

Variación del ángulo de disparo de un sistema senoidal para desarrollar un sistema eléctrico de ahorro de potencia

CABRERA-ORNELAS, Javier †, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma

Centro de Tecnológica Avanzada (CIATEQ), Universidad Autónoma del Estado de México

Recibido Recibido Julio 11, 2017; Aceptado Septiembre 5, 2017

Resumen

El ahorro de potencia juega un rol muy importante en cualquier empresa, donde en ocasiones existen motores de corriente alterna que no cuentan con un control de velocidad por lo que trabajan a la máxima potencia. En el mercado existe una gran cantidad de variadores de velocidad los cuales en su mayoría funcionan modificando la frecuencia de oscilación y con esto varían la energía suministrada al motor. Esto los hace muy confiables, pero representan costos adicionales para su diseño, programación e implementación. En este artículo se presenta un método para modificar la velocidad de un motor de corriente alterna, el cual consiste en usar el circuito RC para cortar la señal de alimentación senoidal a intervalos periódicos por medio de un triac y de esta forma obtener diferentes potencias de suministro del motor. Como se muestra en el contenido del trabajo el control es muy accesible, por lo que, también podría implementarse de forma sustentable en otros dispositivos que trabajen en corriente alterna como lo son luminarias o calentadores.

Sistema dinámico, circuito RC, Ahorro de energía

Abstract

The energy-saving is essential for corporations and consumer, in the industries there are electric motors without speed control with these motors rotating at nominal speed. In the market exists many efficient devices for the speed control, almost all change the frequency of the motor supply with electronic technology. There devices are reliable and effective, but to operate correctly these must be incurring additional costs in their design, programming and implementation. This article shows a method to modify the speed of an AC motor using the conventional RC circuit. The goal is to cut the sinusoidal supply in periodic times using a triac. The result is a simple control and costs less to operate. Due to the versatility of the control can be applied in others AC circuits like luminaires or heaters.

Dynamic system, RC circuit, Energy saving

Citación: CABRERA-ORNELAS, Javier, JUÁREZ-TOLEDO, Carlos y MARTÍNEZ-CARRILLO, Irma. Variación del ángulo de disparo de un sistema senoidal para desarrollar un sistema eléctrico de ahorro de potencia. Revista de Investigación y Desarrollo 2017, 3-9: 11-19.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El ahorro de energía es tema de interés actual en la mayoría de las empresas de cualquier giro (González, 2016). En este artículo se presenta una técnica con control de tensión alterna y que por su simplicidad no depende de la frecuencia.

El control propuesto, está basado en el suministro de corriente alterna mediante un corte periódico en la señal senoidal periódicamente, (Rashid, 2004). Para tal fin es necesario un dispositivo con suficiente velocidad de respuesta tal y como sería un triac.

Convencionalmente existen dos formas de controlar la velocidad en el motor de corriente alterna:

- Para una carga que presenta una característica par-velocidad, será posible controlar la velocidad ajustando la tensión del motor (Hart, 2001).
- Variando la frecuencia, debido a que el par producido por un motor de inducción es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada (Jamaica G, 2016). El inconveniente de esta técnica es que necesita de equipos costosos en su diseño y programación.

El modelo que se presenta en este trabajo para controlar la velocidad de un motor de inducción consiste en el análisis dinámico variante en el tiempo de un circuito RC, con lo que se modifica la compuerta de disparo de un dispositivo electrónico semiconductor (triac) mediante el comportamiento del voltaje de la resistencia del circuito RC, variando el valor energético suministrado al motor.

Existen métodos convencionales para el disparo del ángulo de los sistemas de control para dispositivos eléctricos, los atenuadores más utilizados son de luminosidad o el control de velocidad de los motores de inducción (Mosqueda V, 2016).

El avance significativo que han tenido los dispositivos semiconductores tanto en precio, rapidez, bajo consumo de energía y confiabilidad hacen que el control por medio del corte del ángulo de disparo sea una opción confiable y de bajo costo (Figuroa F, 2016).

