

INTRODUCCIÓN DE TARJETAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS EN LAS PRÁCTICAS DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

*José María Maza Ortega
Ángel Luis Trigo García
Miguel Ángel Caballero Gutiérrez
Manuel Burgos Payán
Pedro Luis Cruz Romero
Antonio de la Villa Jaén
Manuel Casal Gómez-Caminero
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Escuela Superior de Ingenieros*

RESUMEN

En este proyecto de innovación educativa se realiza una aplicación de las tarjetas de adquisición de datos al laboratorio de *Máquinas Eléctricas*. Por una parte se pretenden analizar algunos fenómenos comentados en las clases de teoría que normalmente no se validan en el laboratorio. Por otra, se introduce un elemento de medida potente y novedoso que resulta de interés para el alumno, incentivando su interés por la asignatura.

ABSTRACT

In the present paper a work of educative innovation based on the application of a data acquisition system for a laboratory on *Electrical Machines* is described. It is intended to analyze some issues studied on the theoretical classes that usually are not validated on the laboratory. On the other hand, the introduction of a data acquisition system as a powerful and new measurement instrument is of interest for the students, motivating the interest for the subject.

1. INTRODUCCIÓN

El transformador es una de las máquinas eléctricas de uso más extendido dentro de los sistemas eléctricos de potencia. El desarrollo de los transformadores a finales del siglo XIX, debido fundamentalmente a las aplicaciones prácticas

llevadas a cabo por Deri, Bláthi y Zipernowsky, contribuyeron a la expansión de los sistemas de corriente alterna en detrimento de los de corriente continua. El uso de los transformadores permitió reducir considerablemente las pérdidas en los sistemas de transmisión de energía eléctrica mediante la elevación de las tensiones de transporte. De esta forma se evitó la necesidad de tener centros de generación cercanos a los de consumo y, por otra parte, aumentar las potencias nominales de las centrales generadoras.

Desde el punto de vista didáctico el transformador es normalmente la primera máquina que se estudia en la asignatura *Máquinas Eléctricas*. La razón es que es la máquina eléctrica más sencilla, debido principalmente a su carácter estático, y en la que se pueden analizar principios físicos que luego se extrapolan a otras máquinas, como por ejemplo el motor de inducción.

Por ambos motivos, el peso específico que el transformador presenta dentro de la asignatura *Máquinas Eléctricas* es elevado, siendo interesante desarrollar cualquier tipo de actividad que refuerce los contenidos teóricos desarrollados en las clases teóricas. Desde este punto de vista, y en general para todas las asignaturas dentro de la Ingeniería Eléctrica, son de utilidad las prácticas de laboratorio. En ellas el alumno entra en contacto con elementos reales, adquiere habilidades en el montaje de circuitos y pone en práctica los conocimientos estudiados. Una de las prácticas de laboratorio convencional que involucra al transformador es la realización de los ensayos de vacío y cortocircuito. A partir de estos ensayos se obtienen los parámetros de su circuito equivalente que se utiliza en la resolución de problemas. Para la realización de estos ensayos se utilizan elementos convencionales de medida como voltímetros, amperímetros y vatímetros, con los que el alumno está suficientemente familiarizado de su paso por *Teoría de Circuitos*. De esta forma, la instrumentación que se utiliza en los ensayos no es de "alta tecnología" y no supone ningún nuevo aliciente para el alumno.

Por otra parte, en los últimos años se ha experimentado una cierta crisis de la Ingeniería Eléctrica como rama de la Ingeniería a nivel mundial [1-4]. Las posibles causas de este fenómeno son múltiples, entre las que cabe destacar la visión clasicista, aburrida, poco tecnológica y con poco futuro profesional que el alumno percibe de los planes de estudio. Este hecho viene además condicionado por otros factores como la escasa dotación existente en los laboratorios con tecnologías obsoletas y poco atractivas. Si además a esto se une la percepción del sector eléctrico como fuertemente destecnificado al compararse con otros sectores emergentes como el de las telecomunicaciones o el aeronáutico, el resultado es claro.

