



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Diseño y construcción de un módulo didáctico de control de motores de inducción con dispositivo de potencia inteligente para el laboratorio de control eléctrico de la universidad de las fuerzas armadas ESPE sede Latacunga.

Tacuri Pilataxi, Jhon Bernardo

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico

Freire Llerena Washington Rodrigo

17 de agosto del 2020



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Diseño y construcción de un módulo didáctico de control de motores de inducción con dispositivo de potencia inteligente para el laboratorio de control eléctrico de la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga”** fue realizado por el señor, **Tacuri Pilataxi, Jhon Bernardo**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditarlo y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, 17 de agosto del 2020

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Washington R. Freire Llerena', is positioned above a dotted line.

ING. FREIRE LLERENA, WASHINGTON RODRIGO.

C.C:1801910884



Document Information

Analyzed document	TESIS_J_TACURI REVISION _2.docx (D77461463)
Submitted	8/5/2020 12:54:00 AM
Submitted by	Mario Jiménez
Submitter email	mpjimenez@espe.edu.ec
Similarity	4%
Analysis address	mpjimenez.espe@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS_LENIN_JAVIER_ANDRADE__LOGACHO_.pdf Document TESIS_LENIN_JAVIER_ANDRADE__LOGACHO_.pdf (D40963588) Submitted by: vgproanio@espe.edu.ec Receiver: vgproanio.espe@analysis.arkund.com
SA	Proyecto Tecnico(Reyes_C&Moya_J).docx Document Proyecto Tecnico(Reyes_C&Moya_J).docx (D34392945)
SA	Proyecto_tecnicoSangucho-Vergar.docx Document Proyecto_tecnicoSangucho-Vergar.docx (D35506226)
W	URL: https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9242/3/T1571.pdf Fetched: 11/3/2019 8:37:28 PM
W	URL: https://www.st.com/content/st_com/en/products/evaluation-tools/product-evaluation- ... Fetched: 8/5/2020 12:55:00 AM

Latacunga, 17 de agosto del 2020

ING. FREIRE LLERENA, WASHINGTON RODRIGO.

C.C:1801910884



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Tacuri Pilataxi, Jhon Bernardo** con cédula de ciudadanía N°0604333948, declaro que el presente trabajo de titulación **“Diseño y construcción de un módulo didáctico de control de motores de inducción con dispositivo de potencia inteligente para el laboratorio de control eléctrico de la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando todos los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas. Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 17 de agosto del 2020

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Tacuri Pilataxi', is written over a horizontal dotted line.

Tacuri Pilataxi, Jhon Bernardo

CC: 0604333948



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **Tacuri Pilataxi, Jhon Bernardo**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación **“Diseño y construcción de un módulo didáctico de control de motores de inducción con dispositivo de potencia inteligente para el laboratorio de control eléctrico de la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 17 de agosto del 2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jhon Bernardo Tacuri', is written over a horizontal line. Below the line is a dotted line.

Tacuri Pilataxi, Jhon Bernardo

CC: 0604333948

DEDICATORIA

Con mucho cariño, a Dios a mis padres y las personas que supieron ayudarme en el transcurso de este camino.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme sostenido durante esta etapa de mi vida por su provisión y su gran amor.

Agradezco a mi padre José y mi madre Luz por su apoyo incondicional, a mis hermanos por apoyarme en todos los proyectos que me he propuesto y agradezco a la familia Shekinah por ser parte de mi vida y ser un apoyo para mi vida

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA.....	1
CERTIFICACIÓN.....	2
URKUND.....	3
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA	4
AUTORIZACIÓN	5
DEDICATORIA.....	6
AGRADECIMIENTO.....	7
1. PROBLEMA.....	20
1.1. Descripción del problema	20
1.2. Antecedentes.....	21
1.3. Justificación e importancia	22
1.4. Objetivos.....	23
1.4.1. Objetivo general.	23
1.4.2. Objetivo específico	23

2. MARCO TEÓRICO	25
2.1. Antecedentes de investigación	25
2.2. Fundamentación teórica	26
2.2.1. Motores de inducción.....	26
2.2.2. Inversor DC – AC	27
2.2.3. Inversor trifásico	28
2.2.4. Técnicas de control de motores de inducción trifásico	29
2.2.5. Modulación SPWM.....	33
2.2.6. Variación de frecuencia	34
2.2.7. Variación de voltaje.	34
2.2.8. Sobre modulación.....	35
2.2.9. Módulos de potencia IGBT	40
2.2.10. Elementos de control electrónico.....	42
2.2.11. Programación de microcontroladores.	44
2.2.12. Pantallas de visualización de datos	45
2.2.13. Filtros pasivos	46
2.2.14. Filtro pasa banda.....	46
2.2.15. Convertidores digitales a análogos.....	49
2.2.16. Uso de la salida PWM como convertidor digital a analógico	50

2.2.17. Control.....	52
2.3. Fundamentación legal.....	52
2.3.1. Normas y reglamentos.....	52
2.3.2. Sistema de variables	53
2.4. Hipótesis.....	54
2.4.1. Operacionalización de variables	54
3. METODOLOGÍA	56
3.1. Modalidad de investigación.....	56
3.1.1. De campo.....	56
3.1.2. Bibliográfica.....	57
3.1.3. Tipos de investigación.	57
3.1.4. Niveles de investigación	58
3.1.5. Población y muestra.	59
3.2. Técnicas de recolección de datos.....	59
3.3. Instrumentos.....	60
3.3.1. Técnica de comprobación de la hipótesis	60
4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	61
4.1. Análisis de los resultados	61

4.2. Motor de inducción trifásico	62
5. PROPUESTA	64
6.1. Tema de la propuesta	64
5.2 Datos informativos	64
5.3 Objetivos.....	65
5.3.1 Objetivo general	65
5.3.2 Objetivo específico	65
5.4 Justificación de la propuesta.....	65
5.5 Fundamentación de la propuesta.....	66
5.6 Diseño de la propuesta	66
5.6.1 Resumen.....	66
5.6.2 Arquitectura del proyecto.....	68
5.7 Selección de los componentes.	68
5.7.1 Selección de microcontrolador.....	69
5.7.2 Selección de generador de onda triangular	70
5.7.3 Selección de módulo de potencia de IGBT.....	71
5.8 Metodología para la ejecución de la propuesta	72

5.8.1	Diagrama los componentes electrónicos y eléctricos.....	72
5.8.2	Programación de la tarjeta de microcontrolador.....	73
5.8.3	Amplificación de señal senosoidal	75
5.8.4	Adquisición de onda triangular.....	76
	Diseño de control de SPWM	78
5.8.5	Comparación de señales.....	78
5.8.6	Obtención de SPWM.....	79
5.8.7	Modulo de IGBT SPM (SMART POWER MODULE).....	80
5.8.8	Fuentes de alimentación.....	81
5.9	Pruebas del módulo didáctico	84
5.9.1	Señal de control portadora.	84
5.9.2	Señal de control moduladora.....	84
5.9.3	Comparación de señal portadora y moduladora.	86
5.9.4	SPWM o señales de disparo.....	87
5.9.5	Variación de frecuencia, amplitud e interfaz de control	88
5.9.6	Señal de salida del inversor.....	89
5.9.7	Módulo didáctico.....	90

CONCLUSIONES.....	92
RECOMENDACIONES.....	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94
ANEXOS	98

INDICE DE FIGURA

Figura 1. Puente de inversor	29
Figura 2. Método de control escalar de bucle cerrado	30
Figura 3. Control vectorial directo.....	31
Figura 4. Diagrama de método de control de torque directo	32
Figura 5. PWM mediante el método de comparación de triángulo sinodal.....	33
Figura 6. Sobre modulación	36
Figura 7 Estructura de transistor de unión bipolar de potencia.....	37
Figura 8. Modelo de circuito equivalente de un IGBT.	38
Figura 9. Símbolo del circuito IGBT con BJT.....	39
Figura 10. Diagrama de un módulo IGBT PIM.....	41
Figura 11. Dispositivo de potencia inteligente	42
Figura 12 . Tarjeta de microcontrolador núcleo STM32	43
Figura 13 . Microcontrolador Atmega328P	44
Figura 14. Esquema filtro pasa banda.....	46
Figura 15. Esquema filtro elimina banda	47
Figura 16. Esquema filtro pasa banda.....	48
Figura 17. Esquema filtro pasa alto	49

Figura 18. Diagrama básico de una salida DAC	50
Figura 19. Descomposición de la señal PWM	51
Figura 20. Filtro analógico de la señal PWM	51
Figura 21 . Esquema control de motor de inducción trifásico.....	68
Figura 22. Microcontrolador ATMEGA328P	69
Figura 23 . Diagrama esquemático de los elementos eléctricos y electrónicos.	73
Figura 24 Tabla de onda senoidal en valores hexadecimal	74
Figura 25. Filtro pasa bajo.....	75
Figura 27. Diagrama de amplificación de voltaje	75
Figura 28. Diagrama de generador de señal triangular.....	76
Figura 29. Diagrama de comparación de señales	79
Figura 30. Diagrama de circuito de control y potencia de la señal SPWM.....	79
Figura 31 . Diagrama interno del módulo IGBT	80
Figura 32. Diagrama para el diseño de PCB de circuito de potencia.....	81
Figura 33. Diagrama de fuentes de alimentación para circuito de control.....	82
Figura 34. Diagrama de fuente de voltaje para alimentación de motor	83
Figura 35. Señal portadora.....	84
Figura 36. Señal moduladora	85

Figura 37. Señal moduladora desfasada 120 grados	85
Figura 38. Señal moduladora desfasada 240 grados	86
Figura 39. Comparación de la señal portadora y señal moduladora	86
Figura 40. Generación de PWM.....	87
Figura 41. Señal de disparo +U y -U	87
Figura 42. Señales de disparo +U y +V.....	88
Figura 43. Pantalla LCD.....	88
Figura 44. Frecuencia de 30 Hz y voltaje al 63 %.....	89
Figura 45. Frecuencia de 90 Hz y voltaje al 78 %.....	89
Figura 46. Salida de voltaje	90
Figura 47. Módulo control de motores de inducción trifásica de baja potencia .	91

INDICE DE TABLA

Tabla 1 Operacionalización de variable independiente.....	54
Tabla 2 Operacionalización de variable dependiente.....	55
Tabla 3 Tabla de recolección de datos	59
Tabla 4 Parámetros para módulo de control de motor de inducción trifásico	63
Tabla 5 Características de los microcontroladores	70
Tabla 6 Características de CI XR-2206	71
Tabla 7 Rango de operación de la señal triangular	77
Tabla 8 Datos de variación de voltaje y frecuencia	78
Tabla 9 Datos técnicos de módulo IGBT.....	80
Tabla 10 Requerimiento para fuentes de alimentación.	82
Tabla 11 Requerimiento para fuente de etapa de potencia.....	83

RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación consta del diseño y construcción de un módulo didáctico de control de motores de inducción trifásico de baja potencia, este proyecto se diseña para un motor de inducción trifásica de $\frac{1}{4}$ de hp de 120 voltios AC. Se da inicio con la investigación bibliográfica de la teoría de control de motores de inducción en el campo de la electrónica de potencia y la tecnología de interruptores electrónicos como los IGBT'S, las cuales son utilizados para el control de dichos motores en la industria, el diseño del módulo didáctico consta de tres etapas; etapa de generación de señales de control; señal portadora y señal moduladora, etapa de comparación y la etapa de potencia respectivamente, en la primera etapa se ingresan las variables de amplitud de voltaje y frecuencia para la variación de la velocidad del motor, además en esta etapa se puede visualizar las señales de control por medio de un osciloscopio y el cambio de las variables de entrada como: amplitud y frecuencia se observan en una pantalla LCD que está incorporada en el módulo, posteriormente las señales son comparadas, de esta se genera los disparadores o señal SPWM, las cuales son conectadas y aisladas a la etapa de potencia, mediante opto acopladores.

Palabras clave

- Motor de inducción trifásico
- Control de motores
- Interruptor electrónico
- Etapa de control

ABSTRAC

The following research work consists of the design and construction of a low power three-phase induction motor control didactic module. This project is designed for a 120 volt AC hp three-phase induction motor from ¼ It starts with the bibliographic research of the theory of control of induction motors in the field of power electronics and electronic switch technology such as IGBT's, which are used for the control of such motors in the industry, the design of the didactic module consists of three stages; stage of control signal generation; carrier signal and modulating signal, comparison stage and power stage respectively, in the first stage the voltage and frequency amplitude variables are entered for the variation of the motor speed, in addition in this stage the control signals can be visualized by means of an oscilloscope and the change of the input variables as: amplitude and frequency are observed in a LCD screen that is incorporated in the module, later the signals are compared, from this the triggers or SPWM signal is generated, which are connected and isolated to the power stage, by means of opto-couplers.

Keywords

- Three-phase induction motor
- Engine control
- Electronic switch
- Control stage

1. PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

En la actualidad a través de los avances de diferentes sistemas tecnológicos, es fundamental emplear el mismo, en áreas que faciliten el control de un motor AC, disminuyendo costos y optimizando.

El laboratorio de control eléctrico no cuenta con módulos con tecnología IGBT, siendo esta tecnología muy aplicada en el desarrollo de control de máquinas e inversores, la ausencia de módulos con este tipo de tecnologías genera que los estudiantes que cursan la asignatura de control eléctrico desconozcan de una manera didáctica, los nuevos métodos que existen para controlar motores de inducción.

Con el avance de la microelectrónica se han desarrollado los módulos de la serie SPM 45, se crearon para proporcionar una solución de inversor muy compacta y de alto rendimiento para controladores de CA, controlador BLDC y motores en aplicaciones de baja potencia, las cuales tiene una aplicación muy alta dentro del campo de la automatización de procesos que no se requiere potencias altas. Este tipo de tecnología es adecuado implementar en el laboratorio de control eléctrico. La implementación de módulos con tecnologías nuevas permite transferir nuevos conocimientos que aportan al desarrollo tecnológico.

El progreso de los sistemas de control de potencia en procesos industriales por medio de cambios tecnológicos en cuanto a software y hardware avanzados, que además sean de costos bajos, se va haciendo necesario en la actualidad en la industria.

1.2. Antecedentes

La electrónica de potencia es uno de los temas actuales de la ingeniería eléctrica que ha tenido muchos avances en los últimos tiempos y que afecta casi todas las esferas de la vida humana.

Un campo importante de los sistemas semiconductores, ha sido el control de grandes bloques de flujo de energía en un sistema, llevando al desarrollo de la electrónica de potencia. Dichos dispositivos actúan como interruptores controlados y pueden llevar a cabo tareas de rectificación, inversión y regulación controlada de la potencia en una carga. Los elementos de conmutación más significativas son los tiristores o SCR Triac Diac (Diodo para corriente alterna), IGBT (Transistor bipolar de puerta aislada), MOSFET (Transistor de efecto de campo semiconductor de óxido metálico) y BJT (Transistor de unión bipolar). (M.Undeland, 2009).

Todos estos dispositivos han sido de gran aporte en el desarrollo de la electrónica de potencia, siendo óptimos en el de control de potencias grandes, el inconveniente es que estos interruptores trabajan de una manera individual, en el caso del IGBT requiere de un driver para el control del gate.

