



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO

NOMBRE DEL PROYECTO

"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE INVERSORES CD/CA PARA CONTROL Y FUERZA EN LOS MOTORES ELECTRICOS EN LOS VEHICULOS ELECTRICOS"

OPCIÓN QUE CORRESPONDA

TITULACION INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERIA EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

PRESENTA:

LUIS ENRIQUE ALCANTARA MORALES

NOMBRE DEL ASESOR:

FRANCISCO ARTURO VAZQUEZ TONIX



APIZACO, TLAX., OCTUBRE 2025



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Apizaco
Departamento de Ingeniería Eléctrica Electrónica
Apizaco, Tlaxcala, **05/junio/2025**

Departamento: Ingeniería Eléctrica y Electrónica
No. OFICIO IEE/315/2025

Asunto: Liberación de Proyecto
para la Titulación Integral

ISRAEL JORGE SÁNCHEZ SÁNCHEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
P R E S E N T E.

Por este medio me permito informar a usted que ha sido liberado el siguiente proyecto para la Titulación Integral:

Nombre del egresado:	LUIS ENRIQUE ALCÁNTARA MORALES
Carrera:	INGENIERÍA EN SISTEMAS AUTOMOTRICES
No. de Control:	20371251
Nombre del proyecto:	"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INVERSORES CD/CA PARA CONTROL Y FUERZA EN LOS MOTORES ELÉCTRICOS EN LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS"
Producto:	TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Agradeciendo de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados, le envió un cordial saludo.

ATENTAMENTE
*Excelencia en Educación Tecnológica
Pensar para Servir, Servir para Triunfar*

JAIME ALBERTO ELIZALDE OLIN
JEFE DEL DEPTO. DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO
DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA
Y ELECTRÓNICA


Francisco Arturo Vázquez Torix
Nombre del Asesor

c.c.p. Expediente



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahuashuatepec,
Municipio de Tzompantepec, Tlaxcala, Mex. C.P. 90491 Tel. (241)
4172010 Ext. 145, e-mail: electronica@apizaco.tecnm.mx tecnm.mx |
apizaco.tecnm.mx





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLOGÍO
NACIONAL DE APIZACO



Instituto Tecnológico de Apizaco
División de Estudios Profesionales

Tzompantepec, Tlaxcala **20/octubre/2025**

ALCANTARA MORALES LUIS ENRIQUE
EGRESADO(A) DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
EN SISTEMAS AUTOMOTRICES
CON NÚMERO DE CONTROL 203712518.
P R E S E N T E.

Por este medio, me permito informar a usted que por aprobación de la comisión revisora asignada para valorar el trabajo que mediante la opción **TITULACIÓN INTEGRAL INFORME DE RESIDENCIA PROFESIONAL** y cuyo tema es: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INVERSORES CD/CA PARA CONTROL Y FUERZA EN LOS MOTORES ELÉCTRICOS EN LO VEHÍCULOS ELÉCTRICOS**, conforme a lo establecido en el procedimiento para la obtención del Título Profesional en el Instituto Tecnológico, la División de Estudios Profesionales a mi cargo le otorga la:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Debiendo entregar **1 USB** del mismo, apropiadamente empastado, a la brevedad, para presentar su Acto de Recepción Profesional.

Sin otro particular por el momento me despido.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
Pensar para Servir, Servir para Triunfar®

CECILIA YARELY ARREGUÍN LARA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

ccp. Archivo

CYAL/mc



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahuastepetec,
Municipio de Tzompantepec, Tlaxcala, Mex. C.P. 90491 Tel. (241) 4172610
Ext. 304, e-mail: dep_titulacion@apizaco.tecnm.mx | apizaco.tecnm.mx



Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido fundamentales en el desarrollo y culminación de mis residencias profesionales.

En primer lugar, doy gracias a Dios, quien me ha guiado y dado la fortaleza necesaria para afrontar cada reto con fe y esperanza. Su presencia ha sido una fuente constante de inspiración a lo largo de este proceso. A mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y por enseñarme siempre el valor del esfuerzo y la perseverancia. Sin su dedicación y sacrificio, este logro no habría sido posible. A mi amiga, Maricarmen Romero Nava, le agradezco profundamente por su apoyo, comprensión y motivación. Su aliento y confianza en mí me han dado la fuerza para continuar en cada etapa de este camino. A mi asesor de residencias profesionales, Arturo Francisco Vázquez Tonix, le agradezco por su guía, paciencia y enseñanza. Su apoyo ha sido esencial para la culminación exitosa de mi proyecto, proporcionándome las herramientas necesarias para crecer profesionalmente. A mis maestros, quienes han sido una fuente de conocimiento y orientación a lo largo de mi formación: la maestra Natalia Flores Vázquez, por su ayuda en la liberación del inglés; al maestro Miguel Ángel Rodríguez, al maestro Eber Salgado, a la maestra Estela Domínguez, a Raziél Guarneros, al doctor Carlos Ortiz Lima, a Aime Hernández, a mi profesor Erick

Montiel y la maestra Lucila, también a mi familia Alcántara y en especial a mi abuela Alejandra Juárez Campos y a mi tío Gilberto Alcántara y a su esposa berania. que, aunque mi abuela y tío ya no están conmigo también es un logro que ellos les hubiera gustado ver.

También a la familia morales a mi abuela catalina, a mi abuelo Jorge que siempre creyeron en mí, también agradezco el apoyo a mi tía Alejandra, a mi tío lázaro y a mi tío diego.

A todos doy gracias por compartir sus conocimientos y por su dedicación en mi aprendizaje.

Agradezco también al Licenciado Héctor Escobar por su apoyo constante y al Licenciado Marcos por brindarme las oportunidades que me han permitido crecer tanto personal como profesionalmente. Finalmente, a todos ustedes, les doy las gracias de corazón por su tiempo, esfuerzo y dedicación. Sin su apoyo, este logro no hubiera sido posible.

¡Muchas gracias!

Índice

Agradecimientos	3
Índice	6
Introducción	9
Resumen	11
Objetivos	13
Objetivo general	13
Objetivos específicos	13
Capítulo I	14
GENERALIDADES DE LA EMPRESA	14
1.1 Nombre de la institución	14
1.2 Dirección y Ubicación	14
1.3 Organigrama del Instituto Tecnológico de Apizaco	15
1.4 Visión y Misión	16
1.5 Área de especialización y Giro	16
1.6 Giro de la Institución	16
1.7 Importancia de la institución en el proyecto	17
Capítulo II	18
MARCO TEORICO	18
2.1 preámbulo	18
2.2 fuentes conmutadas	18
2.2.1 definición de fuente conmutada	18
2.2.2 tipos de fuente conmutada	19
2.2.3 Transformador de fuente conmutada	21
2.3 Convertidores de Potencia	22
2.3.1 Convertidores Boost y Buck	22
2.3.2 Boost Converter (Conversor Elevador de Corriente)	23
2.4 Inversores CD/CA	24
2.4.1 Definición y funcionamiento del Inversor CD/CA	24
2.4.2 Inversor CD/CA conmutado	25
2.5 señales y Modulación	26

2.5.1 que es un pulso.....	26
2.5.2 tren de pulsos.....	27
2.5.3 voltaje promedio de un pulso senoidal.....	27
2.5.4 Modulación PWM.....	28
2.5.5 Transformada de Fourier en un Pulso.....	28
2.5.6 Calculo y utilización de la transformada de Fourier en un pulso.....	29
2.6 Motores Trifásicos automotriz.....	30
2.6.1 conceptos de Motores Trifásicos Automotrices.....	30
2.6.2 Motor eléctrico IPMSynRM.....	30
2.6.3 concepto de reluctancia.....	32
2.6.3.1 concepto flujo magnético.....	33
2.6.4 la reluctancia en un motor eléctrico automotriz.....	34
2.6.5 Concepto de Modulación SPWM.....	36
2.6.6 el concepto de capacitor.....	36
2.6.7 Control de Fases y PWM.....	37
2.7 Componentes Electrónicos Utilizados en el inversor CD/CA automotriz.....	39
2.7.1 Arduino Uno.....	39
2.7.2 Diodo 1N4148.....	39
2.7.3 MOSFET IRF540N.....	39
2.7.4 Concepto Transistor IGBT.....	40
2.7.5 IGBT IRG4PC50U.....	41
2.7.6 Boost Converter 12V-380V 500W.....	41
2.8 Tabla de correspondencia de Potencia y masa.....	42
2.8.1 Tabla de correspondencia entre Hp – KW.....	42
2.8.2 Tabla de correspondencia entre Hp – Kg.....	42
2.8.3 Tabla de correspondencia entre Hp mecánico – KW electrónico.....	43
Capítulo III.....	44
DESCRIPCION DEL PROBLEMA.....	44
3.1 Preámbulo.....	44
3.2 descripción del problema.....	44
3.3 Problemática en el laboratorio de Autotrónica.....	44
3.4 Problemática para los estudiantes a futuro.....	45

Capítulo IV	46
SOLUCION DEL PROBLEMA	46
4.1 Levantamiento de campo en el laboratorio de AUTOTRONICA	46
4.2 Calculo para calcular Hp de un motor eléctrico	50
4.3 Identificar, seleccionar y adquirir los componentes eléctricos y electrónicos 51	51
requeridos	51
4.4 Diseño del inversor CD/CA trifásico conmutado Automotriz.....	51
4.5 Cálculos del inversor CD/CA conmutado automotriz	59
4.5.1 cálculos detallados del sistema	59
4.5.2 potencia del sistema	60
4.5.3 corriente necesaria en 12V	60
4.5.4 conmutación por mosfet IRF540N.....	61
4.5.5 Potencia disipada por cada Mosfet.....	61
4.5.6 cálculo de las resistencias a gate (200Ω).....	61
4.5.7 trasformador y relación de vueltas	62
4.5.7.1 motor monofásico calculo	62
4.5.7.2 motor trifásico calculo	62
4.5.8 diseño del tablero	63
4.5.9 montaje de los Mosfets en placa perforada	64
4.5.10 montaje resistencias y cables que van al trasformador	65
4.5.11 montaje de jumpers en la placa para acoplamiento al Arduino	66
4.5.12 Selección del motor trifásico	67
4.5.13 base para sostener el motor	68
4.5.14 colocación de abrazaderas para el motor	69
4.5.15 construcción de la base para sostener los componentes del prototipo	71
4.5.16 colocación de los componentes del modulo	72
4.5.17 colocación del prototipo sobre la mesa.....	73
4.5.18 pruebas finales del prototipo.....	75
4.5.14 construcción final del prototipo	80
Conclusiones	81
Referencias Bibliográficas	83
Anexos	85

Introducción

En la actualidad, los vehículos eléctricos han revolucionado la industria automotriz al ofrecer una alternativa más eficiente y ecológica en comparación con los automóviles de combustión interna.

Estos vehículos funcionan mediante motores eléctricos, los cuales requieren un sistema de control y un sistema de potencia adecuado para su correcto funcionamiento.

Uno de los componentes esenciales en estos sistemas es el inversor CD/CA (SWITCHEADA), el cual permite convertir la corriente continua de la batería en corriente alterna conmutada, para alimentar motores eléctricos trifásicos automotrices.

Para aprovechar eficientemente la energía suministrada al motor, se utilizan dispositivos semiconductores de potencia como el IGBT, que permiten conmutar altas corrientes y voltajes a altas frecuencias.

Para mejorar el desempeño y la eficiencia de los motores eléctricos, se requiere como apoyo el uso de la técnica electrónica llamada modulación por ancho de pulso (PWM) y su variante SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation), técnicas que permiten regular la potencia entregada al motor al modificar el voltaje promedio en cada pulso por modulación de frecuencia.

En aplicaciones automotrices, se utilizan motores trifásicos conmutados, los cuales ofrecen una mayor eficiencia y control sobre el torque y la velocidad.

En el diseño de un vehículo eléctrico, es fundamental determinar cuántos caballos de fuerza (HP) se necesitan para transportar una carga específica. Para un automóvil con cinco pasajeros de 70 kg cada uno, se estima que se requieren aproximadamente 0.5 a 1 HP para

mantener un desplazamiento eficiente. La relación entre caballos de fuerza y corriente eléctrica depende de la eficiencia del sistema, el voltaje de operación y la tecnología del motor utilizado.

El presente trabajo aborda el diseño y construcción de un inversor CD/CA trifásico conmutado automotriz para motores eléctricos en vehículos electrónicos, utilizando técnicas avanzadas de control de potencia para mejorar la eficiencia energética y el rendimiento del sistema.

Resumen

El presente proyecto de residencias profesionales tuvo como objetivo diseñar y construir un inversor CD/CA trifásico conmutado para motores eléctricos automotrices, como parte del desarrollo tecnológico orientado a la movilidad eléctrica. Se llevó a cabo en el Instituto Tecnológico de Apizaco, en el laboratorio de Autotrónica del edificio X, respondiendo a la necesidad de contar con equipamiento especializado que permita a los estudiantes realizar prácticas reales en sistemas de control de potencia.

El trabajo contempló una investigación teórica sólida sobre fuentes conmutadas, convertidores de potencia, modulación PWM, motores trifásicos IPMSynRM y dispositivos electrónicos como IGBTs, MOSFETs y Boost Converters. Posteriormente, se diseñó el circuito en software (Proteus y Octave), desarrollando un sistema capaz de elevar 12V CD a 380V mediante modulación trifásica desfasada.

Se ensamblaron todos los componentes físicos en una base estructurada y se realizaron pruebas funcionales con osciloscopio que comprobaron el correcto desfase de las señales trifásicas generadas por el Arduino y el sistema de control. Sin embargo, por limitaciones de tiempo y presupuesto, no fue posible adquirir el transformador trifásico necesario para energizar completamente el motor y observar su rotación es decir no se probó el sistema de potencia si no solo el de control.

A pesar de ello, el sistema electrónico quedó completamente diseñado, ensamblado y funcional en su etapa de control. Se deja abierta la posibilidad para que futuros estudiantes puedan integrar el transformador faltante y dar continuidad al proyecto con pruebas mecánicas reales. El circuito de control fue probado eléctricamente y su funcionalidad

quedó verificada en laboratorio, cumpliendo satisfactoriamente con los objetivos propuestos en control sin embargo a pesar de no cumplir con el requerimiento de potencia los objetivos de control cumplieron.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y construir un inversor CD/CA trifásico conmutado para motores eléctricos trifásicos automotrices.

Objetivos específicos

- Realizar el levantamiento de campo en el laboratorio de AUTOTRONICA situado en el edificio X
- Realizar la búsqueda de los diagramas de los circuitos elevadores Boost y reductores bucks
- Investigar acerca de los componentes electrónicos y eléctricos que integren los circuitos elevadores y reductores de voltaje
- Identificar, seleccionar y comprar los componentes eléctricos y electrónicos requeridos
- Investigar el funcionamiento de un inversor CD/CA trifásico conmutado e investigar y determinar el modelo del motor eléctrico trifásico para los vehículos electrónicos
- Diseño del inversor CD/CA trifásico conmutado
- Construcción del inversor CD/CA
- Verificación de funcionamiento y pruebas

Capítulo I

GENERALIDADES DE LA EMPRESA

1.1 Nombre de la institución

El presente trabajo se desarrolla en el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Apizaco (ITA Apizaco), una institución de educación superior tecnológica reconocida por su excelencia académica y su contribución al desarrollo científico y tecnológico del país.

1.2 Dirección y Ubicación

El Instituto Tecnológico de Apizaco se encuentra ubicado en:

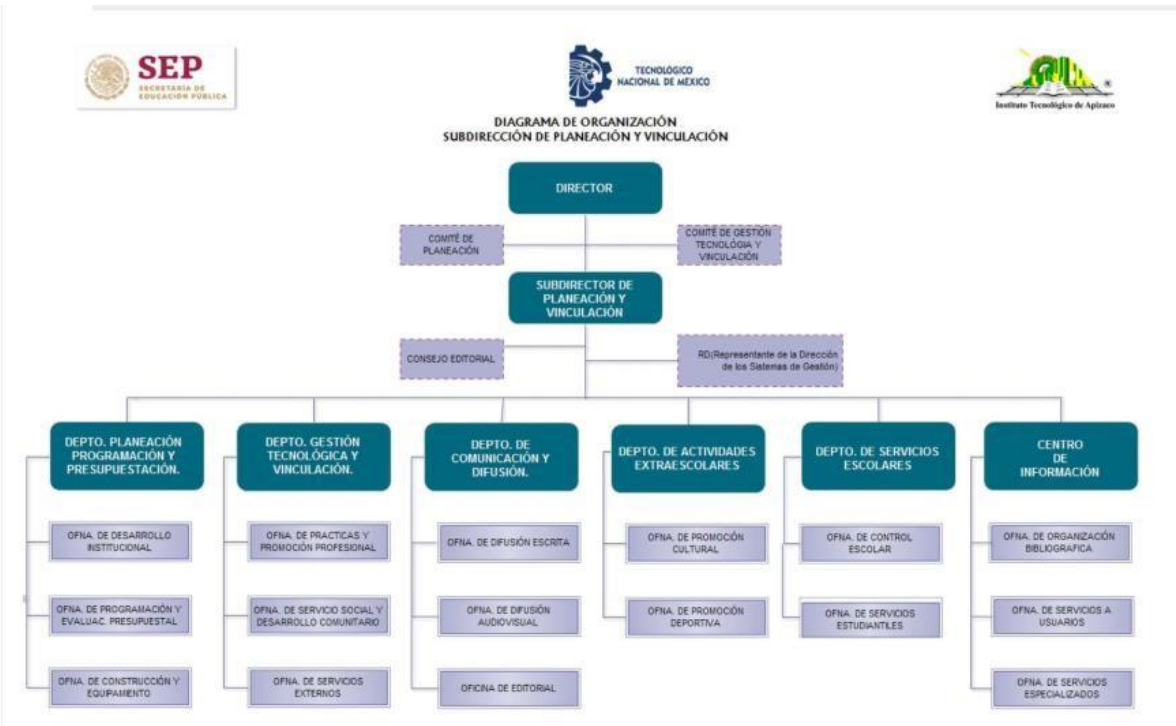
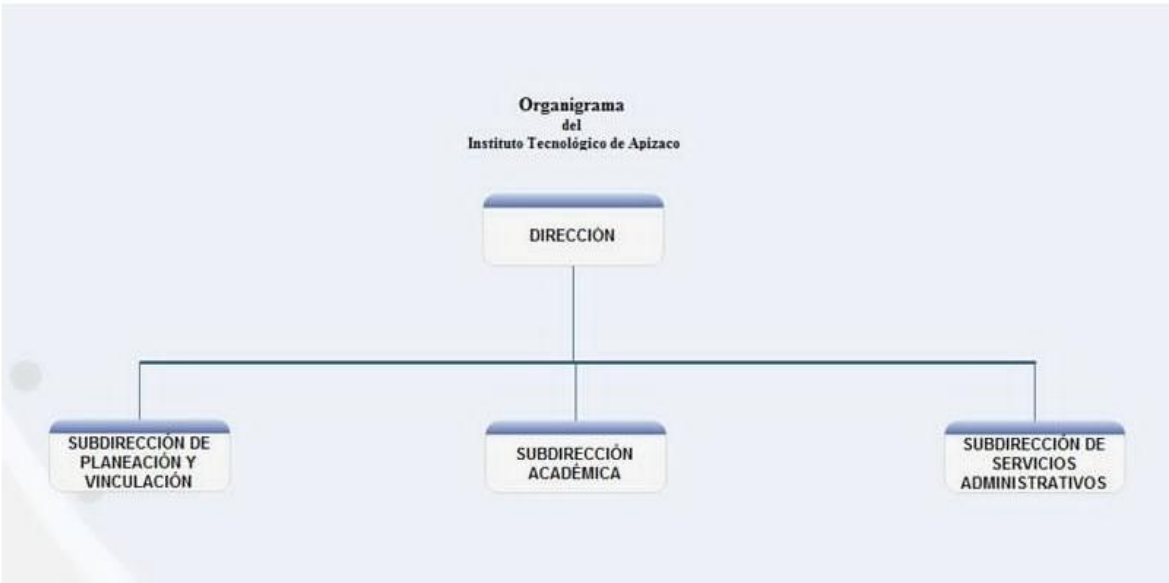
Av. Instituto Tecnológico s/n, Conurbado Tzompantepec, 90300 Cdad. de Apizaco, Tlaxcala, México. Como se muestra en la fig.1.1.