Modelado dinámico de un sistema RC

Un sistema RC, como el que se muestra en la Fig. 1, está constituido de los siguientes componentes:

1. El conmutador tiene tres posiciones:
 - Posición S1 no hay carga del capacitor
 - Posición S2 carga al capacitor
 - Posición S3 descarga al capacitor
2. El circuito consta de un voltaje que carga a un capacitor,
3. El capacitor está conectado en serie con una resistencia.

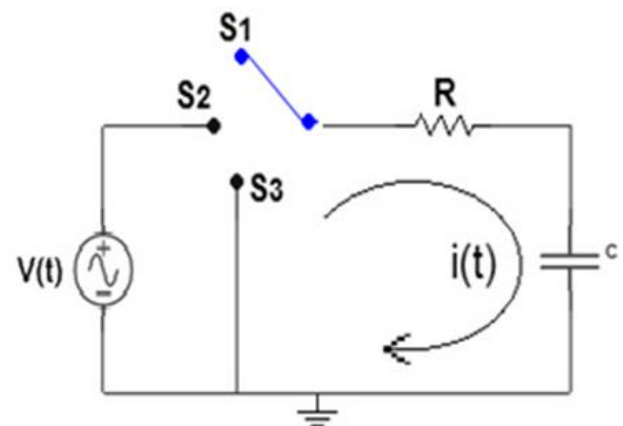


Figura 1 Circuito RC

Fuente: Elaboración propia

Los elementos que intervienen en el circuito RC, del sistema de estudio se presentan en la tabla 1.

Elemento	Símbolo	Unidades de medida
Generador de corriente alterna (Señal de entrada)		Volts (V)
Conmutador		Off-On
Resistencia		Ohms (Ω)
Capacitancia		Faradios (F)
Corriente	$i(t)$	Amperes (A)

Tabla 1 Elementos del sistema RC

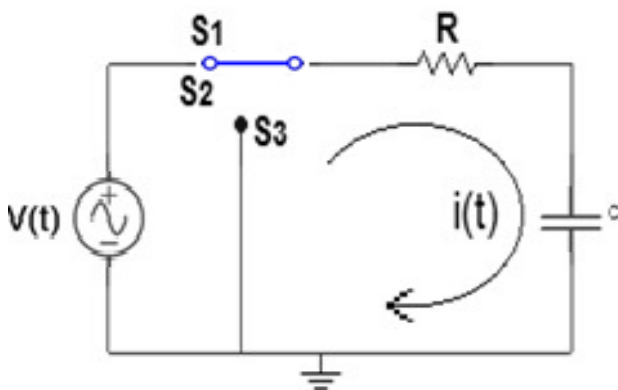
Fuente. Elaboración propia

El análisis del comportamiento dinámico del sistema de la Fig. 1, se visualiza desde dos casos (Muhammad H, 2004).

1. Cuando **S1** conmuta con **S2**, el capacitor se carga con respecto al generador de corriente alterna (Generador de C. A.).
2. Si **S1** conmuta con **S3**, entonces el capacitor entrega energía al sistema lo que propicia su descarga.

En este trabajo al análisis del sistema RC de estudio, se analizará desde el caso 1.

S1 conmuta con S2. Para fines de este estudio, considérese la Figura 2.

**Figura 2** S₁ conmuta con S₂.

Fuente: Elaboración propia.

Cuando S1 conmuta con S2 los elementos del circuito se alimentan de la fuente de voltaje $V(t)$, entonces el comportamiento dinámico del sistema es representado por (Ogata K, 2003):

$$V(t) = V_R + V_C \quad (1)$$

Donde V_R y V_C son el voltaje de la resistencia y del capacitor respectivamente y cuya correspondencia es de la forma:

$$V(t) = Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t)dt \quad (2)$$

A partir de la Ecuación (2) se requiere obtener un modelo analítico que permita conocer el comportamiento del sistema en el dominio del tiempo, por lo que se usará el método transformada de Laplace (Rosales J, 2011). Siendo $V(t)$ la señal de entrada e $i(t)$ la señal de salida del sistema de estudio y aplicando transformada de Laplace a la ecuación (2) resulta:

$$V(S) = RI(S) + \frac{1}{C} \left[\frac{I(S)}{S} - \int \frac{i(t)}{S} dt |_{t_0} \right] \quad (3)$$