La serie SPM proporciona una solución de inversor compacta, es decir este dispositivo encapsula el IGBT y el driver para el manejo de las compuertas, siendo estos componentes confiables para aplicaciones de motores de baja potencia. (On Semiconductor, 2014).

1.3. Justificación e importancia

La implementación de módulo didáctico con IGBT para el control de motores trifásicos de inducción para el laboratorio de control eléctrico permite que el estudiante experimente nuevos métodos de control, y obtener nuevas experiencias en el aprendizaje, con la aplicación de tecnologías nuevas en el campo de los semiconductores.

El desarrollo de este proyecto de investigación está dirigido para los alumnos que cursan la asignatura de Electrónica de Potencia, de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga, contribuirá para profundizar la formación académica en el ámbito de control de máquinas aportando el conocimiento en el desarrollo y el análisis de las diferentes características de un inversor trifásico.

El estudiante de pregrado conocerá cada parte del módulo y su respectivo funcionamiento, que al estar conectado a una interfaz gráfica se podrá observar las diferentes señales, desde el inicio del inversor hasta la señal de salida trifásica, conectando a su salida cargas resistivas e inductivas.

Por tal motivo este proyecto será un instrumento de análisis y de comprensión en el tema de los inversores trifásicos y de esta forma el estudiante tendrá una herramienta de apoyo para el aprendizaje la cual irá de la mano con la parte teórica y práctica.

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo general.

Diseñar y construir un módulo didáctico de control de motores de inducción con dispositivo de potencia inteligente para el laboratorio de control eléctrico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga.

1.4.2. Objetivo específico

- Investigar sobre trabajos o prototipos desarrollados relacionados al diseño de módulos con IGBT'S para el control de motores trifásicos en diferentes fuentes bibliográficas, artículos certificados.
- Diseñar el circuito electrónico con los parámetros requeridos para el funcionamiento del módulo de potencia inteligente.
- Desarrollar e implementar un algoritmo para el control de las compuertas gate del IGBT.
- Construir el sistema eléctrico y electrónico para el módulo didáctico con SPM para motores trifásico.
- Diseñar y construir la estructura mecánica para la ubicación del sistema eléctrico y electrónico del módulo.

- Desarrollar las guías para las prácticas dentro del laboratorio de control eléctrico.
- Realizar pruebas de funcionamiento que validen el módulo desarrollado por medio del control propuesto.

2. MARCO TEÓRICO

Este capítulo contiene los conceptos que se requiere para el desarrollo de un inversor trifásico, la técnica y la ingeniería para el diseño, la cual permite generar el conocimiento previo para el desarrollo del proyecto, se muestra métodos de control, dispositivos y equipos utilizados en el proceso de este proyecto.

2.1. Antecedentes de investigación

El trabajo de titulación “Desarrollo de un inversor trifásico con modulación SPWM e interfaz gráfica para el laboratorio de electrónica de potencia”. (CRISTIAN XAVIER; MOYA VELASCO, JONATHAN PAUL, 2018) Previo a la obtención de título de ingenieros electrónicos los autores Cristian Reyes y Jonathan Moya; El desarrollo de este proyecto presenta la construcción de un inversor trifásico con modulación SPWM, utilizando componentes individuales tales como el IGBT, el driver para el control de las compuertas, son tecnologías que ya existen en el mercado. Es controlado mediante PWM desde una tarjeta arduino. Existe una gran diferencia entre el tema desarrollado y el tema que se propone realizar, ya que el módulo IGBT que se ocupara es un bloque sólido, la cual integra el driver y las protecciones, de esta manera optimizando recursos en sus aplicaciones.

El trabajo de titulación “diseño e implementación de un prototipo usando la metodología de ingeniería inversa para la construcción del módulo didáctico inversor trifásico d 1kw”. (SANGUCHO QUISPE & VERGARA ZURITA, 2018) Previo a la obtención de título de ingenieros electrónicos los autores Byron Sangucho y Darwin

Vergara desarrollan el control de un motor AC utilizando una tarjeta electrónica de potencia y un microcontrolador, lo que distingue de este trabajo desarrollado es que se utilizó una tarjeta de control ya fabricada, y se desarrolló el proyecto mediante el método de ingeniería inversa, mientras en este trabajo de investigación se desarrollara el diseño completamente de todo el equipo

El trabajo de investigación “A New Generation of 600V Smart Power Module (SPM©) for Motor Drive Applications” de los autores BUM-SEUNG JIN, SAMUELL SHIN, SUNG-DAE SHIN , GEUN-HYOUNG LEE, HYUN-SOO BAE , TAE-SUNG KWON. Este artículo habla sobre el desarrollo de nuevos productos para el control de motores de baja potencia, el desarrollo de integrados que ayudan a optimizar recursos, ya que cuentan con driver y las protecciones de sobre corriente y temperatura. Muestra las características eléctricas que ofrece, soporta una corriente hasta de 15 amperios, tiene un alto rendimiento térmico, este artículo no indica una aplicación específica. Este documento ayudará al desarrollo del tema propuesto ya que se basará en datos importantes que muestra el artículo.

2.2. Fundamentación teórica

2.2.1. Motores de inducción.

El motor de inducción trifásico es un motor muy conocido y el más utilizado en la industria. Funcionan a una velocidad constante desde sin carga a plena carga, sin embargo, sin embargo, la velocidad depende de la frecuencia y, por lo tanto, el motor no puede adaptarse fácilmente para controlar la velocidad. Es por eso que esencialmente se

conoce como un motor de velocidad constante y su velocidad no puede modificarse con facilidad. Para este componente, se dice que el motor de CC es mucho mejor cuando se trata de variaciones de velocidad. Sin embargo, los motores de inducción de tres fases son fáciles, duraderos, de bajo precio, de fácil mantenimiento y pueden fabricarse con características que se adecuan a la mayoría de los requisitos de la industria, el tipo más famoso es el motor de inducción de CA de tres fases de jaula de ardilla. Es un motor sin preservación, menos ruidoso y eficiente. El estator se alimenta con la ayuda de una fuente de alimentación de CA equilibrada de tres fases. (MOHD NAJIB BIN HUSSIN, 2014)

La velocidad síncrona ***ns*** del motor se calcula mediante la ecuación 1.

$$n_s = \frac{120f}{p} \text{ (rpm)} \quad (1)$$

Donde:

ns = velocidad síncrona

p = número de polos del estator

f = frecuencia síncrona del estator

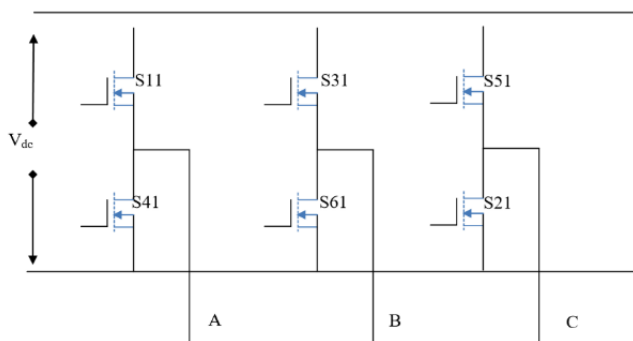
2.2.2. Inversor DC – AC

El convertidor de potencia que se conoce como inversor es un dispositivo eléctrico que puede transformar la corriente continua DC a corriente alterna AC. La AC convertida puede tener cualquier voltaje y frecuencia requeridos, generalmente utilizados en transformadores, circuitos de conmutación y control. También se puede utilizar desde

pequeñas fuentes de alimentación conmutadas hasta grandes aplicaciones de equipos eléctricos de alto voltaje que transportan energía a granel y los inversores de estado sólido no tienen partes móviles. Comúnmente, el inversor se utiliza para suministrar paneles solares o baterías y realiza la función opuesta de un rectificador. El inversor eléctrico es un oscilador electrónico de alta potencia porque generalmente el convertidor de CA a CC se hizo funcionar en reversa y, por lo tanto, se invirtió para convertir CC en CA. (MOHD NAJIB BIN HUSSIN, 2014)

2.2.3. Inversor trifásico

El inversor trifásico común tiene como principio el puente hexagonal. Hay dos tipos de interruptores que se consideraron para esta gama de aplicaciones de potencia, transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) o MOSFET. El puente toma un voltaje de CC y utiliza seis interruptores (MOSFETS) dispuestos en patas de tres fases como se muestra en la Figura 1. El circuito de alimentación consta de seis interruptores semiconductores con conmutación automática S1 a S6. Los pares de interruptores (S1, S4), (S3, S6) y (S5, S2) forman tres terminales del inversor. Los interruptores en el mismo terminal conducen alternativamente. Debe pasar algún tiempo antes de apagar un interruptor y encender otro para asegurarse de que ambos no se conduzcan simultáneamente.

Figura 1.*Puente de inversor*

Nota: diagrama de la arquitectura de los interruptores semiconductores. Tomado de (MOHD NAJIB BIN HUSSIN, 2014).

La técnica de control PWM de inversores de fuente de tensión monofásica se puede utilizar en inversores trifásicos, en los que la fase de tres ondas sinusoidales desplazadas 0° , 120° , 240° con la frecuencia del voltaje de salida deseado se compara con un triángulo portador de muy alta frecuencia, el voltaje de salida del inversor no es suave, pero es una forma de onda discreta, por lo que es más probable que la onda de salida contenga armónicos, que generalmente no son deseables ya que deterioran el rendimiento de la carga.

2.2.4. Técnicas de control de motores de inducción trifásico

Existen diferentes técnicas de control de velocidad del motor de inducción, aplicadas en la era moderna las cuales se clasifican en tres y son las siguientes:

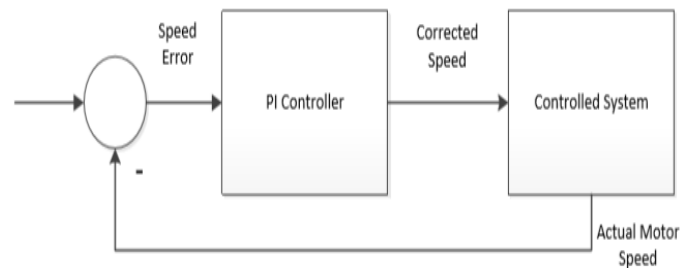
a. Control escalar (V/F)

Sin duda es el esquema más utilizado para el control de velocidad del motor de inducción la cual es variando la frecuencia de suministro. Este esquema proporciona resultados con un amplio rango de velocidad y rendimiento inicial.

En este tipo de control, se utiliza un inversor con control PWM para generar frecuencias variables. Para obtener un par constante para un funcionamiento suave, la relación v / f se mantiene constante. Como resultado, el flujo del motor permanece constante y el par no depende de las frecuencias suministradas. Dado que el flujo se mantiene constante, el torque desarrollado depende solo de la velocidad de deslizamiento. El método de bucle abierto v / f se usa ampliamente en la industria debido a su bajo costo, implementaciones fáciles e inmunidad a las señales de error de retroalimentación.

Figura 2.

Método de control escalar de bucle cerrado



Nota: El esquema muestra la configuración tradicional de un control en lazo cerrado. Tomado de (ijcem, 2016).

b. Control vectorial

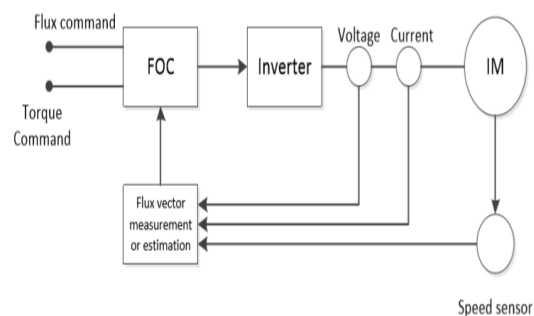
También se denomina como "control orientado al flujo" o "control de par indirecto". Este tipo de sistema de control es de tres tipos, tales como control orientado de flujo de magnetización, control orientado de flujo de estator, control de flujo de rotor. Los motores de inducción se utilizan ampliamente en diferentes aplicaciones comerciales y de procesos sofisticados que requieren altas prestaciones para lo cual, la velocidad del motor necesita mantener una trayectoria de referencia específica independientemente de cualquier modificación de parámetros, carga desequilibrada e incertidumbres del modelo.

c. **Control de corriente orientado al campo directo:** El método de control directo del vector está relacionado con el vector unitario originado a partir del flujo del estator.

d. **Control de corriente indirecto orientado al campo:** aquí el ángulo del rotor se mide indirectamente, como midiendo la velocidad de deslizamiento.

Figura 3.

Control vectorial directo



Nota: el control vectorial tiene múltiples datos entrada como retroalimentación.

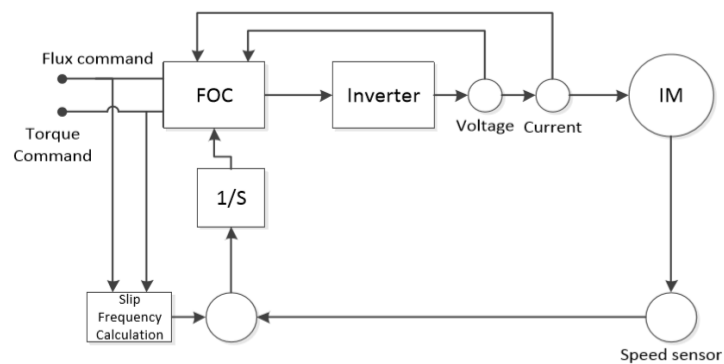
Tomado de (*ijcem, 2016*).

e. Control de torque directo

Este método de control es una nueva técnica para el refinamiento de la velocidad del motor de inducción mediante el uso del convertidor de frecuencia ajustable. Existen diferentes parámetros, como la inductancia mutua, la resistencia del estator, el coeficiente de saturación las cuales son requisitos previos de este método de control. El par motor y el flujo de magnetización son las principales variables de control en esta técnica, por eso se llama método de control de par directo

Figura 4.

Diagrama de método de control de torque directo



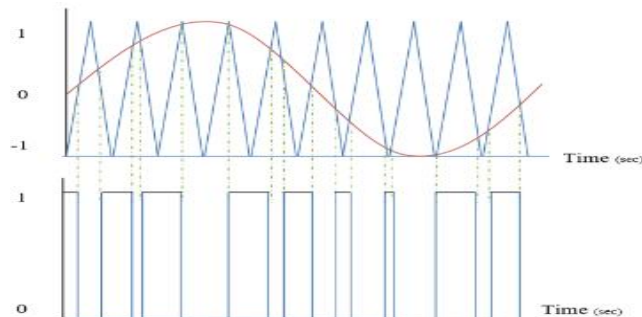
Nota: esta técnica es un método nuevo que se está desarrollando. Tomado de (ijcem, 2016).

2.2.5. Modulación SPWM

El método de modulación de ancho de pulso sinusoidal se aproxima a la generación de forma de onda sinusoidal comparando la referencia a las ondas portadoras o filtrando la forma de onda de salida de pulso variando los anchos de la forma de onda triangular. La forma de onda sinusoidal de referencia de baja frecuencia se compara con las ondas triangulares de alta frecuencia que se denominan ondas portadoras (V_{Δ}). Cuando se cruzan las ondas sinusoidales y portadoras, la fase de conmutación cambia en ese momento. En tres fases, tres ondas de referencia sinusoidales de baja frecuencia (V_a , V_b y V_c) que están desfasadas 120 grados entre sí, se comparan con la forma de onda de voltaje triangular, como resultado obtenemos tres pulsos de conmutación para tres fases diferentes. (Mohiuddin, 2018)

Figura 5.

