



Implementación de un inversor trifásico mediante IGBTs para prácticas de electrónica de potencia.

Medina Guanotasig, Félix Rubén

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Tecnología en Electrónica mención Instrumentación & Aviónica

Monografía, previo a la obtención del título de Tecnólogo en Electrónica mención

Instrumentación y Aviónica

Ing. Calvopiña Osorio, Jenny Paola

Latacunga, 03 de Febrero del 2021



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE TECNOLOGÍA EN ELECTRÓNICA MENCIÓN
INSTRUMENTACIÓN & AVIÓNICA**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Implementación de un inversor trifásico mediante IGBTs para prácticas de electrónica de potencia**” realizado por la señor **Medina Guanotasig, Félix Rubén**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 03 de Febrero del 2021



Firmado electrónicamente por:

**JENNY PAOLA
CALVOPINA
OSORIO**

Ing. Calvopiña Osorio, Jenny Paola

C.C.: 0503390239

Document Information

Analyzed document	MEDINA_FELIX_TEIP_1072.pdf (D95748790)
Submitted	2/16/2021 11:54:00 PM
Submitted by	
Submitter email	fmedina@espe.edu.ec
Similarity	6%
Analysis address	jpcalvopina1.espe@analysis.orkund.com

Sources included in the report

W	URL: https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/828/Jos%C3%A9%20Carlos%20Gar ... Fetched: 7/10/2020 9:12:37 AM	 3
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / JOSÉ DAVID SANTILLÁN MÁRQUEZ.docx Document JOSÉ DAVID SANTILLÁN MÁRQUEZ.docx (D78209152) Submitted by: jjsantillan@espe.edu.ec Receiver: jpcalvopina1.espe@analysis.orkund.com	 17
W	URL: https://www.ingmecafenix.com/electronica/fuente-de-alimentacion/ Fetched: 2/16/2021 11:54:00 PM	 1
W	URL: https://isotest.net/comprar/fuentes-de-alimentacion/ Fetched: 2/16/2021 11:54:00 PM	 1
W	URL: https://www.academia.edu/28030774/MODULACION_PWM_APLICADA_A_INVERSORES_TRIFASICA Fetched: 2/16/2021 11:54:00 PM	 1
W	URL: https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/16488/2019juansilva.pdf?sequ ... Fetched: 2/16/2021 11:54:00 PM	 1
W	URL: https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20601 Fetched: 2/16/2021 11:54:00 PM	 1



Firmado electrónicamente por:
JENNY PAOLA
CALVOPINA
OSORIO

Ing. Jenny Paola Calvopiña Osorio
C.C.: 0503390239



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE TECNOLOGÍA EN ELECTRÓNICA MENCIÓN
INSTRUMENTACIÓN & AVIÓNICA**

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Medina Guanotasig, Félix Rubén**, con cédula de ciudadanía **N° 0504106956**, declaro que este trabajo de titulación **“Implementación de un inversor trifásico mediante IGBTs para prácticas de electrónica de potencia”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 03 de Febrero del 2021

Medina Guanotasig, Félix Rubén

C.C.: 0504106956



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE TECNOLOGÍA EN ELECTRÓNICA MENCIÓN
INSTRUMENTACIÓN & AVIÓNICA**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Medina Guanotasig, Félix Rubén**, con cédula de ciudadanía N° **0504106956**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el presente trabajo de titulación **“Implementación de un inversor trifásico mediante IGBTs para prácticas de electrónica de potencia”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 03 de Febrero del 2021

Medina Guanotasig, Félix Rubén

C.C.: 0504106956

Dedicatoria

A mis padres que con su sacrificio y abnegación me supieron apoyar e impartir valores en los momentos más difíciles de mi carrera.

A mis familiares que con sus consejos y sus ejemplos me motivaron para alcanzar esta etapa de mi vida.

MEDINA GUANOTASIG, FÉLIX RUBÉN

Agradecimiento

En primera instancia agradezco infinitamente a Dios, por haberme brindado salud, sabiduría, y dedicación permitiéndome llegar a cumplir mis metas de mi formación como profesional.

A mi padre Tomás Medina y mi madre Carmen Guanotasig, por ser el pilar fundamental al bendecirme el día a día y ser mi mayor impulso para realizar este proyecto.

