

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO, PARA EL CONTROL DE UN MOTOR TRIFÁSICO

TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN
ELECTROMECAÁNICA

PADILLA TITUAÑA XAVIER ALEXANDER

xavier.padilla@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. PROAÑO CHAMORRO PABLO ANDRÉS

pablo.proano@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. ROMO HERRERA CARLOS ORLANDO

carlos.romo@epn.edu.ec

Quito, Octubre, 2017

DECLARACIÓN

Yo, Padilla Tituaña Xavier Alexander declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Padilla Tituaña Xavier Alexander

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Padilla Tituaña Xavier Alexander, bajo mi supervisión.

Ing. Pablo Proaño Chamorro

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Carlos Romo Herrera

CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Primeramente a Dios por bendecirme día a día a lo largo de mis estudios, brindándome sabiduría y entendimiento para culminar con éxito mi carrera.

A mi padre Angel Padilla le agradezco por nunca dejarme solo, por convertirse en el amigo que nunca falla, por sus consejos, su tiempo, su cariño y sobre todo por la comprensión en todo momento, ya que sin usted a mi lado, creo que no lo hubiese logrado.

A mi madre Mariana Tituaña le agradezco por enseñarme que hay un Dios que nos ama y nos ayuda, por ser una madre que siempre vela por el bienestar de su familia, por su cariño, consejos y sobre todo sus oraciones para que día a día me vaya de la mejor manera.

A mi hermana Verónica Padilla le agradezco por su apoyo incondicional, por ser un modelo a seguir y sobre todo por confiar en mí en todo momento.

Agradezco al Ing. Pablo Proaño por su tiempo, paciencia y dedicación que brindo hacia este proyecto y mi persona para alcanzar el objetivo propuesto.

Agradezco al Ing. Carlos Romo por su ayuda y aporte para terminar con éxito el presente proyecto.

Agradezco a la Escuela Politécnica Nacional conjuntamente con la Escuela de Formación de Tecnólogos por brindarme acertadamente todos los conocimientos fundamentales para nuestra vida profesional.

Finalmente a toda mi familia que en su momento supieron ayudarme, a mis amigos de la universidad con los cuales pasamos momentos buenos y malos.

Xavier Padilla T.

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico en especial a mis padres Angel y Mariana, quienes depositaron su confianza en mí y de mi parte no los defraude, espero que siempre se sientan orgullosos de mí, como yo me siento de ustedes.

A mis hermanos Verónica y Jhon, quienes me enseñaron un momento de cosas pero lo más importante el saber llevarnos como hermanos.

A mi tío Carlitos, quien siempre me aconsejo y motivo para enfrentar cada dificultad que se me presentaba con el objetito de culminar mis estudios.

A mi hijo Emilio, quien fue el motor para luchar y conseguir culminar este sueño.

A mi novia Valeria, quien siempre me dio ánimos, fuerzas y sobretodo su cariño para enfrentar con valentía todo lo que se me ponía al frente.

A mis abuelitos Juan Manuel (+) y María Delia (+), aunque ya no estén conmigo, siempre los llevare en el corazón.

Xavier Padilla T.

TABLA DE CONTENIDOS

| | |
|--|----|
| RESUMEN..... | 1 |
| INTRODUCCIÓN..... | 2 |
| OBJETIVOS..... | 3 |
| CAPÍTULO I..... | 4 |
| 1. MARCO TEÓRICO | 4 |
| 1.1. MICROCONTROLADOR..... | 4 |
| 1.1.1. MICROCONTROLADOR ATMEL AVR..... | 4 |
| 1.1.2. ENTRADAS Y SALIDAS..... | 4 |
| 1.1.3. TIMER..... | 5 |
| 1.1.4. CONVERTOR ADC | 5 |
| 1.2. MÁQUINAS ELÉCTRICAS..... | 6 |
| 1.2.1. MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN | 7 |
| 1.2.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN .. | 7 |
| 1.3. MÉTODOS DE ARRANQUE | 8 |
| 1.3.1. ARRANQUE DIRECTO | 9 |
| 1.3.2. ARRANQUE EN ESTRELLA – TRIÁNGULO | 9 |
| 1.3.3. OTROS MÉTODOS..... | 10 |
| 1.4. FRENADO..... | 11 |
| 1.5. ACCIONADORES DE POTENCIA | 12 |
| 1.5.1. CONTACTOR ELECTROMAGNÉTICO..... | 12 |
| 1.5.2. RELÉ | 14 |
| CAPÍTULO II..... | 15 |
| 2. EJECUCIÓN Y RESULTADOS..... | 15 |
| 2.1. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA Y ELÉCTRICA | 16 |
| 2.1.1. MÓDULO DEL MOTOR TRIFÁSICO..... | 16 |
| 2.1.2. MÓDULO DE FUERZA..... | 17 |
| 2.1.3. PANEL DE CONTROL..... | 21 |
| 2.2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA | 25 |
| 2.2.1. ALIMENTACIÓN CONTINUA (DC)..... | 25 |
| 2.2.2. ALIMENTACIÓN MONOFÁSICA Y TRIFÁSICA..... | 26 |
| 2.3. DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE LA PLACA ELECTRÓNICA..... | 27 |
| 2.3.1. FABRICACIÓN DE PLACAS ELECTRÓNICAS..... | 27 |

| | |
|--|----|
| 2.3.2. PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR ATMEL 164P | 35 |
| 2.3.3. ESTADOS DE OPERACIÓN | 35 |
| 2.4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA PRINCIPAL..... | 45 |
| 2.5. PRUEBAS Y RESULTADOS OBTENIDOS..... | 47 |
| 2.5.1. VOLTAJES DE ALIMENTACIÓN AC Y DC | 47 |
| 2.5.2. FUNCIONAMIENTO DE LOS ARRANQUES..... | 48 |
| 2.5.3. VERIFICACIÓN DE FUNCIONES DEL MÓDULO DIDÁCTICO | 48 |
| 2.5.4. MECANISMO DE FRENO | 49 |
| CAPÍTULO III..... | 56 |
| 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 56 |
| 3.1. CONCLUSIONES..... | 56 |
| 3.2. RECOMENDACIONES | 57 |
| BIIBLIOGRAFÍA..... | 58 |
| ANEXOS..... | 61 |
| ANEXO A: MANUAL DE FUNCIONAMIENTO..... | 62 |
| ANEXO B: CIRCUITOS ELECTRÓNICOS Y ELÉCTRICOS..... | 67 |
| ANEXO C: PLACAS ELECTRÓNICAS..... | 70 |
| ANEXO D: DIAGRAMAS DE FLUJO..... | 72 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Microcontrolador..... | 4 |
| Figura 1.2 Tipos de rotor de un motor de inducción..... | 7 |
| Figura 1.3 Esquema de arranque directo..... | 9 |
| Figura 1.4 Esquema de arranque estrella – triángulo..... | 10 |
| Figura 1.5 Esquema de funcionamiento de un accionador de potencia..... | 12 |
| Figura 2.1 Módulo didáctico real..... | 15 |
| Figura 2.2 Módulo del motor trifásico..... | 17 |
| Figura 2.3 Accionamiento de contactores para el control del motor trifásico..... | 19 |
| Figura 2.4 Circuito de fuerza del módulo didáctico..... | 20 |
| Figura 2.5 Módulo de fuerza del módulo didáctico..... | 21 |
| Figura 2.6 Conexión del selector de 3 posiciones..... | 22 |
| Figura 2.7 Conexión del selector de 2 posiciones..... | 22 |
| Figura 2.8 Conexión del pulsador normalmente abierto..... | 23 |
| Figura 2.9 Conexión del Potenciómetro..... | 23 |
| Figura 2.10 Conexión Reset..... | 24 |
| Figura 2.11 Panel de control del módulo didáctico..... | 24 |
| Figura 2.12 Fuente de alimentación DC..... | 25 |
| Figura 2.13 Conexión de la fuente de alimentación DC..... | 26 |
| Figura 2.14 Distribución eléctrica del módulo didáctico..... | 26 |
| Figura 2.15 Conexión de entradas y salidas al microcontrolador Atmega 164P..... | 28 |
| Figura 2.16 Conexión de verificación de encendido de la fuente de alimentación.... | 29 |
| Figura 2.17 Circuito impreso de control..... | 30 |
| Figura 2.18 Circuito activador para accionadores de potencia para contactores..... | 31 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.19 Circuito activador para accionadores de potencia para el freno DC..... | 32 |
| Figura 2.20 Configuración Chopper..... | 32 |
| Figura 2.21 Conexión del transformador para obtener 24 AC en la salida..... | 33 |
| Figura 2.22 Circuito impreso de acoplamiento de voltaje..... | 35 |
| Figura 2.23 Mapa de estados de operación..... | 36 |
| Figura 2.24 Visualización del estado 1 del módulo didáctico..... | 36 |
| Figura 2.25 Visualización del estado 2 del módulo didáctico..... | 37 |
| Figura 2.26 Mensaje de restricción al invertir el giro en funcionamiento manual..... | 38 |
| Figura 2.27 Mensaje de restricción al presionar botones erróneos..... | 38 |
| Figura 2.28 Visualización del estado 3 del módulo didáctico..... | 39 |
| Figura 2.29 Visualización del estado 4 del módulo didáctico..... | 40 |
| Figura 2.30 Visualización del estado 5 del módulo didáctico..... | 41 |
| Figura 2.31 Visualización del estado 6 del módulo didáctico..... | 42 |
| Figura 2.32 Visualización del estado 7 del módulo didáctico..... | 43 |
| Figura 2.33 Visualización del estado 8 del módulo didáctico..... | 43 |
| Figura 2.34 Prototipo del módulo didáctico..... | 46 |
| Figura 2.35 Módulo didáctico final..... | 46 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1 Voltajes de alimentación AC y DC..... | 47 |
| Tabla 2.2 Corriente nominal y arranque en conexión estrella y delta..... | 48 |
| Tabla 2.3 Evaluación de las funciones del módulo didáctico..... | 48 |
| Tabla 2.4 Tiempo de frenado para ciertos porcentajes de freno..... | 49 |
| Tabla 2.5 Tiempos de frenado para los dos formas de freno..... | 50 |
| Tabla 2.6 Voltajes obtenidos para ciertos porcentajes de freno..... | 51 |
| Tabla 2.7 Corrientes obtenidas para ciertos porcentajes de freno..... | 51 |
| Tabla 2.8 Variación del tiempo a diferentes voltajes..... | 52 |
| Tabla 2.9 Señal PWM a diferentes porcentajes de freno..... | 54 |

RESUMEN

En el presente proyecto se diseña e implementa un módulo didáctico para controlar el arranque, frenado e inversión de giro de un motor de inducción mediante el microcontrolador Atmega 164P.

Este trabajo permitió brindar a los estudiantes de la Escuela de Formación de Tecnólogos un módulo didáctico, en el cual se evidencie el manejo de sistemas microprocesados para controlar dispositivos electrónicos de potencia, con lo cual el estudiante pueda emprender sus propios proyectos empleando estos dispositivos.

A continuación se describe el contenido de los tres capítulos que contiene el presente proyecto:

El capítulo uno, Marco Teórico, contiene los conceptos fundamentales y principios de funcionamiento del microcontrolador, máquinas eléctricas y accionadores de potencia.

El capítulo dos, Ejecución y Resultados, describe el diseño e implementación de: estructura mecánica y eléctrica, sistema de alimentación eléctrico, estructura principal, placas electrónicas y la programación del Atmel 164P. Además, describe las pruebas y resultados obtenidos del módulo didáctico.

El capítulo tres, Análisis de resultados, muestra las conclusiones y recomendaciones obtenidas de la aplicación y funcionamiento del módulo didáctico.

INTRODUCCIÓN

En Ecuador, se encuentra en auge la creación de tarjetas de control para comandar accionadores de potencia, ya que su versatilidad da al usuario un alto grado de confiabilidad comparable a los controladores lógicos programables (PLCS). Algunas de las aplicaciones están en campos como la domótica, pequeños procesos industriales y PYMES en general.

En la Escuela de Formación de Tecnólogos, no se evidencia en su formación la práctica en el manejo de elementos electrónicos de potencia con dispositivos microprocesados, ya que por el momento las prácticas de laboratorio se encuentran separadas en dos partes, una con niveles bajos de voltaje ($5 V_{DC}$ y $12 V_{DC}$) y otra con niveles medios de voltaje ($120 V_{AC}$ y $220 V_{AC}$), para solucionar este problema se construye un módulo didáctico en donde se visualice el funcionamiento de microcontroladores con 120 voltios de alterna.

En el presente proyecto, el módulo didáctico construido controla un motor trifásico de 0,75 Hp, utilizando un microcontrolador Atmel 164P, con el objetivo de que los estudiantes puedan relacionarse con el trabajo de motores de inducción, contactores electromagnéticos, acopladores de voltaje y sistemas microprocesados. Las funcionalidades del módulo didáctico son: arranque en estrella o triángulo, inversión de giro en reposo o en funcionamiento y frenado dinámico con corriente continua.

Para lo cual, se diseñó e implementó tres circuitos de operación que se encargan de realizar cada función del módulo didáctico, los cuales son: Control, Acoplamiento de Voltaje y Fuerza. Los circuitos de control y acoplamiento de voltaje fueron implementados en placas electrónicas, mientras que, el circuito de fuerza fue implementado en un módulo adicional usando elementos electromecánicos, además, para determinar la función que se desea realizar en el motor de inducción se construyó un panel de control. Tanto el panel de control como los tres circuitos de operación fueron integrados en una base de madera obteniendo el módulo didáctico final.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un módulo didáctico, para el control de un motor trifásico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los requerimientos para el diseño del módulo didáctico.
- Diseñar y construir el circuito de fuerza para el control del motor trifásico.
- Diseñar e integrar la alimentación eléctrica del módulo didáctico.
- Diseñar, construir y programar la placa electrónica para el control del motor trifásico.
- Diseñar y construir el armazón para el sistema, en base a los requerimientos del módulo didáctico.
- Integrar la parte electrónica con la eléctrica para el control del motor trifásico.
- Realizar las pruebas correspondientes para verificar el correcto funcionamiento del sistema.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. MICROCONTROLADOR

Un microcontrolador se define como un integrado programable que en su estructura interna y externa se asocia a un pequeño ordenador, ya que posee CPU, memorias, un sistema de reloj, reset, puertos de entrada y salida, entre otros como se muestra en la figura 1.1. (Velasco, 2005)

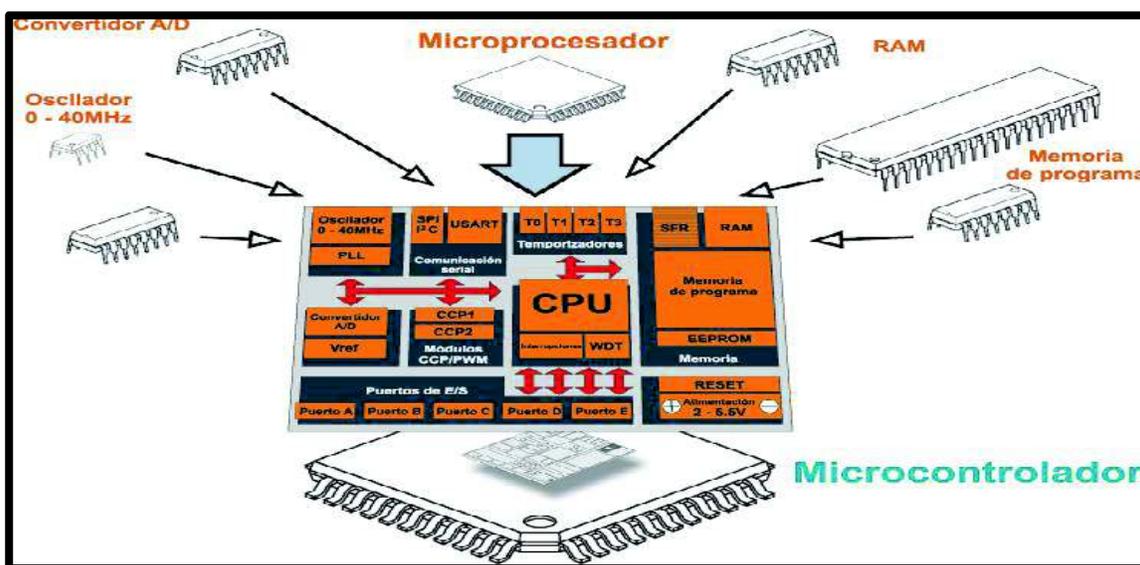


Figura 1.1 Estructura del Microcontrolador

(Barros, M. & Tipan, S., 2017)

1.1.1. MICROCONTROLADOR ATMEL AVR

Esta familia de microcontroladores usa tecnología CMOS de 8 bits, su arquitectura se basa en Reduced Instruction Set Computer (RISC). Esto implica un mínimo juego de instrucciones pero con un bajo consumo de operación, brindando una velocidad de respuesta rápida. Según el modelo de microcontrolador se tiene la posibilidad de manejar algunos periféricos como: tipos de memoria como Flash, Ram, EEPROM y SRAM, ciclos de frecuencias y alimentación. (Velasco, 2005)

1.1.2. ENTRADAS Y SALIDAS

En la familia Atmel, el microcontrolador maneja puertos configurables como entrada o salida, temporizadores, conversores, interrupciones internas o externas, entre otros. Para cada periférico que compone el microcontrolador se ha designado un

puerto o pin específico, el número de puertos y ancho de bits de cada puerto depende del modelo usado. Para ejecutar las funcionalidades del microcontrolador se utilizan registros que ayudan a configurar los periféricos pero varían de acuerdo al modelo usado para lo cual se debe consultar la hoja de datos.

Por otra parte, en el microcontrolador el fabricante ha agregado pines para programación, alimentación, reset, etc. Estos pines cumplen una función las cuales son:

- Los pines para programación permiten transmitir el código de programación al microcontrolador
- Los pines de alimentación permiten alimentar al microcontrolador para que entre en funcionamiento.
- El pin de reset permite resetear al microcontrolador en todo momento pero no lo apaga. De acuerdo al microcontrolador usado se puede manejar diferentes tipos de reset.
- Los otros pines dependen del microcontrolador usado y de la aplicación que se desee realizar para lo cual se debe consultar la hoja de datos. (Proaño, 2014)

1.1.3. TIMER

El timer es un periférico que trabaja de dos maneras: Normal y PWM, en el modo normal ejecuta funciones como conteos, comparaciones, interrupciones, etc. Mientras que, en el modo PWM tiene dos opciones de trabajo, PWM rápida o PWM fase corregida. Para realizar cada operación se debe configurar los registros adicionales que posee el timer, para lo cual se debe consultar la hoja de datos del microcontrolador usado para conocer la manera de configurar el timer para obtener la operación deseada. El timer puede ser de 8 bits o de 16 bits dependiendo el microcontrolador usado. (Mrelberni, 2016)

1.1.4. CONVERTOR ADC

El convertor analógico digital (ADC) tiene la función de convertir señales analógicas en valores digitales, la conversión consiste en recibir la señal analógica en el pin configurado y usando los comparadores internos del microcontrolador convertir en un número binario de 10 bits. El voltaje de referencia (V_{ref}) es necesario en la

conversión analógica –digital ya que permite trabajar de forma correcta a los comparadores internos. Se utiliza la misma fuente de alimentación del microcontrolador como voltaje de referencia pero también se puede elegir otros voltajes esto depende de la configuración aplicada, además, se determina también la resolución de conversión, la resolución es el valor de voltaje con el que varía el número binario en la conversión, la cual viene definida por la siguiente fórmula:

$$\text{Resolución} = V_{\text{ref}} / (2^n - 1) \quad (1)$$

Por ejemplo, suponiendo que el voltaje de referencia es de 5 [V] y el número de bits (n) es 10, aplicando la fórmula descrita en la expresión (1), se obtiene una resolución de 4,9 [mV], con lo cual el voltaje de referencia se ha dividido en partes equivalentes a 4,9 [mV], al utilizar esto en forma digital indica que para un 0 será 0 [V], si el voltaje aumenta desde 0 a 4,9 [mV] se tendrá un 1, si aumenta 2 veces 4,9 [mV] se tendrá un 2, etc. (Mrelberni, 2016)

1.2. MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Las máquinas eléctricas convierten energía eléctrica en mecánica o viceversa, dependiendo del mecanismo de conversión se derivan sus nombres, se conoce como generador a la conversión de energía mecánica a eléctrica y como motor a la conversión de energía eléctrica a mecánica. Estas máquinas basan su funcionamiento en la acción de campos magnéticos y otros aspectos de trabajo como voltaje, corriente y aspectos constructivos. Además, la velocidad de giro del motor puede ser síncrona o asíncrona. Se trabaja con velocidad síncrona cuando la velocidad de giro del motor es igual a la velocidad del campo magnético del estator y con velocidad asíncrona cuando la velocidad de giro del motor es cercana a la velocidad del campo magnético del estator.

Las máquinas eléctricas como motor se clasifican en (Chapman, 2012):

- Corriente continua (DC)
- Monofásicos
- Trifásicos de Inducción
- Trifásicos síncronos
- Uso especial

1.2.1. MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN

El motor trifásico de inducción o motor asíncrono está compuesto por los siguientes parámetros constructivos: estator y rotor, con dos tipos de rotor, jaula de ardilla o rotor devanado como se muestra en la figura 1.2 y bobinados trifásicos que se encuentran desfasados 120 grados entre sí.