PWM mediante el método de comparación de triángulo sinodal



Nota: este diagrama se utiliza para representar la adquisición de la señal PWM mediante la comparación de dos señales. Tomado de (MOHD NAJIB BIN HUSSIN, 2014).

2.2.6. Variación de frecuencia

Es un tipo de modulación donde la frecuencia de la señal portadora varia (se modula) en proporción a la señal de la moduladora mientras la amplitud y fase se mantienen constantes.

M_f Se define como la relación entre la frecuencia de la portadora y la moduladora como, también conocido como relación de frecuencia.

$$M_f = \frac{F_p}{F_m} \quad (2)$$

Donde:

F_p : Frecuencia de la señal portadora

F_m : Frecuencia de la señal moduladora

Para la relación de frecuencia es recomendable elegir la relación M_f un número impar para eliminar los armónicos pares y múltiplo de tres. (Inversor trifásico con IGBTs aplicando técnica PWM,, 2000)

2.2.7. Variación de voltaje.

Un Inversor con SPWM es decir que utiliza completamente la referencia sinusoidal de modulación sólo puede llegar un 86.6% de rango voltaje.

$$VLL(OUTPUT) = \frac{\sqrt{3}}{2} * M * VLL(INPUT) \quad \text{Ec. (3)}$$

$$VLL(OUTPUT) = 0.866 * M * VLL(INPUT) \quad \text{Ec. (4)}$$

2.2.8. Sobre modulación.

Cuando la señal de modulación es una senoide de amplitud modulada (A_m), y la amplitud de la portadora triangular es A_p , la relación:

$$M = \frac{A_m}{A_p} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde:

M : se conoce como índice de modulación.

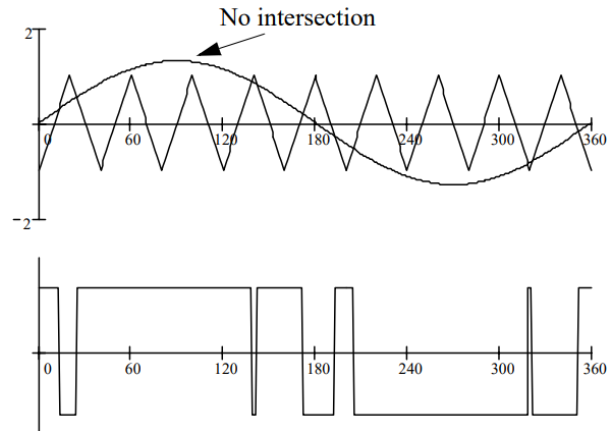
A_m : Amplitud de moduladora

A_p : Amplitud de portadora

Se debe tener en cuenta que controlar el índice de modulación controla la amplitud del voltaje de salida aplicado. El proceso funciona correctamente cuando $M \leq 1$. Para $M \geq 1$, hay períodos de la onda triangular en los que no hay intersección de la portadora y la señal como en la Fig. 6. Sin embargo, una cierta cantidad de esta "sobre modulación" a menudo se permite con el fin de obtener una mayor magnitud de voltaje de CA a pesar de que el contenido espectral del voltaje se vuelve algo más pobre.

Figura 6.

Sobre modulación



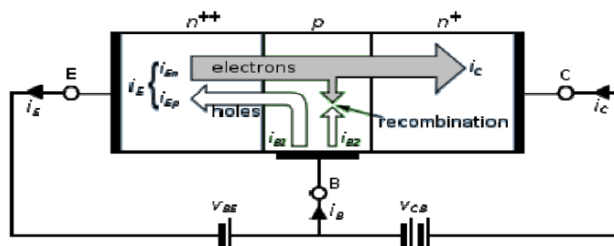
Nota: el índice de sobre modulación permite obtener la magnitud de voltaje A_c a la salida del inversor. Tomado de (ijcem, 2016)

Transistor de unión bipolar de potencia (BJT)

Los BJT vienen en dos tipos, o polaridades, conocidas como PNP y NPN basadas en los tipos de dopaje de las tres regiones terminales principales. Un transistor NPN comprende dos uniones de semiconductores que comparten una región delgada dopada en P, y un transistor PNP comprende dos uniones semiconductoras que comparten una región delgada dopada en N. El flujo de carga en un BJT se debe a la difusión de portadores de carga a través de una unión entre dos regiones de diferentes concentraciones de carga. (Yang, 2018)

Figura 7

Estructura de transistor de unión bipolar de potencia.



Nota: la unión de un transistor puede ser de tipo NPN Y PNP. Tomado de (Yang, 2018).

Las regiones de un BJT se denominan emisor, colector y base. Un transistor discreto tiene tres líneas para la conexión a estas regiones. Por lo general, la región del emisor está muy dopada en comparación con las otras dos capas, mientras que las concentraciones de portadores de carga mayoritarios en las capas base y colector son casi iguales (el dopaje colector suele ser diez veces más ligero que el dopado base). Por diseño, la mayor parte de la corriente del colector BJT se debe al flujo de cargas inyectadas desde un emisor de alta concentración en la base donde son portadores minoritarios que se difunden hacia el colector, por lo que los BJT se clasifican como dispositivos portadores minoritarios.

Transistor bipolar de puerta aislada (IGBT)

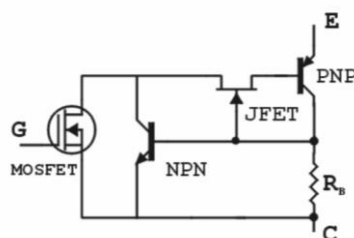
El transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) es un dispositivo portador minoritario con alta impedancia de entrada y gran capacidad de transporte de corriente bipolar. Muchos diseñadores ven el IGBT como un dispositivo con características de entrada MOS

y característica de salida bipolar que es un dispositivo bipolar controlado por voltaje. Para aprovechar las ventajas de Power MOSFET y BJT, se ha introducido el IGBT. Es una integración funcional de dispositivos Power MOSFET y BJT en forma monolítica. Combina los mejores atributos de ambos para lograr características óptimas del dispositivo. (Yang, 2018)

El IGBT es adecuado para muchas aplicaciones en electrónica de potencia, especialmente en modulación de ancho de pulso (PWM) y unidades trifásicas que requieren un alto control de rango dinámico y bajo nivel de ruido. También se puede usar en fuentes de alimentación ininterrumpida (UPS), fuentes de alimentación de modo conmutado (SMPS) y otros circuitos de alimentación que requieren un interruptor de alta tasas de repetición, IGBT mejora el rendimiento dinámico y la eficiencia y reduce el nivel de ruido audible. Es igualmente adecuado en circuitos convertidores de modo resonante. (Sattar, 2001)

Figura 8.

Modelo de circuito equivalente de un IGBT.



Nota: un dispositivo igbt está conformado por un arreglo de transistores. Tomado de (MOHD NAJIB BIN HUSSIN, 2014)

Estructura del IGBT

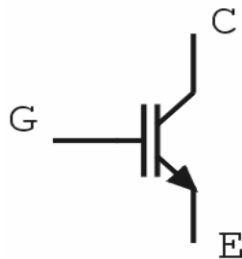
Según la estructura, se puede dibujar un modelo de circuito equivalente simple de un IGBT como se puede observar en la Figura 4. Contiene transistores MOSFET, JFET, PNP y NPN.

- El colector de la PNP está conectado a la base de la NPN y el colector de la NPN está conectado a la base de la PNP a través del JFET.
- Los transistores NPN y PNP representan el tiristor parásito que constituye un circuito de retroalimentación regenerativa.
- La resistencia R_B representa el cortocircuito del emisor base del transistor NPN para garantizar que el tiristor no se enganche, lo que conducirá al enganche IGBT.

En la Figura 5 se muestra un símbolo de circuito para el IGBT. Tiene tres terminales llamadas Colector (C), Puerta (G) y Emisor (E).

Figura 9.

Símbolo del circuito IGBT con BJT.



Nota: el símbolo del IGBT puede cambiar de acuerdo a su disposición ya sea con un Mosfet o un BJT. Tomado de (Sattar, 2001)

2.2.9. Módulos de potencia IGBT

Existe un sinnúmero de módulos de IGBT'S cada una de ellas con mejor tecnología, es decir su tamaño es mejor al tradicional y su potencia es mayor, La introducción de las nuevas familias de módulos de potencia de IGBT, se enfoca a las aplicaciones industriales con capacidad de 600v/ 1200V su encapsulado es robusto. Vienen en configuraciones de interruptor, doble, PIM, cuatro paquetes, seis paquetes, doce paquetes, 3 niveles, amplificador o de un solo interruptor con una clasificación de corriente entre 6 A y 3600 A.

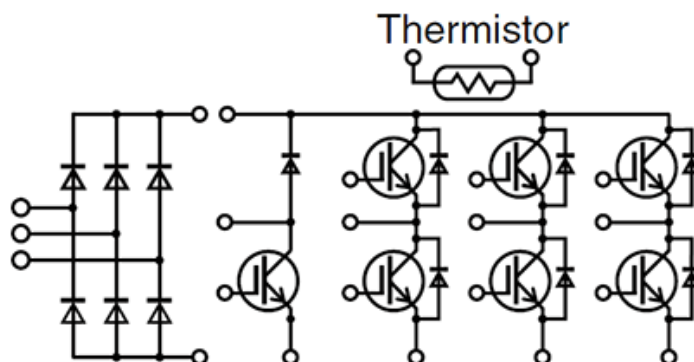
Módulo PIM IGBT.

El PIM (módulo de potencia integrada) es un equipo que incluye un circuito inversor trifásico, un circuito de puente de diodos y un circuito de frenado en un solo módulo, esto permite crear un diseño compacto para el circuito principal. (fujielectric, 2020)

En el mercado hay una línea de productos de dos tipos diferentes para corresponder a la capacidad del motor, que incluye EconoPIM y PIM de pequeña capacidad, las cuales son compacta y liviana.

Figura 10.

Diagrama de un módulo IGBT PIM



Nota: Existen módulos que cuentan con un IGBT adicional para el disparo y así generar el frenado dinámico del motor. Tomado de (fujielectric, 2020)

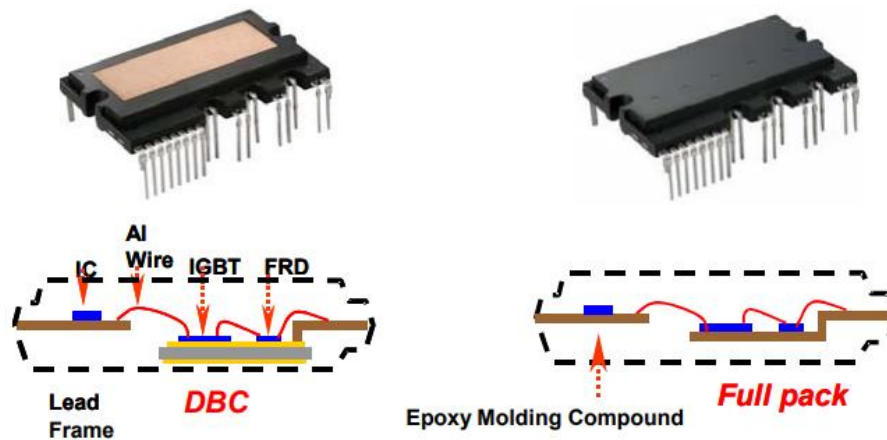
Módulo de potencia inteligente

La mejora del rendimiento del Mini DIP SPM es esencialmente el resultado del avance tecnológico de los dispositivos de alimentación (es decir, IGBT y FRD) en el circuito inversor trifásico. El objetivo fundamental del diseño es reducir el tamaño del troquel y aumentar la densidad de corriente de estos dispositivos de potencia. Los IGBT Mini DIP SPM representan la última tecnología de Fairchild. A través del diseño optimizado de NPT IGBT, mantienen un SOA (Área de operación segura) adecuado para la aplicación de control de motores, al tiempo que reducen drásticamente las pérdidas de conmutación de apagado y conducción en estado. También implementan un rendimiento de conmutación suave sin sacrificar otras características. (Literature Distribution Center for ON Semiconductor, 2008)

Los FRD son diodos ultrarrápidos que tienen una baja caída de voltaje directo junto con características de recuperación suave.

Figura 11.

Dispositivo de potencia inteligente



Nota: este modelo de circuito integrado es el más básico, el fabricante cuenta con dispositivos de más potencia. Tomado de (*Literature Distribution Center for ON Semiconductor, 2008*).

2.2.10. Elementos de control electrónico.

Los elementos de control electrónico son dispositivos que ayuda al procesamiento de señales para el control, accionamiento de máquinas. Un microcontrolador es una computadora en un chip o puede considerarse como una computadora de un solo chip, micro significa un elemento pequeño, y el controlador lo conoce como un elemento para controlar objetos, procesos o eventos, en el mercado existe una variedad de

microcontroladores como Intel's 8051, Motorola's 68xxes, Zilog's Z's, STM y Los PIC de Microchip.

Microcontrolador STM32.

Es un microcontrolador que cubre las necesidades de una amplia gama de aplicaciones como en la industria de accionamiento de motores de inducción, posee características que otras tarjetas de microcontroladores no poseen como una alta velocidad de reloj de hasta 72 MHz, salidas DAC de múltiples canales, entradas múltiples de puertos de comunicación USART, ADC. Además, cuenta con tarjetas de microcontroladores las cuales se puede programar directamente desde una PC.

Figura 12 .

Tarjeta de microcontrolador núcleo STM32



Nota: esta tarjeta cuenta con una salida DAC lo cual no es suficiente para el trabajo a desarrollar. Tomado de (STMicroelectronics, 2020)

Microcontrolador Atmega.

El microcontrolador Atmega de Atmel es rápido, barato, programable en circuito, y el software de desarrollo se puede obtener de forma gratuita, El microcontrolador mejorado Atmega permite modos de direccionamiento fornidos y eficientes para permitir el acceso a la memoria de programa (Flash) y la memoria de datos (SRAM, archivo de registro). (Microchip, 2020)

Figura 13 .

Microcontrolador Atmega328P



Nota: el microcontrolador 328p se puede programar con arduino y otros compiladores.

Tomado de (Microchip, 2020)

2.2.11. Programación de microcontroladores.

Un microcontrolador no sabe qué hacer por sí mismo. Por lo cual es responsabilidad del programador escribir un algoritmo o código para el microcontrolador. Existe una serie de compiladores utilizados para este propósito. Una vez escrito el código,

se compila dicho código para el microcontrolador, existe una variedad de compiladores para el mismo propósito, los compiladores más conocidos y utilizados son:

- STM32IdeCUBE, para microcontroladores de ST
- Keil Uvision para microcontroladores de ST
- Arm Compiler para microcontroladores de Atmel
- Bascom AVR

2.2.12. Pantallas de visualización de datos

La visualización de datos es una serie de medios para presentar visualmente datos complejos y abstractos en una forma más entendible. La visualización de datos está creada para permitir a los usuarios comprender rápidamente el significado detrás de los datos.

Tipos de pantallas LCD

Existe una gran variedad de tipos de pantallas para entre las cuales son las siguientes.

