

CÁLCULO INFORMATIZADO DE INDUCTORES

Milanés Montero, M^a Isabel; Silos Calderón, Israel; Romero Cadaval, Enrique; Martínez Giles, Ángel; Montero Milanés, José Miguel; Barrero González, Fermín.

Escuela de Ingenierías Industriales (UEX)

Apdo. 382 06071 Badajoz

milanes@unex.es

Ref: 183

RESUMEN

Las bobinas constituyen un elemento común en cualquier circuito de un sistema de energía eléctrica (inductancias de las líneas, transformadores, cargas, etc.). En el campo de la Electrónica de Potencia también actúan con un papel indispensable en cualquier convertidor electrónico. El diseño de estos elementos y su construcción depende de la aplicación particular en la que vayan a formar parte.

El dimensionamiento de componentes inductivos suele realizarse empleando cálculos paramétricos a partir de datos de inductores o transformadores previamente construidos o mediante un método iterativo hasta llegar a un diseño en el que todas las especificaciones sean satisfechas. En cualquier caso, la aplicación de estos métodos resulta tediosa debido a que es necesario utilizar numerosas tablas y gráficas suministradas por los fabricantes, interpolar en dichas gráficas, etc. Este hecho, unido a que es un método sistemático, con unos pasos a seguir perfectamente definidos, lo hacen especialmente apto para ser automatizado. Con este objetivo, se propone en el presente trabajo el cálculo automatizado para el diseño de inductores, empleando una aplicación informática desarrollada para tal fin en el Área de Ingeniería Eléctrica de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura.

El programa permite el dimensionamiento de bobinas a partir de las especificaciones indicadas por el usuario. La aplicación permitirá seleccionar el material empleado para el núcleo de la bobina (aire, material ferromagnético o ferrita) en función de la frecuencia de trabajo prevista. Permitirá la opción de incluir o no entrehierro (es frecuente la utilización de entrehierros en las bobinas para que sea posible un ajuste más preciso de la inductancia).

El programa dará, en caso de que sea posible, varias soluciones para que el diseñador elija, en función de unos determinados ratios o criterios de decisión, (tales como volumen, peso, coste, pérdidas magnéticas y eléctricas, rendimiento, etc.). Se podrá efectuar un estudio comparativo de estas soluciones con distintos materiales, geometría, etc.

Desde un punto de vista docente, esta herramienta constituye un complemento muy útil para el diseño de transformadores, materia recogida en las asignaturas de Máquinas Eléctricas.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de un inductor depende de la aplicación particular en la que vaya a formar parte. En la selección del núcleo apropiado se han de tener en cuenta multitud de factores, como la frecuencia de trabajo, tipo de excitación a la que va a quedar sometido (AC o DC), valores de pico y eficaz de corriente más desfavorable que va a circular por el devanado, etc.

En el cálculo intervienen parámetros magnéticos y eléctricos que están íntimamente relacionados entre sí, y que influirán en la elección de los parámetros geométricos. Sin embargo, las ecuaciones disponibles para el dimensionamiento se reducen a las obtenidas por aplicación de las leyes de Kirchhoff para circuitos eléctricos y magnéticos. Nos enfrentamos, por tanto, a un problema indeterminado donde las incógnitas son muy superiores a las ecuaciones disponibles. Por este motivo, no queda otra opción más que recurrir al empleo de cálculos paramétricos basados en datos empíricos de reactancias o transformadores previamente construidos, tablas suministradas por fabricantes, etc. Habitualmente no se dimensionan todos los parámetros geométricos del circuito magnético, sino que se utilizan núcleos estándares con dimensiones normalizadas (generalmente en función de una única dimensión lineal, a), quedando en este caso como parámetros libres, el número de espiras, el tipo de conductor y las dimensiones de entrehierros, en caso de que éstos existan.

En las siguientes secciones se describe una aplicación informática desarrollada por el Área de Ingeniería Eléctrica de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura para el cálculo y diseño de inductores. Se han diferenciado tres tipos de bobinas en función del material empleado para el núcleo:

- 1.- Núcleo ferromagnético
- 2.- Núcleo de ferrita
- 3.- Núcleo de aire

2. DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN INFORMÁTICA

La aplicación informática se ha implementado utilizando como lenguaje de programación DELPHI 5.0. El motivo de esta elección se debe a que se trata de un lenguaje visual, con la doble ventaja de facilidad de desarrollo para el programador y de interacción con el usuario, y por ser PASCAL el lenguaje de programación didáctico por excelencia. El programa se suministra en un CD. Los requisitos de hardware mínimos para poder instalar el programa son:

Procesador 486 o superior
Sistema operativo Windows 98/NT/2000/XP
32 MB de memoria RAM
10 MB de espacio disponible en el disco duro
Unidad lectora de CD

El programa contiene tres módulos principales, que permiten el dimensionamiento de inductores en función del material empleado para el núcleo sobre el que se arrollará el devanado:

- *Diseño de bobinas con núcleo ferromagnético*

- *Diseño de bobinas con núcleo de ferrita*
- *Diseño de bobinas con núcleo de aire*

El diagrama estructural de las posibilidades de construcción geométrica que permite seleccionar la aplicación se muestran en la tabla 1.

