



Estudio de fenómenos transitorios en circuitos eléctricos de primer orden

Study of transient phenomena in first order circuits

Bertha M. - Soriano González
Frank - Grau Merconchini.
Llohandry - Cruz Carnero

Recibido: septiembre de 2013

Aprobado: febrero de 2014

Resumen/ Abstract

Este trabajo expone una metodología para estudiar procesos transitorios de corriente alterna y directa, en circuitos eléctricos lineales con un solo elemento almacenador de energía, empleando un sistema de instrumentación con una computadora y una tarjeta de adquisición de datos que permitió generar un tren de pulsos para sustituir los dispositivos de conexión y desconexión de la fuente. Se presentan los modelos matemáticos de los procesos transitorios, en presencia del tren de pulsos y para la combinación de este en serie con una fuente de señal sinusoidal; así como el diseño, la implementación de la práctica de laboratorio y las características instantáneas de tensión y corriente en los elementos almacenadores de energía, lo que permitió estudiar estos procesos y probar la coherencia de los resultados con los modelos obtenidos y las leyes de los procesos transitorios; estos además fueron contrastados con los cálculos teóricos y las simulaciones realizadas.

Palabras clave: circuitos eléctricos, procesos transitorios, sistemas de instrumentación.

This work presents a methodology to study transient processes of direct and alternating current, in linear circuits with a single energy storage element, using an instrumentation system with a computer and a data acquisition card, which generates a train of pulse to replace devices connecting and disconnecting the source. Mathematical models were obtained for transient processes in the presence of the pulse train and the combination of the pulse train in series with a sinusoidal signal source, allowing study these processes and test the structural similarity of models obtained both when connecting and disconnecting the circuit using switches. The lab was designed and implemented, obtaining the instantaneous characteristics of voltage and current in the energy storage elements. The results are consistent with the models obtained and the laws of transient processes and also were compared with theoretical calculations and measurements made with digital tools, corroborating its veracity.

Key Words: electric circuits, transient process, instrumentation systems

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos transitorios constituyen más del 80 % de los regímenes de operación de cualquier red eléctrica. La simple conexión o desconexión de los equipos, la variación de las magnitudes de

alimentación de una red o de los parámetros que caracterizan sus componentes; además de las fallas producidas, ya sea por factores tecnológicos o por medioambientales, provocan condiciones anormales en las redes eléctricas con el consiguiente estrés en los equipos: calentamiento, vibraciones, etc., lo que puede provocar averías y disminuir el tiempo de vida útil de los mismos.

El estudio de los procesos transitorios permite predecir qué tanto y por qué tiempo, puede soportar una red los efectos de estos fenómenos; además, suministran datos útiles para el diseño de equipos que actúan como protección, adecuando los circuitos en concordancia con el tipo y la dimensión de los transitorios que más frecuentemente se producen en su entorno. De manera que resulta de gran interés para los ingenieros del perfil eléctrico adquirir habilidades para calcular, medir y analizar las magnitudes y parámetros que caracterizan a estos procesos.

Las prácticas de laboratorio juegan un rol fundamental en el desarrollo de las habilidades antes mencionadas. Estas permiten corroborar el cumplimiento de las leyes que rigen estos fenómenos, a partir de la medición de magnitudes de corriente y tensión en circuitos con componentes reales que no siempre se pueden estudiar empleando los modelos ideales analizados en clases. Es en ellas donde concurren y se expresan todos los conocimientos adquiridos con anterioridad; y se forman hábitos, valores y sentimientos profesionales. Es por eso que de la calidad con que se realice ésta, depende la eficacia del método de enseñanza empleado y el cuestionamiento que de la teoría y la práctica puedan plantearse los estudiantes.

La calidad de una práctica de laboratorio empieza a definirse en función de la correlación entre el objetivo trazado, el método y la tecnología empleada para lograrlo. La tecnología debe estar actualizada respecto al entorno de desarrollo profesional que encontrará el estudiante una vez graduado, para contribuir realmente al desarrollo de habilidades que luego sean beneficiosas.

Las prácticas de laboratorio para el estudio de estos procesos se llevaban a cabo tradicionalmente desde la década de los 60 y hasta los 80, empleando la tecnología analógica de los osciloscopios y los interruptores rápidos de telefonía que permitían observar adecuadamente el fenómeno. Con la caída del campo socialista y la desaparición de más del 90 % del intercambio comercial de Cuba, las universidades se vieron privadas de actualizar su tecnología por más de 15 años, provocando el deterioro y la desaparición del instrumental con que se contaba para el desarrollo de estas prácticas. Una solución a este problema fue la implementación de las mismas empleando programas simuladores que permitían, en un ambiente virtual muy parecido al laboratorio real, "montar esquemas de circuitos eléctricos" y "medir" las magnitudes necesarias para corroborar la teoría, incluso muchas veces, con menos tropiezos que en un laboratorio real, debido a que se trabajaba todo el tiempo con modelos, tanto en las conferencias como en las simulaciones.