- Pantalla CRT, es la tradicional pantalla de una computadora.
- Pantalla LED
- Pantalla LCD
- Pantalla TouchScreen

2.2.13. Filtros pasivos

Un filtro es un circuito electrónico cuya ganancia varía con la frecuencia. A menudo, un filtro tiene como objetivo permitir que pasen algunas frecuencias mientras bloquea otras, idealmente, un filtro no agregará nuevas frecuencias a la señal de entrada, ni cambiará las frecuencias componentes de esa señal, pero cambiará las amplitudes relativas de los diversos componentes de frecuencia y / o sus relaciones de fase existen cinco tipos básicos de filtro (paso de banda, elimina banda, paso bajo, paso alto y paso completo).

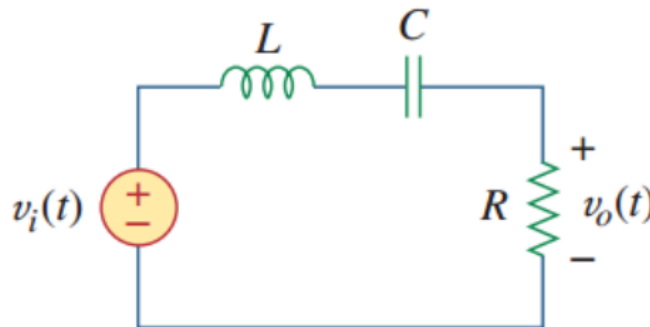
2.2.14. Filtro pasa banda.

Permite frecuencias de un rango particular y elimina otras frecuencias. La ecuación 6 muestra su función de transferencia, y su diagrama

$$H(\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \quad (6)$$

Figura 14.

Esquema filtro pasa banda



Nota: La Figura 14 muestra el circuito básico de primer orden. Tomado de (SÍNTESIS DE FILTROS PASIVOS, 2004)

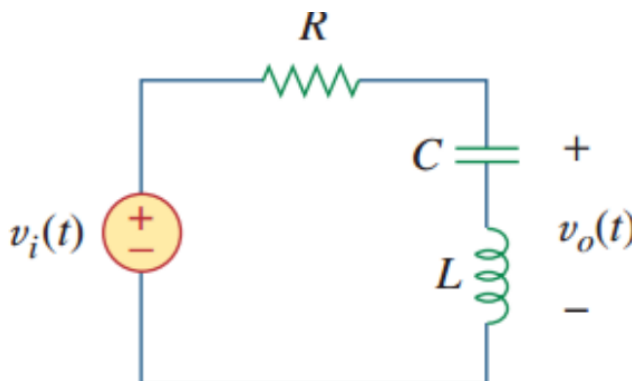
Filtro elimina banda

Filtros de elimina banda se usan para eliminar una frecuencia no deseada de una señal, mientras afectan a todas las demás frecuencias lo menos posible, la ecuación 7 muestra su función de transferencia y su diagrama.

$$H(\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{J(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{R + J(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \quad (7)$$

Figura 15.

Esquema filtro elimina banda



Nota: Circuito básico de primer orden. Tomado de (SÍNTESIS DE FILTROS PASIVOS, 2004)

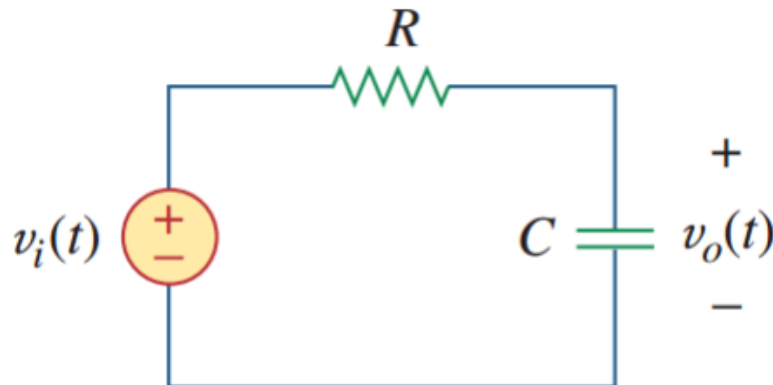
Filtro paso bajo

Permite pasar frecuencias más bajas y aminora frecuencias más altas, este circuito es muy empleado en sistemas analógicos y digitales generalmente en la generación de ondas sinodales. En la ecuación 8 su función de transferencia y en la figura 16 el diagrama esquemático de su circuito

$$H(w) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{R + \frac{1}{jwC}} \quad (8)$$

Figura 16.

Esquema filtro pasa banda



Nota: circuito básico de primer orden. Tomado de (SÍNTESIS DE FILTROS PASIVOS, 2004).

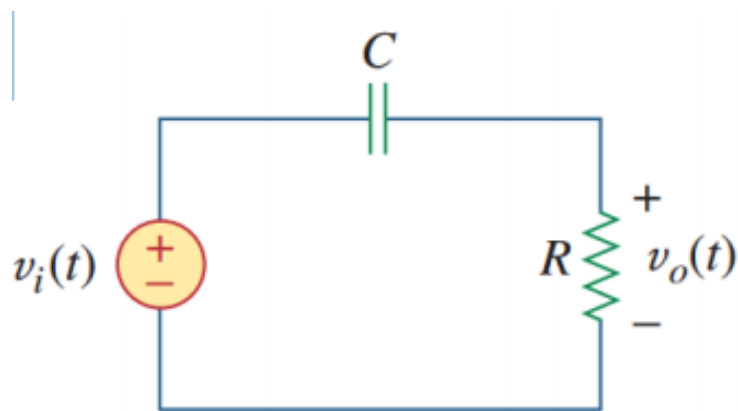
Filtro pasa alto

Atenúa las frecuencias más bajas y permite pasar las frecuencias más altas, las altas y bajas frecuencias dependen mucho del diseño de cada uno del circuito.

$$H(\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{R + j\frac{1}{\omega C}} \quad (9)$$

Figura 17.

Esquema filtro pasa alto

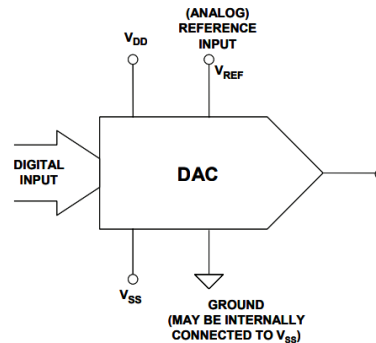


Nota: la figura 17 muestra un circuito básico de primer orden. Tomado de (SÍNTESIS DE FILTROS PASIVOS, 2004)

2.2.15. Convertidores digitales a análogos.

Los primeros DAC fueron diseños a nivel de placa, construidos a partir de componentes discretos, incluidos los tubos de vacío como elementos de conmutación.

Figura 18. Diagrama básico de una salida DAC



Nota: circuito muestra como es el proceso para llevar una señal digital a una señal analógica. Tomado de (Texas instrument, 2008)

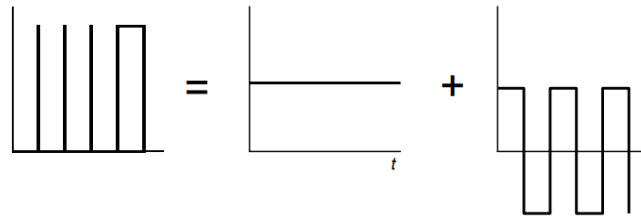
Frecuentemente es necesario convertir la señal analógica en un número digital preciso, y viceversa. Por ejemplo, en aplicaciones donde un microprocesador está controlando un experimento, la señal analógica de un sensor debe convertirse en forma digital para que pueda comunicarse al microprocesador.

2.2.16. Uso de la salida PWM como convertidor digital a analógico

Las salidas de señal PWM en un dispositivo de microcontrolador son ondas cuadradas de ciclo de trabajo variable con amplitud de 3.3 voltios. Estas señales pueden descomponerse en un componente de DC más una nueva onda cuadrada de ciclo de trabajo idéntico, pero con una amplitud promedio de tiempo de cero. La figura 19 representa este concepto gráficamente. (Texas instrument, 2008)

Figura 19.

Descomposición de la señal PWM

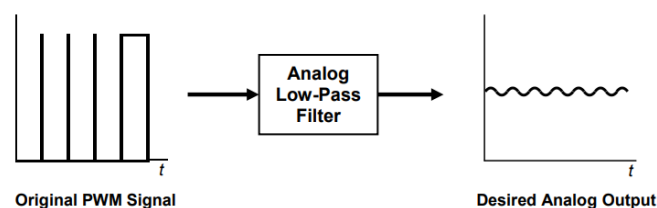


Nota: en la figura se muestra como se descompone una señal PWM. Tomado de (Texas instrument, 2008)

La idea detrás de realizar la salida digital a analógica (D / A) de una señal PWM es filtrar analógicamente el paso bajo de la salida PWM para eliminar la mayoría de los componentes de alta frecuencia, idealmente dejando solo el componente D.C, el ancho de banda del filtro de paso bajo determinará esencialmente el ancho de banda del convertidor digital a analógico. (Texas instrument, 2008)

Figura 20.

Filtro analógico de la señal PWM



Nota: en la figura 20 se muestra como es el proceso para poder sacar una señal analógica a partir de una señal digital. Tomado de (Texas instrument, 2008)

2.2.17. Control

El motor de inducción es dificultoso de mantener una velocidad constante cada vez que se varía la carga. Recientemente, se han desarrollado muchos controladores y se pueden dividir en dos clasificaciones, las cuales son: controlador de potencia pasivo y adaptativo. El modelo para el controlador de potencia pasiva es la histéresis, el relé y el control de modo deslizante; y para el controlador de potencia adaptativo es el controlador PID, difuso

2.3. Fundamentación legal

2.3.1. Normas y reglamentos

Norma IEEE 519-2014

La norma IEEE 519-2014 habla sobre “Práctica recomendada y Requisitos para el Control de armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia” (IEEE Power and Energy Society, 2014). Indica los objetivos para el diseño de sistemas eléctricos que incluyen cargas lineales y no lineales.

Se describen las formas de onda de voltaje y corriente que pueden existir en todo el sistema, y se establecen los objetivos de distorsión de la forma de onda para el diseñador del sistema. (IEEE Power and Energy Society, 2014)

Norma ISO 17025

La norma ISO 17025 habla sobre “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”, fue creada para que la utilicen los laboratorios de ensayo y calibración cuando desarrollan los sistemas de gestión para sus actividades de la calidad, administrativas y técnicas, al ponerse bajo los estándares de esta Norma se reconoce su capacidad técnica y la validez de sus resultados, respondiendo a las exigencias de los organismos o entidades y dotándose de credibilidad ante sus usuarios. (ICSA, 2018)

2.3.2. Sistema de variables

Variable dependiente

Monitorear las señales portadoras y moduladora de variables eléctricas para la variación de voltaje y frecuencia para motores de inducción trifásico.

Variable independiente

Diseño de un prototipo de módulo didáctico de control de motores de inducción trifásico.

2.4. Hipótesis

Con el diseño y la implementación de un módulo de potencia inteligente se podrá monitorear las variables de control eléctrico para variar voltaje y frecuencia de un motor de inducción trifásico.

2.4.1. Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variable independiente.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional		Técnicas
		Dimensiones	Indicadores	
Implementación de modulo para el control de motores de inducción trifásico	La implementación del módulo para motores de inducción trifásico consiste en la generación de señales moduladoras y portadora	• Implementación del módulo para el control de motores trifásicos de baja potencia	100%	• Dimensionamiento
		• Validación de la implementación del modulo	100%	• Encuesta
		• Obtención de señales de voltaje y frecuencia	100%	• Cálculos matemáticos • Tabla de datos

Tabla 2

Operacionalización de variable dependiente.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional		Técnicas
		Dimensiones	Indicadores	
Obtención de las señales de control y portadoras para las variables de voltaje y frecuencia para el control de motores de inducción trifásica	El módulo de control de motores de inducción trifásica permite la variación de voltaje frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> • Señal portadora y moduladora • Amplitud de señales moduladora 	<ul style="list-style-type: none"> • Rango de operación • Voltaje 	<ul style="list-style-type: none"> • dimensionamiento • Programación

3. METODOLOGÍA

El trabajo pretende controlar la velocidad de un motor de inducción trifásico, utilizando un módulo de potencia inteligente IGBT, para generar la señal portadora y moduladora se utiliza un microcontrolador que cuenta con salidas digitales , para la entrada de datos se utiliza dos potenciómetros los cuales mediante las entradas analógicas del Microcontrolador que ingresan datos de amplitud de voltaje y frecuencia, para la visualización de datos se emplea una pantalla LCD, en la cual se visualiza los datos de entrada.

3.1. Modalidad de investigación.

Las modalidades de investigación aplicadas en la presente investigación son: bibliográficas y de campo, como resultado de esto, se presenta la solución para el control de motores de inducción trifásicos, que serán utilizados por los estudiantes que cursan la asignatura de electrónica de potencia.

3.1.1. De campo

A través de este método de investigación, se logra ver la problemática que existe, la investigación se realiza en la ciudad de Latacunga en el laboratorio de control eléctrico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga.

3.1.2. Bibliográfica

La investigación se basa en investigaciones técnicas realizados en el campo del diseño de controladores de potencia para motores de inducción, son respaldados con fuentes confiables de investigación y documentos de fabricantes de los elementos utilizados en el diseño y construcción del módulo didáctico.

3.1.3. Tipos de investigación.

Cuantitativo.

Para la medición y obtención de datos de modulación de las señales, se hace mediante un osciloscopio, para de esta forma poder ver los datos de voltaje y frecuencia a la que trabaja el motor, sobre estos datos se comprueba el diseño e implementación.

Diseño de la investigación.

El proyecto de investigación pretende mostrar las variables de frecuencia, amplitud y sobre modulación para el control de un motor de inducción trifásico de baja potencia observando el comportamiento del motor al generar cambios en las variables mencionadas.

Método de hallazgo: Inductivo. - Este método se basa en el análisis para su implementación, en la cual se adquiere las señales sinusoidales (moduladora) y la triangular (portadora) a través de las salidas DAC del microcontrolador variando

parámetros de voltaje y frecuencia, permite implantar parámetros para el diseño del módulo didáctico para el control de motores de inducción de baja potencia.

Método de contrastación: Experimental. - para el diseño del módulo para el control de motores de inducción es necesario experimentar con las adquisiciones de las señales portadoras y moduladoras al realizar cambios en las variables de voltaje y frecuencia.

Al determinar las variables de amplitud y frecuencia en las señales sinusoidales que proceden desde el microcontrolador se procede a diseñar el módulo didáctico para el control de motores a inducción.

3.1.4. Niveles de investigación

Exploratorio

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga, en el laboratorio de control eléctrico no se cuenta con un módulo didáctico para el control de motor de inducción trifásico con un módulo de potencia inteligente para motores de baja potencia.

Descriptivo

La investigación se basa en el análisis de datos recolectados, características de los problemas que se estudia relacionando a la electrónica de potencia en este caso la visualización de las formas de onda de control al realizar la práctica de control de un motor de inducción trifásico.

3.1.5. Población y muestra.

Para este trabajo de investigación se considerará como población al docente que guía la asignatura de electrónica de potencia y al docente encargado del laboratorio de control eléctrico los cuales cumplen una labor muy importante al transmitir el conocimiento a sus estudiantes.