Por todos estos motivos el presente proyecto de innovación educativa introduce la utilización de las tarjetas de adquisición de datos en las prácticas de laboratorio de *Máquinas Eléctricas*. La razón es doble: por un parte se pretende motivar y preparar al alumno en el uso de esta tecnología (más avanzada que la

instrumentación utilizada convencionalmente); por otra, con la utilización de esta tecnología se pueden estudiar fenómenos que normalmente no se validan en las prácticas de laboratorio.

El documento se estructura de la siguiente forma: en primer lugar se ponen de manifiesto aquellos aspectos de importancia que se desean analizar con la incorporación de las tarjetas de adquisición de datos; posteriormente se describen los montajes realizados para la adquisición; finalmente se exponen los resultados obtenidos y las principales conclusiones.

2. ASPECTOS TEÓRICOS ANALIZADOS

Tres son los aspectos teóricos que se desean validar experimentalmente en el laboratorio:

- La corriente de conexión de un transformador en vacío [5]. En este caso se desea analizar el transitorio que se produce en la intensidad de vacío. Dicha intensidad en los instantes iniciales será prácticamente unidireccional con una componente de corriente continua y de segundo armónico elevadas. Con el paso del tiempo estas componentes se irán amortiguando hasta que finalmente resulta la intensidad de vacío en régimen permanente.
- El carácter no senoidal de la corriente de vacío [5]. La no linealidad del circuito magnético del transformador es la responsable del carácter no senoidal de la intensidad de vacío. Normalmente la característica de magnetización es saturada, trabajándose cerca del codo de saturación para aprovechar al máximo las características magnéticas del material. De esta forma, ante una tensión senoidal el flujo magnético, relacionado con la tensión mediante la ley de Faraday (relación lineal), es senoidal y la intensidad de vacío, relacionada con el flujo mediante la curva de magnetización, resulta no senoidal.
- El transitorio producido cuando se origina un cortocircuito en el devanado de baja tensión del transformador [6]. La aparición de un cortocircuito lleva siempre asociado un régimen transitorio entre el régimen permanente existente antes de la aparición del mismo y el nuevo régimen que se genera. Durante el cortocircuito circulan intensidades muy elevadas debido a la baja impedancia que existe en el secundario del transformador. Además, debido al carácter resistivo-inductivo del circuito, se tiene un sistema con dinámica de primer orden, apareciendo una componente continua de la intensidad que se atenúa con el tiempo.

Para estudiar estos fenómenos se realizan los montajes experimentales que se describen en la siguiente sección.

3. MONTAJES REALIZADOS

De los tres fenómenos que se quieren validar en el laboratorio dos de ellos conciernen a la intensidad de vacío del transformador, incluyendo un transitorio y un régimen permanente, y otro a la intensidad de cortocircuito. Por estos motivos se realizan los dos montajes de laboratorio siguientes:

- Ensayo de vacío. En este caso el secundario del transformador se deja abierto mientras se alimenta el primario a tensión nominal, tal y como se muestra en la Figura 1. Se mide la tensión e intensidad primarias mediante unos transductores adecuados cuyas salidas se conectan a las entradas analógicas de la tarjeta de adquisición de datos.

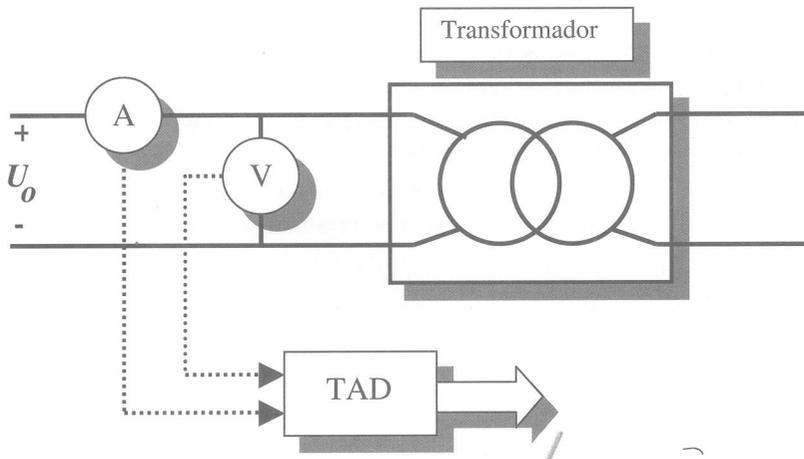


Figura 1. Montaje del ensayo de vacío.