El desarrollo virtual de las prácticas de laboratorio, si bien permite corroborar la teoría, así como familiarizar a los estudiantes con el análisis de las magnitudes eléctricas durante los procesos transitorios, lo cierto es que limita la formación de habilidades de conexión de circuitos e instrumentos de medición, de analizar la veracidad de los resultados y las posibles causas de errores, y de calcular magnitudes a partir de los datos medidos. En este trabajo se expone una metodología para estudiar procesos transitorios de corriente alterna y directa, en circuitos eléctricos lineales con un solo elemento almacenador de energía, empleando para ello un sistema de instrumentación conformado por una computadora y una tarjeta de adquisición de datos que brinda la posibilidad de generar formas de ondas por sus salidas analógicas, lo que se utilizó para generar un tren de pulsos cuya función fue producir el efecto de conexión y desconexión de la fuente de alimentación.

Se obtuvieron los modelos matemáticos para los procesos transitorios que tienen lugar en circuitos inductivos y capacitivos de primer orden, en presencia del tren de pulsos lo que permitió estudiar estos procesos en circuitos alimentados con corriente directa. Así mismo, se obtuvieron los modelos matemáticos para la combinación del tren de pulsos en serie con una fuente de señal sinusoidal, lo que permitió estudiar los procesos transitorios en circuitos alimentados con corriente alterna sinusoidal; probándose la similitud estructural de ambos casos con los modelos matemáticos obtenidos cuando se conecta y desconecta una fuente de corriente directa y una de alterna sinusoidal empleando interruptores, respectivamente; lo que permite afirmar la validez teórica de la metodología propuesta.

Por otra parte se prueba su validez práctica al diseñar los circuitos a estudiar e implementar la práctica de laboratorio cuyos resultados fueron coherentes con los modelos obtenidos y las leyes de los procesos transitorios en estos tipos de circuitos.

En el desarrollo del trabajo se obtuvieron las características instantáneas de tensión y corriente en los elementos almacenadores de energía, además se midió valor eficaz y constante de tiempo. Los resultados de estas mediciones fueron comparados con los cálculos teóricos y con las mediciones realizadas con instrumentos digitales, corroborándose su veracidad.

DESARROLLO

Los circuitos lineales que poseen un solo tipo de elemento almacenador de energía, inductivo o capacitivo, o una combinación de ellos equivalente a uno solo, son llamados “*circuitos de primer orden*” debido a que su modelo matemático está formado por ecuaciones diferenciales de primer orden y se caracterizan por el hecho de que la tensión en los terminales del capacitor y la corriente a través del inductor varían de forma continua en el tiempo, lo que es una expresión de la ley de conservación de la carga y de la energía.

La tensión en el capacitor y la corriente en el inductor, de este tipo de circuitos, poseen comportamientos instantáneos que pueden caracterizarse matemáticamente como la suma de una componente de igual forma a la fuente de alimentación, denominada componente forzada o respuesta a régimen estable, y una componente exponencial que decrece durante el proceso transitorio con rapidez inversa a la constante de tiempo del circuito [1]. Las ecuaciones (1) y (3) muestran los modelos matemáticos de las respuestas de tensión en el capacitor y corriente en el inductor en circuitos alimentados con corriente directa [1-2] y las ecuaciones (2) y (4), los modelos matemáticos de las respuestas de tensión en el capacitor y corriente en el inductor para corriente alterna sinusoidal respectivamente [3].

$$u_c = u_{cf} + [u_{c(0-)} - u_{cf}] e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \quad (1)$$

$$u_c = \hat{u}_c \sin(\omega t + \alpha_{uc}) + [u_{c(0-)} - \hat{u}_c \sin(\alpha_{uc})] e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \quad (2)$$

$$i_L = i_{Lf} + [i_{L(0-)} - i_{Lf}] e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \quad (3)$$

$$i_L = \hat{i}_L \sin(\omega t + \alpha_{iL}) + [i_{L(0-)} - \hat{i}_L \sin(\alpha_{iL})] e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \quad (4)$$

Donde: U_{cf} e I_{Lf} son los valores de la tensión en el capacitor y corriente en el inductor¹, en régimen estable de corriente directa; $u_c(0-)$ e $i_L(0-)$ son los valores de la tensión en el capacitor y corriente en el inductor respectivamente en el instante de inicio del proceso transitorio; \hat{u}_c e \hat{i}_L son los valores máximos instantáneos de la tensión en el capacitor y corriente en el inductor, α_{uc} y α_{iL} son las fases iniciales² de la tensión en el capacitor y corriente en el inductor y τ la constante de tiempo del circuito³.