De la Ecuación (3) con condiciones iniciales cero, entonces la función de transferencia (FT) que es el cociente de la señal de salida entre la señal de entrada (Martinez I, 2015) mediante:

$$\frac{I(S)}{V(S)} = \frac{1}{R} \frac{S}{S + \frac{1}{RC}} \quad (4)$$

La función de transferencia representada por la ecuación (4) contiene las siguientes características:

- Tiene un cero en $S=0$
- Un polo en $s = -\frac{1}{RC}$ con $RC > 0$

Por la ubicación del único polo en el plano complejo del sistema representado por la (FT) de la Ecuación (4) el circuito RC de estudio siempre será estable como se muestra en la figura 3.

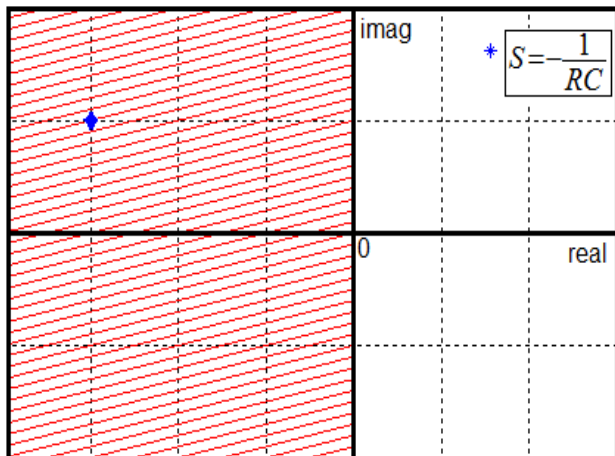


Figura 3 Ubicación del polo del sistema
Fuente: Elaboración propia.

Introduciendo una señal senoidal de entrada en la FT de la ecuación (4) de la forma:

$$V(t) = A \text{sen}(\omega t) \text{Volts} \tag{5}$$

Entonces, la ecuación (4) resulta:

$$I(S) = \frac{A}{R} \frac{S}{\left(S + \frac{1}{RC}\right)} \frac{\omega}{(S^2 + \omega^2)} \tag{6}$$

Donde A es el valor máximo de voltaje de la fuente de alimentación de ca. Aplicando transformada inversa de Laplace a la ecuación (6) se obtiene:

$$i(t) = \frac{AC\omega}{c^2R^2\omega^2+1} \left[-e^{-\frac{t}{CR}} + \cos(\omega t) + CR\omega \text{sen}(\omega t) \right] \text{ Amp} \tag{7}$$

A partir de la ecuación (7), se puede obtener fácilmente el efecto de voltaje de carga y descarga del capacitor y de la resistencia del sistema de estudio siendo:

$$V_C = \frac{1}{C} \int i(t) dt = \frac{AC}{c^2R^2\omega^2+c} \left[\text{sen}(\omega t) + CR\omega \left[e^{-\frac{t}{CR}} - \cos(\omega t) \right] \right] \tag{8}$$

$$V_R = Ri(t) = \frac{ACR\omega}{c^2R^2\omega^2+1} \left[-e^{-\frac{t}{CR}} + \cos(\omega t) + CR\omega \text{sen}(\omega t) \right] \tag{9}$$

Por lo tanto:

$$V(t) = A \text{sen}(\omega t) = V_C + V_R \tag{10}$$

Una vez conocido el comportamiento del sistema de estudio se colocará un sistema de apertura para un triac como a continuación se describe.

Circuito de control de compuerta triac

Para el sistema circuito RC que se muestra en la figura 2, se conecta un circuito de compuerta para un triac, como se ilustra en la figura 4.