A mis compañeros y amigos con quienes compartimos distintos momentos de alegría y tristeza en el transcurso de la carrera.

Agradezco a mis formadores, personas de gran sabiduría y conocimiento quienes se han esforzado por ayudarme al punto en el que me encuentro.

Gracias a la Unidad de Gestión de Tecnologías – ESPE y a mi directora de trabajo de titulación Ing. Paola Calvopiña por ser guía fundamental durante el desarrollo y elaboración del proyecto.

MEDINA GUANOTASIG, FÉLIX RUBÉN

Tabla de contenidos

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Reporte de verificación.....	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Tabla de contenidos.....	8
Índice de tablas.....	12
Índice de figuras.....	13
Resumen.....	16
Abstrac.....	17
Introducción.....	18
Tema.....	18
Antecedentes.....	18
Planteamiento del problema.....	20
Justificación.....	20
Objetivos.....	22
Objetivo General.....	22
Objetivos Específicos.....	22
Alcance.....	22
Marco teórico.....	23
Fundamentos básicos de los inversores.....	23
Inversores de potencia.....	24
Clasificación de los inversores de potencia.....	25

Inversores monofásicos.....	25
Inversor monofásico de medio puente.	25
Inversor monofásico de puente completo.	26
Inversores trifásicos.....	28
Características de un inversor trifásico.....	29
Inversor trifásico de fuente de tensión.	30
Reguladores de voltaje en los inversores.	31
Técnicas de modulación y regulación mediante PWM	33
Modulación de un solo ancho de pulso.....	33
Modulación de ancho de pulso múltiple.....	34
Modulación senoidal del ancho de pulso (SPWM).....	35
Modulación senoidal modificada de ancho de pulso (MSPWM)	
.....	36
Transistor bipolar de compuerta aislada (IGBTS)	37
Estructura Básica de un IGBTS	38
IGBTS 2MBI 200N- 060.....	39
Características de los IGBTS 2MBI 200N- 060	41
Aplicaciones de los IGBTS 2MBI 200N - 060.	41
Calificaciones de los IGBT's 2MBI 200N - 060.....	42
Características eléctricas de los IGBTS 2MBI 200N - 060.....	42
Datos térmicos de los IGBTS 2MBI 200N - 060.....	43
Optoacoplador u optoaislador	43
Optoacoplador 6n135	43
Características Optoacoplador 6n135.....	44
Drivers de disparo de los IGBTS.....	45
Características principales del IR2102.....	45

Drivers de disparo del IGBT (IR2102).....	46
Distribución de pines (IR2102).....	47
Conexión Típica de Potencia del (IR2102) con IGBT.....	48
Sistema embebido arduino.....	49
Arduino Uno.....	50
Desarrollo	54
Identificación de la solución	54
Fuente de alimentación fija	55
Etapa de transformación.....	56
Etapa de rectificación.....	58
Etapa de filtración.....	60
Etapa de regulación.....	62
Reguladores LM 7812, LM 7815.....	62
Diseño esquemático electrónico de fuente de poder fijo.	63
Circuito de control y modulación.....	65
Circuito de Optoacoplación	66
Circuito optoacoplador línea (R).	67
Circuito optoacoplador línea (S).	67
Circuito optoacoplador línea (T).....	68
Circuito de disparo	69
Circuito disparador línea (R).	71
Circuito disparador línea (S).....	72
Circuito disparador línea (T).....	73
Diseño esquemático electrónico del circuito de control.	74
Circuito de Potencia	77
Diseño esquemático electrónico del circuito de potencia.....	79

Circuito Neutro	80
Diseño esquemático electrónico del circuito neutro.	81
Código ejecutable del inversor trifásico y modulación SPWM	82
Diseño estructural del inversor trifásico	83
Conexión del enchufe	84
Conexión de dispositivo de protección del módulo	84
Conexión indicador de encendido del módulo	84
Conexión al puente de IGBT's	85
Conexión de la fuente de alimentación.	85
Tomas de mediciones de las señales de control	87
Tomas de mediciones de señales de optacopladores	87
Tomas de mediciones de las señales de drivers de disparo	87
Conexión de los elementos internos del módulo	88
Procedimiento de operación	89
Pruebas realizadas a los circuitos del módulo inversor.	91
Prueba de la fuente de tensión.	92
Prueba del circuito de control y modulación.	93
Prueba del circuito de optoacoplación.	95
Prueba del circuito de drivers IR2102.	97
Prueba del circuito inversión 2MBI 200N – 060.	98
Conclusiones y recomendaciones	101
Conclusiones	101
Recomendaciones	102
Bibliografía	103
Anexos	106

