



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Implementación de un módulo didáctico de conversor AC/DC controlado para el  
aprendizaje práctico de la electrónica de potencia**

**Velasco Iza, Alison Tatiana**

**Departamento de Eléctrica y Electrónica**

**Carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación**

**Monografía, previo a la obtención del título de Tecnóloga Superior en Automatización e  
Instrumentación**

**Ing. Sandoval Vizuite, Paola Nataly**

**Latacunga, 08 de agosto 2021**



## DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

### CARRERA DE TECNOLOGÍA SUPERIOR EN AUTOMATIZACIÓN E

### INSTRUMENTACIÓN

### CERTIFICACIÓN

Certifico que la monografía, **“Implementación de un módulo didáctico de convertidor AC/DC controlado para el aprendizaje práctico de la electrónica de potencia de los estudiantes de la carrera de tecnología superior en automatización de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – SEDE Latacunga”** fue realizado por la señorita Velasco Iza, Alison Tatiana, la cual ha sido revisada y analizada en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

**Latacunga, 08 de agosto del 2021**

Firma



Ing. Sandoval Vizuete, Paola Nataly

C.C.: 0503254005



### Document Information

Analyzed document	TESIS-VELASCO ALISON.docx (D112312980)
Submitted	9/9/2021 9:39:00 PM
Submitted by	Juan Carlos Altamirano
Submitter email	jc.altamiranoc@uta.edu.ec
Similarity	8%
Analysis address	jc.altamiranoc.uta@analysis.orkund.com



### Sources included in the report

<b>W</b>	URL: <a href="https://revistas.ute.edu.ec/index.php/tsafiqui/article/download/24/23/37">https://revistas.ute.edu.ec/index.php/tsafiqui/article/download/24/23/37</a> Martin, Fetched: 9/9/2021 9:41:00 PM	2
<b>W</b>	URL: <a href="https://docplayer.es/82880024-Dedicado-a-juan-ignacio-lobo-y-a-mi-madre.html">https://docplayer.es/82880024-Dedicado-a-juan-ignacio-lobo-y-a-mi-madre.html</a> Fetched: 7/21/2020 10:07:45 AM	1
<b>SA</b>	<b>MURILLO VANESSA_MONOGRAFÍA TUIJ (2).docx</b> Document MURILLO VANESSA_MONOGRAFÍA TUIJ (2).docx (D111359166)	21

Firma



Ing. Sandoval Vizúete, Paola Nataly

C.C.: 0503254005



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA DE TECNOLOGÍA SUPERIOR EN AUTOMATIZACIÓN E**  
**INSTRUMENTACIÓN**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, **Velasco Iza, Alison Tatiana** con cédula de ciudadanía N° **1724938327**, declaro que el contenido, ideas y criterios de la monografía: **“Implementación de un módulo didáctico de conversor AC/DC controlado para el aprendizaje práctico de la electrónica de potencia de los estudiantes de la carrera de tecnología superior en automatización de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – SEDE Latacunga”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 08 de agosto del 2021

Firma

.....  
**Velasco Iza, Alison Tatiana**

C.C.: 1724938327



## DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

### CARRERA DE TECNOLOGÍA SUPERIOR EN AUTOMATIZACIÓN E INSTRUMENTACIÓN

#### AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **Velasco Iza, Alison Tatiana**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar la monografía: **“Implementación de un módulo didáctico de conversor AC/DC controlado para el aprendizaje práctico de la electrónica de potencia de los estudiantes de la carrera de tecnología superior en automatización de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – SEDE Latacunga”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 08 de agosto del 2021

Firma

.....  
**Velasco Iza, Alison Tatiana**

C.C.: 1724938327

## **DEDICATORIA**

Esta Monografía, si bien ha requerido de esfuerzo y mucha dedicación, no hubiese sido posible su finalización sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que me acompañaron en el recorrido laborioso de este trabajo y muchas de las cuales han sido un soporte muy fuerte en momentos de angustia y desesperación, primero y antes que todo, dar gracias a Jehová, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio, a mis queridos docentes que con su amplia experiencia y conocimientos me orientaron al correcto desarrollo y culminación con éxito este trabajo para la obtención de la Tecnología en Automatización e Instrumentación, a través de ellos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE: autoridades y docentes.

Mil veces gracias.

**VELASCO IZA, ALISON TATIANA**

## **AGRADECIMIENTO**

A la primera persona que quiero agradecer es a mi tutora Paola Sandoval y mi director de carrera Pablo Pilatasig, que sin su ayuda y conocimientos no hubiese sido posible realizar este proyecto.

A mis padres, por haberme proporcionado la mejor educación y las lecciones de vida.

En especial a mi padre, por haberme enseñado que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se consigue, y que en esta vida nadie regala nada.

En especial a mi madre, por cada día hacerme ver la vida de una forma diferente y confiar en mis decisiones.

A mis compañeros de clase, con los que he compartido grandes momentos.

A mis amigos, por estar siempre a mi lado, en especial a mi mejor amiga Ibeth por el apoyo incondicional, por sus consejos para no abandonar este sueño.

A una persona especial a Adrián por brindarme todo su apoyo y todos sus conocimientos para llegar hasta este punto de mi vida e impulsarme a seguir mejorando cada día como persona y ahora como futura profesional.

A todos aquellos que siguen estando cerca de mí y que le regalan a mi vida algo de ellos no son nada más nada menos que el conjunto de seres queridos que suponen benefactores de importancia inimaginable en mis circunstancias de humano.

**VELASCO IZA, ALISON TATIANA**

<b>Tabla de contenidos</b>	
<b>Carátula .....</b>	<b>1</b>
<b>Certificación .....</b>	<b>2</b>
<b>Reporte de verificación .....</b>	<b>3</b>
<b>Responsabilidad de auditoria .....</b>	<b>4</b>
<b>Autorización de publicación .....</b>	<b>5</b>
<b>Dedicatoria .....</b>	<b>6</b>
<b>Agradecimiento .....</b>	<b>7</b>
<b>Tabla de contenidos.....</b>	<b>8</b>
<b>Índice de figuras .....</b>	<b>11</b>
<b>Índice de tablas.....</b>	<b>14</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>15</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>16</b>
<b>Generalidades .....</b>	<b>17</b>
<b>Introducción... .....</b>	<b>17</b>
<b>Antecedentes .....</b>	<b>18</b>
<b>Planteamiento del problema .....</b>	<b>19</b>
<b>Justificación .....</b>	<b>20</b>
<b>Objetivos .....</b>	<b>21</b>
<b><i>Objetivo General</i> .....</b>	<b>21</b>
<b><i>Objetivos Específicos</i> .....</b>	<b>21</b>
<b>Alcance .....</b>	<b>22</b>

<b>Marco teórico.....</b>	<b>23</b>
<b>Electrónica de potencia .....</b>	<b>23</b>
<b>Convertor AC/DC .....</b>	<b>24</b>
<b>Convertor AC-DC controlado.....</b>	<b>27</b>
<i><b>Tiristor .....</b></i>	<b>29</b>
<b>Convertor AC/DC controlado con diodo de conmutación .....</b>	<b>30</b>
<b>Convertor AC/DC semicontrolado.....</b>	<b>31</b>
<b>Convertor AC/DC onda completa.....</b>	<b>32</b>
<b>Convertor AC/DC media onda.....</b>	<b>33</b>
<b>Convertor AC/DC no controlado.....</b>	<b>34</b>
<i><b>Diodo... .....</b></i>	<b>36</b>
<b>Etapas de control.....</b>	<b>37</b>
<b>Circuito de disparo.....</b>	<b>37</b>
<i><b>Disparo por puerta.....</b></i>	<b>37</b>
<i><b>Disparo por modulo de tension.....</b></i>	<b>38</b>
<i><b>Disparo por gradiente de tension.....</b></i>	<b>38</b>
<i><b>Disparo por radiacion.....</b></i>	<b>38</b>
<i><b>Disparo por temperatura.....</b></i>	<b>38</b>
<b>Microcontrolador Arduino.....</b>	<b>38</b>
<b>Arduino Nano.....</b>	<b>39</b>
<b>Características técnicas de Arduino Nano.....</b>	<b>40</b>
<b>Entradas y Salidas de Arduino Nano.....</b>	<b>41</b>
<b>Compatibilidad con Arduino Nano .....</b>	<b>42</b>
<b>Opto acopladores .....</b>	<b>43</b>
<i><b>Principales características.....</b></i>	<b>43</b>

<b>Desarrollo del tema propuesto.</b> .....	<b>44</b>
<b>Desarrollo</b> .....	<b>44</b>
<b>Circuito de control</b> .....	<b>45</b>
<i>Circuito cruce por cero</i> .....	<b>46</b>
<i>Lectura del detector de cruce por cero</i> .....	<b>48</b>
<i>Entrada digital</i> .....	<b>49</b>
<i>Entada analogica</i> .....	<b>49</b>
<i>Salida digital</i> .....	<b>50</b>
<b>Circuito de potencia</b> .....	<b>51</b>
<i>Control de disparo</i> .....	<b>52</b>
<b>Angulo de disparo</b> .....	<b>53</b>
<b>Placa del conversor AC/DC controlado monofásico</b> .....	<b>55</b>
<b>Conversor AC/DC controlado monofásico</b> .....	<b>56</b>
<b>Conversor AC/DC controlado con carga resistiva</b> .....	<b>57</b>
<b>Formas de onda de una carga resistiva generadas en el osciloscopio</b> .....	<b>57</b>
<b>Conversor AC/DC controlado con carga resistiva inductiva</b> .....	<b>60</b>
<b>Formas de onda simuladas de una carga resistiva inductiva</b> .....	<b>60</b>
<b>Conclusiones y Recomendaciones</b> .....	<b>63</b>
<b>Conclusiones</b> .....	<b>63</b>
<b>Recomendaciones</b> .....	<b>65</b>
<b>Bibliografia</b> .....	<b>66</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>69</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b>	Diagrama de bloques de electrónica de potencia.....	24
<b>Figura 2</b>	Diagrama de bloques del conversor AC/DC.....	26
<b>Figura 3</b>	Características del conversor AC/DC.....	27
<b>Figura 4</b>	Conversor monofásico de media onda totalmente controlado.....	28
<b>Figura 5</b>	Conversor monofásico de onda completa totalmente controlado.....	28
<b>Figura 6</b>	Símbolo Rectificador controlado de silicio.....	30
<b>Figura 7</b>	<i>Conversor monofásico controlado con diodo de conmutación.....</i>	<i>31</i>
<b>Figura 8</b>	<i>Conversor monofásico semicontrolado.....</i>	<i>32</i>
<b>Figura 9</b>	<i>Conversor monofásico de onda completa.....</i>	<i>33</i>
<b>Figura 10</b>	<i>Conversor monofásico de media onda.....</i>	<i>34</i>
<b>Figura 11</b>	<i>Diagrama de bloques de un conversor monofásico no controlado.....</i>	<i>35</i>
<b>Figura 12</b>	<i>Esquema conversor monofásico no controlado.....</i>	<i>35</i>
<b>Figura 13</b>	<i>Símbolo Diodo rectificador y característica corriente-tensión .....</i>	<i>36</i>
<b>Figura 14</b>	<i>Estructura física de Arduino Nano.....</i>	<i>40</i>
<b>Figura 15</b>	<i>Descripción de Pinout .....</i>	<i>41</i>
<b>Figura 16</b>	<i>Modulo conversor controlado monofásico.....</i>	<i>45</i>