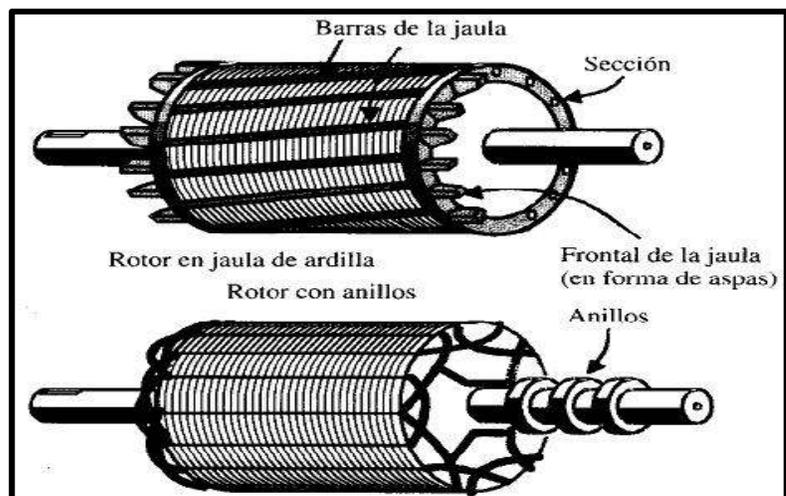


Figura 1.2 Tipos de rotor de un motor de inducción
(Blogspot, 2013)

1.2.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN DESARROLLO DEL PAR INDUCIDO

En un motor trifásico de inducción con rotor jaula de ardilla, se aplica un voltaje trifásico al estator y las corrientes fluyen creando un campo magnético que gira en sentido opuesto a las manecillas del reloj. El movimiento relativo que se forma en el rotor en comparación con el campo magnético del estator produce un voltaje inducido en la barra del motor, esto debido a la relación de velocidad entre las barras superiores del rotor y el campo magnético, que tienen una dirección hacia la derecha, se determina que el voltaje inducido en la barra superior va hacia afuera y en el inferior hacia adentro, generando un flujo de corriente con dirección igual a la barra superior e inferior. Este flujo de corriente crea un campo magnético en el rotor con lo cual se tiene un par resultante con dirección antihorario que acelera en esa dirección. Además, se considera las siguientes condiciones de operación:

- A velocidad síncrona, las barras del motor están estacionarias y no hay voltaje inducido.

- Voltaje inducido igual a cero, no hay corrientes ni campo magnéticos en el rotor.
- Campo magnético igual a cero, el par inducido será cero y el rotor reduce la velocidad por pérdidas de fricción

Además, un motor de inducción puede trabajar con una velocidad cercana pero no igual a la velocidad síncrona.

DESLIZAMIENTO DEL ROTOR

El deslizamiento del rotor se define como la variación de velocidad entre la velocidad síncrona y la velocidad mecánica del rotor, con lo cual se determina lo siguiente:

- A velocidad síncrona el deslizamiento es igual a cero
- Si el rotor se encuentra en reposo el deslizamiento es igual a uno

FRECUENCIA ELÉCTRICA DEL ROTOR

Se define como la frecuencia de trabajo a la que gira el rotor. Esta frecuencia no es la misma a la que trabaja en el estator debido a que en el rotor se tiene carga.

Además, se presentan algunas excepciones (Chapman, 2012):

- ❖ Si existe la misma frecuencia en el estator y rotor, el motor se bloquea
- ❖ Si existe la misma velocidad en el estator y rotor, la frecuencia del rotor es cero

Nota: En este proyecto para referirse al motor trifásico de inducción se usa solamente la denominación de motor.

1.3. MÉTODOS DE ARRANQUE

Existen diversos métodos de arranque que en su gran mayoría se basan en reducir la corriente creada en el arranque del motor, la misma que se genera por un lapso pequeño de tiempo hasta que el motor alcance sus condiciones nominales de operación, los métodos también varían de acuerdo al tipo de motor a utilizarse. A continuación se detallan algunos métodos. (Bowerl, 2012)

1.3.1. ARRANQUE DIRECTO

Este método consiste en conectar al motor a la red de alimentación, con plena tensión y frecuencia constante como se muestra en la figura 1.3, su aplicación se da en motores con baja potencia y como ventaja se tiene un par de arranque elevado. (Bowerl, 2012)

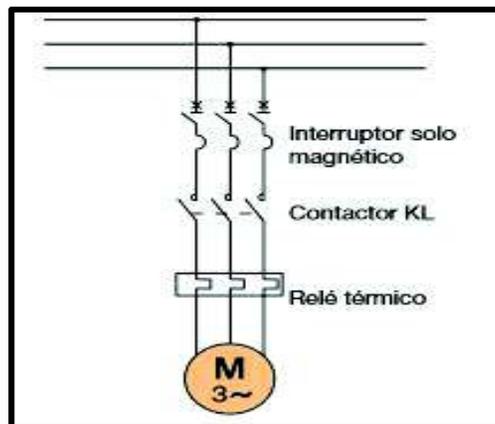


Figura 1.3 Esquema de arranque directo
(Bowerl, 2012)

Donde:

KL: Contactor de alimentación del motor.

1.3.2. ARRANQUE EN ESTRELLA – TRIÁNGULO

Es uno de los más usados ya que se aplica una tensión reducida en el arranque debido a que los bobinados del motor están conectados en estrella inicialmente con lo cual el voltaje de fase que reciben los bobinados es bajo en comparación al voltaje de línea reduciendo así los esfuerzos mecánicos, par de arranque y la corriente de arranque, para luego trabajar a condiciones normales con sus bobinados conectados en triángulo con lo cual el voltaje de fase que reciben los bobinados es igual al voltaje de línea, para lo cual el motor debe tener 6 borneras disponibles para la conexión de bobinados como se muestra en la figura 1.4. (Bowerl, 2012)

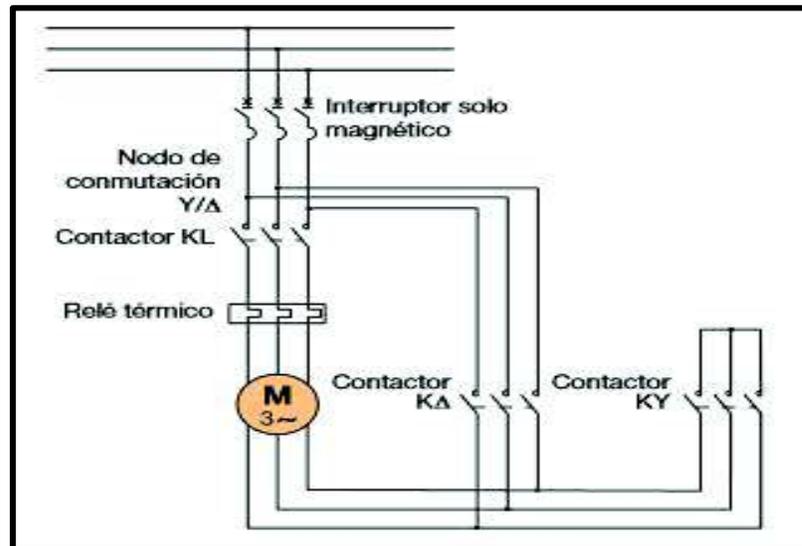


Figura 1.4 Esquema de arranque estrella – triángulo
(Bowerl, 2012)

Dónde:

KL: Contactor de alimentación del motor.

KA: Contactor de conexión delta del motor.

KY: Contactor de conexión estrella del motor.

1.3.3. OTROS MÉTODOS

Estos métodos aplican un mecanismo de funcionamiento diferente para reducir la corriente de arranque ya que consideran otros factores de operación como la frecuencia o agregan dispositivos electrónicos auxiliares como autotransformadores, tiristores, entre otros. Algunos de estos métodos son: (Bowerl, 2012)

- **Arranque con Autotransformador.-** El autotransformador es un transformador que tienen un devanado común en el lado primario como en el secundario con lo cual reduce la fuente de alimentación. Su aplicación en el arranque de motores es disminuir el par y la corriente de arranque debido a que el motor arranca con tensión reducida y cuando el motor alcance sus condiciones nominal este autotransformador se desconecta.
- **Arranque con Resistencias Estatóricas.-** Consiste en alimentar con tensión reducida al motor conectando resistencias al mismo, ya que en el arranque parte de la tensión cae en las resistencias obteniendo un par reducido y una

corriente de arranque casi la mitad de la nominal. Se usan en máquinas con gran inercia y sus desventajas son recalentamiento por la disipación de potencia de las resistencias y un factor de potencia reducido.

- **Arranque con arrancador suave.**- El arrancador suave es un dispositivo que tiene una unidad de mando y control compuesto generalmente por: disipadores térmicos, tiristores, entre otros, que son controlados mediante un microprocesador. Su funcionamiento consiste en incrementar de forma lineal o gradual la alimentación hacia el motor, con el objetivo de evitar esfuerzos eléctricos o mecánicos, disminuyendo así la corriente de arranque.
- **Arranque con variador de frecuencia.**- Los variadores de frecuencia son dispositivos electrónicos que permiten variar la frecuencia de la fuente de voltaje que alimentará al motor, convirtiendo las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de alimentación en magnitudes variables. (Tasiguano, 2015)

1.4. FRENADO

Los motores pueden tener diferentes métodos para frenar, a continuación se detallan algunos (Galarza, M. & Quisaguano, J., 2009):

- **Freno DC dinámico.** – Consiste en desconectar la alimentación trifásica al motor para luego ingresar a los bobinados conectados en estrella una alimentación continua (DC), con lo cual hay una excitación fija provocando polos electromagnéticos fijos en el estator, este nuevo campo se opone al campo inicial con lo cual el motor llega al reposo rápidamente
- **Freno regenerativo.** – Se da cuando el motor sobrepasa la velocidad síncrona, con lo cual trabaja como generador, en el momento que se desconecta la alimentación del motor se produce una energía por el freno y la misma regresa en forma regenerativa a la línea de alimentación de alterna (AC) con lo cual no existe consumo de potencia.
- **Freno por inversión.** – Este método consiste en el intercambio de dos fases con lo cual las corrientes en el estator se reducen a cero y empieza nuevamente a incrementarse en sentido contrario, antes de vencer la inercia del motor se desconecta el intercambio de dos fases, con lo cual se frena el motor.

1.5. ACCIONADORES DE POTENCIA

Son dispositivos electrónicos o eléctricos de potencia que en su interior tiene un sistema de acoplamiento para su operación. Su funcionamiento consiste en recibir una tensión de entrada de activación para luego enviar una tensión de conmutación de salida a otro elemento asociado para su activación como se muestra en la figura 1.5. (Molina, 2013)

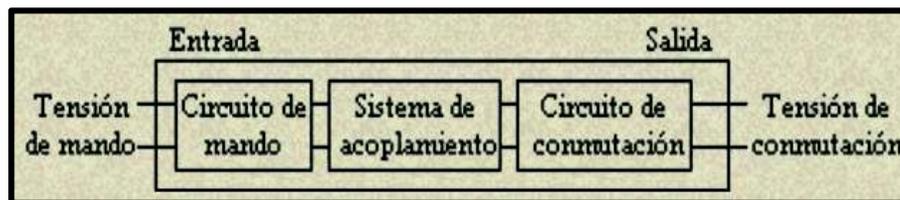


Figura 1.5 Esquema de funcionamiento de un accionador de potencia
(Molina, 2013)

1.5.1. CONTACTOR ELECTROMAGNÉTICO

Son dispositivos de control y maniobra muy utilizados a nivel industrial por su versatilidad de trabajar a pequeña, mediana y gran escala de potencia, además, su estructura tanto en tamaño, volumen, robustez, durabilidad y mantenimiento escaso lo hacen un elemento insustituible. Sus aplicaciones varían desde la más simple como un sistema de iluminación a más complejas como arranques de motores trifásicos. (Angulo, 2014)

ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DEL CONTACTOR

ELECTROIMÁN

Es el elemento principal del contactor, ya que su función principal es transformar la energía eléctrica en una fuerza de atracción magnética provocando la apertura y cierre de contactos.

ESTRUCTURA MAGNÉTICA

Está compuesta por un núcleo fijo, una armadura móvil y una espira de sombra, esta última es necesaria para trabajar con electroimanes alimentados con alterna. Además tiene un entrehierro en posición cerrado para evitar la atracción de la armadura móvil por el flujo remanente. El núcleo está construido con láminas de acero de silicio para disminuir pérdidas de energía debido a corrientes parásitas, su

función es encapsular el campo magnético en la bobina creado para atraer a la armadura, esta es muy similar a la estructura del núcleo pero sin la espira de sombra, su función es cerrar el circuito magnético y mover los contactos móviles.

BOBINA

La fuerza de atracción depende únicamente del flujo magnético existente en la bobina del contactor, la bobina se ubica en una de las columnas del núcleo del electroimán, estas bobinas son agrupadas en un carrete de resina aislante o generalmente se usa un hilo de cobre esmaltado.

CONTACTOS

Los contactos sirven para activar o bloquear el funcionamiento de un circuito en particular, cuando cambian su posición inicial. La posición inicial de cada contacto puede ser normalmente abierto o cerrado. Los contactos se clasifican en principales, secundarios y auxiliares, los contactos principales se usan para trabajar con escalas de potencia medias o altas, mientras que, los contactos secundarios y auxiliares se usan para trabajar con una escala baja de potencia (Angulo, 2014)

PARÁMETROS DE SELECCIÓN DE UN CONTACTOR

Para la selección de un contactor se deben tomar en cuenta los siguientes factores (Angulo, 2014):

- Intensidad de corriente de la aplicación
- Tipo de Alimentación CA o CC para la bobina y para la aplicación
- Tipo de circuito CC, AC, monofásico y trifásico
- Tiempo de operación de los contactos
- Números de maniobras a ejecutarse
- Condiciones ambientales
- Métodos de arranque

CATEGORÍAS DEL CONTACTOR

Las siguientes categorías son para contactores electromagnéticos de corriente alterna (Angulo, 2014):

- **AC-1.** – Aplica para cargas AC con un factor de potencia menos al 0,95, como cargas no inductivas o ligeramente inductivas.

- **AC-2.** – Aplica para motores de inducción con rotor devanado ya que soporta una corriente 2,5 veces la corriente nominal.
- **AC-3.** – Aplica para motores de inducción con rotor jaula de ardilla, ya que soporta una corriente 5 a 8 veces la corriente nominal y la interrupción se hace en valores cercanos a los nominales.
- **AC-4.** – Aplica para el arranque y paro de motores de inducción con rotor jaula de ardilla ya que soporta una corriente 5 a 8 veces la corriente nominal, además, soporta interrupciones severas.

1.5.2. RELÉ

El relé es un dispositivo que en su interior tiene dos sistemas para su operación, un sistema electromagnético y un sistema de contactos. Su funcionamiento consiste en alimentar la bobina del relé, mientras que, la corriente que circula en la bobina produce un campo magnético, el cual magnetiza el núcleo hecho de ferrita, con lo cual se atrae al inducido obligando a los contactos a cambiar su posición inicial.

Tipos de Relé.- Se clasifican en dos grupos (Molina, 2013):

- **Relés Electromecánicos.** – Son dispositivos comunes en el mercado ya que sus contactos pueden conmutar corriente continua o alterna. Su estructura interna consta de una bobina y contactos. Este tipo de relés pueden ser: armadura, red o lengüeta o polarizado.
- **Relés de Estado Sólido.** – Son dispositivos electrónicos compuestos por un disparador por nivel acoplado a un interruptor semiconductor y un transistor o tiristor. Su estructura interna no es una placa electrónica, sino un elemento compacto.

CAPÍTULO II

2. EJECUCIÓN Y RESULTADOS

Se implementó un módulo didáctico para controlar el arranque, frenado e inversión de giro de un motor. Su funcionamiento consiste en dos modos de operación manual y automático. En modo manual el motor arranca en delta o estrella, el frenado consiste en emitir un voltaje entre 0 [V] a 28 [V] mediante la selección de un porcentaje entre 0% al 100%, por ejemplo, se selecciona un porcentaje del 40%, el voltaje emitido será 11,2 [V] y la inversión de giro se lo realiza solo cuando el motor se encuentre parado. En modo automático el motor arranca en estrella hasta alcanzar las condiciones normales de operación para luego trabajar en delta, la inversión de giro se lo realiza cuando el motor se encuentre parado o en funcionamiento y el frenado se lo realiza de dos maneras: suave o brusco. En forma suave se emite un voltaje ascendente equivalente a un rango de porcentaje que va desde 40% al 60%, mientras que, en brusco se emite un voltaje descendente equivalente a un rango de porcentaje que va desde 100% al 60%, por ejemplo, se selecciona freno brusco, el voltaje emitido varía de 28 [V] a 16,8 [V]. Para lo cual se ha construido: un panel de control, dos placas electrónicas y un módulo de fuerza que se encargan de realizar las funcionalidades mencionadas. Estos componentes son integrados en una estructura de madera como se muestra en la figura 2.1.

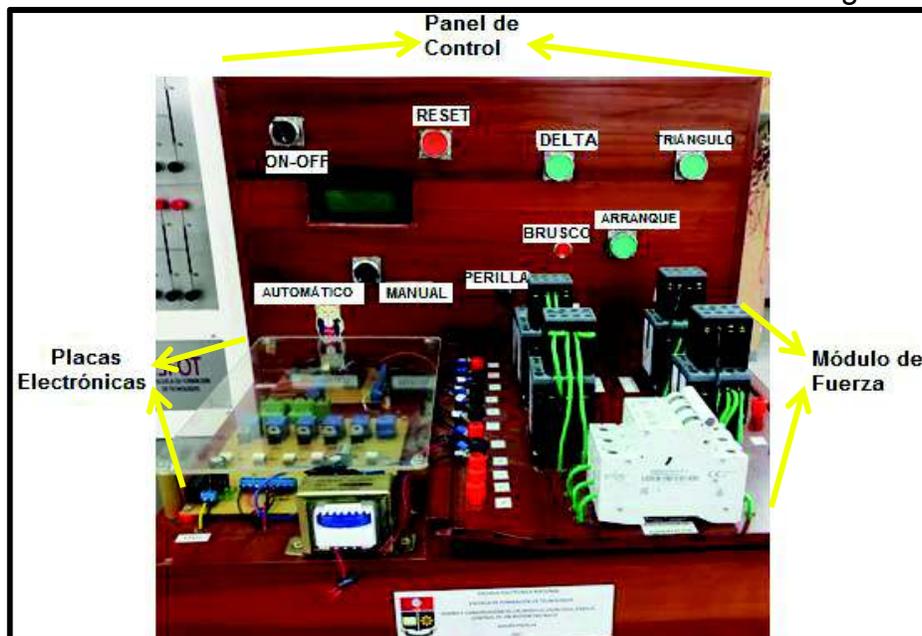


Figura 2.1 Módulo didáctico real [Elaboración propia]

2.1. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

2.1.1. MÓDULO DEL MOTOR TRIFÁSICO

Para este proyecto se escogió un motor trifásico de inducción con rotor jaula de ardilla con 6 terminales, accesibles para la conexión de sus bobinados de baja potencia de operación debido a que su utilización es a nivel educativo y práctico dentro del nuevo laboratorio de control industrial de la Escuela de Formación de Tecnólogos (ESFOT), ya que para otras aplicaciones se consideraría otros aspectos como temperatura del ambiente, altura de ubicación, potencia entre otras.

Sus características técnicas principales son (Ingelcom, 2016):

- Voltaje de alimentación 220 [V_{AC}], 380 [V_{AC}] y 440 [V_{AC}]
- Corriente 2,60 [A]; 1,49 [A]; 1,29 [A]; respecto al voltaje de alimentación
- Velocidad 1800 [rpm]
- 4 polos
- Potencia 0,75 [Hp]
- Tamaño constructivo 80 M
- Factor de servicio 1,15

El motor trifásico de inducción en este proyecto se alimenta con 220 [V_{AC}]. ya que es el voltaje que proporciona el nuevo laboratorio de control industrial de la ESFOT.

Se acopla al motor sobre una madera de 2 líneas de ancho ya que este tipo de material soporta el peso del motor, además, para la conexión de cada bobinado del motor se usó borneras que permitan conectar los bobinados desde un punto exterior a la caja de bornes. Considerando la dimensión del motor de 20 x 20 cm más las 6 borneras que se necesitan para conectar los bobinados del motor, se obtuvo una dimensión resultante de 26 x 33,5 cm.

Finalmente, se procedió a integrar el motor y las borneras en la base de madera, obteniendo el módulo final del motor como se muestra en la figura 2.2



Figura 2.2 Módulo del motor trifásico
[Elaboración propia]

2.1.2. MÓDULO DE FUERZA

En el módulo de fuerza se encuentran los elementos finales de control, los cuales permiten arrancar, frenar y cambiar el sentido de giro del motor. Además, protege las fuentes de alimentación y el motor mediante un switch trifásico, contactores electromagnéticos y un relé magnetotérmico, la función de cada elemento es la siguiente:

- **Switch trifásico.** - Protección ante la presencia de cortocircuitos en las líneas de alimentación.
- **Contactores electromagnéticos.** – Son los elementos de control que permiten arrancar, frenar y cambiar el sentido del giro del motor
- **Relé magnetotérmico.** – Protección ante sobrecargas en el motor y fallas.