- Ensayo de cortocircuito. El estudio del transitorio de la corriente de cortocircuito en el secundario del transformador requeriría la alimentación del transformador a tensión nominal con los bornes secundarios cortocircuitados. Este montaje presentaría el problema de originar unas corrientes permanentes muy elevadas, tan solo limitadas por la tensión de cortocircuito (ϵ_{cc}), y unos picos transitorios que, en el peor de los casos, podrían alcanzar $2\sqrt{2}$ veces la intensidad de régimen permanente. Estas corrientes podrían tener efectos perjudiciales para los devanados del transformador tanto desde el punto de vista térmico como mecánico. Por estos motivos se realiza el ensayo a tensión reducida para, de esta forma, limitar el valor de las intensidades a valores no perjudiciales para el transformador. Si bien la magnitud de las intensidades que se obtendrían sería mucho inferior, y proporcional

a la relación existente entre la tensión nominal y la aplicada, el fenómeno transitorio aparecería de igual forma. De entre las tensiones reducidas que pueden aplicarse se opta por la tensión de cortocircuito del transformador, definida como aquella que produce la circulación de la intensidad nominal cuando uno de los devanados está en cortocircuito. De esta forma, el esquema del montaje que se realiza se muestra en la Figura 2.

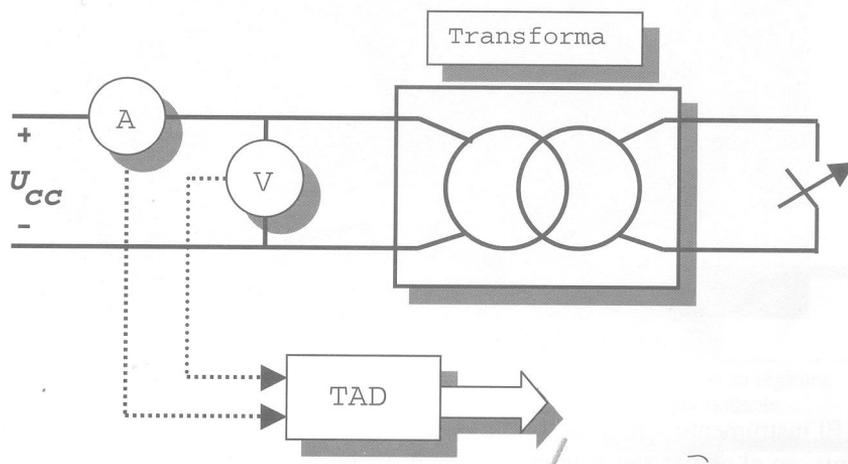


Figura 2. Montaje del ensayo de cortocircuito.

Como puede observarse los montajes realizados son idénticos a los convencionales ensayos de vacío y cortocircuito, en los que la instrumentación clásica ha sido sustituida por transductores de tensión e intensidad y una tarjeta de adquisición de datos controlada desde un ordenador personal. Así, además de poder comprobar los fenómenos físicos comentados con anterioridad, pueden realizarse estos ensayos y hasta calcular directamente los parámetros del transformador.

Una fotografía del montaje realizado puede verse en la Figura 3. En ella se observa el transformador que se está sometiendo a ensayo, el ordenador personal en el que se diseña un instrumento virtual de medida basado en tarjetas de adquisición de datos y los transductores de tensión e intensidad.