<b>Figura 17</b>	<i>Circuito de control del módulo conversor controlado monofásico AC/DC</i> .....	46
<b>Figura 18</b>	<i>Detector de cruce por cero con opto acoplador 4N25 entrada monofásica</i> ...	47
<b>Figura 19</b>	<i>Pulso del 4N25 detector de cruce por cero desde el osciloscopio</i> .....	48
<b>Figura 20</b>	<i>Arduino Nano distribución de pines entradas y salidas</i> .....	49
<b>Figura 21</b>	<i>Lectura de la constante de disparo</i> .....	50
<b>Figura 22</b>	<i>Variable de interrupción</i> .....	51
<b>Figura 23</b>	<i>Declaración en void set up</i> .....	51
<b>Figura 24</b>	<i>Pistas en la placa de conversor AC/DC monofásico onda completa</i> .....	52
<b>Figura 25</b>	<i>Circuito de control de disparo</i> .....	53
<b>Figura 26</b>	<i>Comando map</i> .....	54
<b>Figura 27</b>	<i>Circuito de control conversor onda completa controlado</i> .....	54
<b>Figura 28</b>	<i>Lectura de ángulo de disparo</i> .....	55
<b>Figura 29</b>	<i>Montaje y soldadura de elementos en la placa de baquelita</i> .....	56
<b>Figura 30</b>	<i>Ángulo de disparo 0° grados con carga resistiva (R)</i> .....	58
<b>Figura 31</b>	<i>Ángulo de disparo 60° grados con carga resistiva (R)</i> .....	58
<b>Figura 32</b>	<i>Ángulo de disparo 120° grados con carga resistiva (R)</i> .....	59
<b>Figura 33</b>	<i>Ángulo de disparo 180° grados con carga resistiva (R)</i> .....	59

<b>Figura 34</b> <i>Ángulo de disparo 0° grados con carga resistiva-inductiva.....</i>	<i>61</i>
<b>Figura 35</b> <i>Ángulo de disparo 60° grados con carga resistiva-inductiva.....</i>	<i>61</i>
<b>Figura 36</b> <i>Ángulo de disparo 120° grados con carga resistiva-inductiva.....</i>	<i>62</i>
<b>Figura 37</b> <i>Ángulo de disparo 180° grados con carga resistiva-inductiva.....</i>	<i>62</i>

**Índice de tablas**

<b>Tabla 1</b> <i>Semiconductores de potencia</i> .....	25
<b>Tabla 2</b> <i>Características de Arduino Nano Vs Arduino Micro y Arduino Mini</i> .....	42
<b>Tabla 3</b> <i>Datos de simulación del conversor AC/DC controlado con carga resistiva</i> ....	57
<b>Tabla 4</b> <i>Datos de simulación del conversor AC/DC controlado con carga resistiva- inductiva</i> .....	60

## Resumen

El objetivo del proyecto desarrollado es diseñar e implementar un circuito electrónico con una placa Arduino Nano de un convertor AC/DC Controlado el control total de este equipo nos permitirá verificar el funcionamiento de cargas resistivas e inductivas.

Para la construcción del convertor se implementó componentes electrónicos como son los tiristores o también llamados SCR (Rectificador Controlado de Silicio) los cuales serán implementados en forma de un puente totalmente controlado, donde debe incluir la parte de aislamientos tanto a la entrada como a la salida, así mismo para el circuito de disparo para que esto sea posible se integró una placa Arduino Nano para la generación de pulsos y cumplir con el objetivo de realizar el disparo de los tiristores para manejar la carga que será acoplada. Se considera que la carrera requiere este equipamiento para el aprendizaje práctico y con este módulo se logra cubrir la necesidad para los laboratorios de electrónica de potencia. La construcción de este módulo sirve para un correcto aprendizaje e interpretación del uso de este tipo de convertidores donde no solo se puede observar los voltajes de entrada y salida en la carga también se podrá observar las formas de onda que cada etapa genera con la ayuda del osciloscopio el cual se encuentra en el laboratorio lugar en donde el modulo tendrá el uso correspondiente para comprender la asignatura al que está destinado.

Palabras clave:

- **MICROCONTROLADOR**
- **CONVERSION**
- **CIRCUITO DE DISPARO**
- **TIRISTOR**
- **ELECTRÓNICA DE POTENCIA**

## **Abstract**

The objective of the developed project is to design and implement an electronic circuit with an Arduino Nano board of a controlled AC/DC converter, the total control of this equipment will allow us to verify the operation of resistive and inductive loads.

For the construction of the converter was implemented electronic components such as thyristors or also called SCR (Silicon Controlled Rectifier) which will be implemented in the form of a fully controlled bridge, where it must include the part of isolations both at the input and output, likewise for the firing circuit for this to be possible an Arduino Nano board was integrated for the generation of pulses and meet the objective of performing the firing of the thyristors to handle the load to be coupled. It is considered that the career requires this equipment for practical learning and this module meets the need for power electronics laboratories. The construction of this module serves for a correct learning and interpretation of the use of this type of converters where you can not only observe the input and output voltages on the load can also observe the waveforms that each stage generates with the help of the oscilloscope which is in the laboratory place where the module will have the corresponding use to understand the subject to which it is intended.

Key words:

- **MICROCONTROLLER**
- **CONVERTER**
- **TRIGGER CIRCUIT**
- **THYRISTOR**
- **POWER ELECTRONICS**

## Capítulo I

### 1. Generalidades

#### 1.1. Introducción

Diseño e implementación de un módulo didáctico de convertidor AC/DC controlado para la enseñanza práctica de la electrónica de potencia tanto para cargas inductivas como resistivas posee los conocimientos aprendidos en las asignaturas de electrónica de potencia, máquinas eléctricas entre otros.; el objetivo de realizar un análisis práctico y cumplir el objetivo principal para proporcionar el aprendizaje que requiere el laboratorio de electrónica de potencia.

El desarrollo de los procesos automatizados en el campo industrial hace que la electrónica de potencia exija la evolución de esta rama como el desarrollo para nuevos elementos que se puedan utilizar para este tipo de proyectos experimentales ya sean microcontroladores y en este caso los semiconductores que ayudan a la elaboración de este tipo de módulos para que el aprendizaje sea más eficiente y así ayudar con la evolución de la electrónica de potencia y poder implementarlas dentro de la industria y control de procesos que lo requieran, se debe analizar y estudiar la parte teórica para tener claro el funcionamiento de cada elemento a utilizar y la parte práctica para realizar las conexiones que permitan poner en funcionamiento este tipo de convertidores de potencia.

El convertidor AC/DC controlado utiliza un sistema de control que se puede ejecutar mediante un código de programación en conjunto de tiristores, detección de cruce por cero, microcontrolador, transformador de pulsos, para completar el proceso requerido por el módulo.

## 1.2. Antecedentes

La electrónica de potencia hace referencia de forma específica a la electrónica que es utilizada para diferenciar las aplicaciones donde se realiza el uso de dispositivos electrónicos, es la que se encarga de estudiar circuitos, sistemas embebidos, el procedimiento para el proceso, control y conversión de la energía eléctrica que comúnmente la encontramos en la parte industrial y doméstica. Tiene sus inicios desde el año 1900 pero en el año de 1948 empieza su primera evolución con su gran invento el transistor de silicio por los señores Shockley, Bardeen y Brattain en el Bell Telephone Laboratories. Al estar rodeada de este factor la electrónica de potencia lo que nos ha enseñado a través de su uso y evolución es transformar y controlar estos voltajes y corrientes a valores que sean significativos y que nos permitan ser utilizados en forma general los componentes a los que se les realiza un uso considerable para la elaboración de circuitos son los semiconductores. Lo que nos lleva a un estudio de circuitos electrónicos los cuales tienen como finalidad controlar el flujo de la energía de la red, los cuales manejan niveles altos, cabe recalcar que la energía eléctrica que es controlada es mayor a la energía que se maneja en dispositivos de uso común. Dentro de esta rama se menciona la potencia y el control los cuales son fundamentales en conjunto a la electrónica de potencia. Un equipo utilizado para conversión de energía y cargas que reciben alimentación directa requieren de potencia, las características estáticas y dinámicas de un control o sistema de lazo cerrado requiere de control. Los principales semiconductores que utiliza esta rama son el diodo de potencia, el transistor bipolar de unión, el MOSFET, los tiristores y el IGBT. Es importante mencionar que es una de las ramas esenciales de la ingeniería eléctrica la cual combina la energía, la electrónica y el control son de uso para equipos de alta potencia.

### 1.3. Planteamiento del problema

En los últimos años los dispositivos electrónicos han tomado mucha fuerza gracias a todas las aplicaciones que se pueden desarrollar mediante el uso de ellos, gran parte de estos dispositivos operan con tensión continua, la cual, tradicionalmente se logra a través de la rectificación de la tensión generada por la red, pero esto no es suficiente, debido a que la tensión no es totalmente regulada y su forma de onda no es completamente constante.

El trabajo propuesto se complementa con el diseño, estudio e implementación de un conversor basado en la transformación AC/DC controlado el cual forma parte de uno de los convertidores existentes es un modelo que se basa únicamente para la educabilidad de la electrónica de potencia dentro de un laboratorio como una forma de comprender el funcionamiento del conversor.

Debido a las características que presenta este modelo de conversor se realizara un estudio de cada uno de los componentes utilizados para que al momento de realizar la conexión de cargas las resultantes permitan establecer que la metodología utilizada facilita el aprendizaje e identificar sus algoritmos de control nos permita verificar que los voltajes son los adecuados. La mayor parte de este proyecto se enfocarán sobre las etapas que manera este conversor donde la metodología permite determinar la función denominada del proyecto. Así se podrá reducir los porcentajes de error que se presentan en los laboratorios al realizar este tipo de prácticas en solo simples simulaciones que ayudaran a tener una idea más clara y más aun a comprobar con valores reales que el proyecto cumple con las necesidades requeridas.

Cabe mencionar que el desarrollo de este módulo no solo incluye un componente conmutador como son los tiristores también permitirá conocer el uso de la combinación de varios dispositivos como una alimentación externa, fuentes de voltaje constantes, capacitores de almacenamiento, resistencias de carga, diodos de potencia y la operación en altas frecuencias.

Este módulo servirá como apoyo para un mejor aprendizaje dentro de la carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación.

La exigencia de los convertidores dentro del aprendizaje de la electrónica de potencia ayudara a que el diseño de este módulo cumpla con todas las restricciones de diseño e implementación partiendo desde sus valores de potencia como son las tensiones de entrada y salida, y la potencia que exige la carga. Empleando así la metodología practica y teórica fundamental para el conocimiento básico de este tipo de conversor como otras de orden elevado.

#### **1.4. Justificación**

El objetivo de este capítulo es introducir la estructura y características principales de los convertidores electrónicos de energía, indicando sus aplicaciones más comunes, especialmente aquellas orientadas a los accionamientos eléctricos.

Este convertidor AC/DC también llamado rectificador es un sistema electrónico que tiene como función principal convertir una tensión alterna de entrada y amplitud constante en una tensión continua de salida dentro de la industria y aplicaciones que podemos encontrar dentro de ella encontramos maquinas que requieren una tensión continua, la cual la realizan con convertidores estáticos este sistema convierte la tensión AC/DC el rendimiento del conversor posee perdidas internas durante el proceso

Se puede diferenciar un convertidor de otro de acuerdo al número de fases de la tensión de entrada nombrando algunos de ellos como los convertidores no controlados los cuales están formados por diodos de potencia y tiristores.

Este tipo de convertidores generan a su salida componentes alternas no deseadas que se suman a la componente continua. En otras ocasiones, la conmutación de corrientes elevadas necesaria para completar el proceso de conversión de energía genera radiación electromagnética que puede producir interferencias en equipos electrónicos sensibles próximos. Existe, por tanto, una antítesis eficiencia energética – calidad de la conversión que debe tenerse en cuenta para un correcto diseño y utilización de los convertidores.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. *Objetivo General***

Implementación de un módulo didáctico de convertidor AC/DC controlado que permita el estudio experimental y el comportamiento de la rectificación controlada.

### **1.5.2. *Objetivos Específicos***

- Proyectar y diseñar un convertidor AC/DC controlado que use tanto energía monofásica como trifásica para el manejo de una carga RL como puede ser un motor.
- Proyectar y diseñar el circuito de disparo del convertidor AC/DC con la ayuda de una placa Arduino para la generación de pulsos y el control del convertidor.

- Implementar un convertor AC/DC controlado que reciba una señal de pulsos para el disparo de sus tiristores a través de una placa Arduino.
- Realizar una guía de laboratorio para la implementación en las prácticas de la materia de Electrónica de Potencia de la Carrera de Tecnología Superior en Automatización.