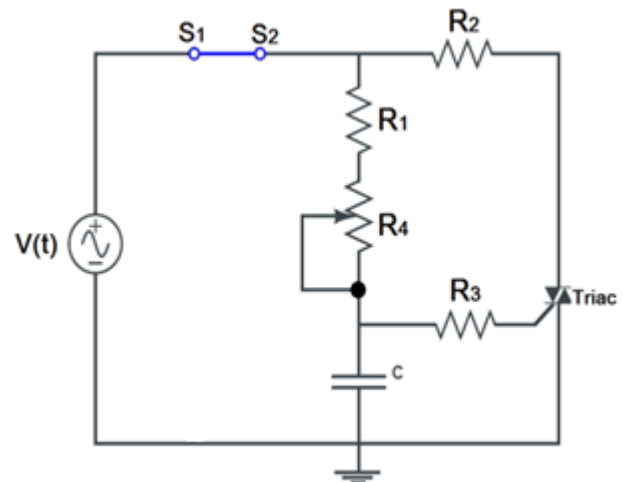


Figura 4 Sistema RC para el control de un triac
Fuente: Elaboración propia.

La función del triac por sus características bidireccionales, en su estado de conducción queda controlado por el potencial de disparo aplicado a la compuerta y la dirección de la corriente eléctrica queda determinada por la polaridad del potencial que recibe (Zetina, 2000).

Una corriente (I_G) se aplica a la compuerta del triac, la cual fluye a través de la unión entre la compuerta y la terminal MT1, la cantidad de corriente de compuerta para disparar un triac es una corriente establecida I_{GT}. Una vez que el triac se ha disparado, mientras que la corriente continúe su flujo a través de las terminales principales, de MT2 a MT1, el triac permanecerá encendido (San Miguel, 2014).

De acuerdo a la ecuación 10, el voltaje total de la fuente se divide en dos partes, una correspondiente al voltaje de la resistencia y la segunda al voltaje de carga o descarga del capacitor, es decir, el voltaje requerido para disparar el triac dependerá del voltaje de la resistencia (Choque S, 2014), siendo:

$$R = R_1 + R_4 \tag{11}$$

Donde, R_4 es una resistencia variable que tomará el valor ideal para disparar el triac para una señal senoidal donde ωt está en radianes, la frecuencia de onda f en Hz y el periodo T en segundos(s) determinados por la relación:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \tag{12}$$

Convencionalmente la frecuencia natural de la corriente alterna comercial es de $f=60\text{Hz}$ (Boylestand R, 2009).

Resultados: Sistema de disparo del triac mediante resistencias

Para la implementación del método propuesto se usó un circuito como el que se muestra en la figura 4, para accionar una carga en un tiempo establecido. La tabla 2 describe las características de los elementos del circuito de estudio.

Parámetro	Valor
R3	100.0Ω
R4	1 a 500.0Ω
C	0.01μF
V(t)	120Vrms, 60Hz. 0°
Triac	2N6073 VGT: 2.5 máx. IGT: 30mA.

Tabla 2 Características del circuito de estudio

Fuente: Elaboración propia

En la figura 5 se muestra el diagrama del sistema de potencia de estudio.

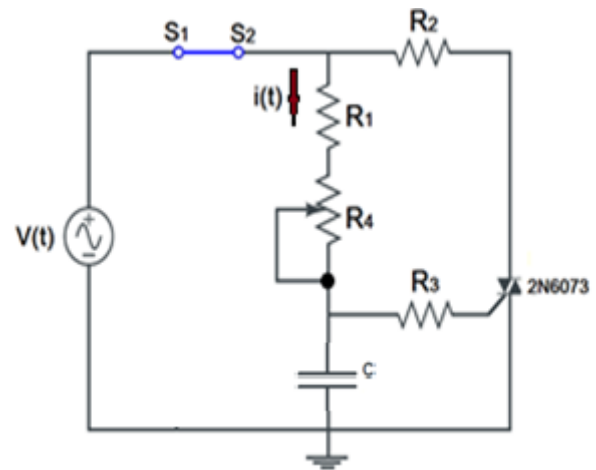


Figura 5 Circuito Electrónico de estudio

Fuente: Elaboración propia

El objetivo se centra en obtener el valor requerido de la resistencia variable para disparar el triac en una constante de tiempo determinada por la ecuación (7) siendo:

$$(R_1 + R_4)C \tag{13}$$

Convencionalmente la sincronización con un dispositivo de arranque triac se da través de las siguiente hipótesis: para un rango de 1 – 30ms. Suponiendo un rango de ajuste de 2×10^{-3} a 25×10^{-3} ms (Timothy J, 2006), la constante de tiempo mínima ocurre cuando R_4 está ajustada hacia un extremo, siendo:

$$(R_1 + 0)0.01 \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-3} \\ R_1 = 200k\Omega \tag{14}$$

El valor estándar de R_1 ocurre en 180 kΩ. La constante de tiempo máxima sucede cuando R_1 está completamente ajustado hacia el otro extremo, es decir:

$$(R_4 + 180 \times 10^3)0.01 \times 10^{-6} = 25 \times 10^{-3} \\ R_4 = 2320k\Omega \tag{15}$$

El valor más cercano estándar para R_4 es de 2200kΩ. Usando como referencia los valores obtenidos en las ec (14) y (15) se obtiene la gráfica de la figura 6.

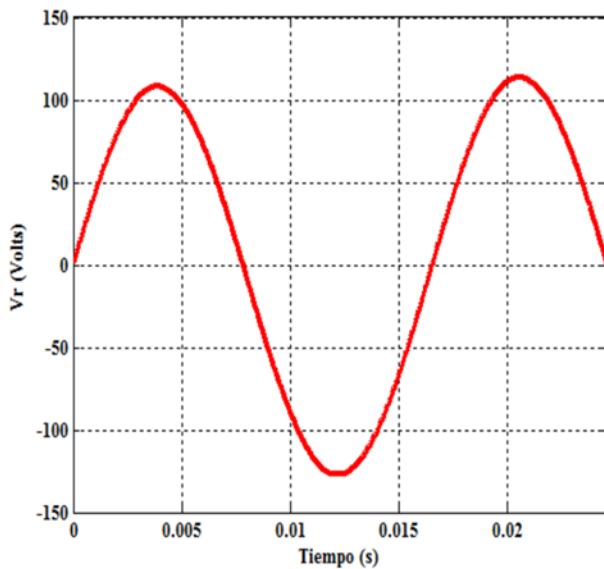


Figura 6 Voltaje de disparo para valores numéricos obtenidos en las ec (14) y (15)
Fuente: Elaboración propia.

Los valores propuestos por el método convencional produce un voltaje fuera del rango requerido para un ángulo eléctrico de 90° , por lo que se procederá a la selección de los valores de la resistencias considerando valores estándar comerciales de la tabla 3.

Parámetro	Valor
R1	1.0kΩ
R4	1.0kΩ
	3.3 kΩ
	3.9 kΩ
	4.7 k

Tabla 3 Valores de R1 y R4
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los valores de la tabla 2 y la tabla 3, sustituyendo en la ecuación (9) de la resistencia, dado que si el voltaje alcanza 2.5 volts a un ángulo eléctrico de 90° , se disparará el triac, como se muestra en la figura 7.

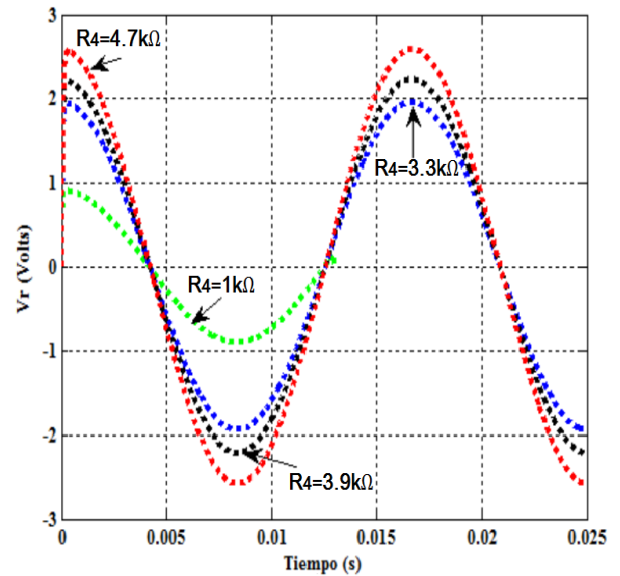


Figura 7 Vr para diferentes valores de R4
Fuente: Elaboración propia.