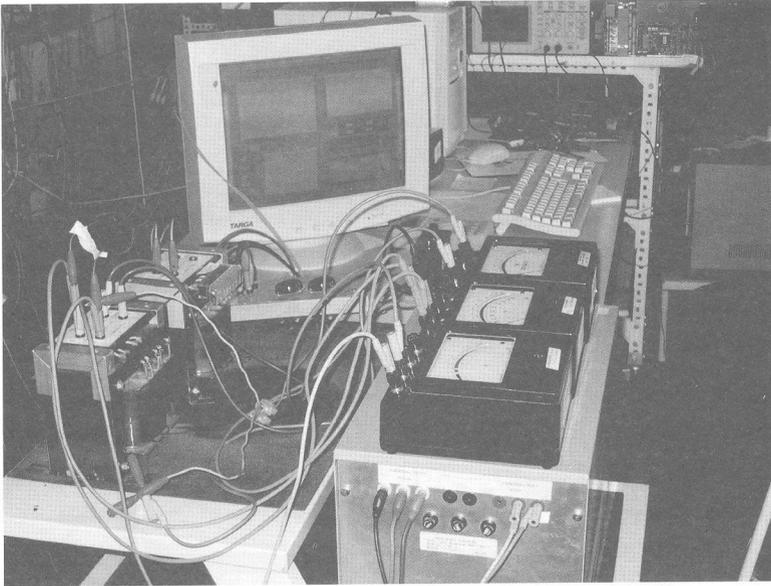


Figura 3. Fotografía del montaje de laboratorio realizado

El instrumento virtual se diseña en el entorno LabView© de National Instruments, en el que se tiene un menú inicial, mostrado en la Figura 4, que permite acceder a cualquiera de los ensayos comentados, incluyendo posibilidad de ayuda en línea y documentación previa de los objetivos buscados.



Figura 4. Menú principal del instrumento virtual desarrollado.

La información mostrada por el instrumento virtual en el ensayo de vacío abarca el periodo transitorio y el permanente. Se capturan las formas de onda de

tensión e intensidad desde que se produce la conexión en vacío del transformador hasta que se alcanza el régimen permanente. Entonces se realiza un procesamiento de la señal para obtener diversos parámetros de interés. En el caso del régimen transitorio se estudia la evolución de distintos armónicos en el tiempo. Para ello se aplican sucesivos análisis de Fourier sobre las formas de onda de intensidad mediante la aplicación de técnicas de ventana móvil. El resultado se muestra en la parte inferior izquierda de la pantalla del instrumento virtual mostrada en la Figura 5.

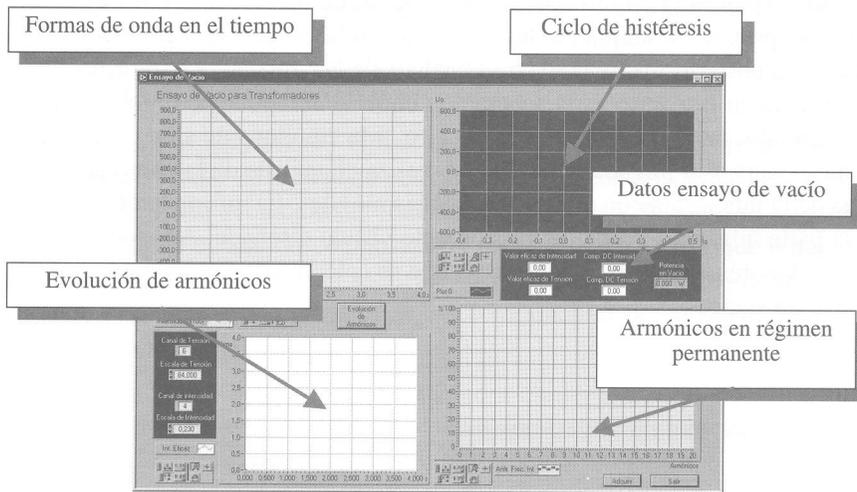


Figura 5. Vista principal del instrumento virtual realizado para el ensayo de vacío.