Las magnitudes de tensión y corriente resultan fáciles de medir, de ahí que implementar una práctica de laboratorio para estudiar su comportamiento, no debe constituir un problema de gran complejidad. Sin embargo, para estudiar los procesos transitorios es necesario emplear algún dispositivo o método que permita cambiar las condiciones del circuito y a la vez observar y medir estas magnitudes durante ese período de cambio. A diferencia de otros métodos que emplean interruptores [4], en este trabajo se propuso emplear una señal de pulsos cuadrados e1, de peso E, como la mostrada en la figura 1a, para provocar el proceso transitorio a partir de cambios en la

¹ Las tensiones y las corrientes empleadas en las ecuaciones a lo largo de este trabajo se expresan en Volt y en Ampere respectivamente.

² Los ángulos de fase inicial (α) empleados en las ecuaciones a lo largo de este trabajo están expresados en radianes.

³ Las constantes de tiempo empleadas en las ecuaciones a lo largo de este trabajo están expresadas en segundos

alimentación del circuito. Las figuras 1(b) y 1 (c) muestran los esquemas empleados para estudiar los procesos transitorios en circuitos alimentados con corriente directa y corriente alterna respectivamente. En ambos casos, el primer proceso, debido a la conexión de una fuente de tensión al circuito, ocurre cuando la señal de tensión de alimentación pulsante e_1 tiene un flanco de subida en $t=0$ y mantiene constante su valor hasta el instante t_a , representando el comportamiento de una fuente de corriente directa, figura 1 (b) y de la combinación serie de una de corriente directa y una de alterna sinusoidal e_2 , figura 1(c). El segundo proceso por su parte, en ambos casos, ocurre cuando la señal de tensión de alimentación pulsante e_1 tiene un flanco de caída en el instante t_a y mantiene constante su valor cero hasta el instante $t_a + t_p$, quedando el circuito sin energía, figura 1(b) y solamente energizado por la fuente sinusoidal e_2 , figura 1(c).

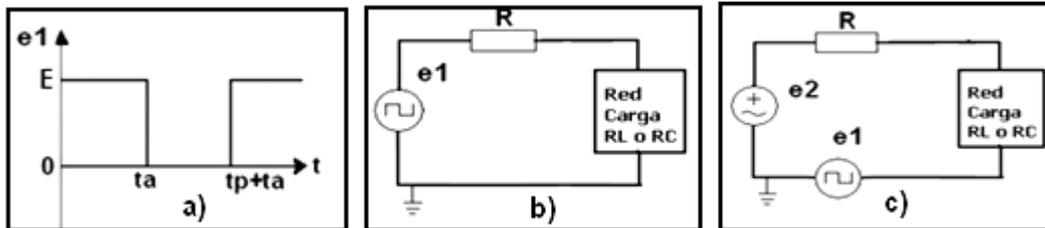


Fig. 1. (a). Tensión pulsante empleada para producir el transitorio, b).y c).Esquemas empleados para el estudio de procesos transitorios de corriente directa y de corriente alterna respectivamente.

Modelo matemático para estudiar procesos transitorios de corriente directa empleando la fuente pulsante.

A continuación se demuestra que los modelos matemáticos de la tensión en el capacitor y la corriente en el inductor, cuando son alimentados con un tren de pulsos, son similares estructuralmente a los obtenidos para la conexión y desconexión de una fuente de corriente directa. Resolviendo la ecuación diferencial que resulta de aplicar la segunda ley de Kirchhoff al circuito de la figura 1 (b) con carga capacitiva, se obtiene la ecuación (5), similar a la obtenida por Boylestad para la respuesta a la combinación serie de una fuente de corriente directa con el tren de pulsos [4].

$$u_{c1} = E - [u_{c(0-)} - E] e^{-\left(\frac{t}{\tau_1}\right)} \quad (5)$$

Donde: E es valor del pulso, $u_{c(0-)}$ el valor inicial de la tensión en el capacitor y τ_1 la constante de tiempo del circuito.