3.2. Técnicas de recolección de datos.

Para este trabajo de investigación junto al docente de la asignatura de electrónica de potencia, tutor de tesis y encargado del laboratorio de control eléctrico se realiza un análisis de que es lo que hace falta para poder guiar a los estudiantes para un mejor aprendizaje específicamente en el tema de inversores trifásicos por lo cual se plantea las preguntas que se ve en la tabla 3.

Tabla 3

Tabla de recolección de datos

Preguntas	Respuestas
¿Existe un módulo para el control de motores de inducción trifásico en el laboratorio?	No
¿Existe un módulo de control de motores con IGBT'S en el laboratorio?	No
¿Existe un módulo de control de motores de inducción con el método SPWM?	No
¿Con los módulos existentes para el control de motores de inducción se puede observar las ondas moduladoras y portadora?	No
¿Se puede diseñar un módulo de control de motores con dispositivo de potencia inteligente?	Si

3.3. Instrumentos

El instrumento para el registro de la información para realizar el proyecto de investigación se trata de una encuesta la cual ha sido tomada del docente que dicta la asignatura de electrónica de potencia y del docente encargado del laboratorio de control eléctrico

3.3.1. Técnica de comprobación de la hipótesis

Comprobación del módulo didáctico de control de motores de inducción, mediante la conexión del módulo al motor y visualizar las señales portadora y moduladora mediante un osciloscopio, haciendo una comparación técnica con otros equipos de inversores y observar los resultados.

4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se muestra los resultados que se ha obtenido del análisis de las necesidades que se adquirió mediante recolección de datos como se observa en la tabla 3, de ella se toma la mejor decisión para aportar al desarrollo del conocimiento de las estudiantes tanto prácticos y teóricos al beneficio de los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga

4.1. Análisis de los resultados

En el análisis de la necesidad de implementar un módulo para el control de motores de inducción trifásica se puede ver que existen equipos y métodos los cuales pueden ser utilizados en distintas aplicaciones de acuerdo a la potencia del equipo y técnicas de control que se requiera.

El desarrollo del proyecto de investigación se basa en el uso y equipos que cuenta el laboratorio de control eléctrico en el desarrollo de prácticas, por lo se considera un equipo adecuado el módulo de control para bajas potencias ya que los motores con los que cuenta el laboratorio es de un máximo de 0.2 KW de potencia, y el método de control que se aplica es el método de control escalar en bucle abierto. El módulo de control no estará en realimentación para compensar y mantener fijo la relación voltaje y frecuencia ya que es lo que el estudiante pretende analizar

4.2. Motor de inducción trifásico

Enfoques y análisis de módulo de control de motor de inducción trifásico

El módulo de control de motores de inducción trifásica para bajas potencias, controlada por el método escalar cumple con la necesidad que requiere el proyecto de investigación , ya que satisface la necesidad que tiene el estudiante y el laboratorio de control eléctrico, la cual no cuenta con un módulo de control con IGBT'S para el respectivo análisis de control, visualización de ondas portadoras, visualización de onda moduladora y el análisis de variación de voltaje y frecuencia, las características que se toma en cuenta para el desarrollo del proyecto se observa en la tabla 4.

Tabla 4*Parámetros para módulo de control de motor de inducción trifásico*

Parámetros del modulo	Descripción	Selección y características
Diseño y selección de elementos y dispositivos	Para lo cual es necesario tomar en cuenta en donde estará ubicado, el ambiente de trabajo y como se utilizara el modulo, para terminar con éxito el proyecto de investigación es importante responder las preguntas antes mencionadas.	<ul style="list-style-type: none"> • Los factores que se toma en cuenta para la selección de los componentes y dispositivos se deben tomar en cuenta la descripción de ellos en este caso los dispositivos de control y de potencia. • Microcontrolador para implementar el algoritmo para generar las señales sinusoidales • Dispositivo de potencia inteligente para el accionamiento del motor la cual incluye las protecciones y driver para el Gate de las compuertas del IGBT • Dispositivos para el acondicionamiento de las señales analógicas provenientes de la tarjeta de microcontrolador, y señales digitales que ingresan a la compuerta del IGBT • La fuente de alimentación del modulo
Adquisición de datos y visualización	Proceso para el análisis de señales para la variación de voltaje y frecuencia	<ul style="list-style-type: none"> • El equipo para la visualización de las señales es un osciloscopio

5. PROPUESTA

6.1. Tema de la propuesta

Diseño y construcción de un módulo didáctico de control de motores de inducción con dispositivo de potencia inteligente para el laboratorio de control eléctrico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga.

5.2 Datos informativos

Nombre de la empresa: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-Sede Latacunga Laboratorio de Control Eléctrico.

Dirección: Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, Campus Gral. Guillermo Rodríguez, Laboratorio de Control Eléctrico.

Beneficiarios

Estudiantes pertenecientes a las carreras técnicas de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Sede Latacunga que hagan uso de las instalaciones del Laboratorio de Control Eléctrico.

5.3 Objetivos

5.3.1 Objetivo general

Diseñar y construir un módulo didáctico para el control de motores trifásicos de $\frac{1}{4}$ hp a 120 voltios AC para el laboratorio de control eléctrico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga, con dispositivo de módulo de potencia inteligente.

5.3.2 Objetivo específico

- Diseñar el circuito electrónico con los parámetros requeridos para el funcionamiento del circuito integrado del módulo de potencia inteligente
- Desarrollar e implementar un algoritmo para las señales portadoras y moduladora para el control de las compuertas gate del IGBT, en un rango de 30Hz a 100Hz
- Diseñar y construir la estructura mecánica para la ubicación del sistema eléctrico y electrónico del módulo.
- Realizar pruebas de funcionamiento que validen el módulo desarrollado por medio del control propuesto.

5.4 Justificación de la propuesta

Al implementar el modulo didáctico en el laboratorio de control eléctrico, se pretende visualizar las variables de control de un motor de inducción trifásico de baja potencia, como es el cambio de la frecuencia y el voltaje con la cual se pretende analizar el efecto que causa al motor al momento del cambio de frecuencia, la amplitud de voltaje

de la señal moduladora y que pasa cuando el índice de modulación sobrepasa del valor establecido en la literatura.

5.5 Fundamentación de la propuesta

En capítulos siguientes se detallará la implementación del módulo didáctico, consta de: un motor de inducción trifásico de $\frac{1}{4}$ de hp de potencia, ya que el laboratorio tiene fuentes de baja potencia, rectificador de voltaje, tarjeta de control de SPWM desarrollada con un microcontrolador de AVR de la familia ATMEL, acondicionado para generar las señales moduladoras, la tarjeta de control consta de 2 potenciómetros, con ella se regula el cambio de las variables de amplitud y frecuencia.

Las tres señales de cambio de frecuencia y amplitud se visualizarán por medio de un osciloscopio con la cual cuenta el laboratorio, los valores de las variables de frecuencia y amplitud se observarán a través de una pantalla LCD.

5.6 Diseño de la propuesta

5.6.1 Resumen

En este capítulo se realizará el detalle del procedimiento para la implementación del módulo del inversor trifásico, la cual será útil para el estudio de inversores trifásicos.

Selección de la tarjeta de microcontrolador: Para seleccionar la tarjeta de microcontrolador adecuado se toma en cuenta la capacidad de procesar datos a altas

frecuencias a la que será sometida para los fines requeridos y la accesibilidad de adquirir del software de programación.

Puente trifásico de IGBTs: constituye de un puente formado por 6 IGBTs, como salidas se tiene tres líneas las cuales van conectados a la entrada UVW del motor trifásico para de esta manera controlar la velocidad de la misma.

Etapa de rectificación: En esta etapa se tiene como entrada un voltaje de 120-AC, la cual ingresa directamente de la red eléctrica, esta señal es rectificadora a través de un puente de diodos y filtrada a través de un capacitor.

Etapa de filtrado: la señal de voltaje proveniente de la etapa de rectificación es filtrada por medio de un capacitor, de esta forma obteniendo una señal DC a su salida, la cual es utilizada para alimentar al puente trifásico de IGBTs.

Generador de señales: por medio de un microcontrolador se genera las tres señales moduladoras (señal sinusoidal) y una señal portadora (señal triangular) de las cuales a través de un comparador se obtiene las tres señales SPWM.

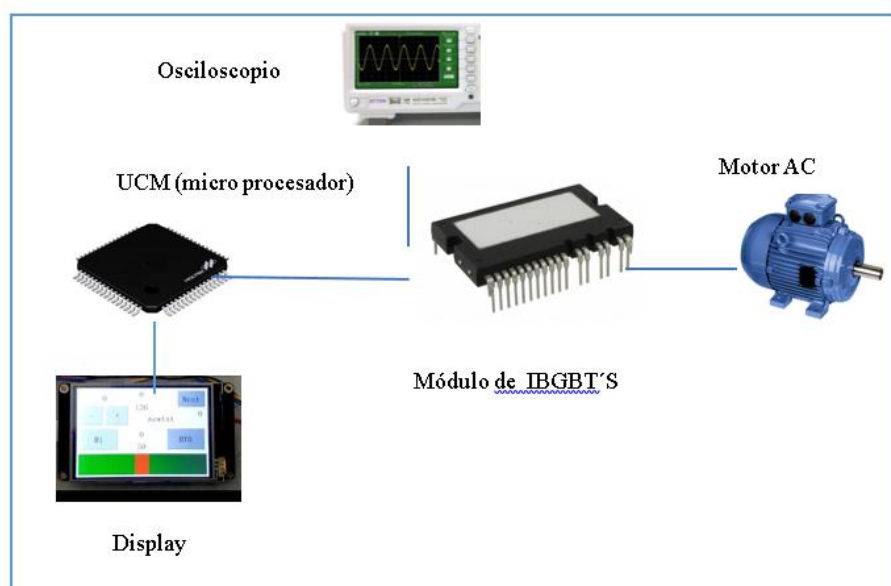
Acondicionamiento electrónico: se diseña el circuito electrónico para la entrada de variables de voltaje y frecuencia, fuentes de voltaje, etapas de amplificación de señales y acoplamiento entre la etapa de control y de potencia.

5.6.2 Arquitectura del proyecto

La figura 21 muestra un esquema del módulo didáctico para el control de motor de inducción trifásico en la cual constan los componentes con la que cuenta el desarrollo del módulo didáctico.

Figura 21 .

Esquema control de motor de inducción trifásico



5.7 Selección de los componentes.

Para la selección de los componentes para el diseño y construcción del módulo didáctico se toma en cuenta las características eléctricas que dispone cada elemento a utilizar como el nivel de voltaje máximo y mínimo con la que trabaja la velocidad de

procesamiento de la unidad del microcontrolador y la capacidad mecánica del motor de inducción trifásico

5.7.1 Selección de microcontrolador.

Para elegir la tarjeta de microcontrolador adecuado, se basa en las características que se requieren para generar las tres señales moduladoras, en este caso tres señales sinusoidales, además que tenga una alta velocidad de procesamiento

Figura 22.

Microcontrolador ATMEGA328P



Justificación

Se tomó en cuenta este microcontrolador ATMEGA328P ya que cuenta con las características requeridas para el proyecto, cuenta con tres salidas PWM de 8 bits que son utilizados para la generación de las tres ondas moduladoras sinusoidales, otra de las características importantes es que trabaja a una velocidad de 20 MHz, importante, ya que su velocidad de procesamiento es relativamente alta para el proyecto que se está realizando.

Tabla 5*Características de los microcontroladores*

MICROCONTROLADOR	Atmega32u4	Atmega328	ST32F3334C6
Voltaje de funcionamiento	5v	1.8-5.5 V	3.3v
I/U digitales	20	23	37
Canales PWM	7	6	12
Entradas ADC	12	10	16
Salidas DAC	-	-	3(12 Bits)
Velocidad de reloj	16MHz	20 MHz	72MHz

5.7.2 Selección de generador de onda triangular

Para elegir el generador de onda triangular adecuado se tomó en cuenta las características principales que se requieren para el proyecto, optando por la utilización de un circuito integrado.

Justificación.

Se seleccionó el circuito integrado TL082, ya que son amplificadores operacionales que permiten la generación de forma de onda triangular con un acondicionamiento sencillo, las formas de onda pueden ser moduladas tanto en amplitud de voltaje como en frecuencia, el rango de frecuencias de este dispositivo se puede variar de 0.01Hz a 1MHz a través de una señal externa en este caso con un potenciómetro. La

señal triangular será de voltaje constante y frecuencia constante ya que esta se caracteriza por ser la señal portadora.

Tabla 6

Características de CI XR-2206

Característica	Rango de operación
Voltaje de trabajo	+/- 5, +/- 13 voltios
Corriente de trabajo	12 mA
Frecuencia	0.1Hz-1MHz

5.7.3 Selección de módulo de potencia de IGBT

Para elegir el módulo de potencia de IGBT, se basa en las características técnicas que se requieren para implementar en el diseño del módulo, como son: el voltaje máximo que trabaja, la corriente máxima que soporta, la frecuencia de conmutación y la tecnología que tiene el dispositivo.

Justificación

Se seleccionó el módulo de potencia FNA51560B2 SPM de la serie 45 del fabricante Fairchild, pues proporciona las características necesarias para el accionamiento y control de motores de baja potencia, es un dispositivo que maneja hasta

600V máximo, cuenta con protección contra sobre corriente además cuenta con los drivers para la activación de los IGBT'S.

Características del módulo FNA51560B2 SPM

- Soporta una corriente hasta de 15 amperios
- Soporta un voltaje máximo de 600 voltios
- Inversor trifásico
- Incluye circuitos integrados para el control de gate y protecciones del IGBT
- Frecuencia de conmutación optimo hasta 5KHz

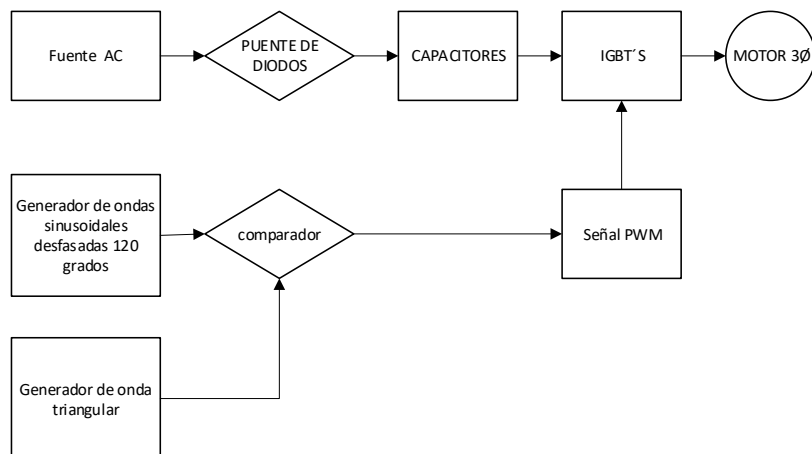
Las características de este dispositivo muestran que para la aplicación de este proyecto de investigación cumple con los requerimientos.

5.8 Metodología para la ejecución de la propuesta

5.8.1 Diagrama los componentes electrónicos y eléctricos

Figura 23 .

Diagrama esquemático de los elementos eléctricos y electrónicos



5.8.2 Programación de la tarjeta de microcontrolador

Programación de la tarjeta de microcontrolador para la adquisición de las ondas sinusoidales

Para la programación del microcontrolador se considera que el método de control será del tipo escalar en ciclo abierto, es decir no tiene retroalimentación, la relación de voltaje y frecuencia (v/f) se manipulara de acuerdo al usuario mediante un potenciómetro tato para la variación de voltaje y frecuencia.