Para dimensionar cada elemento se midió los valores de corriente de arranque y nominal que genera el motor, las cuales son:

- Corriente de arranque en conexión estrella 2,54 [A]
- Corriente de arranque en conexión delta 3,45 [A]
- Corriente nominal en conexión estrella 0,45 [A]
- Corriente nominal en conexión delta 0,91 [A]

Obteniendo, un switch trifásico con una capacidad de 4 [A], para su elección se basó en la corriente de arranque y nominal más alta, un relé magnetotérmico con una

capacidad configurable entre 2,2 [A], 2,8 [A] y 3,2 [A], para su elección se basó en la corriente nominal más alta, además, este elemento discrimina la corriente de arranque del motor.

Para la elección de los contactores electromagnéticos se basó en los parámetros y categorías como se explica en el punto 1.5.1. Se escogió un contactor de la marca SIEMENS – SIRIUS modelo 3RT2015-1AF01 clase AC-3 ya que soporta el voltaje de alimentación de 220 [V_{AC}] que necesita el motor y la corriente generada por el mismo, además, este tipo contactor se usa específicamente para operar motores de inducción con rotor jaula de ardilla.

Sus especificaciones técnicas son las siguientes (Ingelcom, 2016):

- Tres contactos principales abiertos y un contacto secundario abierto
- Voltaje de alimentación de la bobina 120 [V_{AC}]
- Voltaje de operación en contactos principales 400 [V_{AC}] y soporta 7 [A]
- Voltaje de operación en contactos principales 220 [V_{AC}] y soporta 7 [A]
- Voltaje de operación 400 [V_{AC}] en contacto secundario y soporta 3 [A]
- Voltaje de operación 230 [V_{AC}] en contacto secundario y soporta 10 [A]
- Un Bloque de contactos auxiliares con 2 contactos normalmente abiertos y cerrados con las mismas características del contacto secundario

Cada contactor electromagnético cumple una función específica de operación, las cuales son:

- **Contactor Delta (CD).** - Conecta los bobinados del motor en delta
- **Contactor Estrella (CY).** - Conecta los bobinados del motor en estrella
- **Contactor de Alimentación (CA).** - Alimenta los bobinados del motor, permitiendo su funcionamiento.
- **Contactor de Inversión de giro (CI).** - Intercambia dos fases para cambiar el sentido de giro del motor

La activación de cada contactor depende de la placa electrónica de control y acoplamiento de voltaje, ya que estas placas permiten la alimentación de la bobina de cada contactor como se muestra en la figura 2.3.

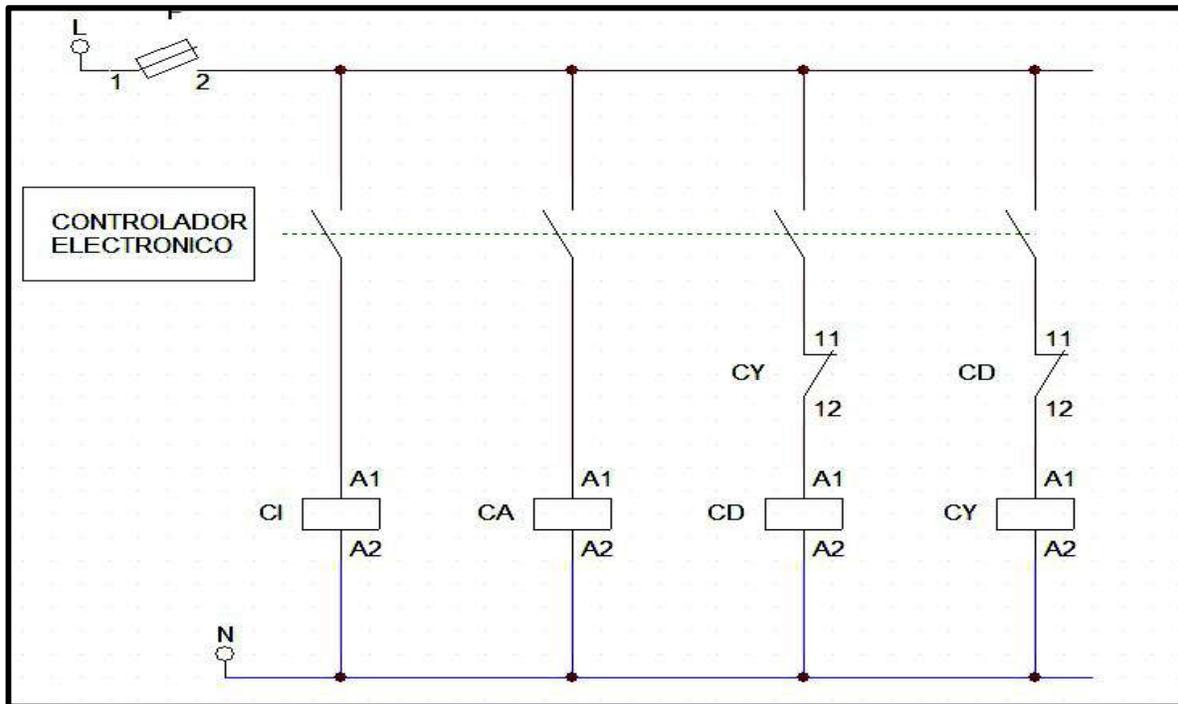


Figura 2.3 Accionamiento de contactores para el control del motor trifásico
[Elaboración propia]

Además, se realizó dos interbloques eléctricos físicos por seguridad entre los contactores que hacen la conexión delta y estrella para evitar que se activen por error al mismo tiempo usando los contactos auxiliares normalmente cerrados de los contactores CD y CY como se muestra en la figura 2.3. También entre las fuentes de alimentación AC y DC para evitar que ingresen al mismo tiempo al motor usando los contactos auxiliares normalmente cerrados del contactor CA como se muestra en la figura 2.4.

Se realizó el diseño del circuito de fuerza basándose en la funcionalidad que cumple cada elemento de este módulo obteniendo el circuito mostrado en la figura 2.4.

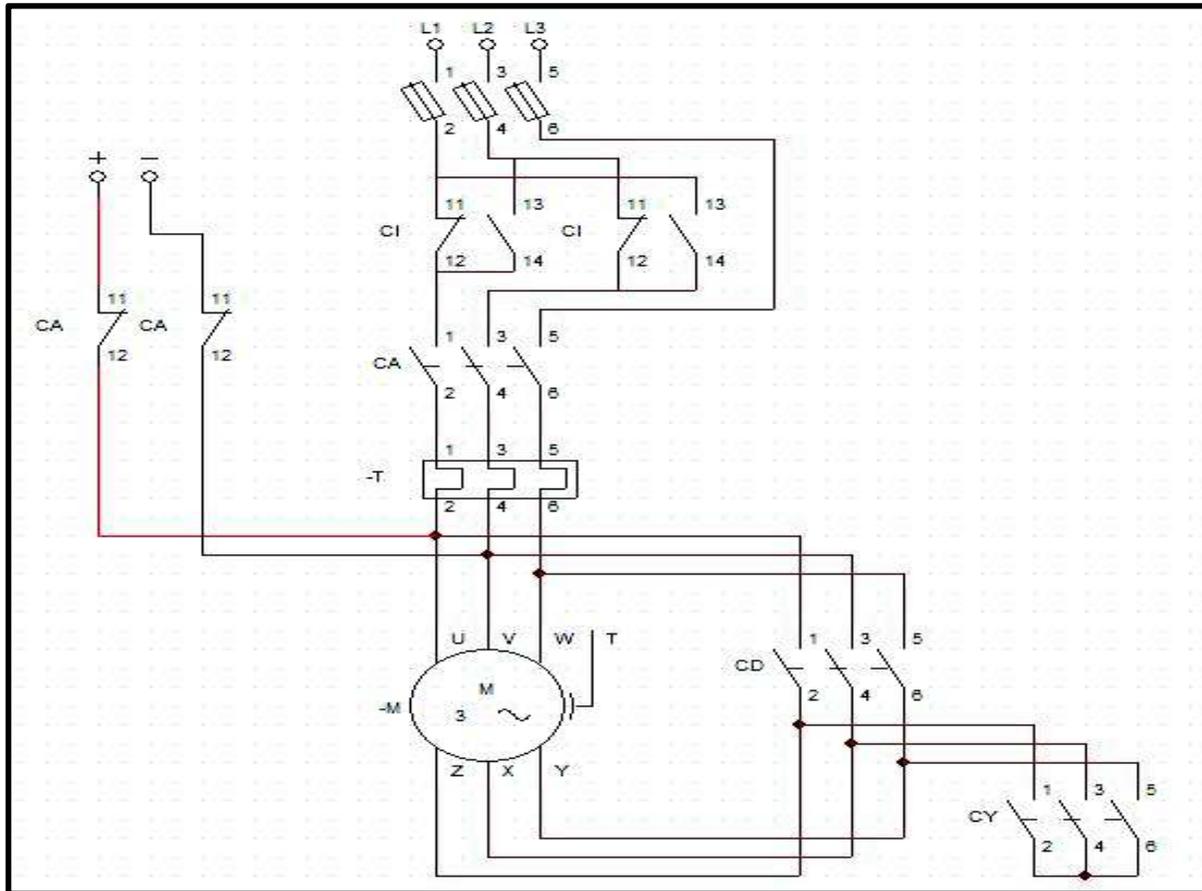


Figura 2.4 Circuito de fuerza del módulo didáctico

[Elaboración propia]

La implementación de este módulo de fuerza se hizo sobre madera de una línea de ancho ya que este tipo de material soporta el peso de todos los elementos que componen el mismo y no conduce electricidad. Además, este módulo será móvil con el fin de usar los contactores electromagnéticos mediante otros dispositivos ajenos al módulo didáctico como controladores lógicos programables o desde las mesas de trabajo del nuevo laboratorio de control industrial de la ESFOT.

La conexión de cada elemento del módulo de fuerza se basa en el circuito mostrado en la figura 2.4 con excepción del motor que se implementó en un módulo adicional como se explica en el punto 2.1.1. Para la activación de cada contactor, conexión de las fuentes de alimentación y conexión de los bobinados del motor se usaron borneras como se muestra en la figura 2.5.

La dimensión de este módulo de fuerza se basó en el tamaño de los contactores, switch trifásico, relé magnetotérmico y borneras obteniendo una dimensión de 24 x 37 cm.

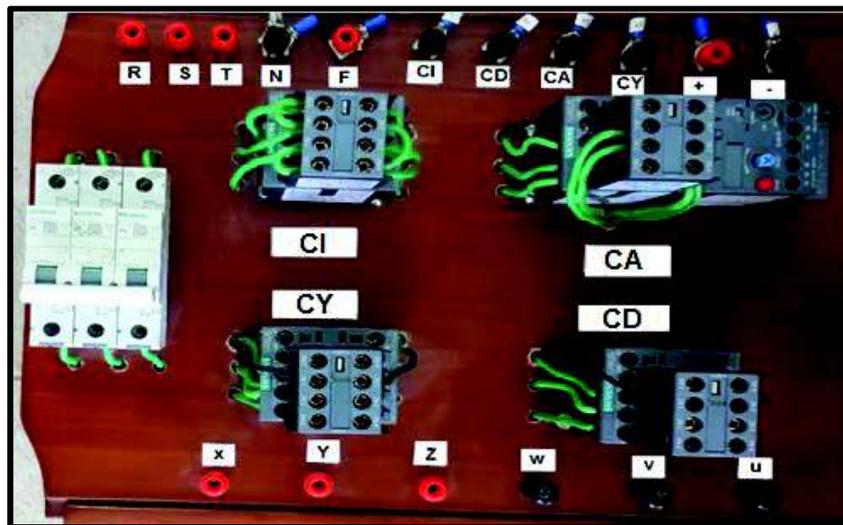


Figura 2.5 Módulo de fuerza del módulo didáctico
[Elaboración propia]

2.1.3. PANEL DE CONTROL

El panel de control sirve para seleccionar la función que se desea realizar en el motor, además, enciende, apaga y resetea el módulo didáctico. El mismo trabaja con una fuente de alimentación de 5 [V_{DC}] y consta de los siguientes elementos:

- Un selector metálico de 2 posiciones y 3 posiciones
- Un LCD 20x4 (20 caracteres x 4 filas)
- Cuatro pulsadores metálicos normalmente abiertos
- Un pulsador metálico normalmente cerrado
- Dos pulsadores metálicos pequeños normalmente abiertos
- Un Potenciómetro 5 [k Ω]

La función de cada elemento es la siguiente:

- **Selector de modo.** – Permite escoger el modo de operación manual o automático, para esta función se usó un selector de 3 posiciones, su forma de conexión se muestra en la figura 2.6.

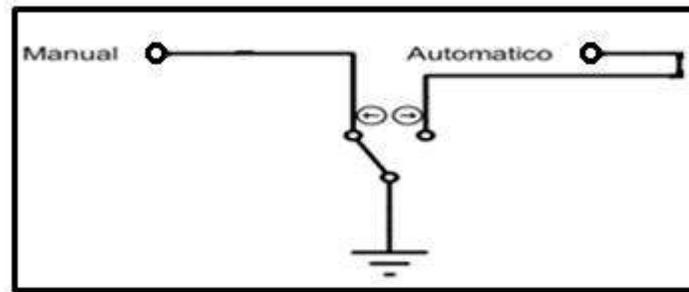


Figura 2.6 Conexión del selector de 3 posiciones
[Elaboración propia]

- **Selector On / Off.** - Enciende o apaga las fuentes de alimentación continua del módulo didáctico, para esta función se usó un selector de 2 posiciones, su forma de conexión se muestra en la figura 2.7.

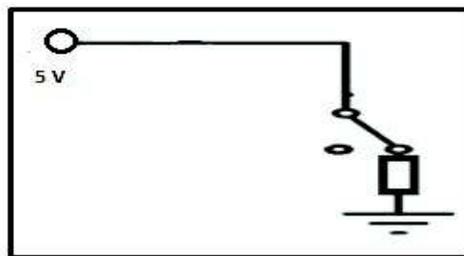


Figura 2.7 Conexión del selector de 2 posiciones
[Elaboración propia]

- **Botón Delta.** – Cuando se encuentra en modo manual arranca el motor con sus bobinados conectados en delta, para esta función se usó un pulsador metálico normalmente abierto, su forma de conexión se muestra en la figura 2.8.
- **Botón Estrella.** – Cuando se encuentra en modo manual arranca el motor con sus bobinados conectados en estrella, para esta función se usó un pulsador metálico normalmente abierto, su forma de conexión se muestra en la figura 2.8.
- **Botón Arrancar.** – Cuando se encuentra en modo automático arranca en estrella - triángulo el motor, para esta función se usó un pulsador normalmente abierto, su forma de conexión se muestra en la figura 2.8.
- **Botón Inversión.** – Cuando se encuentra en modo manual invierte el sentido de giro del motor cuando se encuentre parado. Mientras que, en modo automático invierte el sentido de giro del motor cuando se encuentre parado o

en funcionamiento, para esta función se usó un pulsador metálico normalmente abierto, su forma de conexión se muestra en la figura 2.8.

- **Botón Brusco.** – Frena al motor de acuerdo al modo de operación seleccionado. En modo manual frena al motor de acuerdo al porcentaje seleccionado entre 0% al 100%, mientras que, en el modo automático frena al motor con una variación descendente del 100% al 60%, para esta función se usó un pulsador metálico normalmente abierto, su forma de conexión se muestra en la figura 2.8.
- **Botón Suave.** - Frena al motor de acuerdo al modo de operación seleccionado. En modo manual frena al motor de acuerdo al porcentaje seleccionado entre 0% al 100%, mientras que en el modo automático frena al motor con una variación ascendente del 40% al 60%, para esta función se usó un pulsador normalmente metálico abierto, su forma de conexión se muestra en la figura 2.8.

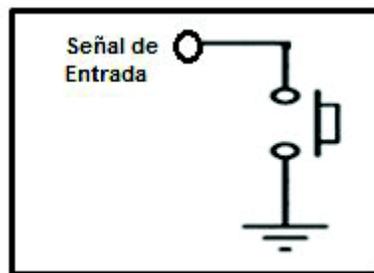


Figura 2.8 Conexión del pulsador normalmente abierto
[Elaboración propia]

- **Perilla.** – Estando en modo manual selecciona el porcentaje de freno para el motor entre el 0% al 100%, para esta función se usó un potenciómetro de 5 [K Ω], su forma de conexión se muestra en la figura 2.9

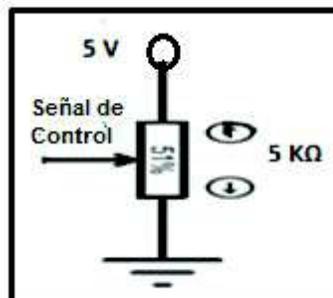


Figura 2.9 Conexión del Potenciómetro
[Elaboración propia]

- **Botón reset.** – Resetea al microcontrolador en cualquier momento de operación deteniendo al motor, más no apaga la alimentación de alterna, para esta función se usó un pulsador metálico normalmente cerrado, su forma de conexión se muestra en la figura 2.10.

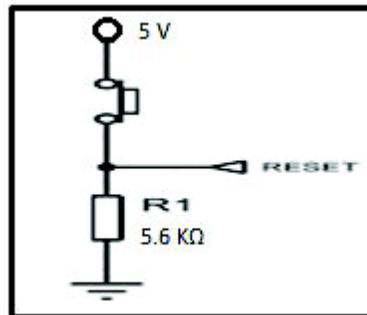


Figura 2.10 Conexión Reset

[Elaboración propia]

Finalmente, se integró cada elemento del panel de control considerando el tamaño de los mismos en una base de madera de dos líneas de ancho ya que este material soporta el peso de cada elemento, obteniendo el panel de control final como se muestra en la figura 2.11. La dimensión total del panel de control es de 52 x 57 cm con una profundidad de 5,5 cm.



Figura 2.11 Panel de control del módulo didáctico

[Elaboración propia]

2.2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA

En esta sección se muestra la distribución de las fuentes de alimentación continua (DC) y de alimentación alterna monofásica y trifásica (AC) que requieren todos los componentes del módulo didáctico para su funcionamiento.

2.2.1. ALIMENTACIÓN CONTINUA (DC)

Para la alimentación DC se usó una fuente de computadora como se muestra en la figura 2.12, ya que nos provee de los voltajes DC que necesitan los circuitos de control y acoplamiento de voltaje.

Sus características técnicas son (Explico Fácil, 2016) :

- Potencia 600 [W]
- Voltajes de salida: 3,3 [V]; 20 [A] y ± 12 [V]
- Voltaje de alimentación 120 [V] o 220 [V]
- 24 Pines



Figura 2.12 Fuente de alimentación DC
(Explico Fácil, 2016)

Esta fuente se alimenta con 120 [V_{AC}] y se utilizan los voltajes de 5 y 12 [V_{DC}]. La fuente de 5 [V_{DC}] es utilizada para alimentar al circuito de control y la de 12 [V_{DC}] es utilizada para alimentar al circuito de acoplamiento de voltaje, además, para emitir estos voltajes de salida la fuente de computadora requiere ser activada internamente, para lo cual se usó el selector ON/OFF del panel de control para la activación de la misma como se muestra en la figura 2.13.

Para identificar las salidas de voltaje de la fuente DC existen dos maneras:

- La primera consiste en medir el valor de voltaje usando un multímetro
- La segunda se basa en los códigos de colores de los cables.

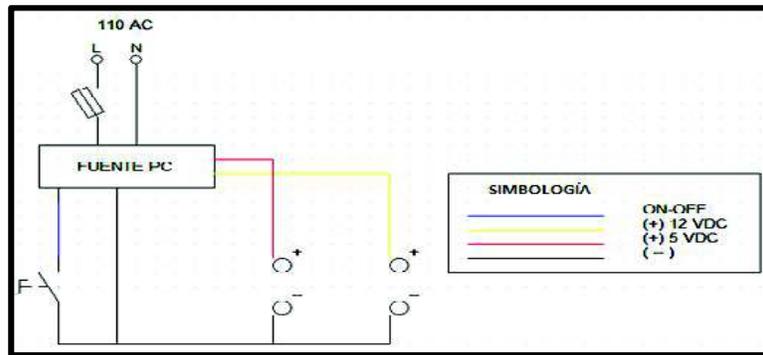


Figura 2.13 Conexión de la fuente de alimentación DC
[Elaboración propia]

2.2.2. ALIMENTACIÓN MONOFÁSICA Y TRIFÁSICA

La alimentación trifásica se ha dividido en dos partes monofásica y trifásica como se observa en la figura 2.14, de la siguiente manera:

- La fuente DC, los contactores electromagnéticos y el transformador necesitan de alimentación monofásica para su funcionamiento.
- El motor necesita de alimentación trifásica para su funcionamiento.

