

PROBLEMAS DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS CON MATLAB

Manuel Burgos Payán
Manuel Casal Gómez-camintero
Pedro Cruz Romero
Ángel Gaspar González Rodríguez
Carlos Izquierdo Mitchell
Manuel Antonio Vallejo Saura

RESUMEN

Se describe una aplicación informática, basada en Matlab, para facilitar el estudio del funcionamiento de las máquinas eléctricas más ampliamente utilizadas en la industria, tanto estáticas como rotativas. Aunque el programa se ha diseñado con un marcado propósito educacional, también podría utilizarse como herramienta de ayuda en la solución de ciertos problemas prácticos de ingeniería.

Descriptor: Máquinas Eléctricas, Problemas, Simulación.

ABSTRACT

An informatical application, based in Matlab, to help the study of performance of the more frequently used electrical machines (static and rotative) is described. Although the program has been designed for an educational purpose, it could also be used as a tool to help work out certain practical problems in engineering.

Key words: Electrical Machines, Problems, Simulation.

INTRODUCCIÓN

Las clases y seminarios de problemas son el complemento lógico de las clases de teoría en los estudios de Ingeniería, en general, y en los de Máquinas Eléctricas, en particular. Es importante que en los ejercicios se utilicen (en la medida de lo posible) datos de instalaciones, máquinas y condiciones de funcionamiento reales (al menos verosímiles), ya que de esta forma, los problemas se convierten en el vehículo idóneo para proporcionar al alumno una idea de las magnitudes reales y de sus rangos normales de variación.

Adicionalmente, estas clases permiten plantear nuevas cuestiones y, tanto la resolución de problemas en clase, como los propuestos para resolver en casa, constituyen una excelente ocasión para conseguir la participación activa de los alumnos en su propio aprendizaje, aunque esto último no sea algo que siempre se consiga sin ningún esfuerzo.

No obstante, las clases y seminarios de problemas, y la utilización de los mismos como recurso didáctico tanto en la asignación de tareas para resolver en casa o en clase, en el diseño de los exámenes, etc., como en la propia elaboración de material didáctico, plantean dificultades de diverso tipo. Y tanto para los docentes como para los alumnos. Los que pueden detectarse de forma más temprana

son la dificultad para conseguir la implicación de los alumnos y la escasez de libros de problemas resueltos de máquinas eléctricas.

Los problemas que se pide a los alumnos que resuelvan suelen ceñirse al tradicional formato consistente en un texto en el que se relacionan los datos y características de una máquina que funcione en unas condiciones dadas, y hay que determinar los valores de ciertas magnitudes asociadas al funcionamiento de la propia máquina. Por ejemplo: se dan los datos correspondientes al modo de circuito equivalente de una máquina rotativa, que funciona en un determinado régimen de carga, y hay que determinar el valor de la corriente absorbida, la potencia, el par, el rendimiento, etc.

Las primeras dificultades surgen ya en la redacción de los mismos enunciados de los problemas. Los libros de texto, en unas ocasiones (probablemente) con la intención de evitar la monotonía y la repetición, y en otras, con el propósito de desafiar a los alumnos, poniendo a prueba el conocimiento de los modelos de las máquinas, suelen ofrecer algunos problemas con enunciados en los que se mezclan parámetros y magnitudes conocidas con otras desconocidas, en combinaciones que raramente podrían darse en una situación práctica y real.

En cualquier caso, una vez que el alumno ha resuelto uno de estos problemas tradicionales, normalmente "a mano" (con ayuda de una calculadora), necesita que el profesor le indique cuáles son las respuestas correctas, con el propósito de comprobar y de poder autoevaluar su propio trabajo.

La realización de un cierto número de este tipo de problemas que podríamos llamar "clásicos" no sólo es necesaria, sino que es indispensable para conseguir que el alumno adquiera una correcta formación, ya que permiten mejorar su capacidad de análisis y desarrollar destreza en el cálculo. Sin embargo, la ejecución de este tipo de tareas exige la dedicación de una importante cantidad de tiempo, y se puede correr el riesgo de dejar poco espacio para que los alumnos puedan estudiar situaciones ingenieriles, algo más realistas.

Por el lado de los docentes, las clases de problemas dan lugar a otro tipo de dificultades. Por ejemplo, aquellos que intentan ceñirse a un determinado libro de texto, al impartir la misma materia durante dos o tres cursos acaban agotando toda la colección de problemas propuestos en el texto de referencia. Una vez llegados a esta situación, un cierto número de alumnos puede verse tentado a limitarse a "aprovechar" el trabajo realizado por sus compañeros de los cursos anteriores.