Fig.1.2 Ubicación del Instituto tecnológico de Apizaco, Fuente Google maps



1.3 Organigrama del Instituto Tecnológico de Apizaco

Fig.1.3 Organigrama del Instituto Tecnológico de Apizaco, fuente Google



1.4 Visión y Misión

Visión

La visión es ser una institución de educación superior tecnológica de vanguardia, formadora de ciudadanos del mundo, con conocimientos intercultural, respetando la diversidad social

Misión

La misión es formar profesionistas que sean líderes visionarios, emprendedores, con capacidad de generar soluciones disruptivas, innovando en la ciencia y la tecnología, comprometidos con el desarrollo económico, la responsabilidad social y con una visión sostenible y sustentable.

1.5 Área de especialización y Giro

El Instituto Tecnológico de Apizaco se especializa en la formación de ingenieros en diversas áreas del conocimiento, destacando su carrera en Ingeniería Electrónica, la cual se enfoca en el desarrollo de soluciones tecnológicas aplicadas a sistemas eléctricos, automatización, control y electrónica de potencia.

1.6 Giro de la Institución

El IT Apizaco pertenece al sector de educación superior tecnológica, cuyo objetivo es preparar profesionistas con un enfoque práctico e innovador, capaces de integrarse al sector productivo y contribuir al avance tecnológico del país.

1.7 Importancia de la institución en el proyecto

El desarrollo del proyecto "Diseño y Construcción de un Inversor CD/CA Trifásico para el Control y Fuerza en Motores Eléctricos en Vehículos Eléctricos" se alinea con la misión del Instituto Tecnológico de Apizaco, al fomentar la aplicación de conocimientos en electrónica de potencia y automatización para resolver problemas actuales en la movilidad eléctrica. Este proyecto representa un ejemplo práctico del compromiso del ITA Apizaco con la innovación tecnológica y el desarrollo sustentable, fortaleciendo la formación académica y brindando soluciones a las necesidades del sector automotriz eléctrico.

Capítulo II

MARCO TEORICO

2.1 preámbulo

El diseño y construcción de inversores CD/CA conmutados automotrices es fundamental en aplicaciones de control y fuerza en motores eléctricos automotrices, un ejemplo claro de lo que representa un inversor electrónicamente, especialmente en el sector de vehículos eléctricos.

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar un inversor CD/CA conmutado automotriz con control de fases mediante Arduino Uno, empleando un Boost Converter 12V-380V conmutados/ 500W para alimentar un motor trifásico automotriz de ¼ HP el cual se usará, aclarando que para la demostración de este proyecto este motor se usará.

La simulación se llevará a cabo en los softwares Proteus y Octave, permitiendo analizar el comportamiento de las señales antes de la implementación en el prototipo físico.

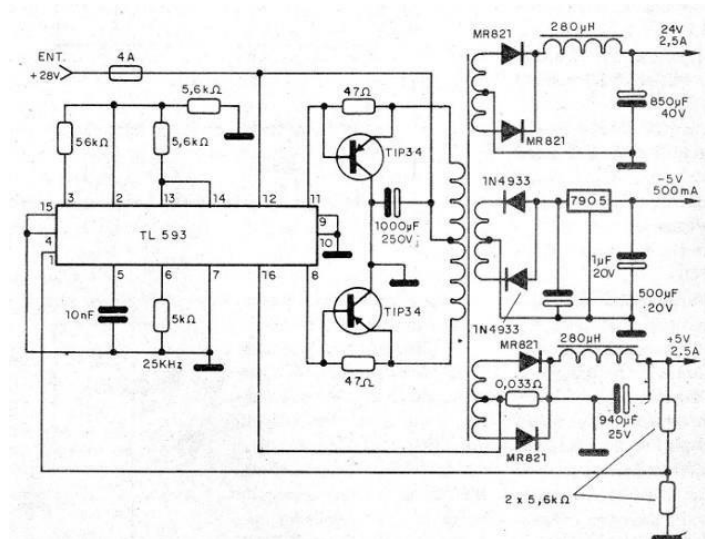
2.2 fuentes conmutadas

2.2.1 definición de fuente conmutada

Las fuentes conmutadas son dispositivos electrónicos utilizados para convertir y regular la energía eléctrica de manera eficiente. A diferencia de las fuentes lineales, estas emplean transistores de conmutación que operan a altas frecuencias, reduciendo las pérdidas de energía y mejorando la eficiencia general del sistema como se muestra en la fig2.1. Según

Erickson y Maksimovic (2001) del libro de electrónica de potencia, las fuentes conmutadas se basan en la conversión de energía mediante interruptores electrónicos controlados, capacitores y bobinas.

Fig.2.2.1 Esquema Eléctrico de Potencia de una fuente conmutada general, fuente Google

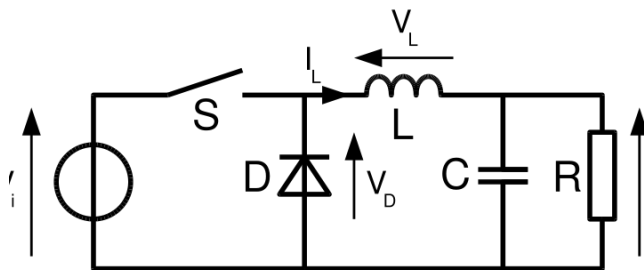


2.2.2 tipos de fuente conmutada

Existen varios tipos de fuentes conmutadas, cada uno con aplicaciones específicas como, por ejemplo:

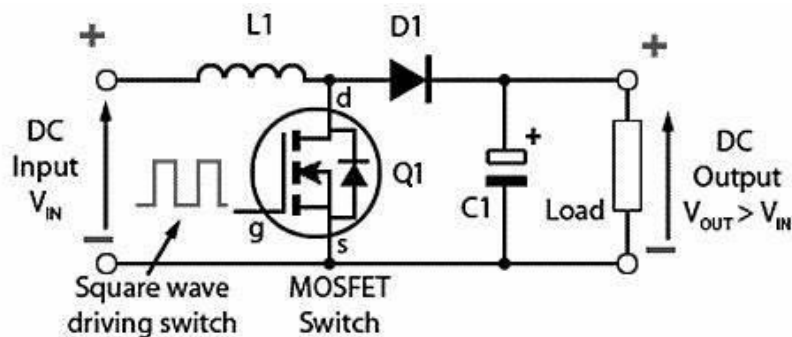
2.2.2.1 Fuente Buck (reductora): reduce el voltaje de entrada a un nivel más bajo como se presenta en el siguiente esquema de la fig2.2.2.1.

Fig.2.2.2.1 Esquema Eléctrico de Potencia de un buck, fuente Google



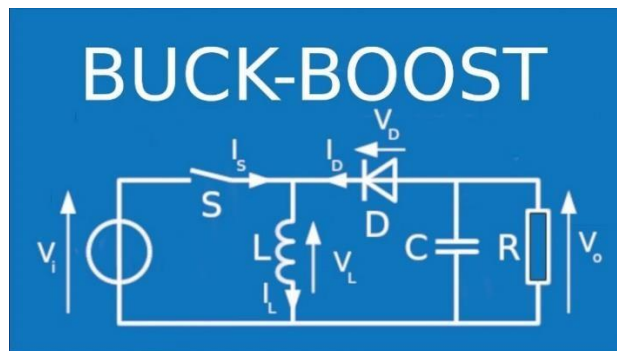
2.2.2.2 Fuente Boost (elevadora): aumenta el voltaje de entrada a un nivel superior tal como se presenta en la fig.2.2.2.2.

Fig.2.2.2.2 Esquema de potencia de un circuito boost, fuente Google



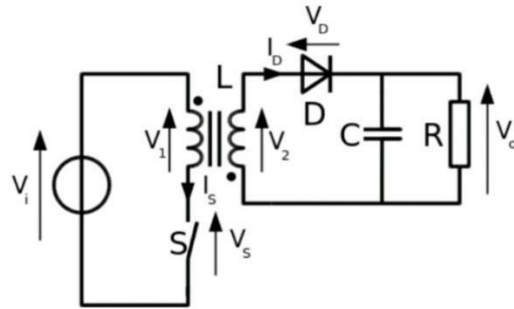
2.2.2.3 Fuente Buck-Boost: Puede incrementar o disminuir el voltaje de salida según los requisitos o como se empleen en base a las necesidades técnicas como se muestra en la fig.2.2.2.3.

Fig.2.2.2.3 Esquema de potencia de un circuito electrónico Buck-boost, fuente Google



2.2.2.4 Fuente Flyback: Utilizadas en sistemas de aislamiento galvánico y baja potencia tal como se muestra en el esquema de la fig.2.2.2.4

Fig.2.2.2.5 Esquema de potencia de un circuito electrónico Flyback, fuente Google



©Elprocus.com

2.2.3 Transformador de fuente conmutada

Un transformador elevador en una fuente conmutada permite aumentar el voltaje de salida al almacenar energía en su núcleo durante el estado de conducción y liberarla en el estado de corte.

Este proceso se basa en la conversión eficiente de energía, minimizando las pérdidas térmicas. De acuerdo con Mohan, Underland y Robbins (2003) del libro electrónica de potencia, estos transformadores son fundamentales en aplicaciones de alto voltaje y electrónica de potencia tal como se muestra en la fig.2.2.3.

Fig.2.2.3 Esquema eléctrico de un transformador de fuente conmutada en proteus, fuente Google

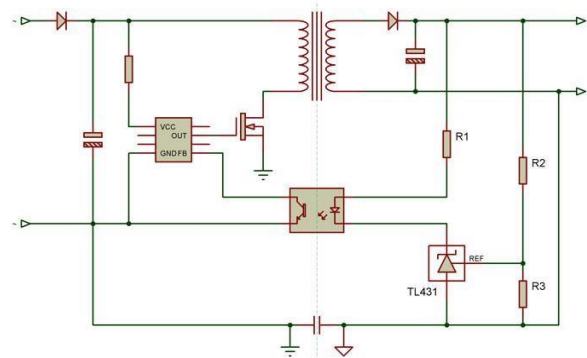
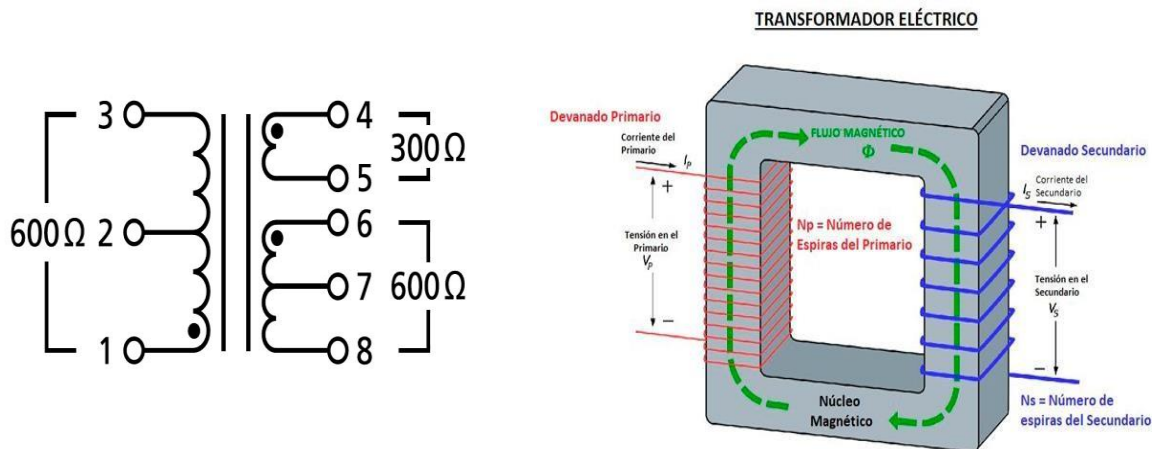


Fig.2.2.3.1 Esquema eléctrico de un transformador de fuente conmutada trifásico, fuente Google



2.3 Convertidores de Potencia

2.3.1 Convertidores Boost y Buck

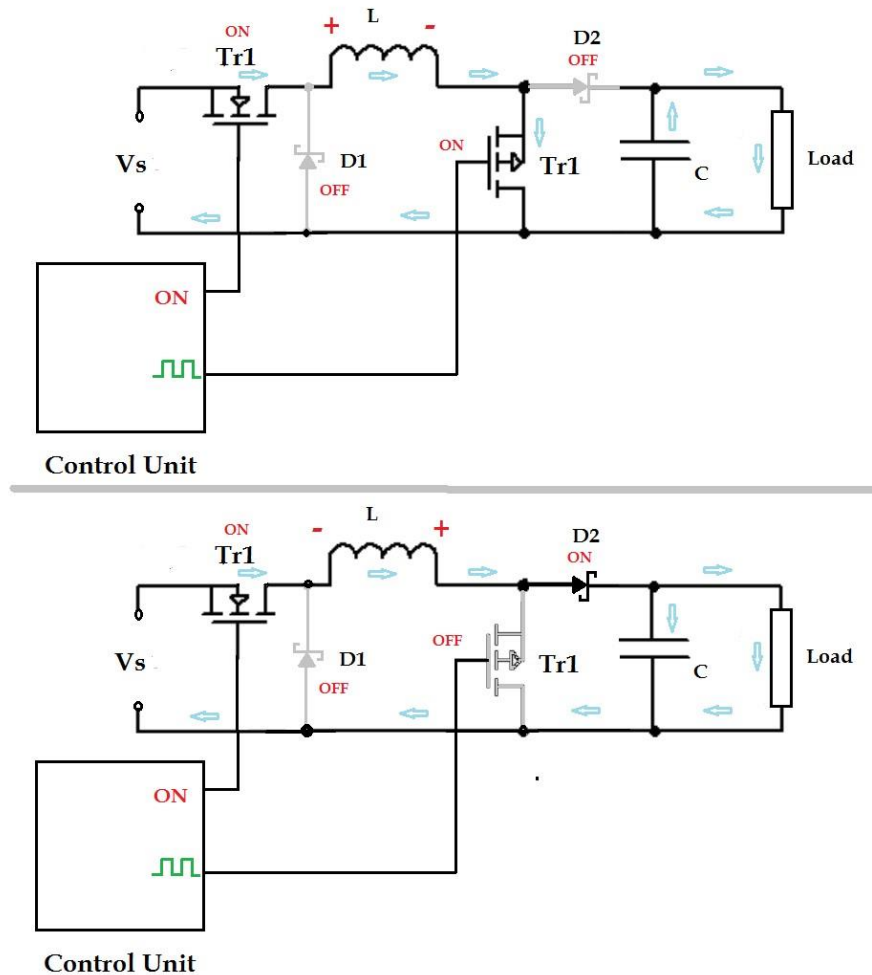
Los convertidores Boost y Buck son topologías fundamentales en la electrónica de potencia tales como:

Convertidor Boost: eleva el voltaje de entrada mediante la acumulación de energía en un bobina y su posterior liberación como se muestra en la fig.2.3.1.

Convertidor Buck: reduce el voltaje de entrada mediante la regulación de la conducción del interruptor como se muestra en la fig.2.3.1.

Ambos circuitos utilizan transistores de conmutación rápida y componentes pasivos como inductores y capacitores para lograr una conversión eficiente de la energía.

Fig.2.3.1 Esquema de potencia del Boost y Buck, fuente Google

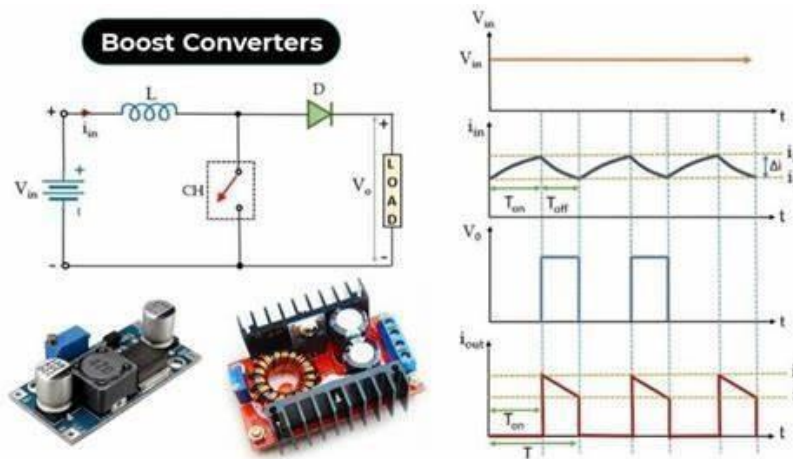


2.3.2 Boost Converter (Conversor Elevador de Corriente)

El Boost Converter como se muestra en la fig.2.3.2 es un tipo de convertidor CC-CC que aumenta el voltaje de entrada a un nivel superior. Este tipo de convertidor es ampliamente utilizado en aplicaciones donde se requiere elevar la tensión de baterías de baja potencia, como en vehículos eléctricos (Erickson & Maksimovic, 2001) de electrónica de potencia.

En este proyecto, el Boost Converter eleva 12V CD a 380V CA, garantizando el suministro adecuado para el motor trifásico automotriz.

Fig.2.3.2 Esquema, componente básico y ondas que genera, fuente Google



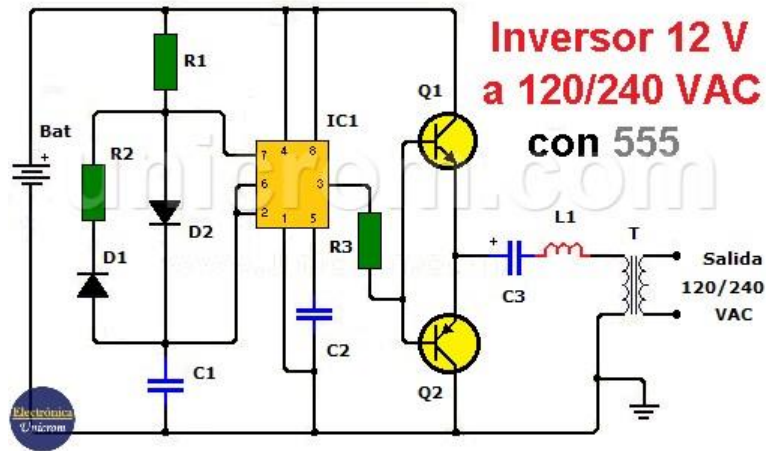
2.4 Inversores CD/CA

2.4.1 Definición y funcionamiento del Inversor CD/CA

Un inversor es un dispositivo que convierte la corriente continua CD a CD conmutada o de corriente CD a corriente alterna CA conmutada, permitiendo la alimentación de motores eléctricos automotrices y otros dispositivos que requieren energía en forma alterna.

De acuerdo con Mohan, Undeland y Robbins (2003) del libro de electrónica de potencia, los inversores pueden clasificarse en monofásicos y trifásicos, dependiendo de la cantidad de fases como se muestra en la fig.2.4.1, que generen en su salida. En este caso, se emplea una configuración monofásica mediante IGBTs.