Bobinas con núcleo de material ferromagnético	Núcleo <i>E-I</i>	Con entrehierro	Entrehierro en la columna central
			Entrehierro en todas las columnas
	Núcleo <i>U-I</i>	Sin entrehierro	Con entrehierro
			Sin entrehierro
Bobinas con núcleo de ferrita	Núcleo <i>E-I</i>	Con entrehierro	Entrehierro en la rama central
			Entrehierro en culata superior
	Núcleo <i>U-I</i>	Sin entrehierro	Con entrehierro
			Sin entrehierro
Bobinas con núcleo de aire	1 capa	Con especificación del ancho del carrete	Sin especificación del ancho de carrete
			Varias capas

Tabla 1: Diagrama de geometrías con las que trabaja el programa

3. INSTALACIÓN DE LA APLICACIÓN

Para instalar el programa de cálculo *Diseño de Bobinas* se ha preparado una aplicación de autoarranque que permite al usuario de una manera cómoda y sencilla cargar la aplicación en el ordenador. En la figura 1 se muestra la pantalla de inicio que aparece en el ordenador al introducir el CD de instalación.



Figura 1: Pantalla principal de la aplicación de autoarranque del programa

La opción *Instalar Bobinas* del menú principal del programa de instalación nos permite acceder a un asistente que nos conduce a la instalación definitiva de la aplicación de una manera ordenada y sencilla.

Se ha de hacer constar que la aplicación informática se apoya en multitud de tablas y gráficas que son gestionadas mediante bases de datos de tipo Paradox, con una estructura Borland Database Engine (*BDE*), por tanto, es imprescindible que esta utilidad esté instalada para el correcto funcionamiento del programa.

4. EJECUCIÓN DE LA APLICACIÓN

La pantalla principal de la aplicación se presenta en la figura 2. Consta de una barra de herramientas y una barra de menús. La barra de herramientas está formada por un conjunto de iconos, entre los cuales cabe destacar los tres primeros botones, que permite acceder rápidamente a cada uno de los tres módulos que componen el programa. Otras opciones disponibles en esta barra son el acceso a la *Ayuda*, *Créditos* y *Salir de la aplicación*. La barra de menús presenta las opciones habituales en aplicaciones bajo entorno Windows (guardar, abrir nuevos proyectos, copiar, pegar, etc.).

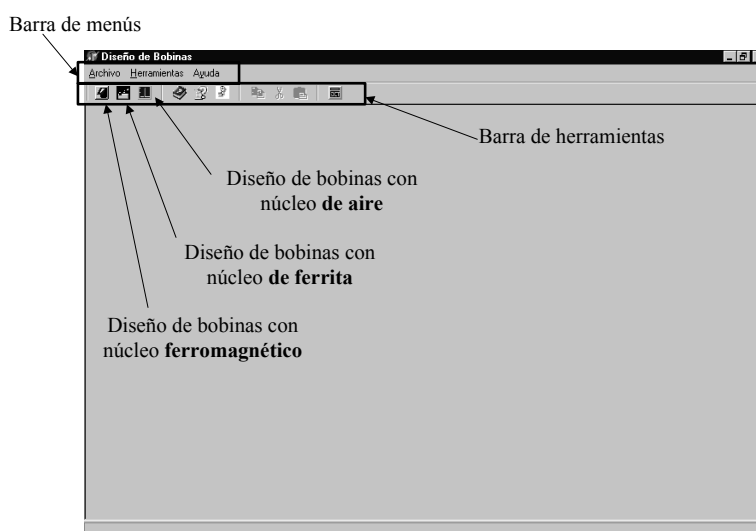


Figura 2: Pantalla principal de la aplicación *DISEÑO DE BOBINAS*

En las próximas secciones se describirán cada uno de los módulos del programa.

5. MÓDULO DE DISEÑO DE BOBINAS CON NÚCLEO FERROMAGNÉTICO

5.1. FUNDAMENTOS DE CÁLCULO

Los materiales ferromagnéticos laminados constituyen una solución óptima siempre que la frecuencia de trabajo no sea muy elevada, pues las pérdidas por corrientes parásitas e histéresis llegarían a hacer inadecuado el empleo de estos núcleos. Son muy utilizados hasta frecuencias del orden de 5 kHz, porque el material ferromagnético presenta muy baja reluctancia magnética, siendo por tanto necesario muy pocas espiras en el devanado para conseguir un determinado flujo en el núcleo. Presentan una inducción de saturación elevada.