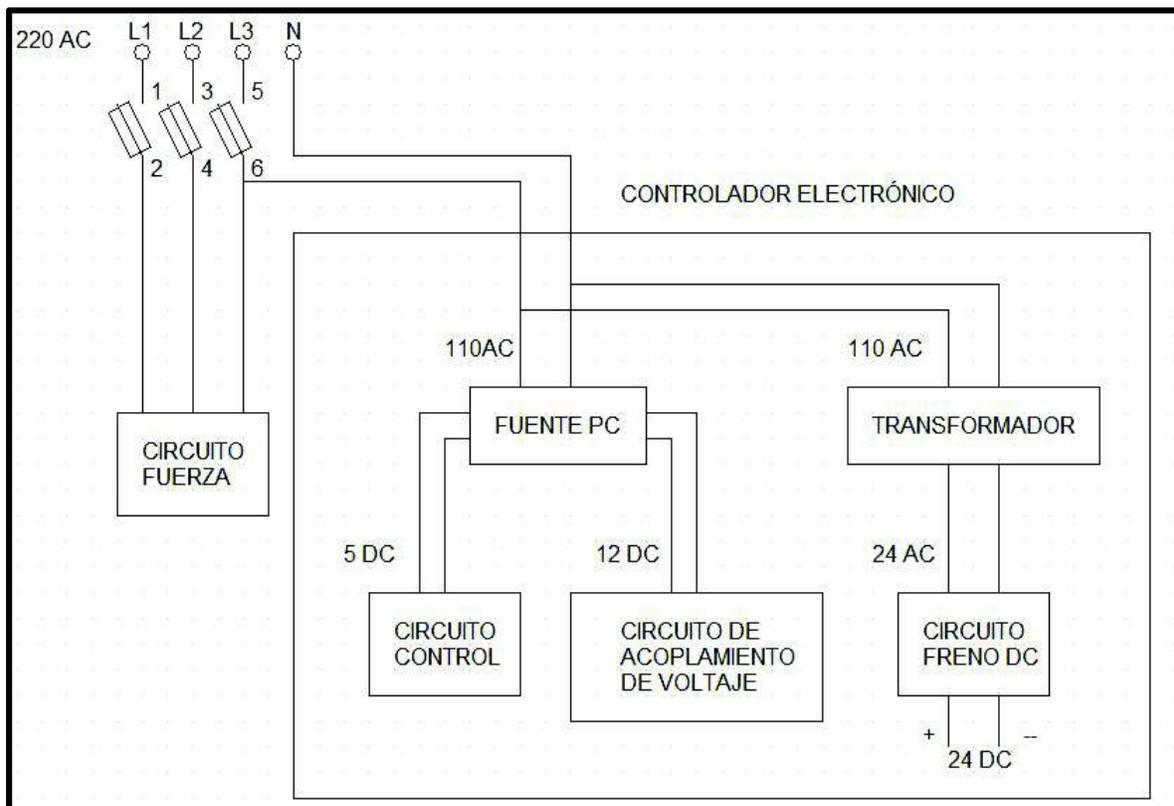


Figura 2.14 Distribución eléctrica del módulo didáctico
[Elaboración propia]

2.3. DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE LA PLACA ELECTRÓNICA

Se utilizó dos tipos de programas para el desarrollo del módulo didáctico, Proteus 8 Profesional para simular y crear circuitos impresos y Atmel Studio 7 para programar el microcontrolador Atmel 164P.

2.3.1. FABRICACIÓN DE PLACAS ELECTRÓNICAS CIRCUITO DE CONTROL

El circuito de control se encarga de recibir todas las señales de entrada que vienen del panel de control, las mismas que ingresan para ser procesadas por el microcontrolador, con lo cual se emite una señal de salida específica y además muestra la operación realizada mediante un LCD como se muestra en el anexo B.

Para cumplir estas funciones se usó un microcontrolador Atmel 164P ya que posee el número adecuado de puertos para todas las entradas, salidas y periféricos requeridos en este proyecto. Además, posee un conversor ADC y un timer, funciones que se usaron en el mecanismo de freno.

Este microcontrolador Atmel 164P posee las siguientes características:

- 2 Timers / Counters de 8 bits con prescaler independiente y modo de comparación
- 1 Timers / Counters de 16 bits con prescaler independiente, modos de comparación y captura
- Contador en tiempo real y oscilador separado
- 6 canales de PWM
- 8 canales de 10 bits para ADC
- Comparador Analógico
- Fuente de interrupción interna y externa
- Voltaje de operación entre 2,7 [V_{DC}]– [5,5 V_{DC}]
- Frecuencias de operación entre 0 – 10 [MHz] a 2,7 [V_{DC}] – 5,5 [V_{DC}] y entre 0-20 [Mhz] a 4,5 [V_{DC}] – 5,5 [V_{DC}]
- Consumo de corriente 0,4 [mA]

Existen otras características que el programador tomará en cuenta de acuerdo al modo de operación que se desee aplicar. (Atmel Corporation, 2016)

Nota: En este proyecto para referirse al microcontrolador Atmel 164P se usó la denominación microcontrolador.

Las señales de salida que emite el microcontrolador cuando recibe una señal de entrada del panel de control son:

- **CY.** – Activa el contactor de conexión estrella del motor (CY).
- **CD.** – Activa el contactor de conexión delta del motor (CD).
- **CA.** – Activa el contactor de alimentación trifásica para el motor (CA).
- **CI.** – Activa el contactor para cambiar el sentido de giro del motor (CI).
- **CF.** – Activa los relés que permiten el paso de la fuente de alimentación DC para frenar el motor.
- **PWM.** – Determina la cantidad de voltaje de alimentación DC que recibe el motor al momento de frenar.

Además, el microcontrolador permite visualizar cada función realizada usando el LCD 20x4. El microcontrolador necesita una fuente de alimentación de 5 Voltios de continua. La ubicación de cada señal de entrada, salida y alimentación se muestra en la figura 2.15.

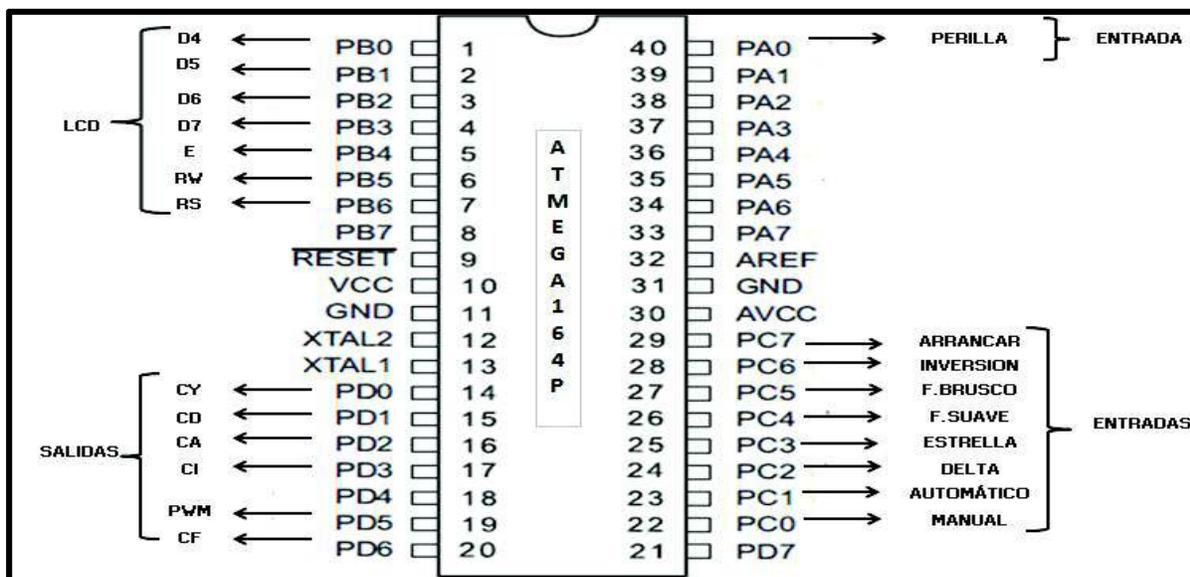


Figura 2.15 Conexión de entradas y salidas al microcontrolador Atmega 164P

[Elaboración propia].

La implementación del circuito se lo realizó en una placa electrónica utilizando el paquete Ares del programa Proteus, para lo cual se diseñó el circuito impreso del mismo basándose en las funcionalidades mencionadas.

Se procedió a ubicar cada elemento de este circuito de control considerando el tamaño real y función de cada elemento. Para el tamaño, el ARES proporciona el tamaño real por defecto de ciertos elementos, pero para otros elementos no muestra el tamaño real o no contiene el elemento utilizado, entonces, se debe crearlos o reemplazarlos.

Para la conexión de la fuente de alimentación de 5 [V_{DC}] se utilizó una bornera 2 en 1, además, se agregó un fusible de protección de 1 [A], ya que la corriente en este circuito es de 37 [mA] y un led para visualizar el encendido de la misma como se muestra en la figura 2.16.

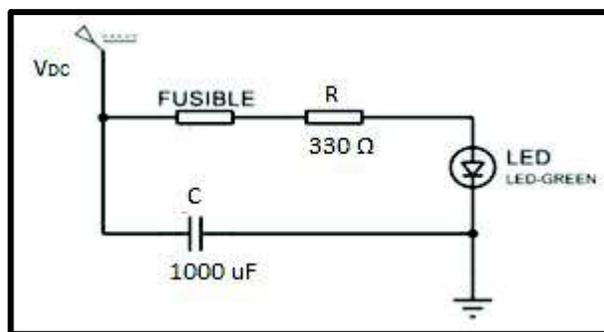


Figura 2.16 Conexión de verificación de encendido de la fuente de alimentación
[Elaboración propia]

Para el ingreso de todas las señales emitidas por el panel de control al microcontrolador se usó borneras 2 en 1, con excepción de los botones reset y perrilla que se conectan directamente en la placa electrónica. Para cada señal de salida emitida por el microcontrolador se usó borneras 2 en 1, además, la conexión del LCD es directamente con la placa electrónica.

Se obtuvo el circuito impreso como se muestra en la figura 2.17. Finalmente, el circuito impreso fue transferido sobre una baquelita para luego soldar con estaño cada elemento basándose en el circuito diseñado obteniendo la placa electrónica del circuito de control como se muestra en el anexo C.

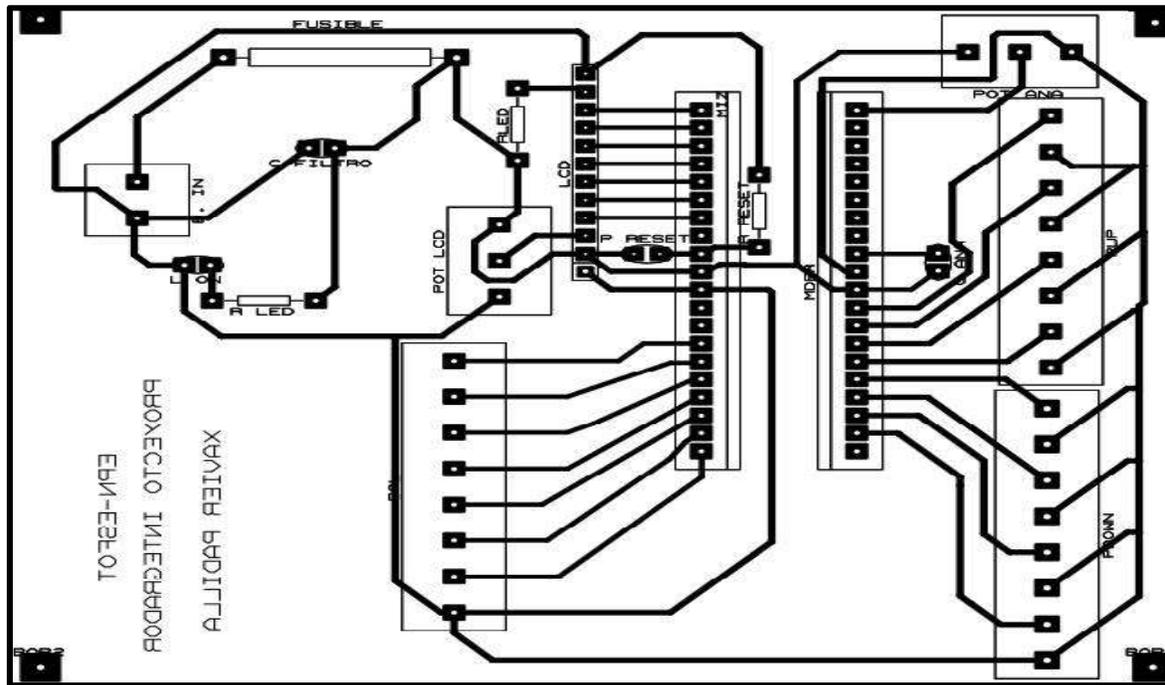


Figura 2.17 Circuito impreso de control
[Elaboración propia]

CIRCUITO DE ACOPLAMIENTO DE VOLTAJE

Este circuito de acoplamiento de voltaje se encarga de recibir las señales de salida emitidas por el microcontrolador, las mismas que activan diferentes accionadores de potencia tipo relé, para lo cual se utilizó elementos de estado sólido como: optoacopladores, transistores y diodos. Además, se encarga de frenar el motor emitiendo una cantidad de voltaje continuo a los bobinados del mismo como se muestra en el anexo B.

Para este proyecto se usó un relé electromecánico tipo armadura de 12 [V_{DC}] ya que este elemento soporta en sus contactos el voltaje y corriente que necesita cada contactor electromagnético.

Este relé tiene las siguientes características técnicas (GHI Electronics, 2010):

- Aislamiento entre los pines de entrada y salida
- 2 posiciones de trabajo
- Con alimentación alterna soporta en sus contactos 10 [A] y un voltaje de 125[V] o 240 [V], si la carga es resistiva

- Con alimentación continua soporta en sus contactos 10 [A] y un voltaje de 30 [V] si la carga es resistiva
- Con alimentación alterna soporta en sus contactos 3 [A] y un voltaje de 120 [V] si la carga es inductiva
- Con alimentación continua soporta en sus contactos 3 [A] y 28 [V] si la carga es inductiva

Nota: En este proyecto para referirse al relé electromecánico tipo armadura se usó la denominación relé.

La función que cumple cada elemento de estado sólido es:

- El optoacoplador sirve para aislar los circuitos de potencia y control
- El transistor sirve para activar los accionadores de potencia relés
- El diodo sirve para descargar la corriente en la bobina del relé cuando se desenergiza.

Se determinó el circuito de operación de cada señal de salida para que cumplan la función de activar relés mediante los elementos de estado sólido con el fin de permitir el paso de la fuente de alimentación de alterna al contactor electromagnético como se muestra en la figura 2.18.

Para las salidas CY, CD, CA y CI se estableció el mismo circuito de operación pero de forma independiente, ya que cada señal de salida activa un contactor que cumple una función específica como se explica en el punto 2.1.2.

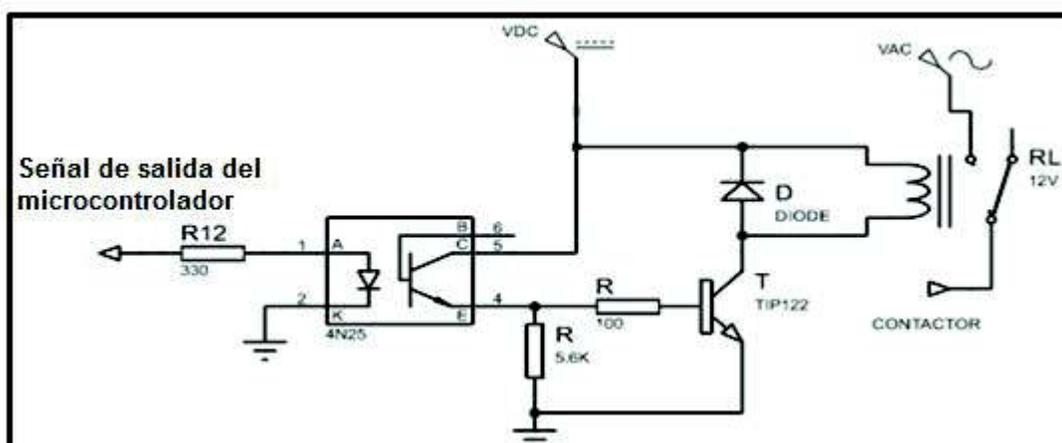


Figura 2.18 Circuito activador de accionadores de potencia para contactores
[Elaboración propia]

La señal de salida PWM y CF son utilizadas en el circuito de freno DC. La señal de salida CF tiene el mismo circuito de operación de las salidas CY, CD, CA y CI, con la diferencia que esta señal activa dos relés que permiten el paso de la fuente de alimentación continua a los bobinados del motor como se muestra en la figura 2.19.

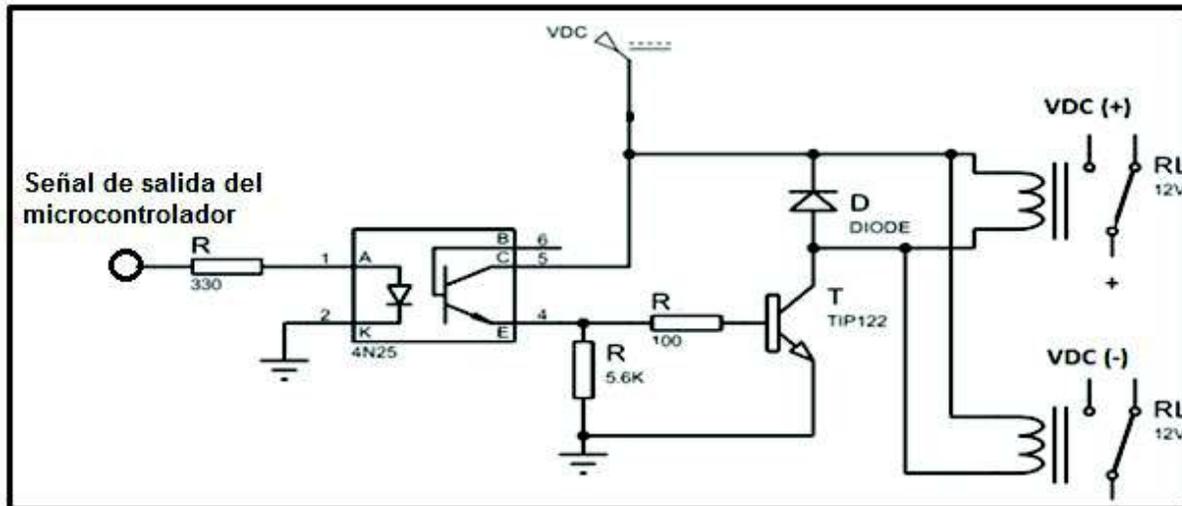


Figura 2.19 Circuito activador para accionadores de potencia para el freno DC
[Elaboración propia]

Por otra parte, se implementó el circuito de operación del freno DC utilizando chopper, el cual es un conmutador eléctrico que permite variar un voltaje mediante la modulación del ancho de pulso de la señal PWM, este voltaje ingresa a los bobinados del motor cuando se activan de los dos relés como se muestra en la figura 2.20.

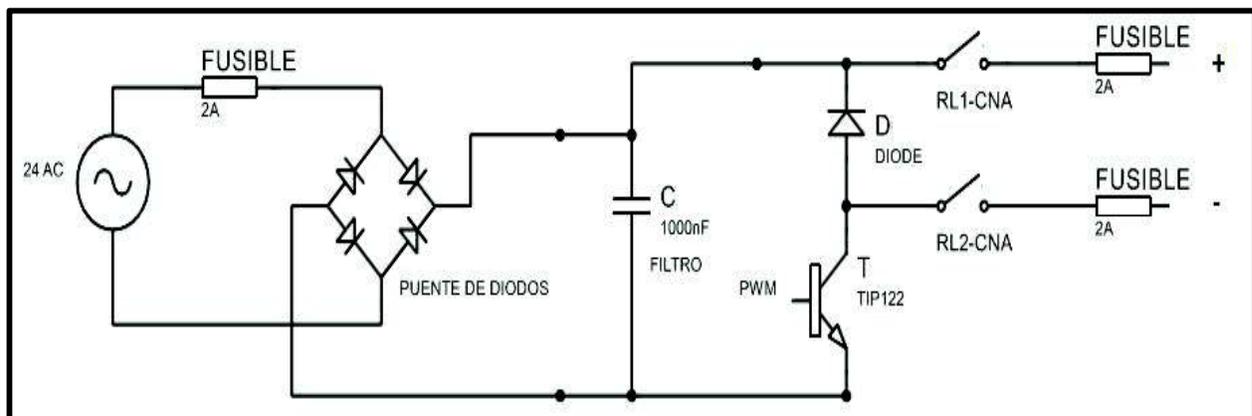


Figura 2.20 Configuración Chopper
[Elaboración propia]

La alimentación del circuito de freno DC se obtiene mediante un transformador comercial de 120 [VAC] que emite un voltaje de salida de 24 [VAC] con una tolerancia de $\pm 15\%$ ya que el motor necesita una fuente de continua de 28 [V] aproximadamente para frenarse, la misma que se obtuvo de acuerdo al siguiente proceso:

- Se determinó la corriente nominal del motor en conexión Delta basándose en los datos de placa del motor con lo cual se obtuvo una corriente de 1[A].
- Luego se procedió a medir la resistencia en los bobinados del motor cuando están conectados en estrella, ya que en esta conexión se obtiene la mayor cantidad de resistencia dando como resultado una resistencia de 27,5 [Ω].

Aplicando la ley de ohm, se obtuvo un voltaje de 27,5 [V] aproximadamente. Para conseguir este voltaje se conectó el transformador como se muestra en la figura 2.21.