### **1.6. Alcance**

El estudio de los convertidores monofásicos en su diseño y en su implementación posterior en el laboratorio estarán compuestos por:

- Fuente de alimentación alterna.
- Un sistema de conmutación para seleccionar el convertidor deseado.
- Los tiristores que compondrán el convertidor.
- Un circuito para controlar el ángulo de disparo de los tiristores, utilizando una placa Arduino que calculara los tiempos de inicio a partir de un circuito de detección de cruce por cero.

También consistirá en la familiarización de elementos de control, como la placa Arduino Nano y de elementos de protección de la misma, adquisición de las tensiones de alimentación del convertidor y del motor. Calculo de los tiempos de retraso antes del disparo derivados de los tiempos de lectura y/o actuación de los distintos componentes (detección de cero, opto-acopladores, microcontrolador y tiristores). El mismo que será una ayuda didáctica en los laboratorios de electrónica de potencia para los estudiantes de la carrera de Automatización e Instrumentación de la Universidad de las Fuerzas Armadas Espe Latacunga.

## Capítulo II

### 2. Marco teórico

Para la realización del proyecto de un convertor AC/DC controlado se aplicó la metodología de investigación bibliográfica donde fue necesario identificar proyectos realizados anteriormente estudiada en el área: Control de circuitos de potencia operación de los convertidores. De estas referencias se utilizó la información y datos relacionados con las actividades a realizar para implementar los circuitos con mayor facilidad, el diseño de las etapas que requiere el modulo con las especificaciones de los componentes y las capacidades que poseen al momento de diseñarlo y para finalizar la operación del módulo con si respectiva carga. (Álvarez Acevedo, 2016)

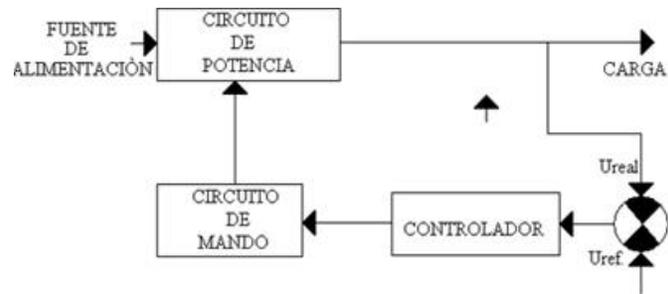
#### 2.1. Electrónica de potencia

La electrónica industrial o de potencia es la técnica de estado sólido destinada a controlar cargas de gran potencia mediante dispositivos semiconductores. La mayor parte de las aplicaciones de electrónica de potencia hacen que los dispositivos semiconductores trabajen como si fueran interruptores teniendo mucha importancia en su comportamiento en la conmutación que en el control de su ganancia o amplificación.

La conmutación de los dispositivos de potencia es gestionada mediante un circuito de control que en algunas ocasiones requiere de realimentación para gestionar la carga de forma adecuada. (Martin, 2017)

**Figura 1**

*Diagrama de bloques de electrónica de potencia*



*Nota.* En la figura se muestra el diagrama de bloques que conforma la electrónica de potencia como es la fuente de alimentación, el circuito de potencia, la carga, el controlador y el circuito de mando. Tomado de (Martin, 2017)

## 2.2. Conversores AC-DC

Permiten convertir una señal de corriente alterna de entrada en una corriente continua a la salida. Dentro de este grupo se encuentran los denominados rectificadores con diodos. Pueden ser de dos tipos:

- Rectificadores no controlados, contruidos a base de diodos.
- Rectificadores controlados contruidos a base de tiristores. (Gonzales, 2019)

La principal característica de los elementos semiconductores de potencia es su capacidad de controlar cargas con valores de tensión y corriente muy elevados. En este caso se habla de cargas de potencia donde uno de los principales problemas de estos elementos de potencia es que generan mucho calor cuando trabajan a plena carga. Por este motivo es importante su correcta disipación mediante disipadores de calor.

(Gonzales, 2019)

**Tabla 1***Semiconductores de potencia*

<b>SEMICONDUCTORES DE POTENCIA</b>	
<b>Transistores</b>	<b>Tiristores</b>
BJT de potencia	SCR
Power MOSFET	GTO
IGBT.	Triac
	Diac

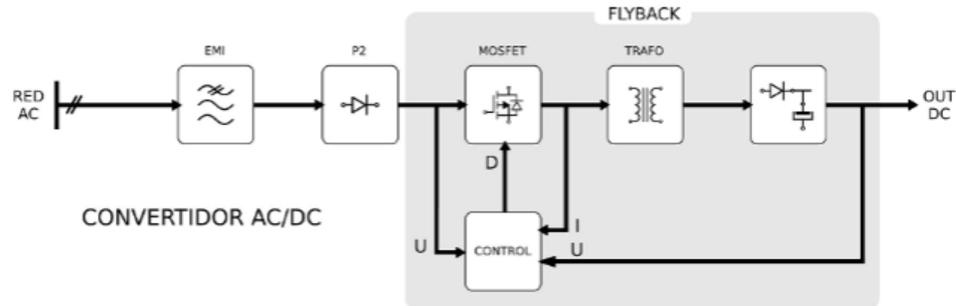
*Nota.* En la tabla se muestra la lista de semiconductores existentes tanto transistores como tiristores. Tomado de (Gonzales, 2019)

Los convertidores están presentes en todos los usos que se le puede dar a la energía eléctrica, ya sea en el hogar, el comercio o la industria. La electrónica se compone de dispositivos de conmutación semiconductores que proporcionan una reducción de dimensiones y menores costos, sin comprometer la eficiencia en relación con fuentes lineales. Una de estas conversiones presentes en el uso de la energía eléctrica es la conversión de voltaje que se va a implementar que es principalmente utilizado para ajustar el voltaje de la red de distribución de energía proporcionada. (Londrina, 2018)

Para realizar la conversión de corriente alterna AC a corriente continua DC se realizan las siguientes etapas: rectificación, filtrar la onda de salida del rectificador adecuando el voltaje a los valores que necesita la carga, subir o bajar, y otro filtrado de la onda después de la adecuación del voltaje. Las etapas de esta conversión se ilustran en bloques en la Figura 2. (Robert W. Erickson, 2016).

**Figura 2**

*Diagrama de bloques del conversor AC/DC*



*Nota.* En la figura se muestra el diagrama de bloques con las etapas que compone el conversor AC/DC. Tomado de (Robert W. Erickson, 2016)

Existen tres tipos de conversores tipo puente que dependen de la combinación de dispositivos semiconductores que se utilice. El primer tipo es el totalmente controlado en donde todos los elementos son tiristores, el semicontrolado, que emplea tiristores y diodos, y finalmente no controlado, en el cual todos los elementos son diodos y no hay posibilidad de variar la señal de salida. (Jarrín, 2017)

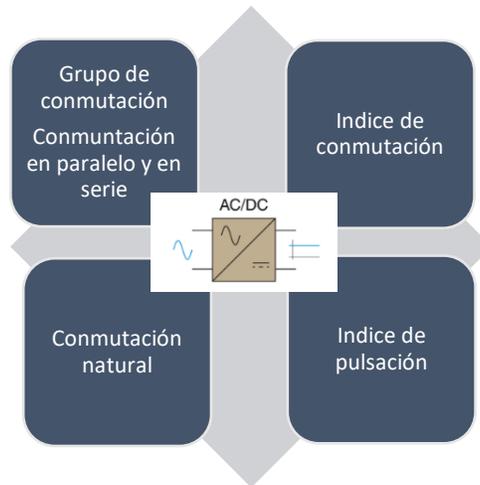
Para elegir un conversor de forma correcta puede ser según su aplicación:

- ▶ Conversores básicos. -
  - ▶ Dos almacenadores de energía (condensador y bobina)
- ▶ Orden elevado. -
  - ▶ Con un mayor número de elementos (conversor buck, conversor boost o conversor buck bust) (Mallada, 2016)

Un sistema conversor junto a la rectificación comprende las siguientes características mostradas en la figura 3:

### Figura 3

*Características del conversor AC/DC.*



*Nota.* En la figura se muestra las características del conversor AC/DC en cuento a su proceso de conmutación. Tomado de (Seguier, 2020)

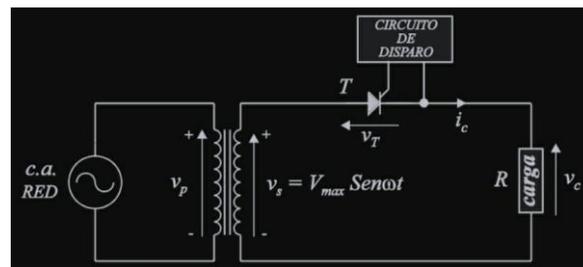
### 2.3. Conversor AC-DC controlado

Los convertidores controlados llevan este nombre porque utilizan un dispositivo de control como es el tiristor. Utiliza montajes iguales a los convertidores no controlados, pero se sustituyen los diodos por tiristores de forma parcial o totalmente. La gran ventaja de utilizar tiristores se da por la capacidad de retardar su entrada en conducción esto sucede cuando la tensión de sus bornes es positiva además recibe un impulso en su puerta. El ángulo de retardo es fundamental ya que actuando sobre él es posible variar la relación entre el valor de la tensión que está rectificando a la salida y el valor de las tensiones alternas de la entrada es por eso que recibe el nombre de “controlados”,

por lo tanto, se controla el tiristor cuando estando directamente polarizado, tenga suficiente tensión entre ánodo y cátodo y reciba a través de la puerta un impulso de valor adecuado y duración suficiente y el bloqueo será natural. En la figura 4 se muestra al conversor monofásico de media onda y en la figura 5 el conversor monofásico de onda completa totalmente controlado. (Peña, 2016)

#### Figura 4

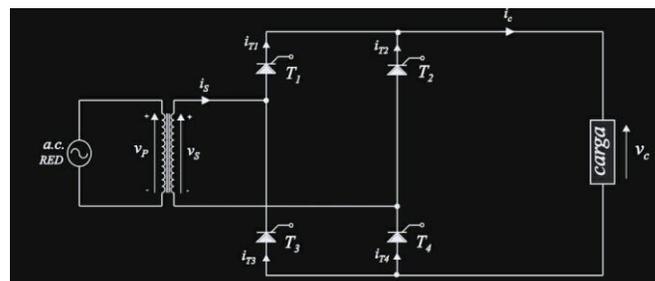
*Conversor monofásico de media onda totalmente controlado*



*Nota.* En la figura se muestra el circuito rectificador controlado monofásico de media onda que se diferencia de un circuito no controlado es el cambio de un diodo se coloca un SCR. Tomado de (Lander, 2018)

#### Figura 5

*Conversor monofásico de onda completa totalmente controlado*



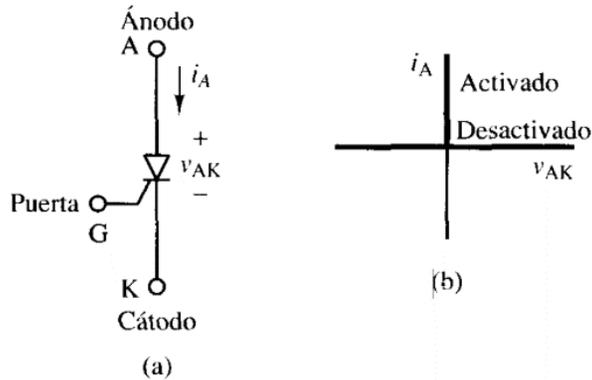
*Nota.* La figura muestra los tiristores formando un puente rectificador donde es posible controlar todos los aspectos de la onda. Tomado de (Lander, 2018)

### **2.3.1. Tiristor**

Los tiristores pertenecen a la familia de dispositivos de tres terminales son interruptores electrónicos utilizados en circuitos electrónicos de potencia y por medio de estos elementos podemos controlar la activación del interruptor dentro de este grupo podemos encontrar: Bidireccionales controlados por fase (BCT), foto tiristor (LASCR), el rectificador controlado de silicio (SCR), tríodo bidireccional (TRIAC) , de inducción estática (SITH), de desactivación por compuerta (GTO), controlados por MOSFET (MCT), conmutados por compuerta integrada (IGCT), diodo bidireccional (DIAC), entre otros. Están conformados por 3 terminales un ánodo, un cátodo y la compuerta o gate y funcionan como un interruptor mecánico cuando se aplica corriente a la compuerta esta se activa y conduce la electricidad. Pueden soportar altas tensiones y corrientes de bloqueo en aplicaciones donde se requiere alta potencia y las frecuencias de conmutación son limitadas a valores que aproximados entre 10 y 20kHz. Para que el SCR entre en conducción se le debe aplicar una corriente de puerta cuando la tensión ánodo-cátodo sea positiva y cuando el dispositivo ya se encuentra en conducción la señal de la puerta deja de ser necesaria para mantener la corriente en el ánodo es decir que continuara conduciendo mientras la corriente que se encuentra en el ánodo sigue siendo positiva y este por encima de un valor denominado nivel de mantenimiento la figura 6 muestra la estructura y característica corriente-tensión ideal del SCR. (Hart, 2017)