Para la selección del tipo de chapa a emplear y el tamaño de la misma, se utiliza el concepto de *potencia construida de la bobina (PC)*, que se define como la potencia de un transformador de aislamiento construido con la misma chapa y cobre. De forma aproximada puede calcularse la potencia construida a partir de las expresiones (I-a) para el caso de corriente continua y (I-b) para el caso de corriente alterna.

$$PC = 111 L I_p^2 \quad (\text{I-a})$$

$$PC = \frac{1}{2} L \omega I_p^2 \quad (\text{I-b})$$

donde:

PC : potencia construida de la bobina

L : inductancia

I_p : valor de pico de la corriente que va a circular por la bobina

ω : pulsación

Se dispone de tablas de transformadores precalculados en las que es posible determinar las dimensiones geométricas apropiadas para el núcleo y el tipo de chapa, buscando un transformador con potencia superior a la potencia construida calculada para el inductor que se está diseñando.

El número de espiras del devanado, sección del mismo y longitud del entrehierro se determinarán analíticamente o utilizando tablas empíricas. Para el cálculo del entrehierro se tienen en cuenta los efectos de dispersión de flujo cuando la longitud del entrehierro es considerable, empleando para el cálculo un entrehierro efectivo inferior al geométrico.

Durante todo el proceso de cálculo se irán realizando comprobaciones para asegurar que la elección inicial de núcleo es adecuada, verificando que el devanado cabe en la ventana del núcleo, que la inducción de pico permanece en todo momento inferior al valor de saturación del material, etc.

5.2. MÓDULO DE DISEÑO DE BOBINAS CON NÚCLEO FERROMAGNÉTICO

Los parámetros de entrada para el diseño de una bobina con núcleo ferromagnético son:

Coefficiente de autoinducción de la bobina, L

Valor eficaz máximo de corriente, I

Valor de pico más desfavorable de corriente, I_p

Frecuencia de trabajo, f

Elección de construcción del núcleo con/sin entrehierro. Se puede introducir manualmente la longitud de entrehierro requerida o permitir al programa que calcule el entrehierro.

Todas estas especificaciones se introducen en la pantalla de *Datos iniciales*, que se muestra en la figura 3. Es posible elegir entre un diseño con o sin entrehierro y seleccionar la geometría requerida: núcleo U-I (ver figura 4) ó E-I (ver figura 6).

Tras introducir los datos de partida, se presiona el botón *Calcular* y en la parte derecha de esta misma pantalla se muestran los resultados del diseño. En las figuras 3 y 4 se presenta una solución para una bobina con inductancia de 154 mH, valor de pico de corriente de 6,43 A y valor eficaz de 4,55 A, que trabaja a 50 Hz. Se ha solicitado una geometría E-I con entrehierro en la rama central. Además de los parámetros geométricos se calcula el coste, precio y pérdidas totales (magnéticas y eléctricas) de la bobina diseñada. En las figuras 5 y 6 se presentan los resultados para estas mismas especificaciones cuando se selecciona una geometría U-I sin entrehierro.

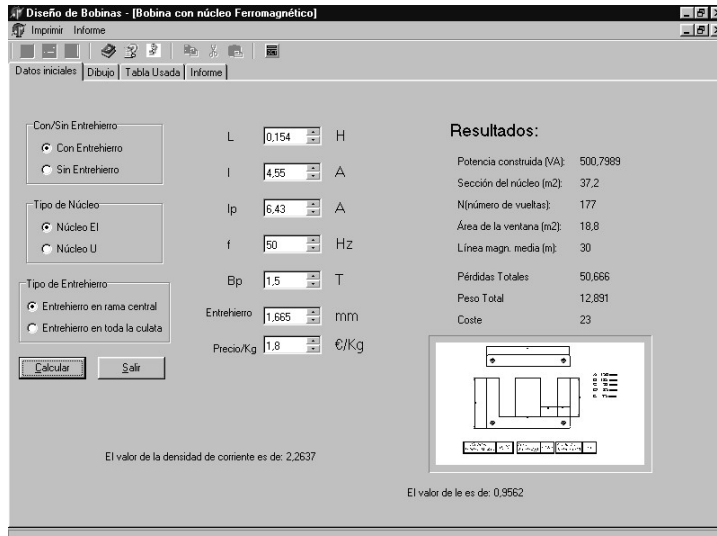


Figura 3: Pantalla de *Datos iniciales* del módulo *Diseño de bobinas con núcleo ferromagnético*. Resultados para geometría E-I con entrehierro en la rama central

