

Diseño y validación de circuito digital para control de velocidad por ángulo de disparo en motores de CA

Fabián H. Alvarez ^{a*}, Felipe S. Alegre Chamorro ^a, Juan P. Gross ^b, Guillermo A. Fernández ^b

^a *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

^b *GID-IE, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.*

Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina

fabianhalvarez99@gmail.com, felpasach@gmail.com, gross@fio.unam.edu.ar, fernandez@fio.unam.edu.ar

Resumen

Actualmente los circuitos digitales constituyen un área fundamental de la Ingeniería Electrónica. El desarrollo del conocimiento acerca de los mismos, es el objeto de estudio en la asignatura Técnicas Digitales 1 de la carrera Ingeniería Electrónica. El presente trabajo constituye una de las actividades integradoras realizada en la asignatura, con el objetivo de articular los saberes propios de la misma junto a los de otras asignaturas anteriores de la carrera. La actividad es planteada bajo la problemática del control de velocidad de un motor de corriente alterna, solicitándose el diseño de un circuito digital que implementa la técnica de variación de ángulo de disparo utilizando triacs. Como resultado de la actividad integradora, este trabajo presenta dos soluciones alternativas al circuito digital solicitado, seleccionándose una de ellas como mejor opción para su implementación práctica tras un análisis de pros y contras. Seguidamente se exponen los cálculos y consideraciones de diseño adoptados. Finalmente, se muestra el circuito y los resultados de simulación, observándose su correcto funcionamiento y el cumplimiento de los requerimientos solicitados en la actividad. De esta manera, los estudiantes han podido desarrollar competencias vinculadas al diseño de circuitos electrónicos digitales como solución a problemáticas reales, necesarias en la formación de los futuros Ingenieros Electrónicos.

Palabras Clave – *Ángulo de disparo, Circuitos digitales, Motores, Tiristores, Triacs.*

1. Introducción

El presente trabajo fue realizado en el marco de la asignatura Técnicas Digitales 1, correspondiente al cuarto año de la carrera Ingeniería Electrónica. Esta asignatura se centra en el estudio de los circuitos digitales que emplean lógica combinacional y/o secuencial. El trabajo desarrollado corresponde a una actividad de carácter integradora que tiene por objetivos la articulación de saberes y la acreditación de competencias vinculadas al diseño de circuitos electrónicos digitales. Esta actividad es realizada cerca de la finalización del cursado de la asignatura, a modo que en su desarrollo puedan utilizarse los saberes proporcionados en el dictado de las temáticas correspondientes a circuitos digitales combinatoriales y secuenciales. En base a lo anterior, seguidamente se describe la actividad integradora realizada, como así también la organización del presente trabajo.

Los motores de corriente alterna, tanto trifásicos como monofásicos, están presentes en diversas aplicaciones ya sean industriales, como en cintas transportadoras o sierras circulares, o bien en aplicaciones domésticas, como ser en licuadoras o ventiladores. La variedad de usos de los motores de CA en ciertos casos implica la necesidad de controlar la velocidad de los mismos. Existen diferentes técnicas de control de velocidad para motores de inducción, incluyendo técnicas de modulación de ancho de pulso (PWM), cicloconvertidores y gobierno por tiristores [1]. En este último caso, la técnica más común es la de control de potencia por ángulo de disparo, donde una llave semiconductor denominada triac se mantiene en estado off, bloqueando el flujo de corriente a través de la carga (motor de CA por ejemplo), hasta que el circuito de control le entrega un pulso de disparo con el cual esta llave entra en estado de conducción permitiendo el paso de corriente hacia la carga. Como resultado de esto, en cada semiciclo de la tensión de red, la carga recibe una tensión recortada por el retardo en la conducción del triac. Este retardo ocasionado por el circuito de control es denominado ángulo de disparo [2]. La Fig. 1 ilustra la forma de la tensión aplicada a la carga y muestra los términos comunes utilizados para describir la operación de control de potencia con triacs.

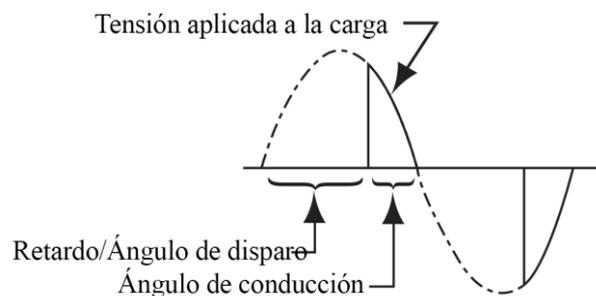


Fig. 1. Onda senoidal mostrando los principios del control de potencia por ángulo de disparo.

En la propuesta del trabajo integrador se solicita el diseño de un circuito digital que permita variar la velocidad de un motor monofásico de un ventilador, utilizando la técnica de control de potencia por variación de ángulo de disparo de un triac. El circuito debe ser capaz de variar la velocidad entre tres valores diferentes y un estado de parada, para lo cual debe disponer de un único pulsador comandado por el usuario del circuito. Cada una de las velocidades debe disponer de un LED que

indique el estado correspondiente. El circuito diseñado también debe incluir la fuente de alimentación a partir de la red eléctrica monofásica.

Como solución a la problemática planteada, para realizar el control de potencia por ángulo de disparo se proponen dos circuitos. El primero de ellos se basa en que la modificación del retardo para el disparo del triac es realizado mediante la reconfiguración de un temporizador. Mientras que el segundo circuito, centra su funcionamiento en que la modificación de dicho retardo es implementada seleccionando un determinado pulso de una onda cuadrada con frecuencia variable.

A continuación, se presentan los circuitos propuestos, explicando su funcionamiento a través de diagramas de bloques, como así también la selección de una de las propuestas. Luego están expresados los cálculos correspondientes a cada etapa del circuito seleccionado y finalmente se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones del mismo y las conclusiones pertinentes.