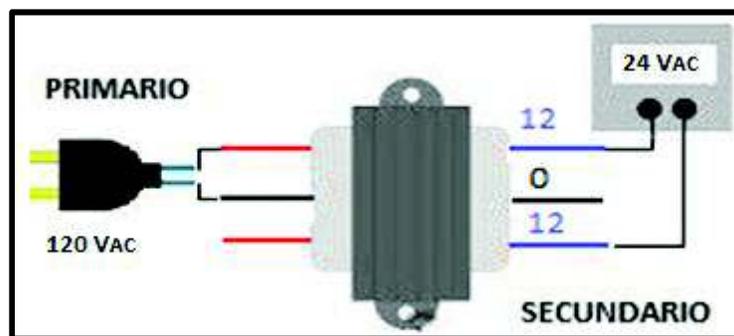


Figura 2.21 Conexión del transformador para obtener 24 AC en la salida
[Elaboración propia]

Luego este voltaje de alterna de 24 [V] entra a una etapa de rectificación y filtrado obteniendo un voltaje rectificado como se muestra en la figura 2.20.

Para frenar al motor con este circuito de freno DC chopper, el controlador varía la magnitud de voltaje continuo rectificado en un rango de 0 [V] a 28 [V], mediante la modulación del ancho de pulso de la señal de salida PWM, para luego emitir el mismo a los bobinados del motor cuando se activen los relés que permiten el paso del voltaje DC.

La implementación de este circuito se lo hizo en una placa electrónica utilizando el paquete ARES del programa Proteus, para lo cual se realizó el circuito impreso del mismo basándose en las funcionalidades mencionadas.

Se procedió a ubicar cada elemento de este circuito de acoplamiento de voltaje considerando el tamaño real y función de cada elemento. Para el tamaño, el ARES proporciona el tamaño real por defecto de ciertos elementos, pero para otros elementos no muestra el tamaño real o no contiene el elemento utilizado, entonces, se debe crearlos o reemplazarlos.

Para la conexión de la fuente alimentación de 12 [V_{DC}] se utilizó una bornera 2 en 1, mientras que, para la fuente de 24 [V_{AC}] se utilizó una bornera enchufable 2 en 1, además, se agregó una protección para cada fuente, para la fuente de 12 [V] se usó un fusible de 1 [A] ya que la corriente en este circuito es de 27 [mA], para la fuente de 24 [V] se usó un fusible de 2 [A] ya que la corriente en este circuito es de 1,5 [A] y un led para visualizar el encendido de las mismas como se muestra en la figura 2.16.

Para cada señal de salida emitida de la placa electrónica de control se usó borneras 2 en 1, para el paso de la fuente de alterna al circuito de fuerza cuando se activan los relés se usó borneras enchufables 2 en 1.

Se obtuvo el circuito impreso como se muestra en la figura 2.22. Finalmente, el circuito impreso fue transferido sobre una baquelita para luego soldar con estaño cada elemento basándose en el circuito diseñado obteniendo la placa electrónica del circuito de acoplamiento de voltaje como se muestra en el anexo C.

Los circuitos de control y acoplamiento de voltaje fueron simulados usando el paquete ISIS del programa Proteus como se muestra en el anexo B, con el fin de verificar el correcto funcionamiento de cada circuito.

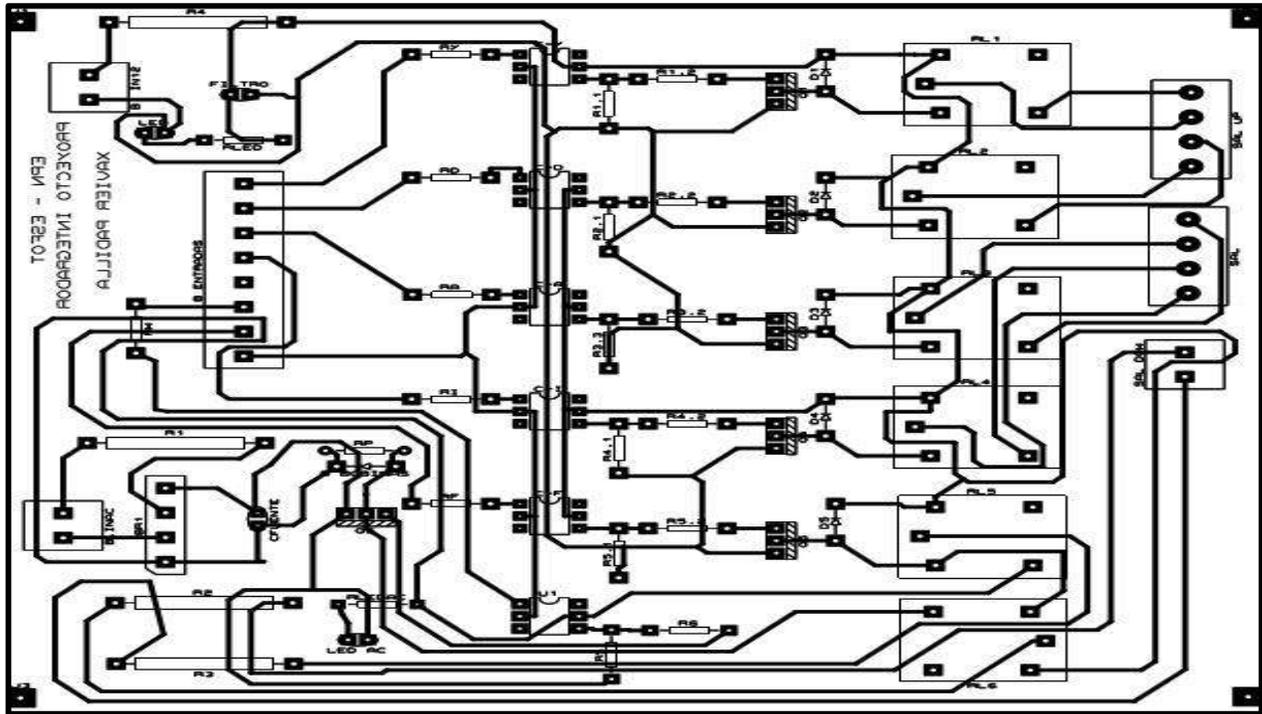


Figura 2.22 Circuito impreso de acoplamiento de voltaje

[Elaboración propia]

2.3.2. PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR ATMEL 164P

La programación del microcontrolador se realizó en el programa Atmel Studio 7.0, usando estados de operación que permiten reducir las líneas de programación. Un estado de operación realiza una o varias operaciones específicas mientras se encuentre en el estado, brindando seguridad al momento de la ejecución. El lenguaje utilizado de programación es C++.

2.3.3. ESTADOS DE OPERACIÓN

Los estados de operación cumplen las funciones del módulo didáctico cuando son llamados y terminan su funcionamiento cuando salen del mismo brindando seguridad al usuario en la ejecución. Las salidas activadas en cada estado de operación son las descritas en el punto 2.3.1. Para este proyecto se han creado 10 estados de operación representados en un mapa de estados en donde se evidencia el ciclo de funcionamiento y cambio entre los mismos como se muestra en la figura 2.23.

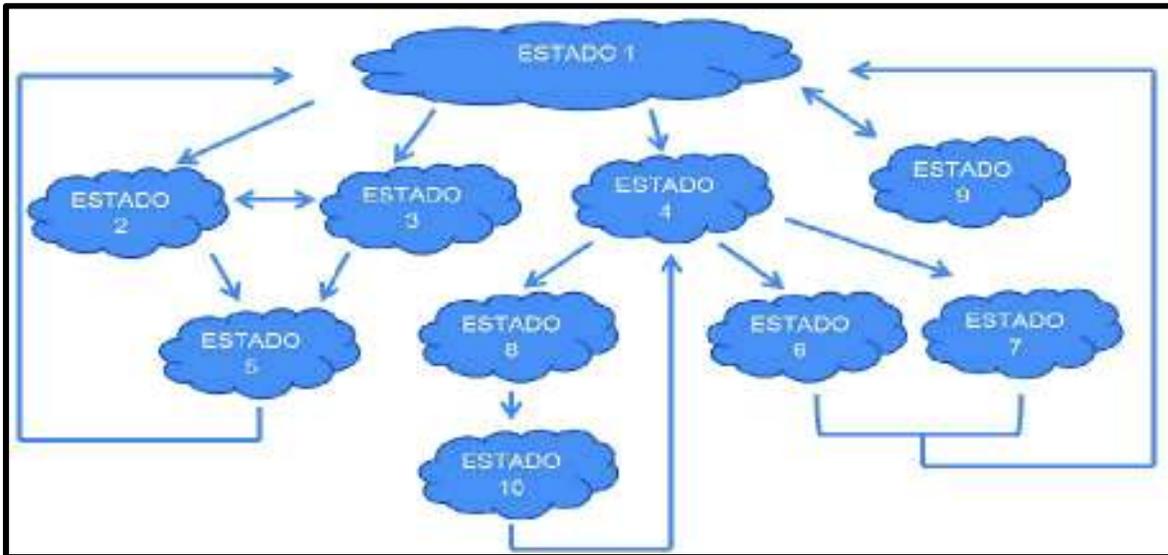


Figura 2.23 Mapa de estados de operación

[Elaboración propia]

ESTADO 1

El estado 1 o estado de reposo es un inicio a los demás estados de operación o retorno cuando terminen su función. Muestra el sentido de giro actual, porcentaje actual para el frenado y gestiona el modo de operación manual o automático como se muestra en el diagrama de flujo del anexo D. Todas las operaciones se visualizan en el LCD como se muestra en la figura 2.24.

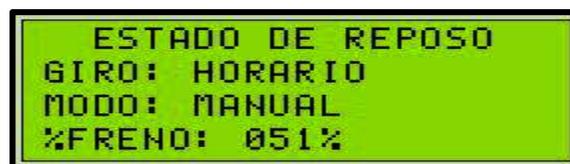


Figura 2.24 Visualización del estado 1 del módulo didáctico

[Elaboración propia]

Para mostrar el sentido de giro actual se utiliza la información almacenada en los registros del microcontrolador con lo cual se indica el sentido de giro actual y se muestra en el LCD.

Para mostrar el porcentaje de frenado se espera la señal emitida por la perrilla del panel de control, luego se realiza la conversión análoga-digital para obtener un equivalente en voltaje y luego en porcentaje. Esta operación se muestra en el LCD.

Para gestionar el modo de operación se espera la señal emitida por el selector de modo, luego se compara esta señal para determinar el modo de operación actual y se muestra en el LCD

Para entrar en este estado existen dos formas:

- Cuando el módulo didáctico se encienda o se resetee.
- Cuando termine el proceso de frenado en cualquier modo de operación

Para salir de este estado de operación se emite cualquier combinación de botones como:

- Selector en modo manual + Botón Delta (Estado 2)
- Selector en modo manual + Botón Estrella (Estado 3)
- Selector en modo manual + Botón Inversión (Estado 9)
- Selector en modo automático + Botón Arrancar (Estado 4)
- Selector en modo automático + Botón Inversión (Estado 9)

ESTADO 2

El estado 2 o trabajando en D, funciona únicamente en un modo de operación manual. Gestiona el arranque del motor con sus bobinados conectados en Delta, indica el sentido de giro actual y el porcentaje para el frenado como se muestra en el diagrama de flujo del anexo D. Todas las operaciones se visualizan en el LCD como se muestra en la figura 2.25.

A rectangular LCD display with a black border and a light green background. The text is displayed in a black, monospaced font. The text reads: "TRABAJANDO EN D", "GIRO: HORARIO", "MODO: MANUAL", and "%FRENO: 051%".

```
TRABAJANDO EN D
GIRO: HORARIO
MODO: MANUAL
%FRENO: 051%
```

Figura 2.25 Visualización del estado 2 del módulo didáctico
[Elaboración propia]

Para gestionar el arranque en Delta se desactiva la salida CY ya que en modo manual se puede cambiar de conexión estrella a delta o viceversa en cualquier momento y luego se activan las salidas CD y CA.

Para indicar el sentido de giro actual se utiliza la información almacenada en los registros del microcontrolador con lo cual se indica el sentido de giro actual y se

muestra en el LCD. Además, en este estado no se permite cambiar el sentido de giro en funcionamiento, para lo cual se muestra un mensaje de restricción como se muestra en la figura 2.26.



Figura 2.26 Mensaje de restricción al invertir el giro en funcionamiento manual
[Elaboración propia]

Para mostrar el porcentaje de frenado se espera la señal emitida por la perrilla del panel de control, luego se realiza la conversión análoga-digital para obtener un equivalente en voltaje y luego en porcentaje. Esta operación se muestra en el LCD.

Para entrar en este estado se debe enviar la siguiente señal de entrada:

- Selector en modo manual + Botón de Delta

Para salir de este estado de operación se emite cualquier combinación de botones como:

- Selector en modo manual + Botón Estrella (Estado 3)
- Selector en modo manual + Botón Brusco (Estado 5)
- Selector en modo manual + Botón Suave (Estado 5)

En el caso de emitir una señal distinta a las mencionadas se mostrará un mensaje de restricción como se muestra en la figura 2.27.

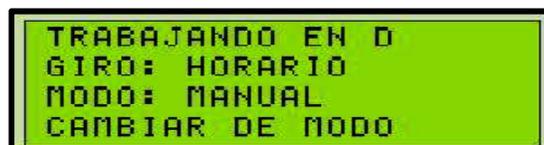


Figura 2.27 Mensaje de restricción al presionar botones erróneos
[Elaboración propia]

ESTADO 3

El estado 3 o trabajando en Y, funciona únicamente en un modo de operación manual. Gestiona el arranque del motor con sus bobinados conectados en Estrella,

indica el sentido de giro actual y el porcentaje para el frenado como se muestra en el diagrama de flujo del anexo D. Todas las operaciones se visualizan en el LCD como se muestra en la figura 2.28.



Figura 2.28 Visualización del estado 3 del módulo didáctico

[Elaboración propia]

Para gestionar el arranque en Estrella se desactiva la salida CD ya que en modo manual se puede cambiar de conexión delta a estrella o viceversa en cualquier momento y luego se activan las salidas CY y CA.

Para indicar el sentido de giro actual se utiliza la información almacenada en los registros del microcontrolador con lo cual se indica el sentido de giro actual y se muestra en el LCD. Además, en este estado no se permite cambiar el sentido de giro en funcionamiento, para lo cual se muestra un mensaje de restricción como se muestra en la figura 2.26.

Para mostrar el porcentaje de frenado se espera la señal emitida por la perrilla del panel de control, luego se realiza la conversión análoga-digital para obtener un equivalente en voltaje y luego en porcentaje. Esta operación se muestra en el LCD.

Para entrar en este estado se debe enviar la siguiente señal de entrada:

- Selector en modo manual + Botón de Estrella

Para salir de este estado de operación se emite cualquier combinación de botones como:

- Selector en modo manual + Botón Delta (Estado 2)
- Selector en modo manual + Botón Brusco (Estado 5)
- Selector en modo manual + Botón Suave (Estado 5)

En el caso de emitir una señal distinta a las mencionadas se mostrará un mensaje de restricción como se muestra en la figura 2.27.

ESTADO 4

El estado 4 o trabajando en Y-D, funciona únicamente en un modo de operación automático. Gestiona el arranque Estrella – Delta e indica el sentido de giro actual como se muestra en el diagrama de flujo del anexo D. Todas las operaciones se visualizan en el LCD como se muestra en la figura 2.29.



Figura 2.29 Visualización del estado 4 del módulo didáctico
[Elaboración propia]

Para gestionar el arranque en Estrella-Delta se activan las salidas CY y CA y se espera un tiempo de 2 segundos para que el motor alcance sus condiciones normales de operación en este tiempo, luego se desactiva la salida CY y se activa la salida CD para trabajar en conexión delta.

Para indicar el sentido de giro actual se utiliza la información almacenada en los registros del microcontrolador con lo cual se indica el sentido de giro actual y se muestra en el LCD. Además, en este estado se permite cambiar el sentido de giro del motor en funcionamiento con la ayuda del estado 8.

Para entrar en este estado se debe enviar la siguiente señal de entrada:

- Selector en modo automático + Botón de Arrancar

Para salir de este estado de operación se emite cualquier combinación de botones como:

- Selector en modo automático + Botón Brusco (Estado 7)
- Selector en modo automático + Botón Suave (Estado 6)
- Selector en modo automático + Botón Inversión (Estado 8)

En el caso de emitir una señal distinta a las mencionadas se mostrará un mensaje de restricción como se muestra en la figura 2.27.

ESTADO 5

El estado 5 o freno seleccionado, funciona únicamente en un modo de operación manual. Gestiona el frenado del motor en base a un único valor del ancho de pulso de la señal PWM seleccionado en porcentaje en un rango entre 0% al 100% e indica el sentido de giro actual como se muestra en el diagrama de flujo del anexo D. Todas las operaciones se visualizan en el LCD como se muestra en la figura 2.30.

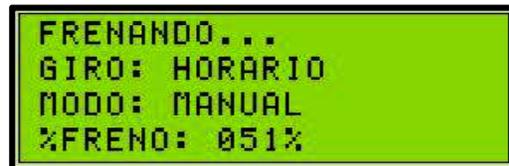


Figura 2.30 Visualización del estado 5 del módulo didáctico

[Elaboración propia]

Para gestionar el frenado se lee el último valor seleccionado por la perrilla, este valor entra al conversor análogo – digital obteniendo un equivalente en un rango de 0% al 100%, esta equivalencia se multiplica y se asigna al ancho de pulso de la señal PWM. Luego se desactivan las salidas CD y CA y se activa la salida CY ya que el motor debe estar en conexión estrella para poder ser frenado. Finalmente se activan las salidas CF y PWM permitiendo así el paso de la señal chopper DC a los bobinados del motor por un lapso de tiempo de 2 segundos. Cumplido este tiempo se desactivan las salidas PWM, CF y CY.

Para indicar el sentido de giro actual se utiliza la información almacenada en los registros del microcontrolador con lo cual se indica el sentido de giro actual y se muestra en el LCD.

Para entrar en este estado se debe enviar la siguiente señal de entrada:

- Selector en modo manual + Botón Suave o Brusco.

Para salir de este estado solo se debe esperar que cumpla su función ya que automáticamente se regresa al estado 1.

ESTADO 6

El estado 6 o freno suave, funciona únicamente en un modo de operación automático. Gestiona el frenado del motor en base a una variación ascendente del

ancho de pulso de la señal PWM en un rango de porcentaje del 40% al 60% e indica el sentido de giro actual como se muestra en el diagrama de flujo del anexo D. Todas las operaciones se visualizan en el LCD como se muestra en la figura 2.31.



Figura 2.31 Visualización del estado 6 del módulo didáctico

[Elaboración propia]

Para gestionar el frenado se usa una variación ascendente en la señal PWM en un rango de porcentaje del 40% al 60% en pasos de uno, esta variación se multiplica y se asigna al ancho de pulso de la señal PWM. Luego se desactivan las salidas CD y CA y se activa la salida CY ya que el motor debe estar en conexión estrella para poder ser frenado. Finalmente se activan las salidas CF y PWM permitiendo así el paso de la señal chopper DC a los bobinados del motor hasta que la variación llegue al valor máximo. Cumplido esta condición se apagan las salidas PWM, CF y CY.

Para indicar el sentido de giro actual se utiliza la información almacenada en los registros del microcontrolador con lo cual se indica el sentido de giro actual y se muestra en el LCD.

Para entrar en este estado se debe enviar la siguiente señal de entrada:

- Selector en modo automático + Botón Suave.

Para salir de este estado solo se debe esperar que cumpla su función ya que automáticamente se regresa al estado 1.

ESTADO 7

El estado 7 o freno brusco, funciona únicamente en un modo de operación automático. Gestiona el frenado del motor en base a una variación descendente del ancho de pulso de la señal PWM en un rango de porcentaje del 100% al 60% e indica el sentido de giro actual como se muestra en el diagrama de flujo del anexo D. Todas las operaciones se visualizan en el LCD como se muestra en la figura 2.32.



Figura 2.32 Visualización del estado 7 del módulo didáctico
[Elaboración propia]

Para gestionar el frenado se usa una variación descendente en la señal PWM en un rango del 100% al 60% en pasos de uno, esta variación se multiplica y se asigna al ancho de pulso de la señal PWM. Luego se desactivan las salidas CD y CA y activa la salida CY ya que el motor debe estar en conexión estrella para poder ser frenado. Finalmente se activan las salidas CF y PWM permitiendo así el paso de la señal chopper DC a los bobinados del motor hasta que la variación llegue al valor mínimo. Cumplido esta condición se apagan las salidas PWM, CF y CY.

Para indicar el sentido de giro actual se utiliza la información almacenada en los registros del microcontrolador con lo cual se indica el sentido de giro actual y se muestra en el LCD.

Para entrar en este estado se debe enviar la siguiente señal de entrada:

- Selector en modo automático + Botón Suave.

Para salir de este estado solo se debe esperar que cumpla su función ya que automáticamente se regresa al estado 1.

ESTADO 8

El estado 8 o inversión en movimiento, funciona únicamente en un modo de operación automático. Gestiona el cambio de giro del motor en funcionamiento como se muestra en el diagrama de flujo del anexo D. Todas las operaciones se visualizan en el LCD como se muestra en la figura 2.33.

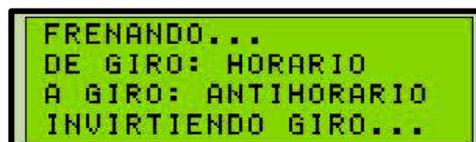


Figura 2.33 Visualización del estado 8 del módulo didáctico
[Elaboración propia]

Para gestionar el cambio de giro del motor en funcionamiento se desactivan las salidas CD y CA, ya que el motor se encuentra trabajando en conexión delta, luego se frena el motor usando el mismo mecanismo del estado 6 pero en un estado diferente denominado estado 10. Finalmente, se verifica en qué sentido se encontraba trabajando el motor, si estaba en sentido antihorario se desactiva la salida CI caso contrario se activa la salida CI y se regresa al estado 4.