**Figura 6**

*Símbolo Rectificador controlado de silicio*



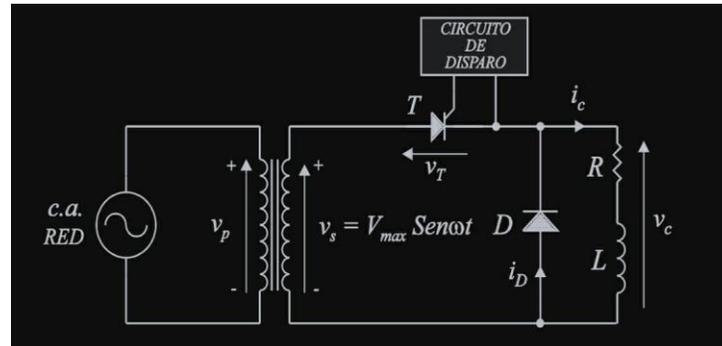
*Nota.* La figura muestra los tiristores formando un puente rectificador donde es posible controlar todos los aspectos de la onda. Tomado de (Lander, 2018)

#### 2.4. Conversor AC/DC controlado con diodo de conmutación

El conversor monofásico controlado con diodo de conmutación varía el valor del voltaje según cambie el ángulo de disparo cuando se tiene el diodo conectado en paralelo el puente evita la circulación de corriente por los dos elementos de la misma rama del puente es decir que la corriente circula por el diodo y de esta manera el voltaje en los terminales del conversor no tendrá valores negativos. La corriente de la carga no puede anularse instantáneamente si es inductiva a la misma y de esta forma se cierra la circulación a través de este diodo de libre circulación donde básicamente su función será más importante cuanto menor sea el índice de pulsación del montaje rectificador, a la hora de reducir en nivel de rizado a la salida del rectificador. (Galeano, 2016)

**Figura 7**

Convertor monofásico controlado con diodo de conmutación



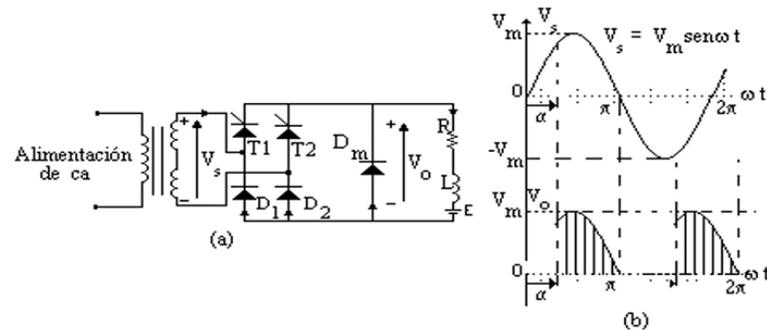
*Nota.* La figura muestra el circuito convertor monofásico de media onda con diodo de conmutación. Tomado de (Lander, 2018)

## 2.5. Convertor AC/DC semicontrolado

El arreglo de los convertidores semicontrolados monofásicos consta de 50% diodos y 50% SCR's lo cuales operan como rectificadores los cuales regulan la potencia entregada a la carga e indican las formas de onda de voltaje y corriente en diferentes tipos de carga, este convertor trabaja en un solo cuadrante que posee el mismo valor de voltaje y de corriente a la salida este convertor tiene como función rectificar la señal alterna de entrada y controlar el proceso de rectificación se puede elegir la cantidad de señal que deseamos que llegue a la salida como los SCR's nos permiten controlar todos los aspectos de la onda mientras que los diodos no esto nos genera solo formas de onda completa siendo el ángulo en el cual empiezan a conducir entre 0 a 180 grados estos convertidores son de costo medio en la figura 8 se observa el circuito de un convertor AC/DC monofásico semicontrolado. (Mayorga, 2016)

**Figura 8**

Convertor AC/DC monofásico semicontrolado



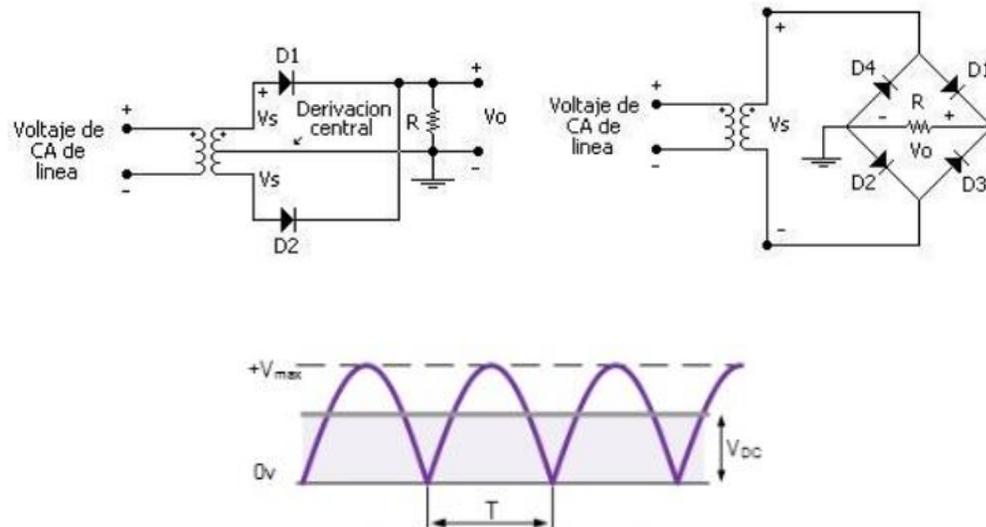
*Nota.* La figura muestra el circuito de un convertor semicontrolado y las formas de onda ideales de entrada y salida. Tomado de (Luzuriaga, 2018)

## 2.6. Convertor AC/DC onda completa

Cuando se habla de rectificadores de onda completa podemos detallar dos muy importantes existe el rectificador con derivación central y con puente diodo en el primero se utiliza ambas mitades de la onda de entrada para obtener una salida unipolar invirtiendo los semiciclos negativos de la onda también utiliza el devanado central del transformador para obtener dos voltajes iguales las cuales están en paralelo con las dos mitades del devanado secundario con sus respectivas polaridades. El rectificador con puente de diodos también llamado puente de Winstone la señal de salida obtenida en el rectificador no tiene variaciones de salida con respecto al rectificador de con derivación central en este rectificador no usa derivación pero si contiene más de dos diodos y funciona durante los semiciclos positivos del voltaje de entrada vs la corriente que atraviesa el diodo D1 la carga y el diodo D2 al ser positivos mientras tanto el diodo D3 y d4 están polarizados de forma inversa como se muestra en la figura 9. (Barron, 2019)

**Figura 9**

Convertidor AC/DC monofásico de onda completa



*Nota.* La figura muestra el circuito de un convertidor monofásico de onda completa y las formas de onda ideales de entrada y salida. Tomado de (Barron, 2019)

## 2.7. Convertidor AC/DC media onda

Este convertidor al ser construido con un diodo puede mantener el flujo de la corriente en un solo sentido y se utiliza para cambiar una señal de ac a una señal dc cuando la tensión de la entrada es positiva el diodo se polariza de forma directa y se puede sustituir por un cortocircuito y cuando la tensión de entrada es negativa el diodo se polariza de forma inversa y se la reemplaza como un circuito abierto, se tiene que tomar en cuenta que para que un diodo funcione correctamente requiere de 0.7 voltios para que se polarice y así la tensión de salida debe estar reducida a esa cantidad como se muestra en la figura 10. (Rashid, 2020)

**Figura 10**

Convertidor AC/DC monofásico de media onda



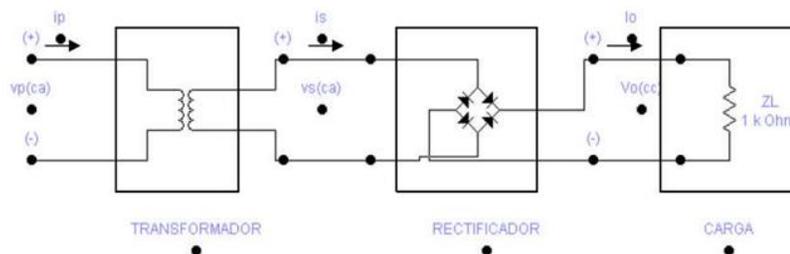
*Nota.* La figura muestra el circuito de un convertidor monofásico de media onda y las formas de onda ideales de entrada y salida. Tomado de (Rashid, 2020)

## 2.8. Convertor AC/DC no controlado

Los convertidores no controlados son los que convierten energía eléctrica de corriente alterna a corriente continua donde sus valores de salida dependes del valor de tensión alterna de la entrada y la carga que se encuentre conectada la conversión que se realice debe proporcionar una tensión continua de salida con un armónico mínimo y al mismo tiempo que mantenga la corriente de entrada de la onda senoidal como mas sea posible mientras que en la fase de tensión de entrada para que el factor de potencia se acerque al valor necesario, cualquier tipo de convertidor ac/dc en su calidad de conversión se queda determinada por la cantidad de contenido armónico que posee tanto de la corriente de entrada como la tensión de salida y corriente de salida. Existen diversos tipos de estos circuitos y para realizar una pequeña comparación respecto al voltaje de suministro e igual carga es mejor definir parámetros de rendimiento para una evaluación y una mejor selección de convertidor. En la figura 11 se muestra el circuito rectificador monofásico con sus bloques principales. (Mallada, 2016)

**Figura 11**

Diagrama de bloques de un conversor monofásico no controlado

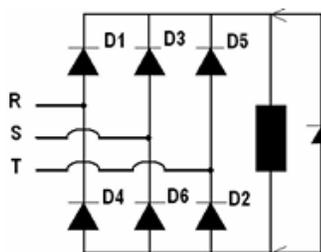


*Nota.* La figura muestra el diagrama de bloques de un rectificador monofásico no controlado. Tomado de (Rashid, 2020)

El conversor monofásico no controlado opera en el primer cuadrante en un solo punto ya que está conformado en totalidad por diodos los cuales permiten que este diseño provea de un voltaje de salida constante esto también hacer que su costo económico sea bajo, el valor de su potencia es constante a su salida con un valor positivo a cero el cual indica que estará operando como un rectificador en la figura 12 podremos observar el circuito rectificador no controlado. (Londrina, 2018)

**Figura 12**

Esquema conversor monofásico no controlado



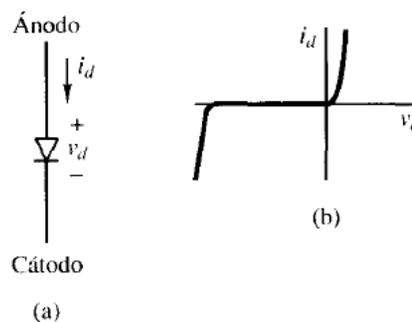
*Nota.* La figura muestra el esquema de un rectificador monofásico no controlado a 6 pulsos. Tomado de (Rashid, 2020)

### 2.8.1. Diodo

Se puede decir que el diodo al igual que el tiristor también funciona como un interruptor pero de una manera más simple es decir que no se puede controlar en el sentido de que las tensiones y corrientes del circuito son lo que determinan los estados de conducción y de corte del diodo, por lo tanto cuando el diodo está en conducción quiere decir que está polarizado de forma directa y la corriente es positiva mientras que cuando el diodo tenga una tensión negativa su estado será en corte ya que estará polarizado de forma inversa. En un caso ideal el diodo se comporta como un cortocircuito cuando está polarizado en directa y su comportamiento al estar conectado de forma inversa será de un circuito abierto. El diodo Schottky posee un contacto de metal – silicio y tiene una caída de tensión directa típica de 0.3 voltios y suelen utilizarse para baja tensión donde las caídas de los diodos son comparadas con las demás tensiones del circuito. Como se observa en la figura 13. (Hart, 2017)