2. Soluciones propuestas

Para dar solución a lo demandado en la actividad integradora, seguidamente se describe el funcionamiento de los circuitos digitales propuestos para realizar la variación de velocidad de un motor monofásico, mediante el control del ángulo de disparo de un triac que actúa como llave electrónica en serie con dicho motor.

2.1. Circuito digital para variación de velocidad por control de ángulo de disparo mediante reconfiguración del temporizador (CAD-RT)

La Fig. 1 representa el circuito digital para el control de potencia por ángulo de disparo mediante la reconfiguración del temporizador. El circuito presenta una interfaz de usuario que consta de un pulsador empleado para variar la velocidad del motor y un indicador luminoso de velocidad. El accionamiento del pulsador genera pulsos que ingresan a un contador (con salida decodificada), el cual incrementa su cuenta (de 0 a 3) con cada pulso de entrada. Cada estado de cuenta enciende su respectivo LED en el indicador de velocidad de la interfaz de usuario y también modifica el ancho de pulso del multivibrador monoestable del temporizador, responsable de generar el retardo en el disparo del triac que actúa sobre el motor. El inicio del retardo se sincroniza con la onda de tensión de la red eléctrica, mediante el detector de cruce por cero mostrado en la Fig. 2. Para esto, el detector utiliza como señal de referencia la tensión de salida del transformador que posee la fuente de alimentación del circuito. Cabe mencionar que el temporizador indicado en la Fig. 1, está constituido por dos multivibradores monoestables en cascada, uno para producir el retardo mencionado y el otro para generar el pulso de disparo del triac.

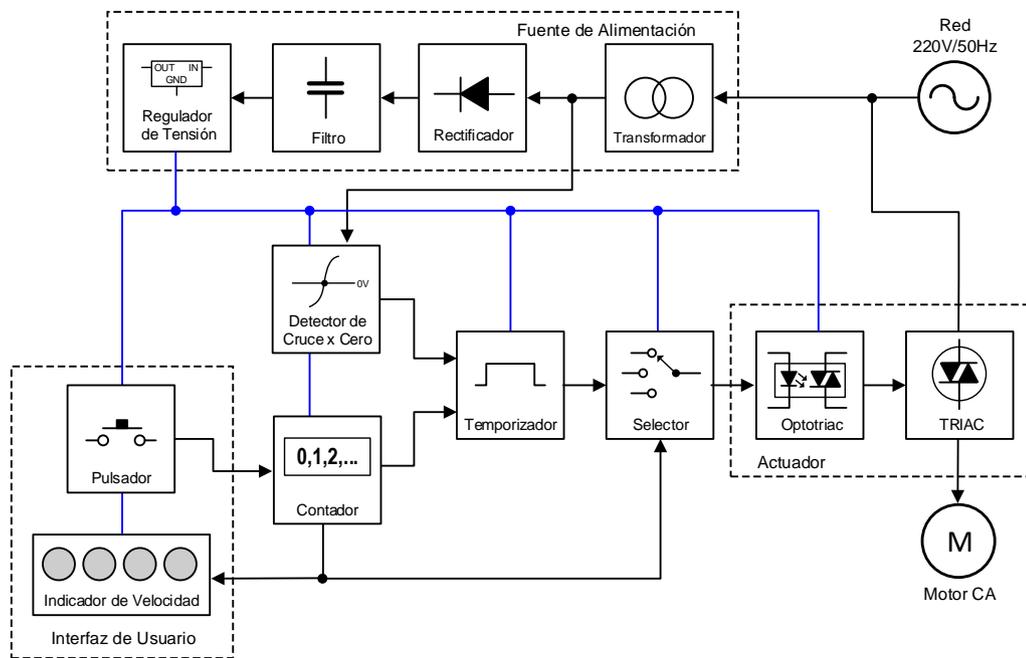


Fig. 2. Diagrama de bloques del circuito para variación de velocidad con CAD-RT.

El selector de la Fig. 2 es una etapa del circuito compuesta de llaves electrónicas y compuertas lógicas. Esta etapa recibe el pulso de disparo desde el temporizador y a partir del estado de cuenta proporcionado por el contador, selecciona el estado off o bien un resistor diferente para la base de tiempo RC sobre la cual funciona el multivibrador monoestable encargado de generar el retardo en el temporizador. De esta forma, con cada vez que el usuario acciona el pulsador, puede seleccionar el ángulo de disparo para el triac entre 0° , 60° , 120° o bien el estado *off* en el cual no se efectúa ningún pulso de disparo. Esto se manifiesta en el motor con velocidad máxima, media, mínima o directamente apagado.

En la Fig. 2, la señal conformada por el retardo y el pulso de disparo que entrega el selector, ingresa al actuador constituido por el triac que acciona el motor y un optotriac que hace de interfaz entre el circuito digital y dicho dispositivo. El optotriac aísla eléctricamente al circuito digital de la etapa de potencia, proporcionando la protección del circuito ante eventuales fallas en la etapa mencionada.

2.2. Circuito digital para variación de velocidad por control de ángulo de disparo mediante selección de onda cuadrada (CAD-SO)

El diagrama de la Fig. 3 representa el circuito correspondiente a la segunda alternativa propuesta para la implementación de la variación de velocidad del motor de CA, mediante el control del ángulo de disparo del triac. En esta propuesta, la interfaz de usuario es idéntica a la del circuito anterior. El detector de cruce por cero utilizado en este circuito, toma como referencia a la tensión de salida del transformador para sincronizar, tanto al generador de onda cuadrada como a un contador que es parte del selector de velocidades. El generador produce una onda cuadrada de 1 kHz de forma tal que, al sincronizarse con la senoidal de 50 Hz del transformador, se producen 10 pulsos en cada semiciclo

de la tensión de CA. En el selector de velocidad, el contador decimal que recibe la onda cuadrada como señal de reloj pone en alto una de sus salidas a la vez, individualizando cada uno de los 10 pulsos descritos anteriormente. Los pulsos 0, 4 y 7 ingresan al multiplexor, el cual escoge entre uno de ellos o bien una entrada fijada en estado bajo, para así seleccionar entre ángulos de disparo de 0°, 60°, 120° o bien el estado apagado respectivamente. La selección se realiza en función de la salida del contador que es incrementado por el pulsador de la interfaz de usuario.