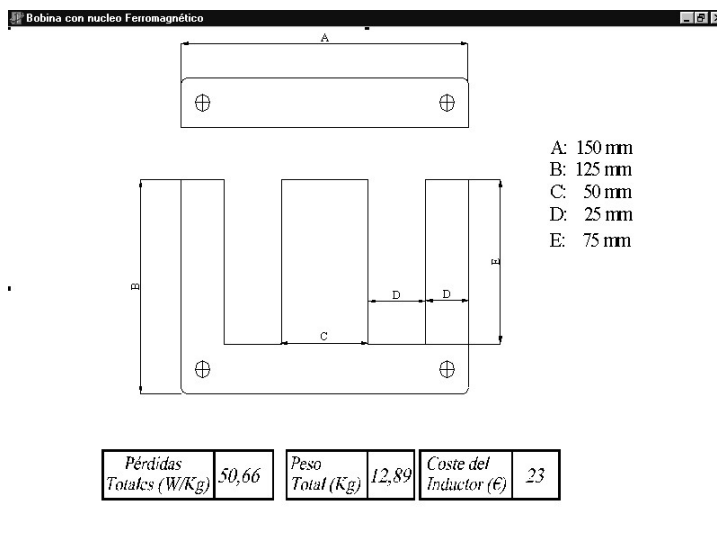


Figura 4: Detalle de las dimensiones principales para geometría E-I

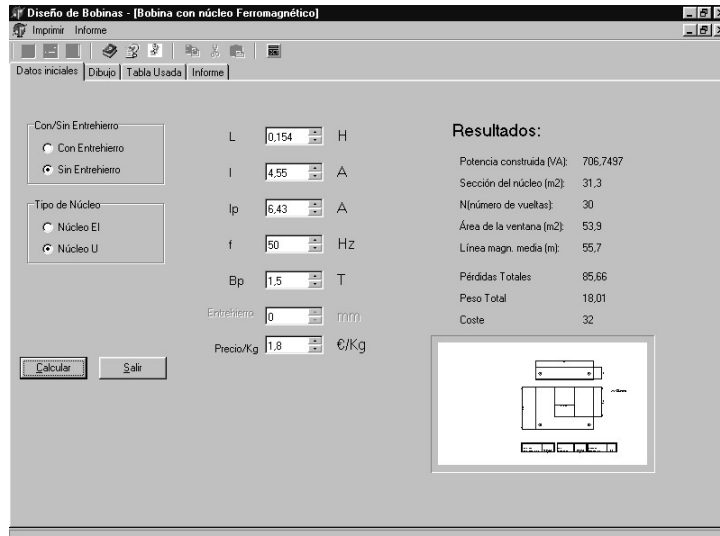


Figura 5: Pantalla de *Datos iniciales* del módulo *Diseño de bobinas con núcleo ferromagnético*. Resultados para geometría U-I sin entrehierro.

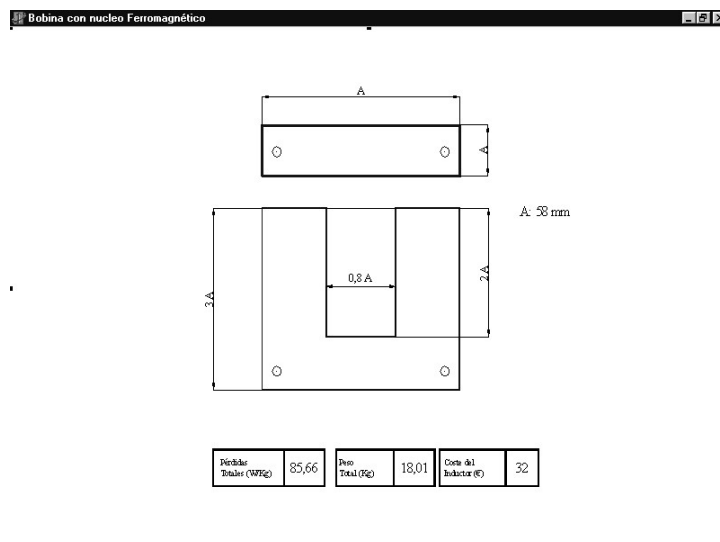


Figura 6: Detalle de las dimensiones principales para geometría U-I

6. MÓDULO DE DISEÑO DE BOBINAS CON NÚCLEO DE FERRITA

6.1. FUNDAMENTOS DE CÁLCULO

La ferrita presenta la ventaja de ofrecer una resistividad eléctrica superior que los materiales ferromagnéticos, siendo por tanto despreciables las corrientes parásitas hasta frecuencias muy elevadas. El inconveniente que presentan los núcleos de ferrita es que este material posee unas inducciones de saturación relativamente bajas, que además descienden con la temperatura. Esto supone que para conseguir un determinado flujo en el núcleo sin que el material sature, son necesarias secciones transversales excesivamente elevadas, lo cual implica en algunos casos la imposibilidad física de construir tales núcleos. Es muy utilizada para alta frecuencia.