Fig.2.4.1 Esquema de un inversor monofásico CD/CA, fuente Google

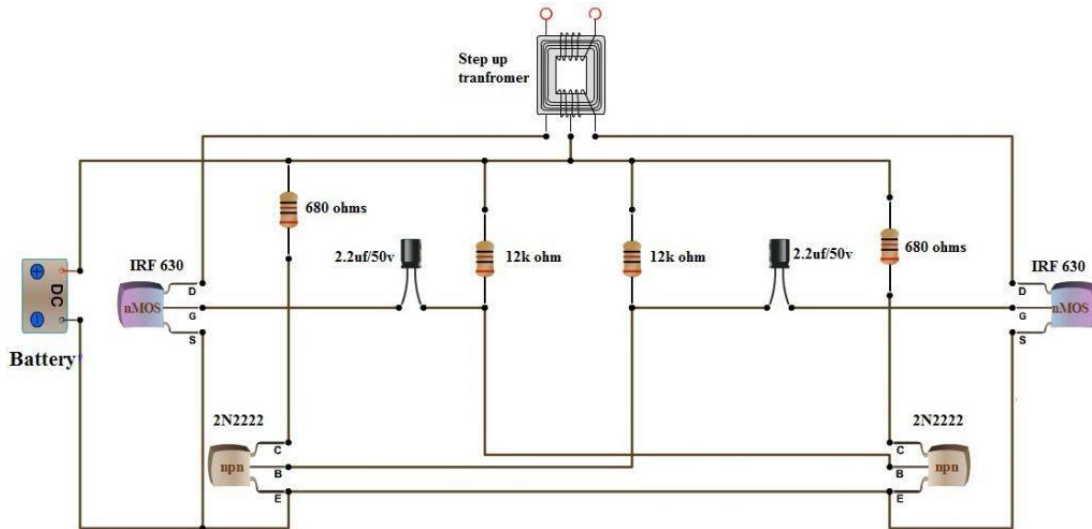


2.4.2 Inversor CD/CA conmutado

Según Rashid (2014) de libro de electrónica de potencia, los inversores son dispositivos esenciales para la conversión de corriente continua en corriente alterna, utilizados ampliamente en sistemas de energía renovable y control de motores.

La importancia de este tipo de dispositivos radica en su capacidad para mejorar la eficiencia energética tal como se muestra en la fig.2.4.2 que muestra las ondas que genera un inversor común y controlar el rendimiento de motores eléctricos en diversas aplicaciones industriales y automotrices.

Fig.2.4.2 Esquema conversión de corriente continua en corriente alterna mediante un transformador, fuente Google

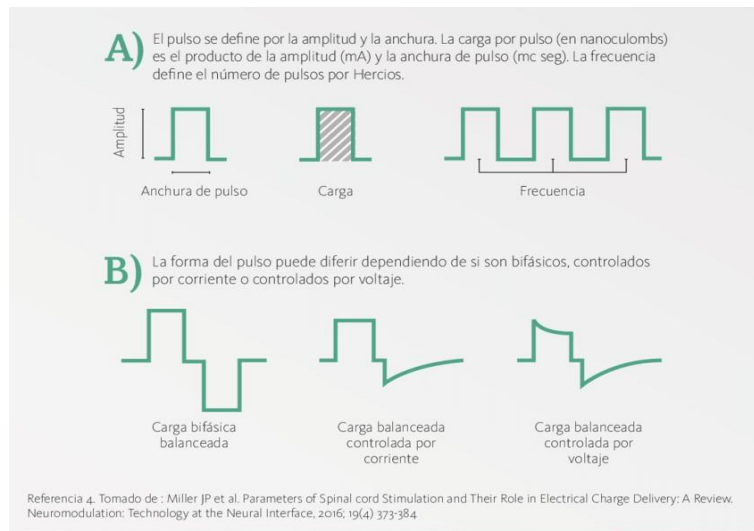


2.5 señales y Modulación

2.5.1 que es un pulso

Un pulso es una señal eléctrica que varía en amplitud durante un corto periodo de tiempo tal como se muestra en la fig.2.5.1, Se usa en la transmisión de datos y en el control de dispositivos electrónicos.

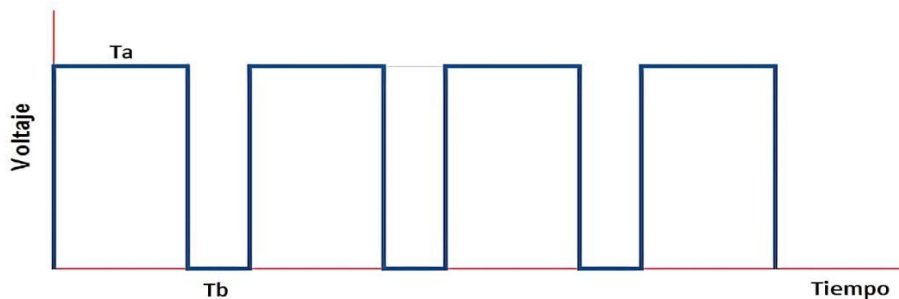
Fig.2.5.1 Tipos de Pulsos, fuente Google



2.5.2 tren de pulsos

Un tren de pulsos es una secuencia repetitiva de pulsos electrónicos como se aprecia en la fig.2.5.2, que es esencial en la modulación de señales y en la conmutación de circuitos electrónicos.

Fig.2.5.2 Representación gráfica de un tren de Pulsos, fuente Google



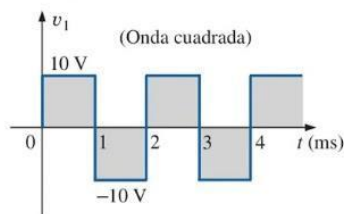
2.5.3 voltaje promedio de un pulso senoidal

el voltaje promedio de un pulso senoidal se obtiene integrando la función de la onda como se muestra en la fig.2.5.3, en un periodo determinado. Este cálculo es crucial en la determinación de la eficiencia energética de un sistema.

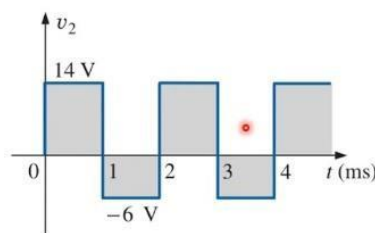
Fig.2.5.3 Vprom de un pulso, fuente Google

El valor promedio.

Ejemplo: Determine el valor promedio de las siguientes formas de onda:



$$G = \frac{(10 \text{ V})(1 \text{ ms}) - (10 \text{ V})(1 \text{ ms})}{2 \text{ ms}} = \frac{0}{2 \text{ ms}} = 0 \text{ V}$$



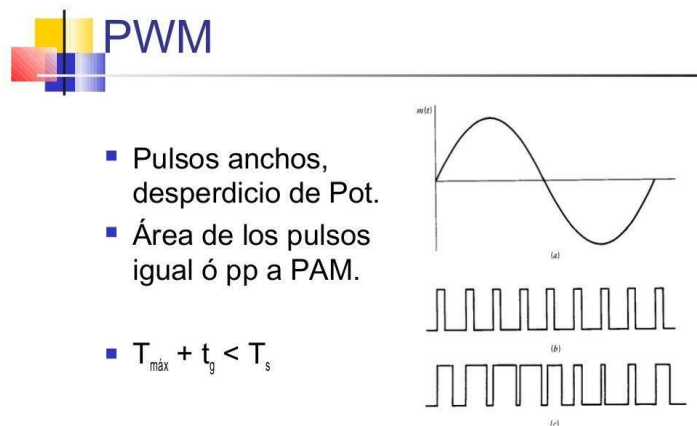
$$G = \frac{(14 \text{ V})(1 \text{ ms}) - (6 \text{ V})(1 \text{ ms})}{2 \text{ ms}} \\ = \frac{14 \text{ V} - 6 \text{ V}}{2} = \frac{8 \text{ V}}{2} = 4 \text{ V}$$

2.5.4 Modulación PWM

La modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) es una técnica utilizada en la electrónica de potencia para controlar la cantidad de energía entregada a una carga. En PWM, la señal de control varía el ancho de los pulsos, mientras mantiene constante la frecuencia de conmutación. Esto permite controlar la potencia promedio suministrada sin tener que regular la frecuencia de operación (Bose, 2002). Los controladores de motor utilizan la modulación PWM para ajustar la velocidad y torque del motor de manera eficiente, optimizando el rendimiento y reduciendo las pérdidas de energía. Como se muestra en la

fig.2.5.4.

Fig.2.5.4 Ondas PWM, fuente Google



2.5.5 Transformada de Fourier en un Pulso

La transformada de Fourier permite analizar y descomponer una señal periódica en sus componentes senoidales.

En la electrónica de potencia, se utiliza para analizar el espectro de una señal de salida y minimizar las distorsiones armónicas.

La transformada de Fourier aplicada a un pulso permite descomponer la señal en una suma de componentes senoidales de diferentes frecuencias. Para un pulso rectangular de amplitud y duración aun su transformada de Fourier está dada por:

$$F(w) = \frac{A T \sin(\frac{wT}{2})}{w}$$

- $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$ es la funcion sinc
- W es la frecuencia angular
- A es la amplitud del pulso
- T es la duración del pulso

2.5.6 Calculo y utilización de la transformada de Fourier en un pulso

para un tren de pulsos periódicos con periodo T, la serie de Fourier se expresa como:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_0 t}$$

$$C_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt$$

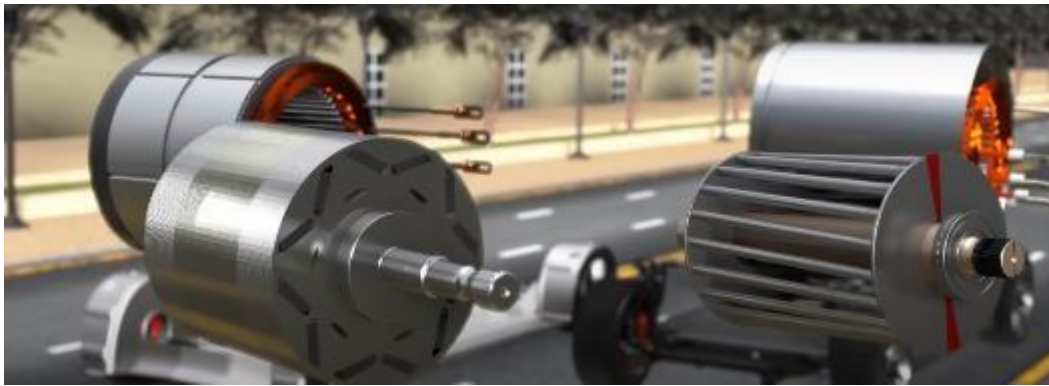
- Determinar la distorsión armónica total (THD)
- Optimizar el diseño de filtros de salida
- Analizar la calidad de la señal generada en inversores y convertidores

2.6 Motores Trifásicos automotriz

2.6.1 conceptos de Motores Trifásicos Automotrices

Los motores trifásicos son los más utilizados en aplicaciones industriales como se muestra en la fig.2.6.1 debido a su alta eficiencia y rendimiento. Estos motores funcionan mediante un sistema de alimentación de tres fases desfasadas 120° entre sí, lo que permite generar un campo magnético giratorio uniforme (Chapman, 2012) libro electrónico de potencia.

Fig.2.6.1 Motor trifásico automotriz, fuente Google



2.6.2 Motor eléctrico IPMSynRM

El motor eléctrico IPMSynRM (Permanent Magnet Synchronous Reluctance Motor) es un tipo de motor síncrono que combina las ventajas de los motores de reluctancia y los de imán permanente. Este tipo de motor tiene una estructura de rotor que presenta imanes permanentes insertados en el mismo, lo que mejora su eficiencia y potencia específica en comparación con otros motores eléctricos (Jung & Lee, 2014). La característica principal de estos motores es la combinación de una reluctancia variable con la presencia de imanes permanentes, lo que permite una mayor eficiencia operativa, sobre todo en aplicaciones automotrices de alta potencia. Un ejemplo de ello es el motor tesla modelo 3 que se muestra en la fig.2.6.2.1.

Fig.2.6.2.1 Motor trifásico automotriz, fuente video de YouTube

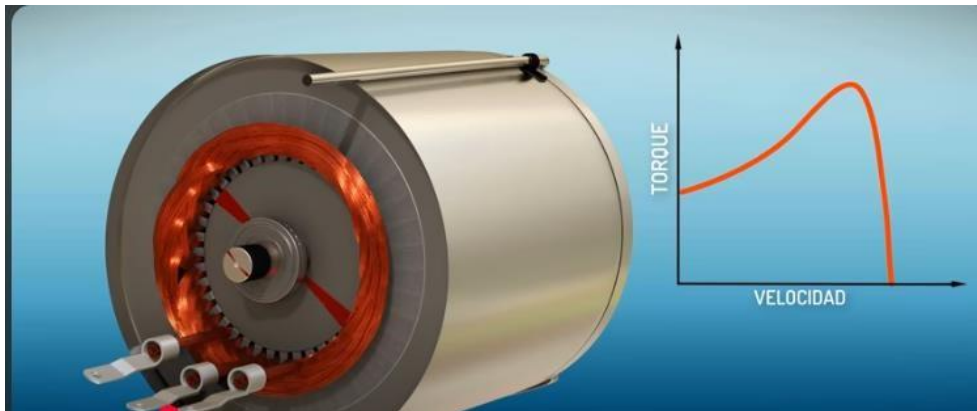


Fig.2.6.2.2 Motor trifásico automotriz de imanes permanentes, fuente video de YouTube

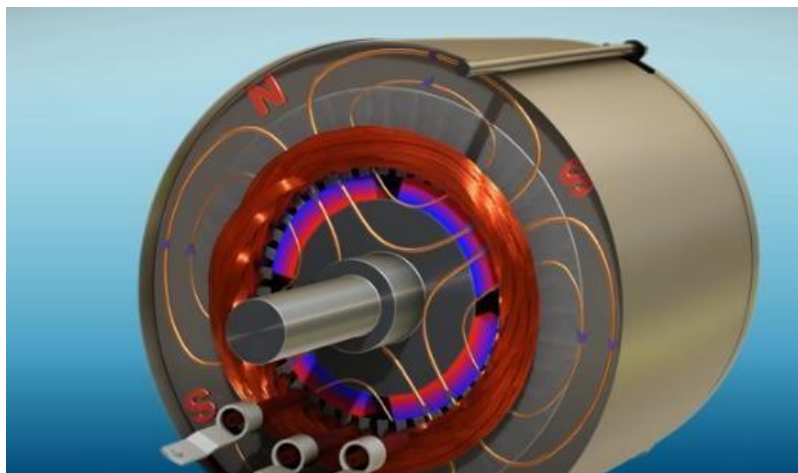


Fig.2.6.2.3 Angulo de operacion, fuente video de YouTube

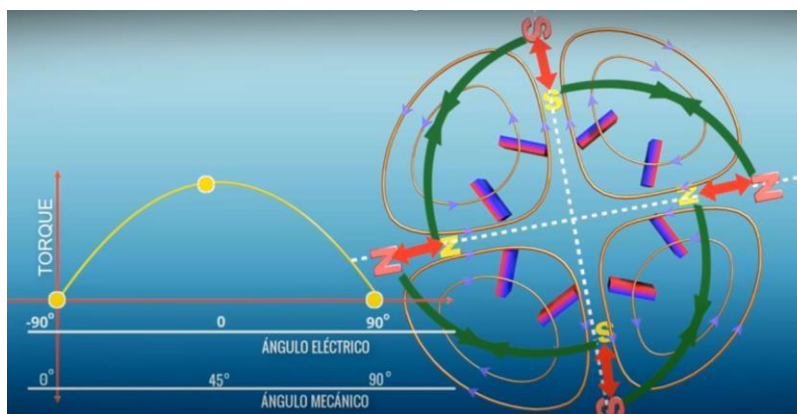
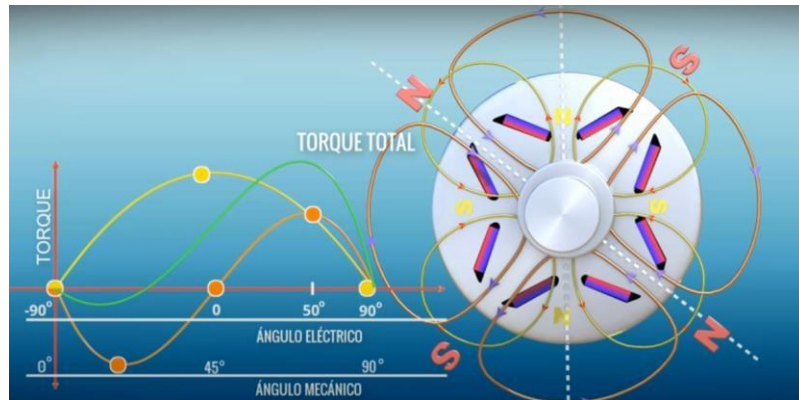


Fig.2.6.2.4 comparativa en el torque, fuente video de YouTube



2.6.3 concepto de reluctancia

La reluctancia es la propiedad de un material magnético que se refiere a su oposición al flujo magnético.