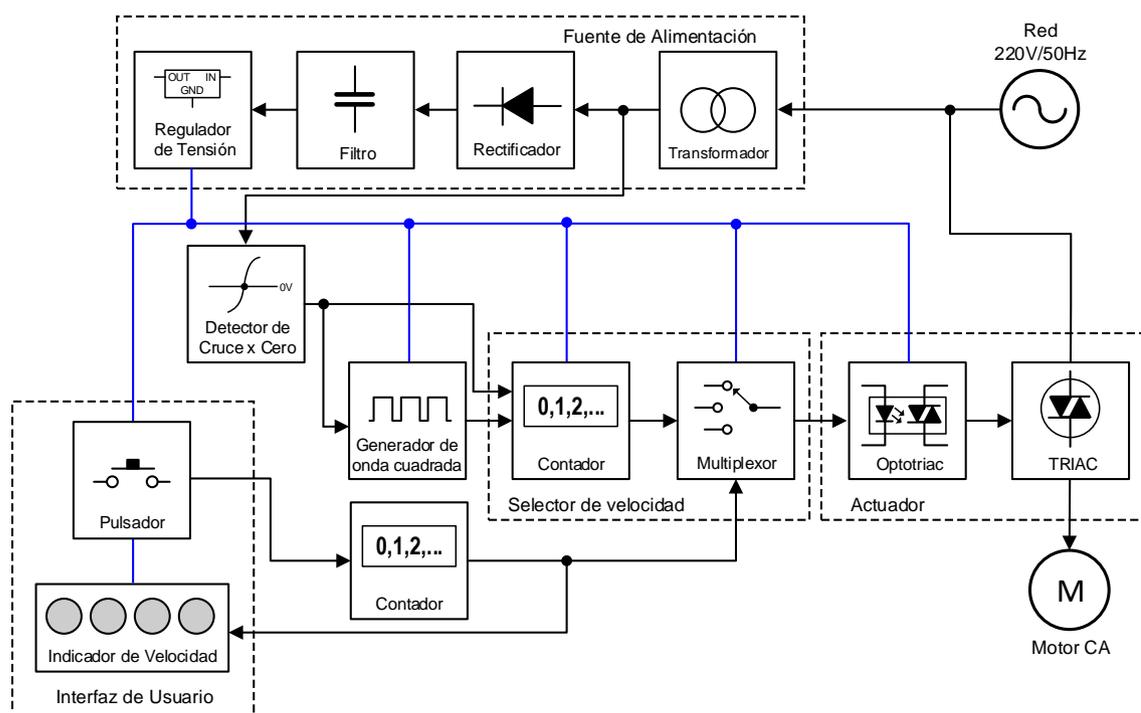


Fig. 3. Diagrama de bloques del circuito para variación de velocidad con CAD-SO.

Al igual que en el circuito de la propuesta anterior, en este caso la salida del selector de velocidad ingresa al actuador, para activar la compuerta del triac mediante un optotriac. De esta forma, el circuito digital controla el ángulo de disparo del triac mediante una interfaz que aísla eléctricamente a dicho circuito de la etapa de potencia con los beneficios ya mencionados.

2.3. Selección de la propuesta

La selección del mejor circuito para la implementación práctica, se basa en la comparación de sus prestaciones en relación a la aplicación para la que fueron diseñados, la precisión del ángulo de disparo y el costo de los componentes utilizados.

En el primer circuito propuesto (CAD-RT), se destaca la capacidad de programar en forma más precisa los ángulos de disparo a seleccionarse en la variación de la velocidad del motor. Para esto se puede utilizar presets en la red RC del circuito integrado NE555 utilizado en el temporizador para proporcionar el retardo en el disparo del triac. La programación mencionada no implica que el usuario sea capaz de modificar el ángulo de disparo a través de los presets, sino que, durante la etapa de

calibración del circuito, el ingeniero a cargo del diseño pueda ajustar los ángulos al motor de CA utilizado. El circuito B es limitado en este sentido, ya que el tiempo de retardo de disparo es un múltiplo del periodo de la señal fija de 1 kHz que proporciona circuito integrado NE555 utilizado en el generador de onda cuadrada.

Los presupuestos obtenidos para ambas propuestas, fueron aproximadamente iguales para la producción unitaria de cada circuito. Por lo que el costo no resulta un factor determinante en la elección de la mejor opción para la implementación práctica.

Otro criterio de selección es la simplicidad del circuito en cuanto a la cantidad de componentes y conexiones. En este aspecto tampoco se observan grandes diferencias entre ambos circuitos propuestos, siendo ligeramente menor la cantidad de componentes utilizados en la segunda propuesta.

Por lo tanto, si bien la operación y los costos de ambas soluciones propuestas son muy similares, el primer circuito presenta mejores prestaciones en relación la mayor precisión en la calibración los ángulos de disparo del triac. Por lo cual, esto junto a la simplicidad de su principio de funcionamiento, determinan la selección de dicho circuito como mejor opción para implementar en forma práctica la técnica de variación de velocidad mediante control de potencia por ángulo según las especificaciones solicitadas en la actividad integradora.

3. Diseño del circuito

En los siguientes párrafos se desarrolla el diseño de las distintas partes del circuito digital para variación de velocidad por control de potencia por ángulo de disparo implementado mediante reconfiguración del temporizador (CAD-RT).

