidad B.

| n | CAPACIDAD BATERÍA (µF) | | | | | | | |
|----|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | LA-545 | | LA-455 | | LA-180 | | LA-110 | |
| | SOL 1 | SOL 2 | SOL 1 | SOL 2 | SOL 1 | SOL 2 | SOL 1 | SOL 2 |
| 1 | 3849,098 | 1586,260 | 3852,611 | 1586,856 | 3897,227 | 1594,374 | 3902,570 | 1595,268 |
| 2 | 1924,549 | 793,130 | 1926,305 | 793,428 | 1948,614 | 797,187 | 1951,285 | 797,634 |
| 3 | 1283,033 | 528,753 | 1284,204 | 528,952 | 1299,076 | 531,458 | 1300,857 | 531,756 |
| 4 | 962,274 | 396,565 | 963,153 | 396,714 | 974,307 | 398,594 | 975,642 | 398,817 |
| 5 | 769,820 | 317,252 | 770,522 | 317,371 | 779,445 | 318,875 | 780,514 | 319,054 |
| 6 | 641,516 | 264,377 | 642,102 | 264,476 | 649,538 | 265,729 | 650,428 | 265,878 |
| 7 | 549,871 | 226,609 | 550,373 | 226,694 | 556,747 | 227,768 | 557,510 | 227,895 |
| 8 | 481,137 | 198,282 | 481,576 | 198,357 | 487,153 | 199,297 | 487,821 | 199,408 |
| 9 | 427,678 | 176,251 | 428,068 | 176,317 | 433,025 | 177,153 | 433,619 | 177,252 |
| 10 | 384,910 | 158,626 | 385,261 | 158,686 | 389,723 | 159,437 | 390,257 | 159,527 |
| 11 | 349,918 | 144,205 | 350,237 | 144,260 | 354,293 | 144,943 | 354,779 | 145,024 |
| 12 | 320,758 | 132,188 | 321,051 | 132,238 | 324,769 | 132,865 | 325,214 | 132,939 |
| 13 | 296,084 | 122,020 | 296,355 | 122,066 | 299,787 | 122,644 | 300,198 | 122,713 |
| 14 | 274,936 | 113,304 | 275,186 | 113,347 | 278,373 | 113,884 | 278,755 | 113,948 |
| 15 | 256,607 | 105,751 | 256,841 | 105,790 | 259,815 | 106,292 | 260,171 | 106,351 |

Se concluye que para esta modalidad y tipo de compensación, la mejor alternativa se consigue con el empleo de un conductor tipo LA-455 con 11 arrollamientos, obteniendo un coste parcial de unos 4889 euros.

Para la evaluación de los costes en esta situación, puesto que se emplea un transformador de potencia, se empleará la expresión 6.14, donde S_n es la potencia nominal del transformador.

$$K_E = K_F \cdot C_B + K_{CD} \cdot L_{CD} + K_P \cdot P_{solar} + 7,407 \cdot 10^{-4} \cdot S_n^2 + 33,34425 \tag{6.13}$$

6.6.4. Compensación paralelo.

En este caso, se sigue el modelo de la figura 6.5, y se consiguen los resultados que se recogen en las tablas 6.12 y 6.13. Se comprueba que las dimensiones de

Tabla 6.11: Costes estimados para compensación serie, modalidad B.

| COSTES PARCIALES ESTIMADOS, Kc (€) | | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| LA-545 | | LA-455 | | LA-180 | | LA-110 | | |
| <i>n</i> | SOL 1 | SOL 2 |
| 1 | 22282,412 | 10881,125 | 25935,939 | 12630,331 | 63728,898 | 30901,688 | 99578,307 | 48183,740 |
| 2 | 11556,300 | 5947,280 | 13305,238 | 6736,237 | 31863,190 | 15608,736 | 49475,536 | 24122,453 |
| 3 | 8173,221 | 4524,116 | 9259,173 | 4956,478 | 21385,552 | 10610,401 | 33008,709 | 16199,659 |
| 4 | 6621,622 | 3977,595 | 7353,169 | 4203,838 | 16212,115 | 8175,441 | 24843,742 | 12285,768 |
| 5 | 5801,929 | 3781,567 | 6302,214 | 3861,813 | 13153,508 | 6764,185 | 19982,379 | 9971,321 |
| 6 | 5348,000 | 3760,739 | 5678,512 | 3725,028 | 11150,414 | 5864,325 | 16768,057 | 8455,455 |
| 7 | 5103,008 | 3840,009 | 5298,856 | 3705,501 | 9749,770 | 5256,523 | 14493,152 | 7395,500 |
| 8 | 4988,572 | 3981,834 | 5071,684 | 3759,249 | 8725,352 | 4831,184 | 12804,617 | 6620,305 |
| 9 | 4961,157 | 4165,357 | 4946,147 | 3861,842 | 7951,601 | 4527,450 | 11506,618 | 6034,861 |
| 10 | 4994,650 | 4378,067 | 4891,743 | 3998,624 | 7353,234 | 4308,821 | 10481,791 | 5582,192 |
| 11 | 5072,434 | 4612,003 | 4889,066 | 4160,269 | 6882,373 | 4152,075 | 9655,515 | 5226,059 |
| 12 | 5183,434 | 4861,859 | 4925,179 | 4340,560 | 6507,112 | 4041,734 | 8978,081 | 4942,311 |
| 13 | 5319,983 | 5123,959 | 4991,128 | 4535,193 | 6205,371 | 3967,085 | 8415,094 | 4714,233 |
| 14 | 5476,604 | 5395,679 | 5080,518 | 4741,095 | 5961,383 | 3920,477 | 7942,000 | 4529,887 |
| 15 | 5649,283 | 5675,096 | 5188,660 | 4956,012 | 5763,591 | 3896,299 | 7540,799 | 4380,522 |

la batería de condensadores es ahora mucho menor, puesto que la tensión a que éstos se encuentran sometidos es mayor, y las corrientes que deben soportar son menores.

Para esta situación, la solución óptima se da para el empleo de conductor tipo LA-455 con 10 arrollamientos, y el coste que se obtiene en este caso es de unos 4663 euros, menor que para el caso de compensación serie en cualesquiera de sus dos modalidades estudiadas. Se concluye por tanto, que desde el punto de vista económico resulta más rentable el empleo de compensación paralelo, si bien el empleo de compensación serie en la modalidad B (con empleo de un transformador) no supone un encarecimiento excesivamente elevado. Donde sí que se aprecia un encarecimiento considerable es en el caso de compensación serie sin empleo de transformadores.

Otro detalle de importancia, es que las capacidades calculadas para las modalidades A y B de la estrategia de compensación serie, han sido obtenidas imponiendo que la impedancia introducida en el lazo sea tal que, para el nivel de tensión correspondiente a cada caso, sea posible conseguir el nivel de corriente deseado. Ésto quiere decir, que éstos son los valores **mínimos** que puede adoptar la batería de condensadores para conseguir dicha corriente por el lazo, lo cual implica que, en caso de desear ajustar la compensación de reactiva, la única alternativa posible será aumentar la capacidad de la batería,

Tabla 6.12: Capacidad de la batería de condensadores para compensación paralelo.

| n | CAPACIDAD BATERÍA (µF) | | | | | | | |
|----|------------------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| | LA-545 | | LA-455 | | LA-180 | | LA-110 | |
| | SOL 1 | SOL 2 | SOL 1 | SOL 2 | SOL 1 | SOL 2 | SOL 1 | SOL 2 |
| 1 | 117,223 | 57,439 | 119,715 | 58,661 | 129,369 | 63,391 | 135,519 | 66,404 |
| 2 | 58,611 | 28,720 | 59,858 | 29,330 | 64,684 | 31,695 | 67,760 | 33,202 |
| 3 | 39,074 | 19,146 | 39,905 | 19,554 | 43,123 | 21,130 | 45,173 | 22,135 |
| 4 | 29,306 | 14,360 | 29,929 | 14,665 | 32,342 | 15,848 | 33,880 | 16,601 |
| 5 | 23,445 | 11,488 | 23,943 | 11,732 | 25,874 | 12,678 | 27,104 | 13,281 |
| 6 | 19,537 | 9,573 | 19,953 | 9,777 | 21,561 | 10,565 | 22,587 | 11,067 |
| 7 | 16,746 | 8,206 | 17,102 | 8,380 | 18,481 | 9,056 | 19,360 | 9,486 |
| 8 | 14,653 | 7,180 | 14,964 | 7,333 | 16,171 | 7,924 | 16,940 | 8,301 |
| 9 | 13,025 | 6,382 | 13,302 | 6,518 | 14,374 | 7,043 | 15,058 | 7,378 |
| 10 | 11,722 | 5,744 | 11,972 | 5,866 | 12,937 | 6,339 | 13,552 | 6,640 |
| 11 | 10,657 | 5,222 | 10,883 | 5,333 | 11,761 | 5,763 | 12,320 | 6,037 |
| 12 | 9,769 | 4,787 | 9,976 | 4,888 | 10,781 | 5,283 | 11,293 | 5,534 |
| 13 | 9,017 | 4,418 | 9,209 | 4,512 | 9,951 | 4,876 | 10,425 | 5,108 |
| 14 | 8,373 | 4,103 | 8,551 | 4,190 | 9,241 | 4,528 | 9,680 | 4,743 |
| 15 | 7,815 | 3,829 | 7,981 | 3,911 | 8,625 | 4,226 | 9,035 | 4,427 |

Tabla 6.13: Costes estimados para compensación paralelo.

| n | COSTES PARCIALES ESTIMADOS, Ke (€) | | | | | | | |
|----|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|
| | LA-545 | | LA-455 | | LA-180 | | LA-110 | |
| | SOL 1 | SOL 2 | SOL 1 | SOL 2 | SOL 1 | SOL 2 | SOL 1 | SOL 2 |
| 1 | 21863,877 | 10318,720 | 25646,852 | 12099,675 | 64412,136 | 30608,805 | 101570,135 | 48206,532 |
| 2 | 10758,288 | 5537,389 | 12539,392 | 6334,404 | 31333,695 | 15265,809 | 49273,343 | 23858,853 |
| 3 | 7517,791 | 4229,668 | 8617,952 | 4665,664 | 20846,384 | 10345,530 | 32615,078 | 15970,226 |
| 4 | 6087,934 | 3752,981 | 6827,425 | 3981,300 | 15742,093 | 7967,360 | 24455,623 | 12097,723 |
| 5 | 5357,431 | 3602,730 | 5862,768 | 3684,323 | 12748,648 | 6595,863 | 19629,962 | 9815,888 |
| 6 | 4969,688 | 3614,036 | 5303,688 | 3579,274 | 10798,859 | 5724,877 | 16452,938 | 8325,003 |
| 7 | 4775,268 | 3717,050 | 4973,661 | 3583,248 | 9441,122 | 5138,860 | 14211,286 | 7284,479 |
| 8 | 4700,561 | 3877,114 | 4785,611 | 3655,078 | 8451,527 | 4730,493 | 12551,306 | 6524,726 |
| 9 | 4705,116 | 4075,080 | 4691,627 | 3772,005 | 7706,425 | 4440,337 | 11277,660 | 5951,806 |
| 10 | 4764,856 | 4299,507 | 4663,174 | 3920,424 | 7131,965 | 4232,806 | 10273,663 | 5509,481 |
| 11 | 4864,561 | 4543,136 | 4682,197 | 4091,703 | 6681,315 | 4085,297 | 9465,324 | 5162,025 |
| 12 | 4994,133 | 4801,141 | 4736,717 | 4280,100 | 6323,346 | 3982,761 | 8803,450 | 4885,655 |
| 13 | 5146,614 | 5070,190 | 4818,470 | 4481,647 | 6036,554 | 3914,793 | 8254,065 | 4663,924 |
| 14 | 5317,050 | 5347,905 | 4921,573 | 4693,515 | 5805,614 | 3873,967 | 7792,948 | 4485,096 |
| 15 | 5501,820 | 5632,545 | 5041,724 | 4913,632 | 5619,301 | 3854,842 | 7402,364 | 4340,570 |

incrementando aún más el coste de la misma.

De tal forma, el tipo de compensación que se empleará en el lazo de corriente objeto de estudio es la **compensación paralelo**.

El modelo matemático seguido para calcular los costes estimados es el que se recoge en la expresión 6.15.

$$K_E = K_F \cdot C_B + K_{CD} \cdot L_{CD} + K_P \cdot P_{solar} + \quad (6.14) \\ + 2 \cdot (7,407 \cdot 10^{-4} \cdot S_n^2 + 33,34425)$$

En lo referente a la comparación entre las dos soluciones consideradas, se tienen los resultados que se recogen en la tabla 6.14. Se aprecia que la Solución 2 ofrece ventajas económicas, si bien éstas no son demasiado elevadas. Cualquiera de las dos soluciones presenta características parecidas, tanto técnicas como económicas, de modo que ambas son válidas para el propósito del proyecto. Para el diseño del inversor se tomará como solución definitiva la solución 1, aunque todos los cálculos se pueden realizar para la solución 2 de forma análoga.

Tabla 6.14: Configuraciones óptimas para las dos soluciones de lazo consideradas.

| <i>Solución</i> | <i>Compensación</i> | <i>Tipo Conductor</i> | <i>n</i> | <i>P (W)</i> | <i>Q (VAr)</i> | <i>C (μF)</i> | <i>Coste (€)</i> |
|-----------------|---------------------|-----------------------|----------|--------------|----------------|---------------|------------------|
| SOL 1 | PARALELO | LA-455 | 10 | 36.3 | 182.031 | 15 | 9600 |
| SOL 2 | PARALELO | LA-455 | 6 | 29,64 | 148,66 | 10 | 8516.1 |

Capítulo 7

ANÁLISIS, CÁLCULO Y DISEÑO DEL MEDIDOR DE FLUJO MAGNÉTICO.

En este capítulo se diseñará el medidor de flujo magnético, que será el encargado de registrar los valores de C.M. en una determinada posición, y transmitir las medidas de forma adecuada al sistema de control del lazo. Se pretenderá obtener a partir de ellas la máxima información posible (secuencia de fases, corriente de la línea...) a efectos de adoptar en cada instante la actuación adecuada.

7.1. Introducción. Conceptos básicos.

El diseño del *medidor de flujo* es una etapa importante para el presente proyecto, debido a que habrá que ajustarse a los datos arrojados por el mismo para regular en cada instante la alimentación del lazo de corriente.

Para tal menester, se dispondrá de dos bobinas¹ caladas la una respecto a la otra con sus ejes de simetría perpendiculares entre sí. De tal forma, cada una de ellas concatenará diferentes flujos, orientados según ejes de coordenadas diferentes. La bobina colocada en posición horizontal, concatenará casi en su totalidad, flujo con dirección horizontal, y análogamente para la bobina dispuesta verticalmente.

Se entenderá por '*Medidor de Flujo*' el dispositivo encargado de obtener

¹Con una sola bobina se puede obtener una buena estimación del C.M., pero, sin embargo, lo que se pretende es, además, obtener mediciones direccionales, esto es, los valores de C.M. según los ejes de coordenadas x e y , lo cual sólo es posible mediante el empleo de dos bobinas.

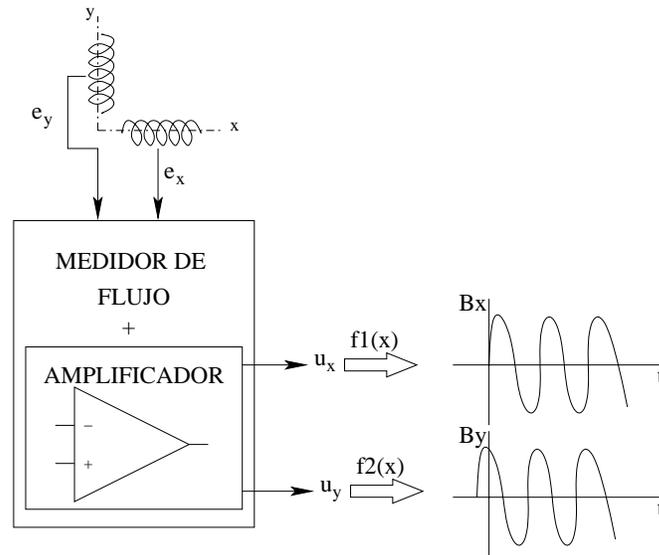


Figura 7.1: Esquema del sistema de medición de flujo.

los valores del campo magnéticos en un punto determinado en un instante determinado. El posterior tratamiento de dichas mediciones será realizado por el módulo de control del lazo, el cual recibirá las señales correspondientes a las medidas realizadas y las tratará a efectos de obtener la máxima información posible.

En la figura 7.1 se muestra un esquema que representa al medidor de flujo, que recibe como señales de entrada las fuerzas electromotrices inducidas en las bobinas, las trata y amplifica, y emite como señales de salida dos tensiones relacionadas matemáticamente con los valores de campo B_x y B_y . Este esquema será un extracto del esquema global del sistema de medición y tratamiento que se muestra en la figura 8.1 del capítulo 8.

A partir de las tensiones u_x y u_y , es posible obtener el trazado de las **Elipses de Inducción** de la línea en el punto de medida, independientemente de la combinación de secuencias de fase de la línea.

De tal forma, en el capítulo 8 se estudiarán las diferentes posibilidades que pueden adoptar las elipses de inducción en función de las distintas combinaciones de secuencias de fase de los dos circuitos de la línea, y se realizará una tabla de inferencias con la finalidad de agrupar bajo el mismo indicativo todas aquellas alternativas de secuencia de fase que producen una misma elipse de

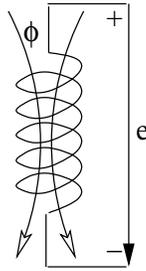


Figura 7.2: Flujo concatenado por la bobina y f.e.m. inducida en ella.

inducción. Los resultados serán comparados entre sí, y se analizarán las concomitancias existentes entre las elipses de inducción obtenidas por el medidor, y las calculadas matemáticamente. En el actual capítulo, tan sólo se desarrollará y diseñará lo que comprende al *Medidor de Flujo* en sí, desde el punto de vista funcional como técnico.

7.2. Relación funcional entre fuerza electromotriz de los sensores, y Campo Magnético.

Como se indicaba en la sección 7.1, para efectuar la medición del campo magnético, no con la intención de conocer únicamente la magnitud del mismo, sino también poder manejar las componentes B_x y B_y , puesto que son necesarias para determinar el grupo en que se engloba las secuencias de fase de la línea, será necesario emplear dos bobinas caladas perpendicularmente la una respecto de la otra, en posición horizontal y vertical respectivamente.

En la figura 7.2 se esquematiza el efecto que produce la concatenación de flujo magnético por parte de una bobina, produciendo la aparición de una fuerza electromotriz inducida en bornas de la misma. Éste será el esquema básico que describirá el principio de funcionamiento de los sensores de campo empleados para la medición.

La relación existente entre el flujo concatenado por la bobina, y el campo magnético en el punto de medida² viene dada por la expresión (7.1).

²A efectos de cálculo, se considerarán las dimensiones de la bobina despreciables frente a las distancias que separan al lazo de corriente o al edificio de la línea eléctrica, con lo que se puede considerar que las magnitudes medidas por ella son coincidentes con las magnitudes asociadas a dicho punto de medida.

$$B_i = \frac{\phi_i}{S_{bobina}} \quad (7.1)$$

En esta expresión, ϕ_i representa al flujo que concatena a la bobina i , así como S_{bobina} se refiere a la sección de la misma. En virtud de lo comentado, y teniendo presente la segunda ecuación de Maxwell, la fuerza electromotriz inducida por la bobina, adoptará el valor dado por la expresión (7.2).

$$e_i = -N_i \cdot \frac{d\phi_i}{dt} \quad (7.2)$$

donde N_i es el número de espiras de la bobina i .

Esta expresión se puede escribir, desarrollando, como se indica en 7.3,

$$e_i = -2\pi f N_i A B_{m\acute{a}x} \cos(\omega t) \quad (7.3)$$

siendo A la superficie de la bobina y $B_{m\acute{a}x}$ el pico de la densidad de flujo magnético.

De (7.3) se deduce con facilidad que la tensión es directamente proporcional a la frecuencia del campo. Ésto significa que requiere un circuito cuya amplificación sea inversamente proporcional a la frecuencia; tal circuito es, por ejemplo, un integrador. La función de transferencia de un integrador basado en un operacional es la que se indica en (7.4).

$$H_{in} = \frac{-1}{2\pi f R_{in} C_{in} j} \quad (7.4)$$

En ella, j representa el número complejo $j = \sqrt{-1}$; R_{in} es la resistencia del integrador y C_{in} es la capacidad del integrador. Cuando el integrador y la bobina se colocan en serie, las cantidades de las ecuaciones (7.3) y (7.4) se multiplican. Ésto se aprecia en (7.5).

$$e_i \cdot H_{in} = \frac{N_i A B_{m\acute{a}x}}{R_{in} C_{in}} \text{sen}(\omega t) \quad (7.5)$$

Con ésto, lo que se ha obtenido es una salida independiente de la frecuencia de campo.

7.3. Diseño del esquema electrónico del medidor de flujo.

En el presente apartado se introducirá el esquema electrónico correspondiente al medidor de flujo, así como una detallada explicación de su funcionamiento. El desarrollo que se seguirá será el consecuente de partir de una bobina del medidor como sensor. Puesto que en este caso se utilizarán dos bobinas como se comentó en 7.1, el desarrollo será válido tanto para una como para otra, motivo por el cual tan sólo se realizará una vez.

El principio de las mediciones realizadas por cada bobina se muestra en el diagrama de bloques de la figura 7.3.

La bobina de inducción usada para detectar campos magnéticos está representada por una fuente de tensión alterna, U_1 , cuya salida media es $1\mu V$. La salida de la fuente se amplifica en 101 veces su valor mediante el amplificador operacional X_1 .

Este amplificador se encuentra unido al integrador X_2 que proporciona una amplificación *dependiente* de la frecuencia. Para señales de tensión continua es 1000, mientras que para señales de alta frecuencia es 0. La frecuencia de corte se elige de forma que la amplificación sea uniforme sobre el rango en el cual la inducción magnética es medida (40Hz–10KHz: en nuestro caso 50Hz).

La red de realimentación R_4 – R_6 asegura automáticamente que el circuito tiene un punto de trabajo en continua estable en todo el momento. Ésto es posible por la utilización de amplificadores operacionales de cierta calidad. El atenuador interno también asegura que la máxima amplificación en continua es: $(1 + R_6/R_5)$. El valor del cociente R_6/R_5 determina el límite inferior del rango de frecuencias.

El diagrama del circuito del medidor asociado a cada bobina del mismo puede observarse en la figura 7.4. Consta de un amplificador de entrada, un integrador, un rectificador con supresión de continua y circuito de ataque asociado y un zócalo para conectar un voltímetro digital (DVM).

El amplificador de entrada, basado en IC_{1a} , asegura que la señal de la bobina L_1 es amplificada $\times 101$. La bobina termina en una impedancia alta, por lo que la salida es adaptada con un operacional.

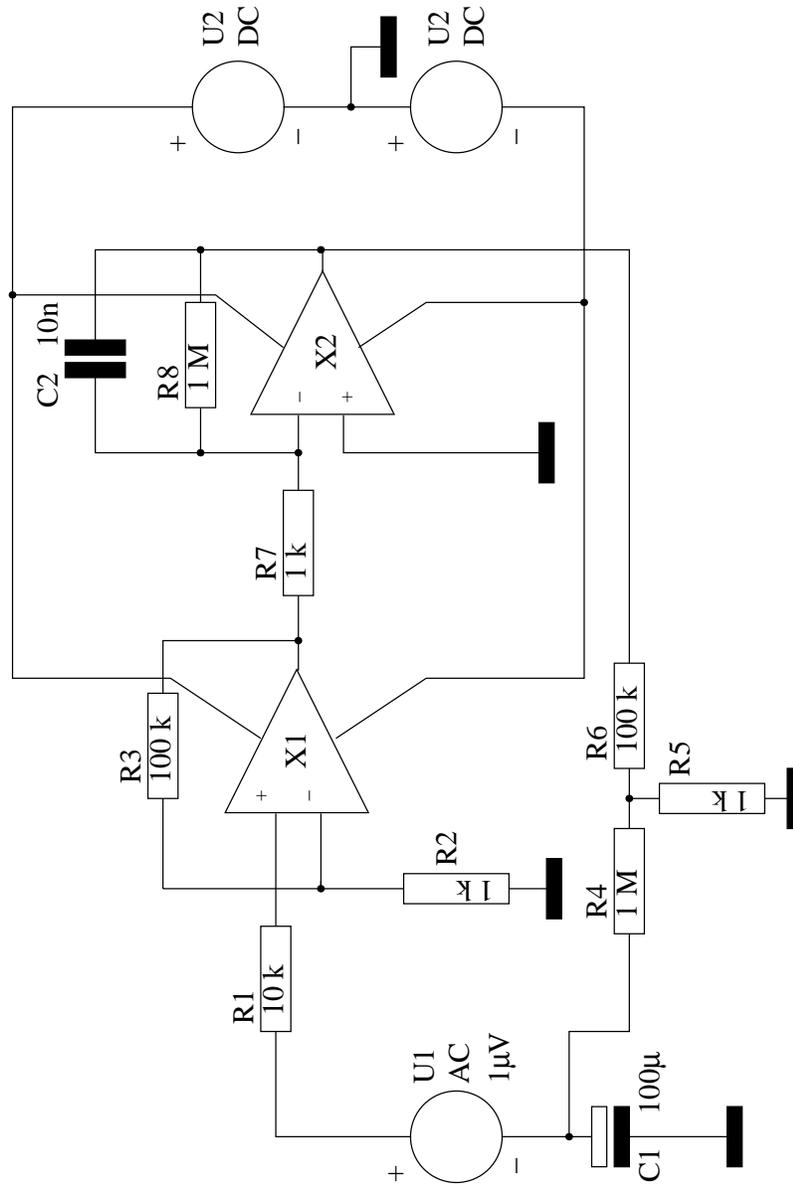


Figura 7.3: Diagrama de bloques del amplificador que convierte el campo magnético detectado en una tensión alterna independiente de la frecuencia.

El integrador lo forma IC_{1b} , otro de los cuatro operacionales contenido en IC_1 .

El rectificador (activo), basado en IC_{1c} , es en realidad un amplificador diferencial que reduce la tensión media de la salida del integrador. Como el amplificador operacional está alimentado asimétricamente, la salida es un rectificador de media onda. Esta tensión es filtrada por $R_{16}-C_6$ o, en el caso de un voltímetro digital, es usada para la medida pasándola por $R_{18}-R_{20}-C_7$. El factor de forma (2,22) es corregido por el rectificador. El nivel se toma deliberadamente del rectificador porque tiene un margen mucho mayor que en IC_{1a} o IC_{1b} .

Loa amplificadores operacionales IC_{1a} e IC_{1b} llevan una señal senoidal pura que está *montada* sobre una tensión continua de $3V$, mientras que en IC_{1c} la señal oscila sobre los $0V$. Ésto significa que este amplificador puede manejar una amplificación de $\times 2,2$ mucho mejor que los otros dos.

La caída en C_6 es la señal que entra en el circuito IC_2 que aporta las salidas encargadas de establecer el nivel que representa el valor del C.M. Este circuito tiene su propia fuente de tensión de referencia. Esta tensión es de $1,25V$ y se utiliza para derivar una tensión auxiliar a los amplificadores operacionales IC_{1a} e IC_{1b} . La tensión en el nudo A es

$$\frac{R_{14} + R_{15}}{R_{15}} \times 1,25 = 3V$$

Se empleará un filtro activo con la finalidad de obtener una señal de salida con la frecuencia correspondiente a la frecuencia industrial del campo (50 Hz). A tal efecto, se hará uso de un filtro Paso-Bajo (sección 7.4).

7.4. Cálculo y diseño del filtro Paso-Bajo.

En la figura 7.5(a) se representa el esquema básico correspondiente al filtro Paso-Bajo empleado para filtrar las señales de salida del medidor de flujo. En este epígrafe se procederá al cálculo de los componentes para la consecución de tal efecto.

En la representación gráfica 7.5(b) se muestra el diagrama de Bode correspondiente al filtro Paso-Bajo de la figura 7.5(a). Se pretende eliminar todas aquellas frecuencias de valor inferior a la de trabajo de la línea (50 Hz).

Deben elegirse los componentes atendiendo a:

$$2 \cdot \pi \cdot 50 = \frac{1}{R_2 \cdot C} \implies C = 32pF \therefore R_2 = 100k\Omega$$

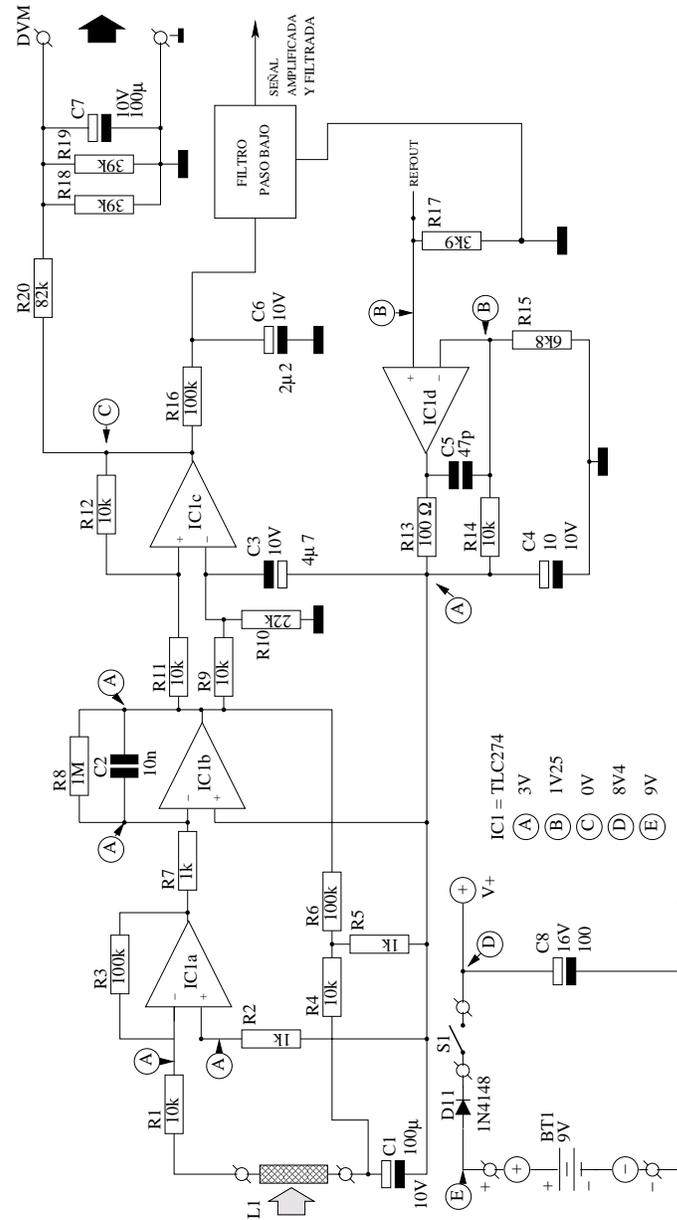


Figura 7.4: Esquema eléctrico del medidor de campo asociado a cada bobina.

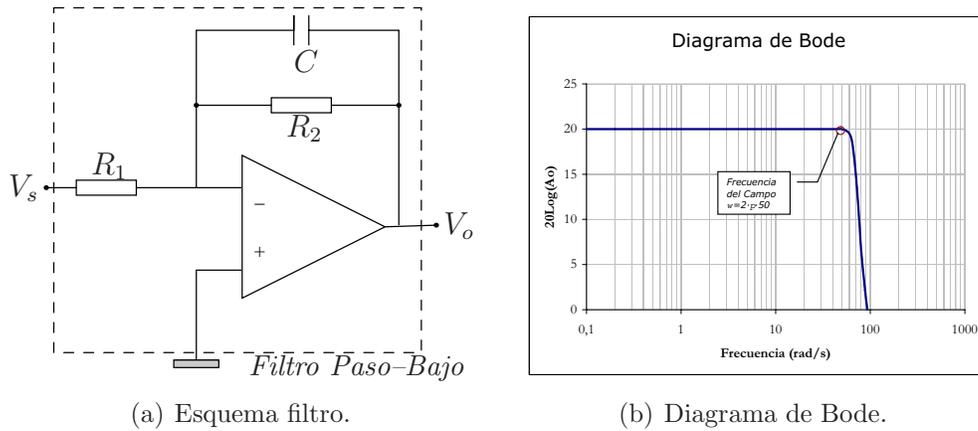


Figura 7.5: Empleo del filtro Paso-Bajo para depurar la señal.

$$R_1 = 100k\Omega$$

La señal V_o , resultado de filtrar la señal amplificada procedente de la tensión de la bobina, será la que se envíe a la tarjeta DSP para su procesamiento y decisión de control sobre el inversor.

7.5. Cálculo y diseño de las bobinas de medida.

El diseño de las bobinas de inducción es un compromiso entre la superficie de las mismas y el número de vueltas. Uno de los inconvenientes del uso de bobinas con elevado número de vueltas radica en la falta de precisión durante el bobinado. Si la bobina consta de muchas vueltas montadas una sobre otra, su superficie se incrementa y con ello la imprecisión. Ésto puede dar lugar a errores. De tal forma, a la hora de diseñar una bobina, el producto del número de vueltas N_i por la superficie A debe ser

$$N_i \cdot A = 51,66 \times 10^{-3}$$

De tal forma, conocidas las dimensiones de la bobina diseñada, el cálculo de vueltas resulta sencillo, sustituyendo en la expresión anterior. Si se usan más de 100 vueltas se puede reducir la precisión al 1% y es posible ajustar el número de vueltas.

En el presente caso, se empleará una bobina cuya superficie será $426 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, de modo que el número de vueltas que se empleará habrá de ser, para mantener la precisión en niveles óptimos, de

$$N_i = \frac{51,66 \times 10^{-3}}{A} = \frac{51,66 \times 10^{-3}}{426 \times 10^{-6}} = 121$$

El conductor que se empleará para la construcción de las bobinas de inducción será hilo de cobre de 0,2 milímetros, y las vueltas se efectuarán exactamente sobre cinco capas.

7.6. Componentes necesarios para la construcción del medidor de flujo.

En esta sección se aportará una lista detallada de los componentes necesarios para la construcción de la placa del medidor asociada a cada bobina de inducción. Puesto que para el medidor de flujo que se pretende realizar se emplearán dos bobinas de inducción dispuestas perpendicularmente entre sí, el número de componentes total que serán necesarios serán el doble de los que se enumera en la tabla 7.1.

Tabla 7.1: Lista de componentes para la realización práctica del medidor de flujo.

| Listado de componentes | |
|-------------------------------|--|
| Resistencias | $R_1, R_9, R_{11}^*, R_{14} = 10k\Omega$ $R_2^*, R_5, R_7^* = 1k\Omega$ $R_3^*, R_6, R_{16} = 100k\Omega$ $R_4, R_8 = 1M\Omega$ $R_{10}, R_{12} = 12k\Omega \ 1\%$ $R_{13} = 100\Omega$ $R_{15} = 6,8k\Omega$ $R_{17} = 3,9k\Omega$ $R_{18}, R_{19}^* = 39k\Omega$ $R_{20} = 82k\Omega, \ 1\%$ $*=1\%$ |
| Condensadores | $C_1, C_7 = 100\mu F, 10V$ $C_2 = 10nF$, de película metalizada $C_3 = 4,7\mu F, 10V$ $C_4 = 10\mu F, 10V$ $C_5 = 47pF$ $C_6 = 2,2\mu F, 10V$ $C_8 = 100\mu F, 16V$ $C_{filtro} = 32pF, 16V$ |
| Bobinas | Ver sección 7.5 |
| Semiconductores | $D_{11} = 1N4148$ |
| Circuitos integrados | $IC_1 = TLC274$ |
| Varios | $S_1 =$ Interruptor de contacto simple $PC_1-PC_4 =$ espadín de 1,3 mm de diámetro. $Bt_1 =$ pila de 9V |

Capítulo 8

DISEÑO DEL MÓDULO DE ANÁLISIS Y REGULACIÓN.

En este capítulo se diseñará el Módulo de análisis y control del lazo, el cual se encargará de recoger las señales obtenidas por el medidor de flujo así como la corriente inyectada al lazo en cada instante, y determina en cada momento, a partir de dichos datos, la regulación de corriente del lazo.

8.1. Introducción.

Una vez diseñado el medidor de flujo, el siguiente bloque implicado en el sistema de control del lazo es el correspondiente al de análisis, que será el que partiendo de los valores tomados por el medidor de flujo, así como del dato correspondiente a la corriente inyectada al lazo en cada instante, procese esta información y aporte el valor de la corriente de lazo que habrá de inyectarse para minimizar el campo magnético. Ésto se presenta con claridad en la figura 8.1.

Se observa como del módulo de Análisis se obtiene una señal indicativa de la corriente que es conveniente inyectar al lazo en cada instante, la cual la recoge el sistema de control del lazo, que se encargará de procurar que la alimentación del mismo se surta con valores de corriente lo más próximos posible a ésta. El sistema, como puede comprobarse, es realimentado, puesto que se analiza la corriente en curso y en base a ella se decide la corriente necesaria.

El modo en que se afrontará este problema será el siguiente: en primer lugar, se realizará un estudio exhaustivo del campo magnético generado por

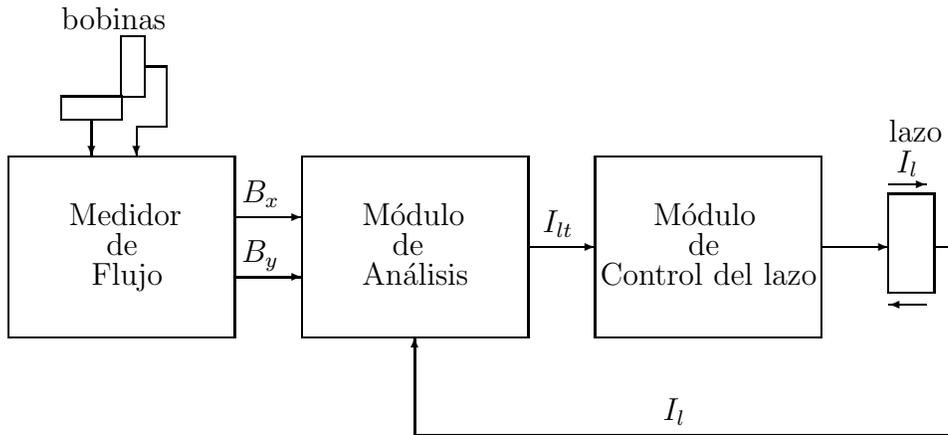


Figura 8.1: Diagrama de bloques del sistema de medición-análisis-regulación.

una línea de las características de la de Don Rodrigo-Pinar del Rey, y de las distintas formas en que éste se puede presentar dependiendo de factores tales como la corriente de la línea o las combinaciones de las secuencias de fase de los circuitos de la red. Con ésto se pretende obtener la máxima información de las condiciones y estado de la línea eléctrica, y corresponderá a la situación en la que la corriente del lazo sea nula (aún no haya sido éste conectado a la alimentación). Por ello, posteriormente habrá que realizar un estudio acerca del comportamiento del campo magnético medible una vez que circule corriente por el lazo, y la variación del mismo en función de este valor.

Una vez conocidos todas estas relaciones, serán convenientemente procesadas y se obtendrá el valor de la corriente que teóricamente habrá de ser inyectada en el lazo en cada instante concreto. Esta señal se enviará al módulo de control del lazo para llevar a cabo las variaciones pertinentes en la corriente del lazo hasta modularla según dicho valor.

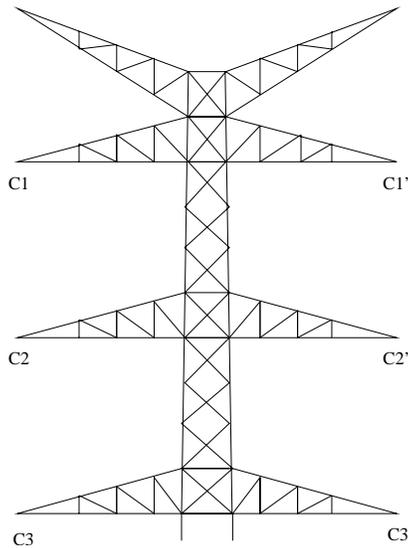
En el presente capítulo sólo se tratará el aspecto matemático-físico del campo magnético, así como el análisis de las variables y su evolución respecto de otras implicadas en estos fenómenos. La parte técnica que se hará cargo de los resultados del presente, se desarrollará en el capítulo 9, donde además, se establecerá el diseño del sistema de alimentación y control completo del lazo de corriente.

Por otra parte, la estructura de este capítulo comprende dos partes diferenciadas, que son las correspondientes a los análisis del campo magnético para lazo en estado inactivo (corrientes de lazo nulas) y para lazo activo. La primera situación es de vital importancia puesto que asegura el establecimiento de la

corriente inicial del lazo de mitigación (al tiempo que determina los valores de la corriente de la línea, secuencias de fase, etc.) para la compensación del campo.

8.2. Combinaciones posibles en las secuencias de fase de la línea, y análisis de las elipses de inducción.

Bajo el presente epígrafe se expondrán y analizarán en detalle cada una de las posibles combinaciones de las secuencias de fase de los dos circuitos de que consta la línea eléctrica.



| <i>Conductor 1</i> | | | <i>Conductor 2</i> | | |
|--------------------|-------|-------|--------------------|--------|--------|
| C_1 | C_2 | C_3 | C'_1 | C'_2 | C'_3 |
| a | b | c | a | b | c |
| a | b | c | b | c | a |
| a | b | c | c | a | b |
| b | c | a | a | b | c |
| b | c | a | b | c | a |
| b | c | a | c | a | b |
| c | a | b | a | b | c |
| c | a | b | b | c | a |
| c | a | b | c | a | b |

Figura 8.2: Esquema básico de los conductores de la línea.

Posibilidades de combinaciones de diferentes secuencias de fase.

En la figura 8.2 se muestra un esquema en el que se nombran los distintos conductores correspondientes a cada circuito que compone la línea, y en la tabla adjunta se exponen las diferentes combinaciones que pueden adoptar las secuencias de fases de dichos circuitos.

Como se estudió en las secciones 2.4 y 2.4.1, la forma que adopta el campo magnético generado por la circulación de corrientes alternas por conductores rectilíneos (en este caso, ésta es una característica que se adopta como

hipótesis: la validez de la aproximación de los conductores reales por conductores rectilíneos), en un punto cercano a los mismos, es una elipse, denominada **elipse de inducción**. Debido a que dicha elipse de inducción depende de forma directa del valor complejo de la corriente que circule por los conductores de la línea, también la forma que ésta adopte variará con la combinación de secuencias de fase que presenten las corrientes que circulen por dichos conductores.

Los valores que adoptan los semiejes de la elipse, B_m y B_M , así como el ángulo que forma el semieje mayor con la horizontal, θ_M , dependen, como se aprecia en las expresiones (2.28), (2.29) y (2.30), de las componentes x e y del campo magnético: B_x y B_y .

Debido a que tales componentes, para la línea trifásica de doble circuito considerada, vienen dadas por las expresiones (8.1) y (8.2), tal y como indica Holton y Goldberg [3].

$$B_x = 2 \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{(I_{irms} \angle \theta_i) \cdot (y_i - y_j)}{(y_j - y_i)^2 + (x_j - x_i)^2} \quad (8.1)$$

$$B_y = -2 \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{(I_{irms} \angle \theta_i) \cdot (x_i - x_j)}{(y_j - y_i)^2 + (x_j - x_i)^2} \quad (8.2)$$

Descomponiendo el valor complejo de la corriente \mathcal{I}_i , en sus componentes real e imaginaria, se tiene la expresión (8.3).

$$\mathcal{I}_i = I_{irms} \angle \theta_i = I_{irms} \cdot (\cos \theta_i + j \cdot \sen \theta_i) \quad (8.3)$$

A partir de estas expresiones, se analizará para cada combinación de secuencias de fase los desfases que se establecen entre B_x y B_y , que serán los que, al fin y al cabo determinen la forma geométrica de la *elipse de inducción*.

Una vez que se conozcan los valores de B_x y B_y , las señales $B_x(t)$ y $B_y(t)$ vendrán dadas por las expresiones (8.4) y (8.5).

$$B_x(t) = B_{x_{mod}} \cdot \cos(\omega t + \theta_x) \quad (8.4)$$

$$B_y(t) = B_{y_{mod}} \cdot \cos(\omega t + \theta_y) \quad (8.5)$$

En ellas, $B_{x_{mod}}$ y $B_{y_{mod}}$ representan los módulos de los valores que adopten las expresiones (8.1) y (8.2) para cada caso concreto, así como θ_x y θ_y suponen los ángulos de fase de los números complejos de estas mismas expresiones.

La representación gráfica de $B_y(t)$ frente a $B_x(t)$ será la elipse de inducción correspondiente al campo magnético generado por la línea en el punto que se considere.

Las corrientes de fase serán las que se presentan desde la ecuación (8.6) hasta (8.11).

$$\mathcal{I}_a = I_{i_{rms}} \angle 0 = I_{i_{rms}} \quad (8.6)$$

$$\mathcal{I}_{a'} = \mathcal{I}_a \quad (8.7)$$

$$\mathcal{I}_b = I_{i_{rms}} \angle \frac{4\pi}{3} = I_{i_{rms}} \cdot \left[\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + j \cdot \text{sen}\left(\frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (8.8)$$

$$\mathcal{I}_{b'} = \mathcal{I}_b \quad (8.9)$$

$$\mathcal{I}_c = I_{i_{rms}} \angle \frac{2\pi}{3} = I_{i_{rms}} \cdot \left[\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + j \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (8.10)$$

$$\mathcal{I}_{c'} = \mathcal{I}_c \quad (8.11)$$

8.2.1. Herramienta de simulación “Elipses de Inducción”.

Con la finalidad de efectuar los cálculos indicados en el epígrafe 8.2 con el mayor rigor matemático, así como de proporcionar una interfaz sencilla e intuitiva para proceder con tales cálculos, así como practicarlos en multitud de casos y situaciones posibles, se ha desarrollado una herramienta de simulación y representación de los Campos Magnéticos creados por la línea eléctrica en puntos próximos a la misma.

La apariencia de la herramienta, justamente tras la instalación y ejecución de la misma, es la que se muestra en la figura 8.3.

Para comenzar a trabajar con el programa, basta establecer los parámetros adecuados: coordenadas del punto de medida, combinación de secuencias de fase... y una vez fijados dichos parámetros, habrá que pulsar el botón “Calcular Elipses de Inducción” para obtener la representación gráfica de la elipse de inducción que teórica y matemáticamente se observaría en el punto de medida. El resultado gráfico es tal como se muestra en la figura 8.4.

La selección de las secuencias de fase se efectúa eligiendo de entre las listas desplegables que se muestran en la figura 8.5 el valor de la fase que se asociará al primer conductor de cada circuito de la línea. Además, en la figura 8.5 se observan dos opciones añadidas que son:

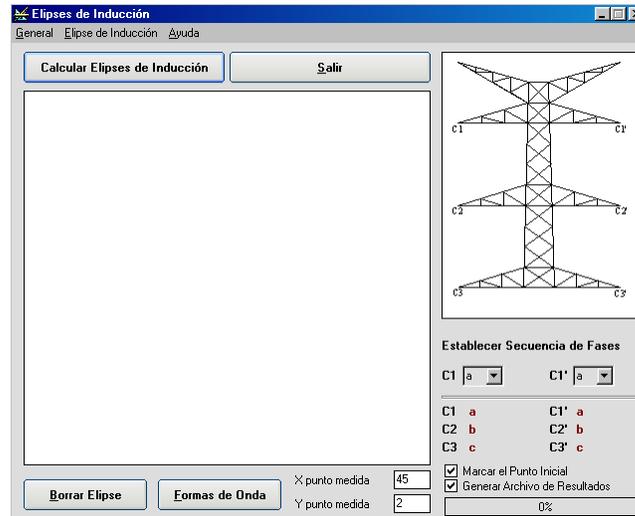


Figura 8.3: Captura de la interfaz de usuario del programa.

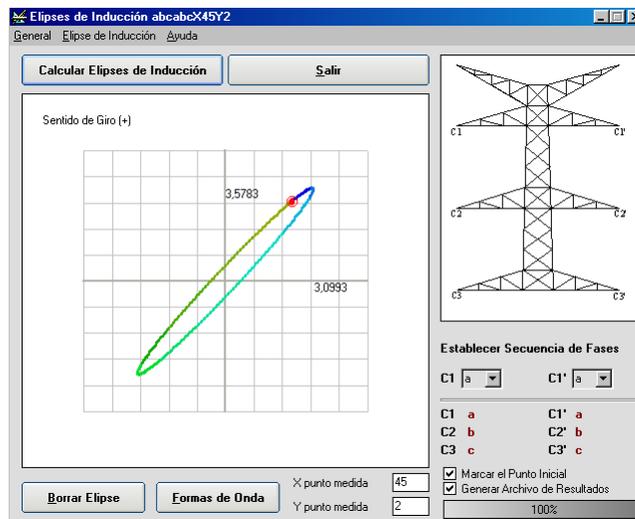


Figura 8.4: Aspecto del resultado gráfico obtenido.



Figura 8.5: Listas desplegables para selección de las combinaciones de las secuencias de fase.