Para entrar en este estado se debe enviar la siguiente señal de entrada:

- Selector en modo automático + Botón Inversión

Para salir de este estado solo se debe esperar que cumpla su función ya que automáticamente se regresa al estado 4.

ESTADO 9

El estado 9 o inversión en reposo, funciona en los dos modos de operación manual o automático. Este estado gestiona el cambio de giro del motor en reposo como se muestra en el diagrama de flujo del anexo D.

Para gestionar el cambio de giro del motor en reposo se verifica en qué sentido se encuentra trabajando el motor, si estaba en sentido antihorario se desactiva la salida CI caso contrario se activa la salida CI y se regresa al estado 1.

Para entrar en este estado se debe enviar la siguiente señal de entrada:

- Selector en modo manual o automático + Botón Inversión

Para salir de este estado solo se debe esperar que cumpla su función ya que automáticamente se regresa al estado 1.

ESTADO 10

El Estado 10 o frenado de inversión, funciona en un modo de operación automático. Gestiona el frenado del motor para que cambie su sentido de giro en movimiento como se muestra en el diagrama de flujo del anexo D. Para gestionar el frenado se usa el mismo procedimiento que se describe en el estado 6. Con la única diferencia que estado cuando termina de cumplir su función regresa al estado 8. Para entrar en estado se debió haber ingresado primero al estado 8, ya que este estado se activa automáticamente desde el estado 8.

2.4.DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA PRINCIPAL

En esta sección, se muestra el diseño e implementación de la estructura principal del módulo didáctico. La estructura principal es el lugar en donde se ubicó todos los componentes que conforman el módulo didáctico, los cuales son: Panel de control, Placas Electrónicas y Módulo de fuerza como se muestra en la figura 2.1.

La estructura del módulo didáctico es de madera lacada de 2 líneas de ancho ya que este tipo de material soporta el peso de todos los componentes del módulo didáctico, además, brinda una facilidad de integración entre la estructura y todos los componentes del módulo didáctico. El diseño de la estructura principal consta de una base horizontal y otra vertical, cada base integra un componente del módulo didáctico, la base horizontal integra a las placas electrónicas y el módulo de fuerza, mientras que, la base vertical integra el panel de control.

Luego se procedió a utilizar el programa AUTOCAD para determinar la posición real que ocupa cada elemento en las bases y la dimensión de las mismas.

Para la base vertical se consideró los elementos del panel de control los cuales son: selectores metálicos, pulsadores metálicos medianos y pequeños, perilla y un LCD, la dimensión de los mismos es la siguiente:

- Selectores con una dimensión de 4 x 4 cm
- LCD 20x4 con una dimensión de 6 x 9,88 cm
- Pulsadores medianos con una dimensión de 4 x 4 cm
- Pulsadores pequeños con un radio de 7 mm
- Perilla con un radio de 0,3 mm

Obteniendo una dimensión total de la base vertical de 52 x 56 cm con una profundidad de 5,5 cm como se muestra en la figura 2.34.

Para la base horizontal se consideró las placas electrónicas y el módulo de fuerza, la implementación de las mismas se explican en el punto 2.1.2 y 2.3.1, con lo cual se obtuvo:

- Módulo de fuerza con una dimensión de 28 x 37 cm
- Placas electrónicas con una dimensión de 24 x 37 cm.

Obteniendo una dimensión total de la base horizontal de 42,5 x 52 cm con una profundidad de 11 cm como se muestra en la figura 2.34. Finalmente, se obtuvo el prototipo del módulo didáctico como se muestra en la figura 2.34, el cual servirá como guía para implementar el modulo didáctico final como se muestra en la figura 2.35. Adicionalmente, para proteger las placas electrónicas de algún elemento externo que pueda dañar o alterar el funcionamiento de las mismas se ha colocado un acrílico de protección como se muestra en la figura 2.35.

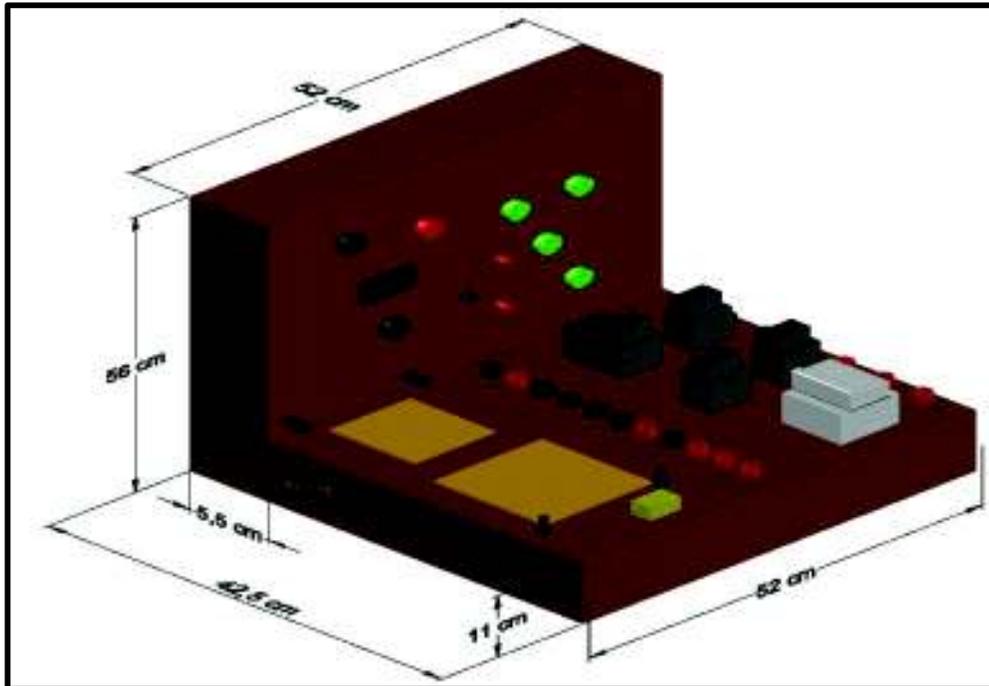


Figura 2.34 Prototipo del módulo didáctico
[Elaboración propia]



Figura 2.35 Módulo didáctico final
[Elaboración propia]

2.5. PRUEBAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Para comprobar el funcionamiento del módulo y cumplir con los objetivos establecidos, se procedió a realizar las siguientes pruebas:

- Voltajes de alimentación AC y DC
- Funcionamiento de los arranques
- Verificación de funciones del módulo didáctico
- Mecanismo de freno

2.5.1. VOLTAJES DE ALIMENTACIÓN AC Y DC

Esta prueba consiste en comparar las fuentes de alimentación reales con las fuentes de alimentación que necesita cada circuito de control, acoplamiento de voltaje y fuerza, con el fin de verificar que los voltajes sean los adecuados en los diferentes circuitos, ya que si un voltaje sobrepasa su rango de tolerancia podría dañar o quemar los componentes de los circuitos, la tolerancia de cada elemento se la obtuvo de las hojas de datos. Para lo cual se usó un multímetro para determinar el voltaje que alimenta a cada circuito como se muestra en la tabla 2.1

| VOLTAJE NECESITADO DE CADA CIRCUITO | TOLERANCIA DE CADA ELEMENTO [%] | VOLTAJE MEDIDO | ERROR [%] |
|--|--|--------------------------|------------------|
| 5 [V _{DC}] | ± 10 | 5,30 [V _{DC}] | 6 |
| 12 [V _{DC}] | ± 5 | 12,54 [V _{DC}] | 4,5 |
| 28 [V _{DC}] | ± 15 | 33,2 [V _{DC}] | 18,6 |
| 24 [V _{AC}] | ± 15 | 27,02 [V _{AC}] | 12,6 |
| 120 [V _{DC}] | ± 5 | 121,7 [V _{DC}] | 1,4 |
| 220 [V _{DC}] | ± 5 | 211,9 [V _{DC}] | 3,7 |

Tabla 2.1 Voltajes de alimentación AC y DC

[Elaboración propia]

Cada voltaje medido se encuentra dentro del rango de tolerancia admisible brindando seguridad al momento de usar el módulo didáctico ya que los elementos reciben la cantidad apropiada de alimentación tanto de alterna como de continua.

2.5.2. FUNCIONAMIENTO DE LOS ARRANQUES

Esta prueba consistió en medir la corriente de arranque y nominal en conexión estrella o triángulo para obtener valores de corriente que sirvieron para el dimensionamiento de cada elemento del circuito de fuerza como se explica en el punto 2.1.2. Para lo cual se eligió en el módulo didáctico un modo de operación manual ya que en este modo se puede medir la corriente de arranque en conexión estrella o delta, obteniendo los siguientes valores como se muestra en la tabla 2.2.

| CONEXIÓN | CORRIENTE NOMINAL | CORRIENTE DE ARRANQUE |
|-----------------|--------------------------|------------------------------|
| Estrella | 0,45 | 2,7 |
| Delta | 0,91 | 3,6 |

Tabla 2.2 Corriente nominal y arranque en conexión estrella y delta

[Elaboración propia]

Además, se cumple la característica de arrancar en estrella ya que la corriente en esta conexión se reduce en comparación a la conexión Delta como se menciona en el punto 1.3.2.

2.5.3. VERIFICACIÓN DE FUNCIONES DEL MÓDULO DIDÁCTICO

Esta prueba consiste en verificar las funcionalidades del módulo didáctico descritas en el capítulo 2, con el fin de establecer si el módulo cumple o no las mismas. Para realizar esta prueba se realizó una tabla de evaluación con todas las funcionalidades que debe cumplir en los dos modos de operación como se muestra en la tabla 2.3.

| MODO | FUNCION | CUMPLE | |
|---------------|--|---------------|-----------|
| | | SI | NO |
| Manual | Motor arranca en conexión Delta | ✓ | |
| | Motor arranca en conexión Estrella | ✓ | |
| | Motor cambia de conexión Delta a Estrella o viceversa | ✓ | |
| | Motor frena en base a la selección del porcentaje | ✓ | |
| | Motor invierte su giro en reposo | ✓ | |
| | Módulo Didáctico se reinicia al presionar el botón RESET | ✓ | |
| | LCD muestra la operación realizada y mensajes de restricción | ✓ | |

| | | | |
|-------------------|--|---|--|
| Automático | Motor arranca en conexión Estrella - Delta | ✓ | |
| | Motor frena en tipo Suave | ✓ | |
| | Motor frena en tipo Brusco | ✓ | |
| | Motor invierte su giro en reposo | ✓ | |
| | Motor invierte su giro en funcionamiento | ✓ | |
| | LCD muestra la operación realizada y mensajes de restricción | ✓ | |
| | Módulo Didáctico se reinicia al presionar el botón RESET | ✓ | |

Tabla 2.3 Evaluación de las funciones del módulo didáctico

[Elaboración propia]

2.5.4. MECANISMO DE FRENO

Esta prueba se realizó en tres partes:

La primera prueba consiste en determinar el tiempo de frenado que emplea el motor en los dos modos de operación manual o automático con el fin de establecer en que circunstancia se reduce o aumenta el tiempo de frenado del motor. Para realizar esta prueba se escogió primero un modo de operación manual y se calibró solo tres porcentajes entre 0% al 100% en pasos de 50% y con la ayuda de un cronómetro establecer cuanto tiempo se demora como se muestra en la tabla 2.4.

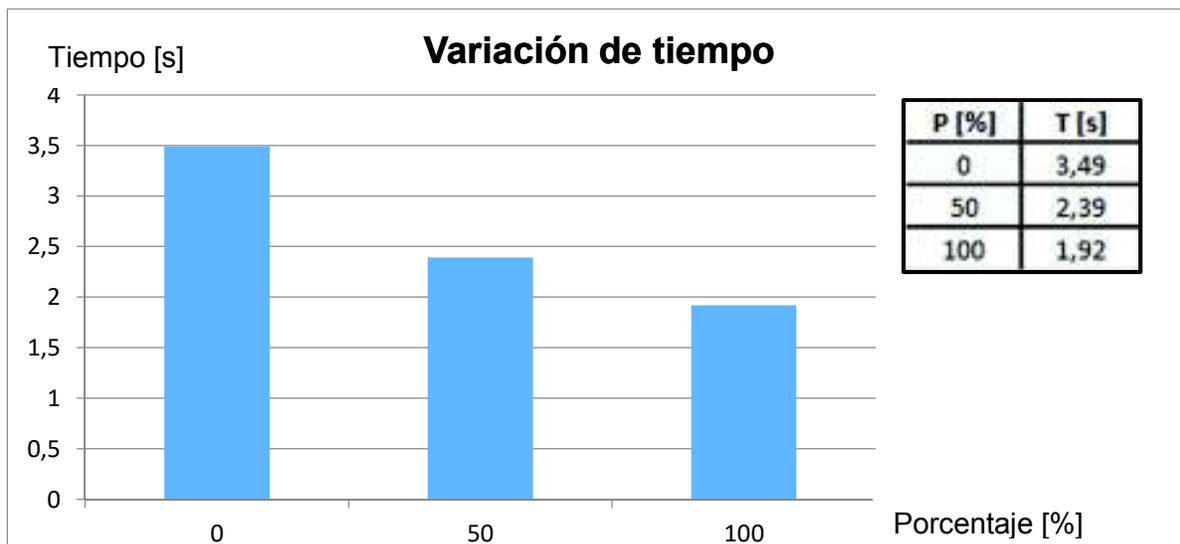


Tabla 2.4 Tiempo de frenado para diferentes porcentajes de freno

[Elaboración propia]

Luego se escogió un modo de operación automático, el freno en este modo se realiza dos formas: suave o brusco, de igual manera se utilizó un cronómetro para diferenciar el tiempo que se demora en estas dos formas como se muestra en la tabla 2.5.

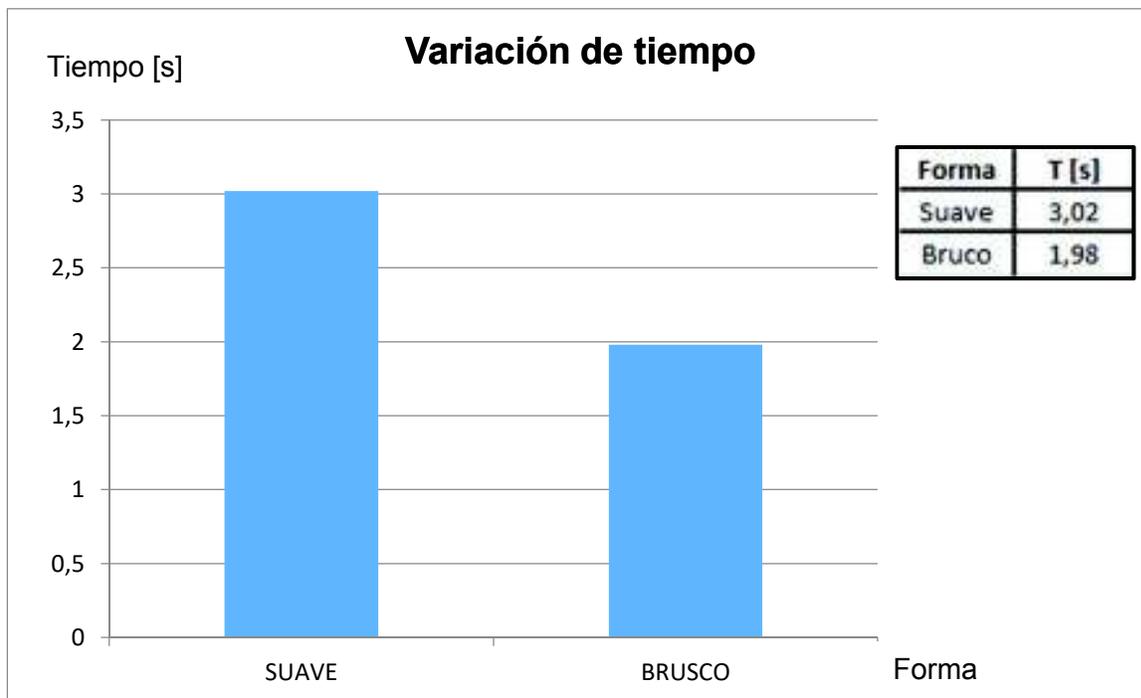


Tabla 2.5 Tiempos de frenado para los dos formas de freno
[Elaboración propia]

En modo manual, el tiempo que tarda el motor en detenerse disminuye gradualmente cuando se eligen mayores porcentajes y aumenta al elegir menores porcentajes. En modo automático, el tiempo que tarda el motor en detenerse usando el freno brusco es menor al freno suave, debido a que, en el freno brusco se emite un mayor porcentaje variable y en freno suave se emite un menor porcentaje variable.

La segunda prueba consiste en determinar el voltaje y corriente que recibe el motor en los dos modos de operación manual y automático con el fin de identificar como varía el tiempo de frenado al ingresar voltaje continuo. Para realizar esta prueba se escogió un modo de operación manual, la cantidad de voltaje y corriente que reciben los bobinados del motor en este modo es constante y se determinan mediante la

selección de un porcentaje entre 0% al 100% en pasos de 10% y con la ayuda de un multímetro se procedió a medir los mismos como se muestra en las tablas 2.6 y 2.7.

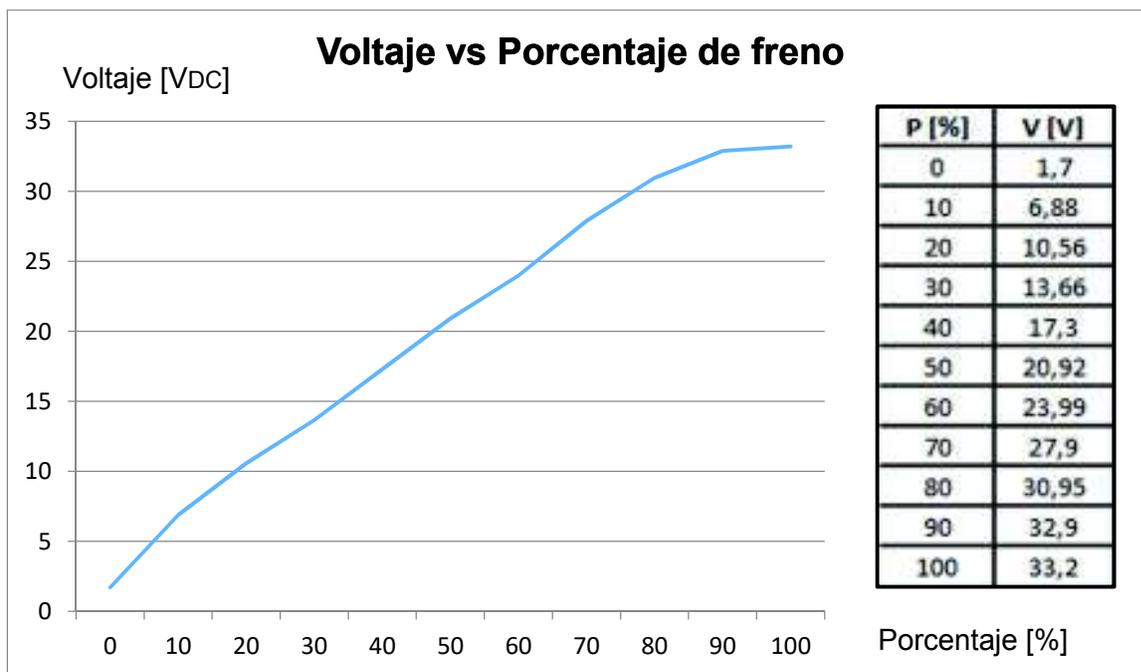


Tabla 2.6 Voltajes obtenidos para diferentes porcentajes de freno

[Elaboración propia]

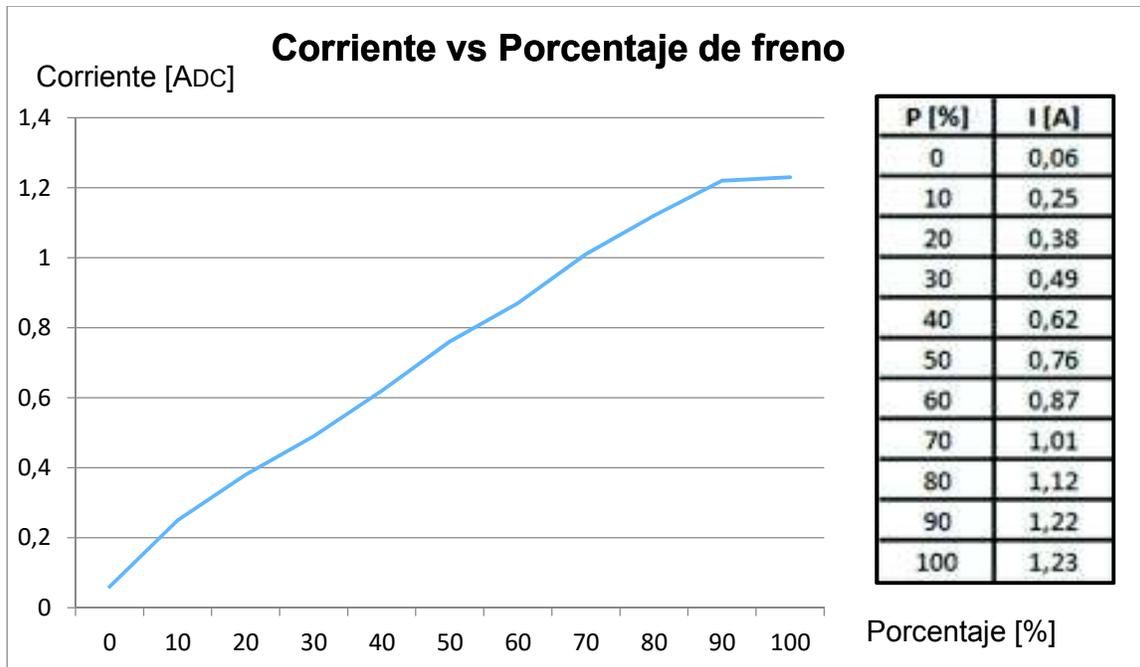


Tabla 2.7 Corrientes obtenidas para diferentes porcentajes de freno

[Elaboración propia]