Para la obtención de la señal sinodal se genera una señal PWM con las frecuencias requeridas, posteriormente mediante un filtro pasa bajos, se obtiene una señal sinusoidal pura. Para esto se realiza una tabla de cálculo en valores hexadecimales como se puede observar en la figura 24.

Figura 24

Tabla de onda senoidal en valores hexadecimal

Seno	&H0800%	&H0803%	&H0806%	&H0809%	&H080C%	&H080F%	&H0812%	&H0815%	&H0818%	&H081C%	&H081F%	&H0822%	&H0825%
Jata	&H0864%	&H0867%	&H086A%	&H086D%	&H0871%	&H0874%	&H0877%	&H087A%	&H087D%	&H0880%	&H0883%	&H0886%	&H088A%
Jata	&H08C8%	&H08CB%	&H08CE%	&H08D2%	&H08D5%	&H08D8%	&H08DB%	&H08DE%	&H08E1%	&H08E4%	&H08E7%	&H08EB%	&H08EE%
Jata	&H092C%	&H092F%	&H0932%	&H0935%	&H0938%	&H093C%	&H093F%	&H0942%	&H0945%	&H0948%	&H094B%	&H094E%	&H0951%
Jata	&H099F%	&H09A2%	&H09A5%	&H09A8%	&H09AB%	&H09AE%	&H09B1%	&H09B4%	&H09B7%	&H09BA%	&H09BD%	&H09C0%	&H09C3%
Jata	&H09F1%	&H09F4%	&H09F7%	&H09FA%	&H09FD%	&H0A00%	&H0A03%	&H0A06%	&H0A09%	&H0A0C%	&H0A10%	&H0A13%	&H0A16%
Jata	&H0A52%	&H0A55%	&H0A58%	&H0A5B%	&H0A5E%	&H0A61%	&H0A64%	&H0A67%	&H0A6A%	&H0A6D%	&H0A70%	&H0A73%	&H0A76%
Jata	&H0AB1%	&H0AB4%	&H0AB7%	&H0ABA%	&H0ABD%	&H0AC0%	&H0AC3%	&H0AC6%	&H0AC9%	&H0ACC%	&H0ACF%	&H0AD2%	&H0AD5%
Jata	&H0B0F%	&H0B12%	&H0B15%	&H0B18%	&H0B1B%	&H0B1E%	&H0B21%	&H0B24%	&H0B27%	&H0B2A%	&H0B2D%	&H0B2F%	&H0B32%
Jata	&H0B6B%	&H0B6E%	&H0B71%	&H0B74%	&H0B77%	&H0B7A%	&H0B7D%	&H0B7F%	&H0B82%	&H0B85%	&H0B88%	&H0B8B%	&H0B8D%
Jata	&H0BC5%	&H0BC8%	&H0BCB%	&H0BCD%	&H0BD0%	&H0BD3%	&H0BD5%	&H0BD8%	&H0BDB%	&H0BDE%	&H0BE0%	&H0BE3%	&H0BE6%
Jata	&H0C1C%	&H0C1F%	&H0C22%	&H0C24%	&H0C27%	&H0C2A%	&H0C2C%	&H0C2F%	&H0C32%	&H0C35%	&H0C37%	&H0C3A%	&H0C3D%
Jata	&H0C71%	&H0C74%	&H0C77%	&H0C79%	&H0C7C%	&H0C7E%	&H0C81%	&H0C83%	&H0C86%	&H0C89%	&H0C8B%	&H0C8D%	&H0C90%
Jata	&H0CC3%	&H0CC6%	&H0CC8%	&H0CCB%	&H0CCE%	&H0CD0%	&H0CD3%	&H0CD5%	&H0CD8%	&H0CDA%	&H0CDD%	&H0CDF%	&H0CE2%
Jata	&H0D13%	&H0D15%	&H0D18%	&H0D1A%	&H0D1C%	&H0D1F%	&H0D21%	&H0D24%	&H0D26%	&H0D28%	&H0D2B%	&H0D2D%	&H0D30%
Jata	&H0D5F%	&H0D61%	&H0D63%	&H0D66%	&H0D68%	&H0D6A%	&H0D6D%	&H0D6F%	&H0D71%	&H0D74%	&H0D76%	&H0D78%	&H0D7A%
Jata	&H0DA8%	&H0DAA%	&H0DAC%	&H0DAE%	&H0DB0%	&H0DB3%	&H0DB5%	&H0DB7%	&H0DB9%	&H0DBB%	&H0DBE%	&H0DC0%	&H0DC2%
Jata	&H0DE0%	&H0DE3%	&H0DE5%	&H0DE7%	&H0DE9%	&H0DEF%	&H0DF2%	&H0DF4%	&H0DF6%	&H0DF8%	&H0DE0%	&H0E02%	&H0E04%
Jata	&H0E2F%	&H0E31%	&H0E33%	&H0E36%	&H0E38%	&H0E3A%	&H0E3C%	&H0E3E%	&H0E40%	&H0E42%	&H0E44%	&H0E46%	&H0E48%
Jata	&H0E6C%	&H0E6E%	&H0E70%	&H0E72%	&H0E74%	&H0E76%	&H0E78%	&H0E79%	&H0E7B%	&H0E7D%	&H0E7F%	&H0E81%	&H0E83%
Jata	&H0EA6%	&H0EA8%	&H0EAA%	&H0EAB%	&H0EAD%	&H0EAF%	&H0EB1%	&H0EB2%	&H0EB4%	&H0EB6%	&H0EB7%	&H0EB9%	&H0EBB%
Jata	&H0EDC%	&H0EDF%	&H0EE1%	&H0EE3%	&H0EE5%	&H0EE7%	&H0EE9%	&H0EEB%	&H0EEE%	&H0EF0%	&H0EF2%	&H0EF4%	&H0EF6%
Jata	&H0F0D%	&H0F0F%	&H0F10%	&H0F12%	&H0F13%	&H0F15%	&H0F16%	&H0F18%	&H0F19%	&H0F1C%	&H0F1E%	&H0F1F%	&H0F21%
Jata	&H0F3B%	&H0F3C%	&H0F3D%	&H0F3F%	&H0F40%	&H0F41%	&H0F43%	&H0F44%	&H0F45%	&H0F47%	&H0F48%	&H0F49%	&H0F4A%
Jata	&H0F6F%	&H0F71%	&H0F73%	&H0F75%	&H0F77%	&H0F79%	&H0F7B%	&H0F7C%	&H0F7D%	&H0F7E%	&H0F7F%	&H0F80%	&H0F81%
Jata	&H0F87%	&H0F89%	&H0F8A%	&H0F8B%	&H0F8C%	&H0F8D%	&H0F8E%	&H0F8F%	&H0F90%	&H0F91%	&H0F92%	&H0F93%	&H0F94%
Jata	&H0FA7%	&H0FA8%	&H0FA9%	&H0FAA%	&H0FAB%	&H0FAC%	&H0FAD%	&H0FAE%	&H0FAF%	&H0FB0%	&H0FB1%	&H0FB2%	&H0FB3%
Jata	&H0FC2%	&H0FC3%	&H0FC4%	&H0FC5%	&H0FC6%	&H0FC7%	&H0FC8%	&H0FC9%	&H0FCA%	&H0FCB%	&H0FCC%	&H0FCD%	&H0FCE%
Jata	&H0FD8%	&H0FD9%	&H0FDA%	&H0FDA%	&H0FDB%	&H0FDC%	&H0FDD%	&H0FDE%	&H0FDF%	&H0FE0%	&H0FE1%	&H0FE2%	&H0FE3%
Jata	&H0FE9%	&H0FE9%	&H0FEA%	&H0FEA%	&H0FEB%	&H0FEB%	&H0FEC%	&H0FEC%	&H0FED%	&H0FED%	&H0FEE%	&H0FEE%	&H0FEE%
Jata	&H0FF5%	&H0FF5%	&H0FF6%	&H0FF6%	&H0FF7%	&H0FF7%	&H0FF7%	&H0FF7%	&H0FF8%	&H0FF8%	&H0FF8%	&H0FF8%	&H0FF9%
Jata	&H0FFD%	&H0FFD%	&H0FFD%	&H0FFD%	&H0FFD%	&H0FFD%	&H0FFD%	&H0FFD%	&H0FFE%	&H0FFE%	&H0FFE%	&H0FFE%	&H0FFE%
Jata	&H0FFF%	&H0FFF%	&H0FFF%	&H0FFF%	&H0FFF%	&H0FFF%	&H0FFF%	&H0FFF%	&H0FFF%	&H0FFF%	&H0FFF%	&H0FFF%	&H0FFF%
Jata	&H0FF3%	&H0FF3%	&H0FF3%	&H0FF3%	&H0FF3%	&H0FF3%	&H0FF3%	&H0FF3%	&H0FF3%	&H0FF3%	&H0FF3%	&H0FF3%	&H0FF3%
Jata	&H0FF5%	&H0FF5%	&H0FF5%	&H0FF5%	&H0FF5%	&H0FF5%	&H0FF5%	&H0FF5%	&H0FF5%	&H0FF5%	&H0FF5%	&H0FF5%	&H0FF5%
Jata	&H0FF7%	&H0FF7%	&H0FF7%	&H0FF7%	&H0FF7%	&H0FF7%	&H0FF7%	&H0FF7%	&H0FF7%	&H0FF7%	&H0FF7%	&H0FF7%	&H0FF7%
Jata	&H0FF9%	&H0FF9%	&H0FF9%	&H0FF9%	&H0FF9%	&H0FF9%	&H0FF9%	&H0FF9%	&H0FF9%	&H0FF9%	&H0FF9%	&H0FF9%	&H0FF9%
Jata	&H0FD7%	&H0FD7%	&H0FD6%	&H0FD6%	&H0FD5%	&H0FD4%	&H0FD3%	&H0FD2%	&H0FD1%	&H0FD0%	&H0FD0%	&H0FD0%	
Jata	&H0FC1%	&H0FC1%	&H0FC0%	&H0FC0%	&H0FBE%	&H0FBE%	&H0FBD%	&H0FBC%	&H0FBB%	&H0FBA%	&H0FBA%	&H0FBA%	&H0FBA%

El valor de la tabla se obtiene mediante un software gratis de cálculo que se encuentra en línea (Sine Look Up Table Generator Calculator).

Una vez generada la señal PWM se utiliza un filtro de primer orden, pasa bajo, que consta de una resistencia y de un condensador como se puede ver en la figura 25. Este circuito presenta la ventaja de su simplicidad y bajo costo, este circuito se aplica a las tres salidas de señales, las cuales están desfasadas 120 grados entre ellos.

La frecuencia de corte de este circuito está definida como:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \tag{10}$$

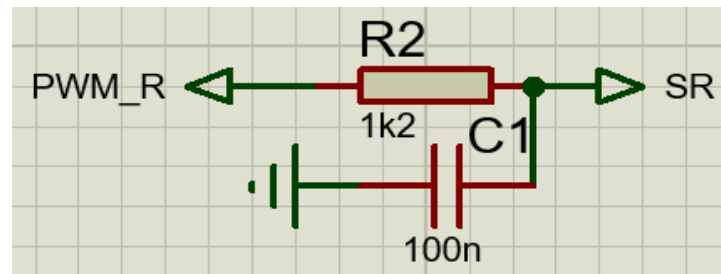
Utilizando la ecuación (10) la frecuencia de corte es:

$$f_c = \frac{1}{2\pi(1000)(100 \times 10^{-9})} = 1.59154 \times 10^5 \text{ Hz} \quad (11)$$

Es decir, esta es la frecuencia límite a la cual responderá el circuito

Figura 25.

Filtro pasa bajo

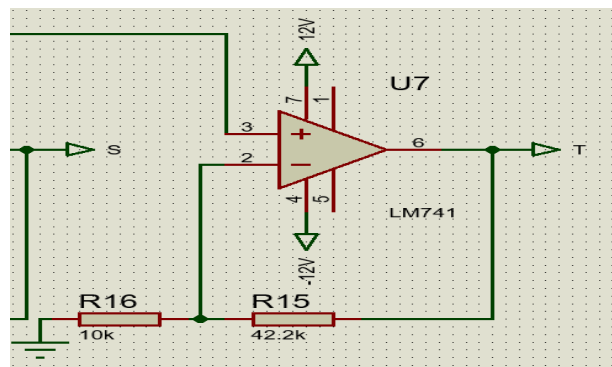


5.8.3 Amplificación de señal senoidal

El voltaje de salida del microcontrolador es de 0 a 5 voltios, por lo cual es necesario amplificar y obtener voltaje AC. Se utiliza un circuito integrado TL084, se acondiciona para una ganancia de 4,22 alimentado con voltajes de +/- 12V.

Figura 26.

Diagrama de amplificación de voltaje



La ganancia se calcula con la ecuación 12.

$$G = \frac{RF}{R1} \quad (12)$$

$$G = \frac{42.2}{10} = 4,22$$

$$V_{out} = V_{in} * (1 + G) \quad (13)$$

$$V_{out} = 1.85 * 5,22 = 9,65 \text{ voltios}$$

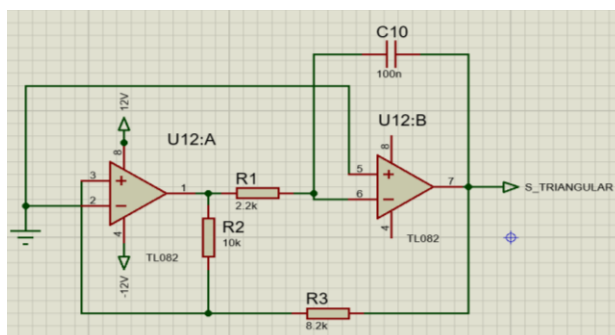
El voltaje pico que tendrá el circuito de acuerdo a la ecuación 13 será de 9,65 voltios pico tanto para la parte negativa y positiva, es decir el voltaje pico a pico que tendrá el circuito es de 19,3 voltios.

5.8.4 Adquisición de onda triangular

Para este proceso se utiliza dos amplificadores operacionales las cuales generan la señal triangular por medio de un circuito de comparación como se observa en la figura 27.

Figura 27.

Diagrama de generador de señal triangular



La frecuencia de conmutación del IGBT dependerá de la frecuencia de salida de la señal triangular, por lo cual se utiliza la ecuación 14, para obtener la frecuencia de salida.

$$F = \frac{R2}{4xCxR1xR3} \quad (14)$$

$$R1 = 2.2K$$

$$R2 = 10K$$

$$R3 = 8.2K$$

$$C = 100nF$$

$$F = \frac{10K}{4x100x10^{-9}x2.2Kx8.2K} = 1385.8 \text{ Hz}$$

Tabla 7
Rango de operación de la señal triangular

Característica	Rango de operación
Voltaje de pico-pico	17,6 Vpp
Frecuencia	1.38Khz

Diseño de control de SPWM

En esta etapa se genera las señales SPWM a través de la comparación de la señal portadora (señal triangular) y las señales moduladoras (señales sinusoidales) las cuales son señales que se puede variar tanto la amplitud de voltaje y la frecuencia, las variaciones con las que cuenta el modulo se observa en la tabla.