Procediendo de igual manera se obtuvo la tensión del capacitor para el segundo transitorio mostrada en la ecuación (6).

$$u_{c2} = [E] e^{-\left(\frac{t}{\tau_2}\right)} \quad (6)$$

Por otra parte, a partir de plantear la ecuación dinámica de la segunda ley de Kirchhoff en el circuito de la figura 1(b), pero con carga inductiva; se obtuvo la ecuación (7), para la corriente en el inductor durante el primer transitorio, y la ecuación 8 para el segundo transitorio.

$$i_{L1} = \frac{E}{R} + \left[i_{Lf(0-)} - \frac{E}{R} \right] e^{-\left(\frac{t}{\tau_1}\right)} \quad (7)$$

$$i_{L2} = \left(\frac{E}{R} \right) e^{-\left(\frac{t}{\tau_2}\right)} \quad (8)$$

Las ecuaciones 5, 6, 7 y 8, guardan similitud estructural con los modelos obtenidos para una fuente de corriente directa mostrados en las ecuaciones 1 y 3, respectivamente, lo que demuestra

que alimentando los circuitos lineales de primer orden con una fuente de pulsos se producen procesos transitorios de corriente directa y corrobora la eficacia teórica de la propuesta.

Modelos matemáticos para estudiar procesos transitorios de corriente alterna empleando la fuente pulsante.

Basados en la idea de Kemmerly que plantea la posibilidad de estudiar la conexión de una fuente de corriente alterna sinusoidal a un circuito, empleando la combinación de ella con el escalón unitario [5], en este trabajo se propuso alimentar la red de carga con una fuente de tensión pulsante en serie con una de corriente alterna, de manera que los procesos transitorios se producen con los flancos de subida y caída de la fuente de pulsos. A continuación se demuestra que los modelos matemáticos de la tensión en el capacitor y la corriente en el inductor, cuando son alimentados con un tren de pulsos en serie con una fuente de tensión alterna sinusoidal, son similares estructuralmente a los obtenidos para una fuente de corriente alterna.

Resolviendo la ecuación diferencial que resulta de aplicar la segunda ley de Kirchoff al circuito de la figura 1c, con carga capacitiva y aplicando el teorema de superposición de los efectos al primer transitorio (0-t_a), se obtuvo la ecuación 9, que describe el comportamiento de la tensión en el capacitor durante este período de tiempo. Como se observa es la suma de una senoide correspondiente a la respuesta ante la fuente de corriente alterna, una constante correspondiente a la respuesta ante la fuente de corriente directa y una exponencial correspondiente a la respuesta libre del circuito.

$$u_{c1} = \left(\frac{Xc\hat{e}_2}{Z_{eq}} \right) \sin(\omega t + \alpha_u - 90^\circ - \varphi) + E - \left[E + \left(\frac{Xc\hat{e}_2}{Z_{eq}} \right) \sin(\alpha_u - 90^\circ - \varphi) \right] e^{-\left(\frac{t}{\tau_1}\right)} \quad (9)$$

Donde: X_c y Z_{eq} son la reactancia capacitiva y la impedancia del circuito respectivamente; \hat{e}_2 , ω y α_u son el valor máximo instantáneo, la frecuencia angular y la fase inicial de la fuente de corriente alterna respectivamente; τ_1 constante de tiempo del circuito y E valor de la fuente de pulsos.

De igual manera se obtuvo el modelo matemático de la respuesta de tensión en el capacitor para el segundo proceso transitorio, ecuación (10).

$$u_{c2} = D \sin(\omega t + \alpha_u - 90^\circ - \varphi) + Q e^{-\left(\frac{t}{\tau_2}\right)} \quad (10)$$

Donde:

$$D = \frac{Xc\hat{e}_2}{Z_{eq}} \quad Y$$

$$Q = \left(1 - e^{-\left(\frac{t_a}{\tau_1}\right)} \right) \left(\frac{Xc\hat{e}_2}{Z_{eq}} \right) \sin(\omega t_a + \alpha_u - 90^\circ - \varphi) - \left(\frac{Xc\hat{e}_2}{Z_{eq}} \right) \sin(\alpha_u - 90^\circ - \varphi) \left(1 + e^{-\left(\frac{t_a}{\tau_1}\right)} \right)$$

Siguiendo el mismo procedimiento pero con carga inductiva en el circuito de la figura 1(c), se obtuvieron las ecuaciones (11) y (12), que describen el comportamiento de la corriente en el inductor durante el primer y el segundo transitorio respectivamente.