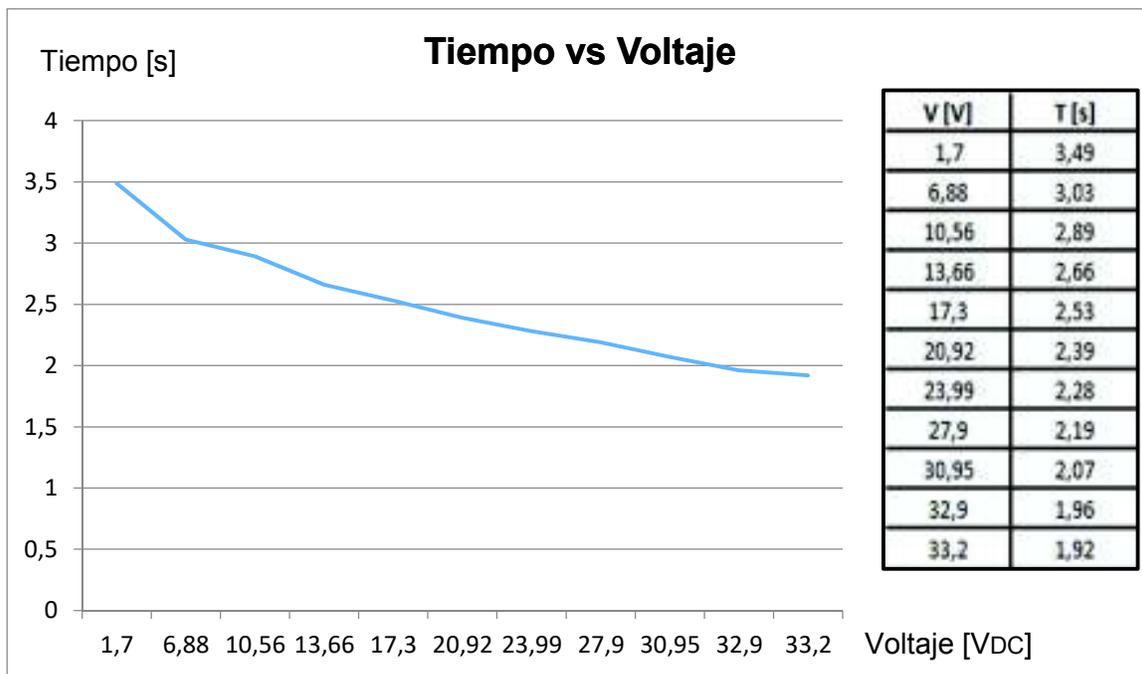


Tabla 2.8 Variación del tiempo a diferentes voltajes

[Elaboración propia]

En las tablas 2.6 y 2.7, se observa que a mayores porcentajes el voltaje y la corriente entran en una etapa saturación ya que este es el valor máximo que se puede emitir.

La gráfica mostrada en la tabla 2.6 responde a la ecuación: $y = mx + b$

Dónde:

y: Voltaje DC

m: La pendiente

x: Porcentaje

b: Coeficiente de posición

Tomando en cuenta los valores máximos y mínimos de cada eje, se obtuvo:
 $y = -0,315x + 1,7$.

Mientras que, la gráfica mostrada en la tabla 2.7 responde a la ecuación: $y = mx + b$

Dónde:

y: Corriente DC

m: La pendiente

x: Porcentaje

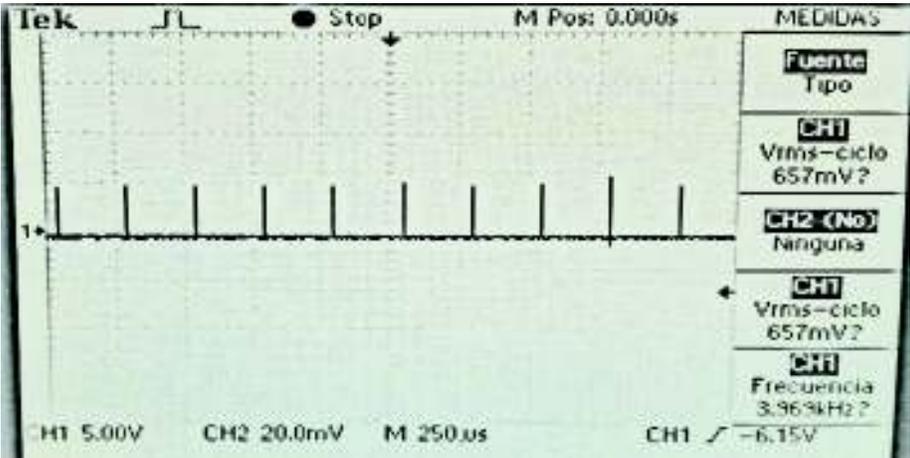
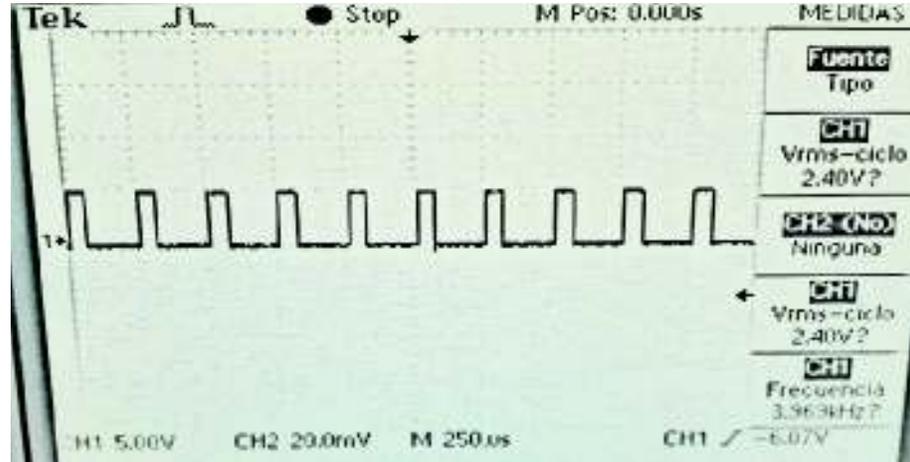
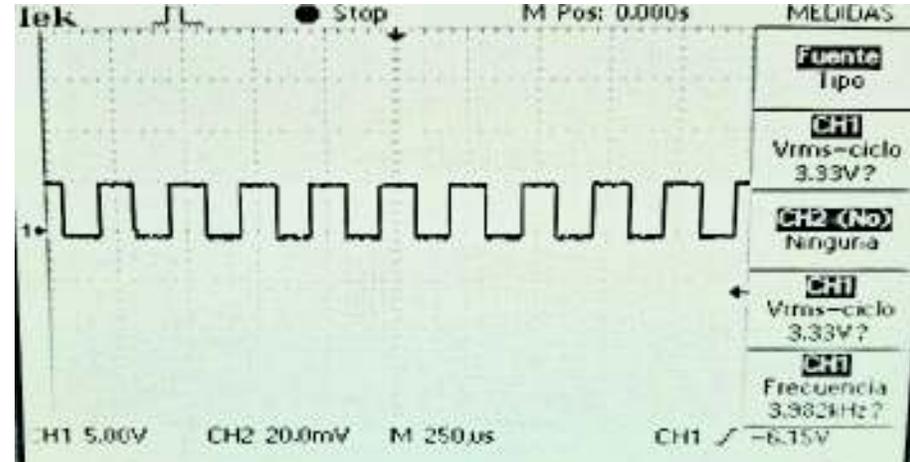
b: Coeficiente de posición

Tomando en cuenta los valores máximos y mínimos de cada eje, se obtuvo:
 $y = 0,0117x + 0,06$.

Al variar el voltaje a valores máximos de porcentaje se reduce el tiempo que empela el motor en detenerse optimizando su frenado, caso contrario se aumenta ya que se varia valores mínimos de porcentaje como se muestra en la tabla 2.8

La tercera prueba consiste en verificar el ancho de pulso de la señal PWM con el fin de visualizar la modulación de la misma en los dos modos de operación manual y automático. Para realizar esta prueba se escogió un modo de operación manual, la modulación del ancho de pulso en este modo es constante y se determina mediante la selección de un único valor porcentaje entre 0% al 100% en pasos de 25% y con la ayuda de un osciloscopio se procedió a visualizar la misma como se muestra en la tabla 2.9 .

En modo automático, la modulación del ancho de pulso es la misma obtenida en el modo manual con la única diferencia que la modulación varía de acuerdo a la forma de freno, en freno suave varia ascendentemente del 40% al 60% y en freno brusco varia descendentemente del 100% al 60%.

| PORCENTAJE DE FRENO [%] | MODULACIÓN DEL ANCHO DE PUSLO |
|-------------------------|--|
| 0 |  |
| 25 |  |
| 50 |  |

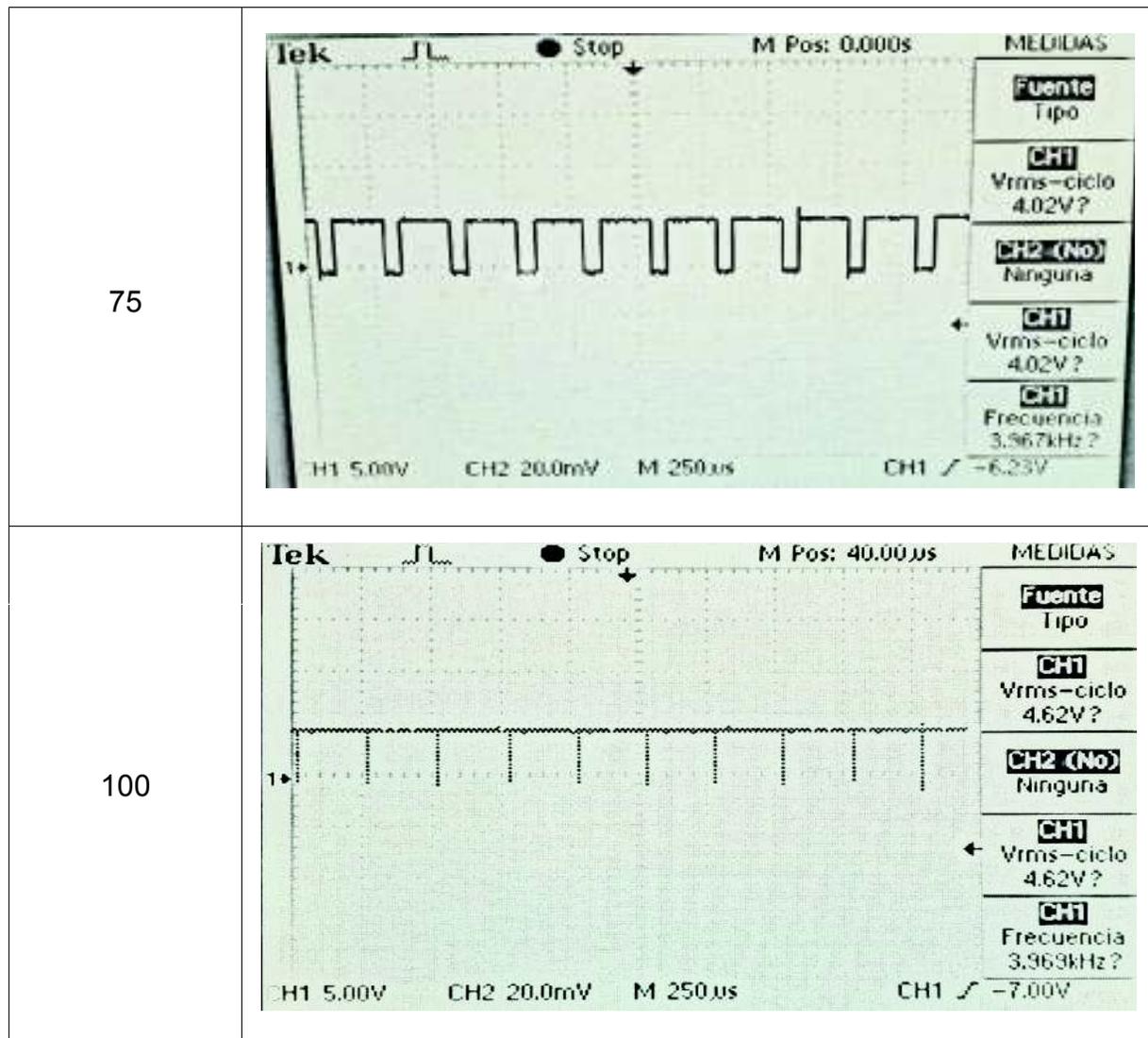


Tabla 2.9 Señal PWM a diferentes porcentajes de freno

[Elaboración propia]

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. CONCLUSIONES

- Se ha cumplido el objetivo general al diseñar y construir un módulo didáctico, para el control de un motor trifásico como se describe en el capítulo 2.
- Se han cumplido con los objetivos específicos al diseñar y construir los circuitos eléctricos y electrónicos para el control del motor. Además de implementar los mismos en módulos adicionales y placas electrónicas para finalmente construir e integrar todos los elementos del módulo didáctico en la estructura principal como se describe en el capítulo 2.
- La reducción de la corriente de arranque en conexión estrella como se muestra en la tabla 2.2, reduce los esfuerzos mecánicos y par de arranque en el motor usado en el presente proyecto optimizando su funcionamiento al arrancar.
- La versatilidad de funcionamiento de este módulo didáctico para controlar el arranque, sentido de giro y frenado del motor trifásico como se muestra en la tabla 2.3, permite ser comparado con cualquier tipo de controlador lógico programable usado en la industria para esta misma aplicación.
- El funcionamiento del freno DC aplicado en este proyecto en comparación al freno por inercia reduce el tiempo que emplea el motor para detenerse como se muestra en las tablas 2.4 y 2.5, que a nivel industrial se conoce como “cost time” que significa reducir costos por pérdidas de tiempo en el frenado del motor.
- El mecanismo de funcionamiento del módulo didáctico empleado permite al estudiante de Tecnología Electromecánica relacionarse de forma educativa y práctica con el trabajo de motores de inducción, contactores electromagnéticos y acopladores de voltaje usando microcontroladores.

- El uso del microcontrolador para controlar componentes de baja o mediana potencia es estable en todo momento de operación ya que en ningún momento los componentes controlados realizaron acciones erróneas por perturbaciones brindando siempre estabilidad y eficiencia en el funcionamiento.

3.2. RECOMENDACIONES

- Implementar los diferentes métodos de freno existentes ya que a nivel industrial no solo se usa frenos por la inercia del motor, con lo cual el estudiante de Tecnología Electromecánica pueda conocer e implementar los mismos.
- Leer el manual de funcionamiento mostrado en el anexo A, para manipular de forma correcta el módulo didáctico para no generar daños o fallas en los componentes del mismo en la operación.
- Utilizar el presente módulo didáctico en motores de inducción que trabajen con una corriente nominal baja de hasta 3,2 amperios como valor máximo ya que todos los componentes soportan este valor.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alldatasheet. (2017). *Electronic Components Datasheet Search*. Obtenido de <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/14624/PANJIT/1N4007/180/1/1N4007.html>
2. Alldatasheet. (2017). *Electronic Components Datasheet Search*. Obtenido de <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/2770/MOSPEC/TIP122/145/1/TIP122.html>
3. Alldatasheet. (2017). *Electronic Components Datasheet Search*. Obtenido de <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/2846/MOTOROLA/4N25/255/1/4N25.html>
4. Angulo, P. (Septiembre de 2014). *Blog de Pablo Angulo*. Obtenido de <http://pabloangulo.blog.epn.edu.ec/wp-content/uploads/sites/174/2014/09/El-Contactor-Electromagn%C3%A9tico.pdf>
5. Atmel Corporation. (Agosto de 2016). *Atmel Corporation*. Obtenido de http://www.atmel.com/Images/Atmel-42742-ATmega164P_Datasheet.pdf
6. Barros, M. & Tipan, S. (2017). *Construcción de un dispositivo de protección para motores trifásicos de inducción basado en el microcontrolador Pic*. Quito.
7. Blogspot. (15 de Febrero de 2013). *Electricidad Práctica*. Obtenido de <http://autodesarrollo-electricidadpractica.blogspot.com/2011/07/motores-electricos.html>
8. Bowerl, A. B. (Agosto de 2012). Cuaderno de Aplicaciones Técnicas. *El motor asíncrono trifásico*. Barceloma, España.
9. Brunk. (Enero de 2015). *Brunk Technology*. Obtenido de <http://brunk.es/es/pulsadores-interruptores/2726-pulsador-metalico-rojo-155mm-de-diametro-circuito-abierto.html>
10. Chapman, S. (2012). Máquinas eléctricas. En S. Chapman, *Introducción a los pincipios de las máquinas* (págs. 1-1;231-295). Mexico: BAE Systems Australia.out

11. Electricas Bogota Ltda. (2010). *Electrica Bogot*. Obtenido de <http://www.electricasbogota.com/detalles/borneras/4081-35961>
12. Electronic Components. (2017). *Electronic Components*. Obtenido de http://www.tme.eu/html/ES/bornas-con-conector-hembra-de-banana-4-mm/ramka_3712_ES_pelny.html
13. Explico Fácil. (22 de Febrero de 2016). *Explico Fácil*. Obtenido de <http://www.explicofacil.com/2016/02/la-importancia-de-una-buena-fuente-de.html>
14. Galarza, M. & Quisaguano, J. (2009). *Diseño y construcción del sistema de frenado dinámico para un vehículo eléctrico*. Quito.
15. GHI Electronics. (Enero de 2010). *GHI Electronics*. Obtenido de <https://www.ghielectronics.com/downloads/man/20084141716341001RelayX1.pdf>
16. Ingelcom. (31 de Julio de 2016). *Ingelcom*. Obtenido de https://issuu.com/frogcreativos/docs/cat__logo_ingelcom_siemens?workerAddress=ec2-107-22-128-5.compute-1.amazonaws.com
17. Lopez, D. (Marzo de 2010). *El mundo es ELectrónica*. Obtenido de <http://elmundoeselectronica.blogspot.com/2010/03/proteus-herramienta-proteus-proteus-es.html>
18. Molina. (2013). *ProfesorMolina*. Obtenido de <http://www.profesormolina.com.ar/>
19. Mrelberni. (2016). *Microcontroladores*. Obtenido de <http://microcontroladores-mrelberni.com/convertidor-analogico-digital-avr/>
20. Mrelberni. (2016). *Microcontroladores*. Obtenido de <http://microcontroladores-mrelberni.com/pwm-timer1-avr-modo-rapido/>
21. Proaño, P. (22 de Marzo de 2014). Programación en Microcontroladores en Lenguaje C. Quito, Pichincha, Ecuador.
22. Tasiguano, C. (2015). Arranque de motores trifásicos de inducción. Quito, Pichincha, Ecuador.

23. Velasco, N. (Noviembre de 2005). *Bibing*. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11141/fichero/PFC%252F3+Microcontroladores.pdf>
24. WordPress. (2015). *Tomando Notas*. Obtenido de <https://tomatoma.wordpress.com/manual-de-php/2-estructuras-de-control-if-for-for-each-while/>

ANEXOS

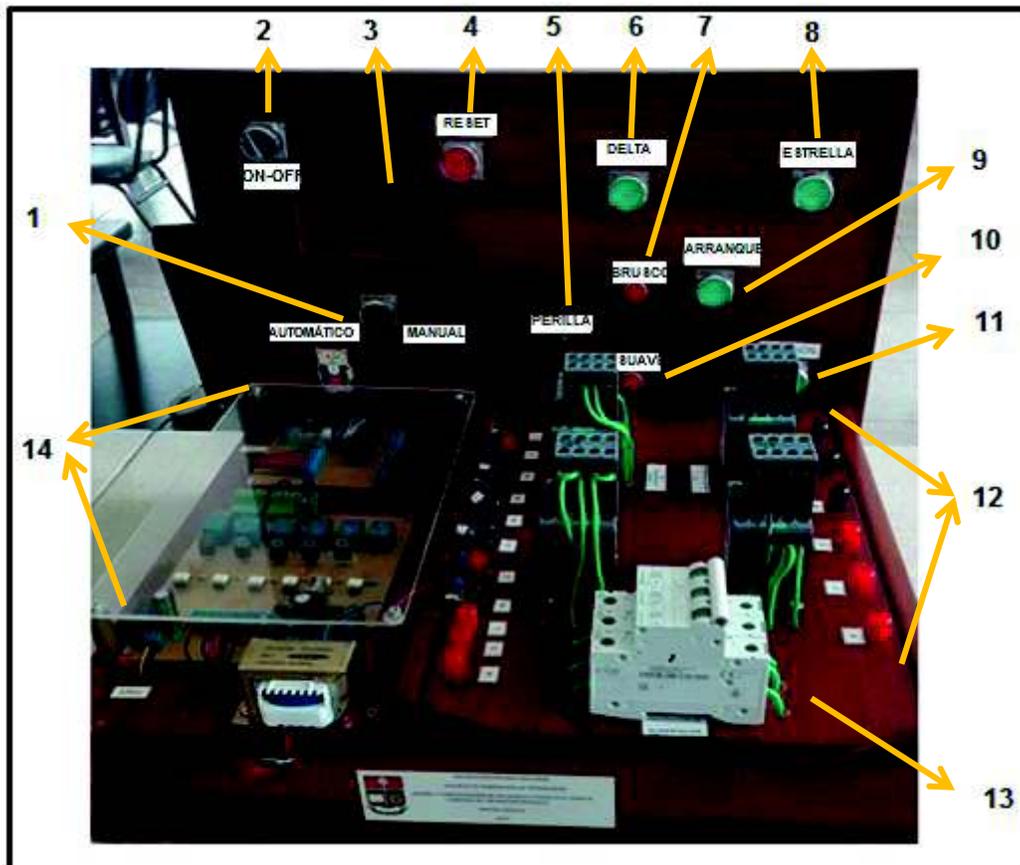
ANEXO A: MANUAL DE FUNCIONAMIENTO

GUIA DE FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO DIDÁCTICO

INTRODUCCIÓN

La presente guía permite al usuario conocer e interpretar de forma correcta el funcionamiento del módulo didáctico para controlar el arranque, frenado e inversión de giro del motor trifásico de inducción.