Sustituyendo los valores de R_4 en la función de transferencia de la ecuación 4, se mapean los polos en el plano complejo como se ilustra en la figura 8.

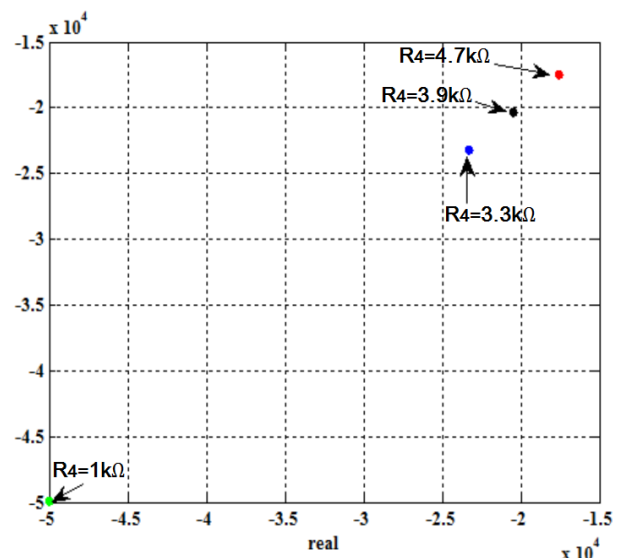


Figura 8 Ubicación de los polos en el plano complejo
Fuente: Elaboración propia

La gráfica de la figura 7, muestra el valor aproximado que debe tener la resistencia variable para disparar el triac dentro de los parámetros requeridos, siendo los valores seleccionados de R_4 de 3.3kΩ o 4.7kΩ.

La gráfica de la figura 9, muestra una ventana más amplia del voltaje de las resistencias en serie con respecto al voltaje requerido para disparar el triac.

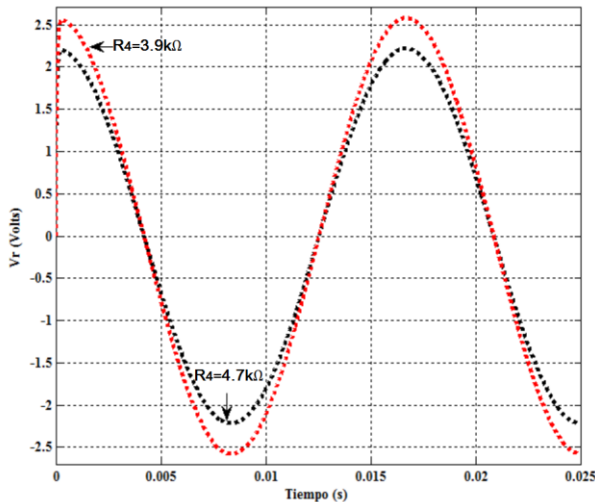


Figura 9 Valores de las resistencias variables seleccionados
Fuente: Elaboración propia.

La gráfica de la figura 9, muestra que la resistencia variable ideal está dentro de los valores estándar de $4.7k\Omega$. Identificada la resistencia variable de interés, se grafica individualmente como se muestra en la figura 10 para comprobar las características de disparo del triac.