Otra dificultad se plantea a los docentes a la hora de diseñar un problema para un examen para ampliar o completar la colección de problemas disponible. En estos casos, el instructor debe establecer un conjunto de datos adecuado para una máquina eléctrica (que debe resultar un dispositivo verosímil), resolver el problema y comprobar que los resultados son coherentes y están dentro de los rangos normales y admisibles. Esto no es una tarea trivial, sino que, por el contrario, requiere que se le dedique una importante dosis de tiempo.

En línea con la cada vez más abundante bibliografía sobre la utilización de ordenadores en el campo de la docencia de la ingeniería eléctrica (Burgos, 1991, Burgos, Casal e Izquierdo, 1995, Burgos, González y Vallejo, 1994 y Gross, 1996), y a fin de allanar las dificultades planteadas por las tareas relacionadas con los problemas de máquinas eléctricas, se ha desarrollado una aplicación informática basada en Matlab (The Math Works, 1994, Marchand, 1996), con el doble conjunto de objetivos siguientes:

1. Dotar a los alumnos de un instrumento que les permita:
 - a) Comprobar las soluciones de los problemas clásicos para los tipos de máquinas más frecuentemente utilizadas en el terreno industrial, de forma simple y rápida, y sin tener que recurrir a ningún libro de texto concreto.
 - b) Resolver de forma correcta y eficiente muchos de los problemas rutinarios que se plantean en la resolución de problemas más complejos y en situaciones prácticas de ingeniería.

- c) Visualizar prácticamente cualquiera de las curvas características de funcionamiento de una máquina eléctrica concreta, sin tener que conformarse únicamente con las descritas en los textos (lo que puede resultar de gran utilidad, por ejemplo, a la hora de cumplimentar los informes o memorias de las prácticas).
2. Dotar a los profesores de un instrumento que les permita:
 - a) Resolver problemas de máquinas eléctricas de forma eficiente (para colecciones de problemas resueltos, exámenes, proyectos, trabajos de asignatura, etc.).
 - b) Generar conjuntos de datos razonables y consistentes para cualquier máquina eléctrica de las comúnmente utilizadas en el ámbito industrial.
 - c) Ilustrar, mediante curvas características o con resultados numéricos, condiciones de funcionamiento no cubiertos en los libros de texto (por ejemplo, a fin de ampliar o completar las clases teóricas).

La aplicación MAQUINAS, basada en Matlab, y desarrollada en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla, cubre básicamente estos requisitos. En su elaboración se han tomado como referencias los textos de los Profesores Cortes, 1972, Chapman, 1991 y Fitzgerald, Kingsley y Umans, 1983.

Si para cualquier programa de ordenador, su facilidad de uso es una característica deseable, en un programa con un pretendido uso didáctico resulta algo de primordial importancia. Por ello, uno de los principales criterios de diseño de la aplicación MAQUINAS fue que el programa resultara lo más amigable y autoexplicativo posible. De esta forma se consiguen dos objetivos importantes:

- a) Los alumnos, prácticamente no tienen que dedicar ningún tiempo extra para aprender a utilizarlo.
- b) No es necesario dedicar tiempo de clase con este propósito.

1. METODOLOGÍA

Una vez identificadas las dificultades y establecidos los requisitos básicos de la actividad a desarrollar, se ofreció como trabajo voluntario a un grupo formado por cuatro alumnos de la asignatura de Cálculo y Construcción de Máquinas Eléctricas (5º Curso de Ingenieros Industriales, especialidad Eléctrica). Aunque su principal tarea (en esta fase de la actividad) consistió en la codificación de la aplicación informática, sus aportaciones resultaron muy interesantes y enriquecedoras.

La elección de Matlab como soporte de la aplicación se realizó atendiendo fundamentalmente a las dos consideraciones siguientes:

- a) Da cobertura suficiente a los requisitos de orden computacional (realización de cálculos, representación de gráficos, desarrollo de interfases gráficas de comunicación con el usuario, etc.) que la tarea propuesta requiere.
- b) Es conocido de antemano, y con suficiente grado profundidad, por la mayor parte de los alumnos.