ELEMENTOS Y FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO DIDÁCTICO



- | | |
|-----------------------|--------------------------|
| (1) Selector de modo | (8) Botón Estrella |
| (2) Selector ON / OFF | (9) Botón Arrancar |
| (3) LCD | (10) Botón Suave |
| (4) Botón reset | (11) Botón Inversión |
| (5) Perilla | (12) Módulo de fuerza |
| (6) Botón Delta | (13) Switch Trifásico |
| (7) Botón Brusco | (14) Placas electrónicas |

Los elementos (1 al 11) del módulo didáctico corresponden al panel de control, el cual sirve para controlar la operación del motor usando los siguientes elementos:

- **Selector de modo.** – Permite escoger el modo de operación manual o automático, para esta función se usó un selector de 3 posiciones.
- **Selector On / Off.** - Enciende o apaga las fuentes de alimentación continua del módulo didáctico, para esta función se usó un selector de 2 posiciones..
- **Botón Delta.** – Cuando se encuentre en modo manual arranca el motor con sus bobinados conectados en delta, para esta función se usó un pulsador metálico normalmente abierto.
- **Botón Estrella.** – Cuando se encuentre en modo manual arranca el motor con sus bobinados conectados en estrella, para esta función se usó un pulsador metálico normalmente abierto.
- **Botón Arrancar.** - Cuando se encuentre en modo automático arranca en estrella - triángulo el motor, para esta función se usó un pulsador normalmente abierto.
- **Botón Inversión.** – Cuando se encuentre en modo manual invierte el sentido de giro del motor cuando se encuentre parado. Mientras que, en modo automático invierte el sentido de giro del motor cuando se encuentre parado o en funcionamiento, para esta función se usó un pulsador metálico normalmente abierto.
- **Botón Brusco.** – Frena al motor de acuerdo al modo de operación seleccionado. En modo manual frena al motor de acuerdo al valor calibrado entre 0% al 100%, mientras que, en el modo automático frena al motor con una variación descendente del 100% al 60%, para esta función se usó un pulsador metálico normalmente abierto.
- **Botón Suave.** - Frena al motor de acuerdo al modo de operación seleccionado. En modo manual frena al motor de acuerdo al valor calibrado entre 0% al 100%, mientras que en el modo automático frena al motor con una variación ascendente del 40% al 60%, para esta función se usó un pulsador normalmente metálico abierto.

- **Perilla.** – Cuando se encuentre en modo manual calibra el porcentaje de freno para el motor entre el 0% al 100%, para esta función se usó un potenciómetro de 5 K Ω .
- **Botón reset.** – Resetea al microcontrolador en cualquier momento de operación deteniendo al motor, más no apaga la alimentación de alterna, para esta función se usó un pulsador metálico normalmente cerrado.

El elemento (14) del módulo didáctico corresponde a dos placas electrónicas que cumplen una función específica:

- **Placa Electrónica de Control.**- Recibe, procesa e emite todas las señales de entrada emitidas por el panel de control usando un microcontrolador.
- **Placa Electrónica de Acoplamiento de Voltaje.**- Activa los relés usando dispositivos electrónicos de estado sólido permitiendo el paso de las fuentes de alimentación de alterna y continua.

Los elementos (12 y 13) del módulo didáctico corresponden al módulo de fuerza, el cual controla el arranque, inversión de giro y frenado dinámico del motor mediante los siguientes componentes:

- **Switch trifásico.**- Permite el paso de la fuente de alimentación para los diferentes componentes del módulo didáctico y protege ante la presencia de cortocircuitos en la alimentación trifásica.
- **Relé magnetotérmico.**- Protección ante la presencia de sobrecargas en el motor.
- **Contactores electromagnéticos** Controlan el arranque, freno y sentido del giro del motor cuando estos elementos sean activados.

Su funcionamiento consiste en dos modos de operación manual y automático. En modo manual el motor arranca en conexión delta o estrella, el frenado consiste en seleccionar un único valor de porcentaje en un rango de 0% al 100% y la inversión de giro se lo realiza únicamente cuando el motor se encuentre parado. En modo automático el motor arranca inicialmente en conexión estrella hasta alcanzar las condiciones normales de operación para luego trabajar en conexión triangulo, la inversión de giro se lo realiza cuando el motor se encuentre parado o en funcionamiento y el frenado se lo realiza de dos maneras: suave o brusco. En forma

suave se emite un valor variable ascendente del 40% al 60%, mientras que, en brusco se emite un valor variable descendente del 100% al 60%.

PUESTA EN MARCHA

Identificar cada bornera de conexión ya que cumplen una función distinta como conectar la alimentación trifásica y monofásica que necesitan contactores electromagnéticos, la fuente de computadora y el motor trifásico, además de conectar la fuente DC para el frenado del motor. Cada conexión tiene su nomenclatura respectiva, se recomienda respetar la misma para precautelar al usuario y los elementos de este módulo didáctico.

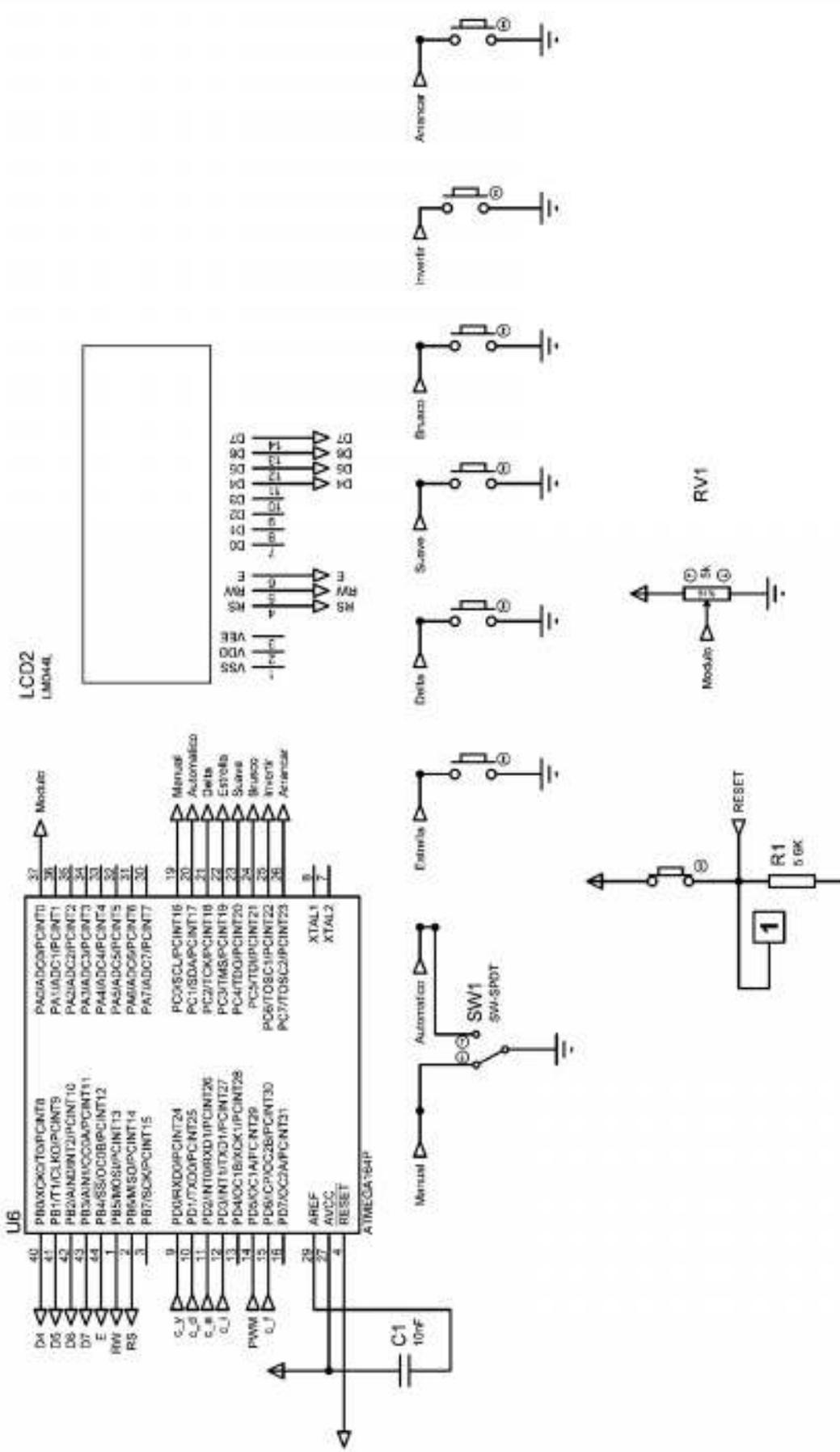
El módulo didáctico se energiza al activar el switch trifásico y el selector ON/OFF y espera únicamente la activación de los botones del panel de control con lo cual el motor trifásico empezará a trabajar. Por ejemplo, si desea trabajar en modo manual y arrancar el motor en estrella y frenar al 100%, se debe seleccionar el modo manual con el selector de modo, luego pulsar el botón estrella con lo cual el motor empieza a trabajar, para el frenado primero se debe seleccionar el 100% con la perilla y finalmente pulsar el botón suave o brusco con lo cual el motor se frena.

MANTENIMIENTO

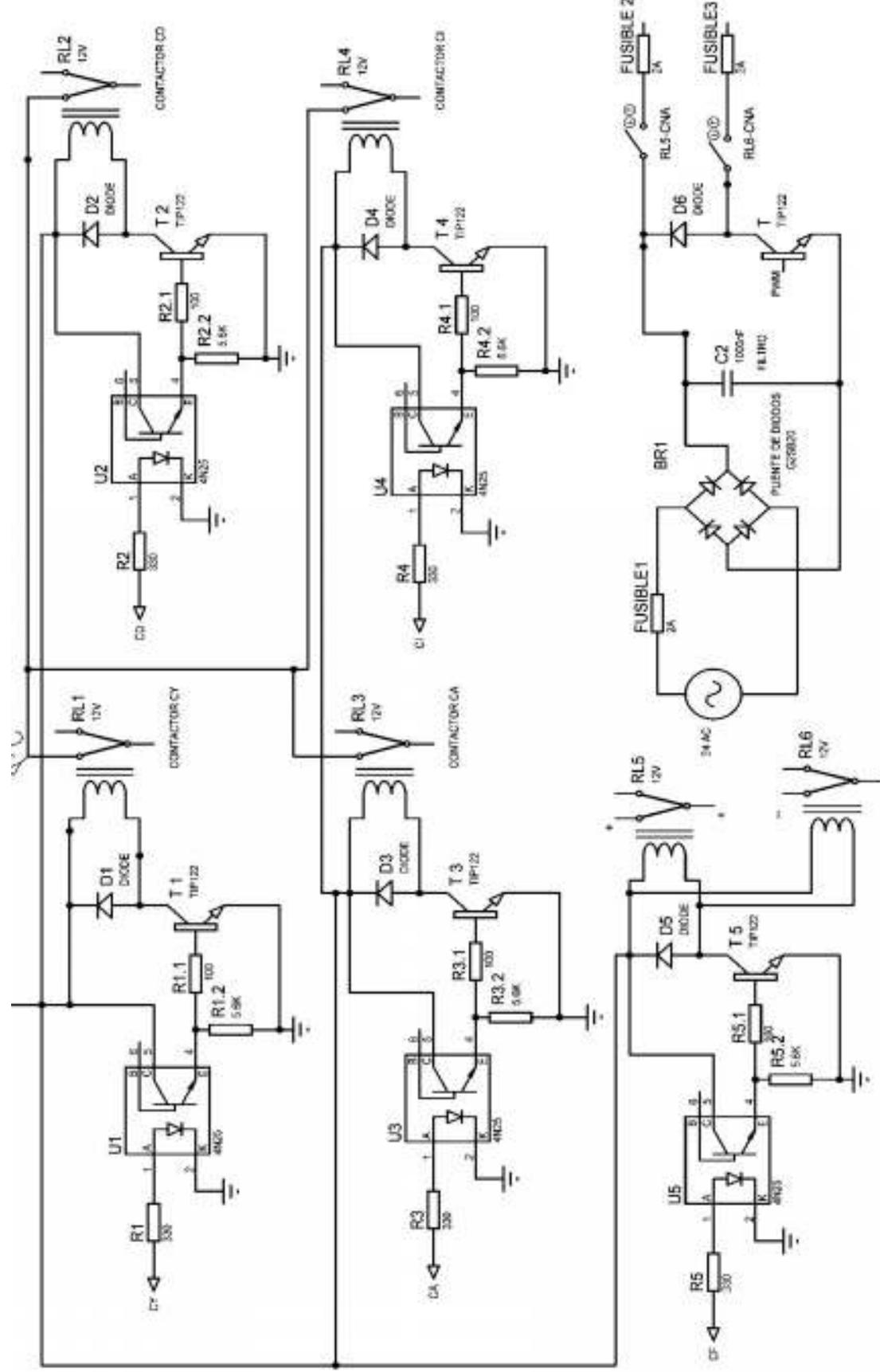
Revisar cada seis meses el estado actual de las dos placas electrónicas para identificar si existen pérdidas de continuidad en el circuito. Además, utilizar un aditivo para estimular la continuidad de las pistas impresas de la placa electrónica. En el caso de existir pérdidas de continuidad proceder a rectificar con una nueva soldada.

Revisar cada tres meses la conexión de todo el módulo didáctico para identificar si existen puntos de conexión flojos. En el caso de existir puntos flojos proceder a ajustar los mismos para no tener fallas en el funcionamiento.

ANEXO B: CIRCUITOS ELECTRÓNICOS



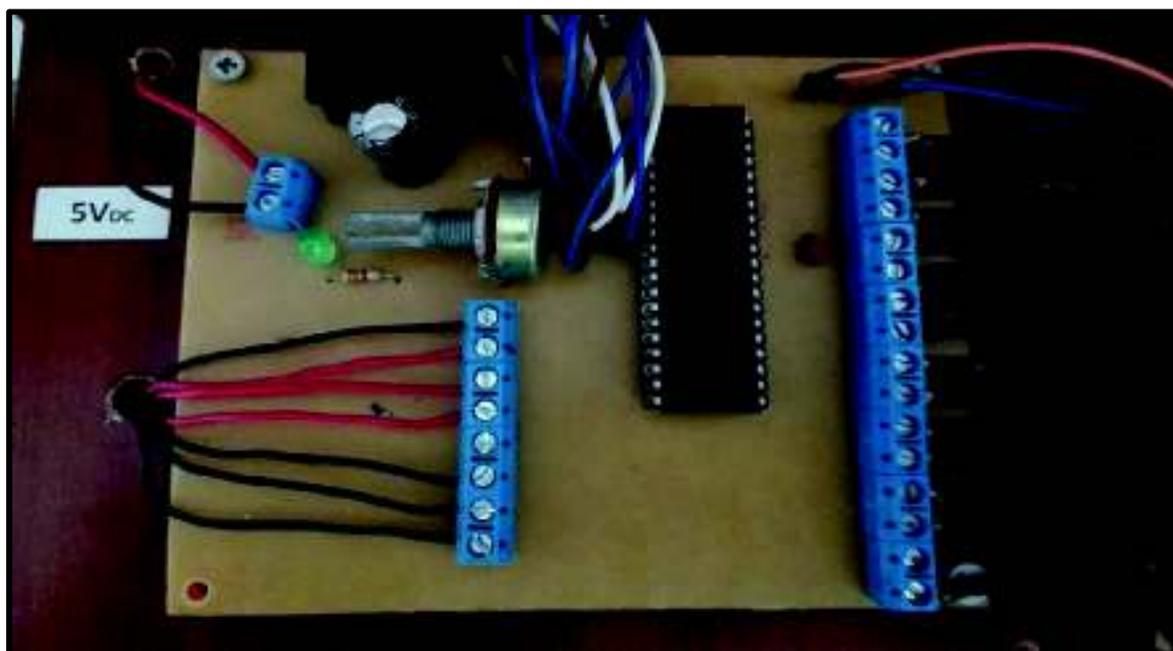
| | | | | | | | |
|-----|---|-------------|---------------------------------------|--------|--|-----------|------------|
| No. | 1 | INSTITUCIÓN | ESCUOLA POLITÉCNICA NACIONAL ESFOT | TÍTULO | CIRCUITOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS | DIBUJADO: | PADILLA X. |
| | | | | | | FECHA | 12-jul-17 |
| | | | | | | REVISADO: | PROAÑO P. |



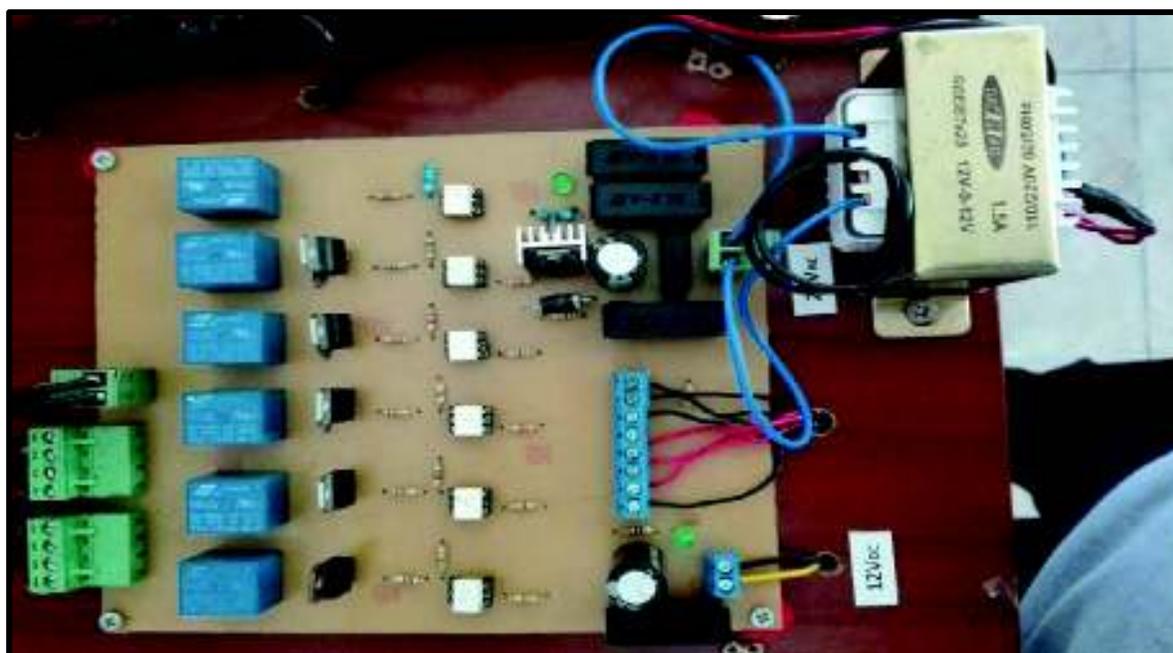
| | | | | |
|-----|---------------------------------------|--|-----------|------------|
| No. | INSTITUCIÓN | TÍTULO | DIBUJADO: | PADILLA X. |
| 2 | ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL ESFOT | CIRCUITOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS | FECHA | 12-jul-17 |
| | | | REVISADO: | PROAÑO P. |

ANEXO C: PLACAS ELECTRÓNICAS

PLACA ELECTRÓNICA DE CONTROL



PLACA ELECTRÓNICA DE ACOPLAMIENTO DE VOLTAJE



| No. | INSTITUCIÓN | TÍTULO | DIBUJADO: | PADILLA X. |
|-----|---------------------------------------|---------------------|-----------|------------|
| 1 | ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL ESFOT | PLACAS ELECTRÓNICAS | FECHA | 12-jul-17 |
| | | | REVISADO: | PROAÑO P. |

ANEXO D: DIAGRAMAS DE FLUJO