3.1. Diseño de la etapa de potencia y la interfaz de usuario

El triac es la llave electrónica que permite recortar la tensión aplicada al motor de CA con determinado ángulo de disparo, para controlar la potencia del motor y así la velocidad del mismo. Para interconectar el circuito digital de control con la etapa de potencia, teniendo una aislación eléctrica entre ambas partes, se utiliza el optotriac MOC3021 como lo muestra el circuito de la Fig. 4. La configuración indicada es sugerida en la hoja de datos de este dispositivo [3].

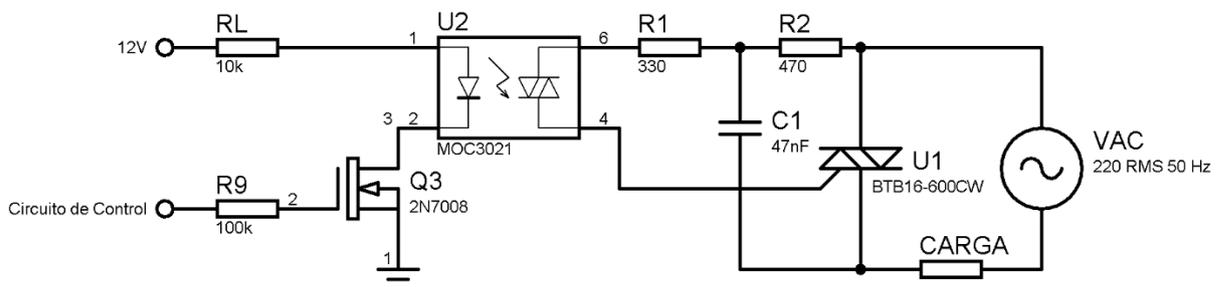


Fig. 4. Esquema propuesto para el acoplamiento de potencia.

Para garantizar que el optotriac encienda al triac de manera correcta se considera 1 ms como el tiempo de duración del pulso de disparo para este último. Para la corriente de entrada al optotriac I_F se consideran 15mA como suficiente para garantizar el funcionamiento de dicho dispositivo. El dimensionamiento de la resistencia limitadora de la corriente de entrada al optotriac R_{in} , se efectúa a través de las ecuaciones (1) y (2). A partir de las mismas se obtiene $R_{in} = 560\Omega / 0,25W$.

$$R_{in} = \frac{V_{CC} - V_F - V_{DS}}{I_F} \quad (1)$$

$$P_d = \frac{(V_{CC} - V_F - V_{DS})^2}{R_{in}} \quad (2)$$

Si bien las características eléctricas del triac utilizado para accionar el motor de CA dependen de la potencia de este último [4], debido a las limitaciones en componentes que presenta el simulador utilizado (Proteus), en el circuito de la Fig. 3 se adopta el dispositivo BTB16-600CW. Este triac es del tipo snubberless, es decir no requiere la red RC de protección típica entre sus ánodos para el manejo de cargas inductivas [5] [6].

El circuito de indicación de la Fig. 5, que es parte de la interfaz de usuario, se compone de cuatro LEDs comandados mediante transistores MOSFET. Cada uno de estos LEDs es encendido para indicar el estado del motor (velocidades y detenido), cuando la correspondiente salida del circuito integrado CD4017 (Q_0 , Q_1 , Q_2 y Q_3) que es utilizado en la etapa contador, pasa a un estado alto.

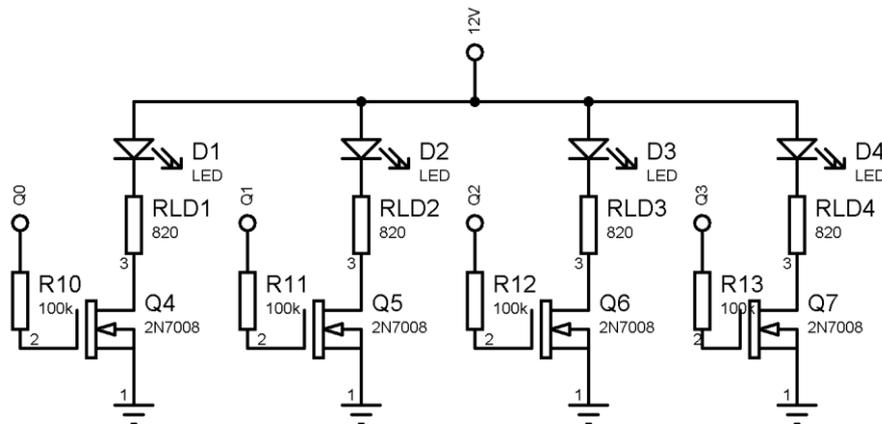


Fig. 5. Circuito de indicación.

La corriente que circula por cada LED de la Fig. 5 es limitada por una resistencia, la cual es calculada a través de (3) y (4),

$$R_{LED} = \frac{V_{CC} - V_{LED} - V_{DS}}{I_{LED}} \quad (3)$$

$$P_d = \frac{(V_{CC} - V_{LED} - V_{DS})^2}{R_{LED}} \quad (4)$$

donde V_{CC} es la tensión de alimentación de 12 V proporcionada por la fuente de alimentación, V_{LED} es la caída de tensión en directa del LED y V_{DS} es la caída de tensión entre drenador y surtidor del transistor 2N7008 empleado [7]. A partir de (3) y (4) para cada LED se obtiene $R_{LED} = 820\Omega / 0,25W$.

La interfaz de usuario mostrada en la Fig. 2 también posee el pulsador. Esta parte del circuito es la que permite al usuario cambiar el estado del motor (velocidades y detenido). Como se puede apreciar en la Fig. 8, esta etapa consiste en un pulsador normalmente abierto conectado a un circuito antirrebote construido a partir de una compuerta NAND con entrada Schmitt trigger y una red RC.