#### Figura 13

*Símbolo Diodo rectificador y característica corriente-tensión*



*Nota.* La figura muestra el símbolo del diodo rectificador y la característica corriente-tensión. Tomado de (Lander, 2018)

## **2.9. Etapa de control**

En esta etapa se requiere de un microcontrolador en conjunto a otros elementos para reunir las condiciones necesarias, de forma básica esta etapa tiene la función de tomar el control tanto de voltaje como de corriente la cual viene generada del conversor donde se realiza la revisión de las fallas de manera continua y veraz en proporción tanto para el software como el hardware, esta tarea es del microcontrolador y debe realizar las operaciones que sean necesarias para que genere los pulsos de activación de los tiristores en el ángulo que se indique por medio del código de programación. (Luzuriaga, 2018)

## **2.10. Circuitos de disparo**

El SCR es disparado por un pulso corto de corriente aplicado a la compuerta para que se produzca este cebado de un tiristor, la unión ánodo - cátodo debe estar polarizado directo y la señal de mando debe permanecer un tiempo suficientemente larga como para permitir que este tiristor alcance el valor de la corriente que tiene el ánodo mayor que  $I_L$ , la corriente necesaria para permitir que el SCR comience a conducir. (Santos, 2018). Las distintas formas de disparo de los tiristores son:

### ***2.10.1. Disparo por puerta.***

Este método que consiste en aplicar una corriente en la puerta donde existen niveles de tensión y corriente de disparo los cuales tiene valores dentro de un rango y estos sean seguro denominándolo zona de disparo de seguridad. (Lander, 2018)

### ***2.10.2. Disparo por módulo de tensión.***

Es el debido al mecanismo de multiplicación por avalancha. Esta forma de disparo no se emplea para disparar al tiristor de manera intencionada; sin embargo, ocurre de forma fortuita provocada por sobre tensiones anormales en los equipos electrónicos. (Lander, 2018)

### ***2.10.3. Disparo por gradiente de tensión.***

Una subida brusca del potencial de ánodo en el sentido directo de conducción provoca el disparo. Este caso más que un método, se considera un inconveniente. (Londrina, 2018)

### ***2.10.4. Disparo por radiación.***

Está asociado a la creación de pares electrón-hueco por la absorción de la luz del elemento semiconductor. El SCR activado por luz se llama LASCR. (Londrina, 2018)

### ***2.10.5. Disparo por temperatura.***

El disparo por temperatura está asociado al aumento de pares electrón - hueco generados en las uniones del semiconductor. Así, la suma de las corrientes tiende rápidamente al aumentar la temperatura. La tensión de ruptura permanece constante hasta un cierto valor de la temperatura y disminuye al aumentar ésta. (Santos, 2018)

## **2.11. Microcontrolador Arduino**

Arduino es una plataforma de creación de electrónica de código abierto, la cual está basada en hardware y software libre, flexible y fácil de utilizar para los creadores y desarrolladores. Esta plataforma permite crear diferentes tipos de microordenadores de

una sola placa a los que se les puede realizar varias aplicaciones. Para poder entender este concepto, se debe entender los conceptos de hardware libre, se refiere a los dispositivos cuyas especificaciones y diagramas son de acceso público, de manera que cualquiera puede replicarlos. Esto quiere decir que Arduino ofrece las bases para que cualquier otra persona o empresa pueda crear sus propias placas, pudiendo ser diferentes entre ellas, pero igualmente funcionales a partir de la misma base.

(Arduino.cl, 2019).

## **2.12. Arduino Nano**

Arduino Nano es otra de las versiones en las que se puede encontrar la famosa placa de desarrollo Arduino. Es pequeña y su tamaño, esconde gran cantidad de posibilidades. Arduino está incluido en el mundo del hardware libre y software se pueden crear multitud de proyectos donde el límite es tu imaginación y algunas limitaciones técnicas por supuesto. Pero permiten aprender electrónica, programación y también crear auténticas maravillas. Incluso proyectos profesionales están basados en estas placas de desarrollo. Arduino Nano, es una versión reducida de Arduino UNO. La placa Arduino Nano no tiene una toma de alimentación DC como otras placas Arduino, sino que tiene un puerto mini-USB. Este puerto se utiliza tanto para la programación como para la monitorización en serie. La característica fascinante de Nano es que elegirá la fuente de energía más fuerte con su diferencia de potencial, y la fuente de energía que selecciona el puente no es válida. Eso minimiza la demanda de energía que consume y también hace que no se necesite tanto espacio para alojar la placa, por lo que es ideal para proyectos donde el tamaño sea importante. (Aguayo, 2019)

### 2.13. Características técnicas de Arduino Nano

Las características técnicas son:

- Microcontrolador Arduino ATmega328
- Voltaje de operación, 5 V
- Velocidad del reloj 16 MHz
- Pines de E/S analógicas, 8
- EEPROM, 1 KB
- Corriente continua por pin entrada salida, 40 mA (Pines de E/S)
- Voltaje de entrada, 7-12 V
- Pines de E/S digitales, 22
- Salida PWM, 6
- Consumo de energía, 19 mA
- Tamaño de la placa de circuito impreso, 18 x 45 mm
- Peso, 7 g. (Damian, 2020)

#### Figura 14

*Estructura física de Arduino Nano*

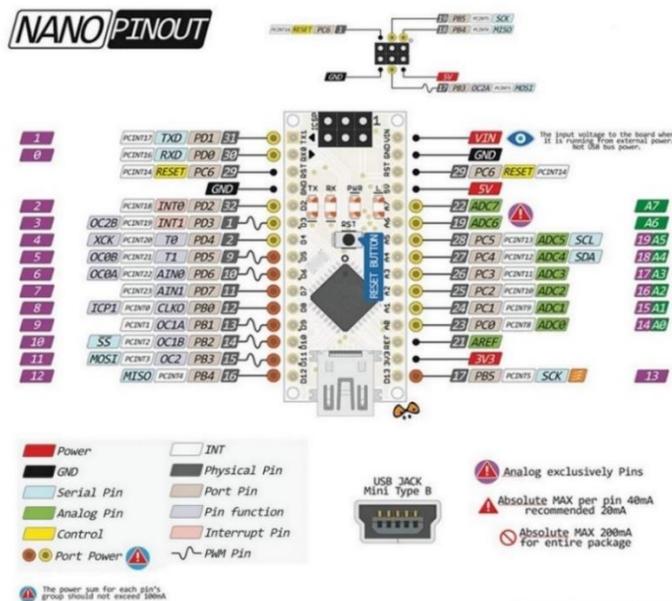


*Nota.* La figura muestra la forma física del Arduino Nano. Tomado de (*Electronica, 2020*)

## 2.14. Entradas y Salidas de Arduino Nano

Figura 15

Descripción de Pinout



Nota. La figura muestra las entradas y salidas que posee Arduino Nano. Tomado de (Silva, 2020).

En la figura 8 cortesía de Arduino se puede ver el pinout o la predisposición de pines y conexiones que se puede encontrar en esta placa de desarrollo. Arduino Nano no cuenta con tantos pines E/S como otras placas, pero tiene una cantidad considerable para la mayoría de proyectos en los que se puede emplear este microcontrolador. (Silva, 2020)

En la tabla 2 se detalla el resumen de las placas más destacadas, estas son las más importantes con respecto a las otras placas de tamaño reducido oficiales:

**Tabla 2***Características de Arduino Nano Vs Arduino Micro y Arduino Mini*

<b>Características</b>	<b>Arduino Mini</b>	<b>Arduino Micro</b>	<b>Arduino Nano</b>
<b>Microcontrolador</b>	Atmega328P	ATmega32U4	ATmega168/ATmega328P
<b>Voltaje de Operación</b>	5V	5V	5V
<b>Voltaje de alimentación</b>	7-9V	7-12V	7-9V
<b>Frecuencia de operación</b>	16MHz	16MHz	16MHz
<b>Entradas/Salidas analógicas</b>	8/0	12/0	8/0
<b>Entradas/Salidas digitales</b>	14/14	20/20	14/14
<b>PWM</b>	6	7	6
<b>EEPROM (kB)</b>	1	1	0.5/12/0
<b>SRAM (kB)</b>	2	2.5	1/2
<b>Flash (kB)</b>	32	32	16/32
<b>Puerto de programación y alimentación principal</b>	Por medio de una tarjeta o un cable FTDI	microUSB	miniUSB
<b>Dimensiones</b>	3 x 18 cm	4.8 x 1.77 cm	4.5 x 1.8 cm

*Nota. Tomado de (Damian, 2020)*

### 2.15. Compatibilidad de Arduino Nano

La placa Arduino Nano es compatible con todo tipo de componentes electrónicos como el resto de las placas. No hay ningún tipo de limitación más allá de las propias limitaciones de intensidad y voltaje máximos que admite. Se puede usar cualquier componente que se desee implementar que incluyan hardware libre. (Matulic, 2019)

## 2.16. Opto acopladores

MOC3021 es un opto acoplador que consta de un diodo emisor de rayos infrarrojos fabricado de arseniuro de galio, acoplado ópticamente a un interruptor bilateral de silicio (Diac), en un encapsulado de tipo DIP-6, con un alto aislamiento eléctrico de 7,5Kv. Diseñado para su uso como controlador de disparo aislado de Triac. Dentro de sus ventajas tenemos: una mayor durabilidad y confiabilidad y fácil de acoplar a cualquier circuito por su reducido tamaño. (Hart, 2017)

### 2.16.1. Principales características

- Tensión de entrada inversa del diodo: 3V
- Corriente de entrada continua del diodo: 50mA
- Tensión máxima de apagado repetitiva (V<sub>drm</sub>): 400 V
- Corriente repetitiva en estado de apagado en cualquier dirección (I<sub>drm</sub>):10 nA
- Corriente inversa estática con V<sub>r</sub>=3V (I<sub>R</sub>):100 μA
- Corriente de activación de LED: 15mA
- Resistencia de aislamiento: 10Ω
- Voltaje de aislamiento: 7.5 kV
- Rango temperatura de operación: -40°C a 150°C
- Disipación continua de energía a 25 °C del diodo emisor de infrarrojos: 100 mW
- Disipación continua de energía a 25 °C del diac: 300 mW
- Disipación continua de energía a 25 °C del dispositivo: 330 mW (Lander, 2018)

## Capítulo III

### 3. Desarrollo del tema propuesto

La finalidad de este proyecto tiene como objetivo de ejecutar los correctos dimensionamientos de los dispositivos electrónicos para la puesta en marcha del módulo conversor AC/DC con el microcontrolador Arduino Nano, el cual permitirá realizar el estudio y funcionamiento del convertidor de energía estático controlado de onda completa monofásico con cargas resistivas e inductivas para poder visibilizar las formas de onda ideales de entrada y salida con el osciloscopio para comprender y fomentar la educación de los alumnos de la carrera en los laboratorios de electrónica de potencia y tener un mejor aprendizaje.

#### 3.1. Desarrollo

Como parte del desarrollo del proyecto se resuelve problemas prácticos con guías del análisis teórico, la implementación del módulo de electrónica de potencia que permite comprobar mediante los resultados finales y la eficiencia de este proyecto experimental utilizando dispositivos estudiados en las asignaturas de la carrera. La implementación de todos los componentes dentro del módulo también permitirá que los estudiantes puedan observar cómo construir los circuitos como: detector de cruce por cero, control de disparo, control de SCR's y finalmente el conversor que como anteriormente analizamos está conformado por tiristores.

**Figura 16**

*Modulo conversor controlado monofásico*



*Nota. En la figura se muestra el módulo ejecutado para el laboratorio de electrónica de potencia.*

### 3.2. Circuito de control

El circuito de control puesto en marcha está formado por un Arduino Nano como fue antes analizado se divide en dos etapas que se muestra en la figura 17.