Por otra parte, una vez alcanzado el permanente se procede a analizar el contenido armónico de la onda de intensidad, para poner de manifiesto el carácter no senoidal de la corriente. Esta información se proporciona en la parte inferior derecha del instrumento realizado. Dicha característica es común de los transformadores debido a la característica no lineal de la curva de magnetización, mostrada en la parte superior derecha de la Figura 5. Por último, tras un sencillo análisis se pueden obtener los datos del ensayo de vacío. Se recuerda que en este ensayo se suelen medir los valores eficaces de la tensión e intensidad, además de la potencia absorbida. Estos datos se obtienen mediante la aplicación de la transformada de Fourier. Los valores eficaces de tensión e intensidad se calculan a partir de los valores eficaces de los armónicos U_k e I_k :

$$U_0 = \sqrt{\sum_k U_k^2} \quad I_0 = \sqrt{\sum_k I_k^2} \quad (1)$$

Para el cálculo de la potencia hay que utilizar los fasores de tensión e intensidad para cada armónico U_k e I_k o bien emplear una formulación alternativa en el dominio del tiempo:

$$P_0 = \sum_k U_k I_k^* = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt \quad (2)$$

Para el ensayo de cortocircuito se diseña el instrumento virtual cuya pantalla principal se muestra en la Figura 6. Se procede de igual forma que en el ensayo de vacío: primero se adquieren las formas de onda temporales de tensión e intensidad para posteriormente realizar el análisis de las mismas. La información que se presenta en este caso es la separación entre la componente unidireccional de cortocircuito, respuesta natural del circuito, y la componente simétrica de cortocircuito, respuesta forzada. Para ello se realiza el análisis de la componente continua de la intensidad con el uso de ventanas móviles. La información se presenta en la parte inferior derecha del instrumento virtual diseñado. Adicionalmente, se dan los valores obtenidos en el ensayo que se calculan de forma similar a los del ensayo de vacío.

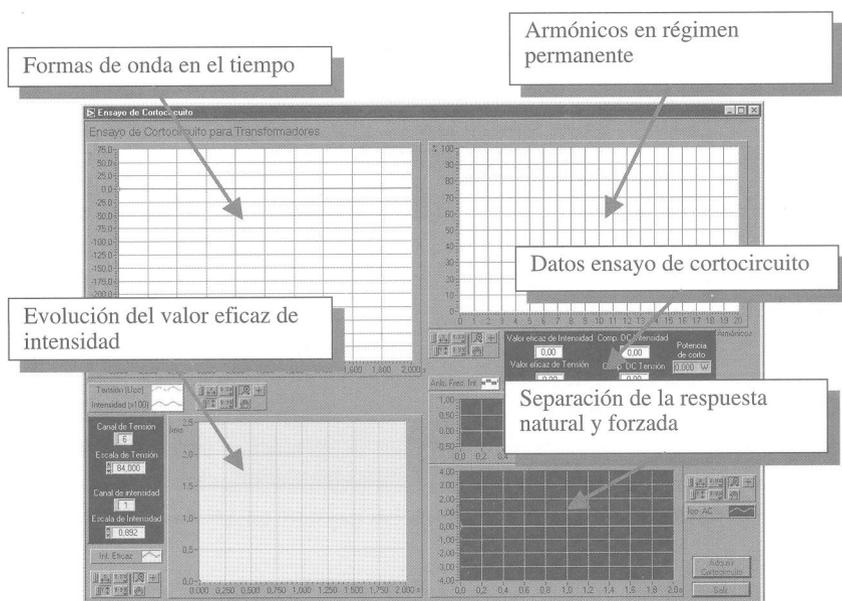


Figura 6. Vista principal del instrumento virtual del ensayo de cortocircuito.