3.2. Diseño de la fuente de alimentación

El circuito de la fuente de alimentación permite que el circuito digital diseñado se energice mediante la tensión de red monofásica. Para reducir el nivel de tensión de la red, se utiliza un transformador reductor de 220/12 V cuya tensión de salida es rectificadora a través de un puente de diodos. Esta tensión de CC es filtrada mediante un capacitor electrolítico, el cual reduce significativamente la componente de alterna que posee la tensión obtenida en el rectificador. Para mejorar la calidad de la tensión entregada por la fuente de alimentación al circuito digital, se utiliza un regulador MC7812 [8], que garantiza un nivel de tensión de 12V más estable ante variaciones de corriente de carga y/o variaciones en la salida del transformador. El diagrama de la fuente de alimentación se presenta en la Fig. 6.

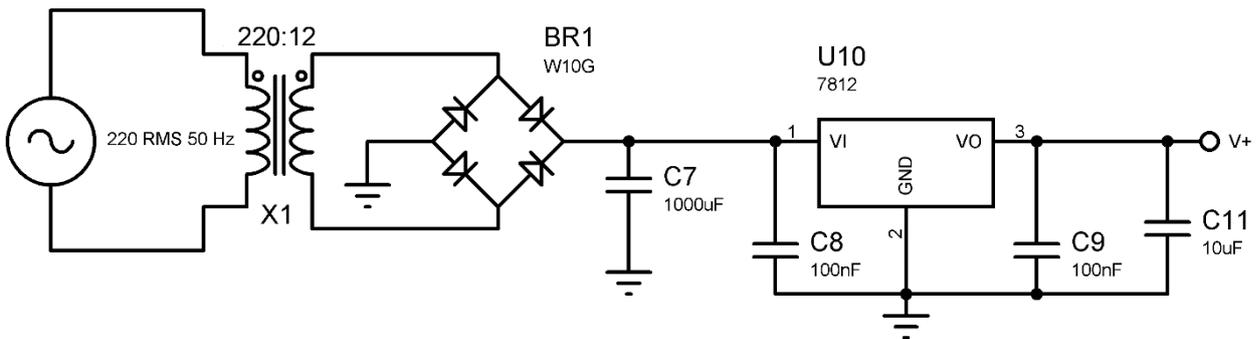


Fig. 6. Circuito de la fuente de alimentación.

La máxima corriente I_{CC} consumida por el circuito digital de control es calculada a partir de (5)

$$I_{CC} = I_{RT} + I_{Q2} + I_F + I_{RPU1} + I_{RPU2} + 2 \cdot I_{DD555} + I_{LED} + I_{4017} + I_{4066} + I_{4093} \quad (5)$$

donde I_{RT} es la máxima corriente transitoria establecida a través de la red RC del temporizador; I_{Q2} es la corriente principal del transistor Q2 como inversor; I_F es la corriente del optoacoplador; I_{RPU1} e I_{RPU2} son las corrientes que circulan a través de las resistencias de pull-up en el detector de cruce por cero y del pulsador de entrada respectivamente; I_{DD555} es la corriente consumida por el multivibrador NE555; I_{LED} se trata de la corriente de un LED del circuito de indicación; mientras que I_{4017} , I_{4066} , I_{4093} son las corrientes consumidas por los circuitos integrados CD4017, CD4066 y CD4093.

La corriente obtenida con (5), junto al voltaje de ripple V_{ripple} determinado mediante las ecuaciones (6) y (7), siendo V_{med} la tensión media a la salida del filtro de la fuente, permiten dimensionar el capacitor C utilizado en el filtro de la fuente de alimentación. El valor de este componente se halla con la ecuación (8), mientras que su tensión de trabajo V_{cap} es calculada con (9) donde V_p es la tensión de pico a la salida del transformador y V_D la caída de tensión en directa de los diodos rectificadores.

$$F_r = \frac{V_{ripple}}{V_{med}} \quad (6)$$

$$V_{med} = (V_p - 2 \cdot V_D) - \sqrt{2} \cdot V_{ripple} \quad (7)$$

$$C = \frac{I_{CC}}{2\sqrt{2} \cdot f \cdot V_{ripple}} \quad (8)$$

$$V_{cap} = 1,5 \cdot (V_p - 2 \cdot V_D) \quad (9)$$

A partir de las ecuaciones anteriores, considerando un factor de ripple Fr del 5%, para el capacitor electrolítico del filtro de la fuente de alimentación se obtiene un valor de 1000 $\mu F/25V$.

3.3. *Diseño del detector de cruce por cero y del temporizador*

El detector de cruce por cero se trata de un circuito comparador de tensión implementado con el integrado LM393. La entrada no inversora de dicho comparador, recibe una muestra de la tensión de red rectificada con un puente de diodos, mientras que la entrada inversora se conecta a la masa del circuito. La muestra de la tensión de red corresponde a la tensión de salida del transformador que posee la fuente de alimentación. Para evitar que picos de tensión puedan dañar al comparador, como se muestra en la Fig. 7, la tensión de salida del rectificador es reducida a la mitad mediante un divisor de tensión resistivo. Como la corriente de entrada al LM393 no supera los 50 nA [9], se considera despreciable para el cálculo del divisor resistivo, considerándose para el mismo dos resistencias de 1k $\Omega/0,25W$. La resistencia de pull-up requerida a la salida del comparador de tensión, es calculada mediante la ecuación (10), tomando como referencia la corriente de salida I_{OL} del LM393 [9]. Con esto se obtiene un valor de 10k $\Omega/0,25W$ para la resistencia de pull up mencionada.

$$R_{pu} \geq \frac{V_{cc}}{I_{OL}} \quad (10)$$

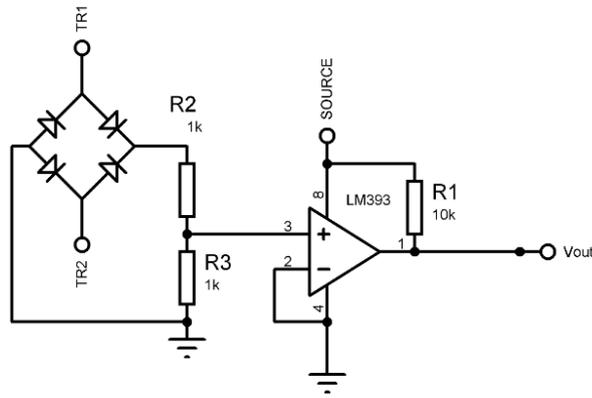


Fig. 7. Detector de cruce por cero.