- **Marcar el punto inicial.** Seleccionando esta casilla, cada vez que se efectúe el trazado de una elipse de inducción, se marcará una circunferencia roja alrededor del punto de inicio de la elipse, que corresponde a aquel para el cual $\omega t = 0$. Este detalle resultará útil para establecer similitudes y diferencias entre las elipses de inducción correspondientes a diferentes combinaciones de secuencias de fase.
- **Generar archivo de resultados.** Cuando se encuentre esta opción marcada, cada vez que se efectúe el trazado de una elipse de inducción, los puntos de la misma (B_x y B_y) serán recogidos en una hoja de cálculo.

Otro dato que se especifica en la zona de trazado del programa, es la ‘orientación’ que sigue la elipse de inducción, es decir, se establece el sentido de giro de la elipse de inducción para valores de ωt crecientes. El signo (+) indicado en la esquina superior izquierda de la zona de trazado, indicará que este ‘giro’ se corresponde con el sentido de giro de las agujas del reloj. A su vez, el signo (−) indicará que tal orientación corresponderá con el sentido contrario al de las agujas del reloj. No obstante, para referirse a tal ‘orientación’ de la elipse en el presente informe, se hará uso de la simbología siguiente: \odot para establecer el sentido de giro opuesto al de las agujas del reloj, y \ominus para establecerlo coincidente a las mismas. Otro detalle que pone de manifiesto tal direccionalidad, es el gradiente de color empleado para la representación gráfica de la elipse. Para valores pequeños de ωt , ésta presenta un trazo de color azul, mientras que conforme ωt va creciendo, ésta va cambiando de color, tornándose en verde.

Otra función importante del programa es la capacidad del mismo para

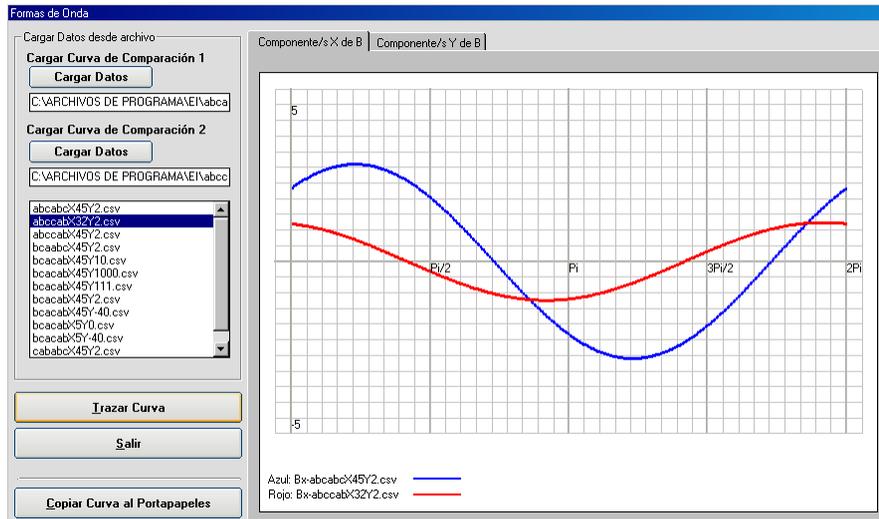


Figura 8.6: Representación gráfica de las curvas B_x y B_y .

representar tanto individualmente como de forma conjunta y comparativa las señales correspondientes a B_x y B_y , con la finalidad de establecer empíricamente los desfases existentes entre las señales correspondientes a la misma elipse, o entre las asociadas a elipses diferentes.

En la figura 8.6 se puede observar una captura correspondiente a la interfaz asociada a esta función. Se comprueba que es posible representar en el mismo espacio las señales correspondientes a dos diferentes valores de B_x (o B_y), simplificando de tal forma la tarea de comparación entre ellas.

El código fuente de esta aplicación viene recogido en el apéndice A en la página 217.

8.2.2. Elipses de inducción para las diferentes combinaciones de las secuencias de fase.

Las simulaciones que se efectúen en el presente epígrafe, corresponderán a los valores teóricos que adopta el campo magnético generado por la línea eléctrica en un punto de medida genérico (punto de medida en el cual se desea conocer con la mayor precisión el valor del C.M.) que se adoptará como

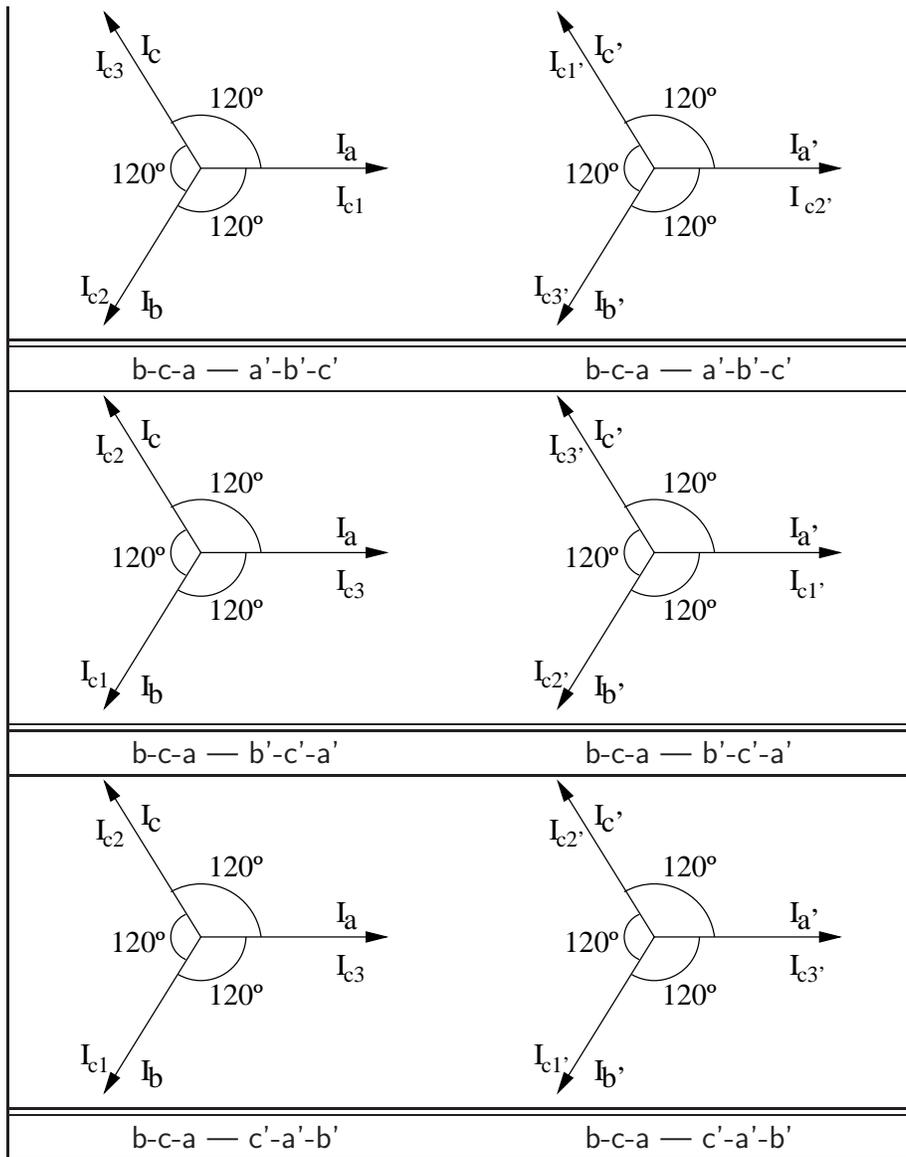
$(x, y) = (-40, 2)^1 m.$

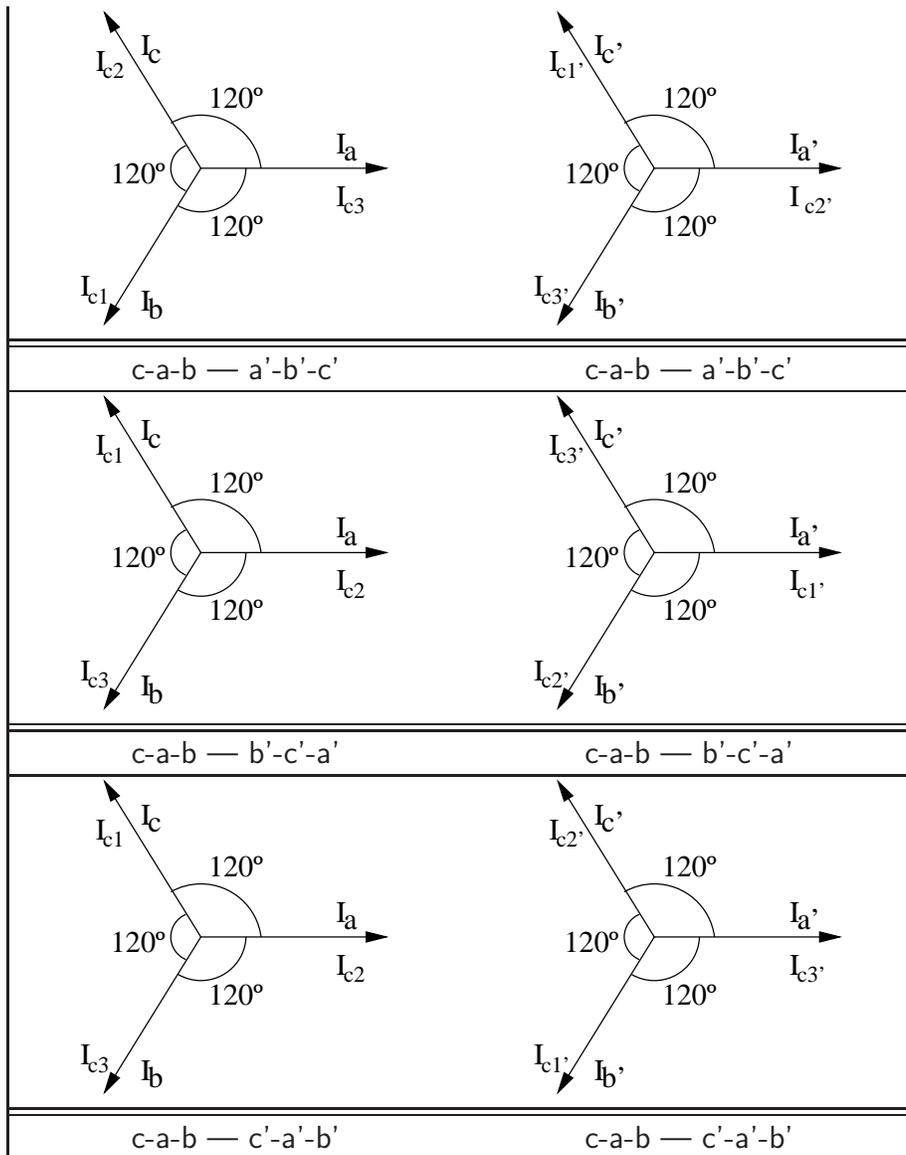
Los valores que adopta en cada combinación de secuencias de fase las corrientes que circulan por cada conductor de la línea, tanto de uno como otro circuito de la misma, se recogen en la tabla 8.1.

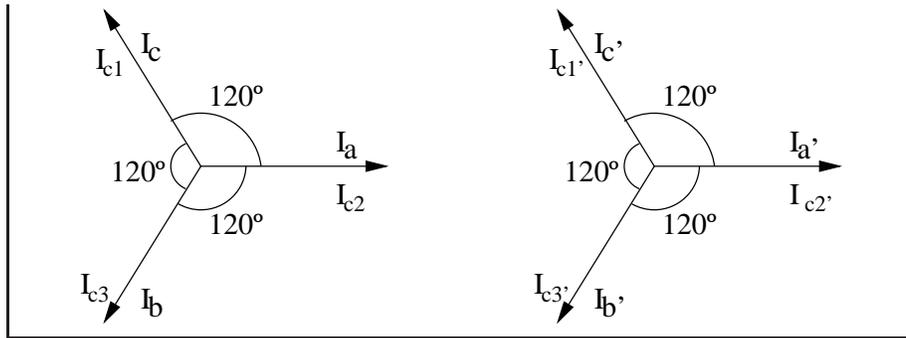
Tabla 8.1: Diagramas de fasores para las corrientes en función de la combinación de secuencias de fase.

| SF Circuito 1 | SF Circuito 2 |
|------------------|------------------|
| a-b-c — a'-b'-c' | a-b-c — a'-b'-c' |
| | |
| a-b-c — b'-c'-a' | a-b-c — b'-c'-a' |
| | |
| a-b-c — c'-a'-b' | a-b-c — c'-a'-b' |

¹Se adopta como posibilidad de ubicación del medidor de flujo magnético una posición a la cota de 2 metros, por tratarse ésta de una altura representativa de una planta del edificio, a la vez que accesible por el personal humano responsable del mantenimiento de la instalación.

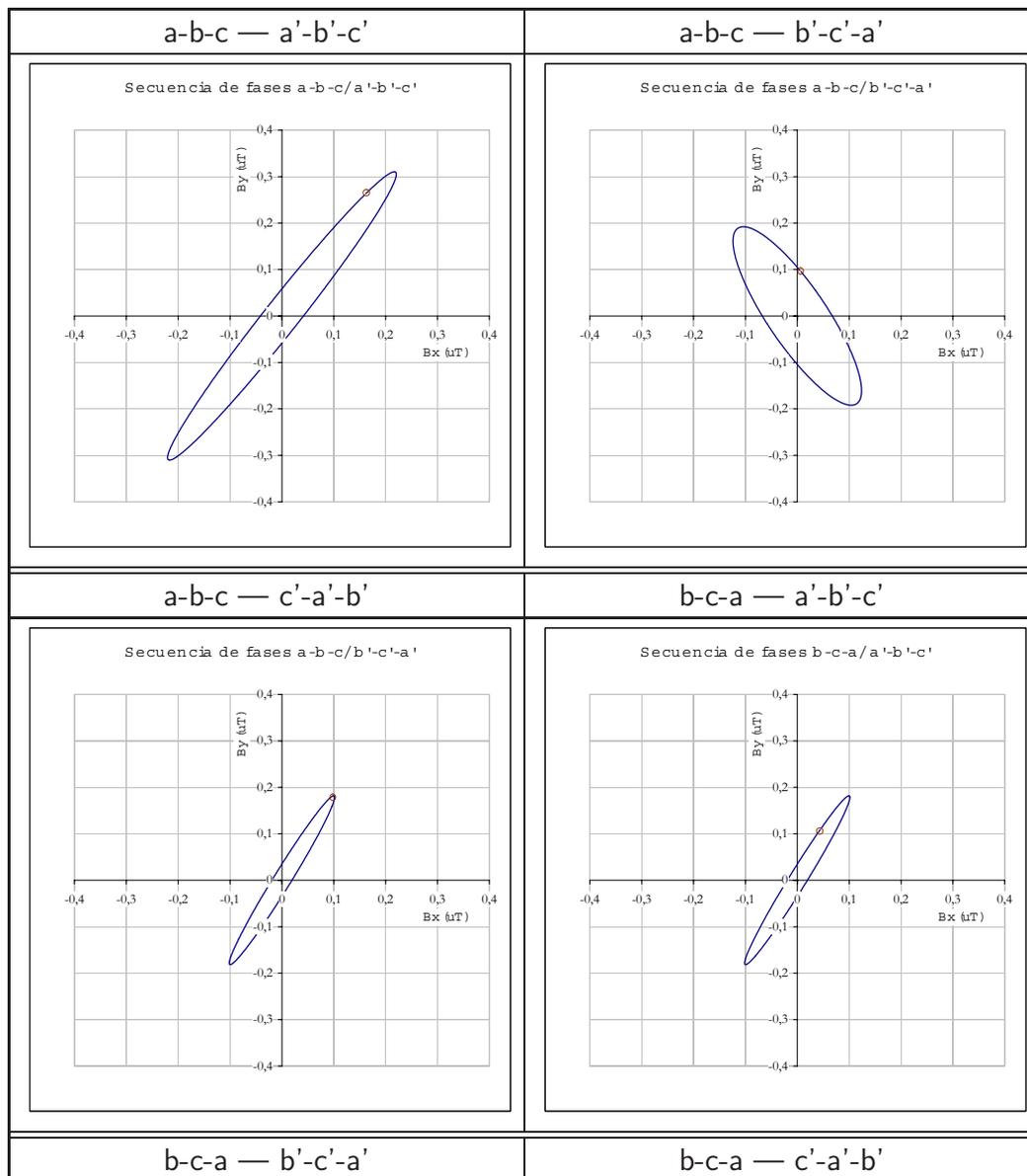


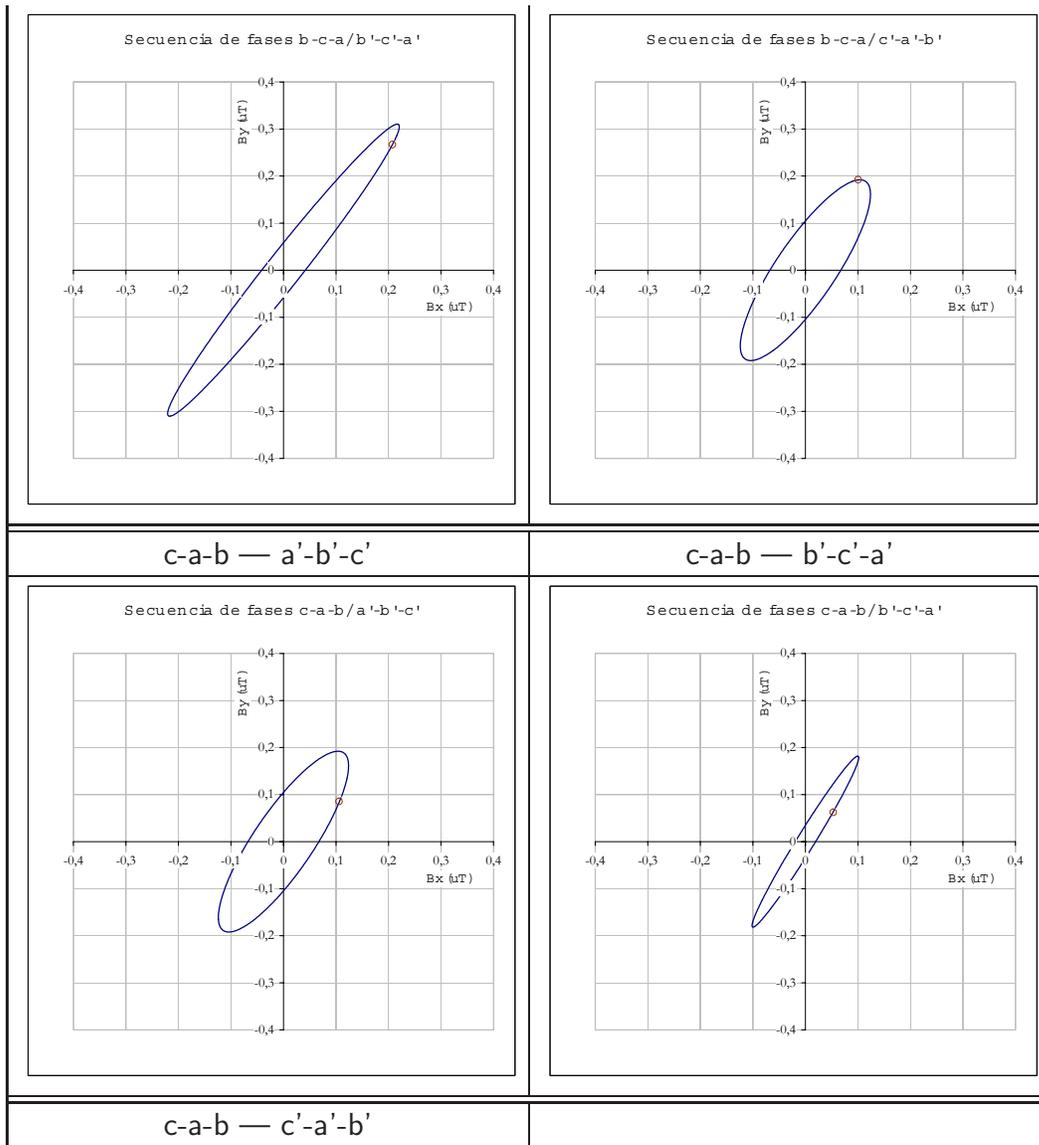


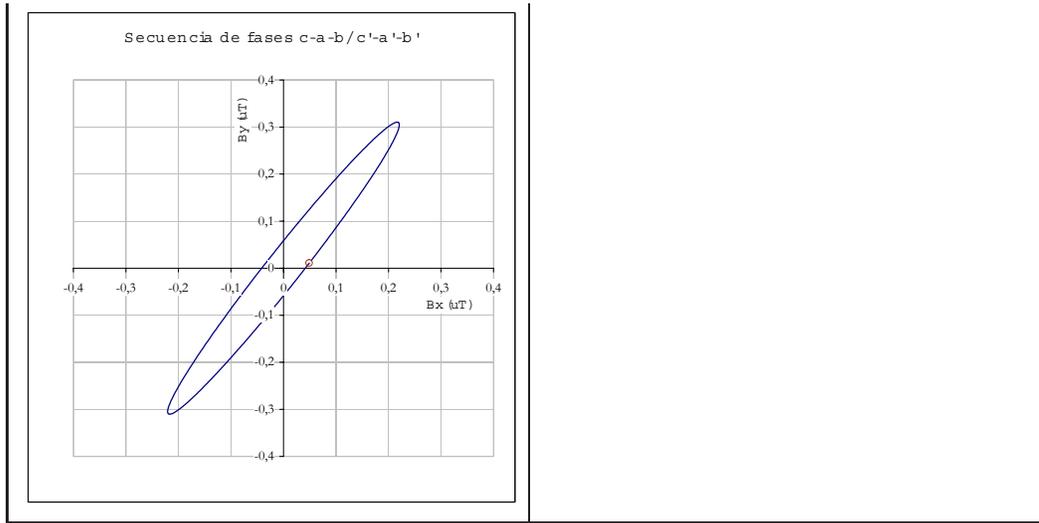


En la tabla 8.2, a su vez, se recogen las representaciones gráficas correspondientes a las elipses de inducción para cada combinación de secuencias de fase de los dos circuitos de la línea Don Rodrigo–Pinar del Rey. El orden seguido para las representaciones gráficas permite la comparación entre ellas de forma sencilla. Los ficheros que contienen los puntos calculados de dichas elipses son los que se encuentran en el directorio adjunto `... \pfc_archivos\elipses_ind\`, bajo la extensión `*.xls`.

Tabla 8.2: Elipses de inducción asociadas a cada combinación de secuencias de fase.







Una vez realizadas las simulaciones, otra serie de resultados se pueden obtener de las mismas, como son los orígenes de las elipses de inducción (es decir, los puntos de las mismas correspondientes al valor $\omega t = 0$, marcados con un círculo rojo en las representaciones de la tabla 8.2), los desfases entre componentes B_x y B_y , valores máximos de las mismas, etc.

Todos estos resultados se recogen de forma ordenada en la tabla 8.3.

Tabla 8.3: Resumen de los resultados obtenidos con la simulación de las diferentes combinaciones de secuencias de fase (valores de campo en μT).

| Nº Id. | Configuración | $B_{x_{m\acute{a}x}}$ | $B_{y_{m\acute{a}x}}$ | Desfase B_x - B_y | Orientación |
|--------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| 1 | a-b-c — a'-b'-c' | 0.2205 | 0.3104 | -11º | ↻ |
| 2 | a-b-c — b'-c'-a' | 0.1239 | 0.1921 | 146º | ↻ |
| 3 | a-b-c — c'-a'-b' | 0.1014 | 0.1817 | 11º | ↻ |
| 4 | b-c-a — a'-b'-c' | 0.1014 | 0.1817 | 11º | ↻ |
| 5 | b-c-a — b'-c'-a' | 0.2205 | 0.3104 | -11º | ↻ |
| 6 | b-c-a — c'-a'-b' | 0.1239 | 0.1921 | 146º | ↻ |
| 7 | c-a-b — a'-b'-c' | 0.1239 | 0.1921 | 146º | ↻ |
| 8 | c-a-b — b'-c'-a' | 0.1014 | 0.1817 | 11º | ↻ |
| 9 | c-a-b — c'-a'-b' | 0.2205 | 0.3104 | -11º | ↻ |

El signo menos en el desfase entre B_x y B_y significa que B_y se encuentra adelantado respecto a B_x .

Resulta inmediato comprobar de la observación de los resultados expuestos en la tabla 8.3 y de las representaciones gráficas insertas en la tabla 8.2, que no todas las soluciones son únicas dadas las combinaciones de secuencias de fase originarias, sino que varias posibilidades de combinación de éstas arrojan como resultados una elipse de inducción físicamente idéntica. Tal es el caso de las combinaciones numeradas como 1, 5 y 9, que arrojan la misma elipse de inducción. Las 3, 4 y 8 también tienen en común la elipse resultante de la simulación, y las combinaciones 2, 6 y 7 también.

La diferencia existente entre las soluciones correspondientes a un mismo grupo, no obstante, no es nula. Ésta radica en el punto origen o inicial de la elipse para cada configuración, que no es el mismo que se da en el de otra que ofrezca el mismo resultado. Los orígenes correspondientes a cada combinación se recogen en la tabla 8.4.

Sin embargo, a todos los efectos, se considerarán resultados técnicamente idénticos, debido a que se tratará el problema únicamente desde el punto de vista *estacionario*, resultando prescindibles los datos que discriminen unas soluciones respecto de otras por diferencias en el punto de “comienzo” de la elipse.

Tabla 8.4: *Puntos de Origen de las elipses de inducción.*

| Nº Id. | B_{x_o} (μT) | B_{y_o} (μT) |
|--------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 0,1617 | 0,2632 |
| 2 | 0,0047 | 0,0984 |
| 3 | 0,1012 | 0,1804 |
| 4 | 0,0443 | 0,1092 |
| 5 | 0,2107 | 0,2740 |
| 6 | 0,1048 | 0,1921 |
| 7 | 0,1095 | 0,0936 |
| 8 | 0,0569 | 0,0711 |
| 9 | 0,0490 | 0,0108 |

En adelante, cada vez que se aluda a alguno de estos tres grupos que proporcionan soluciones claramente diferentes, se empleará para ello la siguiente notación: grupos A, B y C, correspondiendo a cada uno de ellos las configura-

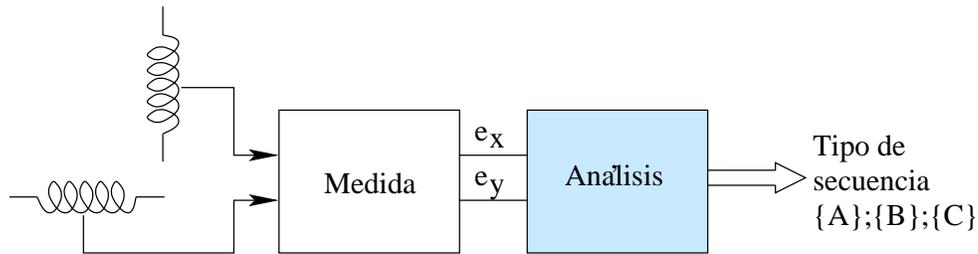


Figura 8.7: Esquema del proceso de medida y detección de la secuencia de fases.

ciones que se indican:

$$\{A\} = \{1, 5, 9\}$$

$$\{B\} = \{2, 6, 7\}$$

$$\{C\} = \{3, 4, 8\}$$

Además, se puede comprobar prácticamente que, sea cual sea el punto de referencia que se tome, todas las posibilidades que puedan adoptar las elipses de inducción, se engloban justamente en tres grupos análogos a los estudiados con anterioridad.

8.3. Análisis y tratamiento de las magnitudes obtenidas por el medidor de flujo.

Una vez establecidas teóricamente las posibilidades y alternativas que se pueden tener para el comportamiento del campo magnético creado por la línea eléctrica en un punto cualquiera. Como se indica en [1] para que estos valores sean manejados por el medidor de flujo de forma sencilla, es de utilidad la obtención de un valor numérico que represente a las elipses de inducción, de modo que el tratamiento de las señales resulte lo más rápido y simple posible. El esquema correspondiente al análisis que se realizará en el presente epígrafe es el que se muestra en la figura 8.7.

Para comenzar, habrá que establecer las relaciones adecuadas entre fuerza electromotriz inducida en las bobinas del sensor e_x , e_y —aunque estos valores ya han sido convenientemente amplificados con el fin de facilitar la transmisión y lectura de los mismos— y las componentes del campo magnético asociadas al punto de medida.

8.3.1. Relación funcional entre las f.e.m. medidas y el grupo de secuencias de fase.

Una vez establecida la relación existente entre f.e.m. inducida en la bobina y campo magnético generado en el punto de ubicación del medidor, se procederá con el bloque de análisis del sistema de medición, el cual, partiendo de tales valores de tensión, habrá de establecer en cada situación el grupo de secuencias de fase a que pertenecen los valores recibidos.

Se comenzará calculando los parámetros fundamentales de las elipses de inducción correspondientes a cada grupo, para diferentes posiciones X en las que sean medidas. De tal forma, se intentará encontrar un parámetro o relación entre parámetros que sea representativo de cada grupo y cuyo valor permita en cada situación establecer el grupo al que pertenece la elipse de inducción.

Estos parámetros fundamentales serán, en principio, los valores de los semiejes mayor y menor de las elipses de inducción.

El cálculo de estos valores resultará de la aplicación directa de las expresiones 2.28 y 2.29. Puede comprobarse que los valores B_x y B_y se obtienen de forma directa a partir de las señales e_x y e_y , mientras que para los desfases φ_x y φ_y habrá que establecer un criterio de medición que se indicará más adelante.

Los resultados que se incluirán en este epígrafe han sido obtenidos para una corriente por la red de 200 Amperios. El estudio de la evolución de los parámetros con la corriente se analizará en el epígrafe 8.4, con la finalidad de generalizar en la medida de lo posible el método de marginación y selección de grupo.

En la figura 8.8 se muestra una representación gráfica de la evolución de los valores del semieje mayor de la elipse de inducción para diferentes valores del punto de medida, así como para cada uno de los tres grupos en que se puede encontrar la combinación de secuencias de fase.

En las figuras 8.9 y 8.10 se muestran a su vez las representaciones análogas para el semieje menor (en el caso de la primera), y para el cociente entre los valores de ambos semiejes (la segunda).

Se observa en la representación 8.8 que, si bien los valores de B_M para las elipses de inducción del grupo $\{A\}$ son claramente diferentes a los de otros grupos, los valores para los grupos $\{B\}$ y $\{C\}$ se muestran sumamente similares, de modo que no parece buena la idea de considerar únicamente este parámetro (B_M) como criterio de selección del grupo asociado a las mediciones realizadas.

Algo parecido se puede observar en la representación 8.9, salvo que en esta ocasión los tres grupos presentan valores demasiado próximos, e incluso se

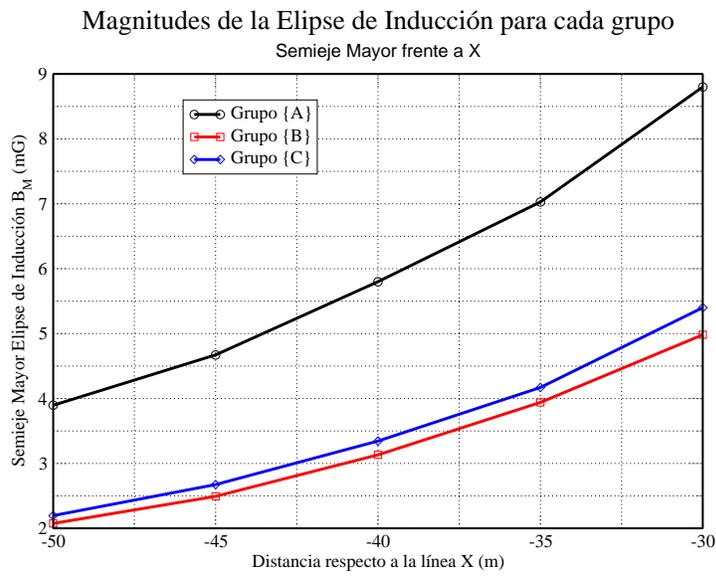


Figura 8.8: Representación gráfica del valor del semieje mayor para diferentes puntos y grupos.

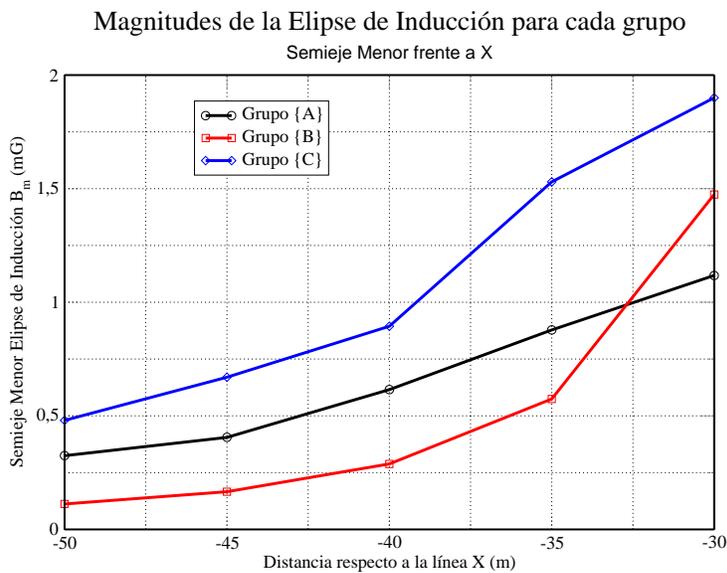


Figura 8.9: Representación gráfica del valor del semieje menor para diferentes puntos y grupos.

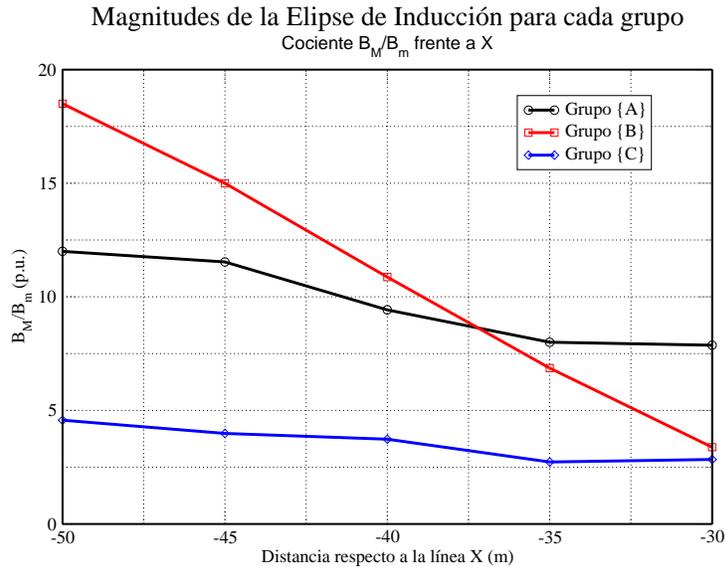


Figura 8.10: Representación gráfica del cociente $\frac{B_M}{B_m}$ para diferentes puntos y grupos.

comprueba que las curvas no siguen pautas fijas, puesto que en unas posiciones el grupo $\{B\}$ presenta valores mayores que el $\{C\}$, pero en otras sucede justamente lo contrario. Se concluye de tal forma que el parámetro B_m no presenta las características adecuadas para que pueda ser considerado como criterio de selección del grupo.

En la representación correspondiente al cociente $\frac{B_M}{B_m}$ los grupos $\{A\}$ y $\{C\}$ quedan perfectamente diferenciados: para ambos grupos, el valor de este cociente se mantiene en rangos diferentes, y las curvas no se solapan. Sin embargo, esto no ocurre para el grupo $\{B\}$. Este hecho hace pensar que el empleo de este parámetro junto con otro parámetro (u otros parámetros) auxiliar aún por determinar puede constituir un criterio válido para la selección del grupo.

Un parámetro auxiliar que se puede emplear para la discriminación de posibilidades es el sentido de giro u orientación de la elipse de inducción, ya que, como se recoge en la tabla 8.3, de los tres grupos el único que presenta sentido levógiro, \odot , es el grupo $\{C\}$.

Para la distinción entre grupo $\{A\}$ y $\{C\}$, se puede observar en la figura 8.8 que el parámetro B_M puede resultar útil, puesto que para ambos grupos se presenta suficientemente diferente. No obstante, por sí solo no es útil, puesto que el rango de variación de dicho parámetro para uno y otro grupo se solapa.

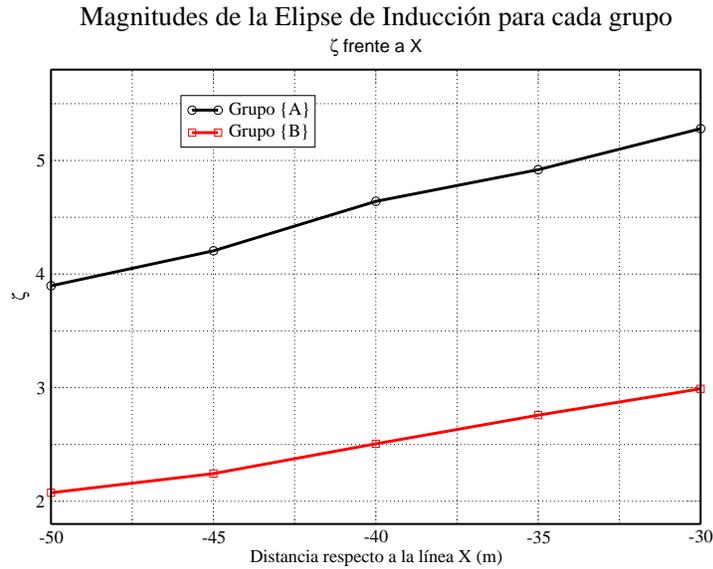


Figura 8.11: Representación gráfica de ζ para diferentes puntos y grupos.

De tal forma, se puede pensar en usar un parámetro correlado del tipo

$$\zeta = \lambda \cdot \frac{B_M}{\sqrt{X^2}}$$

donde λ es una constante numérica cuyo valor se determinará, y X será el indicativo del punto de medición, donde se encuentran los sensores del medidor de flujo. El objeto de usar la variable X elevada al cuadrado y después aplicarle la raíz cuadrada es simplemente el de conseguir un valor de ζ positivo, puesto que se tratarán valores de X negativos.

En la figura 8.11 se comprueba que tras la correlación se tienen curvas, bastante planas, que para los grupos $\{A\}$ y $\{B\}$ no se solapan en rango, con lo cual, ζ puede resultar útil para seleccionar entre estos dos grupos.

En la figura 8.12 se muestra el organigrama correspondiente al proceso de selección de grupo. Se comprueba cómo partiendo de las señales de medida e_x y e_y éstas son tratadas para convertirlas las señales B_x y B_y que serán con las que se trabaje. Se comprueba el sentido de giro u orientación de la elipse de inducción que se mide. En caso de ser éste levógiro, automáticamente se tendrá el grupo en que se engloba el caso en consideración, que no podrá ser otro que el $\{C\}$. En caso de que el sentido de giro sea dextrógiro, se procederá al cálculo del parámetro ζ , y se comparará su valor con R_{mB} que será el límite

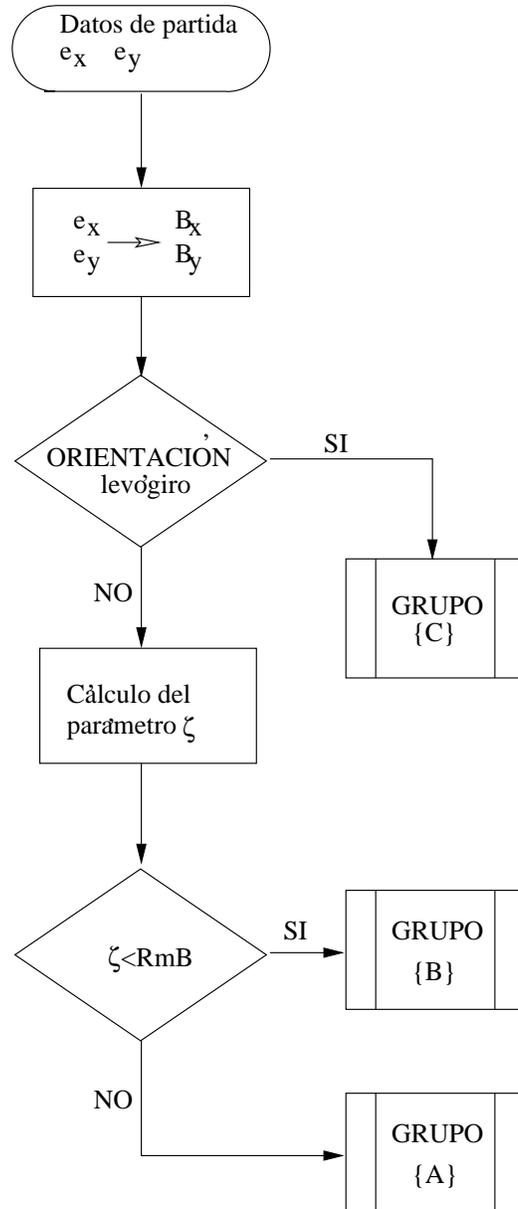


Figura 8.12: Organigrama correspondiente al proceso de selección de grupo.

superior del rango de variación de ζ para las elipses del grupo $\{B\}$ (figura 8.11). En el caso de que ζ sea inferior a este valor, el grupo correspondiente será el $\{B\}$. Si por el contrario, ζ supera a este valor, el grupo habrá de ser el $\{A\}$.

8.4. Adimensionalización de los parámetros de selección respecto de las corrientes de línea.

La principal ventaja que presenta el criterio de selección de grupo del apartado 8.3.1 es que basta disponer de dos parámetros para completar satisfactoriamente dicho proceso: R_{mB} y X . El resto de datos implicados en los cálculos procederán de las propias mediciones efectuadas por el medidor de flujo.

No obstante, el análisis anterior presenta la inevitable desventaja de que es válido únicamente para situaciones en las que la corriente de la línea sea de 200 A, que es para la cual han sido obtenidas las curvas 8.8, 8.9 y 8.10.

De las expresiones empleadas para el cálculo de las elipses de inducción, 8.1, 8.2, 8.4 y 8.5 se extrae que las magnitudes obtenidas con ellas, correspondientes a dichas elipses de inducción, son *directamente proporcionales* al módulo de la corriente de la línea, I_{irms} , siempre que se considere que por cada uno de los seis conductores de la línea circule la misma corriente.

De tal forma, un proceso de adimensionalización que permitirá, además de establecer el grupo al que pertenece la combinación de secuencias de fase, conocer la corriente circulante en cada instante por la línea es el que se describirá a continuación.

X será un dato que se introducirá al medidor de flujo. Una vez conocidos los valores de B_x y B_y calculados a partir de e_x y e_y , mediante 2.28 y 2.29 se obtendrán los valores correspondientes a los semiejes mayor y menor de la elipse de inducción en curso.

Las magnitudes que se ven afectadas por el proceso de adimensionalización son los valores de semieje mayor y menor de la elipse, B_M y B_m , puesto que el cociente entre ambos no se verá afectado. De tal forma, denominando B_{M_a} y B_{m_a} a los valores adimensionales correspondientes a los semiejes, se tendrán las relaciones:

$$B_{M_a} = \frac{B_M}{264}$$

$$B_{m_a} = \frac{B_m}{264}$$

Los valores que se obtienen para B_{M_a} y B_{m_a} en función de la distancia a la línea y para cada grupo de combinaciones de secuencias de fase son los que se recogen en la tabla 8.5.

Tabla 8.5: Adimensionalización de los Semiejes de la elipse.

| X | <i>Semieje mayor B_{M_a} (p.u.)</i> | | | <i>Semieje menor B_{m_a} (p.u.)</i> | | |
|-----|--|--------|--------|--|--------|--------|
| | G {A} | G {B} | G {C} | G {A} | G {B} | G {C} |
| -30 | 0,0447 | 0,0253 | 0,0277 | 0,0043 | 0,0034 | 0,0091 |
| -31 | 0,0426 | 0,0240 | 0,0263 | 0,0041 | 0,0031 | 0,0085 |
| -32 | 0,0407 | 0,0228 | 0,0249 | 0,0039 | 0,0028 | 0,0079 |
| -33 | 0,0388 | 0,0217 | 0,0236 | 0,0037 | 0,0025 | 0,0073 |
| -34 | 0,0372 | 0,0207 | 0,0224 | 0,0035 | 0,0023 | 0,0068 |
| -35 | 0,0355 | 0,0197 | 0,0213 | 0,0034 | 0,0021 | 0,0063 |
| -36 | 0,0340 | 0,0188 | 0,0203 | 0,0032 | 0,0019 | 0,0059 |
| -37 | 0,0326 | 0,0180 | 0,0193 | 0,0030 | 0,0017 | 0,0055 |
| -38 | 0,0312 | 0,0172 | 0,0184 | 0,0029 | 0,0016 | 0,0051 |
| -39 | 0,0299 | 0,0164 | 0,0175 | 0,0027 | 0,0014 | 0,0048 |
| -40 | 0,0287 | 0,0157 | 0,0167 | 0,0026 | 0,0014 | 0,0044 |
| -41 | 0,0275 | 0,0151 | 0,0160 | 0,0025 | 0,0012 | 0,0042 |
| -42 | 0,0265 | 0,0144 | 0,0153 | 0,0023 | 0,0011 | 0,0039 |
| -43 | 0,0255 | 0,0138 | 0,0146 | 0,0022 | 0,0010 | 0,0036 |
| -44 | 0,0245 | 0,0133 | 0,0140 | 0,0021 | 0,0009 | 0,0034 |
| -45 | 0,0236 | 0,0128 | 0,0134 | 0,0020 | 0,0008 | 0,0032 |
| -46 | 0,0227 | 0,0123 | 0,0129 | 0,0019 | 0,0008 | 0,0030 |
| -47 | 0,0219 | 0,0118 | 0,0124 | 0,0018 | 0,0007 | 0,0028 |
| -48 | 0,0211 | 0,0114 | 0,0119 | 0,0017 | 0,0006 | 0,0027 |
| -49 | 0,0196 | 0,0110 | 0,0114 | 0,0016 | 0,0006 | 0,0025 |

8.4.1. Correlación polinómica para aproximación de las curvas de los semiejes de la elipse.

Se pretende encontrar una expresión tal que, conocida la distancia a la que se encuentra el medidor de flujo de la línea eléctrica, sea capaz de proporcionar los valores de B_{M_a} y B_{m_a} que se tienen en dicho punto. Para ello, se aproximarán las curvas que definen los puntos recogidos en la tabla 8.5 por un polinomio de tercer grado tal como el que se escribe en la expresión 8.12 y 8.13, para la modelación de los resultados que arrojan el valor del semieje mayor y menor respectivamente.

$$B_{M_a}^{G\{i\}} = a_M^{G\{i\}} \cdot x^3 + b_M^{G\{i\}} \cdot x^2 + c_M^{G\{i\}} \cdot x + d_M^{G\{i\}} \tag{8.12}$$

$$B_{m_a}^{G\{i\}} = a_m^{G\{i\}} \cdot x^3 + b_m^{G\{i\}} \cdot x^2 + c_m^{G\{i\}} \cdot x + d_m^{G\{i\}} \tag{8.13}$$

siendo x el valor que representa la distancia entre el sensor y la línea eléctrica: $x = \sqrt{X^2}$. En la tabla 8.6 se recogen los valores correspondientes a los parámetros a , b , c y d en función del grupo al que pertenezca la elipse de inducción, así como del semieje que se desee calcular.

Tabla 8.6: Valores de los parámetros de correlación.

| | <i>Semieje mayor</i> | | | <i>Semieje menor</i> | | |
|-------------|---|-------------------------|-------------------------|---|------------------------|--------------------------|
| | $B_{M_a} = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$ | | | $B_{m_a} = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$ | | |
| <i>Par.</i> | G {A} | G {B} | G {C} | G {A} | G {B} | G {C} |
| a | -0.85×10^{-6} | -0.656×10^{-6} | -0.81×10^{-6} | -0.193×10^{-6} | -0.9×10^{-6} | -0.4455×10^{-6} |
| b | 0.136×10^{-3} | 0.995×10^{-4} | 0.1223×10^{-3} | 0.596×10^{-5} | 0.109×10^{-3} | 0.66×10^{-3} |
| c | -0.793×10^{-2} | -0.00549 | -0.666×10^{-2} | -0.52×10^{-3} | -0.0045 | -0.0034 |
| d | 0.1835 | 0.11813 | 0.1394 | 0.01511 | 0.0647 | 0.0647 |

Los parámetros han sido obtenidos obligando a los polinomios a pasar por los puntos con abcisa $x = 30$, $x = 35$, $x = 40$ y $x = 45$, de forma que en dichas situaciones, el error cometido será nulo. Sin embargo, para el resto de puntos comprendidos entre $x = 30$ y $x = 50$, los errores serán los que se muestran en las figuras 8.13 y 8.14.

Se puede comprobar que los errores que se cometen como consecuencia del uso de estas correlaciones en el caso del cálculo de los valores del semieje mayor son muy pequeños, resultando ser éste un buen método de operación.