El concepto de reluctancia es fundamental en la teoría electromagnética y está estrechamente relacionado con la ley de Ohm para circuitos magnéticos. Cuanto mayor sea la reluctancia de un material, menor será la cantidad de flujo magnético que puede atravesarlo (Slade & Nash, 2011). Este principio es crucial en el diseño de motores eléctricos, especialmente en los motores de reluctancia, donde la variación de la reluctancia del rotor influye directamente en su rendimiento. Como se muestra en la fig.2.6.3

Ecuación de la reluctancia:

$$\Phi = \frac{f * m * m}{R}$$

Fig.2.6.3 reluctancia y flujo magnético, fuente Google

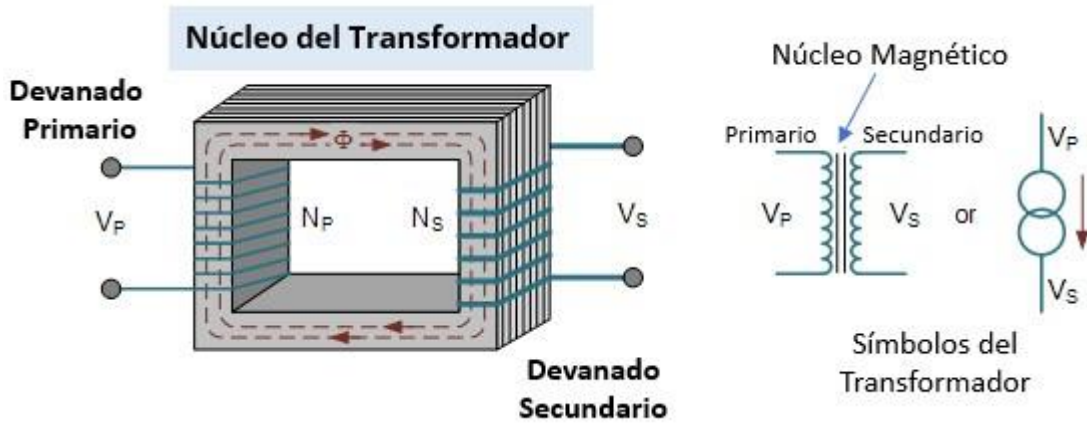
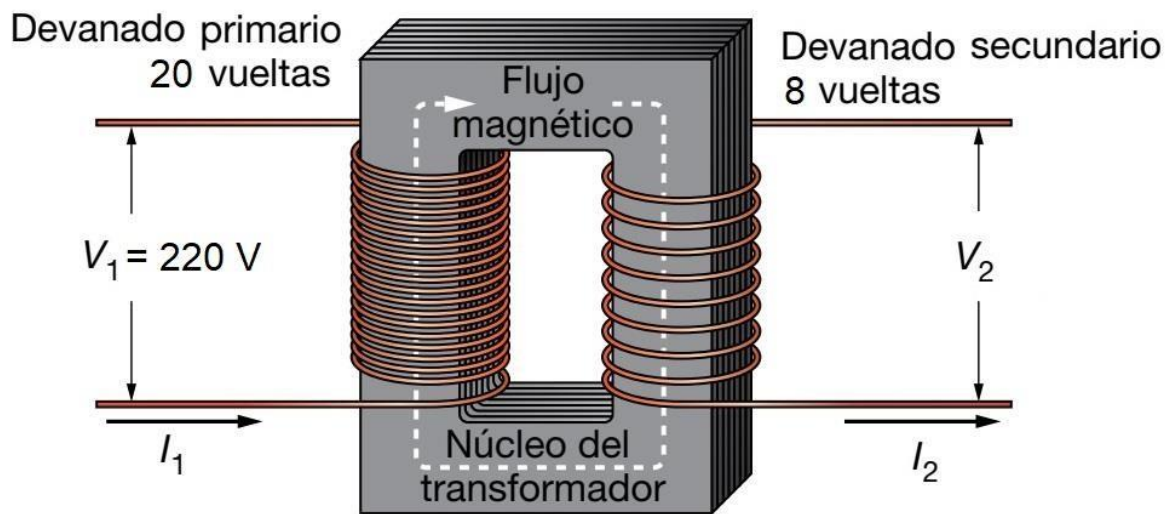


Fig.2.6.3 reluctancia y flujo magnético, fuente Google



2.6.3.1 concepto flujo magnético

El **flujo magnético** es una magnitud que representa la cantidad total de campo magnético que atraviesa una superficie determinada. Este fenómeno es fundamental en la teoría electromagnética, ya que está relacionado con la inducción de corriente eléctrica en conductores, como ocurre en generadores y transformadores. El flujo magnético depende de la intensidad del campo magnético y del área a través de la cual éste pasa, así como de la orientación de esa superficie respecto al campo. En términos prácticos, un flujo

magnético mayor implica una mayor interacción entre el campo magnético y el material o dispositivo que lo atraviesa, lo que influye directamente en el rendimiento de sistemas electromagnéticos como motores y generadores (Harris et al., 2016). El concepto de flujo magnético es esencial en el diseño y análisis de dispositivos eléctricos, ya que está directamente relacionado con el fenómeno de la inducción electromagnética descubierto por Faraday, que establece la base de la generación de corriente eléctrica (Faraday, 1831). Como se muestra en la fig.2.6.3.1

Fig.2.6.4.1 Flujo magnético, fuente Google

Flujo de Campo Magnético

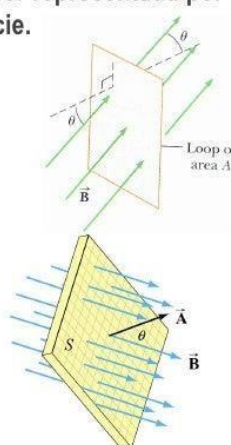
El flujo magnético (ϕ) es una medida del número de líneas de campo pasando a través de un área (A). El área puede ser representada por un vector $\vec{A}$ perpendicular al plano de la superficie.

- Necesitamos una forma de calcular la **cantidad de campo magnético** que pasa a través del lazo.
- Similar a la definición de flujo eléctrico, definimos el flujo magnético

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

- El flujo magnético es una cantidad escalar.
- En un **campo magnético uniforme**, el flujo magnético puede ser expresado como.

$$\Phi_B = BA \cos \theta$$



FLORENCIO PINELA - ESPOL
8
04/08/2009 16:42

2.6.4 la reluctancia en un motor eléctrico automotriz

Fig.2.6.4.1 reluctancia de motor tesla modelo3, fuente video de YouTube



La reluctancia es el análogo magnético de la resistencia eléctrica, definida como la oposición al flujo de campo magnético en un material. En términos matemáticos, la reluctancia se expresa como la relación entre la longitud del camino magnético, la permeabilidad del material y el área de la sección transversal del mismo (Harris et al., 2016). En un motor de reluctancia, el flujo magnético sigue el camino de menor reluctancia, lo que genera la fuerza electromotriz que impulsa el rotor. Ejemplo fig.2.6.4.2

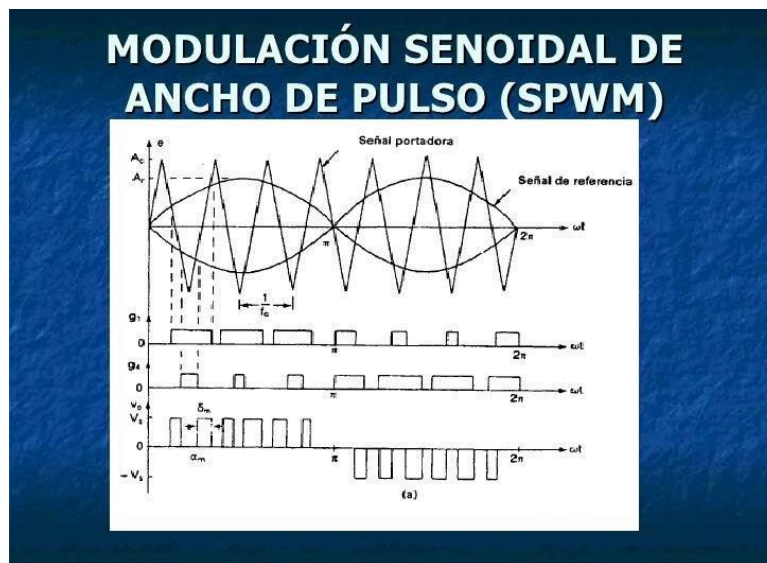
Fig.2.6.4.2 Motor Automotriz tesla modelo 3, fuente video de YouTube



2.6.5 Concepto de Modulación SPWM

La modulación de onda portadora sinusoidal (SPWM, por sus siglas en inglés) es una técnica avanzada de modulación de ancho de pulso que se utiliza principalmente para controlar inversores en sistemas de energía eléctrica. A diferencia de la PWM convencional, la SPWM genera señales que siguen una onda sinusoidal, lo que reduce el contenido armónico y mejora la calidad de la señal (Chau & Lai, 2006). En motores eléctricos, la SPWM permite una operación más suave y eficiente, especialmente en aplicaciones de motores síncronos y asíncronos de corriente alterna. Como se muestra en la fig.2.6.5

Fig.2.6.5 Ondas PWM, fuente Google

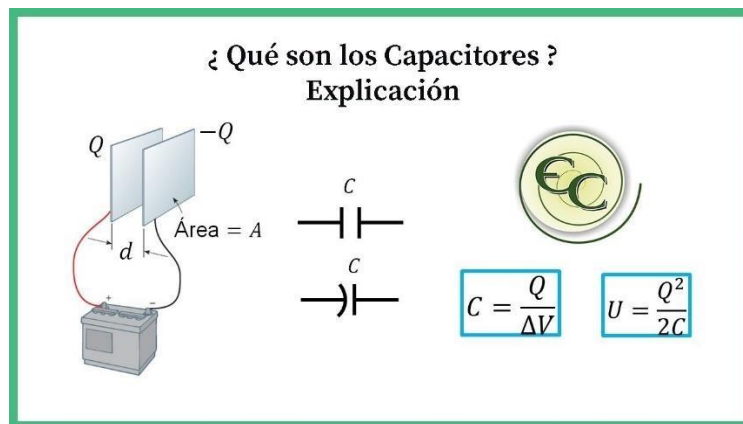


2.6.6 el concepto de capacitor

Un capacitor es un componente eléctrico que almacena energía en forma de campo eléctrico, y su capacidad para hacerlo depende de la constante dieléctrica del material aislante entre sus placas y el área de las placas mismas. Los capacitores se utilizan ampliamente en circuitos eléctricos para suavizar fluctuaciones de voltaje, filtrar señales y

en el arranque de motores (Lundberg, 2017). En motores eléctricos, un capacitor puede mejorar el rendimiento al ofrecer una compensación de potencia reactiva, ayudando en la regulación del factor de potencia y evitando caídas de tensión en sistemas de energía. Como se muestra en la fig.2.6.6.

Fig.2.6.6 representación de uso de un capacitor, fuente Google



2.6.7 Control de Fases y PWM

Para controlar el motor, se emplea modulación por ancho de pulso (PWM) como se muestra en la Fig.2.6.7.1 y la fig.2.6.7.2, la cual permite regular la potencia suministrada a los IGBTs. Según Sedra y Smith (2010) de libro de electrónica de potencia, la técnica PWM es clave en el control de motores, ya que posibilita una conmutación eficiente y una reducción en la disipación de calor. En este proyecto, el control de fases se basa en la siguiente asignación de ángulos:

- **Fase 1:** 0° a 90°
- **Fase 2:** 90° a 120°
- **Fase 3:** 120° a 240°
-

Fig.2.6.7.1 Pulsos PWM de motor trifásico automotriz, fuente Google

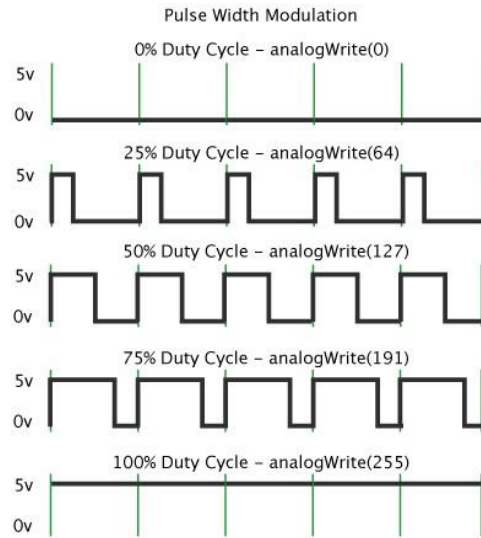
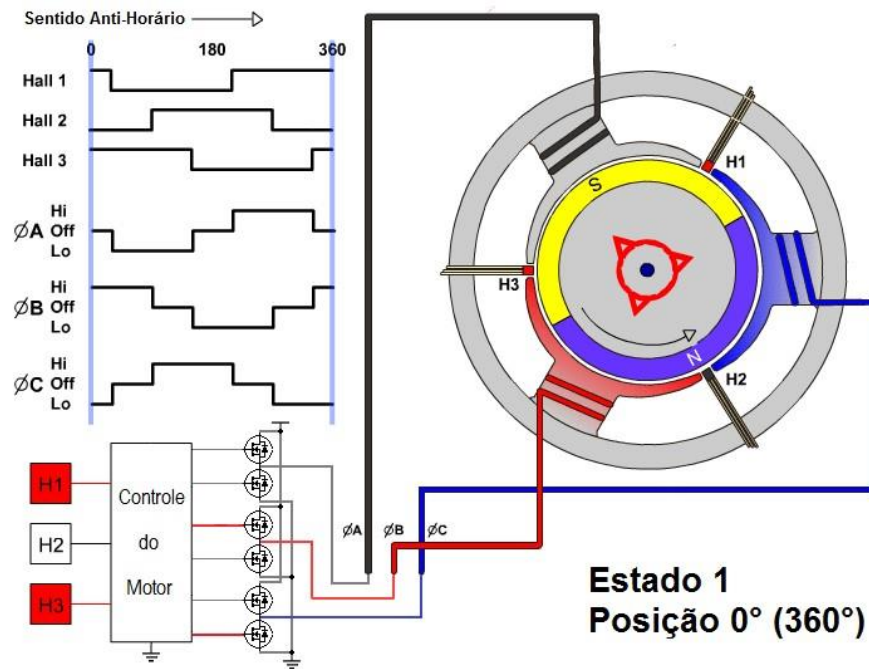


Fig.2.6.7.2 Conmutación de un Motor trifásico automotriz, fuente Google



2.7 Componentes Electrónicos Utilizados en el inversor CD/CA automotriz

2.7.1 Arduino Uno

Arduino Uno: genera las señales PWM necesarias para controlar la conmutación de los IGBTs y regula la salida de corriente alterna e el inversor conmutado. Fig.2.7.1

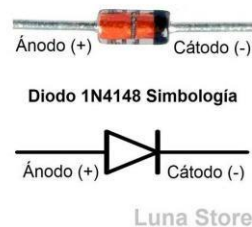
Fig.2.7.1 Microcontrolador Arduino Uno, fuente Google



2.7.2 Diodo 1N4148

1N4148: el **1N4148** es un diodo versátil y fiable en circuitos que requieren conmutación rápida y es ampliamente utilizado en la mayoría de los dispositivos electrónicos para tareas de protección, rectificación y modulación. Fig2.7.2

Fig.2.7.2 Diodo 1N4148, fuente Google

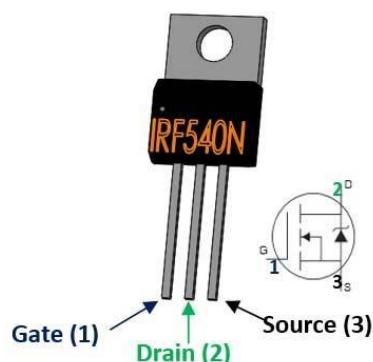


2.7.3 MOSFET IRF540N

IRF540N: El IRF540N es un MOSFET de canal N robusto, ideal para aplicaciones de potencia media a alta debido a su capacidad para manejar altas corrientes (33A) y tensiones

moderadas (55V), su baja resistencia en conducción ($R_{ds(on)}$), y su versatilidad en conmutación y amplificación. Se utiliza comúnmente en fuentes de alimentación, controladores de motor, y en otros sistemas de conmutación de potencia. Fig.2.7.3

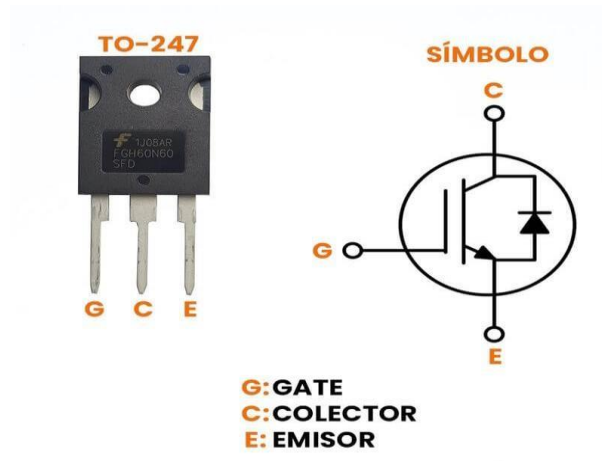
Fig.2.7.3 mosfet, fuente Google



2.7.4 Concepto Transistor IGBT

El **Transistor IGBT** (Insulated Gate Bipolar Transistor) es un dispositivo semiconductor de potencia que combina las características de los transistores de efecto de campo (FET) y los transistores bipolares de unión (BJT). Esta combinación le permite manejar altas corrientes y voltajes con un control de puerta aislada, lo que facilita su utilización en aplicaciones de conmutación de alta eficiencia y bajo consumo energético, como en inversores, controladores de motores y fuentes de alimentación (Bose, 2002). Su capacidad para conmutar rápidamente y con bajas pérdidas lo hace ideal para sistemas de control de potencia en aplicaciones industriales y energéticas, donde se requiere un alto rendimiento y fiabilidad (Walker & Lee, 2005). Ejemplo fig.2.7.4

Fig.2.7.4 Transistor IGBT, fuente Google

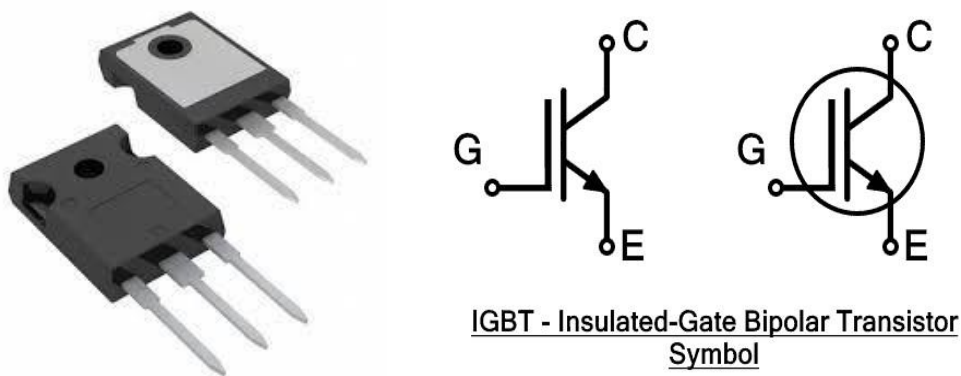


2.7.5 IGBT IRG4PC50U

IGBT IRG4PC50U: transistor de conmutación de alta potencia que permite transformar la corriente en el inversor CD/CA continua en alterna mediante pulsos controlados mediante el

Arduino. Fig.2.7.5

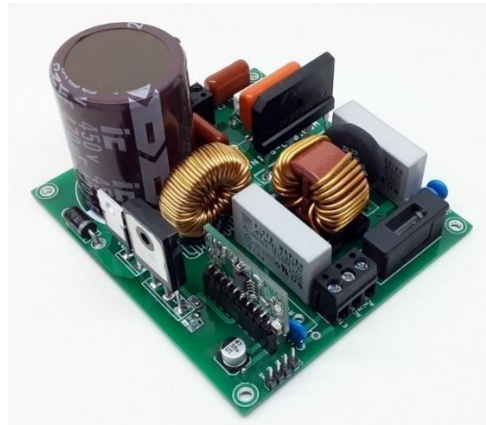
Fig.2.7.5 Transistor IGBT, fuente Google



2.7.6 Boost Converter 12V-380V 500W

Boost Converter 12V-380V 500W : eleva el voltaje de 12V DC a 380V DC en el inversor enviando 500W y proporcionando la tensión adecuada para que el inversor genere la corriente alterna necesaria de salida de conmutación. Fig.2.7.6

Fig.2.7.6 Boost Converter 12V-380V, fuente Google



2.8 Tabla de correspondencia de Potencia y masa

2.8.1 Tabla de correspondencia entre Hp – KW

Fig.2.8.1 comparación de caballos de fuerza y kilowatts, Fuente Google

HOW TO CALCULATE - HP TO KW & KW TO HP			
	(HORSE POWER)	(KILLO-WATT)	
1	0.5 HP	0.37 KW	
2	0.75 HP	0.5 KW	
3	1 HP	0.75 KW	
4	1.5 HP	1.1 KW	
5	2 HP	1.5 KW	
6	3 HP	2.2 KW	
7	5 HP	3.7 KW	
8	7.5 HP	5.5 KW	
9	10HP	7.5 KW	
10	12.5 HP	10 KW	
11	15 HP	12.5 KW	
12	20 HP	15 KW	
13	25 HP	18.5 KW	

2.8.2 Tabla de correspondencia entre Hp – Kg

Fig. 2.8.2 tabla comparativa de potencia y masa, Fuente Google

Potencia (HP)	Potencia (W)	Masa Movida (Kg)
0.5 HP	373 W	38 Kg
1 HP	746 W	76 Kg
2 HP	1492 W	152 Kg
3 HP	2238 W	228 Kg

4 HP	2984 W	304 Kg
5 HP	3730 W	380 Kg
7.5 HP	5595 W	571 Kg
10 HP	7460 W	760 Kg
15 HP	11190 W	1140 Kg
20 HP	14920 W	1520 Kg
25 HP	18650 W	1900 Kg

2.8.3 Tabla de correspondencia entre Hp mecánico – KW electrónico

Fig. 2.8.3 tabla comparativa de potencia mecánica y kw, Fuente Google

Potencia Mecánica (HP)	Potencia Eléctrica (kW)
0.5 HP	0.373 KW
1 HP	0.746 KW
5 HP	3.73 KW
10 HP	7.46 KW
15 HP	11.19 KW
20 HP	14.92 KW

Capítulo III

DESCRIPCION DEL PROBLEMA

3.1 Preámbulo

El instituto tecnológico de Apizaco enfrenta una limitante significativa en el desarrollo de proyectos orientados a la electrificación y control de motores automotrices, debido a la falta de tarjetas electrónicas especializadas, motores trifásicos Automotrices y equipos de potencia en sus laboratorios, en particular, el laboratorio de autotrónica, ubicado en el edificio X.