Considerando que 180° equivalen a los 10 ms de un semiciclo de la tensión de red, a partir de (11) y con los ángulos de disparo deseados ($\alpha_{d1} = 60^\circ$ y $\alpha_{d2} = 120^\circ$), se obtienen los tiempos de retardo que deben transcurrir entre la detección del cruce por cero de la tensión de red y el pulso de disparo del triac. Los tiempos correspondientes son $t_{d1} = 3,33$ ms y $t_{d2} = 6,67$ ms respectivamente. La implementación de los retardos anteriores, es efectuada a través del circuito integrado NE555 en configuración monoestable [10] [11]. La ecuación (12) permite obtener los valores de los componentes para conseguir los retardos t_{d1} y t_{d2} con el monoestable mencionado, dando: $C=100$ nF, $R_{t1}=30303 \Omega$ y $R_{t2}=60606 \Omega$ (los valores de los resistores se obtienen mediante presets).

$$t_d = t_{sm} \cdot \frac{\alpha_d}{180^\circ} \quad (11)$$

$$T \approx 1.1 \cdot R_t \cdot C \quad (12)$$

Para seleccionar los resistores que permiten obtener los retardos reconfigurar t_{d1} y t_{d2} , el circuito selector de la Fig. 2 utiliza llaves electrónicas tipo CD4066, las cuales poseen resistencia interna prácticamente despreciables para la corriente que deben manejar [12].

4. Resultados

En la Fig. 8 se muestra el esquema completo del circuito diseñado. El mismo fue simulado en el software Proteus 8, analizando la forma de onda de la tensión aplicada a la carga, mediante la herramienta de osciloscopio que posee dicho software. Los resultados de la simulación pueden apreciarse en la Fig. 9.

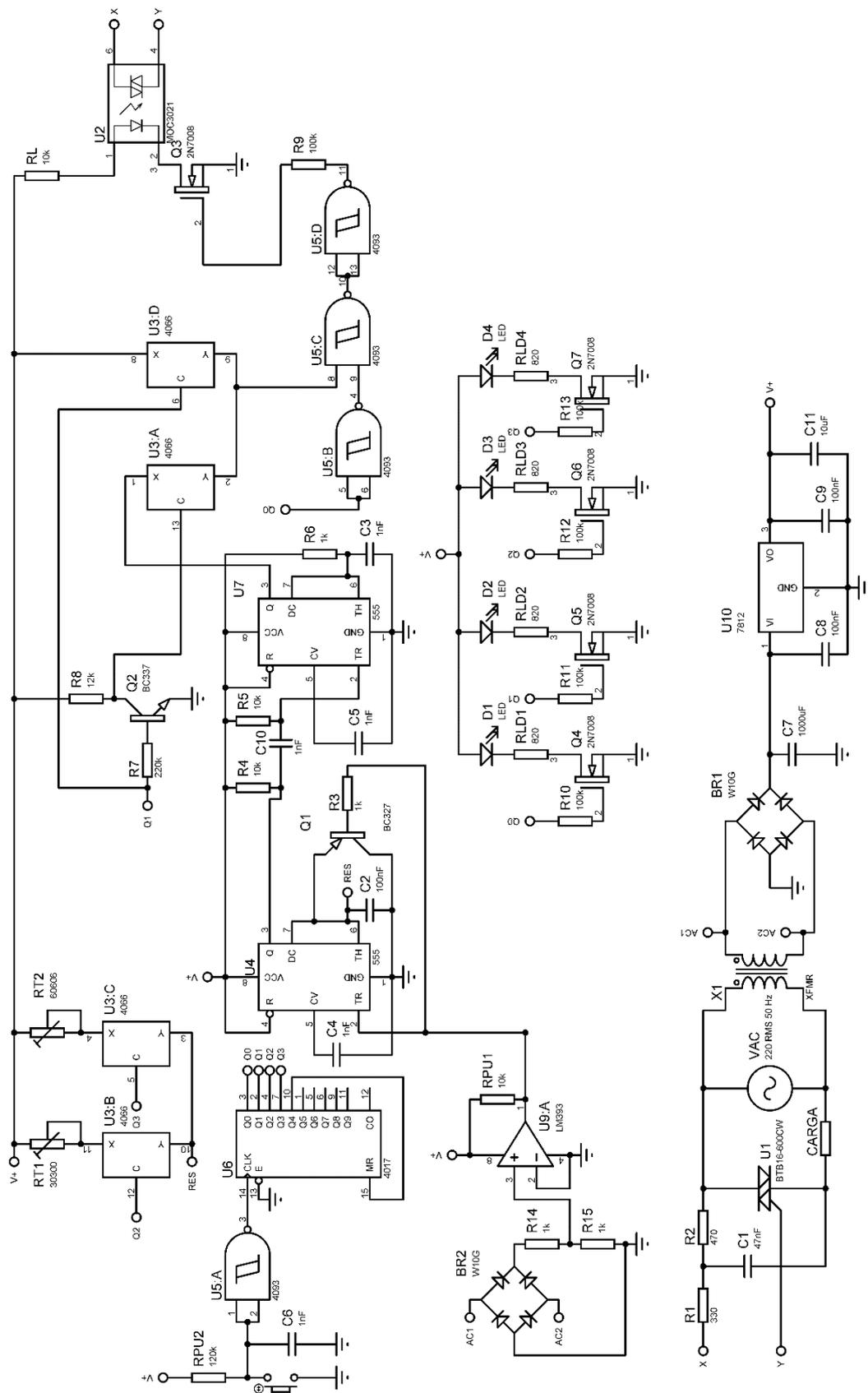


Fig. 8. Circuito digital para el control del ángulo de disparo mediante reconfiguración del temporizador (CAD-RT).