Índice de tablas

Tabla 1 Posibles combinaciones de los interruptores.....	27
Tabla 2 Características en modo de operación	30
Tabla 3 Las soluciones existentes para reguladores de voltaje en inversores.....	32
Tabla 4 Las técnicas de modulación comúnmente utilizadas son:.....	33
Tabla 5 IGBT Module (N series).....	41
Tabla 6 Aplicaciones de los IGBTs 2MBI 200N - 060	41
Tabla 7 Calificaciones y características máximas IGBTs 2MBI 200N - 060	42
Tabla 8 Características eléctricas de los IGBTs 2MBI 200N - 060.....	42
Tabla 9 Datos térmicos del IGBTs 2MBI 200N - 060	43
Tabla 10 Características Optoacoplador 6n135	44
Tabla 11 Características del regulador.....	46
Tabla 12 Descripción de la simbología IR2102	48
Tabla 13 Ventajas de la utilización de arduino.	49
Tabla 14 Especificaciones Técnicas del Arduino Uno	53
Tabla 15 Descripción de la relación de transformación.	57
Tabla 16 Relación de conexión del IGBT 2MBI 200N – 060 y el driver IR210	80
Tabla 17 Mediciones fuentes de alimentación fija	93
Tabla 18 Mediciones de cada una de las fases RST.....	94
Tabla 19 Mediciones del circuito de control líneas (R, S y T).	95
Tabla 20 Mediciones del circuito optoacoplador líneas (R, S y T)	97
Tabla 21 Mediciones del circuito de drivers líneas (R, S y T)	98
Tabla 22 Mediciones del circuito de potencia fase R, s y T.	100

Índice de figuras

Figura 1	Circuito básico de configuración de puente.....	23
Figura 2	Inversor monofásico de medio puente	25
Figura 3	Inversor monofásico de puente completo.....	26
Figura 4	Formas de onda de la salida inversor monofásico puente completo.	27
Figura 5	Configuración básica de un Inversor Trifásico	28
Figura 6	Principio de operación de un inversor trifásico	29
Figura 7	Inversor trifásico de fuente de voltaje en puente.....	31
Figura 8	Modulación de un solo ancho de pulso	34
Figura 9	Modulación de ancho de pulso múltiple.	35
Figura 10	Modulación senoidal del ancho de pulso (SPWM).	36
Figura 11	Modulación senoidal modificada de ancho de pulso.	37
Figura 12	Símbolo de un IGBT canal n.....	38
Figura 13	Vista de un corte vertical de un IGBT.....	39
Figura 14	Dimensionamiento del IGBT 2MBI 200N – 060.....	40
Figura 15	Construcción interna de IGBT.....	40
Figura 16	Disposición interna del optoacoplador 6N135.....	44
Figura 17	Circuito integrado vista externa IR2102	45
Figura 18	Conexión interna IR2102	47
Figura 19	Distribución de Pines del IR2102	47
Figura 20	Conexión típica de potencia del IR2102.....	49
Figura 21	Arduino uno	51
Figura 22	Descripción de entradas y salidas de Arduino Uno	52
Figura 23	Diagrama de bloques para el inversor trifásico	55
Figura 24	Fases del diseño de una fuente de alimentación fija.....	56
Figura 25	Transformador	58