El fundamento de cálculo de bobinas con núcleo de ferrita es idéntico al utilizado para materiales ferromagnéticos. La única diferencia radica en las tablas de las que se obtendrán los datos para el cálculo.

6.2. MÓDULO DE DISEÑO DE BOBINAS CON NÚCLEO DE FERRITA

En las figuras 7 y 8 se presenta un ejemplo de cálculo de una bobina con inductancia de 500 mH, corriente de pico de 5 A y eficaz de 4 A, frecuencia de 10 kHz, con geometría E-I sin entrehierro.

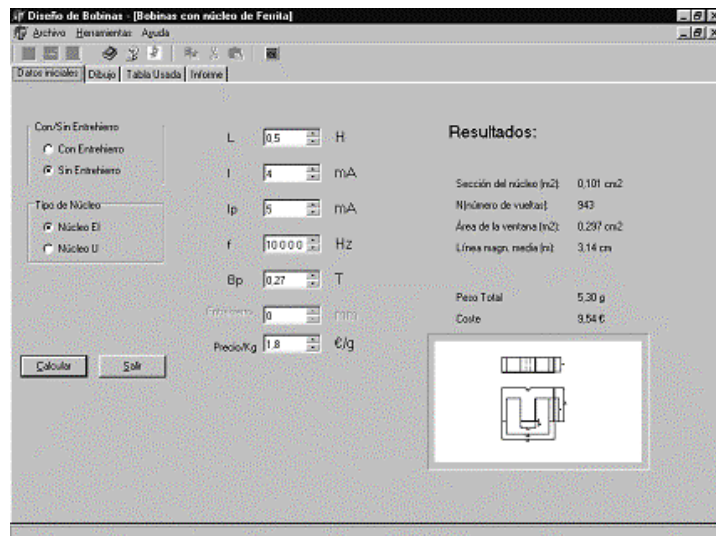


Figura 7: Pantalla de *Datos iniciales* del módulo *Diseño de bobinas con núcleo de ferrita*.

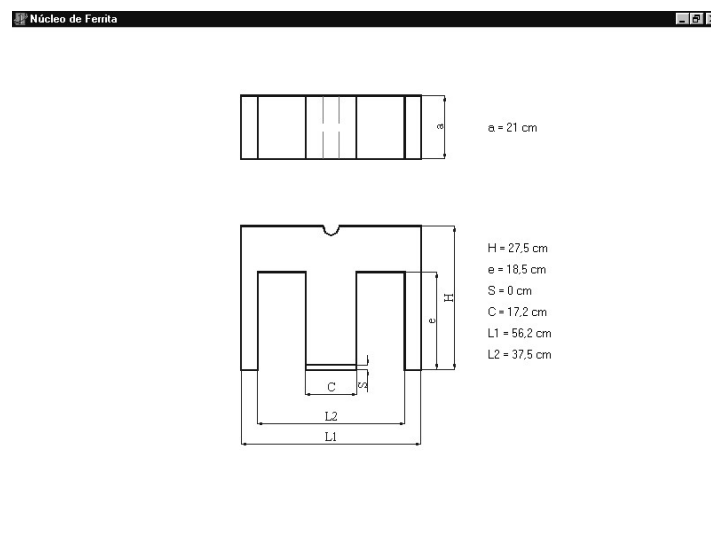


Figura 8: Detalle de las dimensiones principales para geometría E-I con núcleo de ferrita.

7. MÓDULO DE DISEÑO DE BOBINAS CON NÚCLEO DE AIRE

En el caso de bobinas con núcleo de aire, el devanado se arrolla en torno a un carrete. El circuito magnético está constituido por aire, por donde se establecen las líneas de campo al circular corriente por la bobina. Es recomendable emplear este tipo de núcleos cuando la bobina a diseñar tiene una inductancia muy baja y se desea que soporte picos de corriente elevados. La ventaja de esta configuración es que se consigue un comportamiento lineal del inductor (permeabilidad constante) y pueden alcanzarse inducciones de pico muy elevadas, sin peligro de efectos de saturación. Otra ventaja adicional es la eliminación de pérdidas magnéticas, quedando reducidas las pérdidas a las debidas al efecto Joule sobre el bobinado. El inconveniente que presentan es que la reluctancia magnética que ofrece el conjunto es muy elevada y, por tanto, es necesario un mayor aporte de fuerza magnetomotriz para conseguir un mismo valor de flujo en el núcleo. Esto se traduce en un incremento del número de espiras y consiguientemente, unas mayores pérdidas eléctricas. Los núcleos de aire son aptos para cualquier frecuencia de trabajo, aunque a bajas frecuencias es recomendable el empleo de núcleos ferromagnéticos.