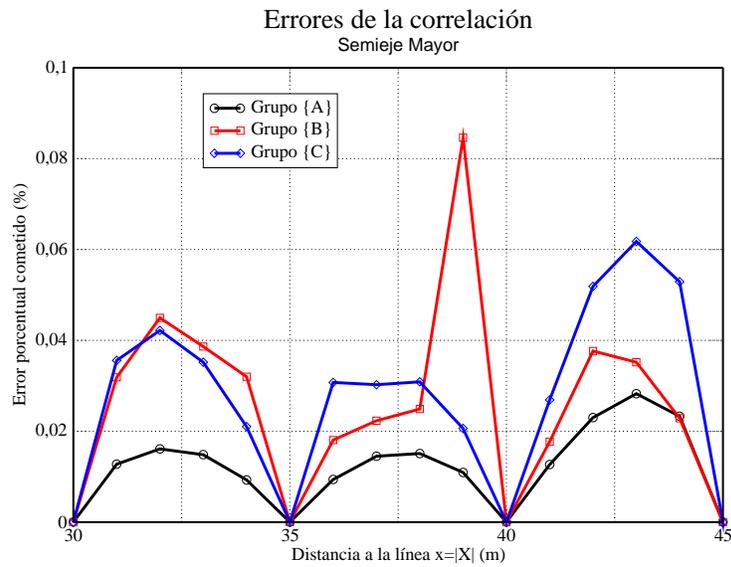


Figura 8.13: Errores cometidos por el uso de la correlación para el cálculo del semeje mayor.

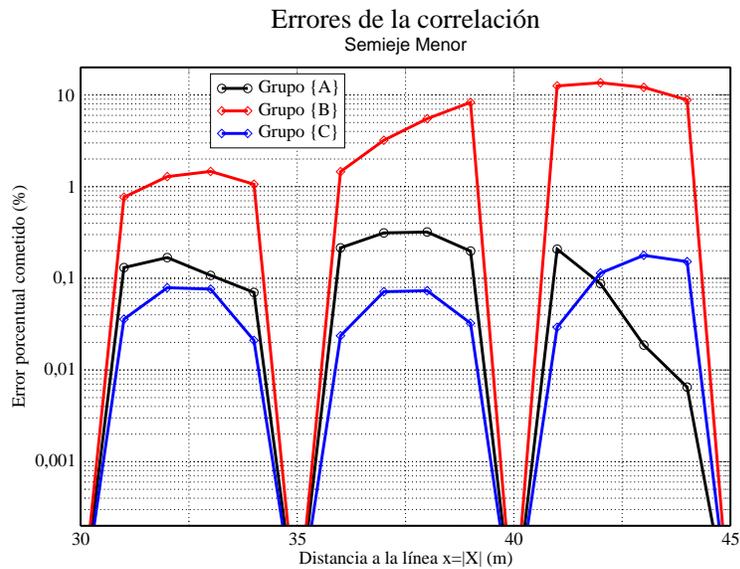


Figura 8.14: Errores cometidos por el uso de la correlación para el cálculo del semeje menor.

Sin embargo, a la hora de proceder con el cálculo de los semiejes menores, para los Grupos $\{A\}$ y $\{B\}$ no se obtienen errores muy elevados tampoco, pero para los del Grupo $\{C\}$ éstos pueden alcanzar valores próximos al 15 %, que, si bien se pueden admitir como válidos, no dejan de ser relativamente elevados. Éste es el motivo de que se haya empleado la escala logarítmica como base para la representación de este último grupo de errores (figura 8.14), puesto que la diferencia en la magnitud de éstos es muy elevada del caso del Grupo $\{C\}$ al resto.

8.4.2. Reducción del número de parámetros implicados en la correlación.

Como se deduce de la inspección de la tabla 8.6, para establecer las correlaciones que proporcionen los valores de B_M y B_m bajo cualquier situación es necesario el conocimiento de 24 parámetros (a , b , c y d para cada uno de los grupos y semiejes). En el presente epígrafe se intentará reducir este número con la finalidad de establecer correlaciones lo más sencillas posibles sin detrimento de los resultados que con éstas se obtengan.

Para conseguir este objetivo, se plantea la siguiente solución: de la inspección de la figura 8.8 se extrae como conclusión que las curvas que describen los valores de B_{M_a} en función de la distancia a la línea eléctrica presentan pendientes bastante similares para los tres diferentes grupos. Ésto hace pensar que, una vez obtenidos los cuatro parámetros que caracterizan a la correlación de una de las curvas, los del resto pueden obtenerse mediante la multiplicación de un coeficiente que será único para cada grupo.

Así, el proceso de reducción de parámetros comenzará por obtener un valor significativo de la diferencia existente entre dos de las curvas. De tal forma, se obtendrá una media de los cocientes entre $B_{M_a}^{G\{A\}}$ y $B_{M_a}^{G\{B\}}$, obteniendo como valor de tal media 1,8191. Ésto quiere decir, que bajo las premisas anteriormente comentadas, se considerará que la curva que determina $B_{M_a}^{G\{A\}}$ es 1,8191 veces mayor que $B_{M_a}^{G\{B\}}$.

Procediendo de forma análoga para el resto de las curvas, así como para las curvas que determinan los valores del semieje menor, se obtienen los resultados que se recogen en la tabla 8.7.

Tabla 8.7: Tabla con los parámetros que relacionan los valores del Grupo {A} con los del resto.

| | Semieje mayor | | | Semieje menor | | |
|----------------|---------------|--------|--------|---------------|---------|--------|
| | G {A} | G {B} | G {C} | G {A} | G {B} | G {C} |
| K_c | | 1,8191 | 1,7035 | | 1,96 | 0,5694 |
| ϵ (%) | | 1,3066 | 2,4825 | | 20,0433 | 7,8801 |

En la tabla 8.7 se han recogido los parámetros que relacionan $B_{M_a}^{G\{A\}}$ y $B_{m_a}^{G\{A\}}$ con las curvas correspondientes al resto de los grupos. K_c representa el factor de proporcionalidad existente entre unas y otras curvas. Se comprueba que para los cálculos de los semiejes mayores los errores cometidos al efectuar estas aproximaciones son bastante reducidos. Ésto no se puede decir de los errores en que se incurre al aproximar las curvas para calcular los semiejes menores mediante este procedimiento.

De tal forma, se concluye que este método es viable únicamente para el cálculo de los valores de B_{M_a} ², mientras que para las correlaciones que aportan los valores de los semiejes menores estas aproximaciones no son válidas.

De tal forma, mediante este procedimiento se ha conseguido reducir el número de parámetros de 24 a 18. En principio, no se van a analizar otras aproximaciones que consigan reducir este número, sino que se trabajará con las correlaciones consecuentes de las aproximaciones realizadas hasta este punto³.

Las expresiones definitivas de las correlaciones, en función de estos 18 parámetros serán las que se recogen desde 8.14 hasta 8.19.

$$B_{M_a}^{G\{A\}} = a_M^{G\{A\}} \cdot x^3 + b_M^{G\{A\}} \cdot x^2 + c_M^{G\{A\}} \cdot x + d_M^{G\{A\}} \quad (8.14)$$

$$B_{M_a}^{G\{B\}} = K_c^{G\{B\}} \cdot \left(a_M^{G\{A\}} \cdot x^3 + b_M^{G\{A\}} \cdot x^2 + c_M^{G\{A\}} \cdot x + d_M^{G\{A\}} \right) \quad (8.15)$$

²Téngase en cuenta que los parámetros recogidos en la tabla 8.7 son los que se obtienen como consecuencia de relacionar los valores del grupo {A} con los del resto. Sin embargo, se podría realizar el mismo proceso relacionando los valores de cualquier otro grupo tomándolo a éste como referencia. Sin embargo, los resultados cualitativos se mantendrán en todos estos casos en las mismas condiciones, con lo que las conclusiones son válidas tanto para unos como para otros.

³se darán por válidas las correlaciones que se obtengan en este epígrafe para cualquier posición en la que se coloque el medidor de flujo dentro de distancias a la línea comprendidas entre 30 y 50 metros

$$B_{M_a}^{G\{C\}} = K_c^{G\{C\}} \cdot \left(a_M^{G\{A\}} \cdot x^3 + b_M^{G\{A\}} \cdot x^2 + c_M^{G\{A\}} \cdot x + d_M^{G\{A\}} \right) \quad (8.16)$$

$$B_{m_a}^{G\{A\}} = a_m^{G\{A\}} \cdot x^3 + b_m^{G\{A\}} \cdot x^2 + c_m^{G\{A\}} \cdot x + d_m^{G\{A\}} \quad (8.17)$$

$$B_{m_a}^{G\{B\}} = a_m^{G\{B\}} \cdot x^3 + b_m^{G\{B\}} \cdot x^2 + c_m^{G\{B\}} \cdot x + d_m^{G\{B\}} \quad (8.18)$$

$$B_{m_a}^{G\{C\}} = a_m^{G\{C\}} \cdot x^3 + b_m^{G\{C\}} \cdot x^2 + c_m^{G\{C\}} \cdot x + d_m^{G\{C\}} \quad (8.19)$$

8.5. *Uso y aplicación de las correlaciones.*

En el epígrafe 8.4 se estudió la forma de adimensionalizar el problema de la medición del campo magnético con la finalidad de así poder obtener también a partir de dicha medición el valor de la corriente de línea circulante por la red eléctrica. Con estos conocimientos, será posible establecer una rutina de programación adecuada para la tarjeta DSP tal que, partiendo de las magnitudes de salida del medidor de flujo, de forma rápida y sencilla se obtenga el valor del campo magnético, así como de la corriente que habrá que inyectar al lazo con la finalidad de que ésta sirva como “corriente de referencia” a la hora de generar los pulsos de disparo del inversor en la alimentación del lazo. La utilidad de todo esto, pues, se hará más clara a la hora de introducir el diseño del inversor, así como la conexión del mismo a la tarjeta DSP en el capítulo 9.

8.6. *Estudio de las posibilidades de correlación de las magnitudes medidas en un punto respecto a otro.*

La ubicación idónea del medidor de flujo es justamente aquella en la que se desea obtener la reducción del campo magnético, ya que es la que aporta los valores más directos y fieles del mismo. No obstante, teniendo en cuenta que dicho punto en el caso concreto que se estudia en el actual proyecto se encuentra en el interior del edificio en consideración, éste se encontrará sometido a los efectos de los Campos Magnéticos producidos además de por la línea eléctrica, por los generados por la propia instalación de baja de que conste el edificio. De tal forma, las mediciones que se efectuen en tal situación, pueden verse falseadas por este hecho, con lo cual surge la necesidad de estudio de la posibilidad de ubicar el medidor de flujo en otra posición diferente al punto en que se desea conocer el campo, y obtener una correlación que relacione las

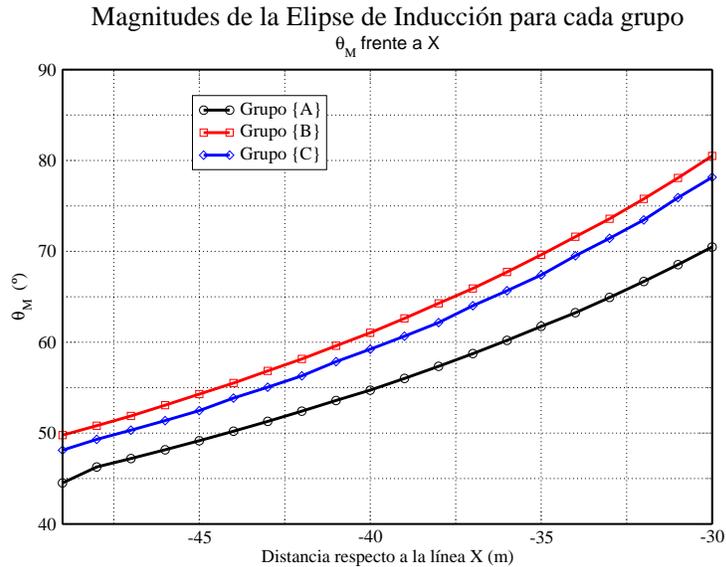


Figura 8.15: Representación gráfica de θ_M para diferentes puntos y grupos.

magnitudes medidas en esta nueva situación con las que se darán en la ubicación deseada. Esto es, a partir de los valores medidos en un punto diferente al de medida, conocer los valores que se darán en el *punto de medida*.

Un fenómeno que diferencia formalmente (sin tener en cuenta por el momento las magnitudes de las mismas) a las elipses de inducción correspondientes a puntos ubicados a diferentes valores de abscisa X , es el que se describirá a continuación. Ésto permitirá encontrar una relación entre las magnitudes de la elipse para una y otra posición.

El comportamiento de las elipses de inducción conforme crece la distancia a la línea es tal que las componentes real e imaginaria del campo magnético tienden al eje horizontal (como deduce y desarrolla [1]), razón por la cual la elipse de inducción presenta variaciones en el ángulo que forma el semieje mayor con la horizontal θ_M , que tienden a hacer disminuir este valor. Además, la forma de la elipse sufre transformaciones de alargamiento, siendo cada vez mayor la relación entre el semieje mayor y el menor. Esto último se explica a partir de las expresiones de los semiejes mayor y menor 2.28 y 2.29 respectivamente, donde se observa que si $\text{Re}[\vec{B}]$ e $\text{Im}[\vec{B}]$ son paralelos, entonces $B_m = 0$.

Esta evolución se puede observar claramente en la representación gráfica de la figura 8.15 en la que se traza el ángulo que forma el semieje mayor de la elipse, θ_M , frente a la distancia a la línea.

Téngase en cuenta que, con los criterios establecidos en la sección 8.3.1, conocida la posición en que se encuentra el medidor de flujo, X , es posible obtener el grupo a que pertenece la combinación de secuencias de fase: no se necesita más dato que el de R_{m_B} , válido como se vio para un rango de distancias línea-sensor amplio, y los valores medidos por el propio sensor para llegar a dicha selección.

8.7. Conclusiones.

En definitiva, todo lo analizado en el presente capítulo se corresponde con la necesidad de procesar las señales del medidor de flujo, traducirlas a términos de campo magnético, y analizar en función de sus valores, en qué situación o régimen de funcionamiento se encuentra funcionando la línea eléctrica (comprobar a qué grupo pertenece en cada instante el régimen de funcionamiento). De tal forma, conocido el régimen de funcionamiento y el campo magnético, se tendrá el valor de la corriente de la línea en cada instante, que será la magnitud que permitirá obtener la corriente que habrá que inyectar al lazo de corriente, y que será utilizada como parámetro comparativo de suma importancia por parte del procesador digital de señales, a la hora de generar éste los pulsos de disparo del inversor para adaptar las corrientes del lazo a dichos valores.

Capítulo 9

CÁLCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN Y CONTROL DEL LAZO.

En este capítulo se diseñará y calculará todo el módulo correspondiente a la alimentación del lazo de corriente y al control y regulación de la misma. Se calculará el número de paneles fotovoltaicos necesarios para suplir la demanda de potencia, así como las características y dimensiones del acumulador de energía.

9.1. Introducción. Modelo básico de alimentación y regulación.

En lo referente al sistema de control y regulación del lazo de control, hasta ahora se han estudiado y analizado los modelos matemáticos que proporcionarán en cada instante los valores referencia a partir de las mediciones efectuadas. En el presente capítulo, se analizará y diseñará la implementación física correspondiente al sistema que llevará a cabo esta tarea.

En la figura 9.1 se presenta un diagrama de bloques con los equipos que constituirán este módulo, así como la interconexión y la disposición relativa de los mismos. La interpretación de los elementos que en el diagrama se muestra es la siguiente: en primer lugar, los paneles fotovoltaicos serán los encargados de generar la potencia destinada a la alimentación del lazo. Mediante el regulador se controlará la carga de la batería de acumuladores, que a su vez permitirá la

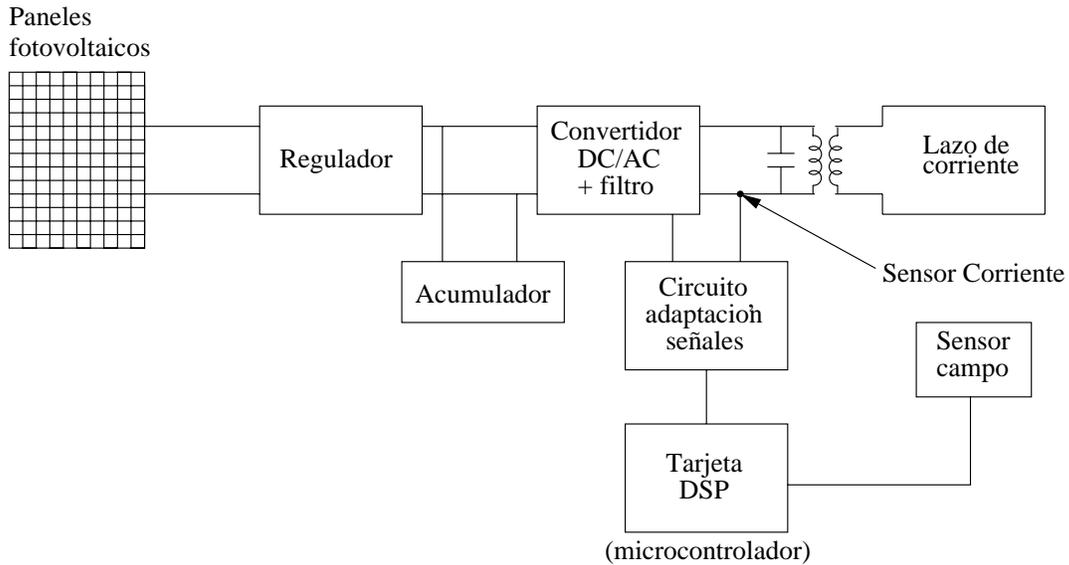


Figura 9.1: Diagrama de bloques del módulo de alimentación y control del lazo de corriente.

alimentación al lazo en ausencia de radiación solar. El convertidor DC/AC proporcionará una salida alterna partiendo de la entrada continua procedente de los paneles fotovoltaicos (o batería de acumuladores en su caso). El sensor de corriente será el elemento decisivo para establecer un bucle cerrado en el control de la corriente inyectada (véase la figura 8.1 en el capítulo 8), y junto con el sensor de campo, transmitirán las medidas obtenidas al bloque compuesto por el circuito de adaptación de señales y la tarjeta DSP (microcontrolador). La tarjeta DSP (microcontrolador) será la encargada del conveniente procesamiento de las señales transmitidas por los sensores, y generará en virtud de los mismos los patrones de disparo del inversor, de modo que se consiga la adecuada modulación de la corriente que se inyectará al lazo. Mediante el uso de una batería de condensadores se compensará la potencia reactiva consumida por el lazo de corriente, y para llevar a cabo los ajustes de tensión en bornas del lazo, se usará un transformador monofásico.

De tal forma, el objetivo del presente capítulo será establecer los cálculos y el diseño completo de cada uno de los equipos enumerados.

En los cálculos realizados en este capítulo, se hace uso de algunas unidades poco usuales en disciplinas no relacionadas con la energía solar y sus instalaciones. Éstas quedan definidas con total claridad en la tabla D.1 (página 279,

sección D.1 del apéndice D).

9.2. Cálculo de la instalación solar fotovoltaica.

El primer paso para el diseño de la instalación solar fotovoltaica será elegir el tipo de módulos fotovoltaicos que se utilizarán en ella, establecer las características y tener en cuenta las especificaciones de los mismos.

9.2.1. Ubicación e inclinación de los módulos.

Para proceder con los cálculos correspondientes a los módulos fotovoltaicos, será imprescindible disponer de los datos precisos de ubicación de la instalación, puesto los valores de radiación solar en función de la época del año serán diferentes según se encuentre la instalación situada en una u otra zona geográfica.

El rendimiento de un panel fotovoltaico suele estar sobre el 20% de la radiación incidente sobre él, motivo por el cual se hace imprescindible la necesidad de aprovechar en la medida de lo posible dicha radiación. Para ello, se definirá el ángulo de inclinación de los paneles. La orientación del panel también juega un importante papel en dicho aprovechamiento. En la mayoría de los casos en España la orientación e inclinación óptimas son **orientación Sur** e **inclinación de 30°**. Éste es el resultado que se obtiene para el caso concreto que se trata en el presente proyecto. Se comprueba que del balance anual, el valor del ángulo de inclinación que permite mejor aprovechamiento de la radiación solar (apartado D.2) es justamente éste: 30°.

9.2.2. Cálculo de la instalación solar fotovoltaica.

Como se concluyó en la sección 9.2.1, se dispondrá de una radiación media anual de 17507,83 Kj/m².

Se considerará que el funcionamiento del lazo de corriente, por la necesidad de obtener niveles de mitigación continuos en núcleos habitados durante todo el día, habrá de ser continuo las 24 horas del mismo. De tal forma, habrá de suplirse un consumo máximo de aproximadamente 121 W, durante 24 horas, a una tensión nominal de 24 Voltios.

- Consumo medio de energía diaria.

$$40 \text{ W} \times 24 \text{ h/día} = 960 \text{ Wh/día}$$

- Consumo diario. Puesto que la tensión nominal es de 24 voltios, el consumo diario en Ah se calcula como sigue:

$$\frac{2904 \text{ Wh/día}}{24} = 40 \text{ Ah/día}$$

- Radiación disponible expresada en h.s.p. (hora de sol pico).

$$17507,83 \text{ kJ/m}^2 \times 0,024 = 420 \text{ Langleys}$$

$$420 \text{ Langley} \times 0,0116 = 4,872 \text{ h.s.p.}$$

- Generación media diaria soportada por un panel. Puesto que la corriente de un panel solar tipo BP-250 en el punto de máxima potencia es de 2.94 A, se tiene que cada panel fotovoltaico generará diariamente:

$$4,872 \text{ h.s.p.} \times 2,94 \text{ A} = 14,3237 \text{ Ah/día}$$

- Número de paneles fotovoltaicos paralelo¹.

$$\begin{aligned} N_{\text{paneles}} &= \frac{\text{Consumo diario}}{\text{Generación 1 panel}} = \frac{40 \text{ Ah/día}}{14,3237 \text{ Ah/día}} \\ &\approx 3 \text{ paneles} \end{aligned}$$

- Cálculo de la capacidad de las baterías. El *Tiempo de autonomía de la central* es el tiempo que se puede estar entregando energía sin tener radiación solar. Para el presente proyecto, se tomará como tiempo de autonomía de la central *15 días* (se adopta un valor elevado teniendo en cuenta que el lazo habrá de funcionar en las horas de noche en las cuales no hay radiación solar incidente en los paneles fotovoltaicos), y se

¹Puesto que el número de paneles fotovoltaicos ha sido aproximado por encima, éste queda ligeramente sobredimensionado, de forma que se cubren también las pérdidas correspondientes al cableado intermedio entre instalación solar y alimentación del lazo de corriente propiamente dicha.

establecerá la descarga final de la batería en un 40%. Con ello, se tiene que la capacidad de la batería será:

$$\begin{aligned} \text{Capacidad}_{BATERÍA} &= \frac{\text{Consumo} \times \text{Días Autonomía}}{\text{Profundidad descarga}} = \\ &= \frac{14,3237 \text{ Ah/día} \times 15 \text{ días}}{0,4} \approx 537 \text{ Ah} \end{aligned}$$

- Cálculo del cargador de baterías. La capacidad de las baterías indica el tipo de cargador que se debe utilizar así como su capacidad de carga, siendo esta capacidad similar a la calculada para la batería si se tarda unas 10 horas en volver a cargar totalmente las baterías (se recarga a una décima parte de la capacidad total de la batería). Éste es el caso más común, ya que normalmente la central genera más de 10 horas consecutivas de energía.
- Dimensionado del convertidor continua-alterna (inversor). Se calcula para el peor caso, es decir, para el caso en que se tenga el límite de máxima potencia. Viene expresado por:

$$P_{INVERSOR} = P_{CARGA} + \text{Pérdidas} = P_{ENTRADA} \times \eta$$

siendo η el rendimiento. Este punto se estudiará con mucho mayor detalle en este mismo capítulo, en la sección 9.3.

- Cálculo de la sección del conductor. Debido a que se trabaja con tensiones de bajo valor (24 V en este caso), las corrientes que se tendrán serán bastante elevadas, de modo que el correcto dimensionamiento de los conductores constituye un importante factor dentro del cálculo de la instalación solar fotovoltaica.

Partiendo de la expresión $R = \rho \cdot \frac{L}{S}$ que define la resistencia eléctrica R en función de la resistividad ρ ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$), la longitud L (m) y la Sección S (mm^2) del conductor, y aplicando la conocida Ley de Ohm, se tiene que:

$$R = \frac{\Delta V_{AB}}{I}$$

donde ΔV_{AB} es la caída de tensión en el cableado, I la corriente que circula por él.

Combinando estas expresiones, y considerando conductor de cobre cuya resistividad es $\rho = 0,01786 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, se tendrá que la sección del cable es:

$$S = \frac{2 \cdot L \cdot I}{56 \cdot \Delta V_{AB}}$$

donde el 2 se debe a la ida y vuelta del cableado. Considerando la longitud hasta las baterías y el sistema de regulación de aproximadamente 20 metros, la sección de conductor que limita en el caso más desfavorable la caída de tensión a 0.5 Voltios será:

$$S_{TOTAL} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 40}{56 \cdot 0,5} \approx 57,14 \text{ } \text{mm}^2$$

9.3. Inversor DC-AC.

Debido a los requisitos de potencia deseados (bajos, debido a que la única carga que se alimentará es el lazo de corriente en sí –y la batería de condensadores–), así como las condiciones de funcionamiento del inversor que se precisa para la alimentación al lazo de corriente, se presenta el problema de que no existen en el mercado modelos de inversores que se ajusten a las características técnicas de 24 V de tensión de entrada (continua) y 220 V de tensión de salida (alterna) y potencia nominal de 80 W, que además admita control de disparo mediante una tarjeta DSP. De tal forma, se hace necesario el diseño físico y estructural del inversor, a efectos de suplir tal carencia con un modelo propio.

En la figura 9.2 se muestra un esquema muy básico y general de un inversor monofásico. En él, la señal $V_c(t)$ representa la señal de control; $V_t(t)$ es una señal triangular (necesaria para el control escalar del inversor, como se verá más adelante), y $q_A(t)$ y $q_B(t)$ son las funciones de las señales de disparo, que serán las encargadas de bloquear y desbloquear las diferentes ramas del inversor para adaptar la tensión de entrada a la de salida.

Lo primero que habrá que decidir es el tipo de modulación que se utilizará para controlar los disparos del inversor. Se decide el empleo de modulación por anchura de pulsos senoidal (SPWM), puesto que representa una alternativa de diseño relativamente sencillo, y efectividad elevada.

Se introducirá brevemente esta técnica de modulación y se realizará la aplicación al caso concreto que se estudia.

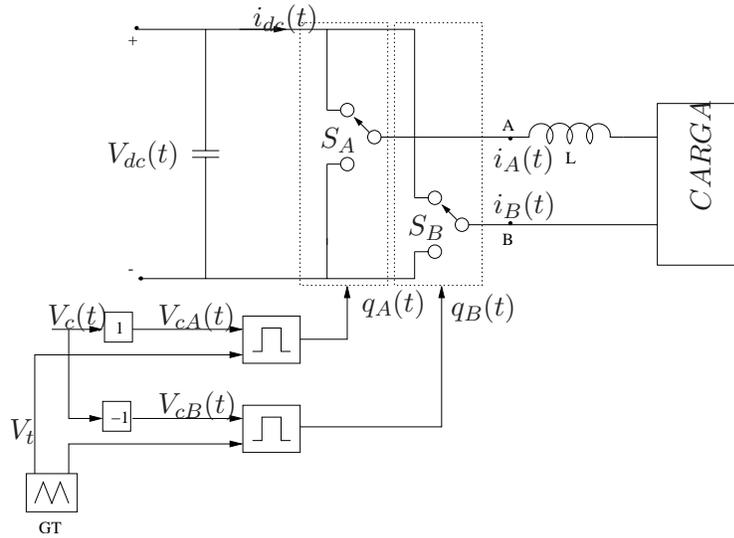


Figura 9.2: Esquema básico de un inversor DC-AC.

En la modulación SPWM el control de la tensión de salida se efectúa mediante la variación del ancho de varios pulsos por semiperiodo con una separación variable entre los pulsos. En un inversor monofásico se obtienen las señales de control mediante la comparación de una señal senoidal que actúa como referencia ($V_c(t)$), cuya amplitud es \hat{V}_c , y su frecuencia es f_c , y una señal triangular $V_t(t)$ de amplitud \hat{V}_t y frecuencia f_t , la cual mantiene siempre constante su amplitud. El resultado de dicha comparación activará el circuito de excitación del inversor. La frecuencia de la señal de referencia es siempre constante y determina la frecuencia de la tensión de salida (en este caso, se desea obtener señales de frecuencia industrial, 50 Hz). La señal triangular será la que determine el número de pulsos de disparo por semiciclo.

Puesto que se desea obtener una tensión de salida de amplitud variable desde los 0 V hasta el valor máximo de 220 V, será necesario variar la amplitud de la señal de referencia $V_c(t)$, con lo que las anchuras de los pulsos de disparo se verán modificadas.

La modulación SPWM presenta menor distorsión que el resto de técnicas de sencilla aplicación en inversores de este tipo (modulación PWM, modulación por comparación trapezoidal, modulación por inyección de armónicos, etc). Además permite variar la tensión de salida sin que el contenido de armónicos cambie. El diseño del circuito de control, en contrapartida, es algo más com-

plejo y pueden aparecer pulsos de disparo de muy corta duración, lo que hace una fiabilidad en la realización práctica algo menor bajo estas situaciones. Sin embargo, puesto que para el sistema que se estudia se empleará para la generación de señales una tarjeta DSP, tal incremento de dificultad de diseño no será un factor de influencia.

9.3.1. Parámetros de la modulación SPWM.

Bajo este epígrafe se analizarán y determinarán los valores que habrán de asumir los diferentes parámetros y variables implicados en la modulación SPWM para obtener los niveles de tensión deseados a la salida del inversor.

Como se comentó en 9.3, en un inversor DC/AC mediante modulación SPWM, para obtener una señal de salida senoidal de la frecuencia que se desee, es necesario realizar la comparación de dos señales:

- Una señal del control, V_c , de tipo senoidal, de frecuencia f_c igual a la frecuencia armónica fundamental ($n = 1$) que se desea obtener a la salida del inversor. La señal senoidal se utiliza para variar el ciclo de trabajo de los interruptores.
- Una señal triangular, V_t , de frecuencia f_t superior a la de la de la senoidal, que es la que establecerá la frecuencia de conmutación ($f_t = f_s = \textit{switching frequency}$) de los semiconductores de potencia. La amplitud de la señal triangular es normalmente constante y de valor \hat{V}_t .

Para realizar el análisis del control PWM es necesario definir algunos parámetros. El índice de modulación de amplitud se designa por m_a y viene dado por:

$$m_a = \frac{\hat{V}_c}{\hat{V}_t}$$

El índice de modulación de frecuencia viene dado por m_f y su expresión es:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1}$$

donde f_s es la frecuencia de conmutación de los interruptores, que es de igual valor que la frecuencia de la señal triangular, y f_1 es la frecuencia de la señal senoidal de control y coincide con la componente armónica fundamental de la tensión de salida del inversor (de 50 Hz en este caso).

Al realizar la comparación entre la señal triangular y la señal senoidal de control se obtiene:

$$V_c < V_t \Rightarrow T1 \rightarrow \text{off} \quad \therefore \quad T2 \rightarrow \text{on} \Rightarrow v_{A0} = -\frac{V_{dc}}{2}$$

$$V_c > V_t \Rightarrow T1 \rightarrow \text{on} \quad \therefore \quad T2 \rightarrow \text{off} \Rightarrow v_{A0} = +\frac{V_{dc}}{2}$$

En la figura 9.3 se muestra gráficamente el proceso de comparación y generación de señales de control.

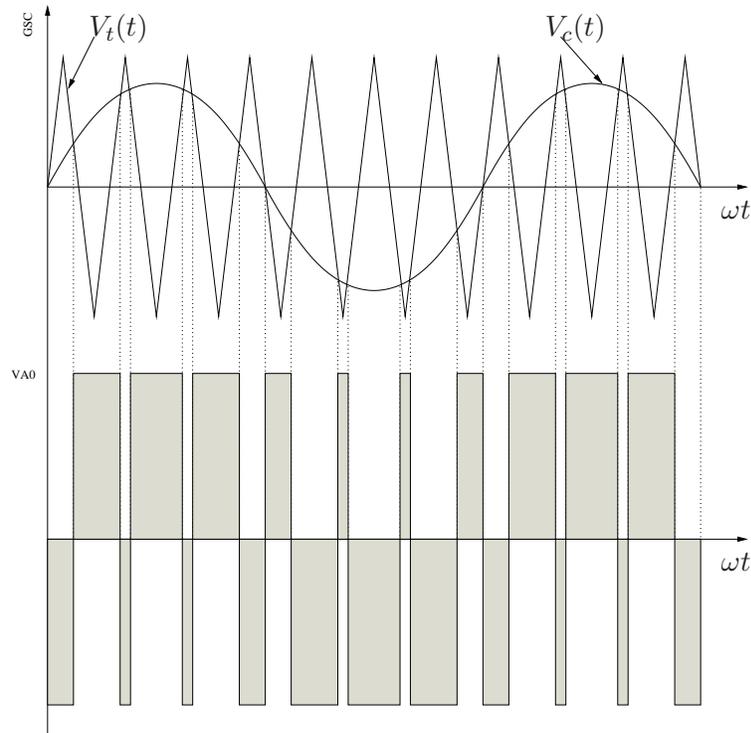


Figura 9.3: Proceso de generación de señales de control.

Dado que los interruptores conducen alternativamente, la tensión a la salida de la rama varía continuamente entre dos valores de continua: $+V_{dc}/2$ y $-V_{dc}/2$.

Realizando el análisis de Fourier de la tensión de Salida, V_{A0} se llega a las siguientes conclusiones:

- El valor de pico de la componente armónica fundamental vale $(\hat{V}_{A0})_1 = m_a \cdot \frac{1}{2}V_{dc}$.
- Los armónicos en la salida del inversor aparecen como bandas laterales centradas sobre la frecuencia de conmutación y sus múltiplos.
- El valor de m_f debe ser un entero impar de forma que la señal presente simetría impar, y además simetría de media onda, lo cual simplifica su análisis.

El hecho del primer punto, implica que el valor de la frecuencia de la señal triangular, f_s , sea muy superior a la frecuencia de la señal senoidal de control, f_1 . Ésto hace que el valor de m_f sea muy elevado.

Para calcular el valor medio en un ciclo de la tensión de salida se partirá de la ecuación de la señal triangular en la parte de pendiente positiva, que tiene las siguientes características:

- En $t = 0$ se inicia la pendiente positiva de la señal.
- En $t = T/4$ la tensión de la señal triangular es de 0 voltios.
- En $t = T/2$ la tensión de la señal triangular es la máxima y de valor \hat{V}_t .

Bajo estas premisas, se concluye que el valor medio de la tensión del ciclo de salida vale:

$$V_{A0} = \frac{V_c V_{dc}}{\hat{V}_t 2} \quad V_c \leq \hat{V}_t$$

De aquí se deduce que, para un valor dado de la tensión de continua V_{dc} , la tensión de salida media V_{A0} en un ciclo completo de conmutación de la rama ($T_s = 1/f_s$) depende sólo de de la relación entre la tensión de control y el valor máximo de la triangular. Si la tensión de control varía lentamente, entonces el valor de V_{A0} también cambia y coincide con el valor que tiene la componente armónica fundamental de $V_{A0}(t)$. Por ésto, la señal de control se elige de tipo senoidal y de la frecuencia deseada a la salida, para que a la salida aparezca una tensión senoidal de igual frecuencia acompañada de algunos armónicos.

El valor máximo o amplitud que alcanza la componente armónica fundamental es igual a

$$(\hat{V}_{A0})_1 = m_a \cdot \frac{V_{dc}}{2} \quad m_a \leq 1$$

En esta expresión se pone de manifiesto que la amplitud de la componente armónica fundamental de la tensión de salida depende linealmente del valor que tenga m_a , siempre que el valor de la modulación en amplitud sea inferior o igual a la unidad.

Cuando se cumple esta condición ($m_a \leq 1$), se observa que las componentes armónicas de la tensión de salida del inversor aparecen como bandas laterales centradas alrededor de la frecuencia de conmutación y múltiplos de m_f ($m_f, 2 \cdot m_f, 3 \cdot m_f, \dots$).

Para un índice de modulación de frecuencia $m_f \leq 9$, lo cual suele ser habitual para la mayoría de los casos (salvo para potencias muy elevadas, que no es la situación que se presenta), las amplitudes de los armónicos son casi independientes del valor de m_f , aunque a pesar de ello, m_f define la frecuencia en la que aparece. Teóricamente, las frecuencias a las cuales los armónicos pueden aparecer vienen indicadas por la expresión 9.1

$$f_n = (a \cdot m_f \pm b) \cdot f_1 \quad (9.1)$$

donde:

- f_1 es la frecuencia de la componente armónica fundamental.
- a y b son constantes (números enteros positivos).
- m_f es el índice de modulación de frecuencia.

El armónico de orden n correspondiente a la banda lateral de orden n de a veces el índice de modulación viene dado, por tanto, por:

$$n = a \cdot m_f \pm b$$

Para valores impares de a , las componentes armónicas existen sólo para valores pares de b . Para valores pares de a , las componentes armónicas existen sólo para valores impares de b .

Los valores de las amplitudes de los armónicos normalizadas $(\hat{V}_{A0})_n / \frac{1}{2}V_{dc}$ en función del índice de modulación de amplitud se encuentran tabulados en cualquier manual de electrónica de potencia ([9]).

Por otra parte, cuando para m_f se elige un entero impar, la señal de la tensión de salida presenta simetría impar ($f(-t) = -f(t)$) y además simetría de media onda ($f(t) = -f(t+1/2T_1)$). De tal modo, sólo los armónicos impares están presentes y los armónicos pares desaparecen de la tensión de salida $V_{A0}(t)$.

Además, sólo los coeficientes del tipo seno de la serie de Fourier son finitos, siendo los de tipo coseno igual a cero.

Para seleccionar la **frecuencia de conmutación** se debe tener en cuenta dos factores de importancia:

- La frecuencia de conmutación es conveniente que sea elevada, puesto que resulta más sencillo el filtrado de componentes armónicas de alta frecuencia.
- La frecuencia de conmutación ha de ser tal que la **potencia de conmutación** no se haga demasiado elevada. La expresión que proporciona el valor de dicha potencia es la 9.2:

$$P_{con} = \frac{1}{2} \cdot V_{m\acute{a}x} \cdot I_{m\acute{a}x} \cdot (t_{on} + t_{off}) \cdot f_s \quad (9.2)$$

siendo $V_{m\acute{a}x}$ la máxima tensión a la que conmuta el interruptor e $I_{m\acute{a}x}$ la corriente máxima que ha de cortar.

Se puede comprobar, dicho lo anterior, que la potencia perdida en las conmutaciones es proporcional a la frecuencia de conmutación.

Otra consideración que se debe tener en cuenta a la hora de elegir la frecuencia de conmutación es el ruido audible que puede generar el inversor. Éste es el motivo de que en el caso de trabajar con frecuencias de conmutación bajas, se suelen utilizar frecuencias inferiores a los 10 kHz. Si se opta por trabajar con frecuencias de conmutación elevadas, se eligen frecuencias superiores a los 20 kHz, que constituye el límite superior de las frecuencias audibles. Para un inversor que deba generar señales de frecuencia industrial, 50 Hz, estos límites de frecuencias definen también los límites del índice de modulación de frecuencia m_f , que podrá variar entre:

$$\begin{aligned} m_f < 40 & \quad f_s < 2\text{kHz} \\ m_f > 400 & \quad f_s > 20\text{kHz} \end{aligned}$$

Para valores pequeños de m_f , la señal triangular y la señal de control deberían in sincronizada una con la otra (recuérdese que m_f es un número entero), lo que se denomina *control PWM síncrono*. Ésto es debido a que el control PWM asíncrono, donde m_f no es un número entero, produce numerosos subarmónicos de la frecuencia fundamental que son indeseables en la mayoría de las aplicaciones. La utilización del modo PWM síncrono implica que la

frecuencia de la señal triangular varía con la frecuencia desada a la salida del inversor. Si además m_f es un número impar, se tiene la ventaja de que sólo los armónicos impares están presentes en la tensión de salida mientras que los armónicos pares desaparecen de la tesnión de salida.

Para valores altos de m_f , la utilización del modo PWM es más usual, ya que las amplitudes de los subarmónicos son pequeñas. El PWM asíncrono es habitual cuando se trabaja con una señal triangular de frecuencia fija y la frecuencia de la tensión de salida del inversor puede variar. Pero éste no es el caso que se trata en este proyecto.

En la figura 9.4 se muestran los armónicos que aparecen para un valor de $m_f = 25$ y valores de m_a pequeños (0.2) y grandes (1.0).

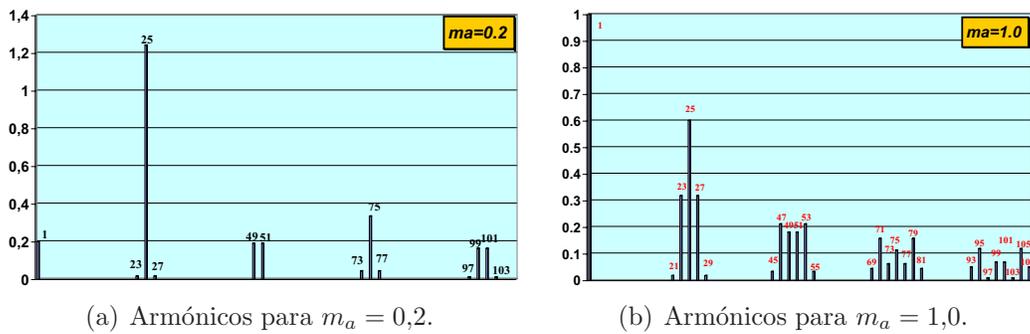


Figura 9.4: Armónicos para $m_f = 25$.

La evolución de las amplitudes de los primeros armónicos para m_a entre 0.2 y 1.0 y para $m_f = 25$ se pueden observar con mayor detalle en la figura

En todo el análisis anterior, se ha considerado que el índice de modulación de amplitud era inferior o igual a la unidad ($m_a \leq 1$), correspondiente a la denominada zona lineal del control PWM senoidal. En esta zona la amplitud de la componente fundamental obtenida a la salida del inversor es linealmente dependiente del valor de m_a (efecto lógico puesto que la amplitud señal triangular va a ser en cada momento mayor que el valor de la señal de control). La ventaja que presenta es que los armónicos aparecen a altas frecuencias alrededor de la frecuencia de conmutación y sus múltiplos. Un inconveniente que presenta trabajar en esta zona es que la amplitud de la componente armónica fundamental no es todo lo grande que se podría desear.

Para poder incrementar más la amplitud de la componente armónica fundamental en la tensión de salida, el valor de m_a debe superar el valor de la

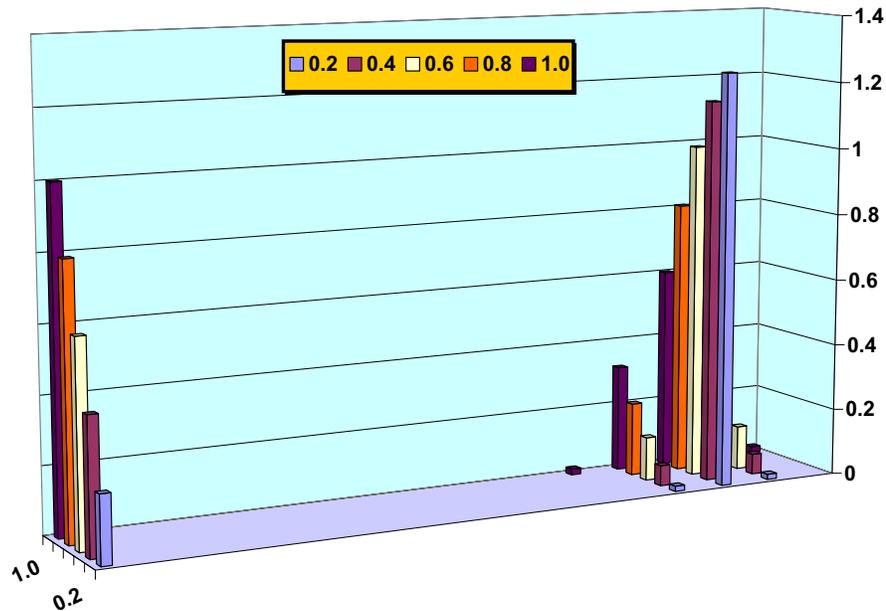


Figura 9.5: Evolución de la amplitud de los primeros armónicos para $m_f = 25$.

unidad, lo que se denomina **sobremodulación** ($m_a \geq 1$). Trabajar en la zona de sobremodulación provoca la aparición de más cantidad de armónicos en las bandas laterales que en el caso de trabajar en la zona lineal. Las componentes armónicas con amplitudes significativas cuando se trabaja en la zona lineal pueden no ser las más importantes al pasar a la zona de sobremodulación.

En la figura 9.6 se presenta la comparación existente entre las simulaciones del control SPWM para $m_a = 0,8$ y $m_a = 1,5$ (con sobremodulación).

También es importante tener presente que en la zona de sobremodulación la amplitud de la componente armónica fundamental no varía linealmente con el índice de modulación de amplitud m_a , sino que para valores muy altos del índice de modulación de amplitud la tensión a la salida del inversor degenera en una señal cuadrada, estableciendo así el límite de la zona de sobremodulación.

En la figura 9.7 se muestra una comparación entre los armónicos que aparecen en condiciones de modulación con y sin sobremodulación.

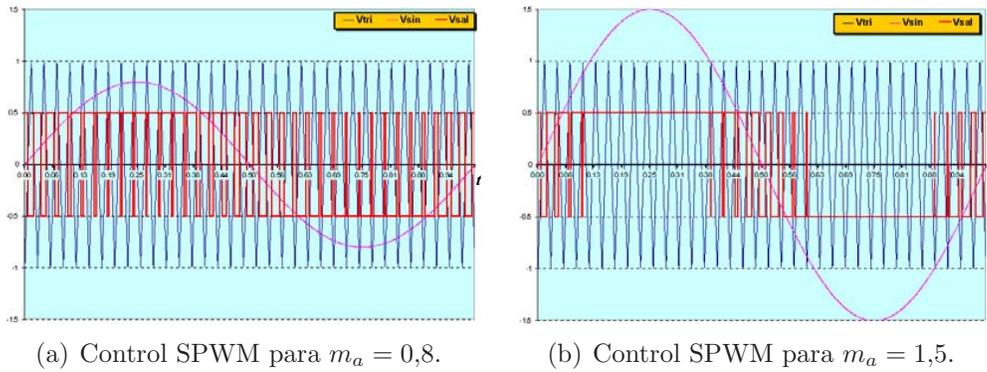


Figura 9.6: Control SPWM para $m_f = 35$.

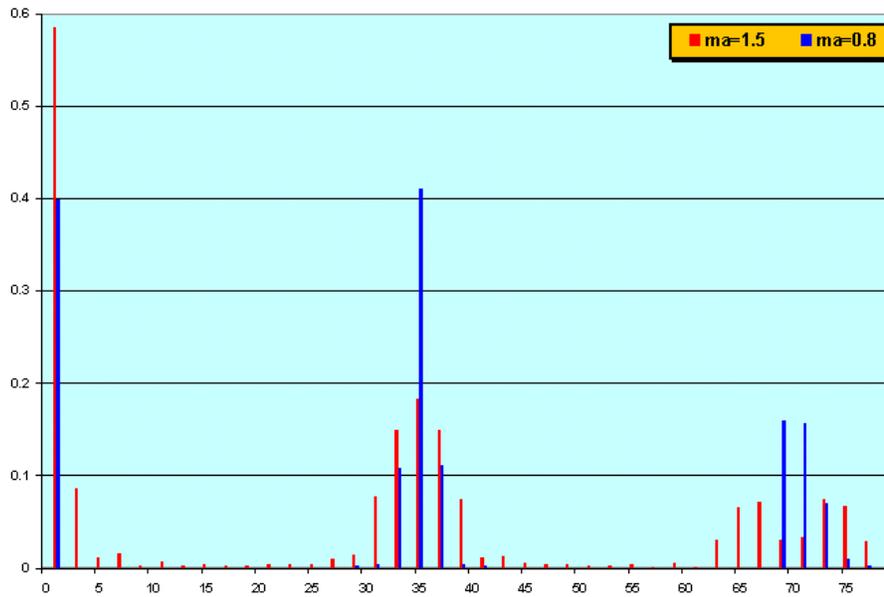


Figura 9.7: Comparación entre armónicos para $m_a = 0,8$ y $m_a = 1,5$ (sobremodulación) para $m_f = 35$.

9.3.2. Selección de la estrategia de disparo.

Las dos estrategias de disparo para la modulación PWM de un inversor monofásico son:

- **Modulación Bipolar.** Esta estrategia de disparo basa su funcionamiento en el disparo simultáneo de dos interruptores semiconductores, cada uno de ellos perteneciente a una rama y un cuadrante diferente del inversor.
- **Modulación Unipolar.** En este tipo de modulación, dependiendo de los valores relativos que adopten las señales de control y triangular, se disparará un solo interruptor semiconductor al mismo tiempo, estableciéndose un determinado orden en esta secuencia.

En la figura 9.8 se muestran las formas de onda correspondientes a ambos métodos de modulación. En 9.8(a) se muestra la representación para modulación bipolar y en 9.8(b) se presenta la representación para modulación unipolar.