Por último, se destacan algunos detalles acerca de los transductores de tensión e intensidad empleados. El empleo de transductores es de vital importancia para tener un aislamiento galvánico entre el circuito de potencia y el de señal. Por otra parte, es importante tener en cuenta las magnitudes de las variables que se van a medir para poder ajustar los transductores de forma que su salida secundaria se ajuste lo más posible al fondo de escala de las entradas analógicas de la tarjeta de adquisición de datos. De esta forma, se reducen los errores de cuantización cometidos en la transformación de la señal analógica a digital. Así, en el ensayo de vacío hay que tener presente que las intensidades son reducidas y las tensiones elevadas, mientras que en el ensayo de cortocircuito sucede al contrario.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Para validar el instrumento virtual realizado se procede a realizar el ensayo de una transformador de 1 kVA de potencia nominal con relación de transformación 380/220 V. La evolución del transitorio del análisis de vacío se muestra en la Figura 7, junto con su descomposición espectral. Puede verse que durante los primeros instantes de conexión se alcanzan valores muy elevados de intensidad de vacío y con contenido elevado de las componentes de corriente continua y segundo armónico.

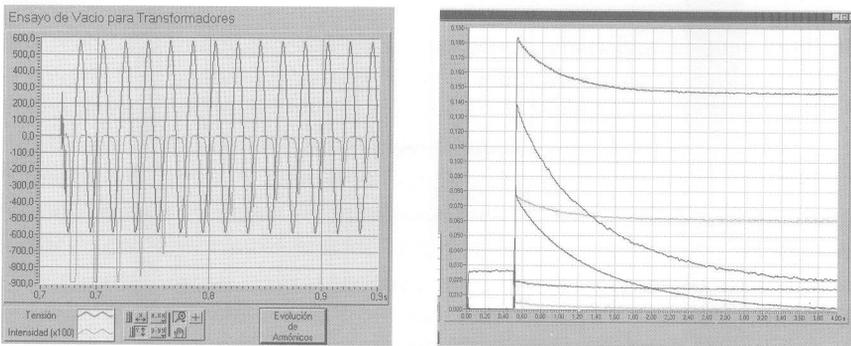


Figura 7. Transitorio de conexión de un transformador en vacío.

Por otra parte, si se analiza el régimen permanente se puede observar el comentado carácter no senoidal de la intensidad de vacío debido a la característica no lineal de magnetización, tal y como se observa en la Figura 8.

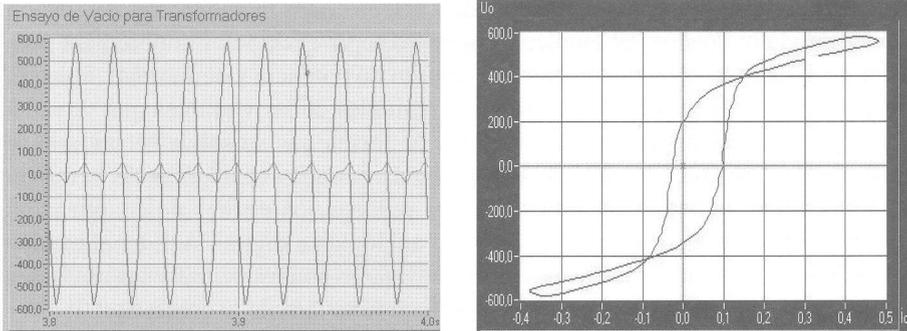


Figura 8. Régimen permanente de la intensidad de vacío y curva de magnetización.

En el caso del ensayo de cortocircuito se tiene la descomposición de intensidades que se muestra en la Figura 9. Se observa que la duración del transitorio es mínima debido fundamentalmente a que para máquinas de reducida potencia el ratio X_{cc}/R_{cc} es muy reducido.