$$i_{L1} = \hat{I}_L \sin(\omega t + \alpha_u - \varphi) + \frac{E}{R} \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_1}\right)} \right] - \left[\hat{I}_L \sin(\alpha_u - \varphi) \right] e^{-\left(\frac{t}{\tau_1}\right)} \quad (11)$$

$$i_{L2} = \hat{I}_L \sin(\omega t + \alpha_u - \varphi) + G e^{-\left(\frac{t}{\tau_2}\right)} \quad (12)$$

$$\text{Donde: } G = \hat{i}_L \sin(\omega t_a + \alpha_u - \varphi) + \frac{E}{R} \left[1 - e^{-\left(\frac{t_a}{\tau_1}\right)} \right] - \left[\hat{i}_L \sin(\alpha_u - \varphi) \right] \left[1 + e^{-\left(\frac{t_a}{\tau_1}\right)} \right]$$

En todos los casos, ecuaciones (9), (10), (11) y (12), se observaron similitudes estructurales respecto a los modelos obtenidos para procesos transitorios en circuitos de primer orden con corriente alterna, ecuaciones (2) y (4), ya que solamente se desplaza el comportamiento sobre una constante proporcionada por la fuente de pulsos.

Implementación de las prácticas de laboratorio para el estudio de los procesos transitorios en circuitos de primer orden.

El esquema eléctrico empleado para el desarrollo de la práctica emplea una fuente de pulsos para estudiar los procesos transitorios de corriente directa. Para estudiar los procesos transitorios de corriente alterna se alimentó el circuito con una fuente conformada por el generador de onda sinusoidal en serie con el generador de pulsos.

Todas las señales de tensión del circuito se midieron empleando la tarjeta de adquisición de datos DaqBoard/1000 de IOtech [6-7]. Estas tensiones se llevaron a las entradas analógicas de la tarjeta a través del conector TB 100 y se midieron empleando las entradas diferenciales ACH0-ACH8, ACH1-ACH9, ACH2-ACH10 y ACH3-ACH11 lo que garantiza mayor precisión en la medición [8].

Diseño y selección de las fuentes.

La onda sinusoidal se obtuvo a partir de un generador de señales externo. Sus valores de frecuencia f_s , para diferentes variantes, se fijaron teniendo en cuenta el teorema del muestreo. La frecuencia máxima de muestreo de la tarjeta es 200 KHz. Para medir las señales de tensión en todos los elementos del circuito se emplearon 4 canales de manera que la frecuencia de muestreo de cada canal f_c es de 50 KHz.

La frecuencia de la señal sinusoidal se fijó en un número entero de veces menor que la de muestreo del canal, teniendo en cuenta además que para observar mejor los procesos transitorios es necesario emplear períodos de la señal sinusoidal, T_s , comparables con la constante de tiempo del circuito τ .

El tren de pulsos se obtuvo desde la tarjeta de adquisición de datos, por su salida analógica (terminales XDAC0 del conector TB 100) [7]. Sus valores de frecuencia f_p , para distintas variantes, se fijaron teniendo en cuenta que, de evaluar las ecuaciones (1), (2), (3) y (4), al cabo de un tiempo igual a cinco veces la constante de tiempo del circuito, se puede considerar que se ha arribado ya al estado estable, con un error del 0.67 %; ya que las magnitudes transitorias han alcanzado 99,3 % de sus valores a régimen estable. Partiendo de este análisis y conociendo que los procesos transitorios bajo estudio ocurren, el primero durante el período activo y el segundo durante el período pasivo de la fuente pulsante, se ajustaron estos períodos y la frecuencia de la fuente según las ecuaciones (13) y (14), para observar los procesos transitorios completos entre cada conmutación de la fuente de pulsos.

$$t_a = t_p \geq 5\tau \quad (13)$$

$$f_p \leq \frac{1}{10\tau} \quad (14)$$

Diseño de los circuitos de carga

Los circuitos se diseñaron empleando la ecuación (15), para garantizar que en todas las variantes la corriente del circuito fuese menor que la corriente máxima permisible de las salidas analógicas de la tarjeta DAQBoard/1000 de IOtech que es de 10 mA. Así mismo se tuvo en cuenta que la tensión máxima en las entradas analógicas es de hasta 10V.

$$I = \frac{E_1 + E_2}{Z} \leq 7\text{mA} \quad (15)$$

Donde E_1 y E_2 valores eficaces de la tensión de cada fuente de alimentación respectivamente y Z la impedancia del circuito.

RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN

La configuración de las mediciones se realizó con el software Daqview de la tarjeta. Los valores de las mediciones y las características gráficas se obtuvieron empleando el PostView que forma parte del paquete tecnológico de la DaqBoard/1000. Los valores eficaces de la tensión se obtuvieron con la función RMS de la toolbox de procesamiento de señales del Matlab y la constante de tiempo se obtuvo a partir de subrutinas implementadas en Matlab 2008. En las tablas [1-4] se contrastan los resultados teóricos con los obtenidos por este método. La forma de onda de la corriente se obtuvo en todos los casos midiendo la tensión en el resistor de carga. Los resultados también fueron contrastados con simulaciones en Multisim 2007.