Tabla 8

Datos de variación de voltaje y frecuencia

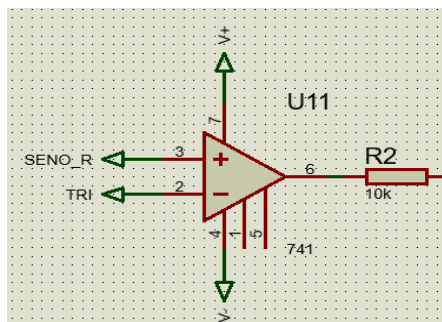
Variables	Señal senosoidal	Señal triangular
Voltaje	30-90 Hz	1.38 kHz
frecuencia	0-220 Vpp	220 Vpp

5.8.5 Comparación de señales

Para obtener las señales de control se debe hacer una comparación entre la señal portadora y la señal moduladora para lo cual se utiliza un circuito integrado (CI 741), este circuito trabaja en modo que cada vez que la señal moduladora se cruce en el mismo tiempo con la señal portadora, envía una señal en alto, caso contrario se mantendrá en bajo, este circuito se adapta para cada una de las fases es decir para R,S,T. en la figura 28 se muestra el circuito y el modo de operación.

Figura 28.

Diagrama de comparación de señales

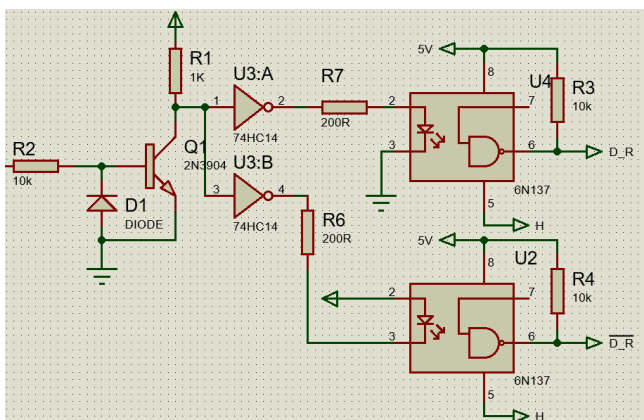


5.8.6 Obtención de SPWM

Al realizar la comparación de la señal portadora y moduladora se obtiene valores positivos y negativos, a la salida se obtiene una señal PWM positivos y negativos, como los IGBT'S se dispara solo con voltajes positivos es necesario eliminar la parte negativa, así, se realiza con un circuito que se observa en la figura 29, para la entrada al módulo de potencia se utiliza el opto acoplador 6N137, que permite aislar la parte de control y de potencia

Figura 29.

Diagrama de circuito de control y potencia de la señal SPWM



5.8.7 Modulo de IGBT SPM (SMART POWER MODULE)

Para la etapa de potencia se utiliza el módulo de IGBT que tiene encapsulados 6 IGBT'S en un solo circuito integrado de la serie FNA41560B2 fabricado por FAIRCHILD de ON SEMICONDUCTOR.

Tabla 9

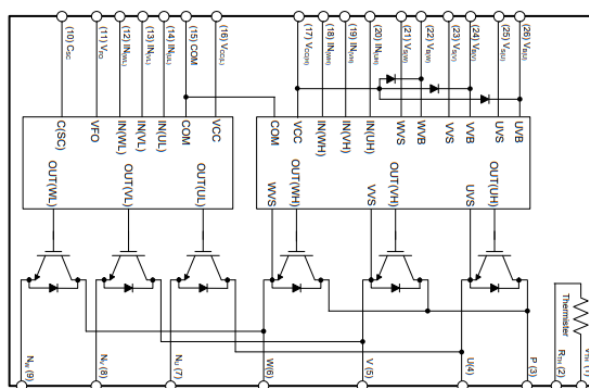
Datos técnicos de módulo IGBT

Dispositivo	IGBT	Motor	Aplicación
FNA	600V-15A	0.7KW	Motores de baja potencia, aire acondicionado, lavadoras

El módulo de potencia está compuesto por dos bloques principales la cuales son driver1 y driver2, están para el manejo respectivos de tres IGBT'S estas cuentan con protecciones de sobre voltaje, sobre corriente y contra la elevada temperatura

Figura 30 .

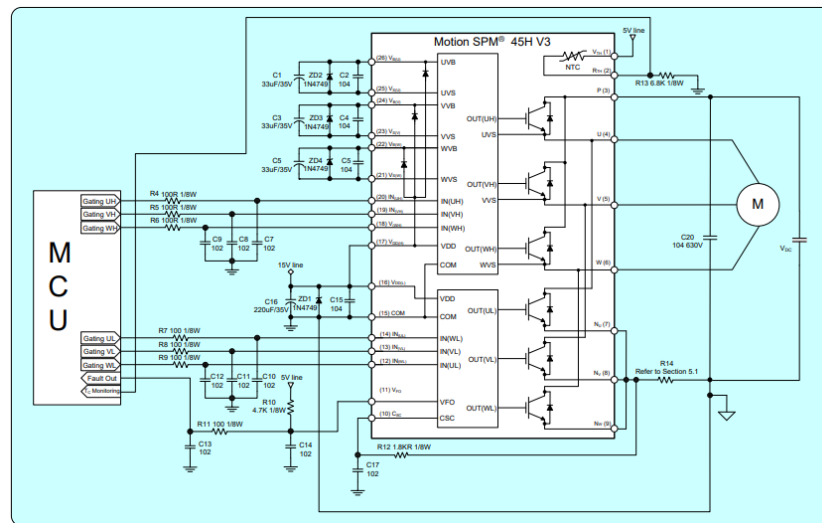
Diagrama interno del módulo IGBT



Para el acondicionamiento de la etapa de potencia se utilizó el catalogo que nos recomienda el fabricante, con cada uno de los elementos y valores ya calculados anteriormente, se utilizan fuentes de 5V, 15V aisladas de la etapa de control, la alimentación para el motor es de 120 V.

Figura 31.

Diagrama para el diseño de PCB de circuito de potencia



5.8.8 Fuentes de alimentación

Las fuentes de que se necesitan son para la etapa de control y etapa de potencia, para las respectivas etapas se detallan en la tabla 10 y tabla 11.

Tabla 10

Requerimiento para fuentes de alimentación.

Dispositivos	Voltaje	Corriente
Generador de ondas	+/- 5V	500mA
Comparadores	+/- 12V	1A

La fuente para la etapa de control y alimentación de driver para la etapa de potencia está compuesta por un transformador reductor con relación de 10:1 de 3 amperios, posteriormente es rectificado por un puente de Diodos y filtrado por capacitores teniendo una salida de 12 voltios en DC, para obtener voltajes positivos y negativos especificado en la tabla 10 se utilizan reguladores de voltajes de acuerdo a la necesidad a cubrir.

Figura 32.

Diagrama de fuentes de alimentación para circuito de control

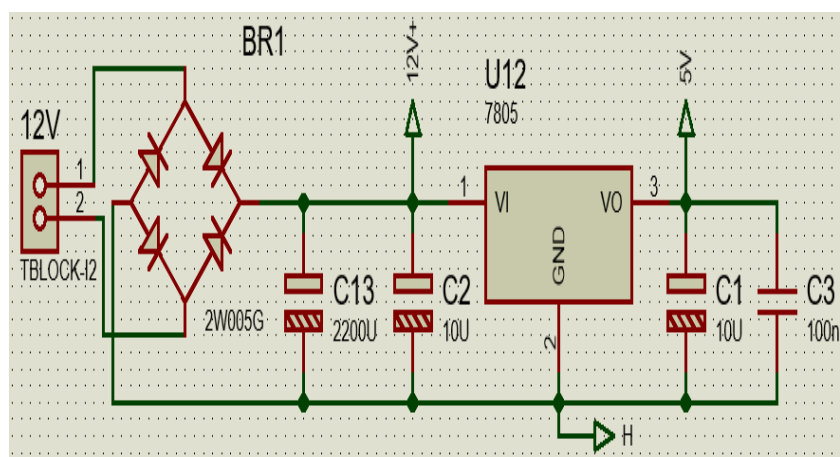


Tabla 11

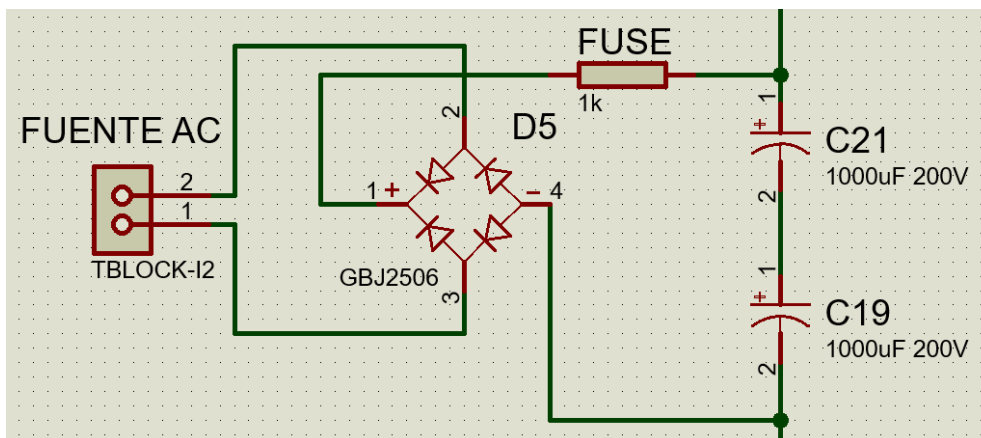
Requerimiento para fuente de etapa de potencia

Dispositivos	Voltaje	Corriente
Alimentación driver	5V, 15V	1 A
Fuente para motor	220v	15 A

La fuente AC para la etapa de potencia se toma directo de la red con una entrada de 120 voltios, es rectificadora con un puente de diodos con una capacidad de 600V y 25 amperios, se implementó un fusible para casos de cortocircuito, y es filtrado con dos capacitores en serie de 1000uF y 200V, el capacitor se implementó en serie para aumentar el nivel de voltaje y cumplir con los requerimientos de la tabla 11

Figura 33.

Diagrama de fuente de voltaje para alimentación de motor



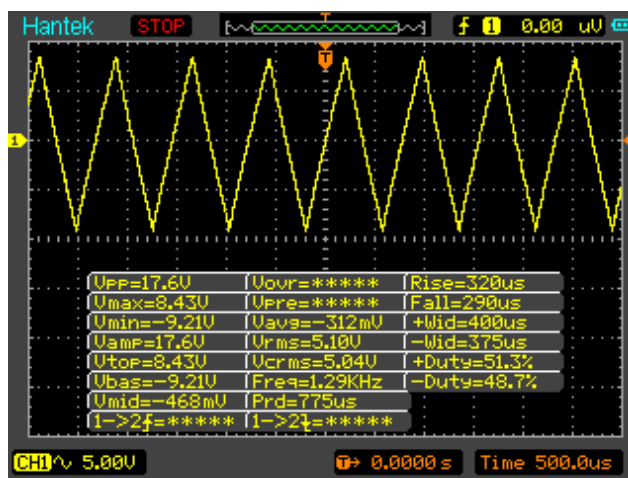
5.9 Pruebas del módulo didáctico.

5.9.1 Señal de control portadora.

La señal triangular (señal portadora) tiene una frecuencia fija de 1,3Khz y un voltaje pico-pico fijo de 17.6, cumpliendo con los parámetros requeridos de la tabla 7.

Figura 34.

Señal portadora



5.9.2 Señal de control moduladora.

La señal moduladora tiene un voltaje pico-pico de 19.3 voltios tal como se calculó en la ecuación (13), la amplitud y la frecuencia de esta señal es variable, la frecuencia se puede variar desde 30Hz hasta 100 Hz, y el voltaje de cero hasta su voltaje máximo de 19,3 voltios pico-pico. Las señales moduladoras están desfasadas 120 grados de entre sí.

Figura 35.

Señal moduladora

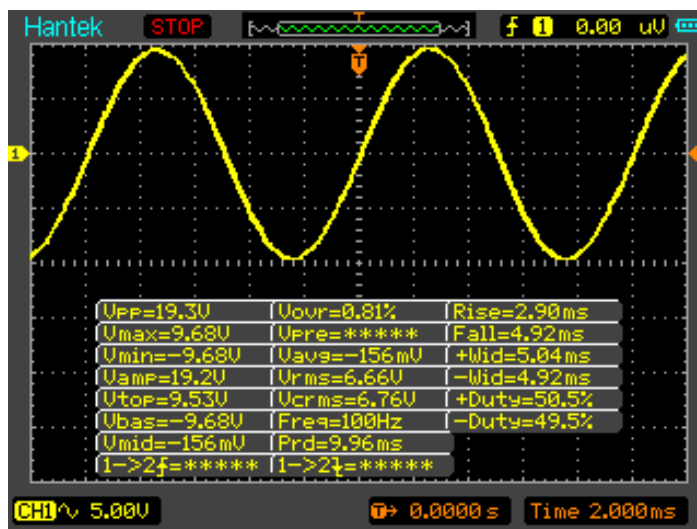


Figura 36.

Señal moduladora desfasada 120 grados

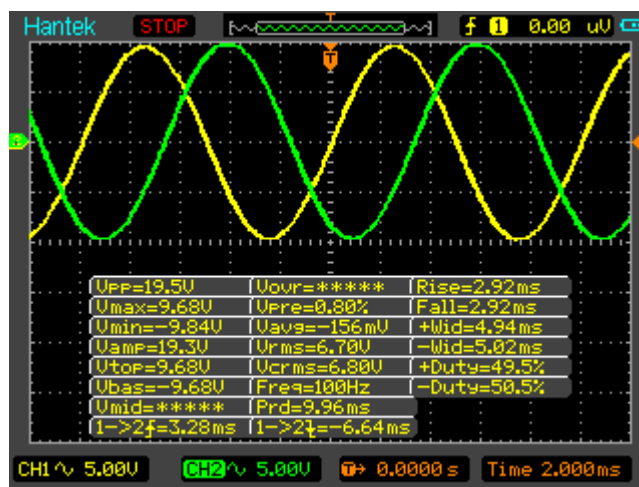
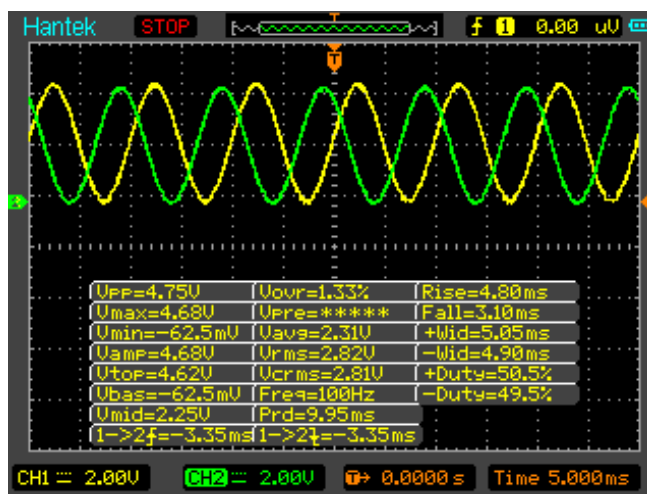


Figura 37.

Señal moduladora desfasada 240 grados



5.9.3 Comparación de señal portadora y moduladora.

Mediante un amplificador operacional se compara la señal portadora y la señal moduladora, de esta comparación se logra obtener las señales para los disparos del Gate del IGBT, esta operación se hace con cada una de las fases de la señal moduladora

Figura 38.