En el cálculo se distingue entre bobinas con una sola capa o de varias capas.

7.1. BOBINAS CON NÚCLEO DE AIRE DE UNA SOLA CAPA. FUNDAMENTOS DE CÁLCULO

El diseño de bobinas con núcleo de aire de una sola capa se determina fácilmente a partir de la fórmula empírica mostrada en la expresión (II), que tiene una precisión del 1% para bobinas con $l > 2/3 r$.

$$L = \frac{0,394r^2N^2}{9r + 10l} \quad (\text{II})$$

donde:

L : inductancia en μH
 r : radio del carrete en cm
 l : longitud bobinada en cm
 N : número de espiras

La longitud bobinada depende de la sección del conductor utilizado, que se selecciona de modo que la intensidad máxima admisible del mismo sea superior al valor eficaz de la corriente nominal de la bobina. El radio del carrete puede establecerse a priori a partir de catálogos de fabricantes de carretes o dejar que el programa calcule el radio del carrete máximo necesario para que la ecuación (II) pueda aplicarse. En este caso se consigue además el resultado óptimo en el diseño, pues se minimiza la cantidad de cobre para construir una bobina con una inductancia determinada.

Para el cálculo se utilizará un método iterativo que calcula en un número reducido de pasos el máximo valor de r que satisface las condiciones impuestas. Para mejorar la convergencia en las iteraciones se han empleado métodos numéricos.

7.2. BOBINAS CON NÚCLEO DE AIRE DE VARIAS CAPAS. FUNDAMENTOS DE CÁLCULO

En este caso se dispone de la expresión empírica (III). Las variables que intervienen se presentan gráficamente en la figura 10(b).

$$L = \frac{0,315r^2N^2}{6r + 9l + 10d} \quad (III)$$

donde:

- L : inductancia en μH
- r : radio del carrete en cm
- d : espesor del devanado en cm
- l : longitud bobinada en cm
- N : número de espiras

7.3. MÓDULO DE DISEÑO DE BOBINAS CON NÚCLEO DE AIRE

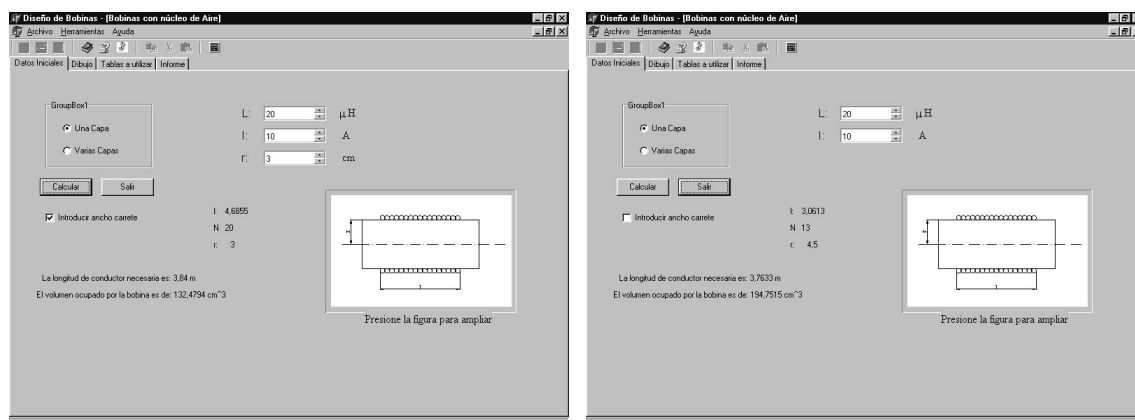
Los parámetros de entrada para el diseño de una bobina con núcleo de aire son:

Coefficiente de autoinducción de la bobina, L

Valor eficaz máximo de corriente, I

Ancho de carrete, r . Este parámetro puede introducirse manualmente, o dejar que el programa calcule el mínimo ancho que satisface las especificaciones.

Todos los valores de entrada se introducen en la pantalla de *Datos iniciales*, que se muestra en la figura, donde se presentan los resultados para el diseño de una bobina de 20 μH y valor eficaz de corriente de 10 A, con ancho de carrete preestablecido de 3 cm (figura 9(a)) o permitiendo que el programa calcule el máximo ancho, que en este caso resulta ser de 4,5 cm (figura 9(b)).