La etapa 1 es la alimentación principal donde la entrada de voltaje monofásica VAC (120VAC), el funcionamiento de esta entrada es realizar la detección de cruce por cero para sincronizar los pulsos que entrega la etapa 2 con la señal continua para poder mantener controlada la potencia que ingresa a la carga donde el circuito consta de:

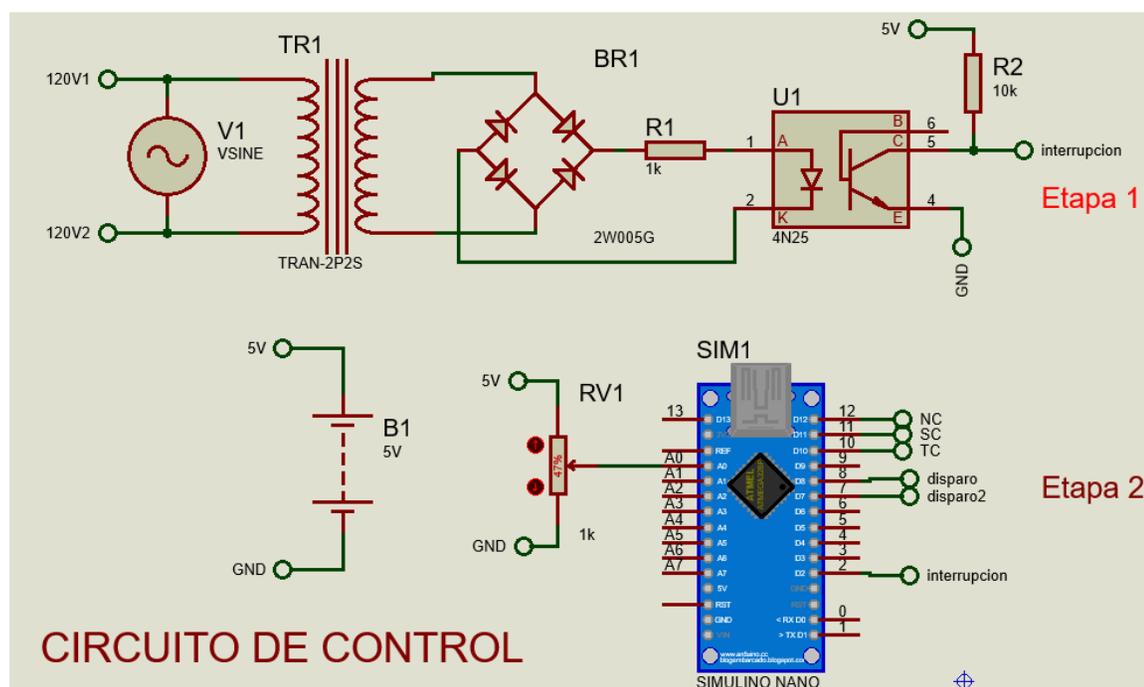
- Un opto acoplador 4N25 que tiene como objetivo realizar la detección de cruce por cero de la señal de entrada.

La etapa 2 es donde el software genera pulsos para los 4 SCR's incorporados mediante una línea de programación que ejecuta el Arduino por medio de la cual se obtiene la señal analógica continua, es decir, el pulso que genera 4N25 también se

debe mediar el voltaje debido a que se trabaja con valores superiores a 5V por lo cual se colocaron resistencias para reducir la tensión antes de la entrada al microcontrolador a partir de esta etapa se implementa el circuito de potencia.

**Figura 17**

*Circuito de control del módulo conversor controlado monofásico AC/DC*



*Nota. En la figura se muestra el módulo implementado para el laboratorio de electrónica de potencia.*

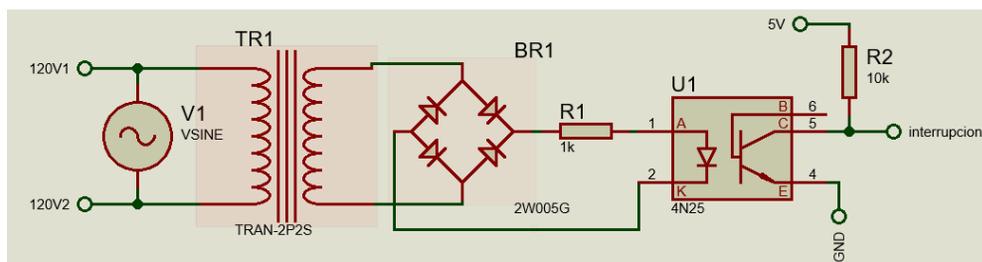
### 3.2.1. Circuito cruce por cero

Los 110 VAC que ingresan de la red son necesarios para el circuito de control para que se pueda sincronizar y controlar los pulsos de la onda donde en 16,60ms la onda completa un ciclo.

El circuito detecta el cruce por cero a los 8,80ms este proceso lo realiza el opto acoplador con la entrada de 12 VAC que se obtiene de la red mediante el transformador reductor, se debe tomar en cuenta que en forma real los valores tendrán una variación con respecto a los que indica el equipo se debe tomar en cuenta que antes de realizar el uso se realiza mediciones para evitar fallas o pueda que presenten daños.

### Figura 18

*Detector de cruce por cero con opto acoplador a la entrada monofásica*

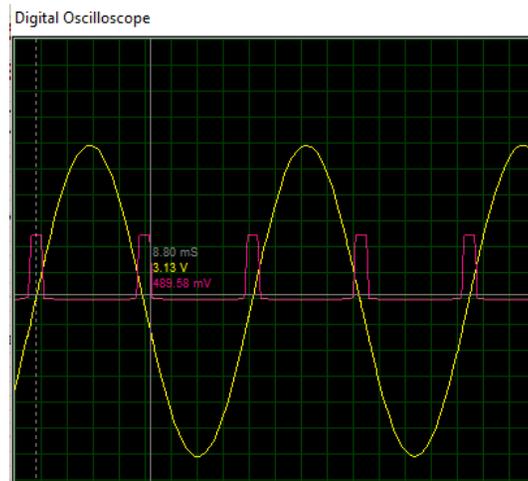


*Nota. En la figura se muestra el circuito detector de cruce por cero simulado integrado con un opto acoplador 4N25 y un puente de diodos alimentado con le energía de la red.*

En la salida el pulso que ayuda a detectar el cruce por cero de la onda sinusoidal como se muestra en la figura 19, a continuación se construye con la etapa en la cual se encuentra el pulso del microcontrolador la cual mediante la programación los pulsos nos ayude a controlar los elementos semiconductores del convertiros AC/DC, también se debe amplificar los pulsos ya que existe una caída de tensión la cual se presenta mediante la conexión de los semiconductores que se encuentran en la etapa de control.

## Figura 19

*Pulso del 4N25 detector de cruce por cero desde el osciloscopio*



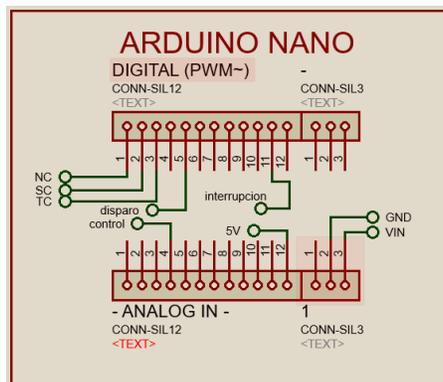
*Nota. En la figura se muestra el pulso generado por el detector de cruce por cero efectuado por el opto acoplador 4N25.*

### **3.2.2. Lectura del detector de cruce por cero**

Se debe tomar en cuenta que el voltaje que ingrese al microcontrolador no sea superior a 5VAC al ser una entrada analógica solo admite lecturas TTL (como máximo 5V), de no ser así se ocasionaría daños al pin o puerto que nos ayudara a leer la variable analógica y los daños no podrían ser solucionados, se asigna el pin 12 para la lectura como se muestra en la figura 20.

**Figura 20**

*Arduino Nano distribución de pines entradas y salidas.*



*Nota. En la figura se muestra la distribución de pines de Arduino Nano donde se generan los pulsos y para las demás conexiones del circuito.*

### **3.2.3. Entrada digital**

En esta entrada se lee la señal de salida del circuito de detección de cruce por cero donde se define a que instante empieza cada ciclo. Este circuito es imprescindible para una correcta sincronización.

### **3.2.4. Entrada analógica**

En esta entrada se lee el valor del potenciómetro que define el tiempo que dura un semiciclo para establecer el ángulo de disparo del primero de los tiristores utilizando en el bloque de potencia. El disparo del segundo tiristor se efectuada después de primero. El potenciómetro esta alimentado con 5V proporcionada por el Arduino Nano que se conecta al pin 3 de entrada a través de un seguidor de tensión para aislar las impedancias ya que la entrada es mayor que la salida además que consumirá una intensidad mínima y no necesita ser conectado a un opto acoplador ya que al no estar conectado de forma directa a una fuente externa no lo necesita.

### 3.2.5. Salida digital

- La señal de cruce por cero como un momento inicial del ciclo
- La posición del potenciómetro como tiempo e retraso

La lectura de la variable se define como un constante *disparo 2* y para realizar la detección de pulsos se necesita la activación de la resistencia interna del Arduino, cuando el pulso del detector de cruce por cero sea detectado se activará la interrupción del cruce por cero e inicia el reloj del Arduino el código de programación que realiza este proceso es el siguiente:

#### Figura 21

*Lectura de la constante de disparo 2*

```
int disparo = 8;  
int disparo2 = 7;  
int tiempo;  
int valor;
```

*Nota. En la figura se muestra la lectura de la constante de disparo 2.*

La variable que activa la interrupción que detecta el detector de cruce por cero es `attachInterrupt`, la línea de código que permite iniciar el tiempo que se tarda en leer la variable de alimentación VAC.

## Figura 22

*Variable de interrupción*

```
Serial.begin(9600);
pinMode(disparo, OUTPUT);
pinMode(disparo2, OUTPUT);
attachInterrupt(0, setAC, RISING);
pinMode(12, INPUT);
pinMode(11, INPUT);
pinMode(10, INPUT);
```

*Nota. En la figura se muestra la variable de interrupción en la línea de código.*

Los temporizadores del Arduino cuando se disparan utiliza las siguientes ilustraciones declaradas en el *void set up* del programa para evitar saturaciones se utiliza la siguiente orden:

## Figura 23

*Declaración en void set up*

```
else if (E1==0 && E2==0 && E3==1){
  valor=analogRead(A0);
  valor=map(valor,0,1023,89,11);
  tiempo=(83^valor);
  delayMicroseconds(tiempo);
  digitalWrite(disparo, HIGH);
  digitalWrite(disparo2, HIGH);}
  delayMicroseconds(20);
  digitalWrite(disparo, LOW);
  digitalWrite(disparo2, LOW);
```

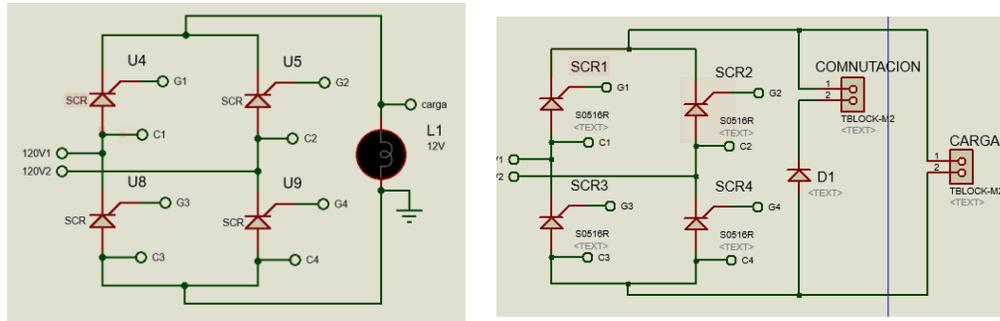
*Nota. En la figura se muestra la declaración en void set up en la línea de programación.*

### 3.3. Circuito de potencia

El circuito de potencia del convertor AC/DC monofásico controlado pasa por alto la señal rectificadora de la corriente alterna monofásica, el puente rectificador está implementado como onda completa el cual está compuesto por 4 dispositivos semiconductores tiristores TIC106D conectados en paralelo como se muestra en la figura 24.