Figura 26 Rectificador.....	58
Figura 27 Estructura externa del puente rectificador.....	59
Figura 28 Capacitor como filtro.....	61
Figura 29 Terminales del regulador.....	62
Figura 30 Fuente de alimentación de 12V.....	63
Figura 31 Diseño esquemático electrónico de las fuentes de poder fijas.....	64
Figura 32 Simulación de la construcción de la fuente de poder regulable.....	64
Figura 33 Desarrollo de las pistas para el circuito impreso de las fuentes fijas.....	65
Figura 34 Circuito de control SPWM.....	66
Figura 35 Circuito optoacoplador línea (R).....	67
Figura 36 Circuito optoacoplador línea (S).....	68
Figura 37 Circuito optoacoplador línea (T).....	69
Figura 38 Niveles de operación del IR2102.....	70
Figura 39 Circuito disparador línea R.....	71
Figura 40 Circuito disparador línea S.....	72
Figura 41 Circuito disparador línea S.....	73
Figura 42 Simulación de la construcción de circuito de control de la línea (R).....	74
Figura 43 Desarrollo de las pistas impresas del circuito de control y línea (R).....	75
Figura 44 Simulación del circuito de control línea (S) y línea (T).....	76
Figura 45 Desarrollo de las pistas impresas del circuito de control y línea (R).....	77
Figura 46 Circuito de potencia, puente IGBT's.....	78
Figura 47 Encapsulado y terminales de conexión del IGBT 2MBI 200N – 060.....	79
Figura 48 Configuración Neutra.....	81
Figura 49 Vista 3D del circuito neutro.....	81
Figura 50 Circuito impreso de la configuración neutra.....	82
Figura 51 Vista frontal del módulo inversor.....	83

Figura 52 Conexión del enchufe (tipo B).....	84
Figura 53 Conexión del disyuntor.	84
Figura 54 Luz indicadora del módulo.	85
Figura 55 Puente de IGBT's	85
Figura 56 Fuente de alimentación de 12VDC y 15 VDC	86
Figura 57 Alimentación del puente de IGBT's.....	86
Figura 58 Tomas de mediciones de las señales de control.....	87
Figura 59 Tomas de mediciones de señales de optoacopladores.....	87
Figura 60 Tomas de mediciones de las señales de drivers de disparo.	88
Figura 61 Conexión de los elementos internos del módulo de inversión trifásico.....	89
Figura 62 Conexión al panel frontal del módulo y luz indicadora.....	89
Figura 63 Conexión de la fuente de alimentación	92
Figura 64 Prueba de resultados de fuentes de tensión	92
Figura 65 Conexión para la medición del circuito de control	93
Figura 66 Prueba de resultados del circuito de control y modulación de la fase R.....	94
Figura 67 Medición del tiempo de desfase línea R ciclo positivo con respecto al desfase de la línea S ciclo positivo del circuito de control	95
Figura 68 Conexión para realizar la medición de optoacopladores	96
Figura 69 Medición del tiempo de desfase línea R ciclo positivo con respecto al desfase de la línea R ciclo positivo del circuito de optoacoplación.....	96
Figura 70 Conexión para realizar la medición de drivers de IGBT.	97
Figura 71 Medición del tiempo de desfase línea R(HO) ciclo positivo con respecto al desfase de la línea R(LO) ciclo positivo en el circuito de optoacoplación.....	98
Figura 72 Conexión para realizar las pruebas del circuito de inversión trifásica.....	99
Figura 73 Medición de fase R de potencia con respecto a la fase S.	100

Resumen

En la presente monografía se describe la implementación de un inversor trifásico con modulación SPWM (Modulación sinusoidal por ancho de pulso). Para ello es necesario el análisis de las etapas que posee, técnicas de modulación y circuitos que intervienen en la parte de control y potencia con el propósito de crear un módulo didáctico para el desarrollo de prácticas de laboratorio orientadas a la asignatura de electrónica de potencia. En primera etapa se realizó la construcción de fuentes de tensión fijas con valores de 12Vdc y 15Vdc, necesarias para el funcionamiento de los circuitos electrónicos que realizan la inversión trifásica. Cabe recalcar que tiene los terminales para utilizar una fuente externa en caso de ser necesaria. La siguiente etapa cuenta con un sistema embebido arduino el mismo que contiene una plataforma de libre acceso, este sistema permite controlar los tiempos de disparo y la modulación de seis señales SPWM distribuidas de la siguiente manera; dos para cada fase, una para el ciclo positivo y otra para el ciclo negativo estas señales son utilizadas para la conmutación de IGBT's (Transistores bipolares de compuerta aislada); mediante optoacopladores, con el objetivo de aislar el circuito de control con la parte potencia.