La utilización de ordenadores en los trabajos de los alumnos es un instrumento formativo que presenta aspectos muy positivos, entre los que cabría resaltar el hecho de ser un recurso que convierte a los alumnos en parte activa de su propio proceso de aprendizaje, así como el de añadir a la tarea que realizan una componente de entusiasmo, por darles la sensación de que están realizando un trabajo de tipo práctico y real.

En una segunda fase de la actividad que previsiblemente se llevará a cabo durante el próximo curso, se ofrecerá la aplicación MAQUINAS a todos los alumnos de las asignaturas de Máquinas

Eléctricas y de Cálculo y Construcción de Máquinas Eléctricas (4º y 5º Curso de Ingenieros Industrial especialidad Eléctrica, respectivamente), a fin de que tengan la oportunidad de utilizarla regularmente en las tareas relacionadas con las asignaturas, y les sirva de complemento y de estímulo para participar más activamente en las clases de problemas.

La aplicación tiene una estructura modular, y es fácilmente ampliable. Por ello, en esta segunda fase se tratará de estimular a los alumnos a que la vayan completando y mejorando desarrollando sus propios módulos para el estudio de condiciones de funcionamiento o tipos de máquinas no cubiertas en la versión actual, por ejemplo, así como para que amplíen la biblioteca de casos estudiados.

Es de esperar que, tanto el desarrollo de estas tareas, como el intercambio de sus trabajos con otros compañeros de clase, con el estímulo adicional que puede derivarse de la competencia en los alumnos por la utilidad y calidad de sus aportaciones personales, contribuyan a una mayor participación de los alumnos en las clases de problemas.

2. RESULTADOS

El principal resultado tangible de la actividad ha sido el desarrollo de la aplicación MAQUINAS como ya se ha indicado. Aunque esta aplicación está fundamentalmente orientada al estudio del régimen permanente de las máquinas eléctricas, tanto estáticas como rotativas, también da cobertura a los más importantes regímenes transitorios de funcionamiento, como son: corrientes de conexión y cortocircuito en transformadores, tiempos de arranque en motores (tanto de inducción como corriente continua), cortocircuitos y oscilaciones en máquinas síncronas, y autoexcitación de generadores de corriente continua.

El programa MAQUINAS se compone de cuatro módulos principales:

- a) Transformadores.
- b) Máquinas Asíncronas o de Inducción.
- c) Máquinas Síncronas.
- d) Máquinas de Corriente Continua.

Para describir un tipo de máquina concreta, cada uno de los módulos de los que se compone la aplicación acepta datos de dos formas diferentes:

- a) Introducción directa los datos de las máquinas, rellenando por teclado, en los espacios reservados al efecto:
- b) Los parámetros de los modelos de circuito equivalente.
- c) Los resultados de los ensayos convencionales para la determinación de los parámetros de los modelos.
- d) Carga de un fichero de texto ASCII (previamente creado con ayuda de un editor de texto por ejemplo) con los datos de la máquina deseada.

En el primer caso, el programa prevé la posibilidad de crear un nuevo archivo con los parámetros de la máquina, lo que permite la creación de una biblioteca y su posterior utilización sin necesidad de tener que reintroducirlos manualmente.

Sea cual sea la forma en que se hayan introducido los datos de la máquina, el programa siempre generará una salida con una estimación de los valores de:

- a) La placa de características de la máquina.
- b) Las constantes del circuito equivalente.
- c) Los resultados de los ensayos.

Las salidas generadas por el programa con los resultados de los cálculos realizados son, básicamente, de dos tipos:

- a) Curvas (y superficies) características de funcionamiento de una máquina dada, o la evolución temporal de una magnitud determinada durante un transitorio.
- b) Cuadros de texto en la pantalla del ordenador y en ficheros de texto, conteniendo:
 - b1) Los valores numéricos correspondientes a las diversas magnitudes que caracterizan un punto de funcionamiento determinado.
 - b2) Los valores numéricos correspondientes a los puntos de una curva característica de funcionamiento determinada, o a la evolución de un transitorio.

En los apartados que siguen se ofrece una breve descripción de las principales características del programa.

2.1. TRANSFORMADORES

El módulo de transformadores opera con el equivalente monofásico (ya sea el transformador monofásico o trifásico), y tiene capacidad para calcular todas las magnitudes primarias y secundarias referidas al primario ($U, I, \varphi, F.P., S, P, Q$), así como las pérdidas, el rendimiento y la caída de tensión, correspondientes a cualquier carga en el secundario, definida por el usuario. También puede calcular curvas y superficies de rendimiento y caída de tensión para todo el rango posible de factores de potencia en retraso y adelanto, con sólo seleccionar la opción correspondiente.