**Figura 24**

*Circuito de control conversor onda completa controlado*



*Nota. En la figura se muestra el conversor controlado con un diodo de conmutación implementado.*

A la salida del conversor se colocó un diodo de conmutación el cual permite que la carga inductiva cuando está conectada a la carga corte las señales generadas, esta forma de conexión es conocida como diodo de libre circulación el cual se debe conectar en paralelo a la carga con el osciloscopio podremos verificar el correcto funcionamiento donde mediante las formas de onda producidas por la carga y la entrada nos permitirá comprobar dicho funcionamiento, cuando se conecta una carga R no podremos observar el funcionamiento.

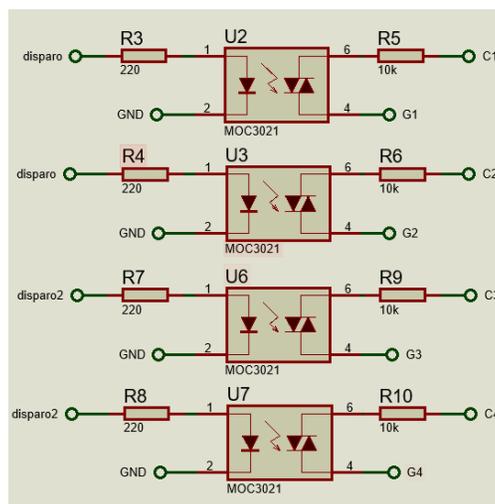
### **3.3.1. Control de Disparo**

Cundo los tiristores se conectan se genera una caída de tensión y la corriente en el circuito aumenta, se realiza el acoplamiento al circuito de potencia y control mediante opto acopladores como se muestra en la figura 22 también se puede utilizar un transformador reductor en este caso de utilizo opto acopladores MOC3021.

El circuito de disparo o "Trigger" se encargará de indicar el comienzo de la parte útil de la señal de entrada, básicamente cuando la señal pase a ser bien mayor o bien menor que un nivel de referencia que será fijado por la salida del conversor.

**Figura 25**

*Circuito de control de disparo*



*Nota. En la figura se muestra control de disparo a los tiristores.*

### 3.4. Ángulo de disparo

El ángulo de disparo para este conversor va desde los  $0^\circ$  a los  $180^\circ$ , es decir, solo se mueve en el semiciclo positivo, para poder realizar esto se debe tener un voltaje de referencia el cual será proporcionado por el operador del módulo. El control del ángulo de disparo está constituido por un potenciómetro de 1k alimentado con 5 VDC este dispositivo proporciona que la entrada analógica de 0V a 5V el cual realiza un escalamiento mediante una ecuación para convertir ese voltaje en un ángulo de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  y en el código de programación el comando *map* los convierte en 0 a 1023 bits

donde el Arduino Nano lee la lectura de la variable analógica a una escala de 89 a 11 bits como se muestra en la línea de código y en la figura 26:

### Figura 26

Comando map

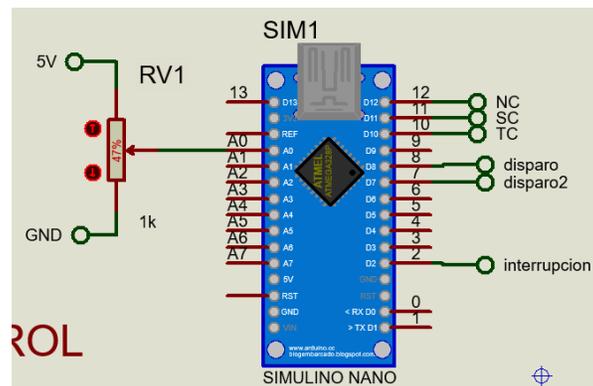
```
else if (E1==0 && E2==0 && E3==1){
  valor=analogRead(A0);
  valor=map(valor,0,1023,89,11);
  tiempo=(83*valor);
}
```

*Nota. En la figura se muestra el comando map en la línea de programación.*

Para el control del ángulo de disparo se tiene un potenciómetro de 1k alimentado con una fuente de 5VDC como se observa en la siguiente figura 27, el valor del potenciómetro depende de las pruebas que se le realice al módulo.

### Figura 27

Lectura de ángulo de disparo



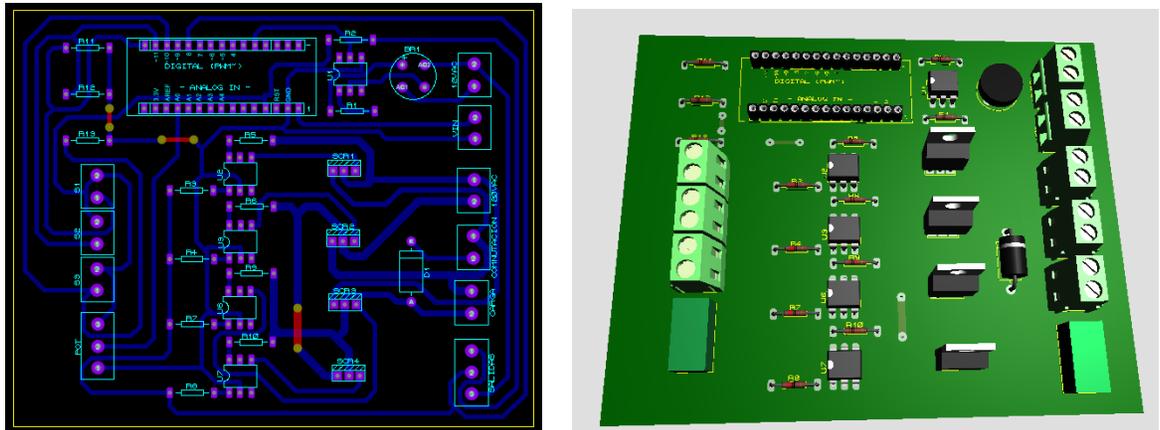
*Nota. En la figura se muestra el potenciómetro de 1k el cual genera la lectura del ángulo de disparo.*

### 3.5. Placa del conversor AC/DC controlado monofásico

La placa realizada para el módulo se la realizó en Proteus la cual nos ayudó a crear las pistas de forma automática colocando los elementos en la posición adecuada como se muestra en la figura 28 para poderlo realizar el montaje y soldadura de los mismos, en caso de que se necesite realizar cambios en la línea de programación se realizará directamente en la placa sin retirarla de la caja.

**Figura 28**

*Diseño de pistas en la placa de conversor AC/DC monofásico onda completa*

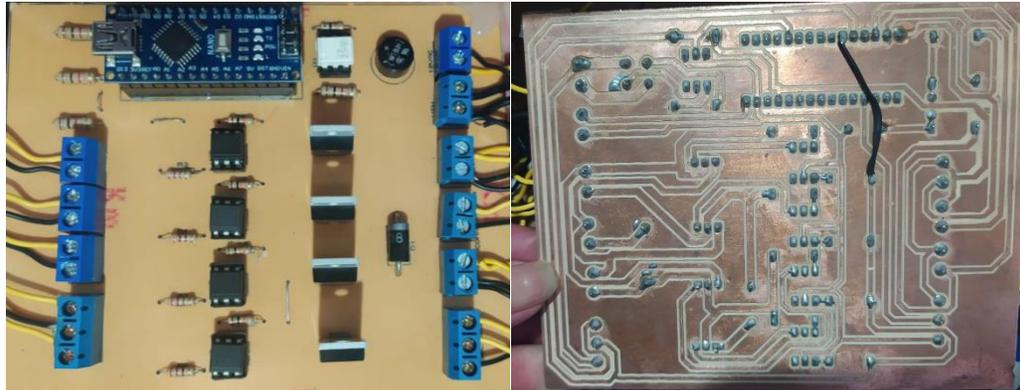


*Nota. En la figura se muestra el diseño de las pistas en la placa del conversor en PCB layout y una vista en 3D.*

Una vez que se realizaron las pistas se realizó el montaje de los elementos en la baquelita y posteriormente se procedió a soldar cada elemento en el lugar designado de la placa como se muestra en la figura 29:

**Figura 29**

*Montaje y soldadura de elementos en la placa de baquelita*



*Nota. En la figura se muestra el montaje de los elementos y la soldadura de los elementos a la placa de baquelita.*

Después de realizar la soldadura de los elementos con la ayuda de un multímetro verificamos la continuidad en las pistas para poder realizar las respectivas pruebas y corregir las fallas que puedan existir en las pistas ya que los elementos utilizados pueden dañarse y podemos ocasionar daños a las pistas.

### **3.6. Conversor AC/DC controlado monofásico**

El conversor AC/DC controlado monofásico de onda completa ya implementado, para realizar la prueba del proyecto se la realizo con una carga resistiva esta puede ser una resistencia una resistencia común en este caso se realizó la prueba con una lámpara en esta carga R se pudo observar las formas de onda ideales de entrada y salida en el osciloscopio.

### 3.7. Conversor AC/DC controlado con carga resistiva

El un conversor AC/DC los armónicos que se generan no son tan notables en este caso se conecta a una lámpara para la prueba y las ondas que se observan a la salida, el conversor no puede generar el mismo resultado si se conecta una resistencia de baja potencia ya que se generaría un corto circuito.

### 3.8. Formas de onda de una carga resistiva generadas en el osciloscopio

Los ángulos de disparo se generan formas de onda dependiendo de las diferentes posiciones como se detallan en la tabla 3.

**Tabla 3**

*Datos de simulación del conversor AC/DC controlado con carga resistiva.*

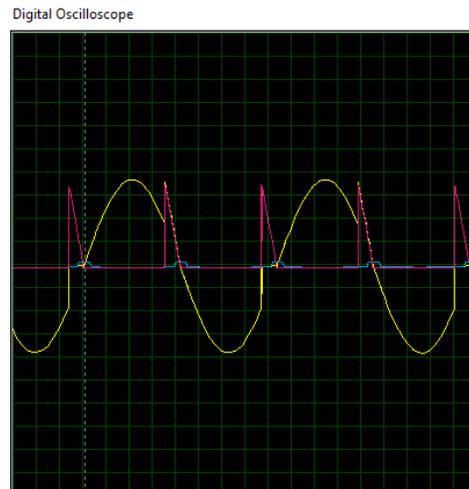
Demostración	Angulo de disparo	Simulación
1	0°	La corriente en la carga no presenta voltaje
2	60°	La corriente en la carga no presenta voltaje
3	120°	La corriente en la carga no presenta voltaje
4	180°	La corriente en la carga no presenta voltaje

*Nota. En la tabla se describe los datos obtenidos en la simulación*

Se conecta una carga resistiva en diferentes grados indicando la señal de entrada, pulsos y salida con sus respectivas formas de onda todo esto se muestra en las figuras 30, 31, 32, 33.

**Figura 30**

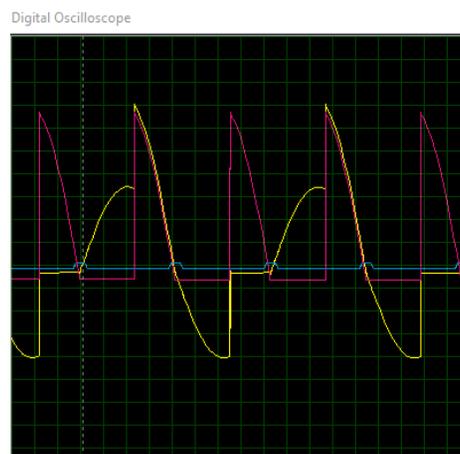
Ángulo de disparo  $0^\circ$  grados con carga resistiva (R)



Nota. En la figura se muestra la forma de onda con un ángulo de disparo de  $0^\circ$  voltaje de salida (magenta), pulso (azul), entrada (amarillo).