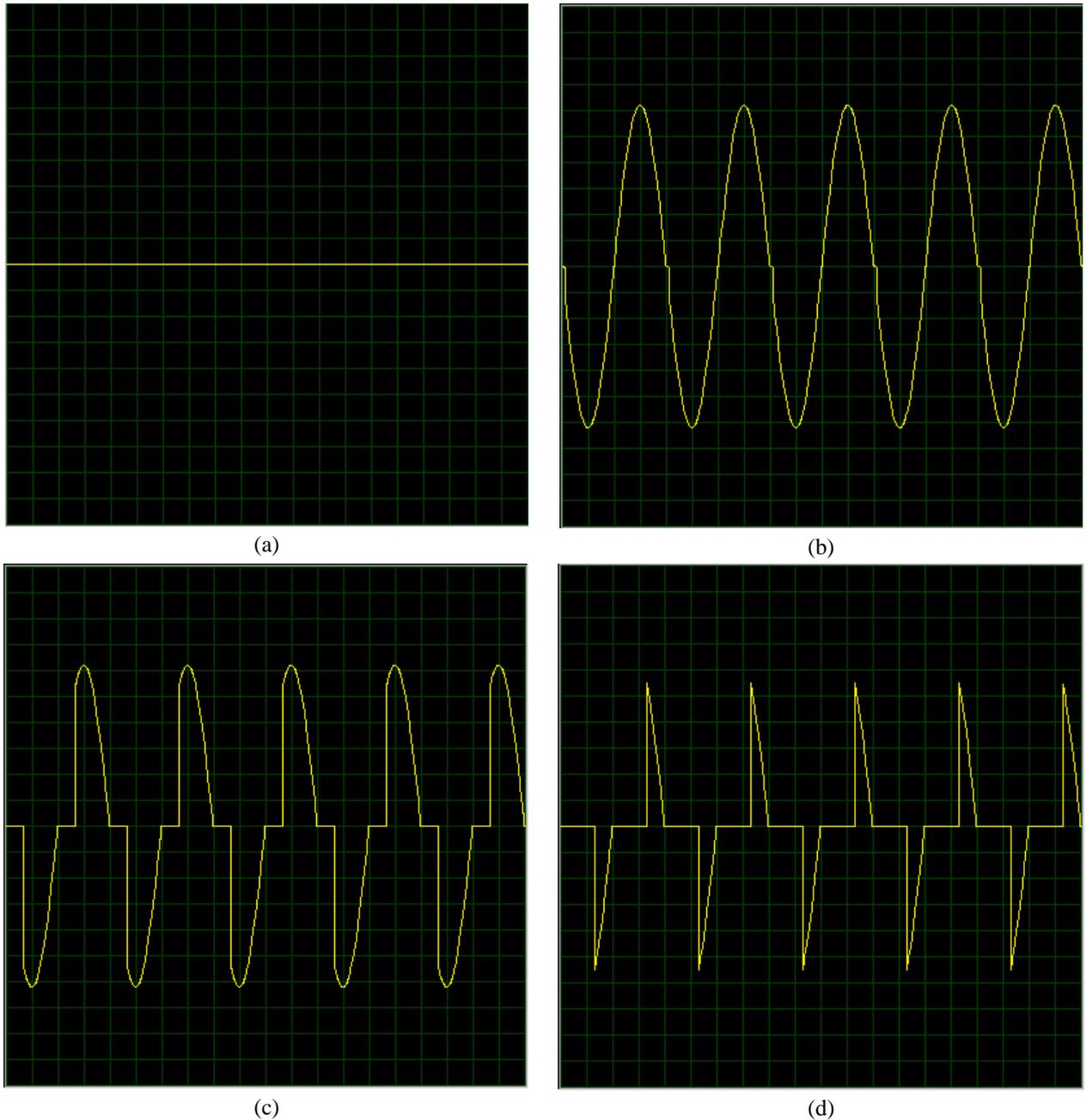


Fig. 9. Forma de onda de la tensión aplicada al motor de CA; (a): En estado apagado; (b): Velocidad máxima o ángulo de disparo de 0° ; (c): Velocidad media o ángulo de disparo de 60° ; (d): Velocidad mínima o ángulo de disparo de 120° .

En los resultados de simulación es apreciable que, en cada caso el ángulo de disparo se sitúa según fue diseñado para cada velocidad pretendida para el motor de CA. En la Fig. 9 puede apreciarse que la forma de onda de la tensión aplicada al motor se comporta según era esperado, demostrando el sincronismo entre la red eléctrica de 220 V/50 Hz y el circuito de control, verificándose el correcto funcionamiento de este último.

La Tabla 1 muestra la lista y los costos de los componentes empleados en la totalidad del circuito digital seleccionado. El costo total del circuito seleccionado es de USD 17,24 sin tener en cuenta la mano de obra y el circuito impreso. El valor indicado corresponde a la compra al por menor de los componentes.

Tabla 1: Lista de componentes para el circuito CAD-RT.