Se implementaron seis variantes de cada caso, en este trabajo solo se muestran dos por razones de espacio. Las figuras 2 (a) y 2 (b), muestran los resultados de las mediciones de tensión en el capacitor (observándose la continuidad de la misma) y en el resistor para procesos transitorios de corriente directa para las variante 1 y 2 de la tabla 1. En ellas se observa que la corriente en el capacitor, la que posee una forma de onda similar a la de la tensión en el resistor, tiene discontinuidades en el momento de la conmutación.

Tabla 1. Valores para las variantes de procesos transitorios de corriente directa capacitivos.					
No.	R[Ω]	C [nF]	$\tau_{\text{diseño}}$ [ms]	$\tau_{\text{medido con DAQ}}$ [ms]	Tensión eficaz en el C medido con DAQ [V]
1	4000	20	0.08	0.081	5.09
2	4000	10	0.04	0.042	5.12

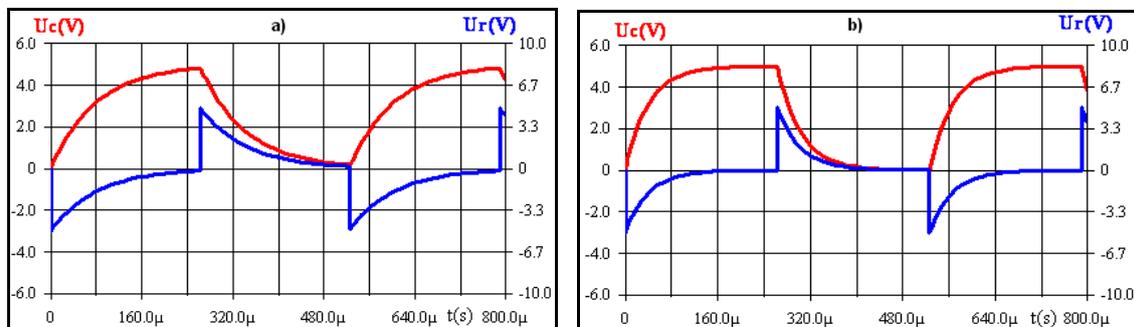


Fig. 2a y b. Formas de onda de la tensión en el capacitor y en el resistor para procesos transitorios de corriente directa, medidas con la DAqBoard/1000. Variante 1 y 2, tabla 1.

Las figuras 3 (a) y 3 (b), muestran los resultados de las mediciones de tensión en el inductor y en el resistor en procesos transitorios de corriente directa para las variante 1 y 2 de la tabla 2. Se observa claramente que el proceso transitorio de la variante 1 es mucho más rápido que el de la variante 2 y que la corriente en el inductor, la cual posee la misma forma de onda que la tensión en el resistor, mantiene un comportamiento continuo durante todo el proceso.

Tabla 2. Valores para las variantes de procesos transitorios de corriente directa inductivos.					
No.	R [Ω]	L[mH]	$\tau_{\text{diseño}}$ [ms]	$\tau_{\text{medido con DAQ}}$ [ms]	Tensión eficaz en el C medido con DAQ [V]
1	5998	100	0.017	0.0167	5.101
2	1010	100	0.099	0.098	5.102

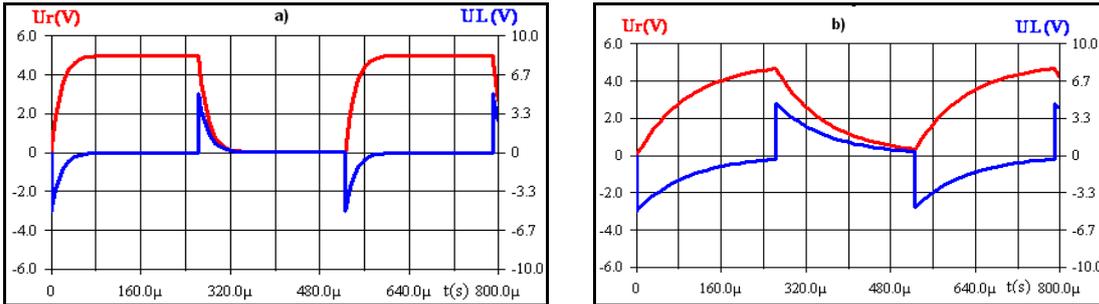


Fig.3a y b. Formas de onda de la tensión en el inductor y en el resistor para procesos transitorios de corriente directa, medidas con la DAqBoard/1000. Variante 1 y 2, tabla 2.