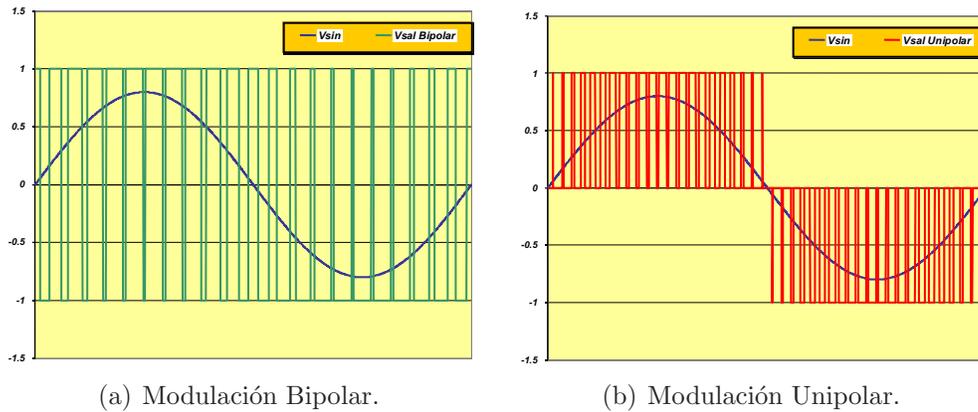


Figura 9.8: Estrategias de modulación PWM.

Se empleará para el diseño del inversor la modulación SPWM Unipolar, debido a que la frecuencia de conmutación se dobla, y los armónicos que genera lo hace a frecuencia doble que en el caso de la modulación bipolar: las componentes armónicas de frecuencias más bajas aparecen como bandas laterales de múltiplos del doble de la frecuencia de conmutación. Ésto se aprecia con claridad en la figura 9.9.

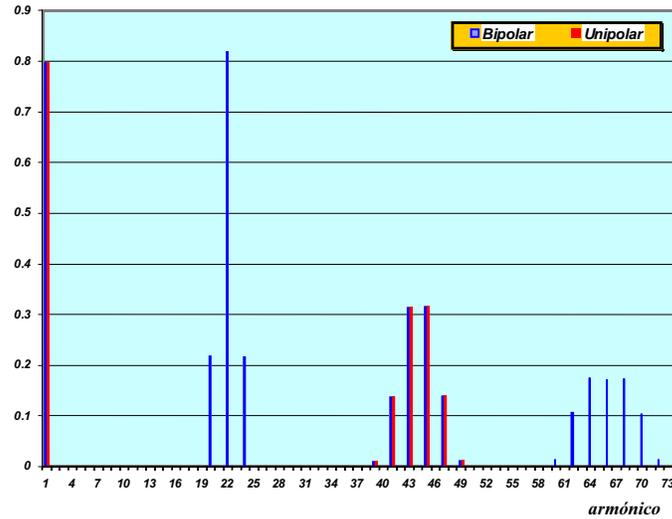


Figura 9.9: Armónicos que aparecen en la onda de salida para modulaciones unipolar y bipolar.

En este tipo de control PWM de tensión de salida unipolar se escoge m_f par, ya que en este caso el primer armónico de las tensiones V_A y V_B (las caídas de tensión en cada rama) están desfasadas 180° .

9.3.3. Aplicación a la situación expuesta.

El problema que se trata, se puede plantear desde el punto de la regulación de tensión mediante modulación SPWM, ajustando convenientemente la tensión de una batería de condensadores de manera que en todo momento, la reactiva consumida por el lazo sea aportada por éstos. No obstante, cabe plantearse el problema desde otro punto de vista, íntimamente ligado con éste, que puede resultar más sencillo de diseñar e implementar.

Puesto que lo que se desea, al fin y al cabo, es ajustar la corriente del lazo a la requerida, y equilibrar consumo—demanda de reactiva, parece lógico emplear la llamada *modulación por corriente regulada*. Ésta se describe en el epígrafe 9.3.4.

9.3.4. Modulación por corriente regulada.

En algunas aplicaciones, como es el caso que se trata, el parámetro que hay que controlar es la corriente que circula a la salida del inversor. Básicamente hay dos técnicas para ello, que son las que se enumeran a continuación:

- Control de la corriente por una banda de tolerancia.
- Control de la corriente por frecuencia fija.

El diagrama de bloques del control de la corriente por una banda de tolerancia o de histéresis, se muestra en la figura 9.12.

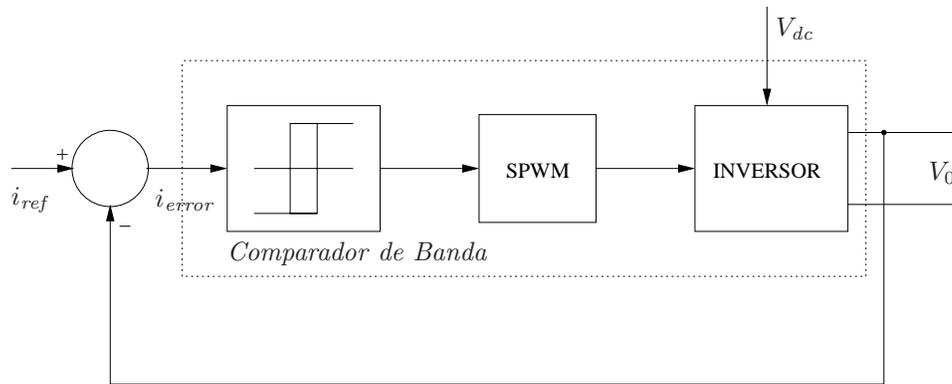


Figura 9.10: Control de la corriente por una banda de tolerancia.

Una señal de referencia senoidal denominada i_{ref} se compara con la corriente que circula por la fase (a la salida del inversor), con una banda de tolerancia alrededor de la corriente de referencia de cada fase. Como resultado de dicha comparación se obtienen las señales de disparo correspondientes a la rama del inversor correspondientes a la rama del inversor correspondiente a dicha fase.

Cuando el interruptor T_1 , conectado al bus de continua positivo, conduce, la corriente por la rama aumenta, ya que la tensión del bus de continua es superior a la tensión en la salida. Si la corriente instantánea en la salida del inversor trata de superar el límite superior de la banda de tolerancia, entonces el interruptor T_1 se bloquea y se pone a conducir el interruptor T_2 , conectado al terminal negativo del bus de continua. Al estar T_2 en conducción la corriente por la salida tiende a disminuir y cuando intenta ser menor que el límite inferior

de la banda de tolerancia, el interruptor T_2 dejará de conducir, y entrará en conducción nuevamente T_1 . Las formas de onda de la corriente, mostrando la banda de tolerancia y la corriente de referencia se muestra en la figura 9.11.

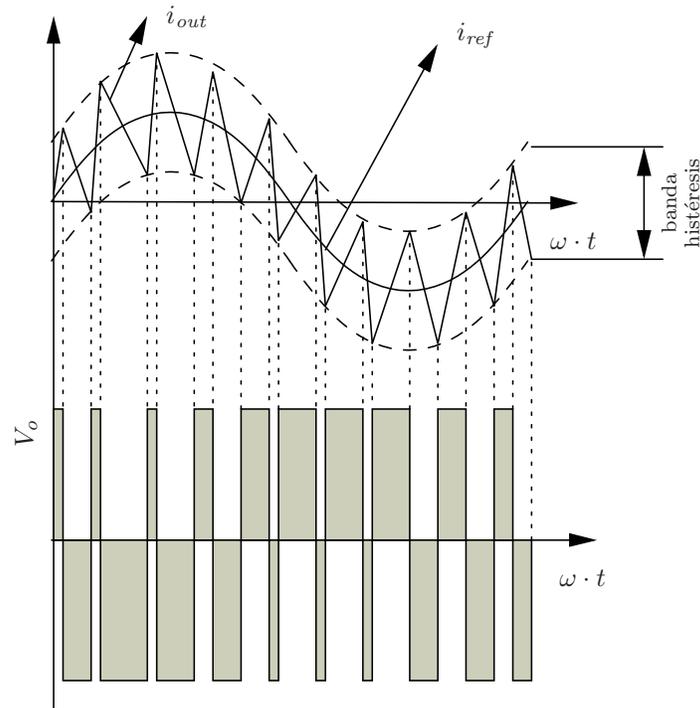


Figura 9.11: Formas de onda resultantes de la modulación por corriente por una banda de tolerancia.

El **control** de la corriente **por frecuencia fija** responde a un diagrama de bloques como el que se tiene en la figura 9.12.

El error existente entre la señal senoidal de referencia, i_{ref} , y la corriente actual, i_r , se amplifica mediante un controlador proporcional integral (PI). La señal de salida del regulador tipo PI se denomina tensión de control, v_c , que es comparada con la señal triangular de frecuencia fija v_t . Una señal de error positiva, $i_{ref} - i_r > 0$, provoca una tensión de control positiva que produce una tensión en la salida del inversor mayor, acercando a la corriente actual a su valor.

Éste es el tipo de control del que hace uso [19], y será el que se empleará para el caso que se estudia en el presente proyecto, pues supone una buena solución

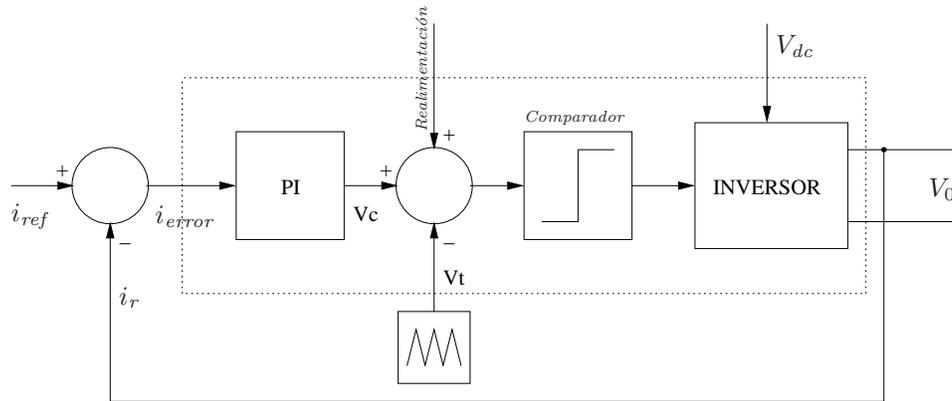


Figura 9.12: Control de la corriente por una banda de tolerancia.

con una implementación relativamente sencilla.

9.3.5. Etapas del inversor.

Las etapas de que constará el inversor son básicamente las siguientes:

- **Etapa inversora.** Es aquella en la cual se obtiene a partir de una tensión continua una señal alterna de componente fundamental senoidal y frecuencia industrial.
- **Etapa de filtrado.** En ella, a partir de la señal alterna de salida, se pretende obtener únicamente la onda senoidal correspondiente al armónico fundamental, que es la que presenta la frecuencia deseada, eliminando por tanto el resto de los armónicos.
- **Etapa amplificadora.** Es la encargada de ajustar los niveles de tensión a los requeridos por la carga.
- **Etapa compensadora.** Es la encargada de ajustar en cada instante la aportación o consumo de reactiva por parte de la carga.

En la figura 9.13 se esquematizan esta secuencia de etapas.

9.3.6. Etapa inversora.

Como se ha comentado con anterioridad, ésta será la etapa encargada de convertir la forma de onda de la tensión de entrada (continua) a una forma

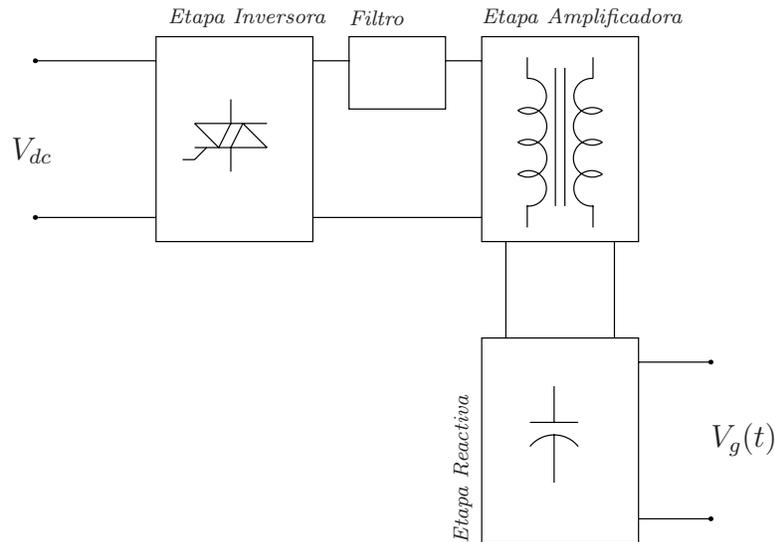


Figura 9.13: Diagrama de las etapas del inversor.

senoidal mediante una adecuada secuencia de corte de los interruptores electrónicos. Para ello, se empleará la estrategia de disparo y modulación analizada en los epígrafes 9.3.1 y 9.3.2.

Puesto que el inversor habrá de funcionar para bajas potencias, la frecuencia de conmutación f_s habrá de ser elevada.

Las características principales que se establecerán en un primer término son:

- **Interruptores electrónicos.** Se emplearán MOSFET debido a que los niveles de tensión son inferiores a los 200 V [9] y la resistencia en conducción ($R_{ds}(ON)$) entre los terminales de potencia es de bajo valor óhmico y las pérdidas en conducción son bajas. Constituyen la mejor alternativa puesto que las potencias que se manejarán son pequeñas.
- **Frecuencia de disparo.** Este tipo de semiconductores admite frecuencias de disparo de hasta 1 MHz. Puesto que para este caso particular la frecuencia de disparo ha de ser elevada, se hará uso de una frecuencia $f_s = 250$ kHz, que suele ser lo habitual para estos niveles de potencia. No obstante, en las simulaciones que se han efectuarán del inversor en el epígrafe ??e considerará la frecuencia de 2 kHz con la finalidad de que los tiempos de simulación no se vean excesivamente afectados. Los resulta-

dos, de todas formas, no diferirán sustancialmente de unas condiciones a otras.

9.3.6.1. Niveles de variación de las señales de control y referencia.

Puesto que se sabe cómo funcionará la etapa inversora, a nivel de bloque, llegado este punto se establecerán los valores y rangos de variación que adoptarán las diferentes magnitudes implicadas en la modulación de corriente por frecuencia fija, con la intención de fijar las relaciones entre las señales medidas y las salidas que se desean obtener.

Habrá que analizar, por tanto, los valores entre los que se moverán las señales i_{ref} e i_R para así poder determinar cual será la amplitud adecuada que habrá que establecer a la señal triangular V_t .

- ▷ i_{ref} es una señal que vendrá impuesta por la tarjeta DSP como consecuencia de la manipulación de los datos resultantes de la medición del CM por el medidor de flujo (capítulo 7).
- ▷ El error consecuente de la diferencia entre las corrientes de referencia y de lazo, será amplificado en el controlador P.I., con la finalidad de poder detectar pequeñas variaciones y así conseguir una mayor viabilidad.
- ▷ Para la señal triangular, se escogerá una amplitud (la frecuencia se estableció en 250 kHz) de 1.2 Voltios. La amplitud de la señal del control V_c será la que habrá que hacerse variar desde un valor igual a 0 hasta como máximo el valor de la amplitud de esta onda triangular, con la finalidad de no incurrir en ningún momento en una *sobremodulación* del inversor. De tal forma, la amplitud de la señal de control se elegirá en cada instante en función del valor previo de ésta, así como del valor que adopte el *error en corriente* o diferencia entre la corriente de lazo y de referencia.
- ▷ La salida del comparador será la que imponga el incremento o decremento del valor de la amplitud de la señal del control V_c .

9.3.6.2. Señales de disparo.

En este epígrafe se analizarán las señales de disparo que ofrece el *comparador* al bloque inversor propiamente dicho.

El comparador emitirá señales de disparo (pulsos) cada vez que la amplitud de la señal V_c sea inferior a la amplitud de V_t .

El bloque inversor de la figura 9.12 se modela mediante el esquema de la figura 9.14, donde cada interruptor electrónico representa, como se ha comentado, un MOSFET. Los terminales denominados DSi con $i = 1, 2, 3$ y 4 , son los terminales de disparo de dichos dispositivos semiconductores.

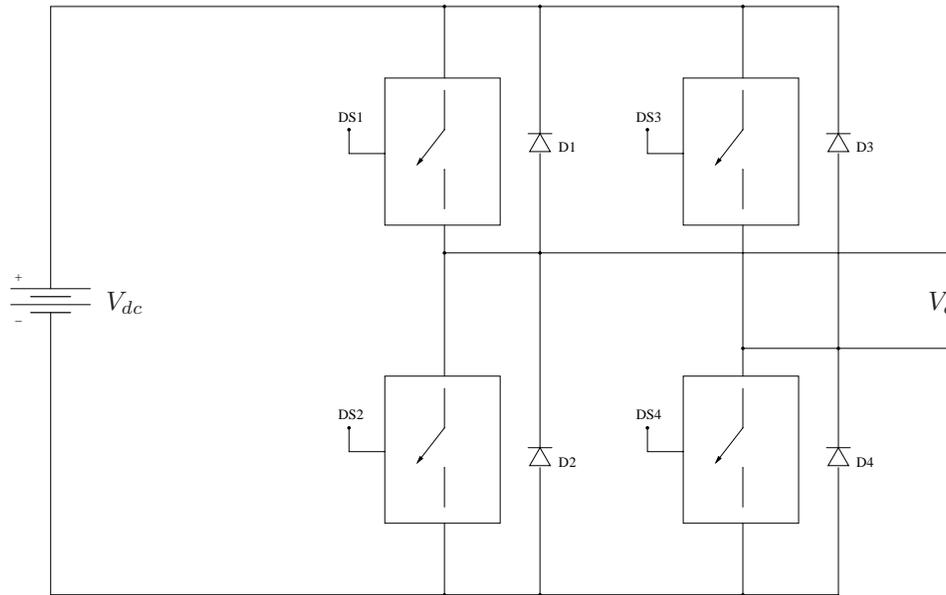


Figura 9.14: Esquema electrónico del inversor propiamente dicho.

La generación de las señales de disparo DSi atenderán al esquema recogido en la figura 9.15 y correrá a cargo de la tarjeta procesadora DSP de acuerdo con los diagramas de bloques que se presentan en 9.18. Como se observa en 9.15, el disparo se efectuará mediante un control SPWM tomando como señal de control la V_c , señal senoidal cuya amplitud es modulada en función del error entre las corrientes (sección 9.3.6.1), y como señal triangular la definida en 9.3.6.1 como V_t . El bloque con la leyenda $1 - V_i$ se emplea para asegurar que en cada instante, sólo estará activado uno de los interruptores de cada rama, mientras que el bloque inversor de signo, garantiza el modo de control *unipolar* (sección 9.3.2).

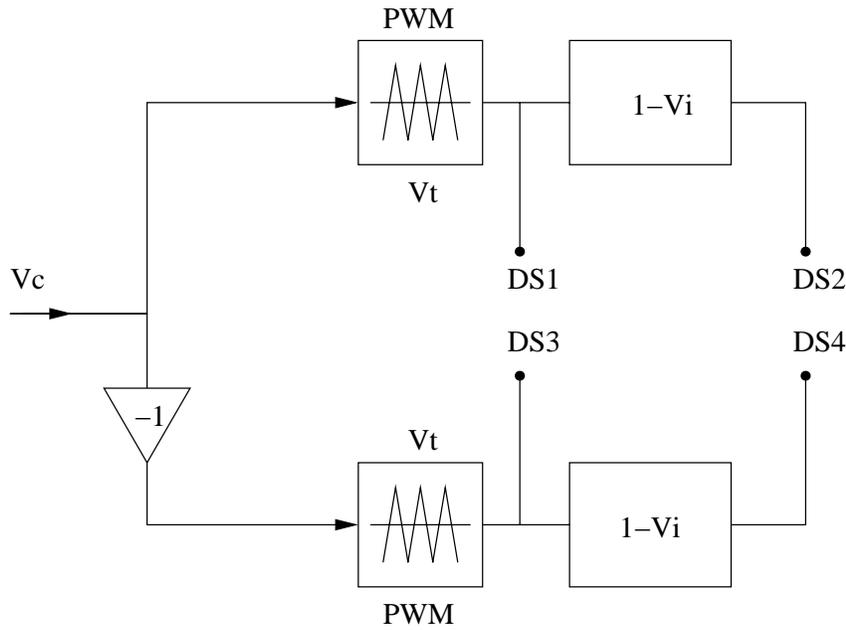


Figura 9.15: Generación de las señales de disparo.

9.3.7. Etapa amplificadora.

Puesto que se desea obtener una tensión a la salida del inversor de 220 V (alterna), en la situación de funcionamiento a máxima capacidad (para cargas de la línea de 500 A), la “relación de transformación” que habrá de presentar la etapa amplificadora habrá de ser de:

$$(\hat{V}_{A0})_{1m\acute{a}x} = 12 = \frac{220}{r_t} \implies r_t = 18,8145$$

9.4. Simulación del Inversor

La simulación del inversor de tensión diseñado se ha llevado a cabo mediante el programa de simulación PSCAD/EMTDC, desarrollado por el centro de investigación de Manitoba (Canadá). La estructura de las simulaciones efectuadas con esta herramienta es la siguiente:

- Se introduce el esquema correspondiente al circuito físico que se desea simular, en este caso, el inversor y el lazo de corriente, junto con el sistema

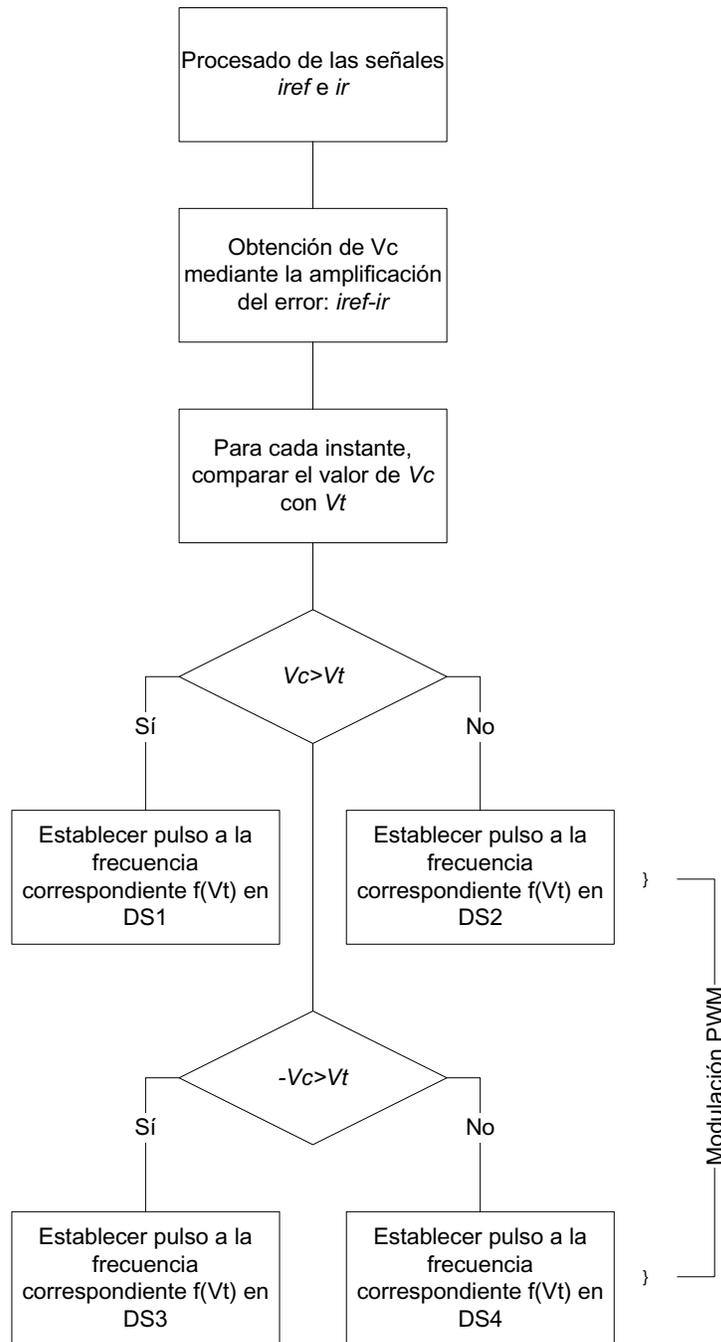


Figura 9.16: Diagrama de flujo para la generación de los pulsos de disparo.

de compensación de reactiva. En este esquema habrán de introducirse todas las referencias necesarias, así como los elementos de medición (amperímetros y voltímetros) que se consideren oportunos para la ejecución de la simulación.

- Se introducen a modo de subcircuitos, los diagramas de bloques que establecerán el control de los dispositivos del circuito principal descrito en el anterior punto.
- Se incorporarán los diversos canales de visualización con la finalidad de asociar a cada magnitud que se desee una representación gráfica.

Estas etapas quedarán mucho más claras una vez que se expongan los esquemas correspondientes al presente caso.

9.4.1. Esquema principal del circuito de simulación.

El esquema correspondiente al circuito que se simulará es el que se muestra en la figura 9.17. El fichero correspondiente a esta simulación, para la situación de funcionamiento del lazo a plena carga, es el que recibe el nombre ...pfc_archivos\sim_inversor\inv_serie_carga-est.psc.

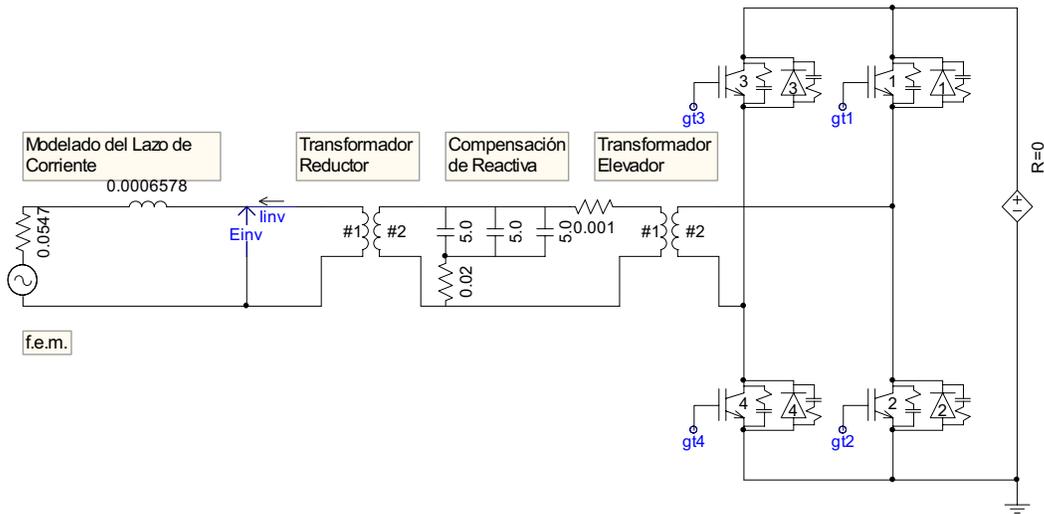


Figura 9.17: Esquema del sistema inversor—lazo de corriente.

Se observa la fuente de tensión conectada al puente de interruptores semi-conductores, los cuales establecerán el rizado de la tensión en función de las señales de control que se les imponga por los terminales *gti*. A continuación se encuentra el condensador encargado de aportar la reactiva al lazo (con la finalidad de eximir de tal menester al propio puente inversor. El transformador es necesario para adaptar los niveles de tensión, ya que para poder utilizar condensadores de capacidades no excesivamente elevadas para las potencias que se tratan, éste se se hace de 220V, que no es la misma a la que se encontrará sometido el lazo de corriente. Así, la etapa amplificadora está representada por un transformador elevador 24V/220V, se coloca a estos niveles de tensión la batería de condensadores, y posteriormente se emplea otro transformador, éste reductor, con la finalidad de adaptar la tensión a la requerida en bornas del lazo de corriente.

Para la generación de las señales de control, con la finalidad de efectuar un adecuado seguimiento de la corriente de lazo, se colocará en serie con el lazo un amperímetro, al que se dotará con la etiqueta *iinv*. Realmente ésta es la única señal necesaria para dicha generación, pero sin embargo, a efectos de comprobar el correcto funcionamiento del inversor, se ha colocado un voltímetro en paralelo con la carga del lazo, V_{inv} .

9.4.2. Generación de las señales de control del inversor.

El diagrama de bloques que establece la generación de las señales de control del inversor es el que se muestra en la figura 9.18.

Mediante este proceso, se modulará la amplitud de la señal de control, $V_{control}$, de frecuencia fija igual a 50 Hz, que será comparada con la señal triangular V_{tri} para obtener los pulsos de disparo. Ésto último se ilustra en la figura 9.19.

La frecuencia de la señal triangular será fija, de valor igual a 2000 Hz (se podría haber tomado un valor de frecuencia mucho mayor, pero se ha desestimado para la simulación puesto que los tiempos invertidos en la misma se hacen prácticamente insostenibles con el aumento de esta magnitud. De tal forma, puesto que con una frecuencia de 2000 Hz se consiguen resultados bastantes buenos, se ha decidido emplear este valor). El proceso de modulación de la amplitud de la señal de control, $V_{control}$, es el siguiente:

- Se comparan la corriente que circula por el lazo y la corriente de referencia que se tendrá como consecuencia de operar los valores obtenidos por el medidor de flujo, obteniendo así una señal de error (e en la figura 9.18).

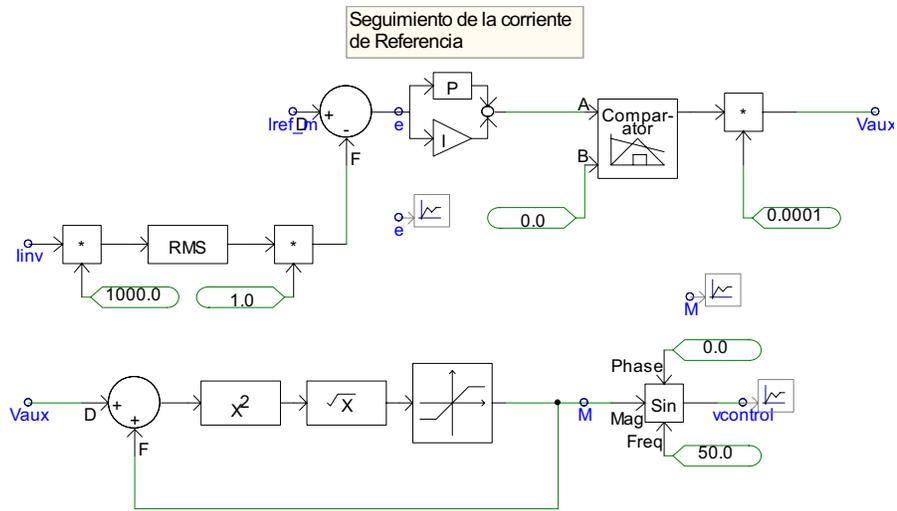


Figura 9.18: Modulación de la amplitud de la señal de control $V_{control}$.

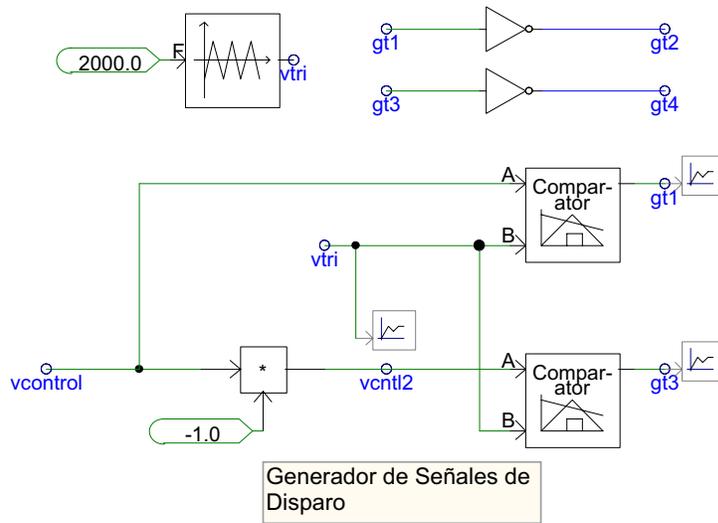


Figura 9.19: Generación de los pulsos de disparo.

- Este error se amplificará mediante un controlador Proporcional Integral (PI), y mediante un bloque comparador se analizará si es mayor o menor que 0.
- En caso de que la corriente por el lazo sea menor que la corriente de referencia, se incrementará en una centésima la amplitud de la señal de control, con la finalidad de obtener valores medios de tensión mayores, y por consiguiente una corriente de lazo mayor. Lo contrario ocurrirá si el valor de la corriente por el lazo es mayor que la corriente de referencia.
- La amplitud de la señal de control, $V_{control}$ quedará limitada a valores comprendidos entre 0 y la amplitud de la señal triangular, con el objeto de no incurrir en *sobremodulación*. Para ello se ha empleado el bloque limitador que se observa en la figura 9.18.

9.4.3. Compensación de reactiva. Control de la batería mediante la tensión de salida.

Puesto que la estrategia de inversión consiste en la regulación de la tensión a la salida del inversor con la finalidad de conseguir los niveles de corriente deseados, se plantea la posibilidad de aprovechar esta circunstancia para comprobar si la reactiva que cede la batería en cada situación se ajusta a la que demanda el lazo. Conforme disminuye la tensión a la salida del inversor, la batería se encuentra sometida a menor tensión y la reactiva que aporta es menor; la corriente de lazo disminuye, con lo cual el lazo consume menos reactiva. Efectuando los cálculos de reactiva consumida por el lazo, y reactiva alimentada por la batería en función de la tensión de salida del inversor (se refiere a la tensión a que se encuentra sometida la batería de condensadores), se obtienen los resultados que se esquematizan en la figura ?? Se puede comprobar, pues, que el seguimiento se ajusta bastante bien a las necesidades (además, hay que tener en cuenta que los transformadores también consumen reactiva, de modo que el hecho de que la reactiva aportada por la batería sea mayor que la consumida por el lazo es una buena señal).

9.4.4. Esquema para el estudio de armónicos.

Con la finalidad de analizar los niveles de armónicos generados por el inversor, se empleará el diagrama de bloques que se muestra en la figura 9.21.

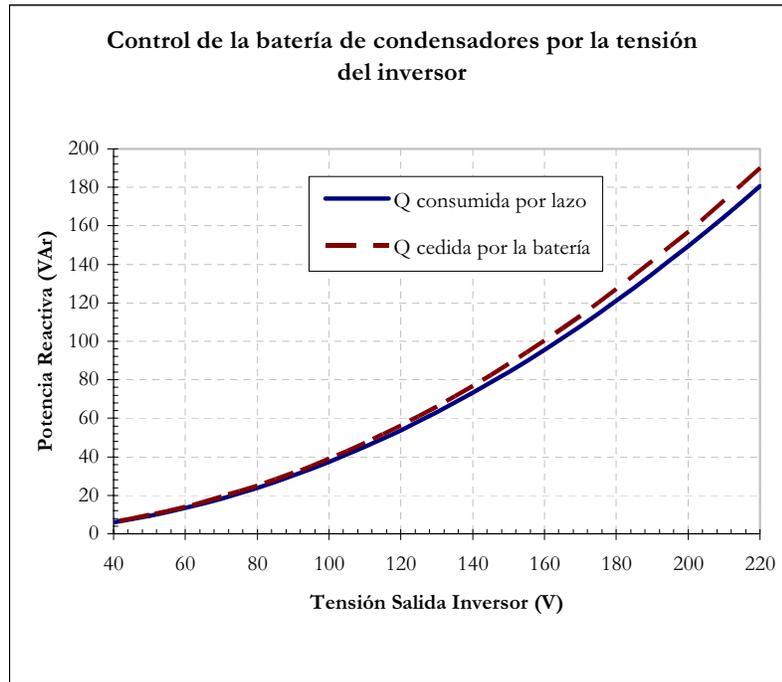


Figura 9.20: Reactiva consumida por el lazo y reactiva cedida por la batería.

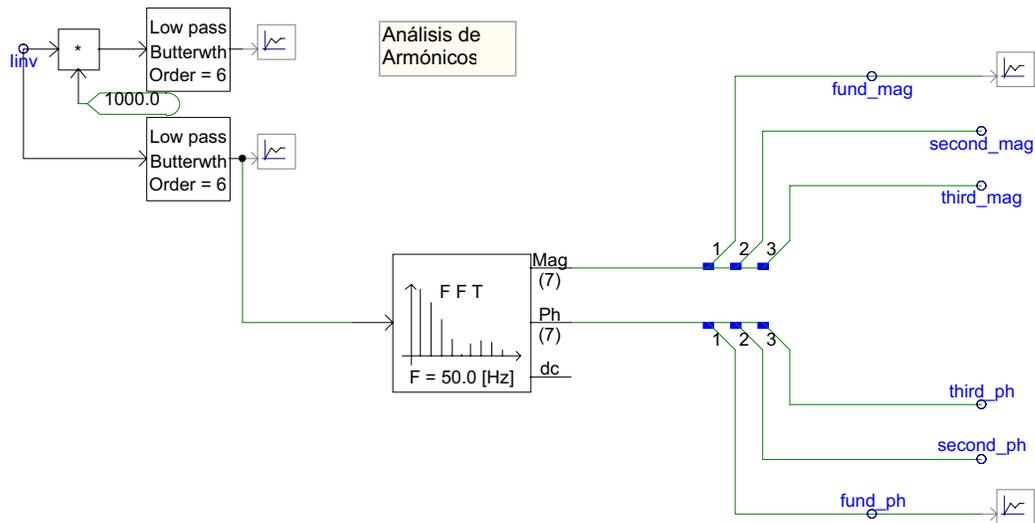


Figura 9.21: Diagrama de bloques para el análisis de armónicos.

9.5. Resultados y representaciones gráficas.

En este epígrafe se presentarán las representaciones gráficas obtenidas mediante la simulación del inversor.

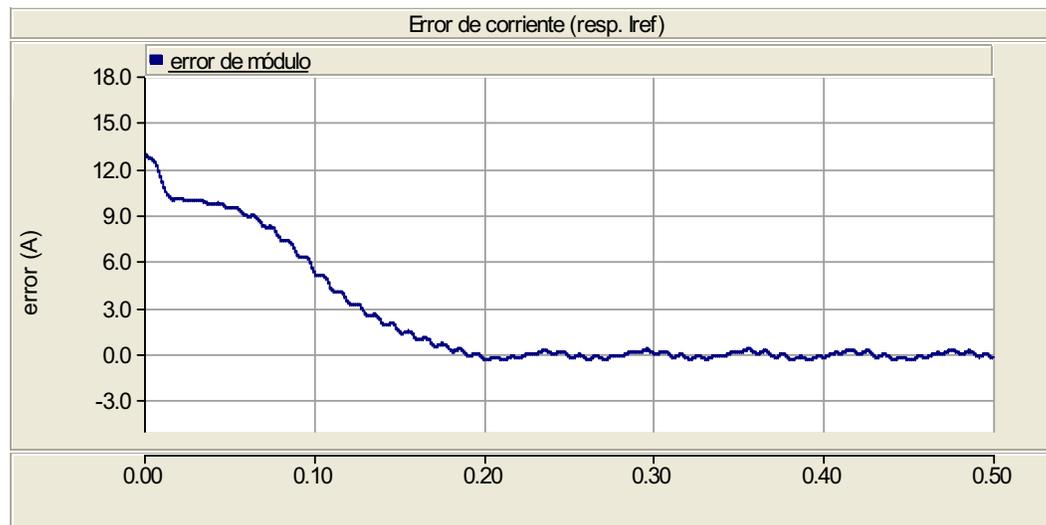


Figura 9.22: Error entre las magnitudes de la corriente del inversor y la corriente de referencia.

En las figuras representadas desde la 9.22 hasta la 9.30, se puede observar el periodo correspondiente al transitorio consecuente de comenzar la simulación desde un estado en reposo. Es decir, se parte de un lazo carente de excitación, y se llega al régimen de funcionamiento estándar (correspondiente a aquel para el cual la corriente de la línea es de 264 A), para el cual la corriente de lazo debe ser $I_{lazo} = 10,8303 + j \cdot 7,2202 \text{ A}$. Este transitorio dura apenas 0.20 segundos.

Para efectuar las representaciones, se han filtrado las señales correspondientes a la tensión de salida del inversor y la corriente del lazo, empleando para ello filtros paso bajo tipo Butterworth de orden 6. Ésto se observa en la figura 9.31.

En el caso de que se desee estudiar el funcionamiento del inversor cuando en la línea se tienen las condiciones máximas de funcionamiento (500 Amperios), se tendrán las siguientes representaciones gráficas, teniendo en cuenta que en este caso el valor de la corriente de lazo es de $I_{lazo} = 20,4573 + j \cdot$

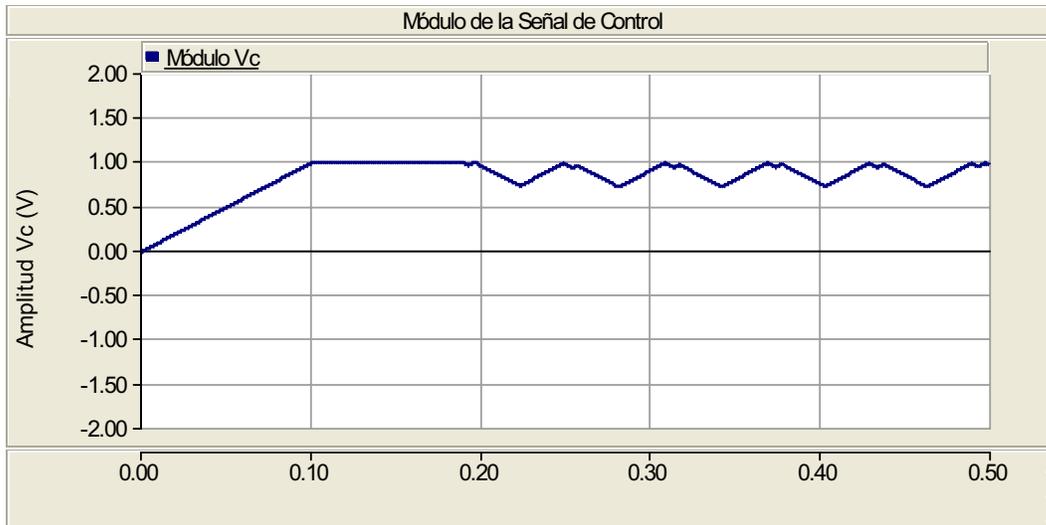


Figura 9.23: Amplitud de la señal de control V_c .

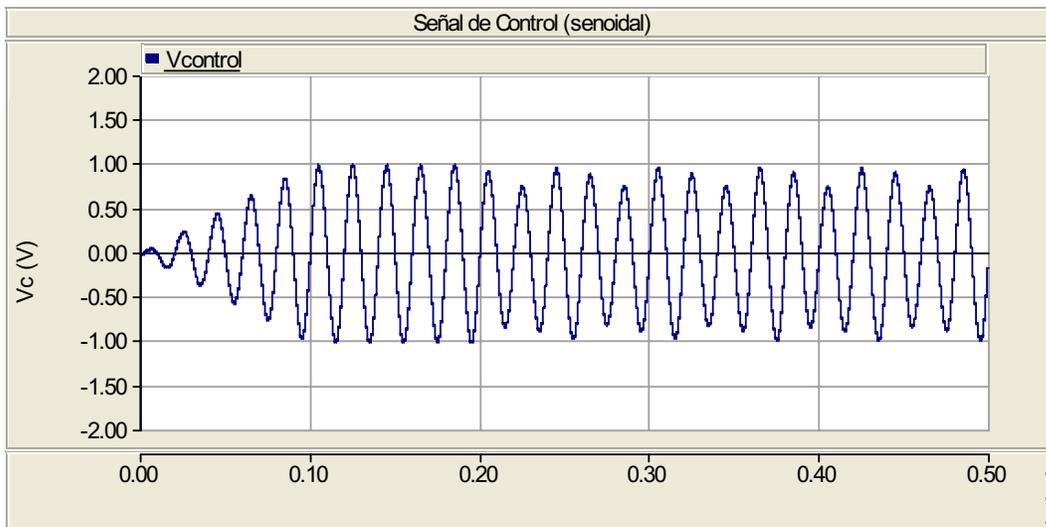


Figura 9.24: Señal de control V_c .

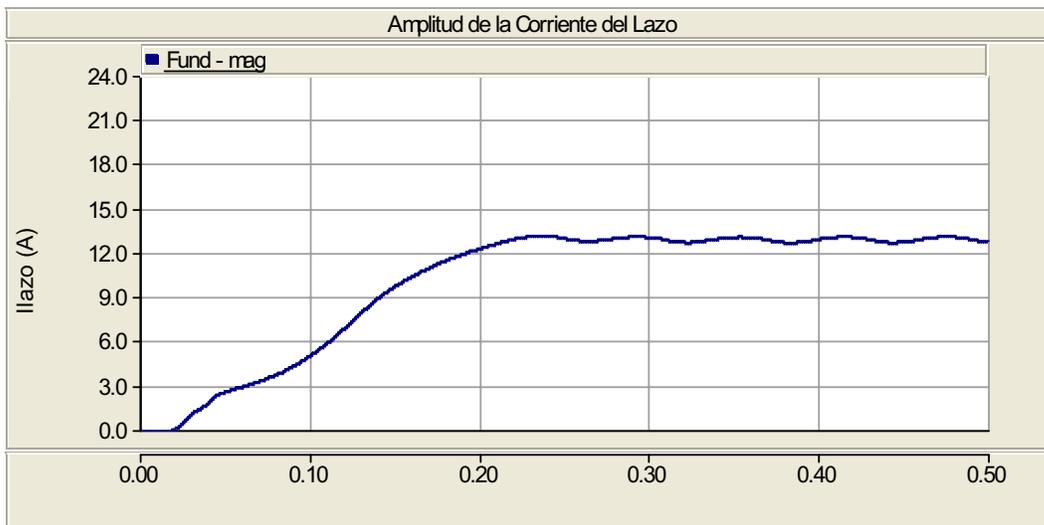


Figura 9.25: Módulo de la corriente de lazo.

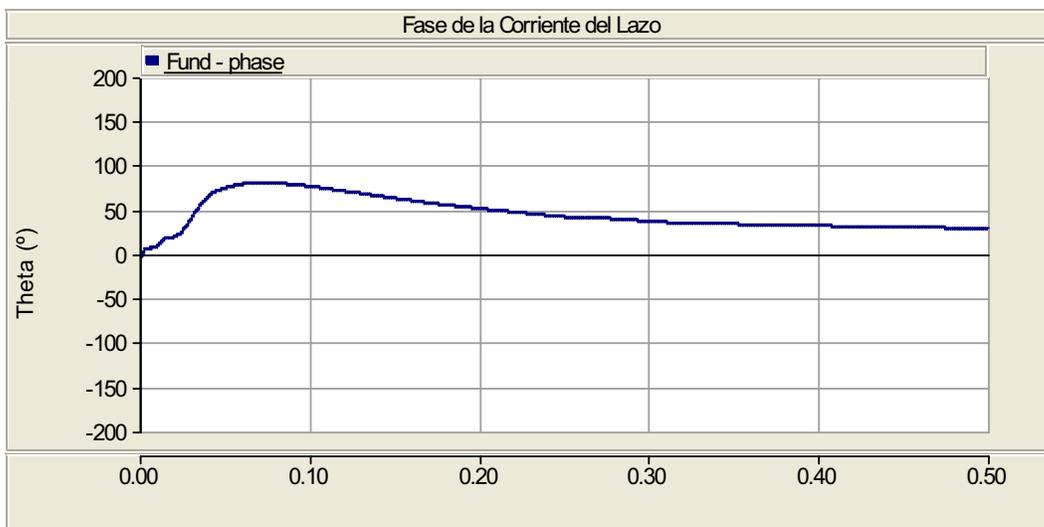


Figura 9.26: Fase de la corriente de lazo.

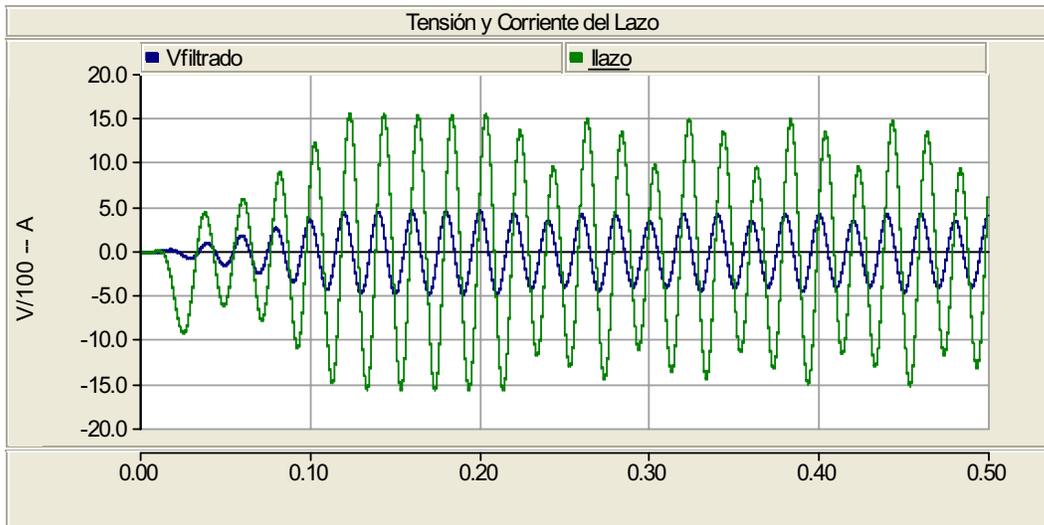


Figura 9.27: Corriente de lazo y tensión a la salida del inversor.