Referencia	Descripción	Cant.	Costo (USD)
Capacitores			
C1	Capacitor cerámico - 47 nF - 50 V	1	\$0,10
C2, C8, C9	Capacitor cerámico - 100 nF - 50 V	3	\$0,17
C3, C4, C5, C6, C10	Capacitor cerámico - 1 nF - 50 V	5	\$0,14
C7	Capacitor electrolítico - 1000 μ F - 25 V	1	\$0,21
C11	Capacitor electrolítico - 10 μ F - 25 V	1	\$0,02
Resistores (5%)			
RL	Resistor 560 Ω - 1/4 W	1	\$0,014
RLD1, RLD2, RLD3, RLD4	Resistor 820 Ω - 1/4 W	4	\$0,014
RPU1, R4, R5	Resistor 10 k Ω - 1/8 W	3	\$0,01
RPU2	Resistor 120 k Ω - 1/8 W	1	\$0,01
R1	Resistor 330 Ω - 1/4 W	1	\$0,014
R3, R6, R14, R15	Resistor 1 k Ω - 1/4 W	5	\$0,014
R2	Resistor 470 Ω - 1/4 W	1	\$0,014
R7	Resistor 220 k Ω - 1/8 W	1	\$0,01
R8	Resistor 12 k Ω - 1/8 W	1	\$0,01
R9, R10, R11, R12, R13	Resistor 100 k Ω - 1/8 W	5	\$0,01
Circuitos integrados			
U1	Triac BTB16-600CW	1	\$1,27
U2	Opto-triac MOC3021	1	\$0,40
U3	Llave electrónica 4066	1	\$1,00
U4, U7	Timer NE555	2	\$0,46
U5	Compuerta NAND Schmitt trigger 4093	1	\$0,60
U6	Contador Johnson/decimal 4017	1	\$0,75
U9	Comparador LM393	1	\$0,35
U10	Regulador 7812	1	\$0,35
Dispositivos Semiconductores			
Q1	BJT PNP - BC327	1	\$0,05
Q2	BJT NPN - BC337	1	\$0,05
Q3, Q4, Q5, Q6, Q7	Mosfet N - 2N7008	5	\$0,50
D1	LED rojo	3	\$0,10
D2, D3, D4	LED verde	1	\$0,28
BR1, BR2	Puente rectificador - W10G	2	\$0,20
Otros			
RT1, RT2	Preset multivuelas 100k	1	\$0,50
X1	Transformador 220:12V 1A	1	\$5,70

Cabe destacar que para el desarrollo de este trabajo se aplican saberes relacionados con compuertas lógicas, contadores binarios, multivibradores monoestables, polarización de LEDs y transistores, fuentes de alimentación lineales y uso de simuladores de circuitos electrónicos, demostrando esto que la actividad integra temáticas no solamente de la asignatura Técnicas Digitales 1, sino también de otras asignaturas tales como Dispositivos Electrónicos y Electrónica Analógica, ambas correspondientes al tercer año de la carrera. Adicionalmente el trabajo sirvió como introducción a las temáticas triac y control de velocidad por ángulo de disparo, las que son desarrolladas en la asignatura Electrónica de Potencia correspondiente al quinto año de la carrera.

5. Conclusiones

En este trabajo se han propuesto dos circuitos digitales como opciones para implementar la variación del ángulo de disparo de un triac con el fin de que un usuario pueda variar la velocidad de un motor de CA cada vez que acciona un pulsador. A partir del análisis comparativo de prestaciones y costos de las propuestas presentadas, se ha seleccionado como más conveniente para su implementación práctica el circuito donde se reconfigura el temporizador (CAD-RT). Para este último se muestran las consideraciones efectuadas en el diseño de sus distintas etapas.

La operación del circuito mencionado se valida mediante simulación. Los resultados obtenidos en la misma confirman su correcto funcionamiento, cumpliendo con las especificaciones propuestas en la consigna de la actividad integradora.

El trabajo permite articular los saberes adquiridos en la asignatura Técnicas Digitales 1 y también los de algunas asignaturas de años anteriores, desarrollándose competencias asociadas al diseño y la proyección de circuitos electrónicos digitales orientados a dar soluciones a problemáticas reales. Esto resulta en una cuestión significativa y esencial en la formación como Ingenieros Electrónicos.

Como trabajo a futuro, se propone la construcción de un prototipo del circuito CAD-RT y la realización de ensayos de laboratorio para validar el diseño y comprobar los resultados de las simulaciones efectuadas.

6. Referencias

- [1] H. A. Toliyat, "Electronic Motors," in *Handbook of Electric Motors*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis Group, LLC, 2004.
- [2] Teccor Electronics, "Phase Control Using Thyristors". Application Note AN1003, 2002.
- [3] Fairchild Semiconductor, "6-Pin Dip Random-Phase Optoisolators Triac Driver Output", MOC3021 datasheet, 2003.
- [4] *Power Semiconductor Applications*, Phillips Semiconductors., 1994, pp 485-552.
- [5] STMicroelectronics, "TRIAC analog control circuits for inductive loads". Application Note AN308, 2008.
- [6] STMicroelectronics, "Snubberless, Logic Level & Standard 16 A TRIACs", BTA/BTB16 Series datasheet, Oct. 2002 - Ed:6A.
- [7] ON Semiconductor, "Small-Signal Field Effect Transistor", 2N7008 datasheet, Oct. 2003.
- [8] STMicroelectronics, "Positive Voltage Regulators", L7800 series datasheet, Dec. 1998.

- [9] On Semiconductor, “Low Offset Voltage Dual Comparators”, LM393 datasheet, Feb. 2018.
- [10] R. J. Tocci, *Sistemas digitales: principios y aplicaciones*, 10ma ed. Naucalpan de Juárez, México: Pearson Educación de México, S.A., 2007.
- [11] Phillips Semiconductors, “TIMER”, NE/SA/SE555/SE555C datasheet, Ago. 1994.
- [12] Fairchild Semiconductor, “Quad Bilateral Switch”, CD4066BC datasheet, Nov. 1983 – [Rev. Ago. 2000].