2.2. MÁQUINAS ASÍNCRONAS

Este módulo permite un completo análisis del funcionamiento equilibrado en régimen permanente de las máquinas de inducción trifásicas, funcionando como motores, generadores o frenos, tanto para máquinas de jaula de ardilla como de anillos rozantes.

Para cualquier fuente de tensión (caracterizadas por el valor eficaz de su tensión, U , y por el de su frecuencia, f) y carga mecánica (caracterizada por su característica mecánica de par resistente, $M_r(\Omega)$), o velocidad, definidas por el usuario, el programa calcula los valores de las magnitudes estáticas y rotóricas ($Z, I, \varphi, F.P., S, P, Q, M, \Omega$), así como las pérdidas y el rendimiento. También es capaz de presentar las curvas de par, corriente absorbida, potencia, etc., en función de la velocidad (funcionamiento como freno, motor y generador), seleccionando la opción correspondiente. De igual forma, también permite representar los diagramas circulares (corriente absorbida y potencia intercambiada con la red).

2.3. MÁQUINAS SÍNCRONAS

Esta parte del programa permite un estudio completo del funcionamiento en régimen permanente como motor, como generador y como compensador síncrono de cualquier máquina síncrona, tanto de rotor liso como de polos salientes.

El módulo de máquinas síncronas también permite representar la característica de vacío, las curvas en V de Mordey, y la de par en función del ángulo de carga, entre otras.

2.4. MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

El programa permite un estudio completo del funcionamiento motor y generador de cualquier máquina de corriente continua: de excitación independiente (o imán permanente), serie, derivación y compuesta, para cualquier fuente de tensión y carga, definidas por el usuario, el programa calcula los valores de corrientes, potencias, pares, velocidades, así como las pérdidas y el rendimiento.

Este módulo también permite representar la característica de vacío, exterior y par-velocidad (característica mecánica), entre otras.

3. EJEMPLO

A modo de ejemplo, en este apartado se ilustrará brevemente algunas de las posibilidades del módulo de máquinas asíncronas o de inducción.

La figura nº 1 muestra el cuadro de diálogo mediante el que se introducen las características principales, las constantes del modelo de circuito equivalente de la máquina a estudiar, así como el rango de velocidades a utilizar en las representaciones de las curvas características.

Tensión de fase (u) :	220	Voltios
Frecuencia (f) :	50	Hz
Velocidad nominal (ω_n) :	150	rad/s
Resistencia estática (r_1) :	0.2	Ohmios
Inductancia estática (x_1) :	0.8	Ohmios
Resistencia rotórica (r_2') :	0.3	Ohmios
Inductancia rotórica (x_2') :	0.8	Ohmios
Resist. de magnetización (r_{fe}) :	200	Ohmios
Induct. de magnetización (x_u) :	20	Ohmios
Pérdidas mecánicas (P_{mec}) :	200	Wattios
Rango de Velocidades para la Representación.		
Max :	0	Min : 157.1
< Atrás Guardar Abrir Continuar >		

Figura nº 1. Cuadro de diálogo para introducción de datos.

Como puede verse, en la parte inferior del cuadro de diálogo aparecen cuatro botones que permiten guardar los datos en un archivo, abrir un archivo (previamente creado con un editor de texto, por ejemplo) de donde leer los datos de otro caso, y navegar a través de la aplicación.

La figura nº 2 muestra un menú, con una serie de botones, en los que puede seleccionarse la representación de cualquier curva característica del funcionamiento de la máquina.

La figura nº 3 muestra la variación de las corrientes estática, rotórica y de excitación, con la velocidad de funcionamiento de la máquina.

La figura nº 4 muestra el diagrama circular de potencia de la máquina.