3.2 descripción del problema

El Instituto no dispone de los componentes necesarios para la implementación y prueba de sistemas de control de motores eléctricos lo que restringe el aprendizaje practico de los estudiantes en áreas clave de la ingeniería en sistemas automotrices.

3.3 Problemática en el laboratorio de Autotrónica

Esta carencia impide que los alumnos pueden realizar pruebas con inversores CD/CA, motores trifásicos y sistemas de control con microcontroladores, elementos fundamentales en la industria automotriz moderna, donde la electrificación de vehículos está en constante crecimiento. Sin estos equipos, los estudiantes carecen de la oportunidad de experimentar

y validar conceptos teóricos mediante prácticas reales, lo que genera una brecha entre la formación académica y las exigencias del sector automotriz.

3.4 Problemática para los estudiantes a futuro

Además, la ausencia de proyectos relacionados con la conversión de energía y el control de motores limita la capacidad del instituto para impulsar la investigación, innovación y desarrollo tecnológico, reduciendo la competitividad de sus egresados en el ámbito laboral. Sin estos recursos los estudiantes deben recurrir a simulaciones sin la posibilidad de comprobar el desempeño real de los circuitos y sistemas eléctricos, lo que afecta su preparación para enfrentar desafíos del mundo profesional.

Capítulo IV

SOLUCION DEL PROBLEMA

4.1 Levantamiento de campo en el laboratorio de AUTOTRONICA

Para la solución de este problema se recurrió a la investigación de los recursos tales como:

- Levantamiento de campo en el Laboratorio de autotrónica situado en el **Edificio X**

fig.4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4, 4.1.5, 4.1.6, 4.1.7, 4.1.8

Fig.4.1.1 Autotrónica fotografía tomada del instituto



Fig.4.1.2 instalaciones del laboratorio de Autotrónica



Fig.4.1.3 instalaciones del laboratorio de Autotrónica



Fig.4.1.4 instalaciones del laboratorio de Autotrónica



Fig.4.1.5 instalaciones del laboratorio de Autotrónica



Fig.4.1.6 instalaciones del laboratorio de Autotrónica

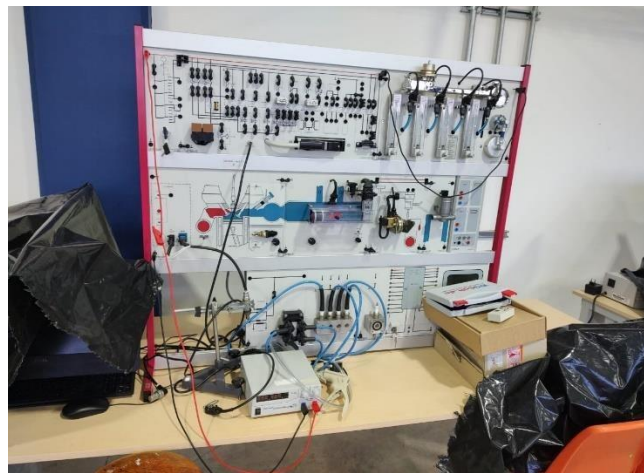


Fig.4.1.7 instalaciones del laboratorio de Autotrónica



Fig.4.1.8 instalaciones del laboratorio de Autotrónica



4.2 Calculo para calcular Hp de un motor eléctrico

Para mover un promedio de 5 personas de aproximadamente 70Kg que al sumar el peso nos da una relación de 350Kg se calcularon los Hp los cuales arrojó mediante esta fórmula:

$$P = \frac{F * V}{n}$$

F= fuerza

V= velocidad m/s η = eficiencia del sistema 80% considerando 20km/h y una velocidad de (5.56 m/s) y un coeficiente de resistencia de 0.015 se obtuvo una potencia de alrededor de 0.5 Hp a 1Hp.

4.3 Identificar, seleccionar y adquirir los componentes eléctricos y electrónicos requeridos

Iniciando la solución con la información recopilada y con los datos obtenidos se realizaron la elaboración correspondiente del diseño en proteus, lo cual se definieron los componentes adecuados en proteus los cuales fueron los siguientes:

MOSFET (IRF540N)

- **Diodos 1N4148**
- **Resistencia de 200 ohms**
- **Motor trifásico PWM**
- **Arduino uno**
- **Batería 12V DC**

4.4 Diseño del inversor CD/CA trifásico conmutado Automotriz

Se recurrió al diseño del inversor en el programa Proteus como se observa en la fig.4.4.1 el cual consistió en organizar los componentes para poder conectarlo y poder simular su funcionamiento.

Fig.4.4.1 Diagrama esquemático del inversor CD/CA en el Programa Proteus, fuente proteus

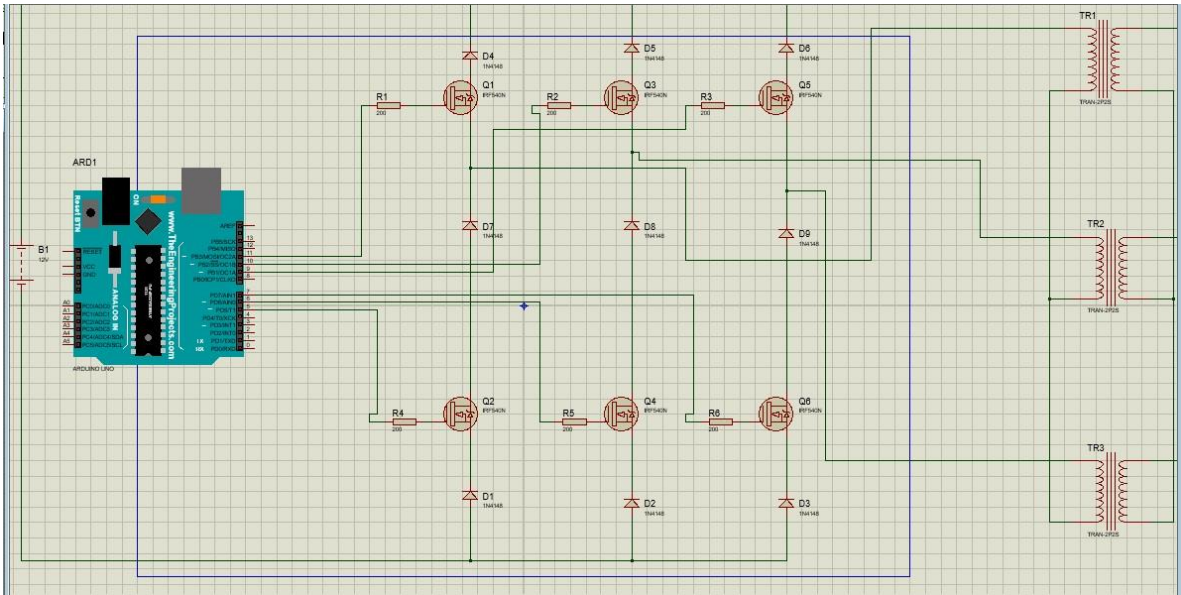


Fig.4.4.1 Diagrama esquemático del inversor CD/CA en el Programa Proteus, fuente proteus

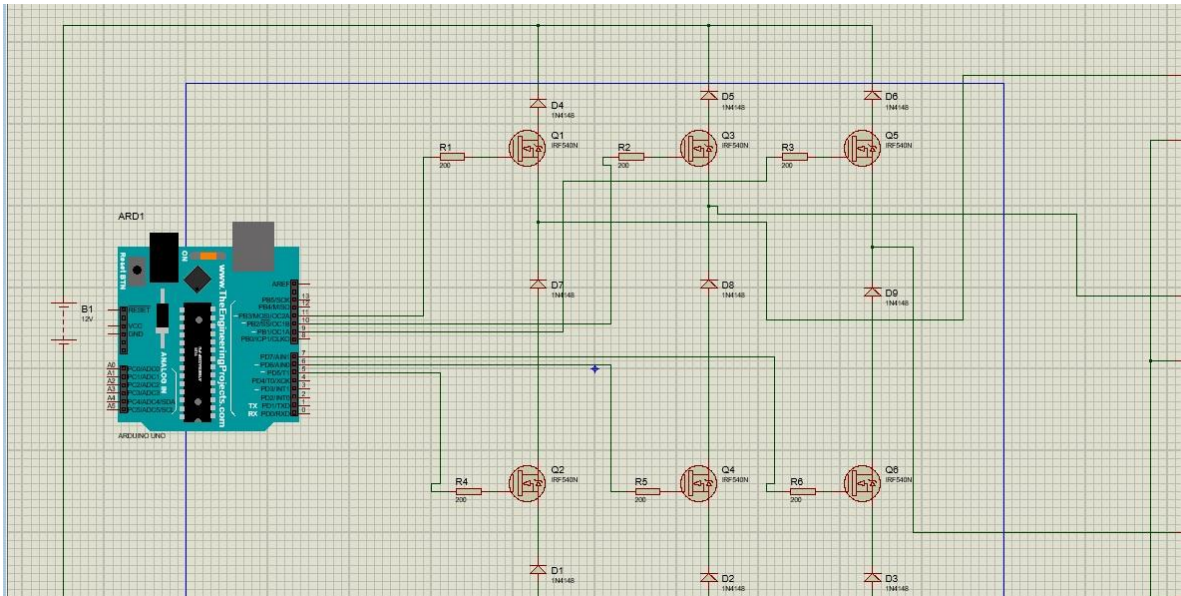
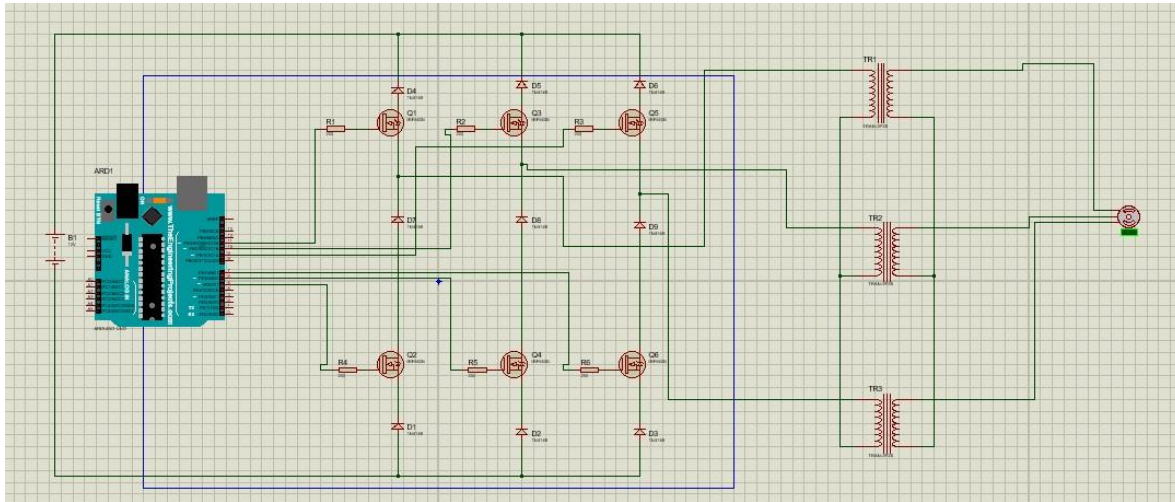


Fig.4.4.1 Diagrama esquemático del inversor CD/CA en el Programa Proteus, fuente proteus



Una vez diseñado el circuito se generó en el programa de Arduino, que es el código necesario tal como se muestra en la fig.4.4.2.

Con dicho código se generará la señal PWM que servirá de señal de control para poder manipular el motor trifásico y así poder observar el comportamiento en aumento y disminución de velocidad.

El código quedo de la siguiente manera:

Fig.4.4.2 Código para mandar las señales al motor, fuente Arduino

```
// Pines de control de los MOSFETs IRF540N
const int irf540n1 = 11;
const int irf540n2 = 5;
const int irf540n3 = 10;
const int irf540n4 = 6;
const int irf540n5 = 9;
const int irf540n6 = 7;

// Tiempos de encendido y apagado (en milisegundos)
const unsigned long tiempoEncendido = 5; // Ajusta este valor según tus necesidades
const unsigned long tiempoApagado = 10; // Ajusta este valor según tus necesidades
const unsigned long tiempoDesfase = 5; // Ajusta este valor según tus necesidades, debe ser menor a tiempo apagado.
const unsigned long tiempoMuerto = 2; // Tiempo muerto en microsegundos

void setup() {
  // Configuración de pines como salidas
  pinMode(irf540n1, OUTPUT);
  pinMode(irf540n2, OUTPUT);
  pinMode(irf540n3, OUTPUT);
  pinMode(irf540n4, OUTPUT);
  pinMode(irf540n5, OUTPUT);
  pinMode(irf540n6, OUTPUT);

  // Inicialización de MOSFETs IRF540N apagados
  digitalWrite(irf540n1, LOW);
  digitalWrite(irf540n2, LOW);
  digitalWrite(irf540n3, LOW);
  digitalWrite(irf540n4, LOW);
  digitalWrite(irf540n5, LOW);
  digitalWrite(irf540n6, LOW);
}

void loop() {
  // Secuencia de encendido y apagado con desfase de 120 grados

  // Par 1-2
```

```

// Par 1-2
digitalWrite(irf540n1, HIGH);
delayMicroseconds(tiempoMuerto);
digitalWrite(irf540n2, LOW);
delay(tiempoEncendido);
digitalWrite(irf540n1, LOW);
delayMicroseconds(tiempoMuerto);
digitalWrite(irf540n2, HIGH);
delay(tiempoApagado - tiempoEncendido);

// Par 3-4
digitalWrite(irf540n2, LOW);
delayMicroseconds(tiempoMuerto);
digitalWrite(irf540n3, HIGH);
delay(tiempoEncendido);
digitalWrite(irf540n3, LOW);
delayMicroseconds(tiempoMuerto);
digitalWrite(irf540n4, HIGH);
delay(tiempoApagado - tiempoEncendido);

// Par 5-6
digitalWrite(irf540n4, LOW);
delayMicroseconds(tiempoMuerto);
digitalWrite(irf540n5, HIGH);
delay(tiempoEncendido);
digitalWrite(irf540n5, LOW);
delayMicroseconds(tiempoMuerto);
digitalWrite(irf540n6, HIGH);
delay(tiempoApagado - tiempoEncendido);

digitalWrite(irf540n6, LOW);
delayMicroseconds(tiempoMuerto);
digitalWrite(irf540n1, HIGH);
delay(tiempoEncendido);
}

```

Simulado y conectado el circuito en el software proteus se procedió a copiar el código de la simulación de Arduino y Se obtuvieron los valores correspondientes que se lograron medir por medio de un osciloscopio digital los cuales nos mostraba el desfase de 120 grados en cada fase que aumentan al motor tal como se muestra en la fig.4.4.3