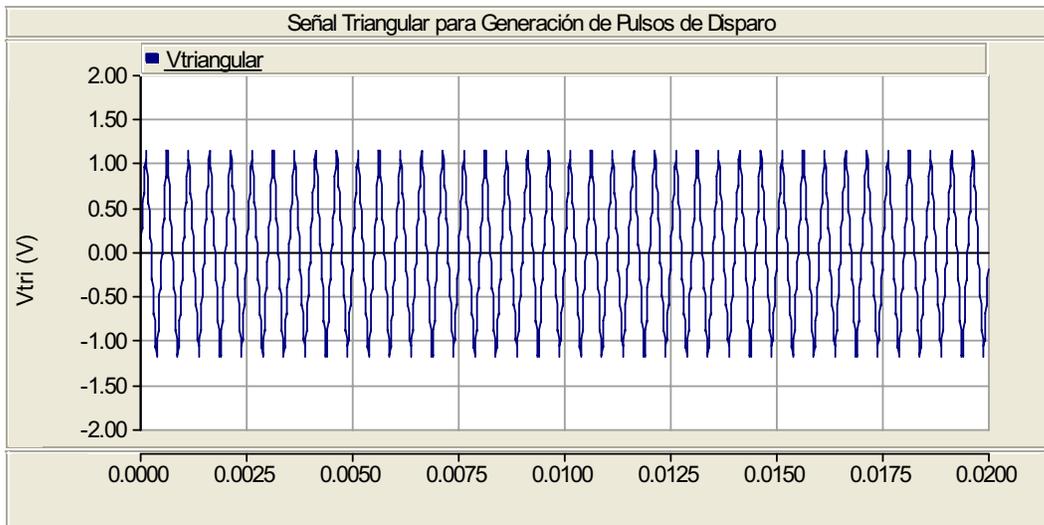


Figura 9.28: Onda triangular para la generación de los pulsos de disparo.

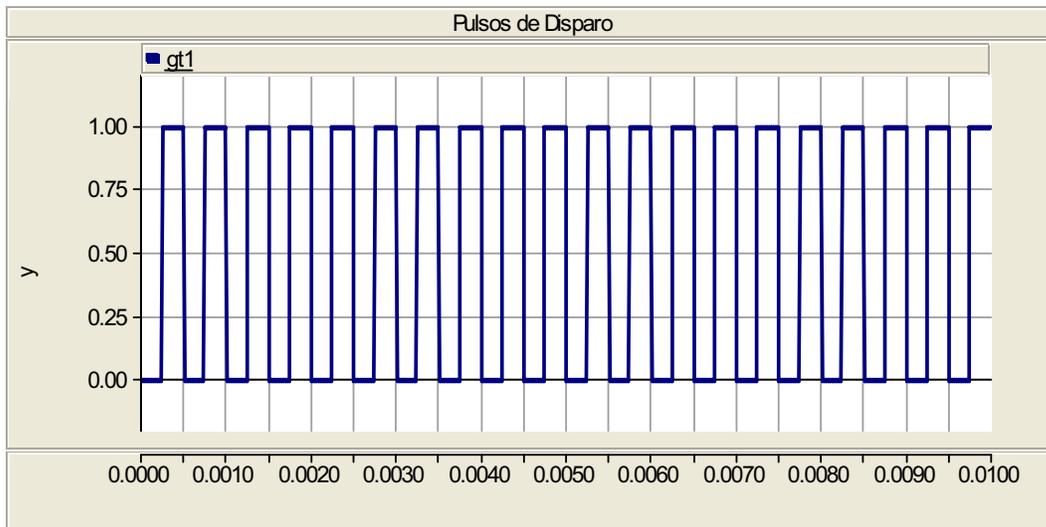


Figura 9.29: Pulso de disparo (detalle #1)

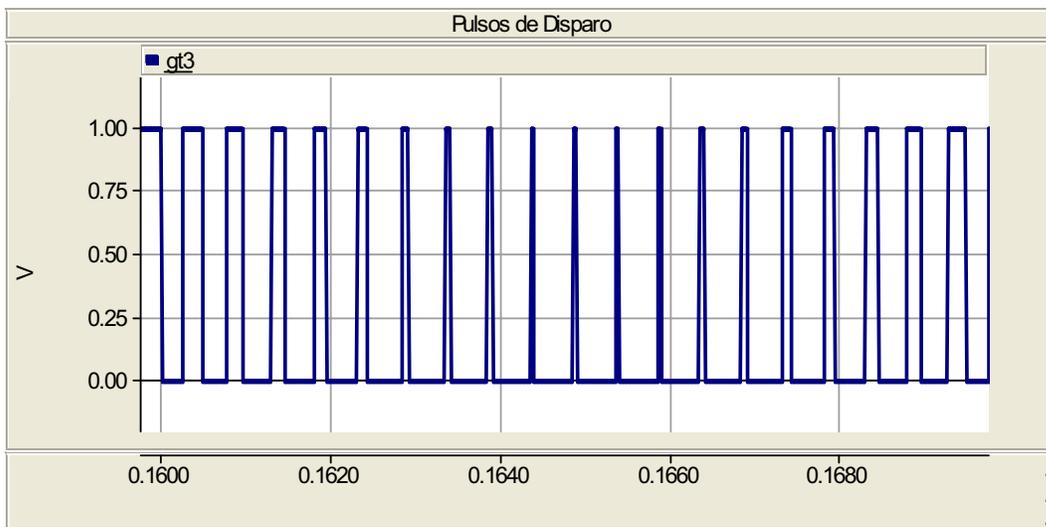


Figura 9.30: Pulso de disparo (detalle #2)

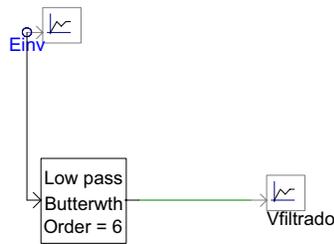


Figura 9.31: Filtrado de la tensión de salida del inversor.

15,6438 A. El fichero correspondiente a la simulación bajo esta situación es el `...pfc_archivos\sim_inversor\inv_serie_carga-max.psc`.

El comportamiento, como se aprecia en las figuras 9.29 y 9.30, es bastante similar al de la modalidad de funcionamiento estándar: el transitorio inicial es prácticamente de la misma duración, y la tendencia sigue las mismas pautas, aproximadamente.

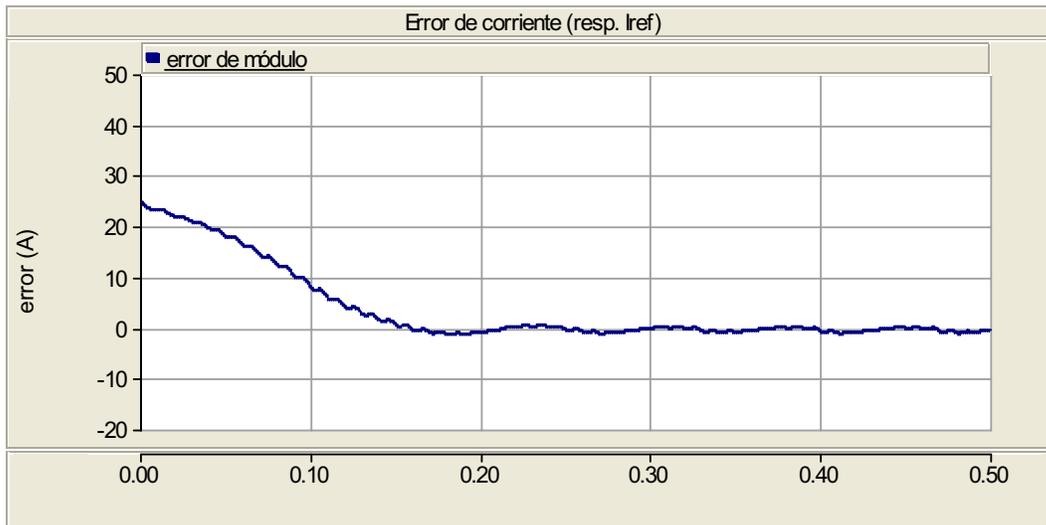


Figura 9.32: Error entre la corriente de lazo y la corriente de referencia.

Se comprueba en las gráficas que para esta situación, la más desfavorable para llegar desde el arranque, el transitorio dura aproximadamente 0.2 segundos, pero transcurrido este intervalo, el ajuste de corriente es bastante bueno.

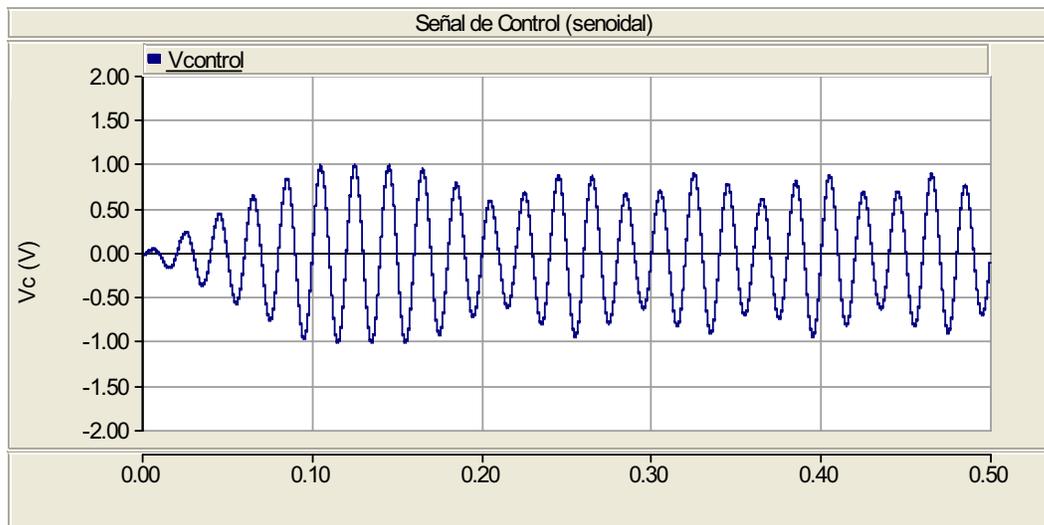


Figura 9.33: Señal de control V_c para la generación de pulsos de disparo.

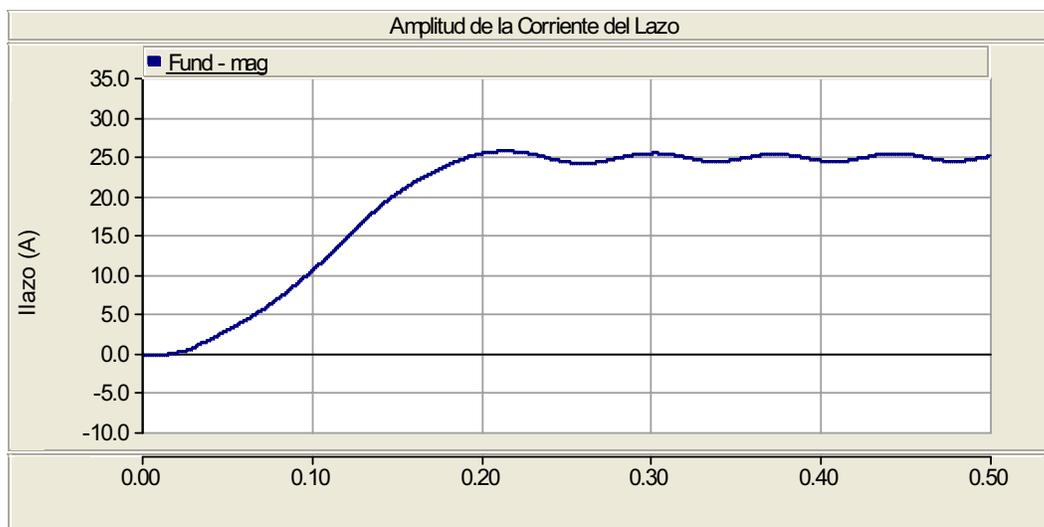


Figura 9.34: Evolución de la corriente de lazo (en módulo).

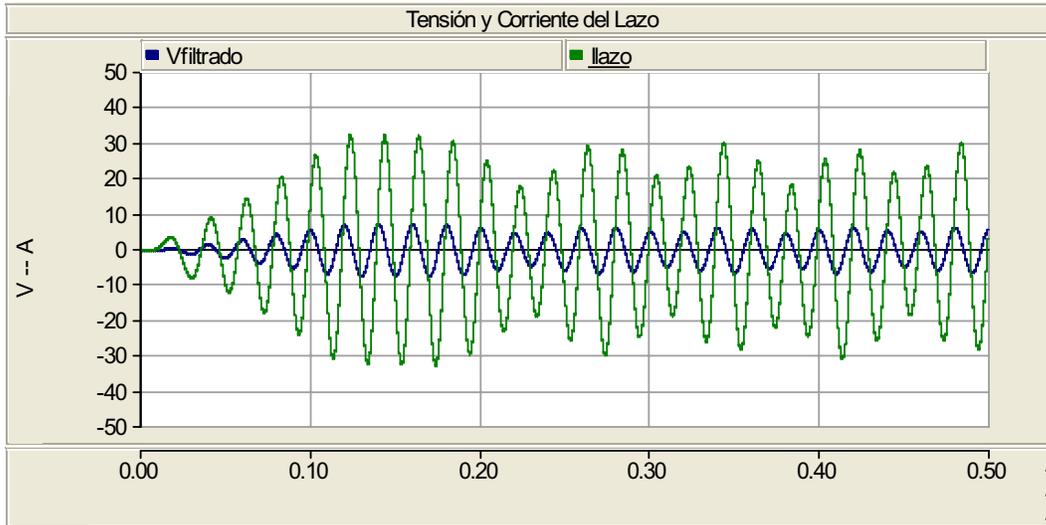


Figura 9.35: Tensión del lazo y Corriente del lazo (senoidal).

9.6. Estudio de armónicos.

Se ha efectuado una representación gráfica de los armónicos introducidos en el transitorio de la corriente del lazo, con la finalidad de establecer una idea de la importancia de los mismos. Para llevar a cabo las representaciones gráficas, se ha empleado el esquema de la figura 9.36.

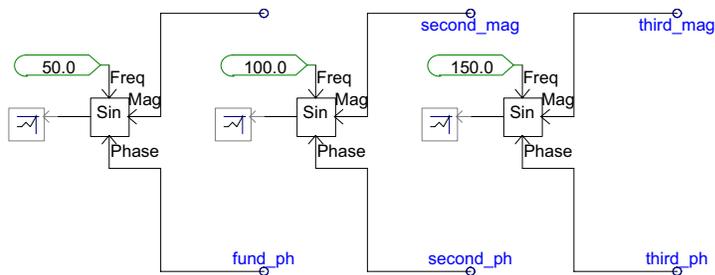


Figura 9.36: Esquema empleado para la representación de armónicos.

Las curvas obtenidas se presentan en 9.37 a 9.39. En ella se puede comprobar que la presencia de armónicos no es especialmente importante.

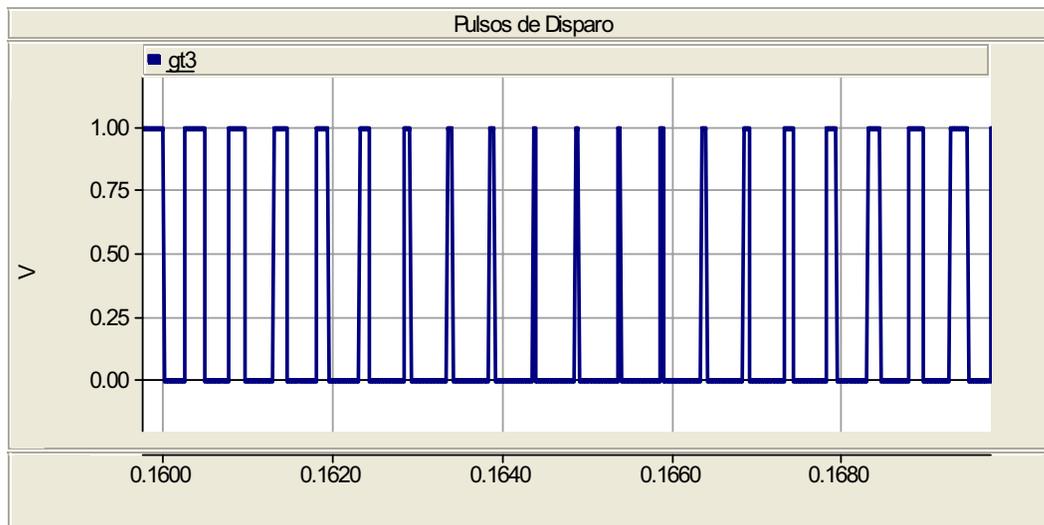


Figura 9.37: Armónicos introducidos en la corriente de lazo.

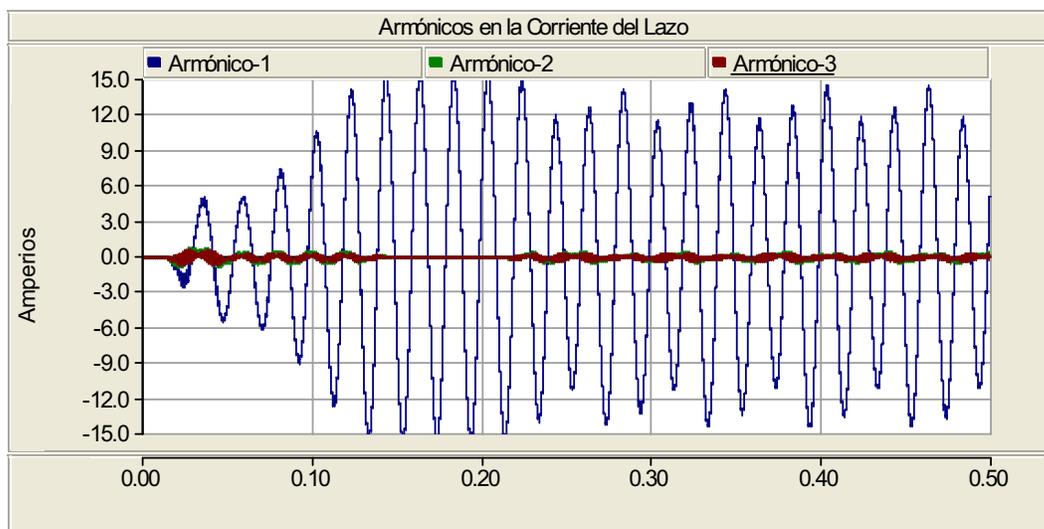


Figura 9.38: Armónicos introducidos en la corriente de lazo en el transitorio.

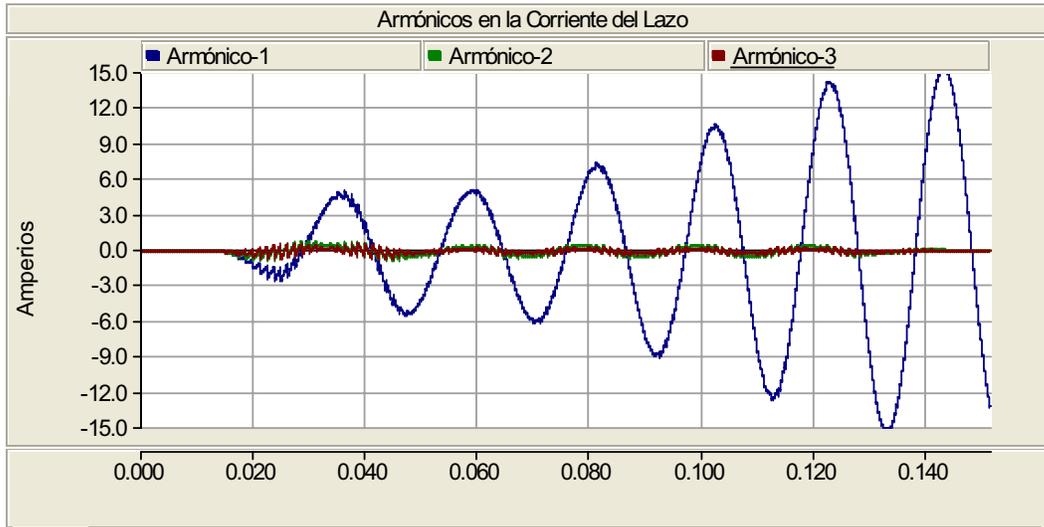


Figura 9.39: Armónicos introducidos en la corriente de lazo tras el transitorio.

9.7. Tarjeta Controladora DSP.

En esta sección se estudiará la conexión correspondiente a la tarjeta DSP con respecto a las señales medidas mediante el medidor de flujo (capítulo 7), y el inversor DC-AC sobre el cual actuará (epígrafe 9.3)

La tarjeta DSP que se empleará será la TMS320LF2407, de Texas Instruments, cuyas especificaciones y características se recogen en el capítulo 10.

Se planteará a continuación el esquema de *ENTRADAS* y *SALIDAS* de esta tarjeta, y el cableado correspondiente hacia el inversor diseñado.

- Los sensores de flujo y de corriente adaptan sus señales (mediante tarjetas de adaptación de señales) a los 3.3 V que admite como entrada máxima la tarjeta DSP (en el caso del medidor de flujo, los niveles son admisibles por la tarjeta, con lo que la salida de éste puede ser directamente atacada por la tarjeta DSP).
- Estas señales son tratadas de acuerdo con los diagramas de flujo obtenidos y a partir de los valores que adopten, generan las señales de control:
 - ▷ Señales de control de la etapa inversora.

Capítulo 10

EQUIPOS Y COMPONENTES: DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS.

10.1. Módulo fotovoltaico BP-250.

Se han comparado las características de los módulos fotovoltaicos del fabricante ATERSA y los del fabricante BP SOLAR, los BP-250. Las características y especificaciones de unos y otros son bastante similares, y al final se ha optado por el empleo del segundo (a pesar de no existir una ventaja técnica real que favorezca la selección de uno frente a otro).

En este epígrafe se detallarán las características y curvas de funcionamiento de este módulo.

Características

El módulo fotovoltaico BP-250 está compuesto por una serie de 36 células fotovoltaicas (2/3 de célula de 125mm) de silicio monocristalino y tiene una potencia típica de $50W_p$ a una tensión de $17V_{cc}$. Las características más notables de este módulo son las que se describen a continuación:

- Células monocristalinas.
- Diseño de máxima fiabilidad y mínimo mantenimiento.
- Alta resistencia al agua, la abrasión, impacto de granizo y otros factores ambientales adversos.

- Bastidor ligero de aluminio, anodizado con junta periférica de silicona alrededor del laminado.
- Cumple con las especificaciones internacionales. Especificación europea ESTI 503/IEC 1215.
- Presenta una garantía de 10 años.

Características de las células.

El módulo fotovoltaico consta de 36 células equivalentes a 2/3 de célula pseudocuadrada de silicio monocristalino de 125 mm de lado, conectadas en serie (ver tabla 10.1).

El aspecto físico de estos módulos fotovoltaicos se muestra de forma esquemática en la figura 10.1.

Tabla 10.1: Características de las células.

| SILICIO MONOCRISTALINO | | | |
|-------------------------------|-----------------|---------------|-------------------|
| <i>Código</i> | <i>Pot. (W)</i> | <i>Modelo</i> | <i>Fabricante</i> |
| M001 | 50 | BP-250 | BP-SOLAR |

Especificaciones

Las especificaciones del módulo fotovoltaico BP-250 se recogen en la tabla 10.2.

Tabla 10.2: Tabla de especificaciones del módulo BP-250.

| | | | |
|--|---------|--------------------|---------|
| Potencia máxima nominal (P_{max}) | 50 W | Dimensiones | |
| Tensión en el punto de Pmax (V_{mp}) | 17 V | Longitud | 825 mm |
| Intensidad en el punto Pmax (I_{mp}) | 2.94 A | Anchura | 530 mm |
| Corriente de cortocircuito (I_{sc}) | 3.22 A | Espesor | 43.5 mm |
| Tensión a circuito abierto (V_{0c}) | 21.20 V | Peso | 5 kg |

Todas las especificaciones de funcionamiento son las medidas en condiciones

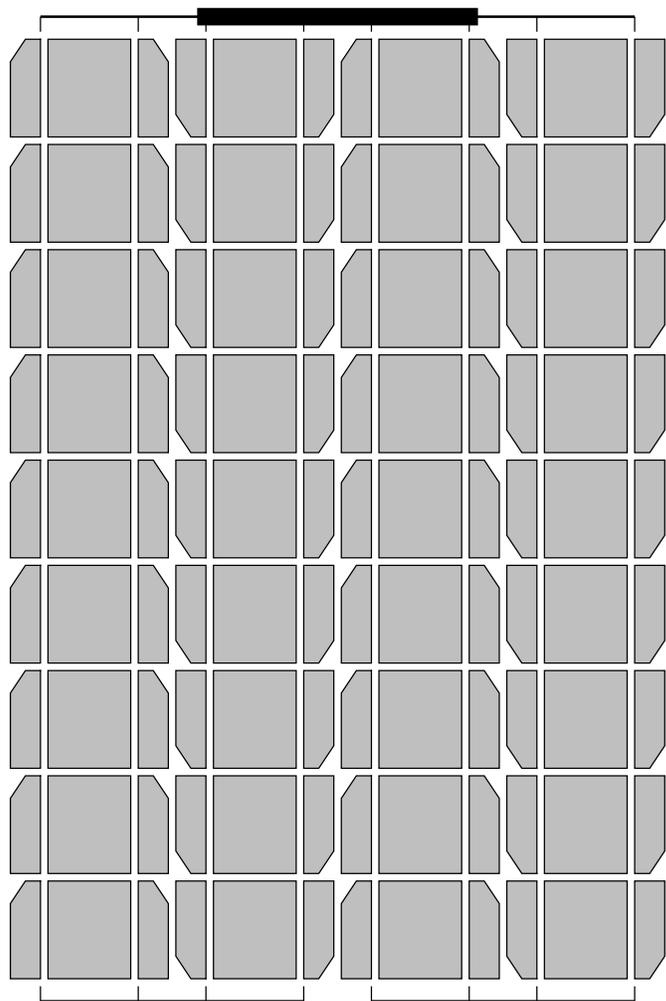


Figura 10.1: Disposición de las células fotovoltaicas en el módulo.

de prueba estándar (STC) (ver tabla 10.3).

En la tabla 10.4 se recoge la descripción de los parámetros de funcionamiento del módulo fotovoltaico.

Tabla 10.3: Condiciones de Prueba Estándar (STC).

| Descripción | Parámetro | Valor |
|---------------------------|------------------------------------|-------|
| Intensidad de iluminación | Irradiación (W/m^2) | 1000 |
| Constante solar | Masa aérea (AM) | 1.5 |
| Temperatura | Temperatura célula ($^{\circ}C$) | 25 |

Tabla 10.4: Descripción de los parámetros de funcionamiento.

| | |
|-----------|--|
| P_{max} | Máxima potencia de un módulo. El punto de la curva donde el producto $I \cdot V$ es máximo |
| V_{mp} | Tensión en el punto de máxima potencia |
| I_{mp} | Intensidad en el punto de máxima potencia |
| I_{sc} | Intensidad de cortocircuito de un módulo |
| V_{oc} | Tensión en circuito abierto de un módulo |
| P_{min} | Potencia mínima garantizada de un módulo |

Curva de tensión/intensidad (típica)

En la figura 10.2 se muestra la curva que relaciona la corriente con la tensión del módulo fotovoltaico. La representación se ha realizado en las condiciones de funcionamiento recogidas en la tabla 10.3: irradiación $1000 W/m^2$, densidad de masa aérea 1.5 AM y $25^{\circ}C$.

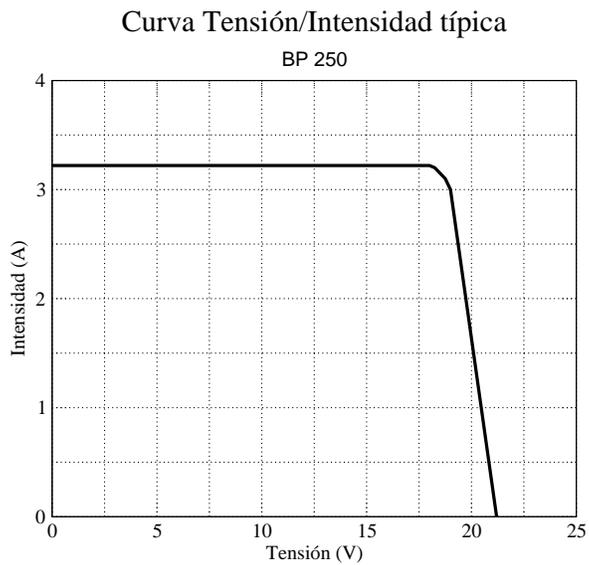


Figura 10.2: Curva de tensión/intensidad para el módulo fotovoltaico BP-250.

10.2. Baterías acumuladoras CONCORDE.

Ver página 199.

Baterías

INFORMACIÓN GENERAL SOBRE BATERÍAS

| Diseños en Baterías de Ciclo Profundo, Plomo-Ácido | | | | |
|--|------------------|--|--|------------|
| | No. ciclos a 50% | Aplicación | Beneficios | Fabricante |
| líquido, plomo-ácido inundada | profundo | industrial, marina, vivienda remota | bajo costo, larga vida mejor garantía | IBE, Rolls |
| sellada, electrolito gelatinoso | profundo | industrial, telecom, sistemas remotos, comercial y sistemas de iluminación | sin mantenimiento, transportable por aire, sin derrames o gases, colóquese en cualquier posición, menos riesgo de congelamiento, sin clasificación de riesgosa | East Penn |
| sellada, AGM absorbed glass mat-plomo-ácido | profundo | | | Concorde |

| % de Recarga | Voltaje a Circuito Abierto | | | Capacidad de Batería a Temp | | Voltaje de Terminación de Recarga Recomendado | |
|--------------|----------------------------|------|------|-----------------------------|----------------|---|---------------|
| | Inundada | Gel | FSFV | Temp de Batería | % de Capacidad | Tipo | Voltaje (VDC) |
| 100 | 12.6 | 13.0 | 12.8 | 50° F (10° C) | 90 | Inundada | 14.5 |
| 75 | 12.4 | 12.8 | 12.6 | 59° F (15° C) | 95 | Gel | 14.1 |
| 50 | 12.2 | 12.6 | 12.4 | 68° F (20° C) | 100 | AGM | 14.2 |
| 25 | 12.0 | 12.4 | 12.2 | 77° F (25° C) | 100 | | |
| 0 | 11.8 | 12.2 | 12.0 | 86° F (30° C) | 103 | | |
| | | | | 95° F (35° C) | 103 | | |



Batería regulada por válvulas, sellada, plomo-ácido

Concorde

Las baterías de plomo-ácido Sun Xtender son selladas, libres de mantenimiento y reguladas por válvulas. Diseñadas para aplicaciones FV de ciclo profundo. Estas baterías contienen en el electrolito en separadores Tejido Saturado de Fibra de Vidrio (TSFV). La serie T incluye terminales con insertos de aleación de cobre y la serie L incluyen terminales en "L" de uso rudo. Ambas están diseñadas para uso rudo y altas capacidades de corriente. Los Sun Xtenders tienen un amplio intervalo de temperaturas de operación, desde -40° C hasta 72° C, así como muy baja autodescarga de menos de 1% al mes a 25° C. Componente de sistemas con reconocimiento UL.

| Modelo | Voltaje | Capacidad a Tasa de 100 Hr. | Dimensiones (cm) | Peso (kg) | Número de Parte |
|------------|---------|-----------------------------|--------------------|-----------|-----------------|
| PVX-6200T | 6V | 240 Ah | 35.5 x 17.2 x 22.7 | 29.5 | 201003PVX6220T |
| PVX-6220U | 6V | 263 Ah | 26.1 x 18.1 x 28 | 29.9 | 201003PVX6220 |
| PVX1234T | 12V | 38 Ah | 19.6 x 13.2 x 17.5 | 10.9 | 201003GPC1234 |
| PVX1248T | 12V | 55 Ah | 24 x 14 x 23.6 | 15.9 | 201003GPC1248 |
| PVX1255T | 12V | 63 Ah | 24 x 14 x 23.6 | 17.7 | 201003GPC1255 |
| PVX1285T | 12V | 102 Ah | 32.8 x 14.1 x 22.6 | 27.7 | 201003GPC1285 |
| PVX12100T | 12V | 120 Ah | 30.5 x 17.2 x 22.7 | 29.5 | 201003GPC1295 |
| PVX12105T | 12V | 126 Ah | 32.8 x 14.1 x 22.6 | 31.3 | 201003GPC12105 |
| PVX12210L* | 12V | 253 Ah | 52.7 x 22.1 x 27.1 | 61.2 | 201003GPC4D |
| PVX12255L* | 12V | 305 Ah | 52.7 x 27.8 x 26 | 73.5 | 201003GPC8D |

U—Terminal Universal; Asas: Serie T = Asas incluidas, * asas de cuerda

10.3. Cables para las baterías.

Ver página 201.

Cables Para Baterías



Cables Para Baterías 4AWG

SoListo

Los cables SoListo de alta calidad para interconectar baterías son del mejor precio ya que ofrecen cable de cobre multi-trenzado *xtra-flex*. Resisten 105°C, 600 volts. Son tipo (UL) MTW/THW, CSA-TEW. Todos los cables se ensamblan con terminales grandes de cobre electro-platedas para tronillos de 3/8", doble prensado y selladas con camisas de calor y aislamiento de color. Son de larga duración. Capacidad máxima de corriente al aire libre: 4AWG=120A, 2/0=265A, 4/0=360A. Disponible en otras longitudes.



2/0 and 4/0 Battery Cables

| AWG | Longitud (cm) | Color | Peso (g) | Número de Parte |
|-----|---------------|-------|----------|-----------------|
| 4 | 20.3 | negro | 182 | 700KIT004BB8D |
| 4 | 33 | negro | 227 | 700KIT004BB13D |
| 4 | 33 | rojo | 227 | 700KIT004RR13D |
| 4 | 40.6 | negro | 272 | 700KIT004BB16D |
| 4 | 40.6 | rojo | 272 | 700KIT004RR16D |
| 4 | 61 | negro | 363 | 700KIT004BB24D |
| 4 | 61 | rojo | 363 | 700KIT004RR24D |
| 2/0 | 20.3 | negro | 272 | 700KIT2/0BB8D |
| 2/0 | 33 | negro | 318 | 700KIT2/0BB13D |
| 2/0 | 33 | rojo | 318 | 700KIT2/0RR13D |
| 2/0 | 40.6 | negro | 363 | 700KIT2/0BB16D |
| 2/0 | 40.6 | rojo | 363 | 700KIT2/0RR16D |
| 2/0 | 61 | negro | 590 | 700KIT2/0BB24D |
| 2/0 | 61 | rojo | 590 | 700KIT2/0RR24D |
| 2/0 | 91.4 | negro | 726 | 700KIT2/0BB36D |
| 2/0 | 91.4 | rojo | 726 | 700KIT2/0RR36D |
| 2/0 | 122 | negro | 999 | 700KIT2/0BB48D |
| 2/0 | 122 | rojo | 999 | 700KIT2/0RR48D |
| 2/0 | 152.4 | negro | 1,226 | 700KIT2/0BB60D |
| 2/0 | 152.4 | rojo | 1,226 | 700KIT2/0RR60D |
| 4/0 | 20.3 | negro | 363 | 700KIT4/0BB8D |
| 4/0 | 33 | negro | 500 | 700KIT4/0BB13D |
| 4/0 | 33 | rojo | 500 | 700KIT4/0RR13D |
| 4/0 | 45.7 | negro | 590 | 700KIT4/0BB18D |
| 4/0 | 45.7 | rojo | 590 | 700KIT4/0RR18D |
| 4/0 | 61 | negro | 772 | 700KIT4/0BB24D |
| 4/0 | 61 | rojo | 772 | 700KIT4/0RR24D |
| 4/0 | 91.4 | negro | 1,087 | 700KIT4/0BB36D |
| 4/0 | 91.4 | rojo | 1,087 | 700KIT4/0RR36D |
| 4/0 | 122 | negro | 1,407 | 700KIT4/0BB48D |
| 4/0 | 122 | rojo | 1,407 | 700KIT4/0RR48D |
| 4/0 | 152.4 | negro | 1,771 | 700KIT4/0BB60D |
| 4/0 | 152.4 | rojo | 1,771 | 700KIT4/0RR60D |



Cables de Inverso a Batería

Cables de Inverso a Batería

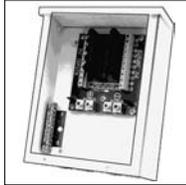
Cables cortados a la medida y terminales prensadas, listado UL. Reducen el tiempo de instalación, mejoran la integridad del sistema y cumplen con códigos. Estos flexibles cables se hacen con terminales de anillo y aislamiento de color. Capacidad NEC en conduita de 230 amp (#4/0 AWG). 175 amp (#2/0 AWG) y al aire libre de 360 amp (#4/0 AWG) ó 265 amp (#2/0 AWG). Los cables se venden en pares.

| Model | Description | Part Number |
|-----------|---------------------------------|-----------------|
| IBC10-2/0 | 3 m, aislamiento rojo y negro | 700KIT2/0ST120D |
| IBC10-4/0 | 3 m, aislamiento rojo y negro | 700KIT4/0ST120D |
| IBC15-2/0 | 4.5 m, aislamiento rojo y negro | 700KIT2/0ST180D |
| IBC15-4/0 | 4.5 m, aislamiento rojo y negro | 700KIT4/0ST180D |

10.4. Caja de combinadores y supresores de rayos.

Ver página 203.

Accesorios de Seguridad



PCB10

Cajas Combinadoras Para Sistemas FV de Pulse

La PCB10 está diseñada para combinar múltiples fuentes fotovoltaicas en un solo circuito abierto. Este combinador permite hasta 10 admisiones con fusible en una caja 3R asegurada y a prueba de lluvia. El combinador PCB10-NEMA es el mismo equipo en una caja NEMA 4X de fibra de vidrio para exteriores. Los combinadores PCB10 tienen listado UL para 12, 24 o 48 VDC de sistemas FV, con un voltaje a circuito abierto máximo de 125 VDC. Cada circuito del combinador puede aceptar fusibles de hasta 15 amp, tipo MDA o ABC (fusibles PCBF se venden por separado en paquetes de 10), con el máximo de corriente nominal de 64 amp de la fuente FV combinada. Cada circuito está protegido contra sobrecorrientes y puede aceptar conductores #10AWG incluyendo la barra de puesta a tierra.

| Modelo de Combinador | Dimensiones (cm) | Peso (kg) | Número de Parte |
|----------------------|---------------------|------------------|-----------------|
| PCB10 | 25.4 x 20.3 x 10.2 | 3.2 | 150TCB10COMBINR |
| PCB10-NEMA | 20.38 x 25.4 x 12.7 | 3.6 | 150PCB10COMB4X |
| Modelo de Fusible | Corriente Nominal | Dimensiones (mm) | Número de Parte |
| PCBF-10 | 10 A | 6 x 32 | 152ACCTCF10 |
| PCBF-15 | 15 A | 6 x 32 | 152ACCTCF15 |

El combinador PCBHV está diseñado para satisfacer el NEC al combinar circuitos de fuentes FV de alto voltaje de hasta 600 V (circuito abierto). Estos ensamblajes se apilan para aceptar 2, 4, 6, 8, 10 ó 12 FV con portafusibles de admisión FV individual e incluye barra de puesta a tierra y bloque de tomas de potencia. Los portafusibles modulares son seguros para los dedos con fusibles tipo KLKD. La caja estándar es de fibra de vidrio NEMA 4X.

| Modelo de Combinador | Dimensiones | Peso (kg) | Número de Parte |
|----------------------|---------------------|------------------|-----------------|
| PCBHV-02 | 20.38 x 25.4 x 12.7 | 3.6 | 510PCBHV-02 |
| PCBHV-04 | 20.38 x 25.4 x 12.7 | 4 | 510PCBHV-04 |
| PCBHV-06 | 20.38 x 25.4 x 12.7 | 4.5 | 510PCBHV-06 |
| PCBHV-08 | 40.6 x 35.5 x 15.2 | 5 | 510PCBHV-08 |
| PCBHV-10 | 40.6 x 35.5 x 15.2 | 5.4 | 510PCBHV-10 |
| PCBHV-12 | 40.6 x 35.5 x 15.2 | 5.9 | 510PCBHV-12 |
| Modelo de Fusible | Corriente Nominal | Dimensiones (mm) | Número de Parte |
| KLKD-10 | 10 A | 38 x 10 | 706FUS10A500V |
| KLKD-15 | 15 A | 38 x 10 | 706FUS15A500VM |
| KLKD-20 | 20 A | 38 x 10 | 706FUS20AATM |
| KLKD-30 | 30 A | 38 x 10 | 706FUS30AATM |



Supresor de Rayos con accesorios de montaje superior (izq) y lateral (der)

Supresores de Rayos

Los supresores de rayos varistores de óxido de silicio resisten altas sobrecorrientes demasiado grandes para otros varistores o capacitores. Todos tienen un diámetro de 57 mm en una caja para intemperie con aperturas de 1/2 pulgada. Incluye cable #12/3 de 45 cm.

| Modelo | Voltaje Nominal | Máx Sobre-corriente | Número de Parte |
|-------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| Supresor DC | 0-250 VDC | 60,000 A | 510ACCLA100V |
| Supresor AC | 0-300 VAC | 60,000 A | 520LA120V302R |

Los capacitores de protección ayudan a prevenir daños en equipo eléctrico AC controlando los altos sobrevoltajes demasiado ligeros o rápidos para un supresor. Reaccionan continuamente con ligeros cambios de voltaje y sin retardo. Incluye cable #12/3 de 45 cm.

| Modelo | Voltaje Nominal | Dimensiones (cm) | Número de Parte |
|--------------|-----------------|------------------|-----------------|
| AC Capacitor | 125/250 VAC | 5.7 diam. x 11.4 | 520SCCA302R |

Accesorio de Montaje para Supresor

| Modelo | Número de Parte |
|------------------|-----------------|
| Montaje Lateral | 510LAMOUNT |
| Montaje Superior | 510LASQDMOUNT |

8/01

10.5. Tarjeta Controladora ezDSP TMS320LF2407 (SPECTRUM DIGITAL) .

La tarjeta controladora DSP que se empleará será la ezDSP TMS320LF2407. Este procesador digital de señales está fabricado con la tecnología de circuitos integrados CMOS. El chip aporta las siguientes ventajas:

- Permite la versatilidad del diseño del TMS320.
- Aporta circuitos integrados de avanzada tecnología con la finalidad de optimizar su funcionamiento.
- Emplea código fuente compatible con los chip 'C1X, 'C2X y C5X.
- Las nuevas técnicas de diseño aseguran minimizar el consumo de la DSP, así como aumentar la tolerancia de la misma frente a radiaciones.

Se incluyen algunas páginas del catálogo en que se describen ciertas señales del procesador digital de señales (en la sección CATÁLOGOS al final del documento).

10.6. Amperímetro bimetálico BIQC .

Se han incluido las páginas de catálogo correspondientes a este modelo, desde la página 205 hasta la página 209.

 **BIQC,**  **BOQC****AMPERÍMETROS MAXÍMETROS CON CONTACTOS**

para C.A.

Sistema bimetálico clase 3

Sistema hierro móvil clase 1,5

MAXIMUM DEMAND INDICATORS WITH CONTACTS

for AC

Bimetallic system class 3

Moving iron system class 1.5

BIQC 96

Escalas 90°

BOQC 96

90° scales



| TIPO / TYPE | | BIQC 96 | | BOQC 96 | |
|---------------------------------------|---|---|------------------|------------------|------------------|
| Medidas marco / Bezel dimensions (mm) | | 96 × 96 | | 96 × 96 | |
| Longitud escalas / Scale lengths (mm) | Bimetálico / Bimetallic | 87 | | 78,5 | |
| | Hierro móvil / Moving iron | - | | 89 | |
| Tiempo de respuesta / Response time | | 8 min. | 15 min. | 8 min. | 15 min |
| Alcances / Ranges | Tensión auxiliar / Auxiliary voltage (50-60 Hz) | REFERENCIA / REFERENCE (Añadir referencia de la escala / Add reference of the scale) | | | |
| 1,2 A | 110 V | 0 0540 211 - ... | 0 0540 231 - ... | 0 0550 211 - ... | 0 0550 231 - ... |
| | 220 V | 0 0540 213 - ... | 0 0540 233 - ... | 0 0550 213 - ... | 0 0550 233 - ... |
| | 230 V | 0 0540 214 - ... | 0 0540 234 - ... | 0 0550 214 - ... | 0 0550 234 - ... |
| | 380 V | 0 0540 216 - ... | 0 0540 236 - ... | 0 0550 216 - ... | 0 0550 236 - ... |
| 6 A | 110 V | 0 0540 251 - ... | 0 0540 271 - ... | 0 0550 251 - ... | 0 0550 271 - ... |
| | 220 V | 0 0540 253 - ... | 0 0540 273 - ... | 0 0550 253 - ... | 0 0550 273 - ... |
| | 230 V | 0 0540 254 - ... | 0 0540 274 - ... | 0 0550 254 - ... | 0 0550 274 - ... |
| | 380 V | 0 0540 256 - ... | 0 0540 276 - ... | 0 0550 256 - ... | 0 0550 276 - ... |
| | 400 V | 0 0540 257 - ... | 0 0540 277 - ... | 0 0550 257 - ... | 0 0550 277 - ... |

APLICACIÓN

Los aparatos tipos BIQC y BOQC incorporan en un mismo aparato las funciones de maxímetro bimetalico y de relé de sobreintensidad. Se utilizan para el control de cargas, protegiendo líneas, transformadores e instalaciones eléctricas en general. Gracias a su gran inercia térmica, las puntas de corriente de corta duración no son registradas ni ocasionan el disparo del relé, de manera que el aparato indica mediante una aguja negra el valor medio de la intensidad eficaz en un periodo determinado (15 u 8 minutos). La máxima indicación queda registrada por una aguja roja, arrastrada por la anterior. Mediante un botón giratorio precintable se puede bajar la roja hasta la posición de la aguja negra, para realizar una nueva lectura.

El tipo BOQC incorpora un amperímetro de hierro móvil, para la medida de valor eficaz de la intensidad en todo momento, incluso con formas de onda distorsionadas, con solamente una pequeña influencia en la precisión.

El nivel de disparo del relé (de contactos conmutados libres de potencial) se ajusta mediante un botón situado en la parte posterior del aparato, y que acciona un índice visible a través de una ranura en la esfera del bimetalico. En la ejecución estándar, la bobina del relé se encuentra normalmente energizada. Cuando la aguja del maxímetro alcanza o rebasa el valor prefijado se desactiva la bobina, lo que se señaliza mediante el paso de color verde a rojo de un LED. La pérdida de la tensión auxiliar ocasiona asimismo el paso del relé al estado de alarma.

Los BIQC y BOQC son adecuados para su montaje en cuadros de conmutación, paneles de control, etc.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El maxímetro utiliza un sistema bimetalico, con una espiral que se calienta por efectos de la corriente moviendo el eje, y otra en oposición para compensar el efecto de la temperatura ambiente. El amperímetro instantáneo (BOQC) utiliza un sistema de hierro móvil con suspensión mediante cojinetes con resorte, para resistir vibraciones y choques. El circuito de disparo del relé es electrónico, y está aislado ópticamente del circuito de medida.

PRECISIÓN

Clase de precisión, según IEC y UNE EN 60051:

- 3 para el maxímetro
- 1,5 para el amperímetro de hierro móvil

Precisión del relé:

- 2,5% de la longitud de escala
- Repetibilidad: < 1,5% de la longitud de escala
- Histéresis de conmutación: < 1,5% de la longitud de escala

| Intensidad primaria (I _{pn}) / Primary current (I _p) | Fondo de escala / Full-scale | | Referencia de la escala / Reference of the scale | |
|--|------------------------------|------------------------------------|--|------------|
| | Bimetálico / Bimetallic | Hierro móvil / Moving iron | | |
| | 1,2 I _{pn} | I _{pn} /2 I _{pn} | | |
| A | 5 | 6 | 5/10 | ... - 3500 |
| | 10 | 12 | 10/20 | ... - 4100 |
| | 15 | 18 | 15/30 | ... - 4150 |
| | 20 | 24 | 20/40 | ... - 4200 |
| | 25 | 30 | 25/50 | ... - 4250 |
| | 30 | 36 | 30/60 | ... - 4300 |
| | 40 | 48 | 40/80 | ... - 4400 |
| | 50 | 60 | 50/100 | ... - 4500 |
| | 60 | 72 | 60/120 | ... - 4600 |
| | 75 | 90 | 75/150 | ... - 4750 |
| | 100 | 120 | 100/200 | ... - 5100 |
| | 125 | 150 | 125/250 | ... - 5125 |
| | 150 | 180 | 150/300 | ... - 5150 |
| | 200 | 240 | 200/400 | ... - 5200 |
| 250 | 300 | 250/500 | ... - 5250 | |
| 300 | 360 | 300/600 | ... - 5300 | |
| 400 | 480 | 400/800 | ... - 5400 | |
| 500 | 600 | 500/1000 | ... - 5500 | |
| 600 | 720 | 600/1200 | ... - 5600 | |
| 750 | 900 | 750/1500 | ... - 5750 | |
| 800 | 960 | 800/1600 | ... - 5800 | |
| kA | 1 | 1,2 | 1/2 | ... - 6100 |
| | 1,2 | 1,44 | 1,2/2,4 | ... - 6120 |
| | 1,5 | 1,8 | 1,5/3 | ... - 6150 |
| | 2 | 2,4 | 2/4 | ... - 6200 |
| | 2,5 | 3 | 2,5/5 | ... - 6250 |
| | 3 | 3,6 | 3/6 | ... - 6300 |
| | 4 | 4,8 | 4/8 | ... - 6400 |
| 5 | 6 | 5/10 | ... - 6500 | |

CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

Cajas para montaje empotrado en panel según DIN IEC 61554, posición vertical. En chapa de acero, con bases en termoplástico autoextinguible UL 94 - V0.
Marcos tipo S según DIN 43718, color negro RAL 9005.
Grado de protección parte frontal (según IEC y EN 60529): IP 52.
Fijación mediante 2 espárragos roscados.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Rangos de medida: 6 y 1,2 A, correspondientes a los valores normalizados de intensidad secundaria I_n (.../5 y .../1 A) mas un 20% de sobrecarga.
Capacidad de sobrecarga: 1,2 veces I_n (continua), 10 veces I_n (0,5 segundos). Para sobrecargas mayores, debe protegerse el aparato conectándolo a través de un transformador de intensidad saturable.
Tensión nominal de aislamiento: 600 V. Tensión de prueba dieléctrica: 2 kV, 50 Hz durante 1 minuto, según IEC-414.
Tiempo de respuesta: 15 u 8 minutos para el maximetro, aproximadamente 1 segundo para el sistema de hierro móvil.
Consumos internos: Ver tabla.
Tolerancia de la tensión auxiliar: $0,9 U_n - 1,1 U_n$.
La entrada de medida, la alimentación y los contactos de salida están separados eléctricamente.
Regulación del punto de disparo (ángulo de la escala): entre 15° y 90° .