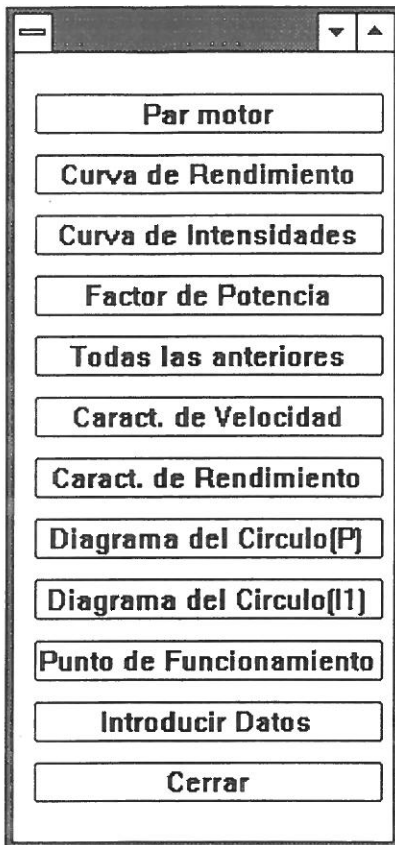


Figura nº 2. Menú de curvas características del módulo de máquinas asíncronas.

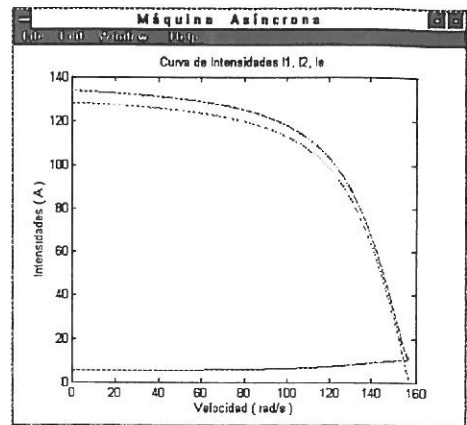


Figura nº 3. Variación de las intensidades con la velocidad.

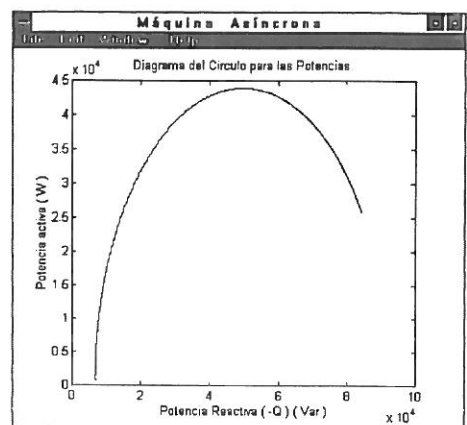


Figura nº 4. Diagrama circular de potencia.

La figura nº 5 muestra el punto de funcionamiento de la máquina cuando acciona una carga de tipo ventilador, cuya característica mecánica aparece superpuesta.

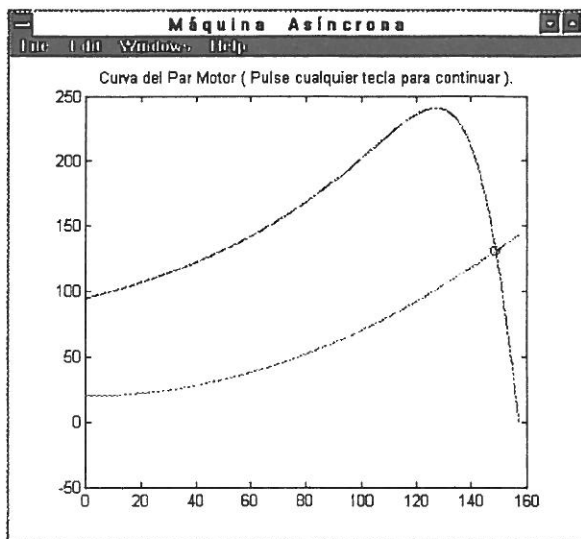


Figura nº5. Punto de Funcionamiento con una Carga Tipo Ventilador.

Finalmente, la figura nº 6 muestra los resultados numéricos correspondientes al citado punto de funcionamiento.

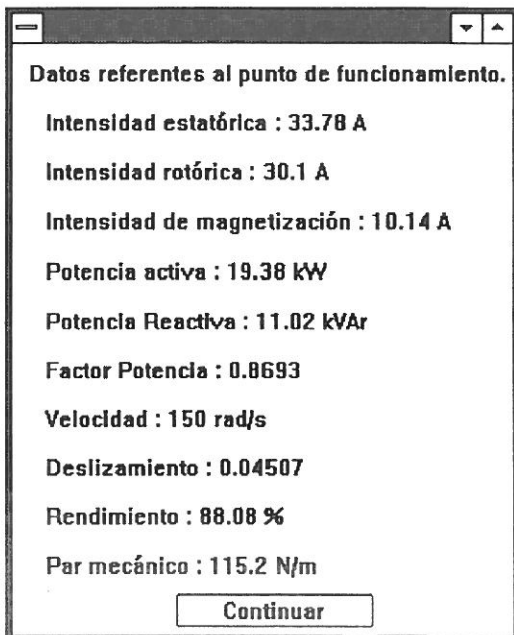


Figura nº 6. Datos numéricos de un punto de funcionamiento.