Fig.4.4.3 simulación de proteus del circuito inversor CD/CA, fuente proteus

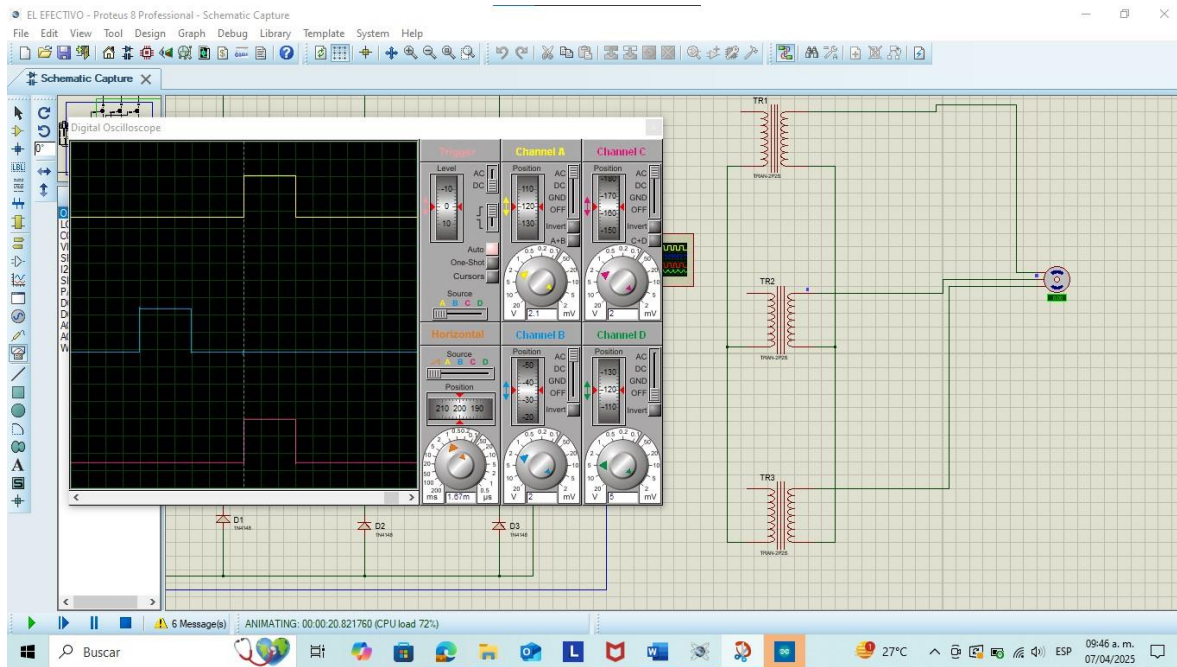


Fig.4.4.3 simulación de proteus del circuito inversor CD/CA, fuente proteus

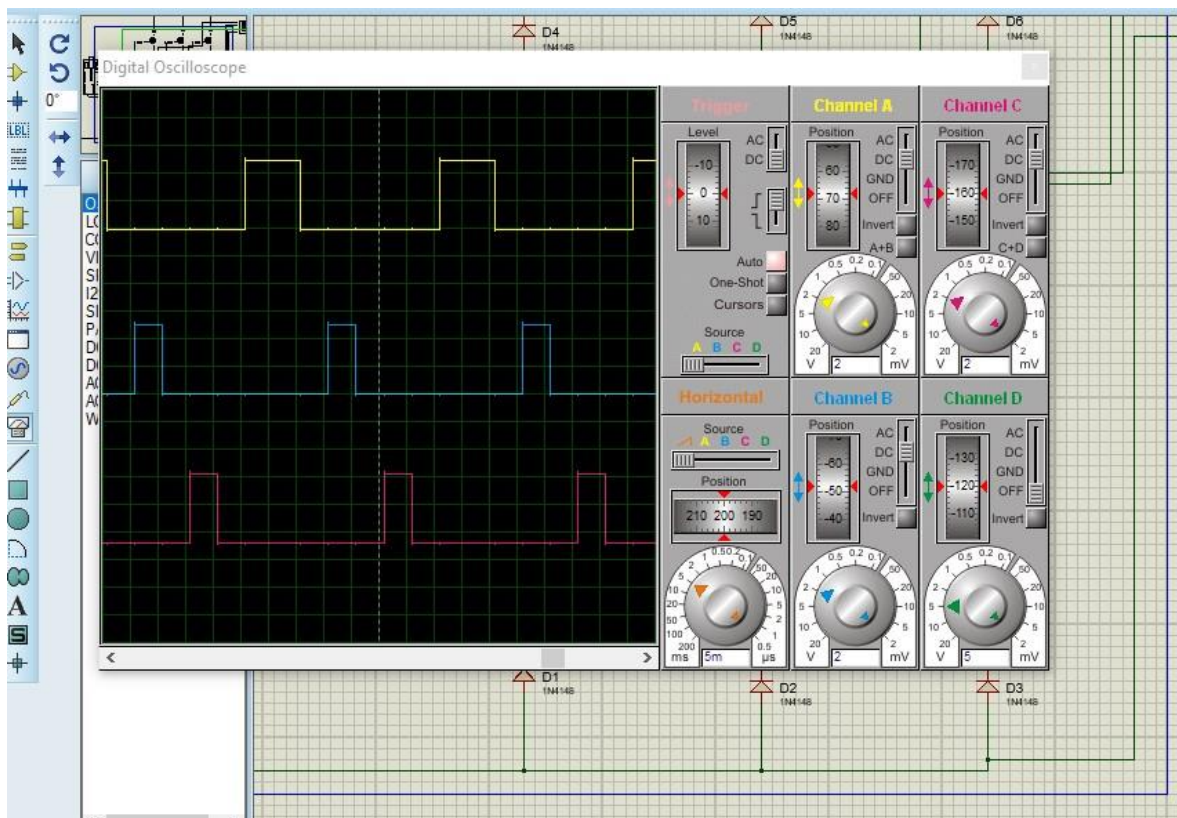


Fig.4.4.3 simulación de proteus del circuito inversor CD/CA, fuente proteus

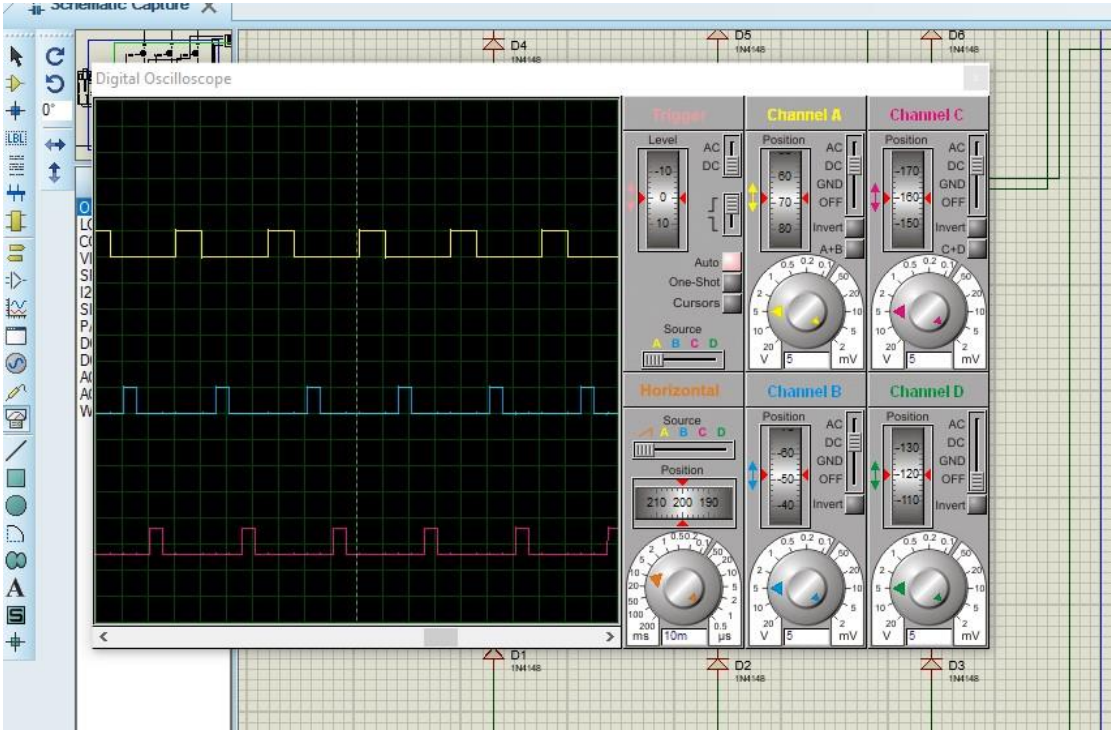
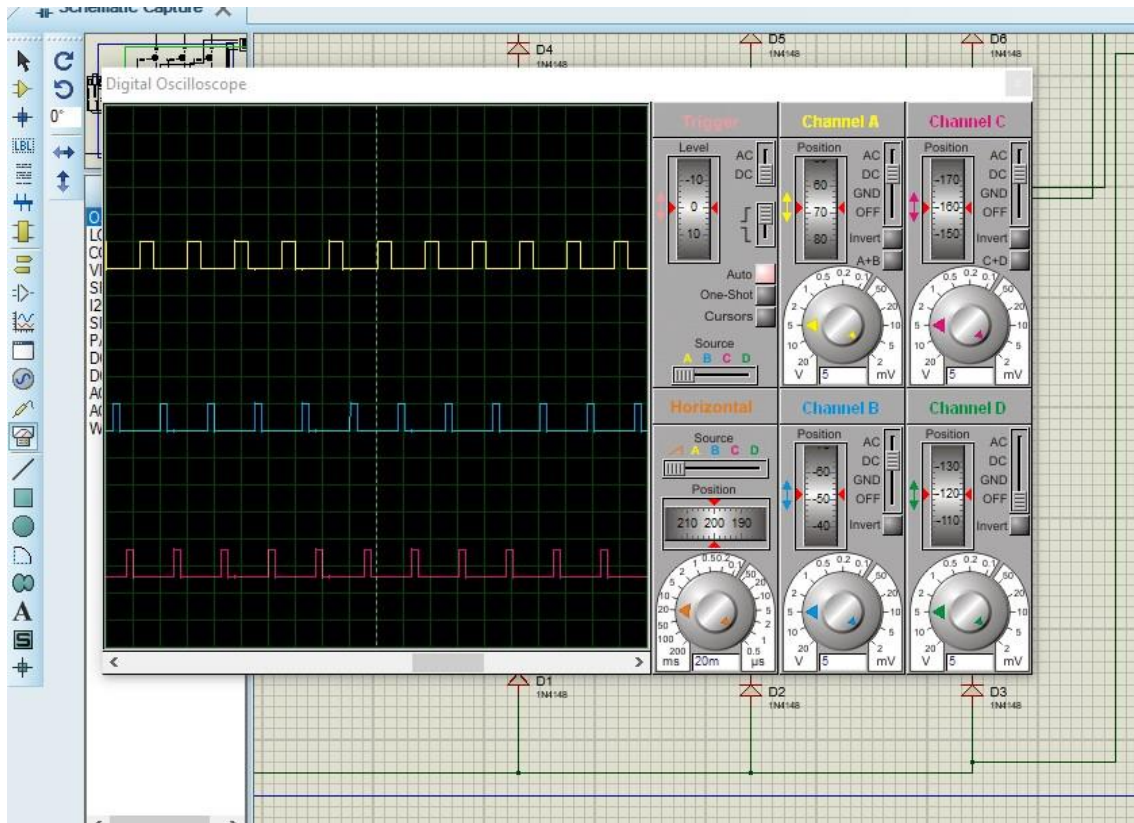
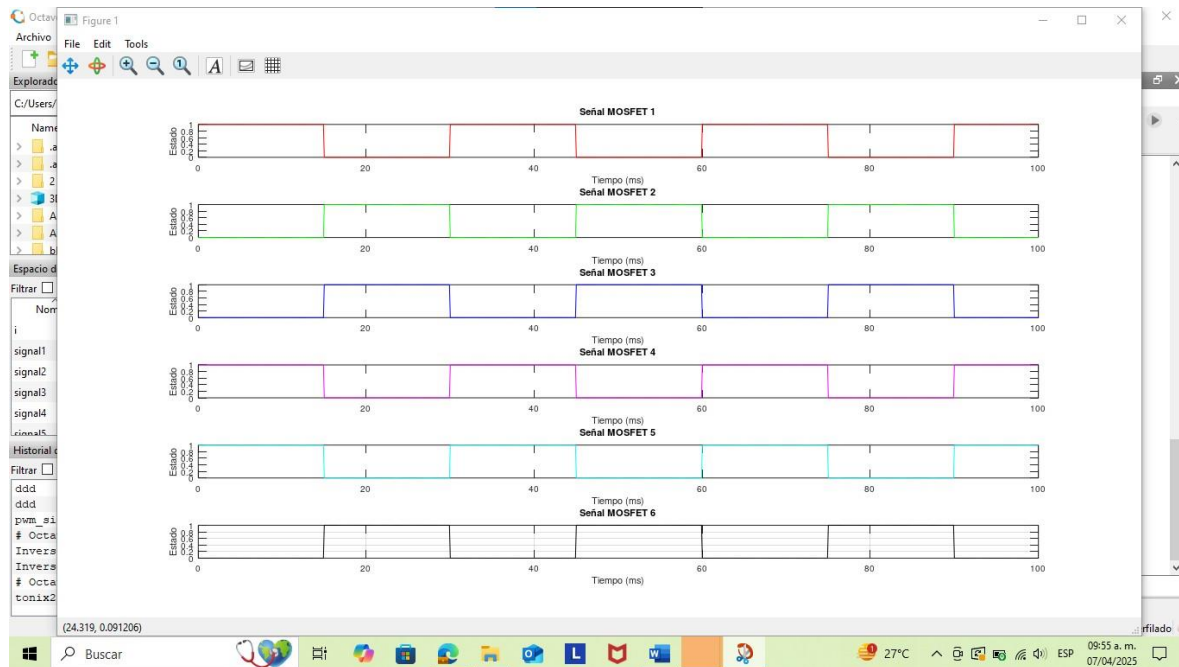


Fig.4.4.3 simulación de proteus del circuito inversor CD/CA, fuente proteus



Para la comprobación como alternativa segura, que realmente funciona el diseño del inversor, se recurrió al programa “octave” para simular el mismo código y verificar su efectividad como se muestra en la fig.4.4.4 los cuales arrojó los mismos comportamientos desfasados de proteus y cada comportamiento en tiempo de no conducción en los mosfet.

Fig.4.4.4 simulación en octave de ondas trifásicas, fuente octave



Una vez comprobado que la solución empleada funciona y es capaz de entregar un voltaje específico de 380V y capaz de mover un peso específico de Kg y alimentar a un motor de 0.5 hp se define que la etapa de simulación es un éxito y posteriormente se ejecuta la etapa de comprobación matemática del circuito antes de construir el prototipo.

4.5 Cálculos del inversor CD/CA conmutado automotriz

Para demostrar matemáticamente que la solución empleada para la solución del inversor CD/CA conmutado automotriz de 12V DC a 380V AC, 500W es correcta, se evaluó cada uno de los componentes utilizados en proteus, se realizaron la selección y los cálculos correspondientes.

4.5.1 cálculos detallados del sistema

Tomando en consideración el proceso que se somete el sistema es el siguiente:

- Control PWM desde Arduino a 6 mosfet IRF540N
- Resistencias de 200Ω en los gates de los mosfet
- Voltaje de entrada 12V DC
- Transformador 12V 380V 1A Max
- Motor trifásico con excitación de 380v/440v a 50-60 Hz, 3 fases, con 0.35/0.33 ampers, con 120 watts y 2800 a 3400 revoluciones
- 9 diodos rápidos de protección
- Conmutación trifásica por 6 mosfet tipo puente H
- Frecuencia de 50-60 Hz

4.5.2 potencia del sistema

Potencia del motor:

$$P_{\text{motor}} = V * I = 380V * 0.35A = 133W$$

Se establece a 120W nominal, como se indico

Eficiencia estimada del sistema (Mosfet + transformador)

$$n=85\%$$

potencia necesaria en el lado 12V:

$$P_{\text{entrada}} = \frac{P_{\text{motor}}}{n} = \frac{120W}{0.85} = 141W$$

4.5.3 corriente necesaria en 12V

$$I_{12V} = \frac{P_{\text{entrada}}}{V} = \frac{141W}{12V} = 11.75A$$

La fuente suministra 12V y 12A estables

4.5.4 conmutación por mosfet IRF540N

$R_{ds(on)} = 0.77 \text{ ohms}$

Max. $V_{ds} = 100V$, $I_d = 33A$

Con disipador de calor puede conmutar 5A continuos sin problemas

Corriente por cada uno:

Cada mosfet conduce 1/3 de ciclo (conmutación trifásica balanceada)

11.75A

$$I_{MOSFET} = \frac{11.75A}{3} = 3.92A$$

4.5.5 Potencia disipada por cada Mosfet

$$P_{MOSFET} = I_2 * R_{ds(on)} = (3.92A)^2 * 0.077 = 1.18W \text{ Total,}$$

de potencia disipada por 6 mosfet:

$$P_{totalMOSFET} = 6 * 1.18W = 7.08W$$

4.5.6 cálculo de las resistencias a gate (200Ω)

Estas limitan la corriente del pin de Arduino al cargar el gate del mosfet:

Capacitancia de entrada del IRF540N:

$$C_{gs} \approx 1600uF$$

Tiempo de carga del gate:

$$\tau = R * C = 200\Omega * 1600 * 10^{-12} \approx 320ns$$

Este tiempo es mucho más rápido que 50-60 Hz, así que funciona perfectamente

$$I = \frac{V}{R} = \frac{5V}{200\Omega} = 25mA$$

Seguro para el Arduino (max por pin = 40mA)

4.5.7 transformador y relación de vueltas

De 12 a 380V

$$\text{Relacion} = \frac{V_{\text{salida}}}{V_{\text{entrada}}} = \frac{380V}{12V} = 31.67 \%$$

4.5.7.1 motor monofásico calculo

$$P = V * I \text{ (Watts)}$$

$$1 \text{ watts} = 0.745 \text{ HP}$$

$$\text{voltaje } 38V$$

$$I = 0.35 \text{ amp}$$

4.5.7.2 motor trifásico calculo

$$HP = \frac{V * I * \%eff * \sqrt{3}}{746}$$

$$\frac{(380)(0.35)(1.15)(0.9)(1.73)}{746} = 0.31HP$$

$$\text{watts} = (1.73)(380)(0.35)(0.9) = 207.08 \text{ watts}$$

$$\frac{P(w) * 207.08}{I (1.73)(380)(0.9)} = \frac{207.08}{591.60} = 0.34$$

Una vez comprobado teóricamente el funcionamiento del circuito se procedió a la conexión física del mismo:

4.5.8 diseño del tablero

Como primera parte se implementó la elaboración de un boceto a mano alzada para definir e identificar la ubicación de los componentes que se utilizaron para la base y para su presentación el cual se estructuraron de la siguiente manera tal como se muestra en la fig.

4.5.8

Fig.4.5.8 esquema a mano alzada del tablero puesto sobre una mesa de uso común

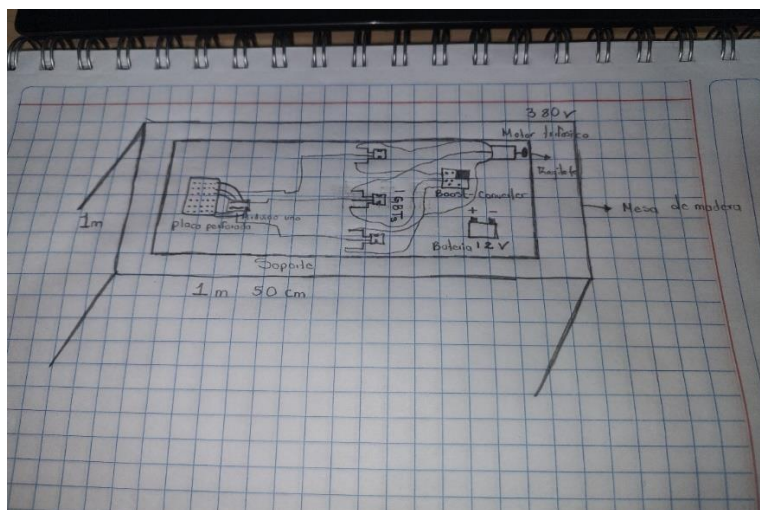


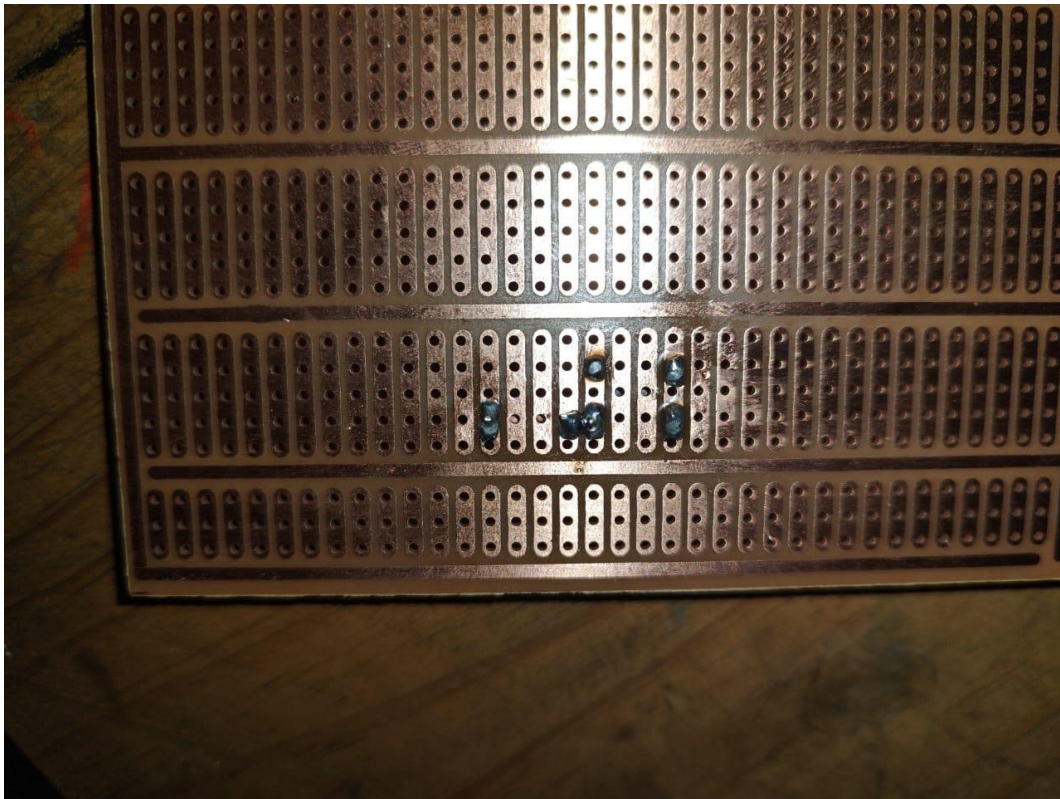
Fig.4.5.8 imagen que muestra cómo se colocara el tablero sobre una mesa