APPLICATION

The BIQC and BOQC combine a maximum demand meter and an over-current relay in one instrument. They are used to monitor loads, protecting feeders, transformers and electrical installations in general. Due to its long response time, short-time current peaks neither are registered nor cause the tripping of the relay. A black pointer indicates the mean of the r.m.s. current in a specified period of time (15 or 8 minutes). The maximum indication is registered by a red pointer, dragged by the black one. By means of a sealable knob it is possible to reset the red pointer to the position of the black one in order to make a new reading.

The BOQC is equipped with a moving-iron ammeter for measuring the r.m.s. value of the current at any time, even with harmonics, with a minor influence on the accuracy.

The set point of the relay (with potential-free change-over contacts) is adjusted by means of a knob located on the rear side of the instrument, that moves an index, visible through a slot on the dial. The relay coil is normally energized. When the pointer of the bimetallic system reaches or exceeds the set point, the coil is de-energized (closed-circuit principle, standard version). This is optically signalled by a LED, changing from green to red. In case of power failure, the relay moves to the alarm (over-current) state.

The BIQC and BOQC are suitable to be mounted in switchboards, control panels, etc.

SYSTEM DESCRIPTION

The maximum demand indicator consists of a bimetallic spiral which is expanded by the heat caused by the current circulating in it, driving the pointer. A second spiral, mounted in opposition, compensates the effect of the ambient temperature. The ammeter (in the BOQC) uses a moving-iron movement with pivot suspension and spring loaded jewel bearings for vibration and shock resistance. The tripping circuit is electronic, optically insulated from the measuring circuit.

ACCURACY

Accuracy class, according to IEC and EN 60051:

*3 for the maximum demand indicator
1.5 for the moving-iron ammeter*

Relay accuracy:

*2.5% of scale length
Repeatability: < 1.5 % of scale length
Differential: < 1.5 % of scale length*

Características de los contactos de salida (corriente alterna):

Potencia máxima de maniobra: 2000 VA, con carga resistiva
Tensión máxima de maniobra: 400 V
Intensidad máxima de maniobra: 8 A
Vida eléctrica: 10^5 maniobras a potencia máxima, $\cos \varphi=1$

ESCALAS

Maximetro: El valor final de escala es 1,2 veces I_{In} , siendo I_{In} la intensidad nominal primaria del transformador de intensidad al que se conecta el aparato. Escala cuadrática de 90° .

Sistema de hierro móvil: Escala de 90° prolongada a 2 veces I_{In} , con inicio comprimido.

Divisionado grueso-fino según DIN 43802 en ambos casos.

HOMOLOGACIONES

Marcado CE.

| CONSUMOS INTERNOS BURDEN / INTERNAL CONSUMPTION | | |
|--|--------------------|----------------|
| Circuito de medida Measuring circuit | BIQC 96 BOQC 96 | 2 VA 2,8 VA |
| Tensión auxiliar Auxiliary supply | | 4 VA |

STRUCTURAL CHARACTERISTICS

DIN IEC 61554 housings, mounting in vertical position. Made of steel sheet, with bases of self-extinguishing thermoplastic V0 according to UL 94.

Bezels type S according to DIN 43718, black RAL 9005.

Degree of protection, front side (according to IEC and EN 60529): IP 52.

Panel fixing through 2 screw clamps.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Measuring ranges: 6 and 1.2 A, corresponding to the rated secondary current values for current transformers I_n (.../5 A and .../1 A), plus 20% overload.

Overload capacity: 1.2 times I_n (continuously), 10 times I_n (0.5 seconds). Saturating current transformers shall be used to protect the instruments against overloads exceeding this rating.

Rated insulation voltage: 600 V. Test voltage: 2 kV, 50 Hz during 1 minute, according to IEC-414.

Response time: 15 or 8 minutes for the maximum demand indicator; approx. 1 second for the moving-iron instrument.

Internal consumption and burden: see table.

Auxiliary supply tolerance: $0.9 U_n - 1.1 U_n$.

Measuring input, auxiliary supply and output contacts are electrically insulated.

Set point adjustment (scale angle): $15^\circ \dots 90^\circ$

Output contact characteristics (AC):

Maximum power switching: 2000 VA with resistive load

Maximum voltage rating: 400 V

Maximum switching current: 8 A

Electrical life: 10^6 operations at maximum power, $\cos \varphi=1$

SCALES

Maximum demand indicator: The full-scale value is 1.2 times I_n (I_n is the rated primary current of the current transformer). 90° scale, quadratic.

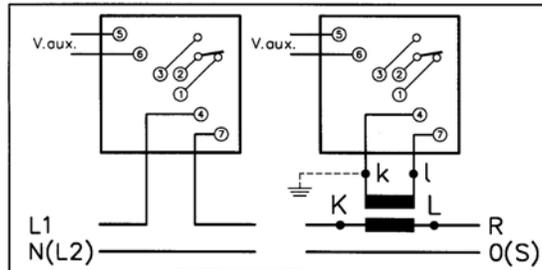
Moving iron system: 90° , with overload scale 2 I_n , compressed at the beginning.

Coarse-fine division according to DIN 43802 for both scales.

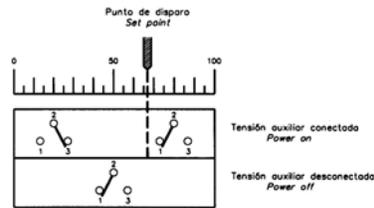
APPROVALS

CE marking.

ESQUEMAS DE CONEXIÓN / CONNECTION DIAGRAMS



Posición de contactos para aparato desconectado / Contact position for disconnected instrument



Operación de los contactos según la posición de la aguja indicadora / Contact operation depending upon meter pointer position

DISPOSICIÓN DE LAS ESCALAS / SCALES ARRANGEMENT

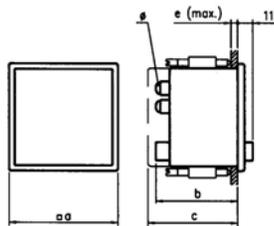


BIQC 96



BOQC 96

DIMENSIONES / DIMENSIONS



| Tipo Type | Alcances Ranges | Dimensiones (mm) Dimensions (mm) | | | | | Abertura panel Panel cut-out (mm) | Peso Weight (g) |
|--------------|--------------------|-------------------------------------|-----|-----|---|----|---|-----------------------|
| | | a | b | c | e | ∅ | | |
| BIQC 96 | .../5 A | 96 | 97 | 102 | 8 | M4 | □92 ^{+0.8} | 560 |
| | .../1 A | | 115 | - | | | | 675 |
| BOQC 96 | .../5 A | 96 | 113 | 118 | 8 | M4 | □92 ^{+0.8} | 720 |
| | .../1 A | | 131 | - | | | | 840 |

Dos espárragos de fijación incluidos sin cargo / Two fixing screw clamps included without extra charge

Juntas de panel, cubrebornas y fijaciones, ver lista de accesorios / Panel gaskets, terminal covers and fixing clamps, see accessories list

| REFERENCIAS - EJECUCIONES ESPECIALES | REFERENCES - SPECIAL EXECUTIONS |
|---|---|
| <p>Caja:</p> <p>002 Montaje en posición distinta de la vertical 003 Tensión de prueba mayor de 2 kV 005 Cristal policarbonato irrompible 006 Cristal antirreflexivo 007 Marco frontal gris RAL 7037 034 Iluminación blanca (sólo BIQC 96) 035 Iluminación roja (sólo BIQC 96) 157 Montaje con bridas de fijación DIN 43835 tipo B</p> <p>Escala:</p> <p>008 Trazo de color 009 Franja de color 010 Trazos y números de color 011 Indicaciones adicionales en la esfera 012 Escala para otras magnitudes 013 Divisiones no normalizadas 014 Doble numeración 018 Esfera negra, divisiones, indicaciones y aguja en blanco o amarillo 102 Escala en blanco</p> <p>Eléctricas:</p> <p>108 Bimetalico con escala prolongada a 1,5 I_n 022 Sistema de hierro móvil con escala prolongada a 1,2 I_n (sólo BOQC 96) 024 Sistema de hierro móvil con escala prolongada a 5 I_n (sólo BOQC 96) 025 Sistema de hierro móvil con otra prolongación de escala (sólo BOQC 96) 029 Calibrado para corriente continua 031 Calibrado a frecuencias especiales 067 Tensión auxiliar no estándar 119 Relé desactivado en estado normal</p> | <p>Housing:</p> <p>002 Mounting in position different from vertical 003 Test voltage higher than 2 kV 005 Unbreakable polycarbonate glass 006 Anti-reflexive glass 007 Grey bezel RAL 7037 034 White illumination (only BIQC 96) 035 Red illumination (only BIQC 96) 157 Panel fixing with screw clamps DIN 43835 type B</p> <p>Scale:</p> <p>008 Coloured stroke 009 Coloured stripe 010 Coloured divisions and numbers 011 Additional lettering 012 Scale for other quantities 013 Non-standard divisions 014 Double numbering 018 Black dials with white or yellow pointer and markings 102 Blank scale</p> <p>Electrical:</p> <p>108 Bimetallic system with overload scale 1.5 I_n 022 Moving-iron system with overload scale 1.2 I_n (only BOQC 96) 024 Moving-iron system with overload scale 5 I_n (only BOQC 96) 025 Moving-iron system with other overload scale (only BOQC 96) 029 Calibration for DC 031 Calibration for special frequencies 067 Non-standard auxiliary voltage 119 De-energized relay in normal state (open circuit principle)</p> |
| <p>REFERENCIAS - ACCESORIOS</p> <p>0 8911 112 1245 Tapa cubrebomas (sólo aparatos .../5 A) 0 8911 111 1324 Cubrebomas unitario Ø10 mm 0 8910 112 1240 Junta panel 0 8910 512 0166 Cubierta de protección frontal IP65 0 8910 000 0006 Idem con dos bridas de fijación roscadas 0 8912 111 0110 Brida fijación a panel 0 8912 111 1347 Muelle de fijación a panel 0 8912 111 1360 Brida de fijación a panel DIN 43835 forma B</p> | <p>REFERENCES - ACCESSORIES</p> <p>0 8911 112 1245 Terminal cover (only for .../5 A instruments) 0 8911 111 1324 Individual terminal sleeve, Ø10 mm 0 8910 112 1240 Panel gasket 0 8910 512 0166 Frontal protection cover IP65 0 8910 000 0006 Id. with two screw clamps 0 8912 111 0110 Fixing screw clamp 0 8912 111 1347 Fixing spring clamp 0 8912 111 1360 Fixing screw clamp DIN 43835 type B</p> |
| <p>ESPECIFICACIÓN DE PEDIDO</p> <p>1.- Tipo de aparato 2.- Tiempo de respuesta 3.- Relación de transformación 4.- Tensión auxiliar 5.- Ejecuciones especiales (añadir sus referencias a la del aparato)</p> <p>Ejemplo: BOQC 96 15 min., 500/5 A, 230 V, cristal antirreflexivo: Ref.: 0 0550 274 5500 / 006</p> | <p>ORDERING INFORMATION</p> <p>1.- Type 2.- Response time 3.- Transformation ratio 4.- Auxiliary voltage 5.- Special executions (add their references to the instrument reference)</p> <p>Example: BOQC 96 15 min., 500/5 A, 230 V, anti-reflexive glass: Ref.: 0 0550 274 5500 / 006</p> |

| CELSA Aparatos de Medida, S.A. | CELSA Messgeräte GmbH |
|---|--|
| C/ Plátanos, 19-25 / E-46025 VALENCIA (SPAIN) P. O. Box 10243 / E-46080 VALENCIA (SPAIN) Tel. : Nac. 96-340 03 22 / Int. ...+34-96-340 03 22 Fax. : Nac. 96-348 44 69 / Int. ...+34-96-348 23 55 E-mail : Nac. nacional@celsavalencia.com / Int. export@celsavalencia.com Web site: www.celsavalencia.com | Barthelsmühlring, 16 D-76870 KANDEL (GERMANY) Tel. Nat: 07275 / 9883-0 Fax. Nat: 07275 / 9883-33 E-mail : info@celsa-messgeraete.de Web site: www.celsa-messgeraete.de |

Reservado el derecho a modificaciones técnicas / All rights reserved for technical changes

Edición nº / Issue no. 030322

Capítulo **11**

PRESUPUESTO ESTIMADO.

| Nº Id | Descripción | Dimensiones | Ud. | Precio ud. | Importe |
|---|---|----------------------|-----|------------|---------|
| A. MÓDULO DE GENERACIÓN (INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA) | | | | | |
| A.1 | Módulo fotovoltaico BP-SOLAR modelo BP-250 de silicio monocristalino | 82.5x53x4.35 cm | 3 | 670.00 | 2010.00 |
| A.2 | Cables o interconectores para módulos, marca Solisto modelo 795MICLT10-2X33 | MIC-LT #10-2x83.2 cm | - | - | - |
| A.4 | Batería acumuladora marca CONCORDE, modelo PVX12255L | 52.7x27.8x26 cm | 1 | 480.00 | 480.00 |
| A.5 | Cables para Baterías, marca Solisto, modelo 700KIT004BB24D | 61 cm | - | - | - |
| A.6 | Cables para Baterías, marca Solisto, modelo 700KIT004RR24D | 61 cm | - | - | - |
| A.9 | Supresores de rayos de continua Solisto, montaje lateral, modelo 510ACCLA100V (supresor); 510LAMOUNT (montaje), incluida instalación. | - | 1 | 56.00 | 56.00 |
| A.10 | Supresores de rayos de alterna Solisto, montaje lateral, modelo 520LAI20V302R (supresor); 510LAMOUNT (montaje), incluida instalación. | - | 1 | 74.00 | 74.00 |
| A.11 | Capacitor de protección para alterna Solisto, modelo 520SCCA302R | ∅ 5.7x11.4 cm | 1 | - | - |
| B. MÓDULO DE CONVERSIÓN Y REGULACIÓN DE TENSIÓN | | | | | |
| B.3 | Cables de conexión Tarjeta DSP-medidor de flujo de 0.5mm para transmisión de señales | 15 m | 2 | 0.50/m | 15.00 |
| B.4 | Medidor de Flujo, diseño propio. | - | 1 | 36.00 | 36.00 |
| B.5 | Amperímetro sistema bimetalico modelo BIQC, | - | 1 | 59.50 | 59.50 |

| | | | | | |
|---|---|------------------|---|------------|----------------|
| | soportes incluidos | | | | |
| B.6 | Batería de Condensadores a 220V de polipropileno axial modelo PPA2/4.7. | 37φ x 85 | 3 | 4.95 | 14.85 |
| B.7 | Inversor DC/AC de 24V/220V de diseño propio, con admisión de control de secuencias de corte. | (Coste estimado) | 1 | 390.00 | 390.00 |
| B.8 | Transformador de potencia de 220/6 V, y de potencia máxima de 150 VA. | - | 1 | 45.00 | 45.00 |
| B.9 | Transformador de potencia de 24/220 V y de potencia máxima 100 VA | | 1 | 105.00 | 105.00 |
| B.9 | Desarrollo del equipo de control (incluido materiales) Tarjeta ezDSP modelo TMS320LF2407 de Spectrum Digital (procesador de Texas Instruments). Software Code Composer C2xxx. | - | 1 | 3000 | 3000 |
| C. LAZO DE CORRIENTE. | | | | | |
| C.1 | Conductor tipo LA-455 | 740 m | 1 | 3.11 (€/m) | 2301.40 |
| C.2 | Apoyos POSTEMEL, tronco-piramidal | 17 m altura | 2 | 480.00 | 960.00 |
| COSTES TOTALES ESTIMADOS¹ | | | | | 9546.75 |

¹ Costes de **material**. Mano de obra, permisos, etc. no incluidos, salvo indicación.

Parte III

Apéndices

Apéndice **A**

CÓDIGO FUENTE DE LA HERRAMIENTA “ELIPSES DE INDUCCIÓN”.

En este apéndice se incluye parte del código fuente correspondiente a la herramienta de simulación “Elipses de Inducción”, que se empleó para el trazado de las elipses de inducción en puntos próximos a la línea en el capítulo 7. Se han omitido aquellas partes de código que no aportan demasiado al algoritmo o proceso de cálculo, o que se centran en los aspectos relacionados con la interfaz de usuario.

A.1. Módulo ModCalculos.bas.

```
Attribute VB_Name = "ModCalculos"  
Option Explicit  
Option Base 1  
  
Public Type Complejo  
    Modulo As Double  
    Fase As Double  
End Type  
  
Public CadConf As String  
  
Dim Bjx As Complejo
```

```
Dim Bjy As Complejo
```

```
' Para cada uno de los sumandos. Como hay 6 conductores,  
' se tendrán 6 sumandos.
```

```
Dim BjxReal(6) As Double
```

```
Dim BjxIm(6) As Double
```

```
Dim BjyReal(6) As Double
```

```
Dim BjyIm(6) As Double
```

```
Dim BjxR As Double
```

```
Dim BjxI As Double
```

```
Dim BjyR As Double
```

```
Dim BjyI As Double
```

```
' Reserva de memoria para los vectores de resultados
```

```
Public A(360) As Double
```

```
Public B(360) As Double
```

```
Dim t As Double
```

```
' Corrientes por cada conductor
```

```
Dim CorrienteC(6) As Complejo
```

```
' Declaración de Constantes.
```

```
' Módulo de la corriente circulante por la línea
```

```
Public Const MODCORRIENTE = 200
```

```
' Los ángulos los tomaremos y usaremos en grados
```

```
Public Const AnguloFaseA = 0
```

```
Public Const AnguloFaseB = 4.18879
```

```
Public Const AnguloFaseC = 2.094395
```

```
' Coordenadas de los conductores
```

```
Public Const XC1 = 7.5
```

```
Public Const YC1 = 30.03
```

```
Public Const YC2 = 22.88
```

```
Public Const YC3 = 14.07
```

```
' Coordenadas del punto donde se toma la medida
' Public Const Xj = 45
' Public Const Yj = 2
' Se les asigna el valor mediante la GUI
' de modo que se puedan efectuar los
' cálculos para diferentes puntos.

Dim Xj As Double
Dim Yj As Double

Dim VecAuxiliar(6) As Complejo
Dim x(6) As Double
Dim Y(6) As Double

Dim SENTIDO As Boolean

Sub CalculosElipse()
Dim i As Double
Dim Inicio As Double
Dim InicioP As Double
' Asignación de las corrientes a cada conductor
' En VecAuxiliar se introducen los valores
' de las fases como si fuesen en orden
Xj = Cdbl(Form1.Text1.Text)
Yj = Cdbl(Form1.Text2.Text)
For i = 1 To 6
    VecAuxiliar(i).Modulo = MODCORRIENTE
Next
    VecAuxiliar(1).Fase = AnguloFaseA
    VecAuxiliar(2).Fase = AnguloFaseB
    VecAuxiliar(3).Fase = AnguloFaseC
For i = 4 To 6
    VecAuxiliar(i).Fase = VecAuxiliar(i - 3).Fase
Next
' La corriente va a tener siempre el mismo módulo
For i = 1 To 6
    DoEvents
```

```
        CorrienteC(i).Modulo = MODCORRIENTE
    Next

    ' Ahora hay que asignar las fases de acuerdo a
    ' como han sido establecidas en los combobox del
    ' formulario

    ' En primer lugar para el Circuito Primero
    Select Case Form1.LblSecuencia(0).Caption
        Case "a"
            Inicio = 1
        Case "b"
            Inicio = 2
        Case "c"
            Inicio = 3
    End Select

    ' Para el segundo circuito
    Select Case Form1.LblSecuencia(3).Caption
        Case "a"
            InicioP = 1
        Case "b"
            InicioP = 2
        Case "c"
            InicioP = 3
    End Select

    For i = 1 To 3
        CorrienteC(i).Fase = VecAuxiliar(Inicio).Fase
        Inicio = Inicio + 1
    Next

    For i = 4 To 6
        CorrienteC(i).Fase = VecAuxiliar(InicioP).Fase
        InicioP = InicioP + 1
    Next

    ' Composición de los vectores de posición
    For i = 1 To 3
```

```
x(i) = XC1
x(i + 3) = -XC1
Next
Y(1) = YC1
Y(2) = YC2
Y(3) = YC3
For i = 1 To 3
    Y(i + 3) = Y(i)
Next

' Cálculo de los sumandos implicados en cada expresión
' de componente (x e y) del campo magnético
Calculo_Sumandos

' Suma de los términos
SumaT

' Generación de los puntos para su posterior
' representación para cada t
' Se calcula
' Bx.modulo*cos(t + Bx.fase) a lo que llamaremos A
' Se calcula
' By.modulo*cos(t + By.fase) a lo que llamaremos B

For t = 1 To 360
DoEvents
    A(t) = Bx.Modulo * Cos(t * 3.141598 / 180 + Bx.Fase)
    B(t) = By.Modulo * Cos(t * 3.141598 / 180 + By.Fase)
Next

End Sub
Sub Calculo_Sumandos()
Dim i As Double
Dim T1 As Double
Dim T2 As Double
Dim T3 As Double
For i = 1 To 6
    T1 = Y(i) - Yj
```

```

        T2 = (Yj - Y(i)) ^ 2
        T3 = (Xj - x(i)) ^ 2
        BjxReal(i) = ((CorrienteC(i).Modulo *
Cos(CorrienteC(i).Fase)) * T1) / (T2 + T3)
        BjxIm(i) = ((CorrienteC(i).Modulo *
Sin(CorrienteC(i).Fase)) * T1) / (T2 + T3)
        T1 = x(i) - Xj
        BjyReal(i) = ((CorrienteC(i).Modulo *
Cos(CorrienteC(i).Fase)) * T1) / (T2 + T3)
        BjyIm(i) = ((CorrienteC(i).Modulo *
Sin(CorrienteC(i).Fase)) * T1) / (T2 + T3)
    Next
End Sub
Sub SumaT()
    Dim i As Double
    BjxR = 0
    BjyR = 0
    BjxI = 0
    BjyI = 0
    For i = 1 To 6
        BjxR = BjxR + BjxReal(i)
        BjxI = BjxI + BjxIm(i)
        BjyR = BjyR + BjyReal(i)
        BjyI = BjyI + BjyIm(i)
    Next
    BjxR = BjxR * 2
    BjxI = BjxI * 2
    BjyR = BjyR * (-2)
    BjyI = BjyI * (-2)

    ' Cálculo de los complejos
    Bjx.Modulo = Sqr(BjxR ^ 2 + BjxI ^ 2)
    Bjy.Modulo = Sqr(BjyR ^ 2 + BjyI ^ 2)
    If BjxR = 0 Then
        If BjxI > 0 Then Bjx.Fase = 3.141598 / 2
        If BjxI < 0 Then Bjx.Fase = -3.141598 / 2
    Else
        Bjx.Fase = Atn(BjxI / BjxR)

```

```
End If
If BjyR = 0 Then
    If BjyI > 0 Then Bjy.Fase = 3.141598 / 2
    If BjyI < 0 Then Bjy.Fase = -3.141598 / 2
Else
    Bjy.Fase = Atn(BjyI / BjyR)
End If
End Sub
Sub TrazadoElipse()
' Rutina que dibuja la elipse de inducción
Dim i As Double
Dim NN As Integer
Dim max1 As Double, max2 As Double
Dim Max
max1 = 0
max2 = 0
For i = 1 To 360
DoEvents
    If A(i) > max1 Then max1 = A(i)
    If B(i) > max2 Then max2 = B(i)
Next
If max1 > max2 Then
    Max = max1
Else
    Max = max2
End If

NN = Int(Max + 2)

' Escalado del picturebox.
Form1.Elipse.Scale (-Max * 2, Max * 2)-(Max * 2, -Max * 2)

Form1.Elipse.DrawWidth = 1

For i = -NN To NN Step 1

    Form1.Elipse.Line (-NN, i)-(NN, i), &H8000000F
    Form1.Elipse.Line (i, -NN)-(i, NN), &H8000000F
```

```
Next

' Trazado de los ejes.
Form1.Elipse.DrawWidth = 2

Form1.Elipse.Line (-NN, 0)-(NN, 0), &HA5AFAC
Form1.Elipse.Line (0, -NN)-(0, NN), &HA5AFAC

Dim Color

For i = 1 To 360
DoEvents

' Coloreado de la Elipse
Select Case i
    Case 1 To 30
        Color = &HDC0101
    Case 31 To 60
        Color = &HDB7402
    Case 61 To 90
        Color = &HDCB601
    Case 91 To 120
        Color = &HC1DD00
    Case 121 To 150
        Color = &H9BDD00
    Case 151 To 180
        Color = &H69DD00
    Case 181 To 210
        Color = &H26DD00
    Case 211 To 240
        Color = &H26DD00
    Case 241 To 270
        Color = &H1A90E
    Case 271 To 300
        Color = &H1A948
    Case 301 To 330
```

```
        Color = &H1A977
    Case 331 To 360
        Color = &HAA95&
End Select
    Form1.Elipse.PSet (A(i), B(i)), Color

    ' ProgressBar
    Form1.PB.Value = i
Next

Form1.Elipse.CurrentX = max1
Form1.Elipse.CurrentY = 0
Form1.Elipse.Print CStr(CCur(max1))

Form1.Elipse.CurrentY = max2
Form1.Elipse.CurrentX = 0
Form1.Elipse.Print CStr(CCur(max2))

If Form1.Check1.Value = 1 Then
    Form1.Elipse.DrawWidth = 6
    Form1.Elipse.PSet (A(1), B(1)), vbRed
    Form1.Elipse.DrawWidth = 1
    Form1.Elipse.Circle (A(1), B(1)), (Max / 20), vbRed
    Form1.Elipse.DrawWidth = 1
End If

' Sección de cálculo de giro de Elipse:
' + --> Sentido de giro igual al de las agujas del reloj
' - --> Sentido de giro contrario al anterior
If Atn(B(1) / A(1)) > Atn(B(2) / A(2)) Then
    SENTIDO = True 'SENTIDO POSITIVO
Else
    SENTIDO = False
End If

Form1.Elipse.CurrentX = -Max * 1.8
Form1.Elipse.CurrentY = Max * 1.8
If SENTIDO = True Then
```

```

        Form1.Elipse.Print "Sentido de Giro (+)"
    Else
        Form1.Elipse.Print "Sentido de Giro (-)"
    End If

    Dim Fichero As String
    Dim N As Double
    Dim Cadena As String

    ' Guarda los resultados en un archivo *.csv
    If Form1.Check2.Value = 1 Then
        N = FreeFile
        ' Fichero = App.Path & "\ResElipses.csv"
        Fichero = App.Path & "\" & Trim(CadConf) & ".csv"
        Open Fichero For Output As #N
            For i = 1 To 360
                Cadena = A(i) & ";" & B(i)
                Print #N, Cadena
            Next
        Close #N
    End If
End Sub

```

A.2. Módulo modFO.bas.

```

' MÓDULO PARA EL TRAZADO DE LAS
' SEÑALES Bx Y By.
'-----
Attribute VB_Name = "modFO"
Option Explicit
Option Base 1

Public X1(360) As Double
Public X2(360) As Double
Public Y1(360) As Double
Public Y2(360) As Double
Dim NUnico As Boolean
Dim L As Integer

```

```
Dim MaxX As Double
Dim MaxY As Double
Public Nombre1 As String
Public Nombre2 As String

Sub FO()
On Error Resume Next
    ' Carga de los archivos.
    Dim I As Integer
    Dim J As Integer
    Dim Fich As Integer
    Dim Cadena As String
    NUnico = False
    Fich = FreeFile
    Open frmFO.Text1.Text For Input As #Fich
        For I = 1 To 360
            Line Input #Fich, Cadena
            J = InStr(Cadena, ";")

            X1(I) = CDb1(Left(Cadena, (J - 1)))
            Y1(I) = CDb1(Right(Cadena, Len(Cadena) - J))
        Next
    Close #Fich
    If frmFO.Text2.Text <> "" Then
        Fich = FreeFile
        Open frmFO.Text2.Text For Input As #Fich
            For I = 1 To 360
                Line Input #Fich, Cadena
                J = InStr(Cadena, ";")
                NUnico = True
                X2(I) = CDb1(Left(Cadena, (J - 1)))
                Y2(I) = CDb1(Right(Cadena, Len(Cadena) - J))
            Next
        Close #Fich
    End If

    ' Ya están cargados todos los datos
    ' Obtención de los máximos
```

```
MaxX = 0
MaxY = 0

For I = 1 To 360
  If X1(I) > X2(I) Then
    If X1(I) > MaxX Then
      MaxX = X1(I)
    End If
  Else
    If X2(I) > MaxX Then
      MaxX = X2(I)
    End If
  End If
  If Y1(I) > Y2(I) Then
    If Y1(I) > MaxY Then
      MaxY = Y1(I)
    End If
  Else
    If Y2(I) > MaxY Then
      MaxY = Y2(I)
    End If
  End If
Next

L = CInt(MaxX) * 10 + 20

' SE LIMPIAN LAS ANTERIORES CURVAS
frmFO.PctCurvas.Cls
frmFO.PctCurvas2.Cls

' Trazado de las curvas.
frmFO.PctCurvas.Scale (-20, 120)-(380, -160)

For I = -11 To 11
  frmFO.PctCurvas.Line_
(-10, I * 10)-(370, I * 10), &H8000000F
  frmFO.PctCurvas.Line_
(-10, -10)-(370, -10), &H8000000F
```

```
Next

    frmFO.PctCurvas.DrawWidth = 2

frmFO.PctCurvas.Line (90, -110)-(90, 110), &HA5AFAC
frmFO.PctCurvas.Line (180, -110)-(180, 110), &HA5AFAC
frmFO.PctCurvas.Line (270, -110)-(270, 110), &HA5AFAC
frmFO.PctCurvas.Line (360, -110)-(360, 110), &HA5AFAC

    frmFO.PctCurvas.Line (-10, 0)-(370, 0), &HA5AFAC
    frmFO.PctCurvas.Line (0, -110)-(0, 110), &HA5AFAC

    frmFO.PctCurvas.DrawWidth = 1

For I = 1 To 37
    frmFO.PctCurvas.Line_
(I * 10, -110)-(I * 10, 110), &H8000000F
Next
    frmFO.PctCurvas.Line_
(-10, -110)-(-10, 110), &H8000000F

    frmFO.PctCurvas.DrawWidth = 2
For I = 1 To 360
    frmFO.PctCurvas.PSet (I, 20 * X1(I)), vbBlue
Next
If NUnico = True Then
    For I = 1 To 360
        frmFO.PctCurvas.PSet (I, 20 * X2(I)), vbRed
    Next
End If

' Trazado de las curvas para By
```

```
frmF0.PctCurvas2.Scale (-20, 120)-(380, -160)

For I = -11 To 11
    frmF0.PctCurvas2.Line_
(-10, I * 10)-(370, I * 10), &H8000000F
    frmF0.PctCurvas2.Line_
(-10, -10)-(370, -10), &H8000000F
Next

frmF0.PctCurvas2.DrawWidth = 2

frmF0.PctCurvas2.Line (-10, 0)-(370, 0), &HA5AFAC
frmF0.PctCurvas2.Line (0, -110)-(0, 110), &HA5AFAC

frmF0.PctCurvas2.Line (90, -110)-(90, 110), &HA5AFAC
frmF0.PctCurvas2.Line (180, -110)-(180, 110), &HA5AFAC
frmF0.PctCurvas2.Line (270, -110)-(270, 110), &HA5AFAC
frmF0.PctCurvas2.Line (360, -110)-(360, 110), &HA5AFAC

frmF0.PctCurvas2.DrawWidth = 1

For I = 1 To 37
    frmF0.PctCurvas2.Line_
(I * 10, -110)-(I * 10, 110), &H8000000F
Next
    frmF0.PctCurvas2.Line_
(-10, -110)-(-10, 110), &H8000000F

    frmF0.PctCurvas2.DrawWidth = 2
For I = 1 To 360
    frmF0.PctCurvas2.PSet (I, 10 * Y1(I)), vbBlue
Next
If NUnico = True Then
    For I = 1 To 360
        frmF0.PctCurvas2.PSet (I, 10 * Y2(I)), vbRed
    Next
End If
```

```
' Escritura de las leyendas.
frmFO.PctCurvas.CurrentX = -15
frmFO.PctCurvas.CurrentY = -135
frmFO.PctCurvas.Print "Azul: Bx-" & Nombre1
frmFO.PctCurvas.Line (80, -139)-(110, -139), vbBlue
If NUnico = True Then
    frmFO.PctCurvas.CurrentX = -15
    frmFO.PctCurvas.CurrentY = -145
    frmFO.PctCurvas.Print "Rojo: Bx-" & Nombre2
    frmFO.PctCurvas.Line (80, -149)-(110, -149), vbRed
End If
frmFO.PctCurvas.CurrentX = 0
frmFO.PctCurvas.CurrentY = 20 * 5
frmFO.PctCurvas.Print "5"
frmFO.PctCurvas.CurrentX = 0
frmFO.PctCurvas.CurrentY = -20 * 5
frmFO.PctCurvas.Print "-5"
' *****
frmFO.PctCurvas2.CurrentX = -15
frmFO.PctCurvas2.CurrentY = -135
frmFO.PctCurvas2.Print "Azul: By-" & Nombre1
frmFO.PctCurvas2.Line (80, -139)-(110, -139), vbBlue
If NUnico = True Then
    frmFO.PctCurvas2.CurrentX = -15
    frmFO.PctCurvas2.CurrentY = -145
    frmFO.PctCurvas2.Print "Rojo: By-" & Nombre2
    frmFO.PctCurvas2.Line (80, -149)-(110, -149), vbRed
End If
frmFO.PctCurvas2.CurrentX = 0
frmFO.PctCurvas2.CurrentY = 10 * 5
frmFO.PctCurvas2.Print "5"
frmFO.PctCurvas2.CurrentX = 0
frmFO.PctCurvas2.CurrentY = -10 * 5
frmFO.PctCurvas2.Print "-5"
frmFO.PctCurvas2.CurrentX = 0
frmFO.PctCurvas2.CurrentY = 10 * 10
frmFO.PctCurvas2.Print "10"
```

```
frmFO.PctCurvas2.CurrentX = 0
frmFO.PctCurvas2.CurrentY = -10 * 10
frmFO.PctCurvas2.Print "-10"
' *****
```

```
frmFO.PctCurvas.CurrentX = 90
frmFO.PctCurvas.CurrentY = 0
frmFO.PctCurvas.Print "Pi/2"
```

```
frmFO.PctCurvas.CurrentX = 180
frmFO.PctCurvas.CurrentY = 0
frmFO.PctCurvas.Print "Pi"
```

```
frmFO.PctCurvas.CurrentX = 270
frmFO.PctCurvas.CurrentY = 0
frmFO.PctCurvas.Print "3Pi/2"
```

```
frmFO.PctCurvas.CurrentX = 360
frmFO.PctCurvas.CurrentY = 0
frmFO.PctCurvas.Print "2Pi"
```

```
frmFO.PctCurvas2.CurrentX = 90
frmFO.PctCurvas2.CurrentY = 0
frmFO.PctCurvas2.Print "Pi/2"
```

```
frmFO.PctCurvas2.CurrentX = 180
frmFO.PctCurvas2.CurrentY = 0
frmFO.PctCurvas2.Print "Pi"
```

```
frmFO.PctCurvas2.CurrentX = 270
frmFO.PctCurvas2.CurrentY = 0
frmFO.PctCurvas2.Print "3Pi/2"
```

```
frmFO.PctCurvas2.CurrentX = 360
frmFO.PctCurvas2.CurrentY = 0
frmFO.PctCurvas2.Print "2Pi"
```

End Sub

A.3. Formulario Form1.frm (extracto).

```
' Formulario principal del programa.
' Interfaz gráfica para el trazado
' de elipses de inducción.
'-----
Option Explicit

Dim chivato As Integer
Dim File1 As String

Private Sub about_Click()
    frmAbout.Show vbModal
End Sub

Private Sub calcular_Click()
    cmdCalcular_Click
End Sub

Private Sub CbSec_click(Index As Integer)
    Dim i As Integer
    Dim J As Integer
    If Index = 0 Then
        Select Case CbSec(0).Text
            Case "a"
                For i = 0 To 2
                    LblSecuencia(i).Caption = CbSec(0).List(i)
                Next
            Case "b"
                For i = 0 To 1
                    LblSecuencia(i).Caption = CbSec(0).List(i + 1)
                Next
                LblSecuencia(2).Caption = CbSec(0).List(0)
            Case "c"
                For i = 1 To 2
                    LblSecuencia(i).Caption = CbSec(0).List(i - 1)
                Next
                LblSecuencia(0).Caption = CbSec(0).List(2)
        End Select
    End If
End Sub
```

```
        End Select
    End If
    If Index = 1 Then
        Select Case CbSec(1).Text
            Case "a"
                For i = 3 To 5
                    LblSecuencia(i).Caption = CbSec(1).List(i - 3)
                Next
            Case "b"
                For i = 3 To 4
                    LblSecuencia(i).Caption = CbSec(1).List(i - 3 + 1)
                Next
                LblSecuencia(5).Caption = CbSec(1).List(0)
            Case "c"
                For i = 4 To 5
                    LblSecuencia(i).Caption = CbSec(1).List(i - 3 - 1)
                Next
                LblSecuencia(3).Caption = CbSec(1).List(2)
        End Select
    End If
End Sub

Private Sub chameleonButton1_Click()
    Elipse.Cls
End Sub

Private Sub cmdCalcular_Click()
    Dim J As Integer

    ' Una cadena de texto indicativa de la configuración de fases
    ' y el punto donde se mide el CM

    Form1.Caption = "Elipses de Inducción"

    CadConf = " "
    For J = 0 To 5
        CadConf = CadConf & LblSecuencia(J)
    Next
```

```
CadConf = CadConf & "X" & Text1.Text & "Y" & Text2.Text

Form1.Caption = Form1.Caption & CadConf

Elipse.Cls

CalculosElipse

' en A( ) y B( ) tenemos los valores numéricos de los resultados
TrazadoElipse

End Sub

Private Sub cmdFO_Click()
    frmFO.Show vbModal
End Sub

Private Sub cmdSalir_Click()
    Unload Me
    End
End Sub

Private Sub copy_Click()

    Clipboard.Clear
    Clipboard.SetData Elipse.Image, 2

End Sub

Private Sub exit_Click()
    Elipse.Cls
End Sub

Private Sub Form_Load()
    'centrar el formulario
    Me.Move (Screen.Width - Me.Width) / 2, (Screen.Height - Me.Height) / 2
    'SetVBACIconMenu Me, Me.imlVBACMenu, PM
    PM.ImageList = imlVBACMenu
```

```
PM.SubClassMenu Form1
Dim c As Control
  For Each c In Form1.Controls
    If TypeName(c) = "Menu" Then
      On Error Resume Next
      PM.ItemIcon(c.Name) = imlVBACMenu.ItemIndex(LCase(c.Name))
      ' Debug.Print c.Name
    End If
  Next
Set PM.BackgroundImage = imlMenuBack.ListImages(1).Picture

'ms.Visible = False
chivato = 0

PB.Value = 1
End Sub
Private Sub elipse_MouseUp(Button As Integer, Shift As _
  Integer, X As Single, Y As Single)
  If Button = 2 Then
    PopupMenu ms
  End If
End Sub

Private Sub print_Click()
  If chivato = 0 Then
    MsgBox "Antes de imprimir, hay que guardar_
    la Gráfica", 64, "Guardar Antes que Imprimir"
  Exit Sub
  End If
  Picture2.Width = Elipse.Width
  Picture2.Height = Elipse.Height
  Picture2.Picture = LoadPicture(File1)
  'Imprime un picturebox
  Printer.PaintPicture Picture2.Picture, 0, 0
End Sub

Private Sub salir_Click()
  cmdSalir_Click
```

```
End Sub

Private Sub save_Click()
    CommonDialog1.DialogTitle = "Guardar Elipse de Inducción"

    ' Establecer CancelError a True
    CommonDialog1.CancelError = True
    On Error GoTo ErrHandler
    ' Establecer los indicadores
    CommonDialog1.Flags = cdlOFNHideReadOnly
    ' Establecer los filtros
    CommonDialog1.Filter = "Archivo de Mapa de Bits (*.bmp)|*.bmp|"
    ' Presentar el cuadro de diálogo guardar
    CommonDialog1.ShowSave

    File1 = CommonDialog1.FileName

    SavePicture Elipse.Image, File1
    chivato = 1

Exit Sub

ErrHandler:
    ' El usuario ha hecho clic en el botón Cancelar
    Exit Sub

End Sub

Sub text1_keypress(keyascii As Integer)
    ' Sólo admitirá números, el punto y el signo menos "-"
    ' Si se pulsa otra tecla se anulará automáticamente
    If InStr("0123456789.-", Chr(keyascii)) = 0 Then
        keyascii = 0
    End If
End Sub

Sub text2_keypress(keyascii As Integer)
    ' Sólo admitirá números, el punto y el signo menos "-"
    ' Si se pulsa otra tecla se anulará automáticamente
```

```
If InStr("0123456789.-", Chr(keyascii)) = 0 Then
    keyascii = 0
End If
End Sub
```

A.4. Formulario frmFO.frm (extracto).

```
' Formulario correspondiente
' al trazado de las formas de Onda
' Bx y By.
'-----

Private Sub chameleonButton1_Click()
On Error Resume Next
If Text1.Text = "" Then
    MsgBox "Selecciona al menos un archivo para representar_
        la curva", vbInformation, "Se necesita archivo"
    Exit Sub
End If
PctCurvas.Cls
PctCurvas2.Cls

    ' Función que representa las curvas
    FO

End Sub

Private Sub chameleonButton2_Click()
    Unload Me
End Sub

Private Sub chameleonButton3_Click()

    ' Copia la curva actual en el portapapeles
    Clipboard.Clear

    If SSTab1.Tab = 0 Then
```

```
        Clipboard.SetData PctCurvas.Image, 2
    Else
        Clipboard.SetData PctCurvas2.Image, 2
    End If

End Sub

Private Sub cmd1_Click()
    If File1.ListIndex = -1 Then Exit Sub

    Text1.Text = App.Path & "\" & File1.FileName
    Nombre1 = File1.FileName

End Sub

Private Sub cmd2_Click()
    If File1.ListIndex = -1 Then Exit Sub

    Text2.Text = App.Path & "\" & File1.FileName
    Nombre2 = File1.FileName

End Sub

Private Sub Form_Load()
    'centrar el formulario
    Me.Move (Screen.Width - Me.Width) / 2, _
        (Screen.Height - Me.Height) / 2
    File1.Path = App.Path
End Sub
```

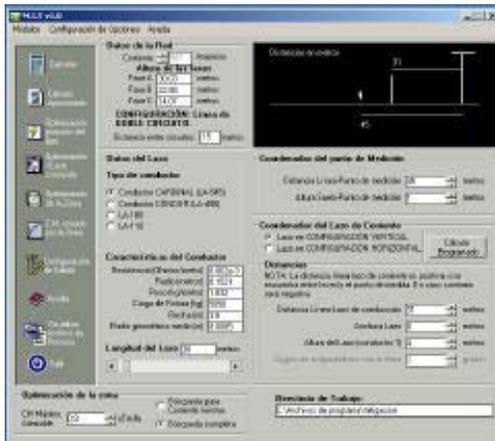

Apéndice **B**

CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA DE CÁLCULO DE CAMPOS MAGNÉTICOS M.I.T.

El programa M.I.T. es el que ha sido utilizado para “rastrear” soluciones, analizarlas y escoger aquellas que presentan los mejores resultados para la configuración del lazo a una distancia determinada de la línea. En los epígrafes siguientes se presenta el código fuente correspondiente a los módulos y formularios más importantes del programa (se trata de un extracto puesto que hay formularios que, aun siendo útiles para el funcionamiento del programa, no aportan información relevante acerca de los algoritmos de cálculo empleados).

B.1. Formulario mit.frm.

Éste es el formulario principal del programa, desde el cual se accede a todas las posibilidades de cálculo, así como es posible configurar los parámetros del lazo.