(a)

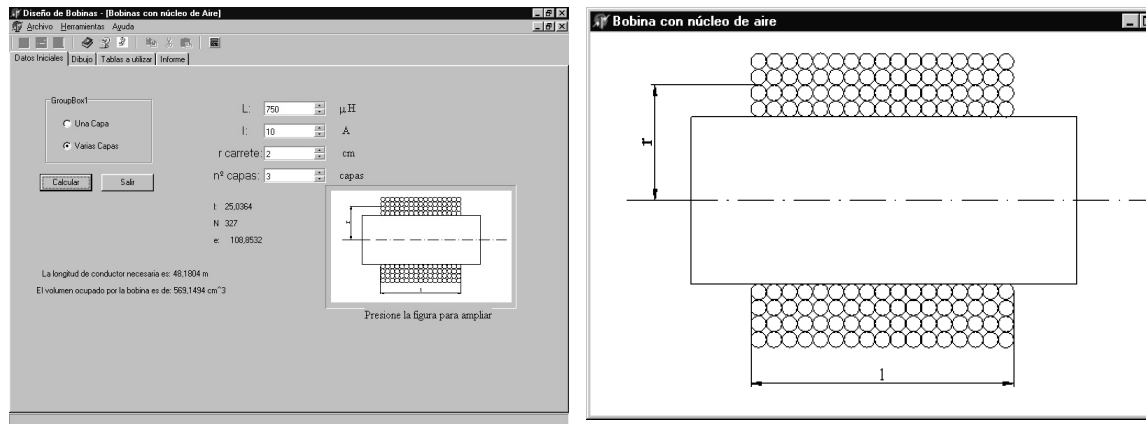
(b)

Figura 9: Pantalla de *Datos iniciales* para bobinas con núcleo de aire de una capa.

(a) Resultados dejando al usuario introducir el ancho de carrete.

(b) Resultados cuando el programa calcula el ancho máximo de carrete.

Si se desea o es preciso que la bobina tenga más de una capa, se selecciona esta opción en la pantalla de *Datos iniciales* de bobinas con núcleo de aire. Los resultados para una bobina de $750\mu\text{H}$, 10 A, de 3 capas y ancho de carrete 2 cm se muestran en la figura 10(a).

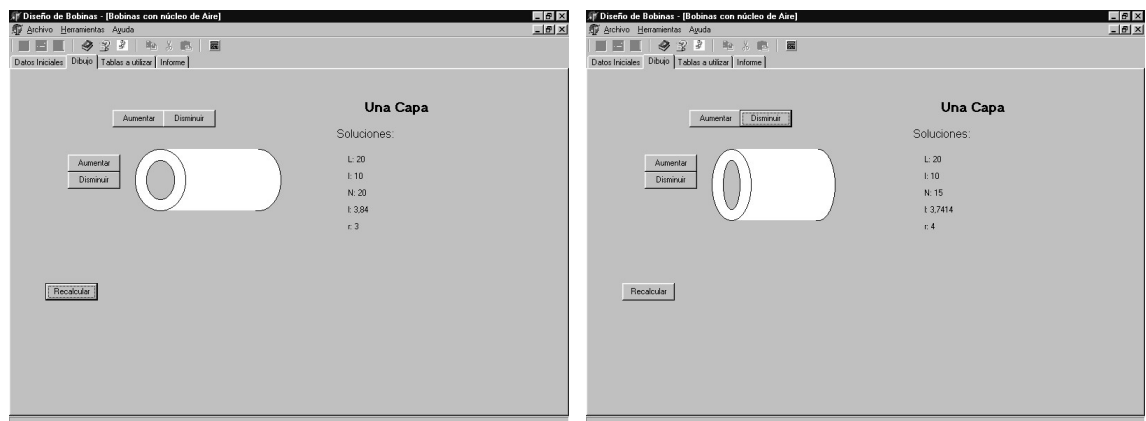


(a)

(b)

Figura 10: (a) Pantalla de *Datos iniciales* para bobinas con núcleo de aire de varias capas. (b) Detalle de los parámetros geométricos que intervienen en las dimensiones de la bobina.

La aplicación permite al usuario modificar las dimensiones del carrete (radio y longitud) de una manera cómoda y visual. Estos cambios se traducirán en una alteración del número de capas, cantidad de espiras por capa, longitud total de cobre, volumen ocupado, etc. Esta utilidad está disponible para bobinas de aire de una o varias capas. En la figura 11 se muestra un ejemplo de cálculo utilizando esta herramienta.