4.5.9 montaje de los Mosfets en placa perforada

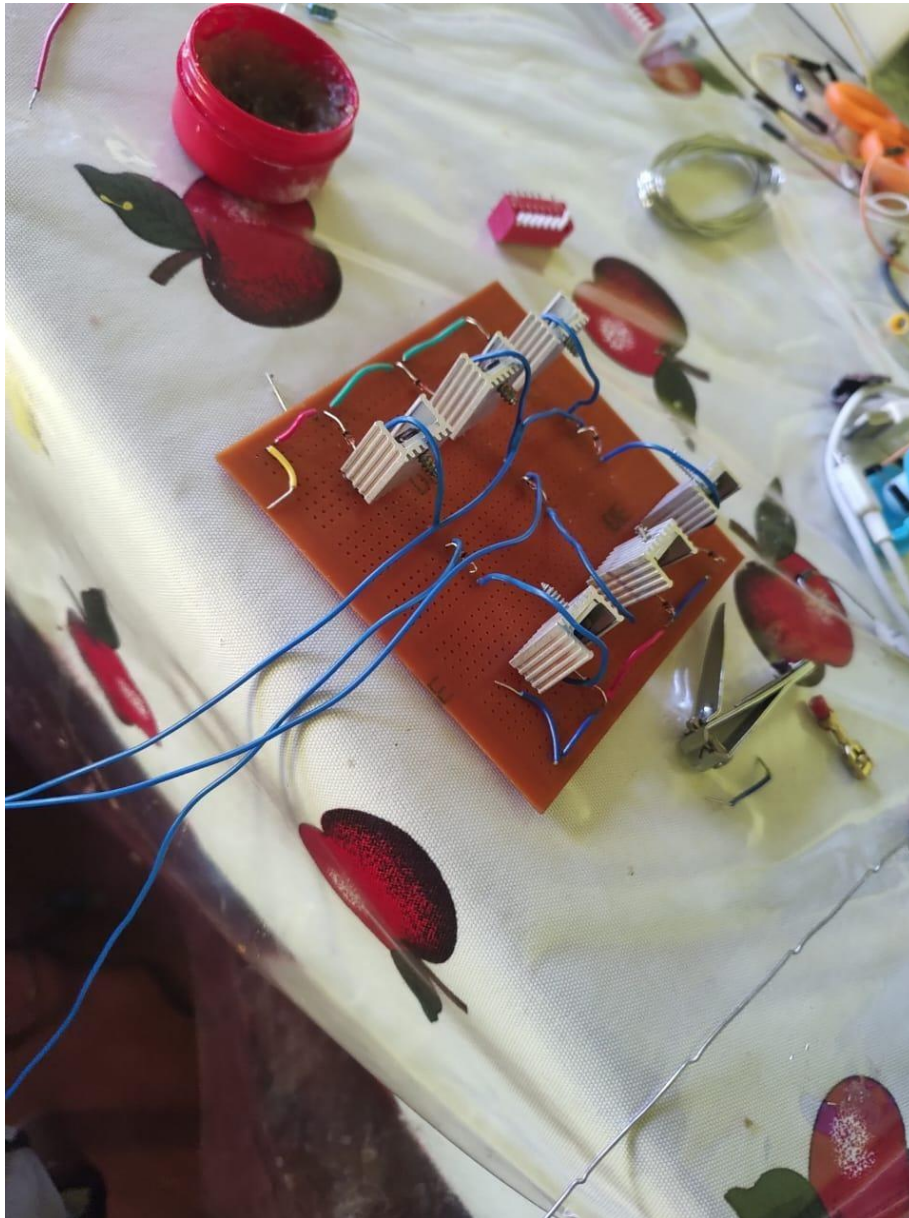
Adquiridos los componentes utilizados en la simulación de proteus, se soldó cada componente en la placa, primeramente, se soldaron los mosfet tal como se muestra en la fig. 4.5.9

Fig.4.5.9 mosfet soldados en la placa



Una vez soldados los mosfets se colocaron los disipadores de calor para evitar sobrecalentamiento y posteriormente se colocaron y soldaron los diodos en las uniones a los mosfet tal como se muestra en la fig.4.5.9.1

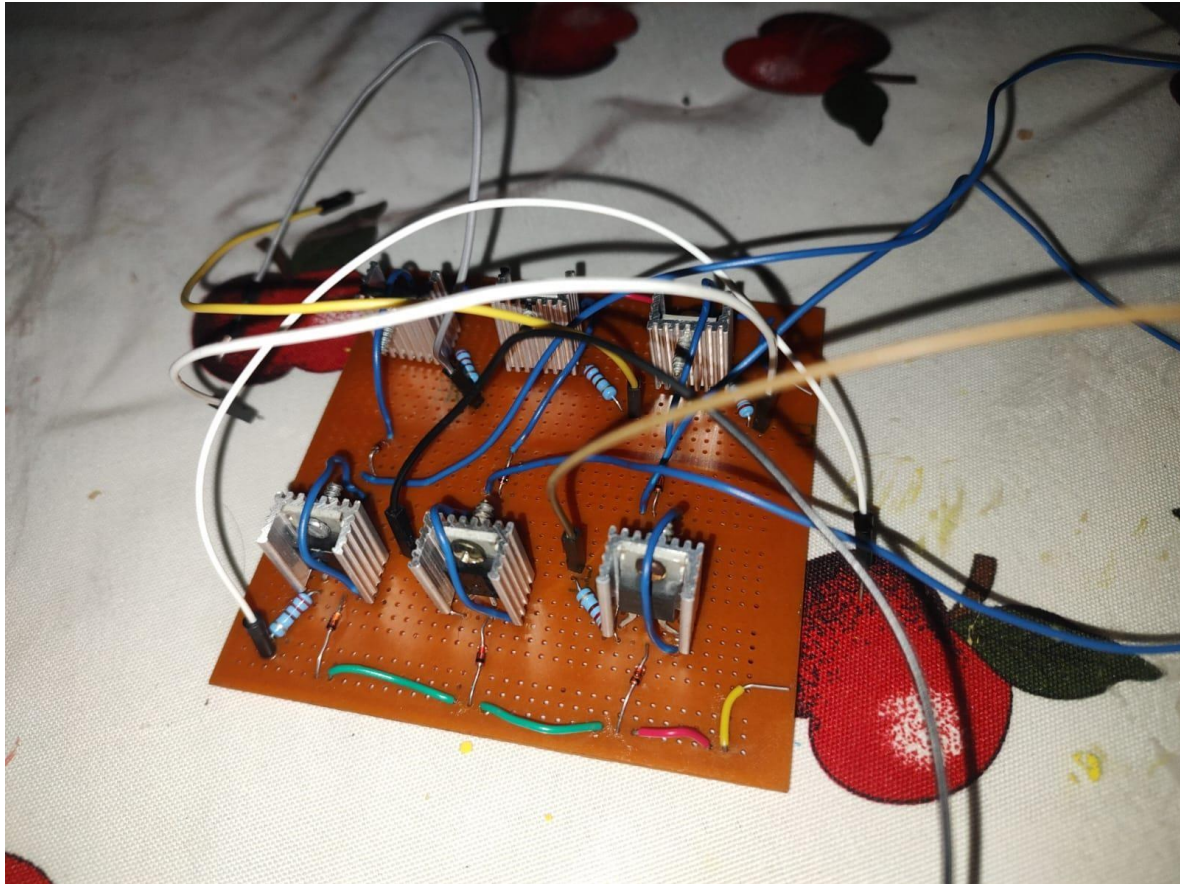
Fig.4.5.9.1 mosfet y diodos soldados en la placa con sus respectivas conexiones



4.5.10 montaje resistencias y cables que van al transformador

Soldados los mosfets y diodos se soldaron las resistencias en los gate de los mosfet y posteriormente las bases que se dirigen a transformador de cada fase tal como se muestra en la fig.4.5.10.

Fig.4.5.10 ubicación y acoplamiento de los diodos, resistencias y nodos respectivos al transformador

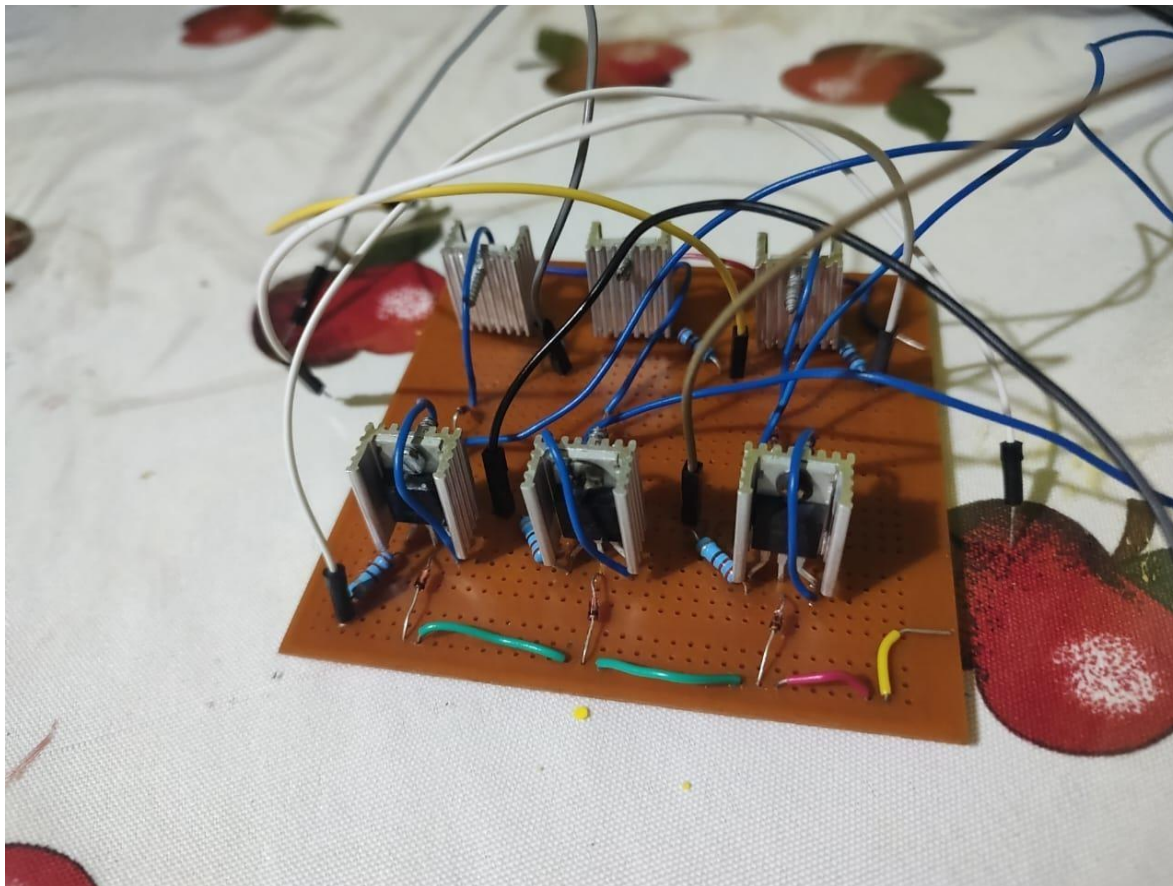


Soldados los componentes se procedió a soldar los jumpers que serán ubicados en el Arduino para recibir las señales.

4.5.11 montaje de jumpers en la placa para acoplamiento al Arduino

ensamblados todos los componentes se procedió a realizar el último paso que fue soldar los jumpers que unirán las conexiones a los GATE” S de los mosfet para recibir los pulsos requeridos tal como se muestra en la fig. 4.5.11

Fig.4.5.11 ubicación y acoplamiento de los jumpers de señal



Realizado el circuito y posterior presentación se obtuvo que el circuito está listo y funcional en la parte de control. (nota: por cuestiones de tiempo y de presupuesto no se pudo adquirir el transformador correspondiente ya que es un componente difícil de adquirir en este momento por lo tanto se deja a carta abierta para futuros residentes)

4.5.12 Selección del motor trifásico

Realizada una búsqueda exhaustiva de motor específico en el laboratorio de electromecánica y requerido para nuestro trabajo se otorgó un permiso por parte del instituto tecnológico de Apizaco de donación del material para poder trabajar en el inversor y para futuras pruebas.

Tal como se muestra en la fig. 4.5.12.

Fig.4.5.12 motor trifásico donado por el instituto tecnológico de Apizaco



Posteriormente se realizó la base que sostendrá nuestro motor para evitar accidentes y ruidos por parte del funcionamiento del motor.

4.5.13 base para sostener el motor

Se realizó una base específica que sostiene el motor y evita que salga disparado lo cual la solución empleada es la implementación de soleras en forma de gancho de las medidas del motor el cual se cortó y barrenaron dichas bases para su implementación y la cual la base es una base de aluminio para evitar sobrecalentamiento y ruido en el motor la cual se barrenó y ajustó al tamaño requerido del motor y quedó de la siguiente manera tal como se muestra en la fig.4.5.13

Fig.4.5.13 base y ganchos para la base y sostenimiento del motor trifásico



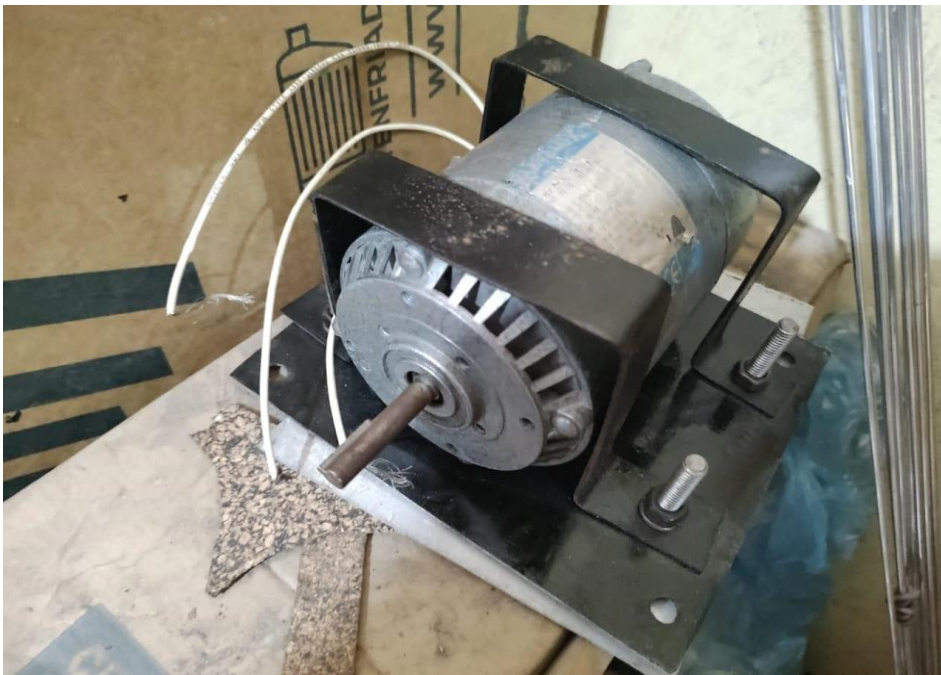
4.5.14 colocación de abrazaderas para el motor

Barrenadas y ajustadas las bases se les dio estética a los soportes y posteriormente ubicarlos y ensamblar para la base del motor lo cual quedo de la siguiente manera tal como se muestra en la fig.4.5.14

Fig.4.5.14 base construida para el motor trifásico



Fig.4.5.14 base construida para el motor trifásico



Definidas tanto la base del motor y la tarjeta del circuito se elaboró el soporte de todos los componentes para presentarlo en su respectivo modulo.

4.5.15 construcción de la base para sostener los componentes del prototipo

Definidos los componentes para la base del circuito electrónico se ensamblaron las bases de madera de dimensiones iguales las cuales son las siguientes:

- 40* 50 cm

Las medidas correspondientes proporcionan una base sólida conjunta para una visualización del circuito y espacio accesible para el mismo.

Como se visualiza en la fig 4.5.15 se ensambló correctamente y se ajustó para que tuviera una firmeza adecuada y resistente.

Fig.4.5.15 base definida para el circuito electrónico



Fig.4.5.15 base terminada del circuito electrónico



4.5.16 colocación de los componentes del modulo

Agrupado el circuito o parte de Él, en la presentación de la base de madera para tener una visibilidad clara de la ubicación y barrenar adecuadamente tal como se visualiza en la imagen 4.5.16

Fig.4.5.16 presentación de los componentes del circuito electrónico

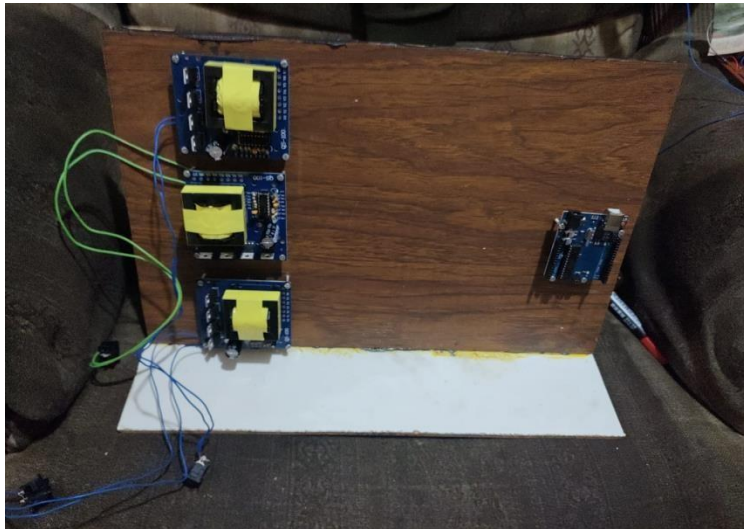
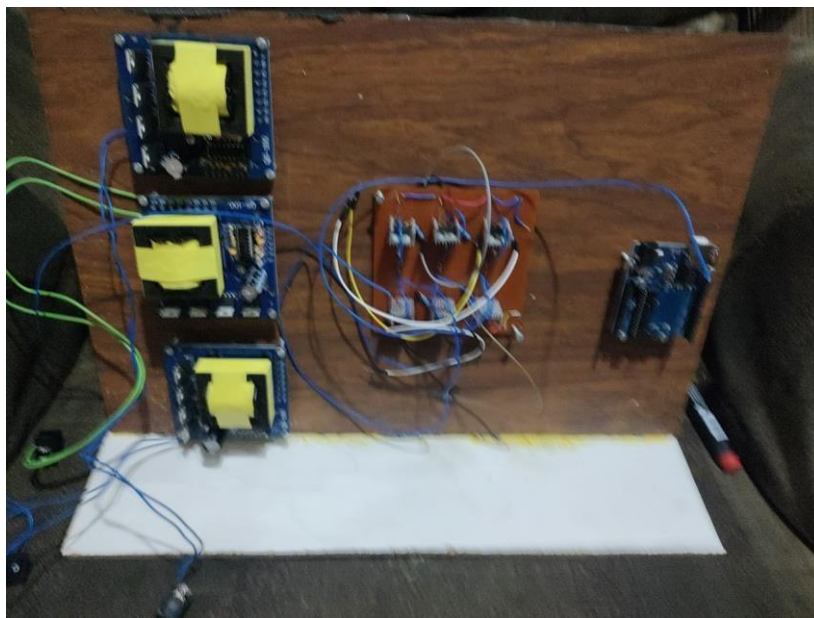


Fig.4.5.16 presentación de los componentes del módulo en donde se muestra la etapa de potencia del circuito electrónico

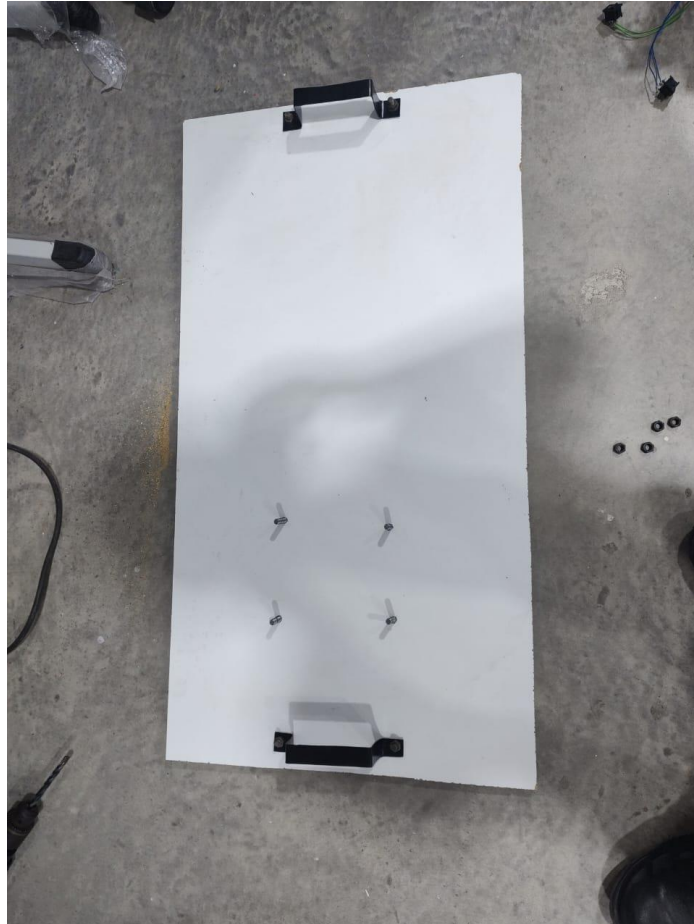


4.5.17 colocación del prototipo sobre la mesa

Teniendo la base fija para el soporte, de todos los componentes, se colocaron soportes en los laterales para mayor movilidad del proyecto.