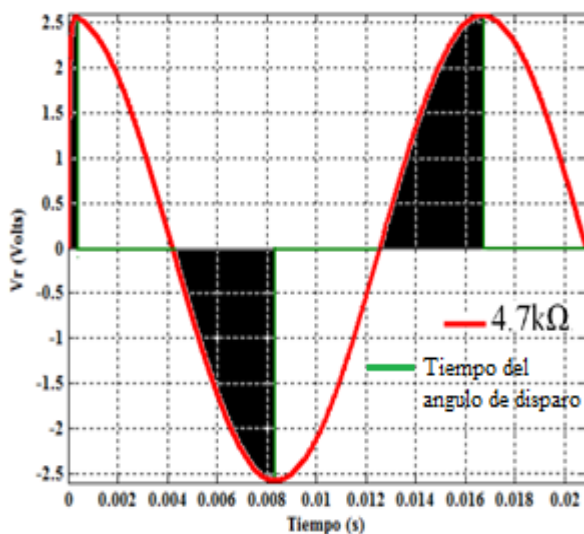


Figura 10 Características de disparo para $R4$ seleccionada
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 10, se visualiza que el sistema de disparo fue inmediato para $t = 0.345ms$ permitiendo una acción rápida al sistema de control de potencia de estudio lo que permite tener un ahorro de potencia por tiempo de disparo del triac, en el anexo se muestran diferentes pruebas de laboratorio para el sistema de estudio.

Conclusiones

En este trabajo se propone una metodología para obtener los valores de las resistencias adecuadas para disparar un sistema de potencia triac, mediante las ecuaciones analíticas del voltaje y corriente de la resistencia de un circuito RC. En trabajos futuros se pretende obtener el valor instantáneo del gasto energético usando integral numérica, la cual se generará por la apertura y cierre del triac de la figura 10 y conocer a detalle el consumo y ahorro relativo en porcentaje de energía del sistema de estudio.

Anexos

En las pruebas de laboratorio se puede observar la variación del ángulo de disparo para tres valores distintos de la resistencia R del circuito de control RC.

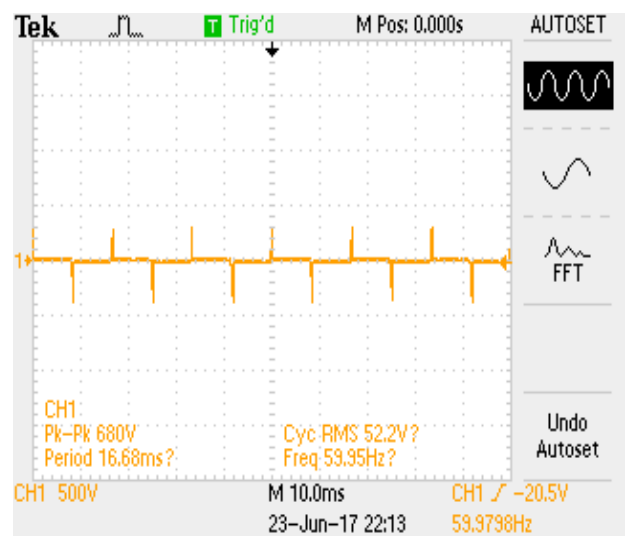


Figura 11 Ángulo de disparo a 10 grados eléctricos
Fuente: Elaboración propia

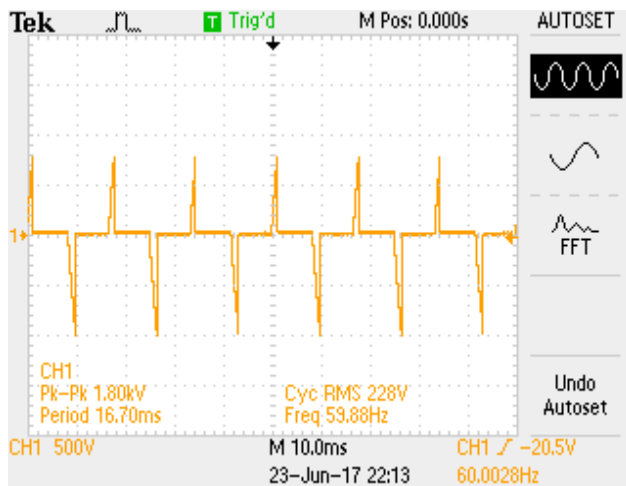


Figura 12 Angulo de disparo a 20 grados eléctricos
Fuente: Elaboración propia.