Las figuras 4 (a) y 4 (b), muestran los resultados de las mediciones de tensión en el capacitor y en el resistor en procesos transitorios de corriente alterna para las variantes 1 y 5 de la tabla 3. En ellas se observa como la corriente presenta discontinuidades en el momento de la conmutación, mientras la tensión en los terminales del capacitor permanece constante en ese momento lo que garantiza el cumplimiento de la ley de conservación de la carga y la energía.

Tabla 3. Valores para las variantes de procesos transitorios de alterna capacitivos.					
No.	R [Ω]	C[μF]	τdiseño [ms]	τmedido con DAQ [ms]	Tensión eficaz en el C medido con DAQ [V]
1	1200	0.900	1.08	1.05	5.212
5	2000	0.975	1.95	1.88	5.109

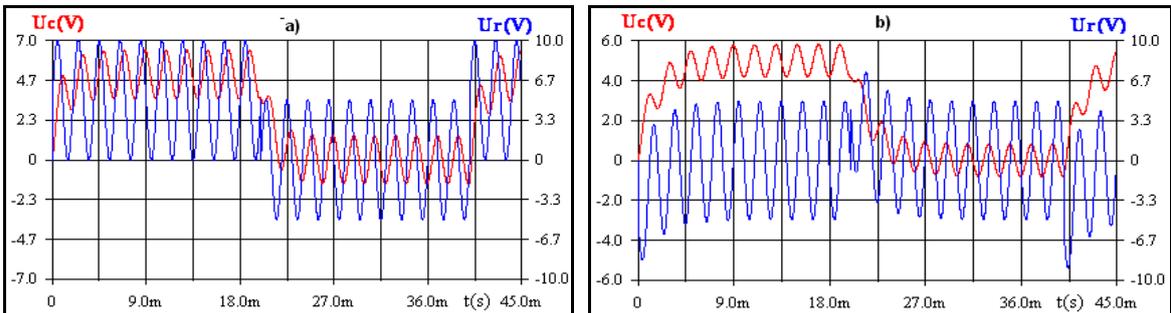


Fig.4a y b. Formas de onda de la tensión en el capacitor y en el resistor para procesos transitorios de corriente alterna sinusoidal, medidas con la DAqBoard/1000. Variante 1 y 5, tabla 3.

Las figuras 5(a) y 5 (b), muestran los resultados de las mediciones de tensión en el inductor y en el resistor para procesos transitorios de corriente alterna para las variantes 1 y 6 de la tabla 4. Se corrobora que la forma de onda de la corriente mantiene constantes sus valores en el momento de la conmutación lo que evidencia el cumplimiento de la ley de conservación de la energía. Asimismo se observa que la tensión en los terminales del inductor presenta discontinuidades en los momentos de la conmutación.

Tabla 4. Valores para las variantes de procesos transitorios de alterna inductivos.					
No.	R[Ω]	L[mH]	τdiseño[ms]	τmedido con DAQ [ms]	Tensión eficaz en el L medido con DAQ [V]
1	1000	50	0.05	0.049	5.212
6	1000	100	0.1	0.1	4.899

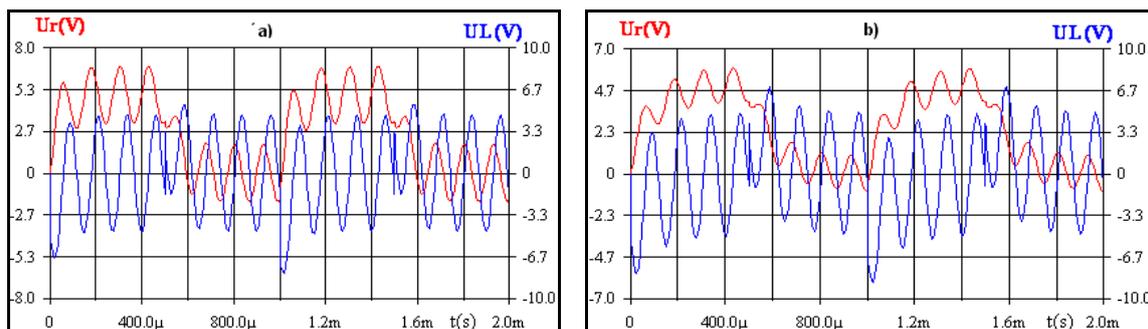


Fig. 5 (a) y (b). Formas de onda de corriente y tensión en el en el inductor en procesos transitorios de corriente alterna medidas con la DAqBoard/1000.Variante 1 y 6, tabla 2.