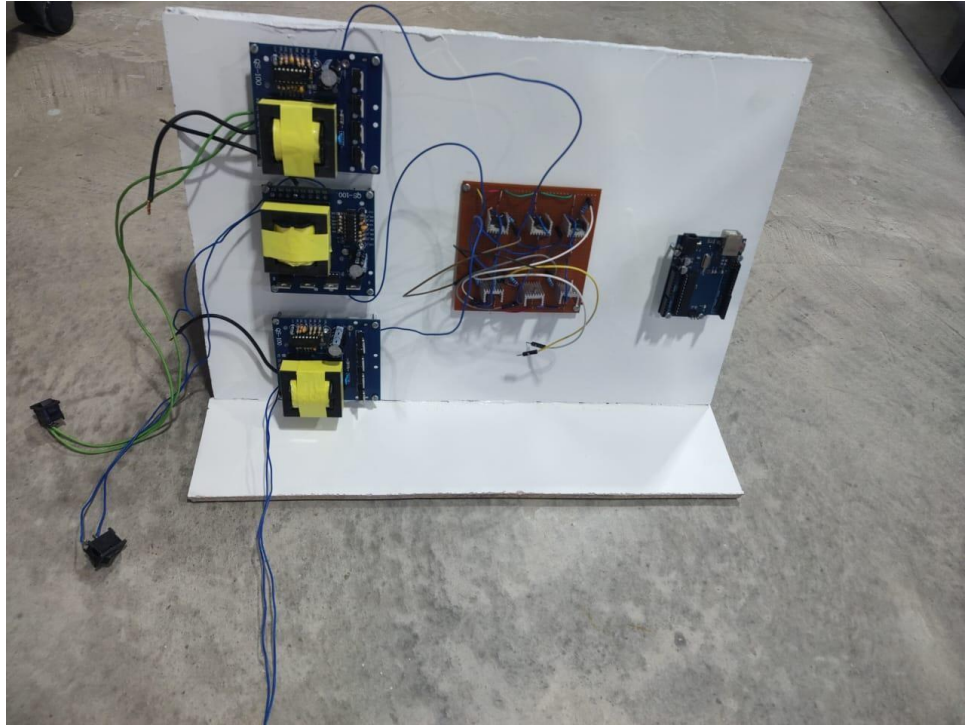
Tal como se observa en la figura 4.5.17.

Fig.4.5.17 Ubicación de la base de todo el sistema



Armado el circuito electrónico, se ensambla para la ubicación correspondiente y organización de este y del motor en la base final, tal como se ve en a fig 4.5.17.

Fig.4.5.17 presentación del circuito electrónico



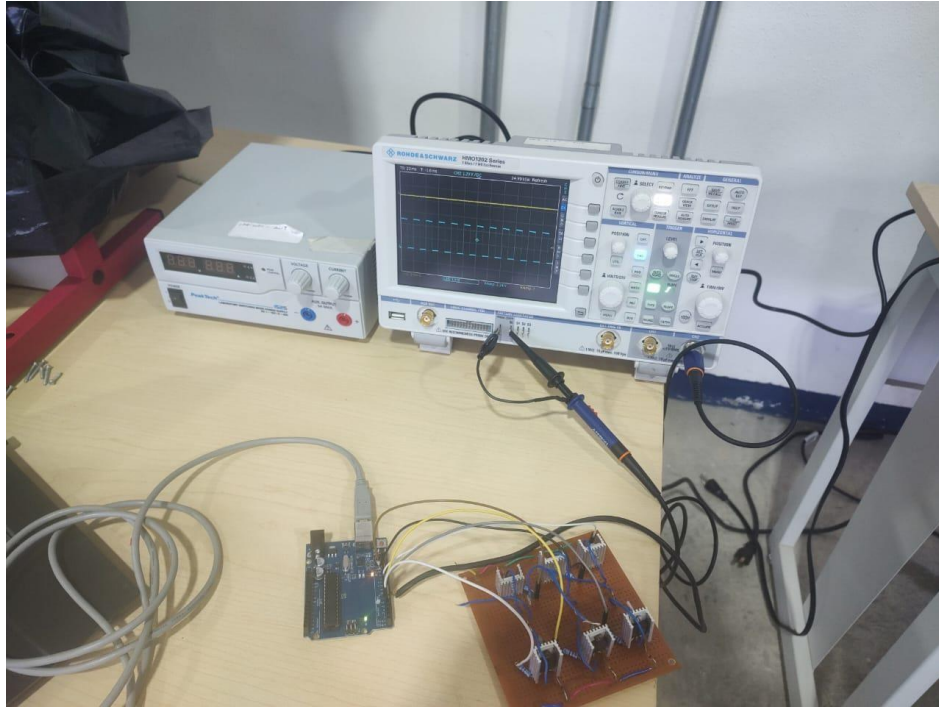
4.5.18 pruebas finales del prototipo

Para corroborar que el circuito funciona completamente se procedió a realizar pruebas fundamentales al circuito electrónico con el osciloscopio, el cual para corroborar el comportamiento desfasado y que el circuito funcione adecuadamente esta prueba se realizó así porque el transformador por cuestiones de tiempo y económicas no se implementó, pero se deja a carta abierta para futuros residentes.

Primeramente, se calibro el osciloscopio para poder realizar las pruebas tal como se muestra

en la fig. 4.5.18.

Fig.4.5.18 calibración del osciloscopio



Calibrado el osciloscopio primeramente como primera prueba se energizo el circuito con 4 V para asegurar que el código implementado en el circuito funciona y no abra incidentes, puesto que respondió el circuito respondió establemente tal como se muestra en la fig. 4.5.19.

Fig.4.5.19 comportamiento del circuito electrónico de control a bajo voltaje



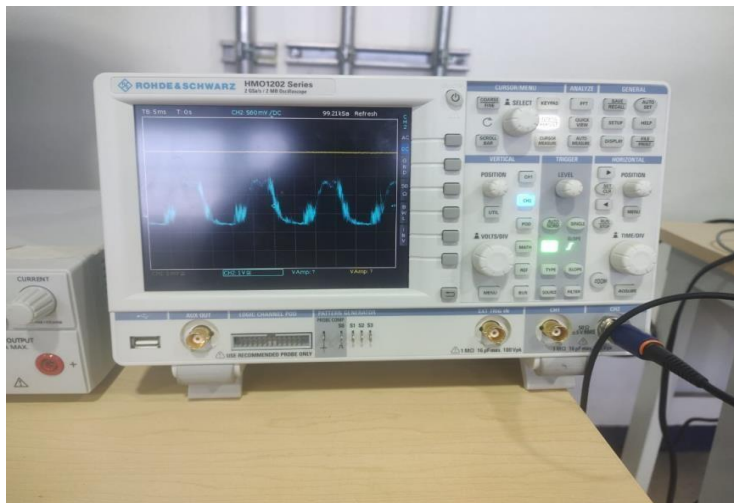
Una vez energizado y elevado el voltaje a 12V observamos que nuestro circuito es capaz de soportar y estabilizar los 12V de la batería automotriz y que no solo eso que es capaz de recibir los pulsos y el desfase que genera el Arduino tal como se visualiza en la fig.4.5.20.

Fig.4.5.20 comportamiento del circuito de control a voltaje de 12V



Como podemos observar en la fig.4.5.21 podemos observar un circuito estabilizado a 12V como nos muestra el desfase y comportamiento de cada fase del circuito.

Fig.4.5.21 comportamiento del circuito de control estabilizado y mostrando las ondas desfasadas



El diseño y ensamble del inversor fue completado a nivel electrónico básico y funcionalidad de señal, sin embargo, las pruebas finales en carga con motor trifásico no se realizaron por limitaciones técnicas, de tiempo y seguridad. Se deja como etapa futura con

una oportunidad para futuros residentes, los cuales integraran el transformador trifásico para poder energizar y poder ver el movimiento del motor, lo cual dichas pruebas fundamentales con 12V que arrojó el circuito energizado a ese voltaje tal como se muestra en la fig. 4.5.22 y 4.5.23.

Fig.4.5.22 circuito de control sin transformador ni carga al motor funcionando establemente

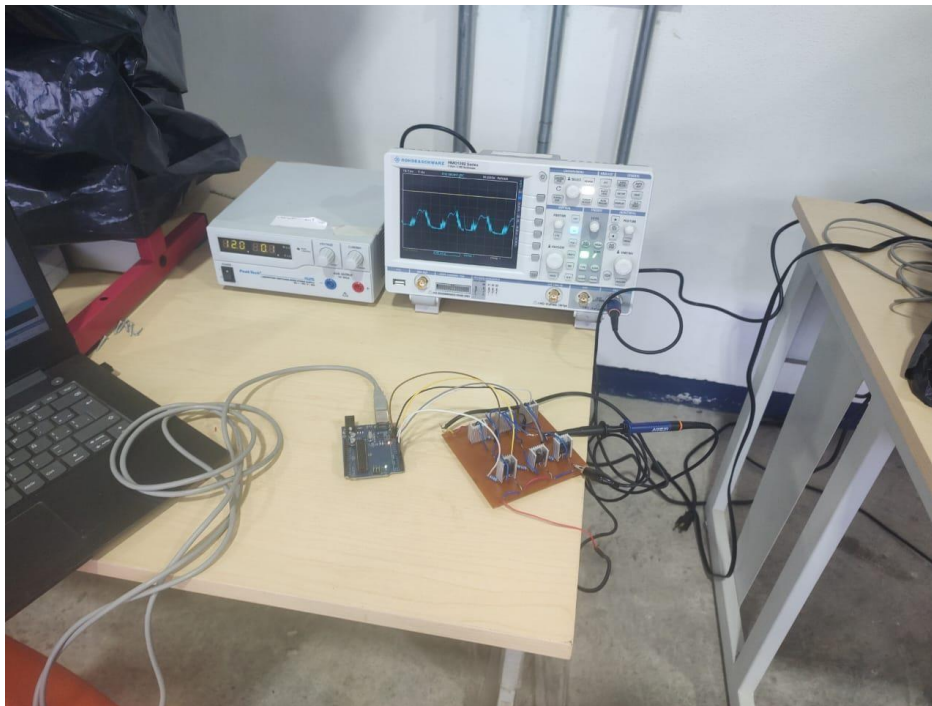


Fig.4.5.23 pruebas sin carga y sin conectar el transformador limitando la verificación completa del sistema



4.5.14 construcción final del prototipo

Posteriormente se ensambló el circuito completo, el motor y la base en el respectivo lugar y espacio tal como se muestra en la fig 4.5.24

Fig.4.5.24 imagen que muestra la construcción final del tablero didáctico



Conclusiones

El desarrollo del proyecto "Diseño y Construcción de un Inversor CD/CA Trifásico conmutado para Motores Eléctricos Automotrices" permitió poner en práctica conocimientos avanzados de electrónica de potencia, simulación, programación y ensamblaje de sistemas de conversión energética.

Se logró completar exitosamente el diseño del circuito electrónico, su simulación teórica, la validación por medio de software (Proteus y Octave), la construcción del prototipo físico y la verificación de señales en osciloscopio. El sistema fue capaz de generar señales PWM desfasadas de 120° , necesarias para energizar motores trifásicos automotrices, confirmando la funcionalidad del diseño implementado.

Por cuestiones económicas y de tiempo, no fue posible integrar el componente clave del transformador trifásico elevador, lo cual impidió energizar el motor y observar el giro de este. No obstante, esto no afectó la integridad del proyecto, ya que se cumplió con todos los requisitos de diseño, cálculo, construcción y pruebas electrónicas.

El prototipo queda como base sólida y operativa para que futuros estudiantes puedan incorporar el transformador y continuar con las pruebas dinámicas, aportando a la mejora continua del laboratorio y del aprendizaje en tecnologías de movilidad eléctrica. El trabajo representa una contribución significativa a la infraestructura académica del ITA y una experiencia formativa completa para el estudiante, aplicando teoría a la práctica con un enfoque profesional y orientado a la innovación.

NOTA: el motor trifásico utilizado en el prototipo consume 0.34 amperes a 380V trifásico, por lo que se requiere un transformador con entrada de 12V ac a 380V ac, de un ampere como máximo, el cual NO EXISTE comercialmente en el mercado.

El suscrito se dio a la tarea de buscar en el mercado y en empresas particulares que se dedican a fabricar transformadores SIN TENER ÉXITO en la adquisición del transformador. En la mayoría de los casos los fabricantes pueden producir los transformadores con los voltajes de entrada y salida requeridos, pero a un amperaje no menor a 5 amperes.

Por tanto, el prototipo solo quedo terminado a un 80% en virtud de que a la fecha el suscrito no adquirió los transformadores elevadores por su difícil adquisición técnica y económica. Por tanto, el prototipo se deja a un siguiente residente para que este adquiriera los transformadores adecuados y se termine al 100% el prototipo.

Los transformadores mostrados en las imágenes del módulo didáctico son solo una presentación simulada ya que dichos transformadores pertenecen a las tarjetas de Arduino mostradas solo para la consideración del espacio que ocuparan los transformadores reales.

Referencias Bibliográficas

- Chapman, S. J. (2012). *Electric Machinery Fundamentals* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Erickson, R. W., & Maksimovic, D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics* (2nd ed.). Springer.
- Franco, S. (2014). *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits* (4th ed.). McGraw-Hill.
- IEEE. (2018). *IEEE Standard for Electrical Safety in the Workplace*. IEEE Standards Association.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Rashid, M. H. (2014). *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications* (4th ed.). Pearson Education.
- Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2010). *Microelectronic Circuits* (6th ed.). Oxford University Press.
- Erickson, R. W., & Maksimovic, D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics* (2nd ed.). Springer.
- Mohan, N., Undenlad, T.M., & Robbins, W.P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications, and desing* (3rd ed.). John wiley & sons
- Bose, B. K. (2002). *Modern Power Electronics and AC Drives*. Pearson Education.
- Chau, K. T., & Lai, L. L. (2006). *Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends*. Elsevier.
- Harris, S. A., Lewis, S. J., & Schofield, A. (2016). *Electromagnetic Field Theory*. Wiley-IEEE Press.

Jung, Y., & Lee, H. (2014). "Development and application of an IPMSynRM with high torque density." *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 50(4), 2478-2487.

Lundberg, M. (2017). *Capacitors: Principles and Applications*. McGraw-Hill.

Slade, P., & Nash, J. (2011). *Magnetic Circuits and Transformers*. Springer.

Wang, L., & Xu, Z. (2015). "Analysis and design of variable speed drives." *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(2), 890-897.

https://youtu.be/iIIN_FaN5kM?si=YFplxZFsbokIzQZB

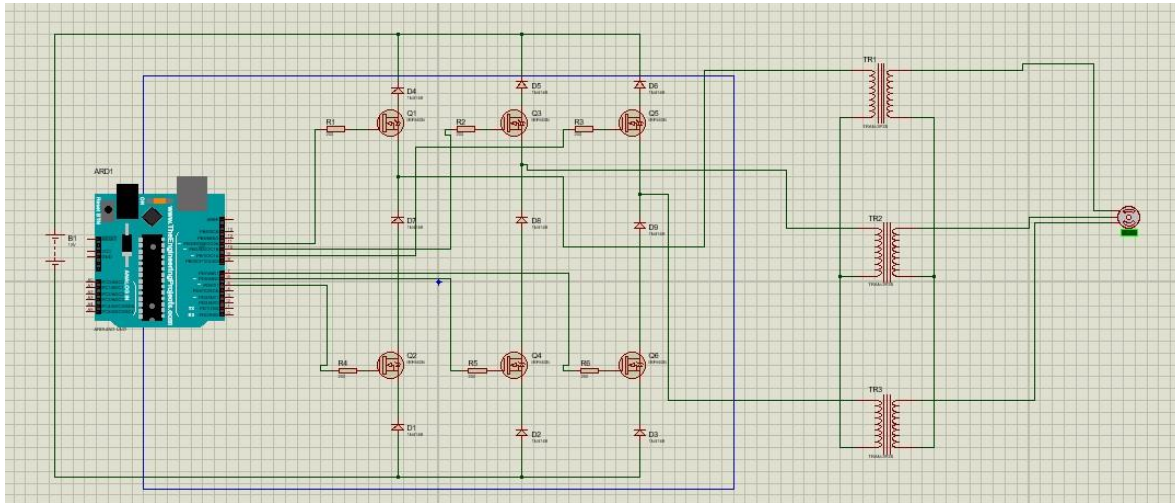
Bose, B. K. (2002). *Modern Power Electronics and AC Drives*. Pearson Education.

Walker, A., & Lee, C. (2005). "Applications of IGBT devices in modern power electronics."

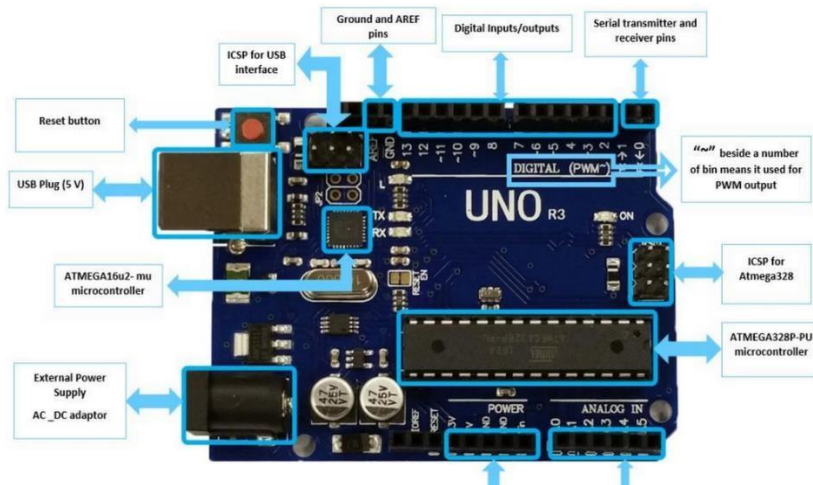
IEEE Transactions on Industrial Electronics, 52(2), 371-380.

Anexos

Diagrama de diseño de inversor CD/CA, fuente Google



componentes y características del Arduino uno, fuente Google



Disipador de calor, fuente Google