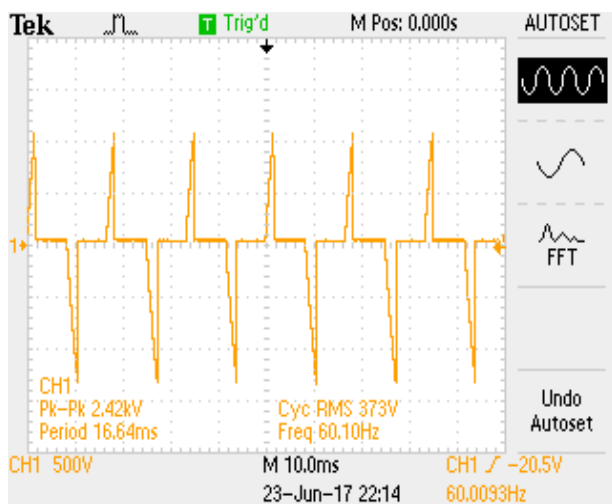


Figura 13 Angulo de disparo a 30 grados eléctricos
Fuente: Elaboración Propia.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CIATEQ por el apoyo institucional así como a la Universidad Autónoma del estado de México por el apoyo de sus laboratorios para las pruebas necesarias para la realización de esta investigación.

Referencias

Boylestand, R. L. y Nashelsky, L. (2009). "Electronic Devices and Circuit Theory". USA. Pearson/Prentice Hall. ISBN 0135026490. pp. 31.

Choque Santos Garrón Danny, Zárata Víctor y Colque Juan, Sistema automatizado para el control de iluminación eléctrica de un campo deportivo. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2014.1-1: 66-72

Daniel W. Hart. (2001). Electrónica de potencia. Madrid: Pearson Educación.

Figueroa Fernando, García José Miguel, Torres Jacinto y Zúñiga Mónica E. Análisis de dos tipos de mediciones de Descargas Parciales utilizando el método estadístico. Revista de Sistemas Experimentales. 2016, 3-7: 1-9.

González Ramos Alma Delia, Hidalgo Baeza María del Carmen, Rojas Silva Eduardo, Gómez Nungaray Mónica Alejandra, Control y monitoreo de riego mediante el uso de dispositivos móviles. Revista de Tecnología e Innovación 2016, 3-6: 13-17.

Jamaica González Alejandro, Ortega Zertuche J. Gerardo, Guerreo Ordaz Salvador, Conde Salinas David, Sensores de corriente aplicados al ahorro de energía en iluminación. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2015, 2-5: 224-229.

J. Juan Rosales García, Manuel Guía Calderón. (2011). Ecuaciones Diferenciales Ordinarias. México; Universidad de Guanajuato.

Mosqueda Valadez Armando, Jurado Pérez, Fernando, Lozano Luna A, Análisis del corto circuito en instalaciones eléctricas industriales trifásicas mediante la Normativa IEC-NOM. Revista de Energía Química y Física. 2016, 3-7: 1-8.

Muhammad H. Rashid. (2004) *Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. México: Pearson Educación.

Muhammad H. Rashid, *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*, Pearson Educación, 2004, ISBN: 9702605326.

Martínez, I., Juárez, C., (2015). "Modelado de un Sistema Máquina Bus Infinito Usando Transformada de Laplace". *Pistas educativas*, ISSN 1465-1249.

Martínez, I., Juárez, C., (2015). "Modelado de un Sistema Máquina Bus Infinito Usando Transformada de Laplace". *Pistas educativas*, ISSN 1465-1249.

Ogata, K. (2003). "Ingeniería de Control Moderno". Madrid. 4ta edición. Prentice Hall. ISBN 0-13-060907-2.

Pablo Alcalde San Miguel, *Electrónica*, Ediciones Paraninfo, S.A., 2014, ISBN: 842839878X, 9788428398787, pág. 268.

Zetina, *Electrónica básica*, Editorial Limusa, 2000, ISBN: 9681857909, 9789681857905, pág. 57.