Option Explicit

Dim Indice

' Módulos de los campos magnéticos

Dim MTotol

Dim ModLin

Dim ModLazo

' Eficiencia

Dim SF

Dim Y As Integer

Dim Rl ' Resistencia lazo

Dim Xl

Dim LongitudLazo ' Longitud del lazo

Dim s ' Anchura del lazo

Dim Xa, Xb, Xc, Xap, Xbp, xcp

Dim ReEs

Dim ImEs

Dim i

' Dipolo

' distancia entre conductores del lazo

Dim Pm ' Módulo del vector p

' coordenadas del punto medio del dipolo

' (en referencia con el conductor 1

' del lazo)

' Referencias:

' eje x: horizontal y perpendicular a la línea

' eje y: vertical

' eje z: horizontal, paralelo a la línea,

' y en el sentido de la intensidad positiva

Dim R0(2) ' Vector de posición del centro del dipolo

Dim R_prima(2)

Dim Rd(2) ' Vector de posición del punto donde se

' desea conocer el CM

' tomando como origen el centro del dipolo

Dim Rd_prima(2)

Dim p(2)

Dim Rdm ' Módulo del vector rd

Dim Rdm_prima

' VECTORES UNITARIOS

Dim Ux(2)

Dim Uy(2)

' distancias

Dim dl, dl1b, dl1c, d12a, d12b, d12c

Dim dl1ap, dl1bp, dl1cp, d12ap, d12bp,

d12cp

' Distancias introducidas como datos

Dim LineaPunto

Dim SueloPunto

Dim LineaLazo

Dim WLazo ' Anchura del lazo de

corriente

Dim HLazo ' Altura del lazo de

corriente

' Valores de la línea

Dim w As Integer ' Distancia entre ambos circuitos

Dim Corriente As Integer ' Corriente por la línea

Dim k

Dim Angulo_Conductores_Lazo ' Para saber si es horizontal

' o vertical el lazo

' Partes reales de la corriente

Dim ReIa

Dim ReIb

Dim ReIc

Dim ReIap

Dim ReIbp

Dim ReIcp

' Partes imaginarias

Dim ImIa

Dim ImIb

Dim ImIc

Dim ImIap

Dim ImIbp

Dim ImIcp

' Vectores de campo magnético

Dim Bb(2)

Dim B(2)

Dim Br(2)

' Componentes de b (campo debido al lazo)

Dim bx1

Dim bx2

Dim by1

Dim by2

' (campo debido a la línea)

Dim Rx1

Dim Ry1

```

Dim Ix1
Dim Iy1
Dim Rx2
Dim Ry2
Dim Ix2
Dim Iy2

' Definición de la mayoría de las
variables
' complejas que se utilizarán:
Dim Corriente_Fase_C As Complejo
Dim Corriente_Fase_A As Complejo

' Corrientes del sistema
Dim Ir
Dim Ii
Dim I_I As Complejo

Private Sub Calc_aprox_Click()
    Picture1.Visible = True
    Labprog.Visible = True
    prog1.Visible = True
    prog2.Visible = True
    Prog3.Visible = True
    Timer1.Enabled = True
End Sub

Private Sub calculaproxim_Click()
    Calc_aprox_Click
End Sub

Private Sub calculosimpleexacto_Click()
    Command1_Click
End Sub

Private Sub Command1_Click()
    ' Rutina para calcular el
    ' nivel de mitigación para las
    ' condiciones seleccionadas
    Call Calcular
    ' Rutina que realiza la
    ' representación gráfica
    Call Representacion
End Sub

Private Sub Command2_Click()
    dir.Show
End Sub

Private Sub Command3_Click()
    End
End Sub

Private Sub Command4_Click()
    Call Optimizar
End Sub

Private Sub Command5_Click()
    Call frmOptions.cmdApply_Click
End Sub

Private Sub Command9_Click()
    Dim Nfich As Integer
    Dim NCalculos As Integer
    Dim Cad1 As String
    Dim Cad2 As String
    Dim Escala As Double

Dim Num As Integer
On Error Resume Next
' Lee de un fichero los parámetros del
' lazo y efectúa la simulación.

' Selección del fichero con los
' datos correspondientes
CD1.DialogTitle = "Abrir Fichero de
Cálculos_
" Programados"

' Establecer CancelError a True
CD1.CancelError = True
On Error GoTo ErrHandler
' Establecer los indicadores
CD1.Flags = cdIOFNHideReadOnly
' Establecer los filtros
CD1.Filter = "Hoja de Cálculo (*.csv)_
|*.csv|Todos los Archivos (*.*)|*.*|"
' Presentar el cuadro de diálogo
guardar
CD1.ShowOpen

FCalculoProg = CD1.FileName

Nfich = FreeFile
NCalculos = 0
Open FCalculoProg For Input As Nfich
While Not EOF(1)
    Line Input #Nfich, Cad1
    NCalculos = NCalculos + 1
    DoEvents
Wend
Close #Nfich
Escala = FrmProg.Picture1.Width /
NCalculos

' En primer lugar, se muestra el
formulario
' FrmProg para mostrar la evolución del
proceso
' de cálculo programado.
FrmProg.Show
DoEvents
Nfich = FreeFile
Num = 0
Open FCalculoProg For Input As Nfich
' Escritura primera línea.
Line Input #Nfich, Cad1
While Not EOF(1)
    Dim Vector() As String
    Line Input #Nfich, Cad2
    Cad2 = Replace(Cad2, ",", ".")
    Vector = Split(Cad2, ";")
    UpDown3.Value =
CLng(Vector(0))
    UpDown4.Value =
CLng(Vector(1))
    UpDown5.Value =
CLng(Vector(2))
    ' Llamada al cálculo de los
resultados
        CCalculoProgramado
        FrmProg.Label2.Width =
FrmProg.Label2.Width + Escala
        DoEvents
    Wend

```

```

    Close #Nfich
    Unload FrmProg
ErrHandler:
    ' El usuario ha hecho clic en el botón
Cancelar
    Exit Sub
End Sub

Sub CCalculoProgramado()
    Command1_Click
    DoEvents
    Unload ilog
    DoEvents
    Unload FrmProg
    DoEvents
End Sub

Private Sub Form_Initialize()
    UpDown1.Value = 45
    UpDown7.Value = 507
    UpDown3.Value = 31
    UpDown4.Value = 8
    UpDown5.Value = 4
    longlazo.Value = 30
End Sub

Private Sub Form_Load()

    ' Centrar el formulario
    Me.Move (Screen.Width - Me.Width) / 2,
    (Screen.Height - Me.Height) / 2
    cmmax.Caption = UpDown8.Value / 10
    CM_max = UpDown8.Value / 10
    RecVarCor = False

    ' Inicialización de variables
    ' Parámetros del lazo
    Y = 1250
    LongitudLazo = 200
    s = 10
    w = 15

    ' Directorio de salida
    Label47.Caption = dir.Dir1.Path

    Line5.x1 = -48 * 25 + 9600
    Line5.x2 = Line5.x1
    Line6.x2 = Line5.x1

    'etiqueta label44
    Label44.Left = Line5.x1

    X_Cercano =
    FConfig.FlatScrollBar1.Value
    X_Alejado =
    FConfig.FlatScrollBar2.Value
    UpDown7.Value = 400
    Text1.Text = 400
End Sub

Private Sub IniCalc_Timer()
    LlamadaCalculo
    IniCalc.Enabled = False
End Sub

Private Sub longlazo_Change()
    ' Cada vez que se mueva la barra

    ' de desplazamiento longlazo, se
    actualizará
    ' el valor de label23.caption
    Label23.Caption = longlazo.Value
    LongitudLazo = longlazo.Value
End Sub

Private Sub mnuconf_Click()
    Command2_Click
End Sub

Private Sub Opt2_Click()
    Call OptIMIZAR2
End Sub

Private Sub Option1_Click()
    'Ahora se muestran las propiedades del
    conductor n°1
    Label11.Caption = "0.062e-3"
    Label13.Caption = "0.01521"
    Label15.Caption = "1.832"
    Label17.Caption = "5050"
    Label19.Caption = "3.5"
    Label21.Caption = "0.8085*a"
End Sub

Private Sub Option2_Click()
    ' Ahora se muestran las
    ' propiedades del conductor n°2
    Label11.Caption = "0.074e-3"
    Label13.Caption = "0.01386"
    Label15.Caption = "1.521"
    Label17.Caption = "4216.67"
    Label19.Caption = "3.5"
    Label21.Caption = "0.8085*a"
End Sub

Private Sub Option3_Click()
    ' Ahora se muestran las
    ' propiedades del conductor n°3
    Label11.Caption = "0.196e-3"
    Label13.Caption = "0.00875"
    Label15.Caption = "0.676"
    Label17.Caption = "2083.33"
    Label19.Caption = "2.6"
    Label21.Caption = "0.8260*a"
End Sub

Private Sub Option4_Click()
    ' Ahora se muestran las
    ' propiedades del conductor n°4
    Label11.Caption = "0.31e-3"
    Label13.Caption = "0.007"
    Label15.Caption = "0.433"
    Label17.Caption = "1466.67"
    Label19.Caption = "3.3"
    Label21.Caption = "0.8260*a"
End Sub

Private Sub optiposlaz_Click()
    Command4_Click
End Sub

Private Sub optxlaz_Click()
    Opt2_Click
End Sub

```

```

Private Sub rango_Click()
    FConfig.Show
End Sub

Private Sub sssallir_Click()
    End
End Sub

Private Sub Timer1_Timer()
    Call Aproximacion
    Timer1.Enabled = False
End Sub

Private Sub UpDown1_Change()
    ' Muestra el valor que se elige
    Label26.Caption = UpDown1.Value

    ' Movimiento línea 5
    Line5.x1 = -48 * UpDown1.Value + 9600
    Line5.x2 = Line5.x1

    ' Alargamiento línea6
    Line6.x2 = Line5.x1

    ' Etiqueta label44
    Label44.Left = Line5.x1
    Label44.Caption = UpDown1.Value
End Sub

Private Sub UpDown2_Change()
    Label29.Caption = UpDown2.Value

    ' Se mueve la línea que representa
    ' el punto de medida
    Y = 1440 - 190 * UpDown2.Value
    Line5.y1 = Y - 50
    Line5.y2 = Y + 50
End Sub

Private Sub UpDown3_Change()
    Label33.Caption = UpDown3.Value

    'También se moverá la línea del dibujo
    Line4.x1 = -48 * UpDown3.Value + 9600
    Line4.x2 = Line4.x1

    'línea 7
    Line7.x1 = Line4.x1

    'etiqueta label45
    Label45.Left = Line4.x1
    Label45.Caption = UpDown3.Value
End Sub

Private Sub UpDown4_Change()
    Label36.Caption = UpDown4.Value
End Sub

Private Sub UpDown5_Change()
    Label39.Caption = UpDown5.Value
End Sub

Private Sub UpDown6_Change()
    Label42.Caption = UpDown6.Value
End Sub

Private Sub UpDown7_Change()
    Text1.Text = UpDown7.Value
End Sub

Private Sub Calcular()
    ' Rutina que calcula la
    ' Impedancia del lazo
    Call ImpedanciaLazo

    ' Rutina que calcula la
    ' Fuerza electromotriz
    ' Inducida en el lazo
    Call femlazo

    ' Cálculo campo magnético
    ' Creado por un dipolo
    Call CampoDipolo

    ' Rutina que calcula el
    ' Campo debido a la línea
    Call CampoLinea

    ' Rutina que calcula las
    ' Corrientes
    Call Corrientes_Sistema

    ' Rutina que calcula la
    ' Eficiencia del lazo
    Call Eficiencia
End Sub

Private Sub ImpedanciaLazo()
    ' Valor de la resistencia del conductor
    ' La resistencia del lazo
    ' Viene dada por 2*R*longitudlazo
    ' Rl es la resistencia del lazo
    ' Xl es la reactancia del lazo

    s = UpDown4.Value
    If Option1.Value = True Then
        Rl = 0.062 * LongitudLazo * 2 /
1000

        Xl = LongitudLazo * Omega_
            * (Mu0 / PI) *
            Log(s / (0.8085 * 0.5 * 0.03042))
    ElseIf Option2.Value = True Then
        Rl = 0.074 * LongitudLazo * 2 /
1000

        Xl = LongitudLazo * Omega * (Mu0 /
PI)_
            * Log(s / (0.8085 * 0.5 *
0.02772))
    ElseIf Option3.Value = True Then
        Rl = 0.196 * LongitudLazo * 2 /
1000

        Xl = LongitudLazo * Omega * _
            (Mu0 / PI) * _
            Log(s / (0.826 * 0.5 * 0.0096))
    ElseIf Option4.Value = True Then
        Rl = 0.31 * LongitudLazo * 2 /
1000

        Xl = LongitudLazo * Omega * _
            (Mu0 / PI) * _
            Log(s / (0.826 * 0.5 * 0.00762))
    End If

    ' Se muestra el resultado como

```

```

' Nuevo item de la lista
' Del cuadro de información
' Del proceso
ilog.Lista.AddItem ("Resistencia del
lazo = " & Rl)
ilog.Lista.AddItem ("Reactancia del
lazo = " & Xl)
End Sub

Private Sub femlazo()
' La fuerza electromotriz
' Ep=-imaginario*((Xa-Xb)*Ia+(Xc-Xb)
' *Ic+(Xap-Xbp)*Iap+(Xcp-Xbp)*Icp)
' Donde
' Xa=k*Log(d12a/d1)
' Xb=k*Log(d12b/d11b)
' Xc=k*Log(d12c/d11c)
' Xap=k*Log(d12ap/d11ap)
' Xbp=k*Log(d12bp/d11bp)
' Xcp=k*Log(d12cp/d11cp)
' Donde d_i y d_ij son distancias
' Que se definirán a continuación:
*****
' d11b: distancia conductor 1 lazo-fase b
' d11c: distancia conductor 1 lazo-fase c
' d12a: distancia conductor 2 lazo-fase a
' d12b: idem fase b
' d12c: idem fase c
' --LÍNEA DE DOBLE CIRCUITO--
' d11ap: distancia conductor 1 lazo-fase
a'
' d11bp: idem fase b'
' d11cp: idem fase c'
' d12ap: idem conductor 2 lazo-fase a'
' d12bp: Análogo
' d12cp: Análogo
' Aparte, se necesitan las coordenadas:
' *coordenadas X: Xl1 y Xl2 de los
conductores del lazo
' *coordenadas Y: Yl1 e Yl2 de los
conductores del lazo
*****
' CÁLCULO DE LAS DISTANCIAS A PARTIR
DE LOS DATOS INTRODUCIDOS POR EL
USUARIO. SE RECUERDA QUE LA LÍNEA
ES DATO: LÍNEA DON RODRIGO-PINAR DEL REY
CON LO CUAL, LAS DISTANCIAS ENTRE
CONDUCTORES DE UNO Y OTRO CIRCUITO
SE SUPONEN CONOCIDOS E INVARIABLES
ASIGNACIÓN DE VALORES A LAS DISTANCIAS
CONOCIDAS E INTRODUCIDAS COMO DATO:
*****
LineaPunto = UpDown1.Value
SueloPunto = UpDown2.Value
LineaLazo = UpDown3.Value
WLazo = UpDown4.Value
HLazo = UpDown5.Value

Corriente = UpDown7.Value
w = Text3.Text

' Adición a la lista de proceso
ilog.Lista.AddItem ("Corriente de_
"la línea = " & Corriente)
ilog.Lista.AddItem ("Distancia_
"entre circuitos = " & w)

' Distancia conductor 1 lazo- fase b
' Depende de si el lazo es vertical
' o es horizontal.

' LAZO HORIZONTAL
If Option6.Value = True Then
Angulo_Conductores_Lazo = 0

' LAZO VERTICAL
ElseIf Option5.Value = True Then
Angulo_Conductores_Lazo = PI / 2
End If

' El conductor 1 es el más cercano a
la línea
' La altura de la línea, conocida.

' El conductor 1 es el que conduce
' Corriente I positiva (en este caso,
' el más alejado de la línea)

'DISTANCIA HORIZONTAL CONDUCTOR 1
R1(0) = -(LineaLazo)

'DISTANCIA VERTICAL CONDUCTOR 1
R1(1) = HLazo + WLazo *
Sin(Angulo_Conductores_Lazo)

' IDEM EJE Z
R1(2) = 0

'ANÁLOGAMENTE PARA EL CONDUCTOR 2
R2(0) = -(LineaLazo - WLazo *
Cos(Angulo_Conductores_Lazo))
R2(1) = HLazo
R2(2) = 0

'DISTANCIA CONDUCTOR 1 DEL LAZO-
FASE A
d1 = Sqr((30.03 - R1(1)) ^ 2 +
(Abs(R1(0)) - 7.5) ^ 2)
ilog.Lista.AddItem ("Distancia_
"Fase a-Conductor 1 lazo = " & d1)

d11b = Sqr((22.88 - R1(1)) ^ 2 +
(Abs(R1(0)) - 7.5) ^ 2)
ilog.Lista.AddItem ("Distancia_
"Fase b-Conductor 1 lazo = " &
d11b)

d11c = Sqr((14.07 - R1(1)) ^ 2 +
(Abs(R1(0)) - 7.5) ^ 2)
ilog.Lista.AddItem ("Distancia_
"Fase c-Conductor 1 lazo = " &
d11c)

'PARA EL CONDUCTOR 2
d12a = Sqr((30.03 - R2(1)) ^ 2 +
(Abs(R2(0)) - 7.5) ^ 2)
ilog.Lista.AddItem ("Distancia_
"Fase a-Conductor 2 lazo = " &
d12a)

d12b = Sqr((22.88 - R2(1)) ^ 2 +
(Abs(R2(0)) - 7.5) ^ 2)
ilog.Lista.AddItem ("Distancia_
"Fase b-Conductor 2 lazo = " &

```

```

d12b)
    d12c = Sqr((14.07 - R2(1)) ^ 2 +_
              (Abs(R2(0)) - 7.5) ^ 2)
    ilog.Lista.AddItem ("Distancia_
" Fase c'-Conductor 2 lazo = " &
d12c)
    ' Para el segundo circuito,
    ' el más alejado del lazo
    ' VALORES PRIMA DE LOS
    ' CONDUCTORES DE LA LÍNEA
    d11ap = Sqr((30.03 - R1(1)) ^ 2 +_
              (Abs(R1(0)) + 7.5) ^ 2)
    ilog.Lista.AddItem ("Distancia_
" Fase b'-Conductor 1 lazo = " &
d11ap)
    d11bp = Sqr((22.88 - R1(1)) ^ 2 +_
              (Abs(R1(0)) + 7.5) ^ 2)
    ilog.Lista.AddItem ("Distancia_
" Fase b'-Conductor 1 lazo = " &
d11bp)
    d11cp = Sqr((14.07 - R1(1)) ^ 2 +_
              (Abs(R1(0)) + 7.5) ^ 2)
    ilog.Lista.AddItem ("Distancia_
" Fase c'-Conductor 1 lazo = " &
d11cp)
    d12ap = Sqr((30.03 - R2(1)) ^ 2 +_
              (Abs(R2(0)) + 7.5) ^ 2)
    ilog.Lista.AddItem ("Distancia_
" Fase a'-Conductor 2 lazo = " &
d12ap)
    d12bp = Sqr((22.88 - R2(1)) ^ 2 +_
              (Abs(R2(0)) + 7.5) ^ 2)
    ilog.Lista.AddItem ("Distancia_
" Fase b'-Conductor 2 lazo = " &
d12bp)
    d12cp = Sqr((14.07 - R2(1)) ^ 2 +_
              (Abs(R2(0)) + 7.5) ^ 2)
    ilog.Lista.AddItem ("Distancia_
" Fase c'-Conductor 2 lazo = " &
d12cp)
    ' Cálculo de k
    k = longlazo.Value * Omega * Mu0 /
(2 * PI)
    ilog.Lista.AddItem ("Valor de la
constante k = " & k)
    ' Con todo esto se calculan
    ' las reactancias asociadas a cada
fase:
    Xa = k * Log(d12a / d1)
    ilog.Lista.AddItem ("Valor Xa = "
& Xa)
    Xb = k * Log(d12b / d11b)
    ilog.Lista.AddItem ("Valor Xb = "
& Xb)
    Xc = k * Log(d12c / d11c)
    ilog.Lista.AddItem ("Valor Xc = "
& Xc)
    Xap = k * Log(d12ap / d11ap)
    ilog.Lista.AddItem ("Valor Xap = "
& Xap)
    Xbp = k * Log(d12bp / d11bp)
    ilog.Lista.AddItem ("Valor Xbp = "
& Xbp)
    xcp = k * Log(d12cp / d11cp)
    ilog.Lista.AddItem ("Valor Xcp = "
& xcp)
    ' Cálculo de la fem
    ' inducida por la línea
    ' en el lazo
    ' Hay que calcular cada
    ' corriente de fase
    i = Corriente
    ' Como es de doble circuito,
    ' por cada uno circulará la
    ' mitad de la corriente
    ' total
    i = i / 2
    ' Corrientes de fase
    ' Ia=250 A
    ' Ib=250 exp(4pi/3)
    ' Ic=250 exp(2pi/3)
    ' con lo cual:
    ReIa = i
    ReIap = ReIa
    ImIa = 0
    ImIap = ImIa
    ReIb = i * Cos(4 * PI / 3)
    ReIbp = ReIb
    ImIb = i * Sin(4 * PI / 3)
    ImIbp = ImIb
    ReIc = i * Cos(2 * PI / 3)
    ReIcp = ReIc
    ImIc = i * Sin(2 * PI / 3)
    ImIcp = ImIc
    ' La parte real de Es será:
    ' Es=-imaginario*((Xa-Xb)*Ia+(Xc-
Xb)_
    ' *Ic+(Xap-Xbp)*Iap+(Xcp-Xbp)*Icp)
    ReEs = -(Xa - Xb) * ImIa -_
(Xc - Xb) * ImIc - (Xap - Xbp)_
* ImIap - (xcp - Xbp) * ImIcp
    ImEs = (Xa - Xb) * ReIa +_
(Xc - Xb) * ReIc + (Xap - Xbp)_
* ReIap + (xcp - Xbp) * ReIcp
    ilog.Lista.AddItem ("Valor de Es =
"
& ReEs & "+ j * " & ImEs)
    ' Cálculo de la fuerza
    electromotriz

```

```

' para ello se necesita el
' valor de corriente por el lazo
' posteriormente se hará
' un bucle para ello.
End Sub

Private Sub CampoDipolo()
Dim aux          ' Variable auxiliar
Dim modaux       ' Valor absoluto de la
                 ' variable auxiliar

' Cálculo del campo magnético
' creado por un dipolo eléctrico:
' la distancia entre los conductores
' del lazo: anchura del lazo = HLazo
' Posición del centro del dipolo:
' Si Angulo_conductores_lazo = 0,
' entonces se encuentra en la
' vertical intermedia
' entre ambos conductores,
' y en la misma horizontal (HLazo)
' de éstos, si
' Ángulo_conductores_lazo = 90,
' la vertical coincidirá con
' la de cualquiera de los
' conductores, y la horizontal
' (altura), con el punto
' intermedio entre ellos.
' CARGA DE LOS VALORES DE
' LOS VECTORES IMPLICADOS:

' El vector p es la resta
' de los vectores R1 - R2
p(0) = R1(0) - R2(0)
p(1) = R1(1) - R2(1)
p(2) = R1(2) - R2(2)

' Módulo del vector p=pm
Pm = Sqr(p(0) ^ 2 + p(1) ^ 2)

' Composición del vector R0:
R0(0) = 0.5 * (R1(0) + R2(0))
R0(1) = 0.5 * (R1(1) + R2(1))
R0(2) = 0.5 * (R1(2) + R2(2))

' Composición de R:
R_(0) = -UpDown1.Value
R_(1) = UpDown2.Value
R_(2) = 0
End Sub

Private Sub CampoLinea()
' CAMPO MAGNÉTICO DEBIDO AL
' LAZO ACTIVO
' (CON CORRIENTE UNITARIA)

'PRESENTACIÓN DE LA POSICIÓN DEL LAZO
ilog.Lista.AddItem ("")
ilog.Lista.AddItem ("")
ilog.Lista.AddItem
("=====
=====
=====")
ilog.Lista.AddItem ("DATOS RELATIVOS_
A LA POSICIÓN DEL LAZO")
ilog.Lista.AddItem ("")

If Option5.Value = _
True Then ilog.Lista.AddItem_
("Configuración del lazo Vertical")
If Option6.Value = _
True Then ilog.Lista.AddItem_
("Configuración del lazo Horizontal")

ilog.Lista.AddItem ("Distancia de la_
Línea al Lazo (horizontal) = " &
UpDown3.Value)
ilog.Lista.AddItem ("Anchura del Lazo_
" = " & UpDown4.Value)
ilog.Lista.AddItem ("Altura del Lazo_
" = " & UpDown5.Value)
ilog.Lista.AddItem
("=====
=====
=====")
ilog.Lista.AddItem ("")
ilog.Lista.AddItem ("Campo magnético_
creado por el LAZO: CÁLCULOS")
ilog.Lista.AddItem ("")

' Campo debido al lazo (formulación
RI)
' Para valores de intensidad I_I=1|_0
I_I.Real = 1
I_I.Imaginaria = 0

' EL CM CREADO POR EL LAZO SE
' ALMACENA EN EL VECTOR C_Lazo
Y = CampoMagnetico(R1(0), R1(1),_
R2(0), R2(1), I_I, R_(0), R_(1))

ilog.Lista.AddItem ("Psi = " &
(180 / PI) * Psi & " ; Theta = " &
(180 / PI) * Theta)

' Asignación de valores a las
' variables implicadas en el
' cálculo de la corriente
bx1 = -CM(0).Real
by1 = CM(1).Real

'Ahora para los valores con -XRow
Y = CampoMagnetico(R1(0), R1(1),_
R2(0), R2(1), I_I, -R_(0), R_(1))
bx2 = -CM(0).Real
by2 = CM(1).Real

' CAMPO MAGNÉTICO DEBIDO A LA LÍNEA
ilog.Lista.AddItem ("")
ilog.Lista.AddItem ("Campo magnético_
creado por la LÍNEA: CÁLCULOS")
ilog.Lista.AddItem ("")

' Campo generado por la línea en R_
Call CMLinea(R_(0))

' OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES
' PARA LA DETERMINACIÓN DE
' LA CORRIENTE DEL LAZO

' NOTA: ya tenemos el valor del campo

```

```

' Bp para xrow = distancia
' linea al punto de medición
' Falta por lo tanto el valor
' de Bp para -xrow
  Rx1 = C_Bp(0).Real
  Ry1 = C_Bp(1).Real
  Ix1 = C_Bp(0).Imaginaria
  Iy1 = C_Bp(1).Imaginaria

' AHORA HAY QUE REPETIR
' TODO EL PROCESO PARA -XROW
  Call CMLinea(-R_(0))

  Rx2 = C_Bp(0).Real
  Ry2 = C_Bp(1).Real
  Ix2 = C_Bp(0).Imaginaria
  Iy2 = C_Bp(1).Imaginaria

' PRESENTACIÓN DE LAS VARIABLES
  ilog.Lista.AddItem("")
  ilog.Lista.AddItem
("=====
=====
"=====
  ilog.Lista.AddItem("
"
"          VARIABLES")
  ilog.Lista.AddItem
("=====
=====
"=====
  ilog.Lista.AddItem("Rx1 = " & Rx1)
  ilog.Lista.AddItem("Ry1 = " & Ry1)
  ilog.Lista.AddItem("Ix1 = " & Ix1)
  ilog.Lista.AddItem("Iy1 = " & Iy1)
  ilog.Lista.AddItem("Rx2 = " & Rx2)
  ilog.Lista.AddItem("Ry2 = " & Ry2)
  ilog.Lista.AddItem("Ix2 = " & Ix2)
  ilog.Lista.AddItem("Iy2 = " & Iy2)
  ilog.Lista.AddItem
("=====
=====
"=====
  End Sub

Private Sub Corrientes_Sistema()
  Ir = (bx1 * Rx1 + bx2 * Rx2 -
  (by1 * Ry1 + by2 * Ry2)) / (bx1 ^ 2 +
  + bx2 ^ 2 + by1 ^ 2 + by2 ^ 2)
  Ii = (bx1 * Ix1 + bx2 * Ix2 -
  (by1 * Iy1 + by2 * Iy2)) / (bx1 ^ 2 +
  + bx2 ^ 2 + by1 ^ 2 + by2 ^ 2)

  I_I.Real = Ir
  I_I.Imaginaria = Ii

  ' Presentación de las corrientes
  ilog.Lista.AddItem("Corriente por
"el lazo: I = " & I_I.Real &
" + i * " & I_I.Imaginaria)
End Sub

Private Sub Eficiencia()
' Cálculo del CAMPO MAGNÉTICO
' CREADO POR LA LÍNEA
  Call CMLinea(R_(0))
  ' En el vector C_bp tenemos
  ' el valor del campo
  C_Linea(0).Real = C_Bp(0).Real
  C_Linea(1).Real = C_Bp(1).Real
  C_Linea(0).Imaginaria =
  C_Bp(0).Imaginaria
  C_Linea(1).Imaginaria =
  C_Bp(1).Imaginaria

  'PRESENTACIÓN DE LOS
RESULTADOS

  ilog.Lista.AddItem("")

  ilog.Lista.AddItem_
("CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR
LA LINEA")
  ilog.Lista.AddItem_
("Componente X Real = " &
C_Linea(0).Real)
  ilog.Lista.AddItem_
("Componente X Imaginaria = "
& C_Linea(0).Imaginaria)
  ilog.Lista.AddItem_
("Componente Y Real = " &
C_Linea(1).Real)
  ilog.Lista.AddItem_
("Componente Y Imaginaria = "
& C_Linea(1).Imaginaria)

  ilog.Lista.AddItem("")

  'módulo del campo creado por
la línea
  ModLin =
Sqr((Sqr(C_Linea(0).Real ^ 2 +
+ C_Linea(0).Imaginaria ^ 2))
^ 2 +
((Sqr(C_Linea(1).Real ^ 2 +
+ C_Linea(1).Imaginaria ^ 2)))

' Cálculo del CAMPO MAGNÉTICO CREADO
' POR EL LAZO ACTIVO (CON I_I)
  Y = CampoMagnetico(R1(0),
R1(1),
R2(0), R2(1), I_I, R_(0),
R_(1))

  C_Lazo(0).Real = CM(0).Real
  C_Lazo(0).Imaginaria =
CM(0).Imaginaria
  C_Lazo(1).Real = CM(1).Real
  C_Lazo(1).Imaginaria =
CM(1).Imaginaria

  'PRESENTACIÓN DE LOS
RESULTADOS

  ilog.Lista.AddItem_
("CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR
EL LAZO")
  ilog.Lista.AddItem_
("Componente X Real = " &
C_Lazo(0).Real)
  ilog.Lista.AddItem_

```

```

        ("Componente X Imaginaria = "
& C_Lazo(0).Imaginaria)
        ilog.Lista.AddItem_
        ("Componente Y Real = " &
C_Lazo(1).Real)
        ilog.Lista.AddItem_
        ("Componente Y Imaginaria = "
& C_Lazo(1).Imaginaria)

        'Módulo del campo generado por
el lazo
        ModLazo =
Sqr((Sqr(C_Lazo(0).Real ^ 2 +_
C_Lazo(0).Imaginaria ^ 2)) ^ 2
+_
((Sqr(C_Lazo(1).Real ^ 2 +
C_Lazo(1).Imaginaria ^ 2))))

' COMPOSICIÓN DE LA SUMA DE CAMPOS:
LÍNEA+LAZO
        C_Total(0).Real =
C_Lazo(0).Real + C_Linea(0).Real
        C_Total(1).Real =
C_Lazo(1).Real + C_Linea(1).Real
        C_Total(0).Imaginaria =_
C_Lazo(0).Imaginaria +
C_Linea(0).Imaginaria
        C_Total(1).Imaginaria =_
C_Lazo(1).Imaginaria +
C_Linea(1).Imaginaria

        'módulo del campo total
resultante
        MTTotal =
Sqr((Sqr(C_Total(0).Real ^ 2 +_
C_Total(0).Imaginaria ^ 2)) ^ 2
+_
((Sqr(C_Total(1).Real ^ 2 +
C_Total(1).Imaginaria ^ 2))))

' PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS
        ilog.Lista.AddItem_ ("")
        ilog.Lista.AddItem_
        ("Módulo campo Del Lazo = " &
ModLazo)
        ilog.Lista.AddItem_
        ("Módulo campo De la Línea = "
& ModLin)
        ilog.Lista.AddItem_
        ("Módulo campo Total = " &
MTTotal)

' Cálculo de la EFICIENCIA DEL LAZO
        SF = MTTotal / ModLin

        ilog.Lista.AddItem_ ("")
        ilog.Lista.AddItem_
        ("REDUCCIÓN DEL CAMPO
MAGNÉTICO_
= " & SF * 100 & " % ")
        ilog.Lista.AddItem_
        ("(Este porcentaje indica el_
porcentaje del CM final")
        ilog.Lista.AddItem_
        ("respecto del inicial)")

End Sub

Private Sub Representacion()
' Se guardan las variables importantes
' como variables globales
ProgressBar1.Visible = True
ag = -UpDown1.Value
bg = R1(0)
cg = R1(1)
dg = R2(0)
eg = R2(1)
fg = Ir
gg = Ii
hg = R_(1)

' Rutina que rellena la matriz Datos
Indice = 0
        Dim Max
        Dim Min
        Dim LongAbcisa
        Dim Int_Real
        Dim X_1, X_2
        Dim Escala

        Dim Campo__Bl(1) As Complejo
        Dim Suma(1) As Complejo

        Dim ML 'módulo campo línea
        Dim MT 'módulo campo total
        Dim SF

        Max = ag - 100
        Min = ag + 100

        LongAbcisa = Sqr((Max - Min) ^ 2)

        ' Se divide entre 200, que son los
puntos que se tomarán
        ' Int_Real = Intervalo Real
        Int_Real = LongAbcisa / 200
        ProgressBar1.Visible = True

        Dim Cabecera

        While Indice < 200
            X_1 = Max + Indice * Int_Real
            Datos(Indice, 0) = Indice

            ' CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR
            ' EL LAZO ACTIVO (para X_1)
            Y = CampoMagnetico(R1(0),
R1(1),_
R2(0), R2(1), I_I, X_1, R_(1))

            Campo__Bl(0).Real = CM(0).Real
            Campo__Bl(0).Imaginaria =
CM(0).Imaginaria
            Campo__Bl(1).Real = CM(1).Real
            Campo__Bl(1).Imaginaria =
CM(1).Imaginaria

            ' CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR LA
LÍNEA (para X_1)
            Call CMLinea(X_1)

            ' En el vector C_bp tenemos el
valor del campo
            ' módulo del campo creado por
la línea

```

```

                ML = Sqr((Sqr(C_Bp(0).Real ^
2_      + C_Bp(0).Imaginaria ^ 2)) ^ 2
+
                ((Sqr(C_Bp(1).Real ^ 2 +
                C_Bp(1).Imaginaria ^ 2))))

' COMPOSICIÓN DE LA SUMA
Suma(0).Real =
Campo__Bl(0).Real + C_Bp(0).Real
Suma(0).Imaginaria =
Campo__Bl(0).Imaginaria +
C_Bp(0).Imaginaria
Suma(1).Real =
Campo__Bl(1).Real +
C_Bp(1).Real
Suma(1).Imaginaria =
Campo__Bl(1).Imaginaria +
C_Bp(1).Imaginaria

' Módulo de la suma
2_      MT = Sqr((Sqr(Suma(0).Real ^
2_      + Suma(0).Imaginaria ^ 2)) ^ 2
2_      + ((Sqr(Suma(1).Real ^ 2 +
                Suma(1).Imaginaria ^ 2))))

SF = MT / ML

Datos(Indice, 1) = SF
PCercanos(Indice, 0) = X_1
PCercanos(Indice, 1) = SF
ProgressBar1.Value = Indice
Indice = Indice + 1
Wend

' AHORA SE CALCULAN LOS MISMOS
' RESULTADOS PARA UNA
' ALTURA DE 3 METROS
Indice = 0
UpDown2.Value = 3 'SE COMPRUEBA A 3
METROS
While Indice < 200
    X_1 = Max + Indice * Int_Real

    ' CAMPO MAGNÉTICO CREADO
    ' POR EL LAZO ACTIVO (para X_1)
    Y = CampoMagnetico(R1(0),
R1(1),_
                R2(0), R2(1), I_I, X_1, R_(1))

    Campo__Bl(0).Real = CM(0).Real
    Campo__Bl(0).Imaginaria =
CM(0).Imaginaria
    Campo__Bl(1).Real = CM(1).Real
    Campo__Bl(1).Imaginaria =
CM(1).Imaginaria

    ' CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR LA LÍNEA
(para X_1)
    Call CMLinea(X_1)

    ' En el vector C_bp tenemos
    ' el valor del campo
    ' módulo del campo creado por
la línea

                ML = Sqr((Sqr(C_Bp(0).Real ^
2_      + C_Bp(0).Imaginaria ^ 2)) ^ 2
2_      + ((Sqr(C_Bp(1).Real ^ 2 +
                C_Bp(1).Imaginaria ^ 2))))

' COMPOSICIÓN DE LA SUMA
Suma(0).Real =
Campo__Bl(0).Real
+ C_Bp(0).Real
Suma(0).Imaginaria =
Campo__Bl(0).Imaginaria +
C_Bp(0).Imaginaria
Suma(1).Real =
Campo__Bl(1).Real +
C_Bp(1).Real
Suma(1).Imaginaria =
Campo__Bl(1).Imaginaria +
C_Bp(1).Imaginaria

' Módulo de la suma
2_      MT = Sqr((Sqr(Suma(0).Real ^ 2
+ Suma(0).Imaginaria ^ 2)) ^ 2 +
((Sqr(Suma(1).Real ^ 2 +
                Suma(1).Imaginaria ^ 2))))
SF = MT / ML

PCercanos(Indice, 2) = SF
ProgressBar1.Value = Indice
Indice = Indice + 1
Wend

' GUARDA UNA HOJA DE
' CÁLCULO CON LOS RESULTADOS
' PARA LOS PUNTOS CERCANOS
Dim ruta
ruta = App.Path & "\PCercanos-"
& UpDown3.Value & "-" & UpDown4.Value
& "-" & UpDown5.Value & ".csv"

Open ruta For Output As #22
Cabecera = "Punto;Nivel de
"mitigación a 1m;Nivel de
mitigación a 3m"
Print #22, Cabecera
Dim ia
For ia = 0 To 199 Step 1
    Cabecera = PCercanos(ia, 0)
& ";" & PCercanos(ia, 1) & ";" &
PCercanos(ia, 2)
Print #22, Cabecera
Next

Close #22
UpDown2.Value = 1
Indice = 0
Grafico_1.Show
ProgressBar1.Visible = False
End Sub

Private Sub Optimizar()
Dim Escala, ESCala2, ESCala3

' Para la ubicación del lazo
Dim XLa, XLa0
Dim WLa, WLa0

```

```

Dim HLa, HLa0
Dim MinSF_para_XLa

' LAZO HORIZONTAL
If Option6.Value = True Then
    Angulo_Conductores_Lazo = 0
' LAZO VERTICAL
ElseIf Option5.Value = True Then
    Angulo_Conductores_Lazo = PI / 2
End If
Escala = 100 / 41
Escala2 = 100 / 199

' Punto de medida
R_(0) = -UpDown1.Value
R_(1) = UpDown2.Value
R_(2) = 0

' Inicialización de los índices
XLa0 = 0 ' Se parte de la
        ' posición inicial del lazo en
-10
WLa0 = 2 ' Y de una anchura inicial
        ' del lazo de 2 m
HLa0 = 2 ' Idem para la altura inicial
XLa = XLa0
WLa = WLa0
HLa = HLa0
' ProgressBar1.Visible = True
Label47.Visible = False
pb1.Visible = True
pb2.Visible = True
pb3.Visible = True
' ProgressBar1.Max = 101
' Bucle reiterativo para
' comprobar la eficacia del lazo
' en diferentes posiciones
For XLa = 0 To 100 Step 1
    DoEvents
        MinSF_para_XLa = 100
        For HLa = 2 To 42 Step 1
            DoEvents
                For WLa = 2 To 40 Step 1
                    DoEvents
                        R1(0) = -(XLa)
                        R1(1) = HLa + WLa *
Sin(Angulo_Conductores_Lazo)
                        R1(2) = 0
                        R2(0) = -(XLa - WLa *
Cos(Angulo_Conductores_Lazo))
                        R2(1) = HLa
                        R2(2) = 0
                        Call Campos
'EN SF TENEMOS LA
"EFICIENCIA"
                        If SF < MinSF_para_XLa
Then
                            MinSF_para_XLa = SF
                            Optimo(XLa, 0) = XLa
                            Optimo(XLa, 1) = WLa
                            Optimo(XLa, 2) = HLa
                            Optimo(XLa, 3) =
MinSF_para_XLa
                        End If
                    Next
                Next
            Next
        Next
    Next
    pb1.Visible = False
    pb2.Visible = False
    pb3.Visible = False
    Label47.Visible = True
    FLAG_A = 0

' YA SE TIENE EN LA MATRIZ
' Optimo LAS POSICIONES
' Y EL ÓPTIMO PARA EL LAZO
Opt.Show

Dim Index
For Index = 0 To 100 Step 1
    Opt.Lista.AddItem_
("Xlazo = " & Optimo(Index, 0)_
& " ; W = " & Optimo(Index, 1)_
& " ; H = " & Optimo(Index, 2)_
& " ; CR = " & Optimo(Index, 3))
Next
End Sub

Private Sub CampoS()
On Local Error GoTo errt
' CAMPO MAGNÉTICO DEBIDO
' AL LAZO ACTIVO (CON
' CORRIENTE UNITARIA)

' Campo debido al lazo (formulación
RI)
' Para valores de intensidad I_I=1|_0
I_I.Real = 1
I_I.Imaginaria = 0
' EL CM CREADO POR EL LAZO SE
' ALMACENA EN EL VECTOR C_Lazo
Y = CampoMagnetico(R1(0), R1(1),
R2(0),
R2(1), I_I, R_(0), R_(1))
' Asignación de valores a
' las variables implicadas
' en el cálculo de la corriente
bx1 = -CM(0).Real
by1 = CM(1).Real

' Ahora para los valores con -XRow
Y = CampoMagnetico(R1(0), R1(1),
R2(0),
R2(1), I_I, -R_(0), R_(1))
bx2 = -CM(0).Real
by2 = CM(1).Real

' CAMPO MAGNÉTICO DEBIDO A LA LÍNEA
' Campo generado por la línea en R_
Call CMLinea(R_(0))

' OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES
' PARA LA DETERMINACIÓN DE
' LA CORRIENTE DEL LAZO

```

```

' NOTA: ya tenemos el valor del
' campo Bp para xrow = distancia
' linea al punto de medición
' Falta por lo tanto el valor de Bp para -
xrow
  Rx1 = C_Bp(0).Real
  Ry1 = C_Bp(1).Real
  Ix1 = C_Bp(0).Imaginaria
  Iy1 = C_Bp(1).Imaginaria

' AHORA HAY QUE REPETIR
' TODO EL PROCESO PARA -XROW
  Call CMLinea(-R_(0))

  Rx2 = C_Bp(0).Real
  Ry2 = C_Bp(1).Real
  Ix2 = C_Bp(0).Imaginaria
  Iy2 = C_Bp(1).Imaginaria

' DETERMINACIÓN DE LAS
' CORRIENTES DEL LAZO
  Ir = (bx1 * Rx1 + bx2 * Rx2 -
- (by1 * Ry1 + by2 * Ry2)) /
(bx1 ^ 2 + bx2 ^ 2 + by1 ^ 2 + by2 ^
2)
  On Error GoTo errt
  Ii = (bx1 * Ix1 + bx2 * Ix2 -
- (by1 * Iy1 + by2 * Iy2)) /
(bx1 ^ 2 + bx2 ^ 2 + by1 ^ 2 + by2 ^
2)
  On Error GoTo errt

  I_I.Real = Ir
  I_I.Imaginaria = Ii

  MCOR = Sqr((Ir) ^ 2 + (Ii) ^ 2)

' DETERMINACIÓN DE LA
' EFICIENCIA Y CAMPO DEL LAZO

  ' Cálculo del CAMPO MAGNÉTICO
  ' CREADO POR LA LÍNEA
  Call CMLinea(R_(0))
  ' en el vector C_bp tenemos
  ' el valor del campo

  C_Linea(0).Real = C_Bp(0).Real
  C_Linea(1).Real = C_Bp(1).Real
  C_Linea(0).Imaginaria =
C_Bp(0).Imaginaria
  C_Linea(1).Imaginaria =
C_Bp(1).Imaginaria

  ' módulo del campo creado por
la línea
  ModLin =
Sqr((Sqr(C_Linea(0).Real ^ 2 +
+ C_Linea(0).Imaginaria ^ 2))
^ 2 +
((Sqr(C_Linea(1).Real ^ 2 +
C_Linea(1).Imaginaria ^ 2)))

  ' Cálculo del CAMPO MAGNÉTICO
  ' CREADO POR EL LAZO ACTIVO (CON I_I)
  Y = CampoMagnetico(R1(0),
R1(1),
R2(0), R2(1), I_I, R_(0),
R_(1))

  C_Lazo(0).Real = CM(0).Real
  C_Lazo(0).Imaginaria =
CM(0).Imaginaria
  C_Lazo(1).Real = CM(1).Real
  C_Lazo(1).Imaginaria =
CM(1).Imaginaria

  ' Módulo del campo generado
por el lazo
  ModLazo =
Sqr((Sqr(C_Lazo(0).Real ^ 2 +
+ C_Lazo(0).Imaginaria ^ 2)) ^
2 +
((Sqr(C_Lazo(1).Real ^ 2 +
C_Lazo(1).Imaginaria ^ 2)))

  ' COMPOSICIÓN DE LA SUMA DE CAMPOS:
LÍNEA+LAZO
  C_Total(0).Real =
C_Lazo(0).Real + C_Linea(0).Real
  C_Total(1).Real =
C_Lazo(1).Real + C_Linea(1).Real
  C_Total(0).Imaginaria =
C_Lazo(0).Imaginaria
+ C_Linea(0).Imaginaria
  C_Total(1).Imaginaria =
C_Lazo(1).Imaginaria
+ C_Linea(1).Imaginaria

  ' Módulo del campo total
resultante
  MTotal =
Sqr((Sqr(C_Total(0).Real ^ 2 +
C_Total(0).Imaginaria ^ 2)) ^
2 +
((Sqr(C_Total(1).Real ^ 2 +
C_Total(1).Imaginaria ^ 2)))

  ' Cálculo de la EFICIENCIA DEL LAZO
  SF = MTotal / ModLin
  On Error GoTo errt

Exit Sub
errt:
  SF = 100
  Exit Sub
End Sub

Private Sub LlamadaCalculo()
  Call Calcular

  ' Rutina que realiza la
' representación gráfica
  Call Representacion
End Sub

Private Sub OptIMIZAR2()
COL = 4
  ' En la última columna
  ' se almacenan los valores
  ' de la corriente del lazo
Dim Escala, EScaled, ESCala3

  ' Para la ubicación del lazo
Dim XLa, XLa0
Dim WLa, WLa0
Dim HLa, HLa0

```

```

Dim MinSF_para_XLa
' LAZO HORIZONTAL
If Option6.Value = True Then
    Angulo_Conductores_Lazo = 0
' LAZO VERTICAL
ElseIf Option5.Value = True Then
    Angulo_Conductores_Lazo = PI / 2
End If
Escala = 100 / 41
Escala2 = 100 / 199

'Punto de medida
R_(0) = -UpDown1.Value
R_(1) = UpDown2.Value
R_(2) = 0

'Inicialización de los índices
XLa0 = UpDown3.Value ' Se parte de la
posición
' inicial del lazo en
-10
WLa0 = 2 ' Y de una anchura inicial del
lazo de 2 m
HLa0 = 2 ' Idem para la altura inicial
XLa = XLa0
WLa = WLa0
HLa = HLa0
pb2.Visible = True
pb1.Visible = True
ReDim Optim2(2000, COL) ' MATRIZ DINÁMICA
N = 0 ' ES EL VALOR
INICIAL PARA N

MinSF_para_XLa = 0.25 ' SE ESTABLECE EL
' VALOR MÍNIMO DE
REDUCCIÓN ADMISIBLE

' Bucle reiterativo para
' comprobar la eficacia del
' lazo en diferentes posiciones
For HLa = 2 To 42 Step 1
    For WLa = 2 To 40 Step 1
        DoEvents
        R1(0) = -(XLa)
        R1(1) = HLa + WLa * _
Sin(Angulo_Conductores_Lazo)
        R1(2) = 0
        R2(0) = -(XLa - WLa * _
Cos(Angulo_Conductores_Lazo))
        R2(1) = HLa
        R2(2) = 0
        Call Campos
        ' EN SF TENEMOS LA
"EFICIENCIA"
        If SF < MinSF_para_XLa
Then
            Optim2(N, 0) = XLa
            Optim2(N, 1) = WLa
            Optim2(N, 2) = HLa
            Optim2(N, 3) = SF
            Optim2(N, 4) = MCOR
            N = N + 1
        End If
        pb1.Valor = WLa * Escala
    Next
    pb2.Valor = HLa * Escala
Next
pb2.Visible = False
pb1.Visible = False

' ProgressBar1.Max = 199
' YA SE TIENE EN LA MATRIZ Optim2
' LAS POSICIONES Y EL ÓPTIMO PARA EL
LAZO
FLAG_A = 1
If N = 0 Then
    FLAG_A = 2
    Opt.Lista.AddItem
    ("NO HAY SOLUCIONES ADMISIBLES
PARA ESTA XLazo")
Else
    Dim Index
    For Index = 0 To (N - 1) Step 1
        Opt.Lista.AddItem
        ("Xlazo = " & Optim2(Index, 0) _
& " ; W = " & Optim2(Index, 1) _
& " ; H = " & Optim2(Index, 2) _
& " ; CR = " & Optim2(Index, 3) _
& " ; II = " & Optim2(Index, 4))
    Next
End If
Opt.Show
End Sub

Private Sub Form_QueryUnload_
(Cancel As Integer, UnloadMode As Integer)
Unload Me
End
End Sub

Private Sub UpDown8_Change()
cmmax.Caption = UpDown8.Value / 10
CM_max = UpDown8.Value / 10
End Sub

Private Sub Label61_MouseMove_
(Button As Integer, Shift As Integer, _
x As Single, Y As Single)
Label61.BorderStyle = 1
Label63.BorderStyle = 0
Label64.BorderStyle = 0
Label65.BorderStyle = 0
Label66.BorderStyle = 0
Label67.BorderStyle = 0
Label68.BorderStyle = 0
Label69.BorderStyle = 0
Label70.BorderStyle = 0
Label71.BorderStyle = 0
End Sub

Private Sub Label63_MouseMove_
(Button As Integer, Shift As Integer, _
x As Single, Y As Single)
Label61.BorderStyle = 0
Label63.BorderStyle = 1

```



```

Label63.BorderStyle = 0
Label64.BorderStyle = 0
Label65.BorderStyle = 0
Label66.BorderStyle = 0
Label67.BorderStyle = 0
Label68.BorderStyle = 0
Label69.BorderStyle = 0
Label70.BorderStyle = 0
Label71.BorderStyle = 0
End Sub

Private Sub Frame1_MouseMove_
(Button As Integer, Shift As Integer, _
x As Single, Y As Single)
Label61.BorderStyle = 0
Label63.BorderStyle = 0
Label64.BorderStyle = 0
Label65.BorderStyle = 0
Label66.BorderStyle = 0
Label67.BorderStyle = 0
Label68.BorderStyle = 0
Label69.BorderStyle = 0
Label70.BorderStyle = 0
Label71.BorderStyle = 0
End Sub

Private Sub Frame2_MouseMove_
(Button As Integer, Shift As Integer, _
x As Single, Y As Single)
Label61.BorderStyle = 0
Label63.BorderStyle = 0
Label64.BorderStyle = 0
Label65.BorderStyle = 0
Label66.BorderStyle = 0
Label67.BorderStyle = 0
Label68.BorderStyle = 0
Label69.BorderStyle = 0
Label70.BorderStyle = 0
Label71.BorderStyle = 0
End Sub

Private Sub Frame6_MouseMove_
(Button As Integer, Shift As Integer, _
x As Single, Y As Single)
Label61.BorderStyle = 0
Label63.BorderStyle = 0
Label64.BorderStyle = 0
Label65.BorderStyle = 0
Label66.BorderStyle = 0
Label67.BorderStyle = 0
Label68.BorderStyle = 0
Label69.BorderStyle = 0
Label70.BorderStyle = 0
Label71.BorderStyle = 0
End Sub

Private Sub label61_click()
Label61.BorderStyle = 0
Command1_Click
End Sub

Private Sub label63_click()
Label63.BorderStyle = 0
Calc_aprox_Click
End Sub

Private Sub label64_click()
Label64.BorderStyle = 0
Command4_Click
End Sub

Private Sub label65_click()
Label65.BorderStyle = 0
Opt2_Click
End Sub

Private Sub label66_click()
Label66.BorderStyle = 0
If OptimLarga = 0 Then
If RecVarCor = False Then
OptimizarZona
Else
CalculoTOTAL
End If
ElseIf OptimLarga = 1 Then
'Optimización larga
OOOptiMizLarga
End If
End Sub

Private Sub label67_click()
Label67.BorderStyle = 0

' Cálculo del C.M. creado por la línea
eléctrica.
CMLine
End Sub

Sub CMLine()
' Rutina para el cálculo del CM generado
por la línea
' en puntos próximos a ésta: desde -100 m
hasta +100 m.
Dim XX1
Dim VecVal(199)
Dim ML01
Dim Nfich As Integer
Dim Indice0 As Integer
Dim Indice01 As Integer
Dim Auxiliar As Integer
Dim RFich As String
Dim CText As String
Indice0 = 0
Indice01 = Indice0 - 100
ProgressBar1.Visible = True
ProgressBar1.Value = 0
Auxiliar = ProgressBar1.Max
ProgressBar1.Max = 200
For Indice0 = 0 To 199
XX1 = Indice01
Call CMLinea(XX1)
'en el vector C_bp tenemos el
valor del campo
'módulo del campo creado por
la línea
ML01 = Sqr((Sqr(C_Bp(0).Real ^
2_
+ C_Bp(0).Imaginaria ^ 2)) ^ 2
+
((Sqr(C_Bp(1).Real ^ 2 +
C_Bp(1).Imaginaria ^ 2)))
VecVal(Indice0) = ML01
Indice01 = Indice01 + 1
ProgressBar1.Value = Indice0