Comparación de la señal portadora y señal moduladora

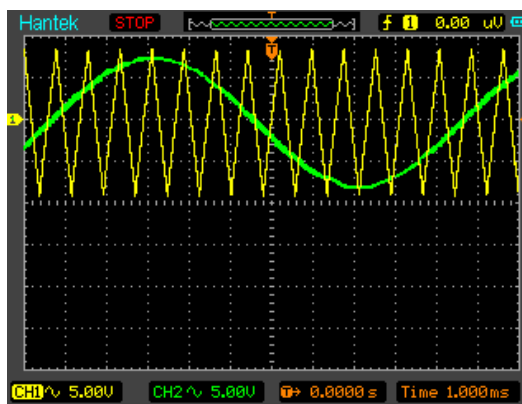
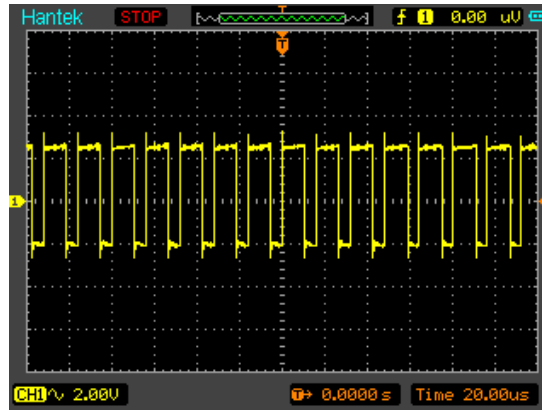


Figura 39.

Generación de PWM



5.9.4 SPWM o señales de disparo

Al obtener la PWM se acondiciona el circuito como en la figura 29 y se obtiene las señales para el disparo positivo y negativo del IGBT, esta operación se le hace a cada una de las fases.

Figura 40.

Señal de disparo +U y -U

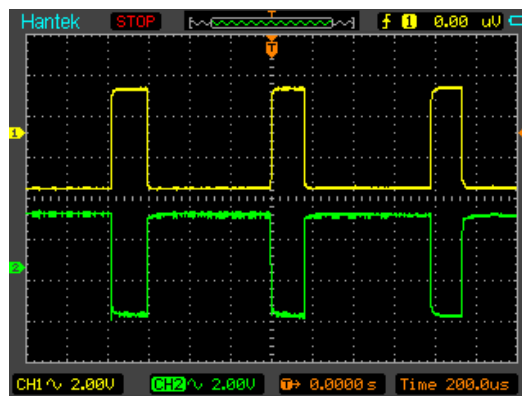
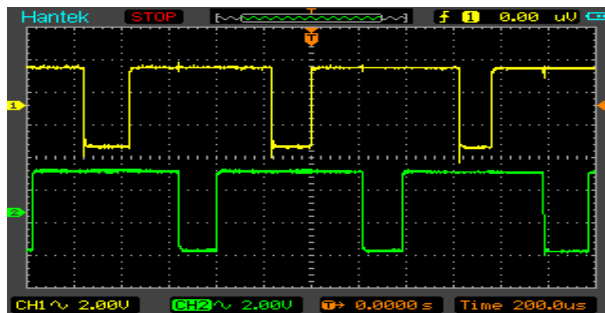


Figura 41.
Señales de disparo +U y +V



5.9.5 Variación de frecuencia, amplitud e interfaz de control

Los datos de voltaje y frecuencia son ingresados por medio de un potenciómetro según corresponda, estos valores se visualizan en la pantalla de LCD, siendo el valor mínimo de frecuencia 30Hz y la máxima de 100Hz como se visualiza en la figura 42, el voltaje se visualiza en valores de porcentaje siendo el valor mínimo de 0% y el valor máximo del 100%.

Figura 42.

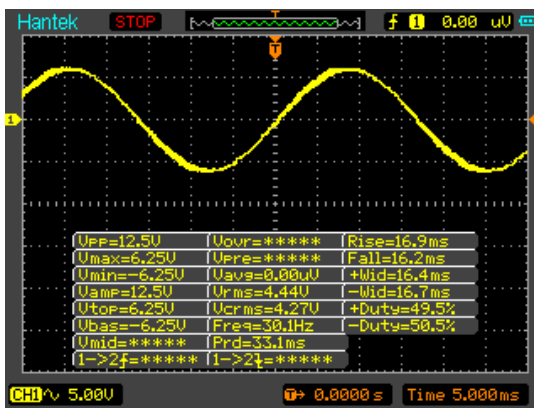
Pantalla LCD



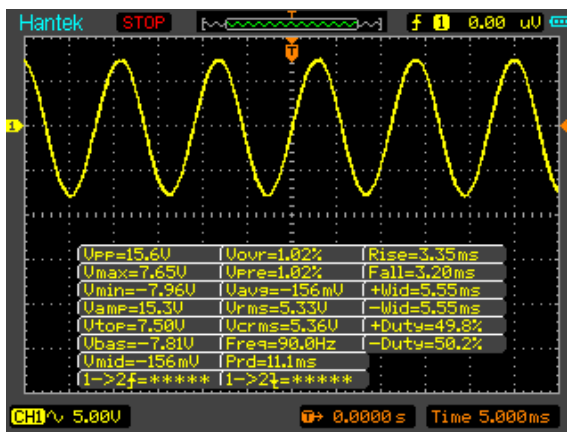
En la figura 42 se observa la modulación de la señal a una frecuencia de 30 Hz y un voltaje al 63% de la fuente.

Figura 43.

Frecuencia de 30 Hz y voltaje al 63 %

**Figura 44.**

Frecuencia de 90 Hz y voltaje al 78 %



5.9.6 Señal de salida del inversor

Las formas de onda a la salida del inversor son casi cuadradas en la parte positiva y en la parte negativa, de esta manera formando una señal similar a una sinusoidal.

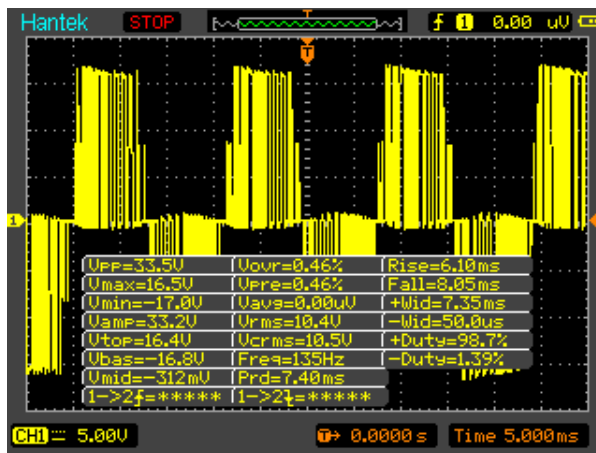
la salida de voltaje del inversor disminuyo en aproximadamente 2% , como la punta del osciloscopio esta en valor X10 el valor obtenido en el osciloscopio se multiplica por 10 y se divide para dos y se obtiene el resultado.

$$V_{input} = 120 * \sqrt{2} = 169.7 \text{ voltios}$$

$$V_{out} = 33.5 * \frac{10}{2} = 167.5$$

Figura 45.

Salida de voltaje

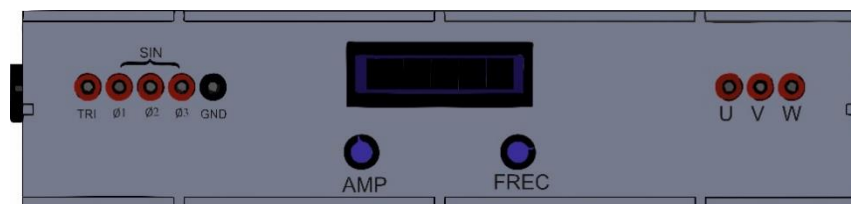


5.9.7 Módulo didáctico

Como se observa en la figura 45. El modulo cuenta con dos potenciómetros, una pantalla LCD, y plug´s banana para la conexión del osciloscopio y ver las señales

Figura 46.

Módulo control de motores de inducción trifásica de baja potencia



CONCLUSIONES

- Se logró el diseño del inversor trifásico para motores de baja potencia en lazo abierto, con un dispositivo de potencia inteligente, con capacidad de $\frac{1}{4}$ de hp de potencia y 120 voltios.
- Se diseñó un módulo didáctico de control de frecuencia con un rango de 30Hz hasta 100Hz y una amplitud de 0% a 100%.
- Se aplicó el módulo de potencia inteligente (Smart Power module), se demuestra que con este dispositivo se puede controlar simplemente con un microcontrolador y de esta manera disminuyendo la dimensión de la placa del circuito y el diseño electrónico.
- El equipo tiene las siguientes condiciones para funcionar; alimentación de la tarjeta de control de disparos con 120 VOLTIOS AC, alimentación de la etapa de potencia para el motor con una fuente de 120 voltios AC y un motor de inducción trifásico menor a $\frac{1}{4}$ Hp.
- Las variables de amplitud y frecuencia se pueden cambiar por medio de un potenciómetro según corresponda y estos datos se pueden ver cuantitativamente por medio de una pantalla LCD.
- Las señales de ondas se pueden visualizar por medio de un osciloscopio, para el análisis respectivo por parte de los estudiantes.
- Con el módulo de IGBT'S utilizado en este trabajo se desarrolló un algoritmo de disparos de IGBT'S directamente desde un microcontrolador, ya que el gate de estos módulos funcionan con 5 voltios, de esta manera se optimiza el tamaño del circuito y costos del equipo a desarrollar.

RECOMENDACIONES

- Para futuras trabajos de investigación se recomienda hacer el diseño del módulo de control de motor en lazo cerrado para una compensación óptima de la relación voltaje frecuencia (V/F), por lo cual se dejó dos entradas analógicas en el diseño de la placa de circuito de control, en esta se puede agregar la entrada de un sensor de corriente o un encoder para su respectiva retroalimentación y adaptarla para un sistema en lazo cerrado.
- Para futuras trabajos de investigación de control de motores se recomienda utilizar y hacer pruebas con módulos de IGBT'S de mayor potencia, pero de la misma serie que se utilizó en este trabajo de investigación ya que estos dispositivos son circuitos integrados de alta potencia con un tamaño reducido a los módulos tradicionales.
- Para los siguientes trabajos de investigación no es necesario hacer el diseño de las etapas de generación y amplificación de señales, se puede generar un algoritmo de disparos, directamente desde un microcontrolador ya que el gate del módulo de IGBT trabaja con 5 voltios de esta manera reduciendo el tamaño de la placa y el costo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CRISTIAN XAVIER; MOYA VELASCO, JONATHAN PAUL. (13 de Enero de 2018).

DESARROLLO DE UN INVERSOR TRIFÁSICO CON MODULACIÓN.

Recuperado el 30 de Enero de 2020, de

<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15079>

Filtros pasivos. (01 de octubre de 2004). Recuperado el 06 de Junio de 2020, de

[https://www.iiitd.edu.in/~mshashmi/CTD_2016/Lecture_Slides/Lect_17_1_2016.p](https://www.iiitd.edu.in/~mshashmi/CTD_2016/Lecture_Slides/Lect_17_1_2016.pdf)

df

fujielectric. (23 de Mayo de 2020). *IGBT Modulo PIM.* Recuperado el 10 de Julio de 2020,

de [fujielectric](https://www.fujielectric.com) Global:

<https://www.fujielectric.com/products/semiconductor/model/igbt/pim.html>

ICSA. (13 de Febrero de 2018). *Normas ISO 17025.* Recuperado el 15 de Abril de 2020,

de Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y

calibración: [https://www.icsa.es/laboratorios-analiticos/consultoria-de-](https://www.icsa.es/laboratorios-analiticos/consultoria-de-laboratorios/norma-iso-17025)

[laboratorios/norma-iso-17025](https://www.icsa.es/laboratorios-analiticos/consultoria-de-laboratorios/norma-iso-17025)

IEEE Power and Energy Society. (23 de Agosto de 2014). *Práctica recomendada y*

Requisitos para el Control de armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia

Práctica recomendada y Requisitos para el Control de armónicos en Sistemas

Eléctricos de Potencia. Recuperado el 03 de Junio de 2020, de IEEE Power and

Energy Society:

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589263/mod_resource/content/1/IEE%20Std%20519-2014.pdf

ijcem. (05 de Agosto de 2016). *A Review of Speed Control Methods of Induction Motor*. Recuperado el 25 de Marzo de 2020, de International Journal Of Core Engineering & Management (IJCEM): <http://ijcem.in/wp-content/uploads/2016/09/A-Review-on-Induction-Motor-Speed-Control-Methods.pdf>

Inversor trifásico con IGBTs aplicando técnica PWM. (6 de Enero de 2000). Recuperado el 03 de Abril de 2020, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9242/3/T1571.pdf>

Microchip. (13 de Febrero de 2020). *ATmega328P*, 2020. Recuperado el 2019 de Marzo de 2020, de Microchip: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328p>

Mohiuddin, M. (12 de Diciembre de 2018). Analysis of Sine Pulse width Modulation (SPWM) and Third Harmonic. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 05(7), 12. Recuperado el 01 de Agosto de 2020, de <https://www.irjet.net/archives/V5/i12/IRJET-V5I12246.pdf>

SANGUCHO QUISPE, B. D., & VERGARA ZURITA, D. A. (18 de Febrero de 2018). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO USANDO LA METODOLOGÍA DE INGENIERÍA INVERSA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DIDÁCTICO INVERSOR TRIFÁSICO D 1KW*. Recuperado el 01 de

Agosto de 2020, de Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15230>

Sattar, A. (09 de Diciembre de 2001). *Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Basics*. Recuperado el 02 de Abril de 2020, de https://www.ixys.com/Documents/AppNotes/IXYS_IGBT_Basic_I.pdf

Smart Power Module Motion SPM® in Mini DIP (SPM3 V4). (09 de Diciembre de 2008). Recuperado el 22 de Marzo de 2020, de <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AN-9044.pdf.pdf>

STMicroelectronics. (08 de Enero de 2020). *STM32 NUCLEO*. Recuperado el 22 de Julio de 2020, de https://www.st.com/content/st_com/en/products/evaluation-tools/product-evaluation-tools/mcu-mpu-eval-tools/stm32-mcu-mpu-eval-tools/stm32-nucleo-boards/nucleo-l4p5zg.html?icmp=tt14587_gl_bn_mar2020

Texas instrument. (16 de Septiembre de 2008). *Salida PWM como convertidor digital a analógico*. Recuperado el 20 de Mayo de 2020, de reporte de aplicaciones: https://www.ti.com/lit/an/spra88a/spra88a.pdf?ts=1595514535021&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

THREE PHASE INVERTER FOR INDUCTION MOTOR BY USING PIREPETITIVE CONTROLLER WITH ARDUINO. (17 de Febrero de 2014). Recuperado el 19 de Febrero de 2020, de http://eprints.uthm.edu.my/id/eprint/6652/1/MOHD_NAJIB_HUSSIN.pdf

Yang, Z. (13 de Octubre de 2018). *Power Bipolar Junction Transistors (BJTs)*.

Recuperado el 06 de Junio de 2020, de Power Bipolar Junction Transistor (BJT)

Background:

<https://www.ece.uic.edu/~zyang/Teaching/20172018Spring/Downloads/ch07.pdf>

ANEXOS