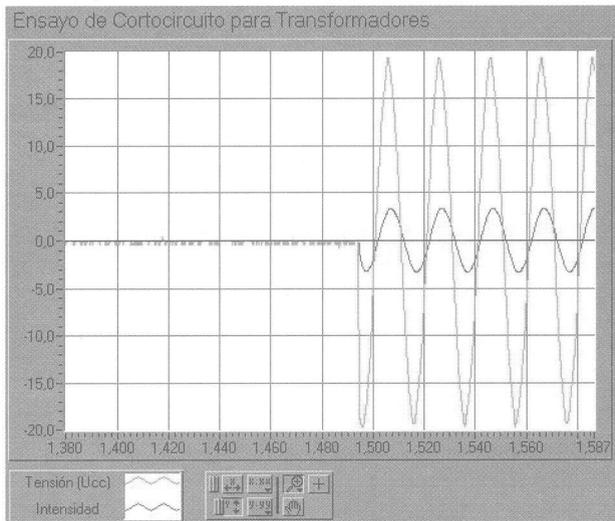


Figura 9. Transitorio de la corriente de cortocircuito.

Por último, la Tabla 1 muestra una comparación de los resultados obtenidos de los ensayos mediante la utilización del instrumento virtual e instrumentación convencional, validándose el procedimiento desarrollado.

Tabla 1. Comparación de resultados obtenidos de los ensayos.

Ensayo		Instrumento virtual	Instrumentación convencional
Vacío	Tensión (V)	412,6	407
	Intensidad (A)	0,24	0,28
	Potencia (W)	29,4	24
Cortocircuito	Tensión (V)	13,3	13,2
	Intensidad (A)	2,4	2,6
	Potencia (W)	29,8	31

5. CONCLUSIONES

En este proyecto de innovación educativa se ha realizado un primer paso para introducir las tarjetas de adquisición de datos al laboratorio de Máquinas Eléctricas. Para ello se ha propuesto analizar tres fenómenos físicos relacionados con el transformador monofásico, dos de los cuales están relacionados con el régimen transitorio. Los montajes que se han llevado a cabo en el laboratorio son similares a los convencionales de vacío y cortocircuito, utilizados para calcular los parámetros del transformador. Como consecuencia, el montaje de esta práctica consigue mejorar ciertos aspectos de los ensayos convencionales, pues el alumno puede ver en la realidad algunos aspectos de los transformadores que antes se explicaban tan solo de forma teórica. Por otra parte, la introducción de la tarjeta de adquisición de datos confiere un aspecto novedoso y tecnológico en la instrumentación utilizada, lo cual puede motivar al alumno en el seguimiento de la signatura. Los resultados satisfactorios obtenidos incitan a seguir en esta línea de trabajo, intentando realizar montajes de las mismas características para las otras máquinas eléctricas (corriente continua, asíncronas y síncronas) que se someten a ensayo en el laboratorio. Además, esta experiencia puede ser de aplicación a otras asignaturas dentro de la Ingeniería Eléctrica como *Tracción y Accionamientos Eléctricos*, *Tecnología Eléctrica* y *Tecnología de Alta Tensión*.

AGRADECIMIENTOS

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 Curso Académico 2003/2004, al amparo de la Convocatoria de Ayudas a la Docencia para la Innovación, dentro del programa de Calidad de la Enseñanza desarrollado por el Vicerrectorado de Calidad y Nuevas Tecnologías.

REFERENCIAS

- AMCHIN, H.K. (1987). "*Increased Industry/University Interactions. A Solution for Today's Power engineering Education Problem*". IEEE/PES 1987 Winter Meeting, paper 87 WM 005 2.
- BARNES, F.S. (1994). "*Engineering Education under Attack*", IEEE Trans on Education, vol. 37 (1), pp. 1-2.
- PYKO, K. y ZORPETTE, G. (1986). "*Can Power Engineering Education be Reenergized?*", IEEE Spectrum, pp. 26-31.
- WAGNER, C.L. (1986). "*The Crisis in Power Engineering Education*". IEEE Power Engineering Review, pp.6-7.
- SANZ FEITO (2002). "*Máquinas Eléctricas*". Madrid: Prentice-Hall.
- RAS OLIVA, E. (1978). "*Transformadores de potencia, de medida y de protección*". Barcelona: Marcombo.