**Figura 31**

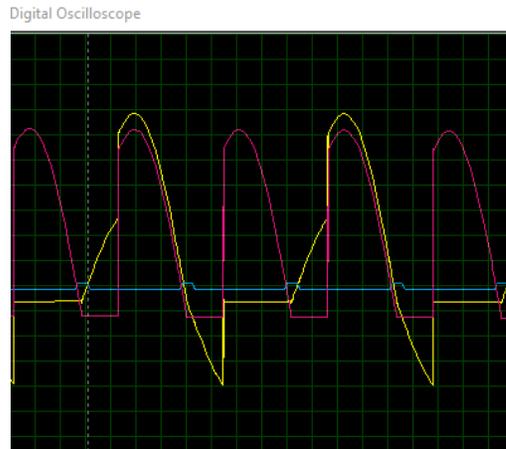
Ángulo de disparo  $60^\circ$  grados con carga resistiva (R)



Nota. En la figura se muestra la forma de onda con un ángulo de disparo de  $60^\circ$  voltaje de salida (magenta), pulso (azul), entrada (amarillo).

**Figura 32**

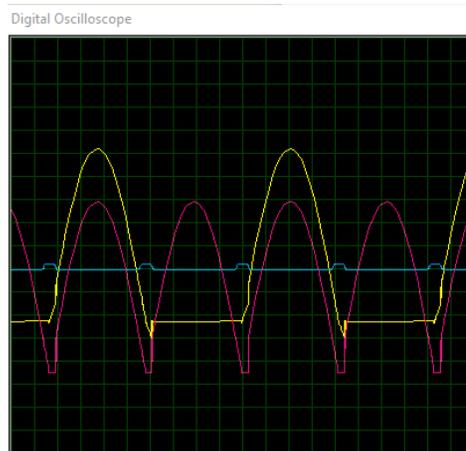
Ángulo de disparo  $120^\circ$  grados con carga resistiva (R)



*Nota. En la figura se muestra la forma de onda con un ángulo de disparo de  $120^\circ$  voltaje de salida (magenta), pulso (azul), entrada (amarillo).*

**Figura 33**

Ángulo de disparo  $180^\circ$  grados con carga resistiva (R)



*Nota. En la figura se muestra la forma de onda con un ángulo de disparo de  $180^\circ$  voltaje de salida (magenta), pulso (azul), entrada (amarillo).*

### 3.9. Conversor AC/DC controlado con carga resistiva inductiva

El conversor AC/DC cuando se conecta una carga resistiva-inductiva (motor) genera armónicos debido al voltaje con el que se alimenta la carga, se realiza las pruebas hay que tener en cuenta que las formas de onda que se presentan a en las simulaciones son diferentes a las que se podrá observar en el osciloscopio del laboratorio.

### 3.10. Formas de onda simuladas de una carga resistiva inductiva

Las formas de onda muestran la potencia que es entregada por el conversor a la carga resistiva – inductiva para las pruebas a realizar con diferentes ángulos de disparo como se detallan en la tabla 4.

**Tabla 4**

*Datos de simulación del conversor AC/DC controlado con carga resistiva- inductiva.*

Demostración	Ángulo de disparo	Simulación
1	0°	Al conectar un carga resistiva-inductiva se genera un voltaje negativo la carga R es el semiciclo positivo y la carga L es el semiciclo negativo.
2	60°	Al conectar un carga resistiva-inductiva se genera un voltaje negativo la carga R es el semiciclo positivo y la carga L es el semiciclo negativo.
Prueba	Ángulo de disparo	Simulación
3	120°	Al conectar un carga resistiva-inductiva se genera un voltaje negativo la carga R es el semiciclo positivo y la carga L es el semiciclo negativo.
4	180°	La corriente en la carga no presenta voltaje

*Nota. En la tabla se describe las observaciones referentes a las pruebas de simulación.*

Se conecta una carga resistiva-inductiva en diferentes grados indicando la señal de entrada, pulsos y salida con sus respectivas formas de onda todo esto se muestra en las figuras 34, 35, 36, 37.

### Figura 34

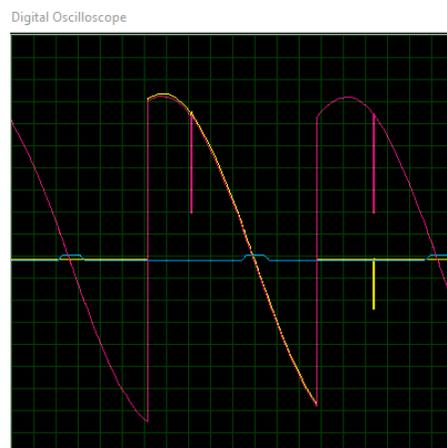
*Ángulo de disparo  $0^\circ$  grados con carga resistiva-inductiva*



*Nota. En la figura se muestra la forma de onda con un ángulo de disparo de  $0^\circ$  voltaje de salida (magenta), pulso (azul), entrada (amarillo).*

### Figura 35

*Ángulo de disparo  $60^\circ$  grados con carga resistiva-inductiva*



*Nota. En la figura se muestra la forma de onda con un ángulo de disparo de 60° voltaje de salida (magenta), pulso (azul), entrada (amarillo).*

### **Figura 36**

*Ángulo de disparo 120° grados con carga resistiva-inductiva*



*Nota. En la figura se muestra la forma de onda con un ángulo de disparo de 120° voltaje de salida (magenta), pulso (azul), entrada (amarillo).*

### **Figura 37**

*Ángulo de disparo 180° grados con carga resistiva-inductiva*



*Nota. En la figura se muestra la forma de onda con un ángulo de disparo de 180° voltaje de salida (magenta), pulso (azul), entrada (amarillo).*

## Cspítulo IV

### 4. Conclusiones y recomendaciones

#### 4.1. Conclusiones

- El objetivo principal de este trabajo de titulación se implementó el módulo de un conversor AC/DC totalmente controlada el cual ayudará al aprendizaje de electrónica de potencia.
- Por lo tanto, el aporte principal de este trabajo de titulación consiste en la implementación y diseño del conversor con el objetivo de observar su funcionamiento de todos los elementos que lo componen este módulo podría ser considerado como un proyecto donde se puede realizar prácticas de laboratorio.
- En este trabajo de titulación se demuestra que la implementación del módulo presenta una gran ventaja y versatilidad.
- La principal característica de un conversor monofásico controlado es que maneja dos cuadrantes, es decir que puede dar y recibir potencia. En cargas resistivas o cargas R el comportamiento de un rectificador monofásico controlado es igual que el de un rectificador monofásico semicontrolado.
- La diferencia se encuentra en cargas inductivas o cargas L, por ejemplo, con el motor dc con el que se realizó las pruebas poniendo a este motor a correr a máxima velocidad, y queremos que se detenga en un segundo. Ya que sus formas de onda reflejan que con diodo de libre circulación en cargas resistivas no encontramos mayor inconveniente con los armónicos a diferencia de las cargas resistivas-inductivas o cargas RL.

- En un rectificador semicontrolado no es posible detener a un motor dc corriendo en su máxima velocidad, ya que no puede recibir energía de la carga, entonces se debe esperar a que la inercia pare al motor, en cambio en un rectificador totalmente controlado al poder recibir energía de la carga esto si es posible. Debido a esto cuando se requiere realizar un control en donde se quiera que un motor tenga una buena respuesta dinámica tanto en aceleración como en desaceleración se debe usar un rectificador totalmente controlado.
- Dentro de los objetivos más relevantes de la implementación del módulo como una herramienta que resulta ser versátil y óptima para el aprendizaje de convertidores dentro de la asignatura de electrónica de potencia.
- El resultado de este trabajo de titulación es que al realizar prácticas los estudiantes puedan entender cómo funciona cada elemento y cuál es la importancia de aprender con pequeños circuitos lo que se presentara en industrias en la vida real.

## 4.2. Recomendaciones

- Es importante tener conocimientos básicos de electrónica de potencia para realizar los procesos adecuados e implementarlos de la forma correcta.
- Se debe tener en cuenta el funcionamiento del elemento que utilizamos para que no existan daños en los mismos ya que algunos de estos elementos tienen su hoja de datos donde especifica que es lo que soporta y como funciona.
- Tener cuidado ya que se manejan voltajes y corrientes relativamente altas.
- Siempre realizar simulaciones previas para entender como es a la conexión y montaje del circuito.
- Realizar el montaje parte por parte e ir probando una por una. Si algo funciona mal el rectificador funcionara mal y así estaremos a tiempo de corregirlo.
- Tener en cuenta que la fuente de 12 V debe ser una fuente aislada.
- Como carga se puede usar un bombillo incandescente como se realizó en la prueba.
- En caso de daños en un componente reemplazarlo por alguno que tenga características similares.
- Para el diseño del módulo conversor AC/DC controlado se tomó los circuitos de tal forma que al realizar una práctica sea más entendible lo que deseamos analizar.

## Bibliografía

Aguayo, P. (23 de Septiembre de 2019). Arduino.cl. Recuperado el 17 de Agosto de 2021, de <https://arduino.cl/arduino-uno/>

Álvarez Acevedo, F. (2016). Álvarez Acevedo, Francisco. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2183/16515>

Arduino.cl. (Enero de 2019). Recuperado el 26 de Agosto de 2021, de <https://arduino.cl/que-es-arduino/>

Barron, E. C. (2019). Rectificadores . Scielo, 15.

Damian, J. (4 de Marzo de 2020). Electrogeek. Recuperado el 03 de Septiembre de 2021, de <https://www.electrogeekshop.com/arduino-nano-pinout-y-caracteristicas/>

Electronica, W. (9 de Julio de 2020). wILAEBEA ELECTRONICA. Recuperado el 18 de Septiembre de 2021, de <https://wilaebaelectronica.blogspot.com>

Galeano, M. (Mayo de 2016). Rectificadores Controlados. Recuperado el 08 de Septiembre de 2021, de <https://www.uv.es/emaset/iep00/IEP6-0607.pdf>

Gonzales, G. D. (2019). Introduccion a la electronica de potencia. Chile: Santa Fe S.A.

Hart, D. W. (2017). Electronica de Potencia. En D. W. Hart, Introduccion a la Electronica de Potencia (págs. 3-5). Madrid. Balboa: Prentice Hall.

Jarrín, A. N. (Septiembre de 2017). Implementacion de una fuente de corriente continua . Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F

%2Fbibdigital.epn.edu.ec%2Fbitstream%2F15000%2F18779%2F1%2FCD-8168.pdf&cflen=3454312

Lander. (2018). Converters. En C. Lander, Power Electronics (págs. 78-122). California: Book Company.

Londrina. (2018). Convertidores CA/CC. Sao Pablo: Foroni.

Luzuriaga, M. J. (Diciembre de 2018). Revistas Ute. Recuperado el 18 de Agosto de 2021, de <https://revistas.ute.edu.ec/index.php/tsafiqui/article/download/24/23/37>

Mallada, U. R. (Febrero de 2016). "Sensitivity Analyses in AC-DC Converters Optimal Design". En P. G. Leyva, International Symposium on Industrial Electronics (págs. 358-364). ISIE BOOK. Obtenido de [sequence%3D1&cflen=3018196](https://www.scribd.com/document/354168170/Informe-Convertor-Ac-Dc-semicontrolado)

Martin, J. C. (2017). Electronica de Potencia. Madrid: Editex S.A.

Matulic, I. (14 de Noviembre de 2019). Scielo. Recuperado el 19 de Agosto de 2021, de <http://www.scielo.org.bo/>

Mayorga, O. (26 de Octubre de 2016). Control Electronico de Potencia. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/354168170/Informe-Convertor-Ac-Dc-semicontrolado>

Peña, A. (2016). Convertidores AC-DC. En M. Hernández, Electronica de Potencia (págs. 123 - 140). Madrid: Marcombo.

Rashid, M. H. (Julio de 2020). Areatecnologica. Recuperado el 12 de Agosto de 2021, de <https://www.areatecnologia.com/>

Robert W. Erickson, D. M. (2016). "Fundamentals of power electronics". Ed. Kluwer Academic Publisher.

Santos, A. G. (Junio de 2018). Rectificadores AC/DC. Obtenido de [https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/21194/Gonz%C3%A1lezSantos\\_Alejandro\\_TFG\\_2018.pdf](https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/21194/Gonz%C3%A1lezSantos_Alejandro_TFG_2018.pdf)

Seguier, G. (2020). Electronica de potencia. los Convertidores estáyicos de energia, Conversion Alterna - Continua. Barcelona: McGraw-Hill.

Silva, C. V. (2020). Electronica para todos con el uso de Arduino. Scielo, 6-12.

# **Anexos**