CONCLUSIONES

El trabajo presentado ha probado teórica y prácticamente la factibilidad de estudiar los procesos transitorios de primer orden de corriente directa y alterna empleando una fuente de pulsos como elemento iniciador del proceso. Los modelos matemáticos que se obtuvieron para la propuesta muestran similitud con los modelos clásicos de la bibliografía y expresan el cumplimiento de las leyes que rigen el comportamiento de las magnitudes de corriente y tensión durante los procesos transitorios en circuitos de primer orden. Así mismo, los resultados de las mediciones son coherentes con el desarrollo teórico, las simulaciones y las mediciones comparativas realizadas con instrumentos digitales. En todos los casos se observó continuidad en las formas de onda de tensión en el capacitor y corriente en el inductor, así mismo se pudo comparar claramente las constantes de tiempo de cada proceso a partir de las características gráficas obtenidas. La propuesta permitió sustituir el empleo de interruptores en la realización de las prácticas lo que trajo ventajas relacionadas con la eliminación del ruido que estos dispositivos introducen en las señales; por otra parte se amplió el diapasón de posibles circuitos a estudiar ya que la frecuencia del tren de pulsos y la de la señal sinusoidal se ajustan en función de la frecuencia de muestreo de la tarjeta y de la constante de tiempo de los circuitos bajo estudio, lo que es menos probable con interruptores. También extendió las posibilidades de la tarjeta de adquisición de datos ya que se implementó y probó un método para medir valor eficaz y constante de tiempo con Matlab.

Por último esta propuesta acerca al profesional a la tecnología moderna de los sistemas de instrumentación para la medición de magnitudes eléctricas lo que cada día es más común en las industrias donde se desarrollan los profesionales del perfil.

REFERENCIAS

- [1]. CARLSON, B. "*Circuitos*". Trad. *Circuits*, Thomson Learning, Ed. Brooks Coole, 2000, ISBN: 0534 37097 7, Mexico D.F., Editorial Thomson Learning 1ra. ed., 2001, 840p., p. 217- 228, ISBN: 970 686 033 9
- [2]. BIRD, J. "*Electrical Circuit Theory and Technology*", Elsevier Science, 2da ed., Edit. Newnes, 2003, 994 p., p. 259-270, Disponible en <www.newnespress.com> ISBN: 0 7506 5784 7.
- [3]. DORF, R. C.; SOVOBODA, J. A., "*Circuitos Eléctricos*". 6ta. ed., México D.F, Edit. Alfa Omega 2008, 912 p., p.378-390, ISBN: 978 607 707 2 324
- [4]. BOYLESTAD, R.L. "Introducción al análisis de Circuitos". Trad. *Introductory Circuit Analysis*, Prentice Hall, 10a ed., México D. F, 2004, 1248 p., p.390-402, 481-487, Disponible en: <www.pearsoneducacion.boylestad>, ISBN: 970 26 0448.
- [5]. HAYT W. H.; KEMMERLY, J.E.; DURBIN, S.M., "Análisis de Circuitos en Ingeniería", Trad. *Engineering Circuit Analysis*, McGraw Hill, 6ta.ed., México, Edit. McGraw Hill/Latinoamericana, 2003, 835 p., p.246- 249, ISBN:970 10 3694 8
- [6]. IOTECH. *DaqBoard/1000 and /2000 Series User's Manual*, [CD-ROM], 1999 through 2005, IOtech, Inc. Disponible en: www.mccdaq.com/products/db1000s.htm y en www.iotech.com.

- [7]. IOTECH. Personal Daq User's Manual. [CD-ROM], 1998 through 2007, IOtech, Inc. Disponible en: www.mccdaq.com/products/db1000s.htm y en www.iotech.com.
- [8]. PARK, J. "*Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems*". [en línea], 1a ed. Elsevier, 2003, Actualizado 2010, [Consultado: febrero 2012], Disponible en: www.newnespress.com, ISBN: 0 750 657 960.

AUTORES

Bertha María Soriano González

Ingeniero Electricista, Máster en Ciencias, Profesor Auxiliar, Departamento de Electroenergética, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

e-mail: bsoriano45@gmail.com

Frank Grau Merconchini

Ingeniero Electricista, Máster en Ciencias, Profesor Asistente, Departamento de Electroenergética, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

Llohandry Cruz Carnero

Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Profesor Asistente, Departamento de Electroenergética, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.