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una aplicación informática que permite el análisis del funcionamiento en régimen permanente de las máquinas más ampliamente implantadas en la industria, es decir: transformadores, máquinas asíncronas o de inducción, síncronas y de corriente continua.

Esta aplicación permite esencialmente:

- a) Calcular una respuesta correcta y rápida con la que los estudiantes pueden autoevaluar su trabajo.
- b) Establecer un conjunto de datos adecuado para una máquina eléctrica (que debe resultar un dispositivo verosímil) y comprobar rápida y fácilmente que los resultados son coherentes y están dentro de los rangos normales y admisibles.

La aplicación MAQUINAS provee a los educadores de una herramienta con la que ofrecer a los alumnos un tipo de problemas y trabajos en el área de las máquinas eléctricas con más sentido ingenieril.

La aplicación tiene una utilidad añadida para los alumnos, en relación con las prácticas de laboratorio: les permite estudiar rápidamente una gran cantidad de casos diferentes, que pueden incluir en las memorias de sus prácticas como tablas numéricas o gráficos complementarios. Además, los instructores podrían utilizarla directamente en clase, para poner énfasis o demostrar determinados aspectos del funcionamiento de las máquinas. Un ordenador portátil permitiría que tales demostraciones pudieran realizarse rápidamente, enriqueciendo y añadiendo un plus de interés a las clases.

BIBLIOGRAFÍA

- BURGOS PAYÁN, M. (1991). Mejora de una Práctica de Laboratorio Utilizando un Ordenador, *ICONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CALIDAD DE LA ENSEÑANZA UNIVERSITARIA*. Puerto de Santa María, del 6 al 8 de marzo de 1991, pág. 26-35.
- BURGOS PAYÁN, M.; CASAL GÓMEZ-CAMINERO, M. Y IZQUIERDO MITCHELL, C., (1993). Mejora de una Práctica sobre Máquinas de Inducción Utilizando un Ordenador. *Revista de enseñanza universitaria (I.S.S.N.: 1131-5245 ICE de la Universidad de Sevilla)*, No. 5, pág. 57-67.
- BURGOS PAYÁN, M.; GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, A.G. y VALLEJO SAURA, M.A., (1994). *Generadores de Inducción en las Prácticas de Laboratorio*, *REVISTA DE ENSEÑANZA UNIVERSITARIA (I.S.S.N.: 1131-5245 ICE de la Universidad de Sevilla)*, No. 7-8, pág. 87-101, España.
- CHAPMAN, S.J., (1991). *Fundamentos de Máquinas Eléctricas*. McGraw-Hill, New York.
- CORTESCHERTA, M. (1972). *Curso Moderno de Máquinas Eléctricas Rotativas*. Editores Técnicos Asociados, Barcelona.
- FITZGERALD, A.E., KINGSLEY JR., C. Y UMANS, S.D. (1983). *Electric Machines Fundamentals*. McGraw-Hill, New York.
- GROSS, C.A., (1996). EMAP. An Aid to Understanding Energy Conversion Device Performance. *Ieee Trans. On Power Delivery, Vol. 11, No. 2*, pp. 607-612.
- MARCHAND, P., (1996). *Graphics and GUIs with MATLAB*. C.R.R. Press, Boca Raton.
- THE MATH WORKS, INC., (1994). *MATLAB Reference Guide*. Natick.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de D. José Castro Mora, D. José Cándido García Pardillo, D. Man Cordero Rodríguez y D. Antonio Rubio Malpesa, alumnos de la asignatura Cálculo y Construcción de Máquinas Eléctricas (5º Curso de Ingenieros Industriales, especialidad Eléctrica), que codificaron la aplicación MAQUIN como trabajo de la asignatura.

De igual forma, los autores desean expresar su agradecimiento al Instituto de Ciencias de la Educación (I.C.E.) de la Universidad de Sevilla por la financiación de este trabajo mediante la concesión de una ayuda en el marco de la Convocatoria de Ayudas a la Docencia Universitaria.