(a)

(b)

Figura 11: Ejemplos de modificación del diseño alterando las dimensiones del carrete

8. OTRAS UTILIDADES DE LA APLICACIÓN

Por último, esta aplicación permite almacenar un histórico de diseños efectuados, por si fuera de interés retomar proyectos de bobinas previamente realizados para hacer modificaciones (por ejemplo, retocar entrehierros) o tomarlos como referencia para un nuevo diseño. Una muestra de esta base de datos se presenta en la figura 12.

Tipo de Bobina	Inductancia	Intensidad	Intensidad máxima	Con Entrel	Valor del Entrelhe	Coste de la Bobin	N
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	2	2	2,18	True		0,93	365 521
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	2	2	2,51	True		0,98	550 454
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	2,54	2	2,6	True		0,88	847 444
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	3,02	2	2,6	True		1,12	847 528
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	3,5	2	2,6	True		1,252	847 612
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	3,99	2	2,6	True		0,88	1631 465
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	2	5	5,7	True		3,996	0 487
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	2	5	5,7	True		3,996	3462 33
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	0,025	2	3	True		0,165	0 61
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	0,025	2	3	True		0,165	0 64
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	0,154	4,55	6,43	True		1,665	0 177
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	0,154	4,55	6,43	True		1,665	23 177
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	0,154	4,55	6,43	True		1,665	23 30
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	0,154	4,55	6,43	True		1,665	23 30
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	0,154	4,55	6,43	True		1,665	23 30
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	0,154	4,55	6,43	True		1,665	23 30
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	0,154	4,55	6,43	True		1,665	23 177
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	0,154	4,55	6,43	True		1,665	23 30
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	0,154	4,55	6,43	True		1,665	32 30
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	0,154	4,55	6,43	True		1,665	32 30
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	0,154	4,55	6,43	True		0,0812	32 211
Bobina ferromagnética tipo EI con entrelheio en culata	0,154	4,55	6,43	True		0,0812	32 30

Figura 12: Histórico de diseño de bobinas

Además, se ha dotado a la aplicación de un asistente de Ayuda donde se informa al usuario sobre la utilización del programa y sobre aspectos teóricos referentes al empleo de los distintos tipos de núcleos. En la figura 13 se muestra la pantalla principal del citado asistente.



Figura 13: Asistente de Ayuda del programa *Diseño de bobinas*

9. CONCLUSIONES

Se ha conseguido implementar una útil herramienta para el diseño de inductores, aplicable a asignaturas de las Área de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, donde es común requerir el diseño de inductores que formen parte de circuitos eléctricos o electrónicos.

La principal ventaja del programa radica en la facilidad de variación de parámetros, de modo que el diseño definitivo se adapte a las condiciones de espacio, peso, etc. del prototipo que se está proyectando. Además, permite comparar diseños con diferentes materiales, geometrías, etc., dando la opción más adecuada.

La generalización de esta aplicación al cálculo y diseño de transformadores es inmediata, pues en la mayoría de las situaciones las tablas a utilizar coinciden con las empleadas para el diseño de inductores con núcleo ferromagnético. Esta materia se encuentra recogida en el programa de las asignaturas de Máquinas Eléctricas, resultando la aplicación un ejemplo claro de utilización de las Nuevas Tecnologías en la docencia, pues de una manera sencilla es posible resolver problemas, mostrar distintos resultados para unas mismas especificaciones a efectos de comparar las soluciones, etc.

Las futuras líneas de trabajo del Área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Extremadura en este tema irán encaminadas a extender la aplicación al diseño de transformadores monofásicos y trifásicos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martínez García, Salvador. “Prontuario para el diseño eléctrico y electrónico”. Marcombo Boixareu Editores. 1989.
- [2] Mohan, Ned. “Power Electronics. Converters, Applications and Design”. John Wiley & Sons, Inc. 1995.
- [3] Corrales Martín, Juan. “Cálculo industrial de máquinas eléctricas”. Tomos I y II. Marcombo Boixareu Editores. 1982.
- [4] Charte, Francisco. “Delphi 5”. Editorial Anaya. 1999.
- [5] Teixeira, Steve; Pacheco, Xavier. “Guía de desarrollo de Delphi 5”. Editorial Prentice Hall. 2000.
- [6] www.himag.com.tw - Página de la empresa Himag, fabricante.
- [7] www.honeywell.com - Página de la empresa Honeywell, fabricante.
- [8] www.ing.unlp.edu.ar/sispot - Página web de la Universidad Nacional de La Plata de Argentina.
- [9] www.itba.edu.ar/~tecno/links1.htm - Página de Tecnología Eléctrica del Instituto Tecnológico de Buenos Aires.