```

```

Next
' Escritura en el archivo de salida
Nfich = FreeFile
RFich = Replace(App.Path & "\CMLinea_"
&_
UpDown7.Value & ".csv", "\\ ", "\")
Open RFich For Output As Nfich
For Indice0 = 0 To 199
    CText = Indice0 & ";" &
VecVal(Indice0)
    Print #Nfich, CText
Next
Close Nfich
' -----
ProgressBar1.Max = Auxiliar
ProgressBar1.Value = 0
ProgressBar1.Visible = False
frmMensaje.Mensajito.Caption = RFich
frmMensaje.Show vbModal
End Sub

Private Sub label68_click()
Label68.BorderStyle = 0
Command2_Click
End Sub

Private Sub label70_click()
Label70.BorderStyle = 0
Command5_Click
End Sub

Private Sub label71_click()
Label71.BorderStyle = 0
End
End Sub

Private Sub label61_mousedown_
(Button As Integer, Shift As Integer, _
x As Single, Y As Single)
Label61.BorderStyle = 0
End Sub

Private Sub label63_mousedown_
(Button As Integer, Shift As Integer, _
x As Single, Y As Single)
Label63.BorderStyle = 0
End Sub

Private Sub label64_mousedown_
(Button As Integer, Shift As Integer, _
x As Single, Y As Single)
Label64.BorderStyle = 0
End Sub

Private Sub label65_mousedown_
(Button As Integer, Shift As Integer, _
x As Single, Y As Single)
Label65.BorderStyle = 0
End Sub

Private Sub label66_mousedown_
(Button As Integer, Shift As Integer, _
x As Single, Y As Single)
Label66.BorderStyle = 0
End Sub

Private Sub label67_mousedown_
(Button As Integer, Shift As Integer, _
x As Single, Y As Single)
Label67.BorderStyle = 0
End Sub

Private Sub label69_mousedown_
(Button As Integer, Shift As Integer, _
x As Single, Y As Single)
Label69.BorderStyle = 0
End Sub

Private Sub label68_mousedown_
(Button As Integer, Shift As Integer, _
x As Single, Y As Single)
Label68.BorderStyle = 0
End Sub

Private Sub label70_mousedown_
(Button As Integer, Shift As Integer, _
x As Single, Y As Single)
Label70.BorderStyle = 0
End Sub

Private Sub label71_mousedown_
(Button As Integer, Shift As Integer, _
x As Single, Y As Single)
Label71.BorderStyle = 0
End Sub

Private Sub vvissor_Click()
Command5_Click
End Sub

Private Sub Representacion_2()
' Se guardan las variables
' importantes como variables globales
ProgressBar1.Visible = True

ag = -UpDown1.Value
bg = R1(0)
cg = R1(1)
dg = R2(0)
eg = R2(1)
fg = Ir
gg = Ii
hg = R_(1)

' Rutina que rellena la matriz Datos
Indice = 0

Dim Max
Dim Min
Dim LongAbcisa
Dim Int_Real
Dim X_1, X_2
Dim Escala

Dim Campo__Bl(1) As Complejo
Dim Suma(1) As Complejo

Dim ML ' módulo campo línea
Dim MT ' módulo campo total
Dim SF

Max = ag - 100
Min = ag + 100

```

```

LongAbcisa = Sqr((Max - Min) ^ 2)

' Se divide entre 200, que son
' los puntos que se tomarán
' Int_Real = Intervalo Real
Int_Real = LongAbcisa / 200
ProgressBar1.Visible = True

Dim Cabecera
While Indice < 200

    X_1 = Max + Indice * Int_Real
    Datos(Indice, 0) = Indice

    ' CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR
    ' EL LAZO ACTIVO (para X_1)
    Y = CampoMagnetico(R1(0),
R1(1),_
    R2(0), R2(1), I_I, X_1, R_(1))

    Campo__Bl(0).Real = CM(0).Real
    Campo__Bl(0).Imaginaria =
CM(0).Imaginaria
    Campo__Bl(1).Real = CM(1).Real
    Campo__Bl(1).Imaginaria =
CM(1).Imaginaria

    ' CAMPO MAGNÉTICO CREADO
    ' POR LA LÍNEA (para X_1)
    Call CMLinea(X_1)

    ' En el vector C_bp tenemos
    ' el valor del campo
    ' módulo del campo creado por
la línea
    ML = Sqr((Sqr(C_Bp(0).Real ^ 2
+
    C_Bp(0).Imaginaria ^ 2)) ^ 2
+
    ((Sqr(C_Bp(1).Real ^ 2 +
C_Bp(1).Imaginaria ^ 2))))

    ' COMPOSICIÓN DE LA SUMA
    Suma(0).Real =
Campo__Bl(0).Real + C_Bp(0).Real
    Suma(0).Imaginaria =_
    Campo__Bl(0).Imaginaria +
C_Bp(0).Imaginaria
    Suma(1).Real =
Campo__Bl(1).Real + C_Bp(1).Real
    Suma(1).Imaginaria =_
    Campo__Bl(1).Imaginaria +
C_Bp(1).Imaginaria

    'módulo de la suma
    MT = Sqr((Sqr(Suma(0).Real ^ 2
+
    Suma(0).Imaginaria ^ 2)) ^ 2
+
    ((Sqr(Suma(1).Real ^ 2 +
Suma(1).Imaginaria ^ 2))))

    SF = MT / ML

    Datos(Indice, 1) = SF
    PCercanos(Indice, 0) = X_1

    PCercanos(Indice, 1) = SF

    ProgressBar1.Value = Indice
    Indice = Indice + 1
Wend

' AHORA SE CALCULAN LOS MISMOS
' RESULTADOS PARA UNA ALTURA DE 3
METROS
Indice = 0
UpDown2.Value = 3 ' SE COMPRUEBA A 3
METROS
While Indice < 200

    X_1 = Max + Indice * Int_Real

    ' CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR EL
    ' LAZO ACTIVO (para X_1)
    Y = CampoMagnetico(R1(0),
R1(1),_
    R2(0), R2(1), I_I, X_1, R_(1))

    Campo__Bl(0).Real = CM(0).Real
    Campo__Bl(0).Imaginaria =
CM(0).Imaginaria
    Campo__Bl(1).Real = CM(1).Real
    Campo__Bl(1).Imaginaria =
CM(1).Imaginaria

    ' CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR
    ' LA LÍNEA (para X_1)
    Call CMLinea(X_1)

    ' En el vector C_bp tenemos el
valor del campo
    ' módulo del campo creado por
la línea
    ML = Sqr((Sqr(C_Bp(0).Real ^ 2
+
    C_Bp(0).Imaginaria ^ 2)) ^ 2
+
    ((Sqr(C_Bp(1).Real ^ 2 +
C_Bp(1).Imaginaria ^ 2))))

    ' COMPOSICIÓN DE LA SUMA
    Suma(0).Real =
Campo__Bl(0).Real + C_Bp(0).Real
    Suma(0).Imaginaria =_
    Campo__Bl(0).Imaginaria +
C_Bp(0).Imaginaria
    Suma(1).Real =
Campo__Bl(1).Real + C_Bp(1).Real
    Suma(1).Imaginaria =_
    Campo__Bl(1).Imaginaria +
C_Bp(1).Imaginaria

    'módulo de la suma
    MT = Sqr((Sqr(Suma(0).Real ^ 2
+
    Suma(0).Imaginaria ^ 2)) ^ 2
+
    ((Sqr(Suma(1).Real ^ 2 +
Suma(1).Imaginaria ^ 2))))

    SF = MT / ML

    PCercanos(Indice, 2) = SF

```

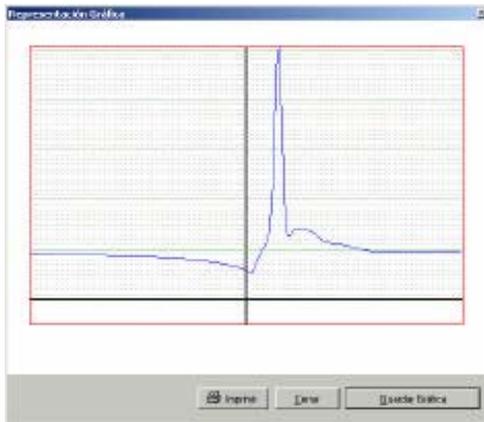
```
        ProgressBar1.Value = Indice
        Indice = Indice + 1
    Wend

    ' GUARDA UNA HOJA DE CÁLCULO
    ' CON LOS RESULTADOS PARA
    ' LOS PUNTOS CERCANOS
    Dim ruta
    ruta = App.Path & "\PCercanos-" &
    & UpDown3.Value & "-" &
    & UpDown4.Value & "-" &
    & UpDown5.Value & ".csv"

    Open ruta For Output As #22
        Cabecera = "Punto;Nivel de_
mitigación a 1m;Nivel de_
mitigación a 3m"
        Print #22, Cabecera
    Dim ia
    For ia = 0 To 199 Step 1
        Cabecera = PCercanos(ia, 0) &
        & ";" & PCercanos(ia, 1) & ";" &
        PCercanos(ia, 2)
        Print #22, Cabecera
    Next
    Close #22
    UpDown2.Value = 1
    Indice = 0
End Sub
```

B.2. Formulario opt.frm.

Es el formulario en el que se presentan las representaciones gráficas correspondientes al cociente entre el Campo Magnético Resultante y el Campo Magnético Original. Desde este formulario se puede guardar la gráfica como un fichero de mapa de bits (Bitmap *.bmp), también se puede imprimir o copiar al portapapeles dicha gráfica.



Option Explicit

```
Private Sub Command1_Click()
Unload Me
End Sub
```

```
Private Sub Command2_Click()
Dim numeroitems
```

```
' Vector para guardar los
' elementos de la lista
numeroitems = Lista.ListCount
```

```
Dim i As Integer
i = 0
```

```
CommonDialog1.DialogTitle = "Guardar
archivo del proceso"
```

```
' Establecer CancelError a True
CommonDialog1.CancelError = True
On Error GoTo ErrHandler
' Establecer los indicadores
CommonDialog1.Flags = cdloFNHideReadOnly
' Establecer los filtros
CommonDialog1.Filter = "Archivos de Proceso
M.I.T. (*.apm)|*.apm|"
' Presentar el cuadro de diálogo guardar
CommonDialog1.ShowSave
```

```
file1 = CommonDialog1.FileName
```

```
ReDim Salvar(numeroitems)
```

```
For i = 0 To numeroitems Step 1
Salvar(i) = Lista.List(i)
Next
```

```
i = 0
```

```
' En file1 ya tenemos la ruta donde vamos a
salvar el archivo de proceso
```

```
Open file1 For Output As #1
```

```
For i = 0 To numeroitems Step 1
Print #1, Salvar(i)
Next
```

```
Close #1
```

```
Exit Sub
```

```
ErrHandler:
```

```
' El usuario ha hecho clic en el botón
Cancelar
Exit Sub
End Sub
```

```
Private Sub Command3_Click()
```

```
Dim numeroitems
Dim Cabecera
Dim i
i = 0
```

```
' Vector para guardar los elementos de la
lista
numeroitems = Lista.ListCount
```

```
CommonDialog1.DialogTitle = "Guardar
Resultado de Optimización"

' Establecer CancelError a True
CommonDialog1.CancelError = True
On Error GoTo ErrHandler
```

```
' Establecer los indicadores
CommonDialog1.Flags = cdloFNHideReadOnly
```

```
' Establecer los filtros
CommonDialog1.Filter = "Hoja de
Cálculo(compatible con
Excel)(* .csv)|*.csv|"
```

```
' Presentar el cuadro de diálogo guardar
CommonDialog1.ShowSave
```

```
file1 = CommonDialog1.FileName
```

```
'Escritura del fichero
```

```
Open file1 For Output As #16
```

```
If FLAG_A = 0 Then
```

```
Cabecera = "Longitud Línea-Lazo;Anchura
Lazo;Altura Lazo;Mitigación"
```

```
Print #16, Cabecera
```

```
For i = 0 To numeroitems Step 1
Cabecera = Optimo(i, 0) & ";" &
Optimo(i, 1) & ";" & Optimo(i, 2) & ";" &
Optimo(i, 3)
```

```
Print #16, Cabecera
```

```
Next
```

```
ElseIf FLAG_A = 1 Then
```

```
Cabecera = "Longitud Línea-Lazo;Anchura
Lazo;Altura Lazo;Mitigación;Corriente Lazo"
```

```
Print #16, Cabecera
```

```
For i = 0 To numeroitems Step 1
Cabecera = Optim2(i, 0) & ";" &
Optim2(i, 1) & ";" & Optim2(i, 2) & ";" &
Optim2(i, 3) & ";" & Optim2(i, 4)
```

```
        Print #16, Cabecera
    Next
ElseIf FLAG_A = 2 Then
Exit Sub
End If

Close #16

Exit Sub

ErrorHandler:
' El usuario ha hecho clic en el botón
Cancelar
Exit Sub

End Sub

Private Sub Form_Load()
'centrar el formulario
Me.Move (Screen.Width - Me.Width) / 2,
(Screen.Height - Me.Height) / 2
End Sub
Private Sub Lista_DblClick()
If FLAG_A = 0 Then
Dim IndiceLista
IndiceLista = Lista.ListIndex

mit.UpDown3.value = Optimo(IndiceLista, 0)
mit.UpDown4.value = Optimo(IndiceLista, 1)
mit.UpDown5.value = Optimo(IndiceLista, 2)

mit.IniCalc.Enabled = True

ElseIf FLAG_A = 1 Then
IndiceLista = Lista.ListIndex

mit.UpDown3.value = Optim2(IndiceLista, 0)
mit.UpDown4.value = Optim2(IndiceLista, 1)
mit.UpDown5.value = Optim2(IndiceLista, 2)

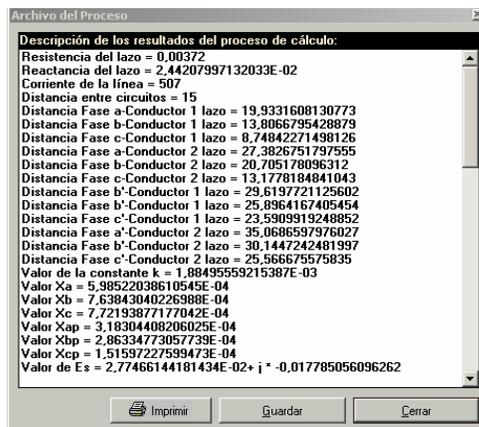
mit.IniCalc.Enabled = True

End If

End Sub
```

B.3. Formulario log.frm.

Formulario encargado de mostrar el denominado "archivo de proceso", en el cual se recogen todos los datos y cálculos efectuados durante la simulación de cada configuración del lazo. Aporta también los valores numéricos de la corriente (tanto en módulo como en fase), y de los Campos Magnéticos original y resultante. Permite salvar dichos valores numéricos en un fichero con extensión *.apm con la finalidad de poder consultarlo en cualquier instante, y así conocer completamente los resultados obtenidos en el proceso de simulación correspondiente.



```
Option Explicit

Dim numeroitems
Dim Salvar() As String ' Matriz dinámica,
                        ' porque no sabemos
                        ' a priori cuántos
                        ' tendrá la lista.
items

Dim file1
Dim chivato

Private Sub Command1_Click()

    Unload Me

End Sub

Private Sub Command2_Click()

'vector para guardar los elementos de la
lista

numeroitems = Lista.ListCount

Dim i As Integer
i = 0

CommonDialog1.DialogTitle = "Guardar
archivo del proceso"

' Establecer CancelError a True
CommonDialog1.CancelError = True
On Error GoTo ErrHandler
' Establecer los indicadores
CommonDialog1.Flags = cdlOFNHideReadOnly
' Establecer los filtros
CommonDialog1.Filter = "Archivos de Proceso
M.I.T. (*.apm)|*.apm|"
' Presentar el cuadro de diálogo guardar
CommonDialog1.ShowSave
file1 = CommonDialog1.FileName
Label2.Caption = file1
chivato = 1
```

```
Exit Sub
ErrHandler:
' El usuario ha hecho clic en el botón
Cancelar
Exit Sub
End Sub

Private Sub Guardar()
Dim i
ReDim Salvar(numeroitems)

For i = 0 To numeroitems Step 1
    Salvar(i) = Lista.List(i)
Next
i = 0

'en file1 ya tenemos la ruta donde vamos a
salvar el archivo de proceso
Open Label2.Caption For Output As #81
For i = 0 To numeroitems Step 1
    Print #81, Salvar(i)
Next
Close #81
End Sub

Private Sub Command3_Click()
If chivato = 0 Then
MsgBox "Antes de imprimir, hay que guardar
el archivo de Proceso", 64, "Guardar Antes
que Imprimir"
Exit Sub
End If
Call Imprimir
End Sub

Private Sub Form_Load()
chivato = 0
End Sub

Private Sub Timer1_Timer()

If Label2.Caption <> "salvadovacio" Then
    Guardar
    Timer1.Enabled = False
End If

End Sub

Private Sub Imprimir()
PrintTXTFile (file1)
End Sub
```

B.4. Módulo CampoMagnetico.bas.

Módulo que contiene todas las operaciones correspondientes al cálculo del Campo Magnético generado por un dipolo eléctrico. Recibe como argumentos las coordenadas de los conductores del dipolo, y la corriente del mismo, así como el punto donde se de desea medir el Campo, y calcula el valor de dicho Campo.

```
Option Explicit
```

```
' Definición de la
' matriz donde se
' almacenarán los datos
Public Datos(199, 1)

' Vector de
' posición del conductor 1
Public R1(2)

' Vector de
' posición del conductor 2
Public R2(2)

Public Psi
Public Theta

' DECLARACIÓN DEL VECTOR M
Public MM(1) As Complejo

Public MenuSecundario As Menu
Public CAMPO, CAMPOBP

' Definición de un CM
' para guardar los resultados
Public CM(1) As Complejo

Public Const PI As Double =
3.14159265358979
Public Const Omega = 2 * PI * 50
Public Const Mu0 = 4 * PI * 10 ^ (-7)

' Rutina general para
' el cálculo del campo
' magnético en función
' de varios parámetros que
' son los que se pasan
' desde la llamada. Con ésto,
' se aprovecha la misma
' rutina para cal-
' cular el campo magnético
' producido por cada
' conductor activo del
' sistema:lazo y línea
' (ésta última dotada de
' dos circuitos con 3 fases
' cada uno de ellos)
Public Function CampoMagnetico(ByVal R1x,
R1y, R2x, R2y, Intensidad As Complejo, Rx,
Ry) As Integer
On Local Error GoTo AST
' Los parámetros que
' habrá que pasar a
' la función serán
'-----
```

```
' r1:vector de posición
' del conductor 1
' r2:vector de posición
' del conductor 2
' id:Intensidad por el
' conductor 1 del dipolo
' r:vector posición del
' punto donde se desea
' conocer el campo

' DECLARACIÓN DE VARIABLES
Dim p(1)
Dim Pm
Dim Rd(1)
Dim Rdm
Dim M
Dim R0(1)
Dim R_(1)
Dim aux, modaux

' Módulo del momento
' magnético
Dim M_ As Complejo

' Vector para el
' campo magnético
Dim B

' comienzo de los cálculos
' El vector p es la resta
' de los vectores R1 - R2
p(0) = R1x - R2x
p(1) = R1y - R2y

' Módulo del vector p=pm
Pm = Sqr(p(0) ^ 2 + p(1) ^ 2)

' Composición del vector R0:
R0(0) = 0.5 * (R1x + R2x)
R0(1) = 0.5 * (R1y + R2y)

' Composición de R:
R_(0) = Rx
R_(1) = Ry

' Composición del vector Rd
Rd(0) = R_(0) - R0(0)
Rd(1) = R_(1) - R0(1)

' Módulo del vector Rd:
Rdm = Sqr((Rd(0)) ^ 2 + (Rd(1)) ^ 2)

' Definición de los
' ángulos implicados
' Dependerán de si el
' lazo tiene configuración
' HORIZONTAL o VERTICAL

'*****
' ÁNGULO PSI
'*****
' DISPOSICIÓN DE LAZO HORIZONTAL
If mit.Option6.Value = 1 Then
Psi = 0
Else
' DISPOSICIÓN DE LAZO VERTICAL
Psi = 3 * PI / 2
```

```

End If

'*****
' ÁNGULO THETA
'*****
If Rd(0) <> 0 Then
  aux = Rd(1) / Rd(0)
  modaux = Abs(aux)
  Theta = Atn(modaux)
  ' Hasta aquí theta
  ' siempre será positiva

  Select Case aux
    Case Is < 0

      If Rd(0) > 0 Then
        Theta = 2 * PI - Theta
      Else
        Theta = PI - Theta
      End If

    Case Is > 0

      If Rd(0) > 0 Then
        Theta = Theta
      Else
        Theta = PI + Theta
      End If
    End Select

  ElseIf Rd(0) = 0 And Rd(1) > 0 Then Theta =
  PI / 2
  ElseIf Rd(0) = 0 And Rd(1) < 0 Then Theta =
  3 * PI / 2
  End If

'*****
M_.Real = Intensidad.Real * Pm
M_.Imaginaria = Intensidad.Imaginaria * Pm

' MM se define como MM=I*p
MM(0).Real = Intensidad.Real * p(0)
MM(0).Imaginaria = Intensidad.Imaginaria *
p(0)
MM(1).Real = Intensidad.Real * p(1)
MM(1).Imaginaria = Intensidad.Imaginaria *
p(1)

' Ahora vienen los cálculos
' del campo magnético
'*****
' Variables auxiliares
Dim aux2
Dim modaux2
Dim au
Dim s

' Composición del vector CM
' Variables auxiliares
  au = 10 ^ 6 * Mu0 / (2 * PI)
  s = Pm
  aux2 = au / ((Rdm ^ 2 + s ^ 2 / 4) ^ 2
- Rdm ^ 2 * s ^ 2 * (Cos(Theta - Psi)) ^ 2)

'*****
' COMPONENTE X
'*****

CM(0).Real = aux2 * ((Rdm ^ 2 * Cos(2 *
Theta) + s ^ 2 / 4) * MM(1).Real - Rdm ^ 2
* Sin(2 * Theta) * MM(0).Real)
CM(0).Imaginaria = aux2 * ((Rdm ^ 2 * Cos(2
* Theta) + s ^ 2 / 4) * MM(1).Imaginaria -
Rdm ^ 2 * Sin(2 * Theta) *
MM(0).Imaginaria)

'*****
' COMPONENTE Y
'*****
CM(1).Real = aux2 * ((Rdm ^ 2 * Cos(2 *
Theta) - s ^ 2 / 4) * MM(0).Real + Rdm ^ 2
* Sin(2 * Theta) * MM(1).Real)
CM(1).Imaginaria = aux2 * ((Rdm ^ 2 * Cos(2
* Theta) - s ^ 2 / 4) * MM(0).Imaginaria +
Rdm ^ 2 * Sin(2 * Theta) *
MM(1).Imaginaria)
Exit Function
AST:
  MARCA1 = 1
  Exit Function
End Function

```

B.5. Módulo CampoLinea.bas (extracto).

En este módulo se recogen las llamadas a la función de cálculo del Campo Magnético para dipolos eléctricos y se aprovecha para calcular el Campo Magnético generado por la línea eléctrica. Se tiene en cuenta que la línea se compone de dos circuitos trifásicos.

encuentra entre la red y el punto de medida. En caso contrario será negativa

kg/metro) 1.832

altura (kg) 5050

fecha (m) 3.5

medio (m) 0.8085

to 30 metros

Distancia Línea-Lazo de conducción 31 metros

Anchura Lazo 8 metros

Altura del Lazo (conductor 1) 4 metros

Ángulo de antiparalelismo con la línea 0 grados

Búsqueda para corriente mínima

Búsqueda completa

```
Option Explicit
' Definición de variables
' globales que se utilizarán
' en este módulo
' y en el principal MIT

' Declaración de un nuevo
' tipo de variable: la compleja
' para trabajar con las corrientes
' y los campos complejos
Public Type Complejo
    Real As Currency
    Imaginaria As Currency
End Type

Public ag, bg, cg, dg, eg, fg, gg, hg
Public FCalculoProg As String
Public CM_max
' Matriz con resultados

' Para los resultados
' de Optimización
Public Optimo(100, 3)

' Para almacenar los resultados
' de los puntos cercanos
Public PCercanos(200, 3)
Public Resultados(500, 2)
Public Vector(360)

' Corrientes
Public IntensidadA As Complejo
Public IntensidadC As Complejo
Public IntensidadLazo As Complejo
Public ModuloCorrienteLazo
Public ArgumentoCorrienteLazo

' Variable auxiliar
Dim Vaux

' Campos magnéticos
Public C_B1(1) As Complejo
Public C_Bp(1) As Complejo
Public C_Lazo(1) As Complejo
Public C_Linea(1) As Complejo
Public C_Total(1) As Complejo

' Distancias
Public LL ' Distancia Línea-Lazo
Public AL ' Anchura del lazo
Public Ang ' Orientación del lazo
Public HL ' Altura del lazo
Public XRow ' Punto de medida-coordenada x-
Public YRow ' Punto de medida-coordenada y-
```

```
' Para comprobar si la
' línea será horizontal o vertical
Public H_V As Boolean
' H_V será false si es horizontal
' H_V será true si es vertical

Public Sub Aproximacion()
' En primer lugar se calculará
' el CM creado por la línea
' Vaux = -1 * mit.UpDown1.Value
Call CMLinea(mit.UpDown1.Value)

' Después se calculará el CM
' creado por el lazo, de modo
' que la suma de los campos
' de como resultado un campo
' resultante mínimo
Call CampoLazo
End Sub

Public Sub CMLinea(x)
' RUTINA QUE CALCULA EL CAMPO MAGNÉTICO
' GENERADO POR LA LÍNEA EN UN PUNTO X
Dim Corriente
Dim Xc(2)
Dim xcp(2)
Dim yc(2)
Dim ycp(2)

' Preparación de los datos
' Corrientes por la línea
Corriente = mit.UpDown7.Value / 2
IntensidadA.Imaginaria = 0
IntensidadA.Real = Corriente
IntensidadC.Real = Corriente * Cos(2 *
PI / 3)
IntensidadC.Imaginaria = Corriente *
Sin(2 * PI / 3)

' Composición del vector xc:
' coordenadas x de los conductores
' de fase circuito x<0
Xc(0) = -mit.Text3.Text / 2
Xc(1) = Xc(0)
Xc(2) = Xc(0)

' Composición del vector xcp:
' idem xc para conductores
' de fase x>0
xcp(0) = -Xc(0)
xcp(1) = xcp(0)
xcp(2) = xcp(0)

' Composición de los vectores
' yc e ycp, con las alturas
' de las fases
yc(0) = 30.03
yc(1) = 22.88
yc(2) = 14.07
ycp(0) = 30.03
ycp(1) = 22.88
ycp(2) = 14.07

' Asignación de valores
' del punto de medida
XRow = x
```

```

YRow = mit.UpDown2.Value

' Ahora se calculará el
' campo magnético creado
' por la línea
Dim Auxiliar1(1) As Complejo
Dim Auxiliar2(1) As Complejo
Dim Auxiliar3(1) As Complejo
Dim auxiliar4(1) As Complejo
Dim S_1(1) As Complejo
Dim S_2(1) As Complejo

' OBTENCIÓN DE AUXILIAR1
Vaux = CampoMagnetico(Xc(0), yc(0),
Xc(1), yc(1), IntensidadA, XRow, YRow)
Auxiliar1(0).Real = CM(0).Real
Auxiliar1(0).Imaginaria =
CM(0).Imaginaria
Auxiliar1(1).Real = CM(1).Real
Auxiliar1(1).Imaginaria =
CM(1).Imaginaria

' OBTENCIÓN DE AUXILIAR2
Vaux = CampoMagnetico(Xc(2), yc(2),
Xc(1), yc(1), IntensidadC, XRow, YRow)
Auxiliar2(0).Real = CM(0).Real
Auxiliar2(0).Imaginaria =
CM(0).Imaginaria
Auxiliar2(1).Real = CM(1).Real
Auxiliar2(1).Imaginaria =
CM(1).Imaginaria

' OBTENCIÓN DE AUXILIAR3
Vaux = CampoMagnetico(xcp(0), ycp(0),
xcp(1), ycp(1), IntensidadA, XRow, YRow)
Auxiliar3(0).Real = CM(0).Real
Auxiliar3(0).Imaginaria =
CM(0).Imaginaria
Auxiliar3(1).Real = CM(1).Real
Auxiliar3(1).Imaginaria =
CM(1).Imaginaria

' OBTENCIÓN DE AUXILIAR4
Vaux = CampoMagnetico(xcp(2), ycp(2),
xcp(1), ycp(1), IntensidadC, XRow, YRow)
auxiliar4(0).Real = CM(0).Real
auxiliar4(0).Imaginaria =
CM(0).Imaginaria
auxiliar4(1).Real = CM(1).Real
auxiliar4(1).Imaginaria =
CM(1).Imaginaria

' Composición de los sumando S_1 y S_2
S_1(0).Real = Auxiliar1(0).Real +
Auxiliar2(0).Real
S_1(1).Real = Auxiliar1(1).Real +
Auxiliar2(1).Real

S_1(0).Imaginaria =
Auxiliar1(0).Imaginaria +
Auxiliar2(0).Imaginaria
S_1(1).Imaginaria =
Auxiliar1(1).Imaginaria +
Auxiliar2(1).Imaginaria

S_2(0).Real = Auxiliar3(0).Real +
auxiliar4(0).Real

S_2(1).Real = Auxiliar3(1).Real +
auxiliar4(1).Real

S_2(0).Imaginaria =
Auxiliar3(0).Imaginaria +
auxiliar4(0).Imaginaria
S_2(1).Imaginaria =
Auxiliar3(1).Imaginaria +
auxiliar4(1).Imaginaria

'*****
' Composición del campo Bp
'*****

C_Bp(0).Real = S_1(0).Real +
S_2(0).Real
C_Bp(0).Imaginaria = S_1(0).Imaginaria
+ S_2(0).Imaginaria

C_Bp(1).Real = S_1(1).Real +
S_2(1).Real
C_Bp(1).Imaginaria = S_1(1).Imaginaria
+ S_2(1).Imaginaria

End Sub

Private Sub CampoLazo()
Dim Indice, Indice2
Dim Angulo
Dim Modulo
Dim ax1, ax2, ay1, ay2 As Double
Dim Suma(1) As Complejo
Dim MODSUMA
Dim Minimo1
Dim Minimo2
Dim Angulo_Bueno

' Se probará inicialmente
' con una corriente Ilazo=1|_0
' y se mirará variando el argumento
' si se obtienen mínimos

' Posteriormente, se incrementará
' el valor del argumento,
' de grado en grado (desde 0° hasta
' 360°, de modo que se calcule lo mismo
' Todos los resultados se
' almacenarán en una matriz de (500,3)

' Composición de distancias
LL = mit.UpDown3.Value
HL = mit.UpDown5.Value
AL = mit.UpDown4.Value
ax1 = LL

' LAZO HORIZONTAL
If mit.Option6.Value = True Then
    Ang = 0

' LAZO VERTICAL
ElseIf mit.Option5.Value = True

Then
    Ang = PI / 2
End If
ay1 = HL + AL * Sin(Ang)
ax2 = ax1 - AL * Cos(Ang)

```

```

ay2 = HL

' Inicialización de valores
Indice = 1
Modulo = 1
IntensidadLazo.Real = 1 * Cos(0)
IntensidadLazo.Imaginaria = 1 * Sin(0)
Angulo = 0
Minimo2 = 100
While Indice < 501
  For Angulo = 0 To 360 Step 1
    DoEvents
    ' Cálculo del Campo Magnético
    ' del lazo con la corriente
    IntensidadLazo.Real = Modulo *
Cos(Angulo * PI / 180)
    IntensidadLazo.Imaginaria =
Modulo * Sin(Angulo * PI / 180)
    Vaux = CampoMagnetico(ax1, ay1,
ax2, ay2, IntensidadLazo, XRow, YRow)
    C_Lazo(0).Real = CM(0).Real
    C_Lazo(0).Imaginaria =
CM(0).Imaginaria
    C_Lazo(1).Real = CM(1).Real
    C_Lazo(1).Imaginaria =
CM(1).Imaginaria

    ' Cálculo de la suma
    ' de los campos
    Suma(0).Real = C_Lazo(0).Real +
C_Bp(0).Real
    Suma(1).Real = C_Lazo(1).Real +
C_Bp(1).Real
    Suma(0).Imaginaria =
C_Lazo(0).Imaginaria + C_Bp(0).Imaginaria
    Suma(1).Imaginaria =
C_Lazo(1).Imaginaria + C_Bp(1).Imaginaria

    ' Se calcula el
    ' módulo de la suma
    MODSUMA = Sqr((Sqr(Suma(0).Real
^ 2 + Suma(0).Imaginaria ^ 2)) ^ 2 +
(Sqr(Suma(1).Real ^ 2 + Suma(1).Imaginaria
^ 2)) ^ 2)

    Vector(Angulo) = MODSUMA
    mit.prog2.Value = Angulo
  Next

  ' Para ver con qué ángulo
  ' se tiene menor ModSuma
  Minimo1 = Vector(0)
  Angulo_Bueno = 0
  For Angulo = 0 To 360 Step 1

    If Vector(Angulo) < Minimo1

Then
      Minimo1 = Vector(Angulo)
      Angulo_Bueno = Angulo
    End If

    mit.Prog3.Value = Angulo
  Next

  ' Escritura en la
  ' matriz de resultados
  Resultados(Indice, 0) = Modulo

      Resultados(Indice, 1) =
Angulo_Bueno
      Resultados(Indice, 2) = Minimo1

      If Minimo1 < Minimo2 Then
        ModuloCorrienteLazo = Modulo
        ArgumentoCorrienteLazo =
Angulo_Bueno
        Minimo2 = Minimo1
      End If

      mit.prog1.Value = Indice
      Indice = Indice + 1
      Modulo = Modulo + 1

    Wend

    ilog.Lista.AddItem ("")
    ilog.Lista.AddItem ("====Campo creado
por la línea====")
    ilog.Lista.AddItem (C_Bp(0).Real)
    ilog.Lista.AddItem (C_Bp(0).Imaginaria)
    ilog.Lista.AddItem (-C_Bp(1).Real)
    ilog.Lista.AddItem (-
C_Bp(1).Imaginaria)
    ilog.Lista.AddItem
("====")

    ' Cálculo del Campo
    ' Magnético del lazo
    ' con la corriente
    IntensidadLazo.Real =
ModuloCorrienteLazo *
Cos(ArgumentoCorrienteLazo * PI / 180)
    IntensidadLazo.Imaginaria =
ModuloCorrienteLazo *
Sin(ArgumentoCorrienteLazo * PI / 180)
    Vaux = CampoMagnetico(ax1, ay1, ax2,
ay2, IntensidadLazo, XRow, YRow)
    C_Lazo(0).Real = CM(0).Real
    C_Lazo(0).Imaginaria = CM(0).Imaginaria
    C_Lazo(1).Real = CM(1).Real
    C_Lazo(1).Imaginaria = CM(1).Imaginaria

    ilog.Lista.AddItem ("")
    ilog.Lista.AddItem ("====Campo creado
por el lazo====")
    ilog.Lista.AddItem (C_Lazo(0).Real)
    ilog.Lista.AddItem
(C_Lazo(0).Imaginaria)
    ilog.Lista.AddItem (-C_Lazo(1).Real)
    ilog.Lista.AddItem (-
C_Lazo(1).Imaginaria)
    ilog.Lista.AddItem
("====")

    ilog.Lista.AddItem ("Modulo = " &
ModuloCorrienteLazo & " ; Argumento = " &
ArgumentoCorrienteLazo & " ; Suma = " &
Minimo2)
    ' Centrar el formulario
    ilog.Move (Screen.Width - ilog.Width) /
2, (Screen.Height - ilog.Height) / 2

```

```
' Muestra el archivo de proceso
ilog.Show

mit.Picture1.Visible = False
mit.Labprog.Visible = False
mit.prog1.Visible = False
mit.prog2.Visible = False
mit.Prog3.Visible = False
End Sub
```

Apéndice C

PROGRAMA PARA CÁLCULO DE POTENCIAS.

```
% -----potencias.m-----
% Extracto del programa para cálculo de CM - Sección
% correspondiente al cálculo de potencias en función del
% tipo de conductor del lazo.
% José Luis Campoy Cano
%=====
fprintf('Seleccionar el tipo de conductor para el lazo\n')
fprintf('1 - Conductor tipo Cardinal (LA-545)\n')
fprintf('2 - Conductor tipo Cóndor (LA-455)\n')
fprintf('3 - Conductor tipo LA-180\n')
fprintf('4 - Conductor tipo LA-110\n')
fprintf('=====\n')
t=input('Escribir N° conductor (del 1 al 4)\n');
if t>4
    error('No es un número válido.')
end
if t<1
    error('No es un número válido.')
end

% Definición de Constantes.
Omega=2*pi*50;
mu0=4*pi*10^(-7);
```

```

% Datos de la Línea y Punto de Medida.
Ia=200+j*0;
Ic=200*(cos(2*pi/3)+j*sin(2*pi/3));
Iap=Ia;
Icp=Ic;
w=15; % Distancia entre circuitos.
ym=1; % Cota del punto de medida.
xc=[-0.5*w;-0.5*w;-0.5*w]; % Abcisa de los conductores del
% Circuito #1
xcp=[0.5*w;0.5*w;0.5*w]; % Abcisa de los conductores del
% Circuito #2
yc=[30.03;22.88;14.07]; % Cotas Circuito #1
ycp=[30.03;22.88;14.07]; % Cotas Circuito #1
% Datos del Lazo de Corriente.
% R: Resistencia-----> en ohmios/m
% a: Radio-----> en m
% lambda: Peso-----> en kg/m
% EEp: Carga Rotura----> en kg

% Selección del tipo de conductor:
switch t
    case{1}
        % LA-545 (CARDINAL)
        R=0.062*10^(-3);
        a=0.5*0.03042;
        rgm=0.8085*a;
        lambda=1.832;
        EEp=15150/3;
        flecha=3.5;
    case{2}
        % LA-455 (CÓNDOR)
        R=0.074*10^(-3);
        a=0.5*0.02772;
        rgm=0.8085*a;
        lambda=1.521;
        EEp=12650/3;
        flecha=3.5;
    case{3}

```

```

% LA-180
R=0.196*10^(-3);
a=0.5*0.0175;
rgm=0.8260*a;
lambda=0.676;
EEp=6520/3;
    flecha=2.6;
case{4}
    % LA-545 (CARDINAL)
R=0.31*10^(-3);
a=0.5*0.014;
rgm=0.8260*a;
lambda=0.433;
EEp=4400/3;
    flecha=3.5;
end

% Longitud del lazo:
llazo=30;
s=7; % Anchura del lazo.

% Cálculo de la impedancia del lazo en ohmios/m
xrow=45; % Abcisa del Punto de Medida.
Rm=[xrow,ym];

Rl=2*R*(llazo+s);
Xl=(llazo*Omega*mu0*log(s/rgm))/pi;
Zl=Rl+j*Xl; % Impedancia del lazo

% -----
% LA CORRIENTE QUE CIRCULA POR EL LAZO ES
% Il
% -----

% Cálculo de las coordenadas de todos los conductores:
% de la línea y del lazo de corriente.
% -----

```

```
% Coordinadas de los conductores de la línea:
xc1(1)=xc(1);
xc1(2)=yc(1);
xc2(1)=xc(2);
xc2(2)=yc(2);
xc3(1)=xc(3);
xc3(2)=yc(3);

xcp1(1)=xcp(1);
xcp1(2)=ycp(1);
xcp2(1)=xcp(2);
xcp2(2)=ycp(2);
xcp3(1)=xcp(3);
xcp3(2)=ycp(3);

% Coordinadas de los conductores del lazo:
% Se fijan aquí estos valores, es decir
% para efectuar los cálculos para otro lazo
% con diferente configuración, habrá que modificar
% los siguientes valores.
% Ver figura para conocer los criterios de referencia.
xl1(1)=-21; % Abcisa del conductor #1 del lazo.
xl1(2)=16; % Ordenada del conductor #1 del lazo.
xl2(1)=-21; % Abcisa del conductor #2 del lazo.
xl2(2)=9; % Ordenada del conductos #2 del lazo.

% Corriente unitaria:
% Se puede omitir, pero...
Iu=1+j*0;

% Cálculo de las distancias entre conductores:
% -----
% (Intento usar la misma nomenclatura que en la
% del programa en Mathematica de Pedro Cruz.

dl=sqrt((xl1(1)-xc1(1))^2+(xl1(2)-xc1(2))^2);
% dl1b=distancia entre el conductor 1 del lazo y fase b
dl1b=sqrt((xl1(1)-xc2(1))^2+(xl1(2)-xc2(2))^2);
```

```

% Idem para el resto de distancias
dl1c=sqrt((xl1(1)-xc3(1))^2+(xl1(2)-xc3(2))^2);
dl2a=sqrt((xl2(1)-xc1(1))^2+(xl2(2)-xc1(2))^2);
dl2b=sqrt((xl2(1)-xc2(1))^2+(xl2(2)-xc2(2))^2);
dl2c=sqrt((xl2(1)-xc3(1))^2+(xl2(2)-xc3(2))^2);

% distancias respecto de los conductores del
% circuito #2 de la línea.
dl1ap=sqrt((xl1(1)-xcp1(1))^2+(xl1(2)-xcp1(2))^2);
dl1bp=sqrt((xl1(1)-xcp2(1))^2+(xl1(2)-xcp2(2))^2);
dl1cp=sqrt((xl1(1)-xcp3(1))^2+(xl1(2)-xcp3(2))^2);
dl2ap=sqrt((xl2(1)-xcp1(1))^2+(xl2(2)-xcp1(2))^2);
dl2bp=sqrt((xl2(1)-xcp2(1))^2+(xl2(2)-xcp2(2))^2);
dl2cp=sqrt((xl2(1)-xcp3(1))^2+(xl2(2)-xcp3(2))^2);

% Cálculo de inductancias:
k=Omega*mu0/(2*pi);
% Cálculo de las componentes expresión 6.31 tesis Pedro Cruz.
Xa=k*log(dl2a/dl1);
Xb=k*log(dl2b/dl1b);
Xc=k*log(dl2c/dl1c);
Xap=k*log(dl2ap/dl1ap);
Xbp=k*log(dl2bp/dl1bp);
Xcp=k*log(dl2cp/dl1cp);

% F.E.M. INDUCIDA EN EL LAZO COMO CONSECUENCIA DE LA
% CIRCULACIÓN DE CORRIENTE POR LA LÍNEA.
Ep=-j*((Xa-Xb)*Ia+(Xc-Xb)*Ic+(Xap-Xbp)*Iap+(Xcp-Xbp)*Icp);

Il=-288.8087+j*204.5728;%Corriente del lazo.

% Cálculo de Eg:
% -----
Eg=-Ep+Il*Zl;

% Cálculo de la Potencia:
% -----
Sn=Eg*conj(Il)

```

```
% Presentación de los resultados:
% -----
fprintf('Potencia Activa: %f W\n',real(Sn))
fprintf('Potencia Reactiva: %f W\n',imag(Sn))
```

C.1. Corrección para el cálculo de la inductancia propia del lazo.

Atendiendo a las expresiones incluidas en la sección 6.2.2, para el cálculo de la inductancia propia del lazo se ha hecho uso del sistema de cálculo “Maple”, por la sencillez que presenta a la hora de trabajar con cálculo simbólico. El comando básico para el cálculo del flujo ϕ_{ei} es el que se incluye a continuación (se presenta el correspondiente al cálculo de ϕ_{e1} , el resto se escribirá de forma análoga, indicando las coordenadas correspondientes en cada caso a cada conductor):

```
int(int( 10^(-7)*(1/(x-(-3.5))^2)*
((15-z)/(sqrt((x-(-3.5))^2+(15-z)^2))-
(-15-z)/(sqrt((x-(-3.5))^2+(15-z)^2))*
(x-(-3.5))),z=-15..15), x=-3.5+0.01521..3.5);
```

Apéndice **D**

DATOS NECESARIOS PARA EL DISEÑO DE LA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA.

D.1. Unidades utilizadas en cálculos de instalación fotovoltaica.

Tabla D.1: Tabla de conversión de unidades usuales en energía solar.

| Unidad | Equivalencia |
|-----------------------|---------------------------------------|
| 1 Langley | 1 cal/cm ² |
| 1 cal | 4.186 W |
| 1 cal/h | 4.186 W × 1h/3600s |
| 1 cal/cm ² | 0.016 × 100mWh/cm ² |
| 1 Langley | 0.016 × 100mWh/cm ² |
| 1 Langley/día | (0,016 × 100mWh/cm ²)/día |
| 1 kWh/m ² | 82.2069 cal/cm ² |

D.2. Tabla de valores de radiación en la provincia de Sevilla.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cruz Romero, Pedro L: *Análisis, Cálculo y Técnicas de mitigación de Campos Magnéticos creados por líneas eléctricas de Alta Tensión*. Tesis Doctoral, 2000.
- [2] Capitán Prada, Ángel: *Software Para el Cálculo de Campos Magnéticos en Líneas Aéreas*. Proyecto Fin de Carrera, E.S.I. Sevilla, 2001.
- [3] Horton W.F., Goldberg S.: *Power Frequency Magnetics Fields and Public Health*. Boca Raton. CRC, 1995.
- [4] Cruz Romero, Pedro L.; Izquierdo Mitchell, Carlos; Burgos Payán, Manuel: *Optimal Design of Active Shielding for Power Lines*. 14th PSCC, Sevilla. 2000.
- [5] Larsson Anette, Jonsson Uno, Sjödin Jan-Olov: *Design, Test and Cost of a Magnetic Field Cancellation Loop near a Swedish 400kV line*. Stockholm Power Tech, 1995.
- [6] Izquierdo Mitchell, Carlos; Burgos Payán, Manuel. *Medida de Campos Electromagnéticos de Líneas de A.T. La Conexión España-Marruecos*. III Jornadas Latinoamericanas de A.T. y Aislamiento Eléctrico. Universidad de Simón Bolívar, Octubre 1997.
- [7] Moulder, John E.: *Controversia Sobre las Líneas Eléctricas y el Cáncer: ¿Existen Pruebas Científicas?*. III Jornadas sobre Líneas Eléctricas y Medio Ambiente. R.E.E. Octubre 1999.
- [8] Represa de la Guerra, Juan; Llanos Lecumberri, Carlos: *Cinco Años de Investigación Sobre los Efectos Biológicos de los Campos Electromagnéticos*

Bibliografía

- de Frecuencia Industrial en los Seres Vivos*. Universidad de Valladolid, C.S.I.C., Unesa y R.E.E., 1995–2000.
- [9] Gimeno Sales Fco. J., Seguí Chilet Salvador, Orts Grau Salvador: *Convertidores Electrónicos: Energía Solar Fotovoltaica, Aplicaciones y Diseño*. Editorial U.P.V. 2002.
- [10] Grupo Pandora: *Campos Eléctricos y Magnéticos de 50 Hz. Análisis del estado de conocimientos*. ISBN 84-9320590-7, 2001.
- [11] S. Castaño Lara; J. M. Gómez Ros; A. Real Gallego: *Campos electromagnéticos generados por las líneas eléctricas de alta tensión. Posibles efectos sobre la salud y el medio ambiente*. CIEMAT (Madrid), 1997.
- [12] John E. Moulder, Ph. D.: *Líneas eléctricas y cáncer: Preguntas y Respuestas*. NAS/NRPB, 1999.
- [13] Bowman J.D., Kelsh M.A., Kaune W.T.: *Manual for Measuring Occupational Electric and Magnetic Field Exposures*. U.S. Department of Health and Human Services, Octubre 1998.
- [14] *Boletín Estadístico de Energía Eléctrica*. Ministerio de Economía, Red Eléctrica de España, Diciembre 2001.
- [15] *La Energía Eléctrica por Comunidades Autónomas*. Red Eléctrica de España, 2000.
- [16] Grandi Gabriele: *A Simple Method to Approximate the Magnetic Field in the Vicinity of Overhead Power Lines*. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Bologna, 2001.
- [17] González Vázquez, F.J.: *Líneas Eléctricas*. Apuntes del Departamento de Ingeniería Eléctrica, E.S.I. Sevilla, 2001.
- [18] Lozano Campoy, José: *Electromagnetismo II*. Apuntes del Departamento de Física Aplicada, E.S.I. Sevilla, 1995.
- [19] Rey, A; Domínguez, J. A.; Ruiz, M.; Lorenzo, S.: *Connecting DC Energy Sources to the Utility*. Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad de Valladolid, 1998.

- [20] Morrison, Richard y otros autores: *A DSP Controlled, Isolated, Power Factor Corrected AC/DC Converter*. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 7, no. 1, January 2001, pp128-135.
- [21] García Franquelo, Leopoldo: *Electrónica de Potencia*. Apuntes del Departamento de Ingeniería Electrónica, E.S.I. Sevilla 1999.
- [22] González Rodríguez, Ángel G.; Burgos Payán, Manuel: *Introducción a PSCAD*. Departamento de Ingeniería Eléctrica, E.S.I. Sevilla, Mayo 1999.