Palabras clave:

- **INVERSOR TRIFÁSICO**
- **DEFASE DE CORRIENTE ALTERNA**
- **MODULACIÓN SPWM**
- **IGBTS**

Abstrac

This monograph describes the implementation of a three-phase inverter with SPWM modulation (Sinusoidal Pulse Width Modulation). For this, it is necessary to analyze the stages it has, modulation techniques and circuits that intervene in the control and power part in order to create a didactic module for the development of laboratory practices oriented to the subject of power electronics. In the first stage, the construction of fixed voltage sources with values of 12Vdc and 15Vdc, necessary for the operation of the electronic circuits that perform the three-phase inversion, was carried out. It should be noted that it has the terminals to use an external source if necessary. The next stage has an embedded Arduino system which contains a free access platform, this system allows controlling the trigger times and modulation of six SPWM signals distributed as follows; two for each phase, one for the positive cycle and another for the negative cycle, these signals are used for the switching of IGBT's (bipolar insulated gate transistors); using optocouplers, in order to isolate the control circuit from the power part.

Key words:

- **THREE-PHASE INVERTER**
- **ALTERNATING CURRENT PHASE SHIFT**
- **SPWM MODULATION**
- **IGBTS**

Introducción

Tema

Implementación de un inversor trifásico mediante IGBTs para prácticas de electrónica de potencia.

Antecedentes

Con el avance tecnológico a nivel industrial los sistemas han mejorado radicalmente, para el control de los sistemas inicialmente existían elementos mecánicos luego evolucionaron a elementos electromecánicos que combinaban los accionamientos mecánicos con una señal eléctrica, finalmente con la invención de semiconductores se han desarrollado sistemas más sofisticados como chips y placas lo que permiten un control con elementos pequeños que disipan poca energía, ocupa menos espacio y son de rápida conmutación.

Con la invención de los semiconductores se poseen elementos como; diodos de dos capas, transistores de tres capas y tiristores de cuatro capas, mismos que han permitido solventar diferentes problemáticas, por lo que hoy en día la electrónica se divide en electrónica de propósito general la cual se encarga de realizar circuitos de baja potencia (menos a 1A), existen aplicaciones de alta frecuencia por lo que los elementos deben ser de conmutación rápida por ello existe la electrónica de telecomunicaciones, finalmente si la carga es considerable y la corriente supera a un amperio existe la electrónica de potencia.

Gracias a la electrónica de potencia específicamente a los IGBT's se pueden realizar inversores, elementos que permiten convertir a la energía de corriente continua en corriente alterna y actualmente son utilizados en aplicaciones como: energías renovables, control en la tracción de motores y cocinas de inducción.

En vista que los inversores son ampliamente utilizados hoy en día es importante que se desarrollen prácticas del laboratorio orientadas a la formación académica, es por esta razón que los señores (LÓPEZ, CAMACHO, DÍAZ, & GAVIRIA, 2007) publicaron un artículo en el cual se titula “Modulación pwm aplicada a inversores trifásicos dentro del esquema de accionamientos eléctricos” de la universidad del cauca, en él se dice que para aplicaciones en motores se utilizan inversores ya que permiten tener variación en tensión y frecuencia. El artículo está enfocado en accionamiento eléctricos los cuales pueden estar en baja o mediana potencia, utilizan una topología de inversor VSI (inversores con fuente de voltaje) de puente completo, el cual utiliza par de diodos que pueden estar en corte o saturación haciendo que su comportamiento sea a manera de switch.

Al pasar algunos años los señores (Patiño, Torres, & Yarce, 2008) publicaron un artículo en el cual se menciona el tema de diseño y construcción de un inversor trifásico, titulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN INVERSOR TRIFÁSICO”, la cual fue postulado por la universidad tecnológica de Pereira en el cual establecen los parámetros de diseño y construcción de este sistema, haciendo énfasis en el tipo de carga a utilizar y la tensión de prueba, además, la implementación de este sistema tiene la finalidad de poder tener una corrección en el factor de potencia y tiene en cuenta el avance que se ha venido experimentando con semiconductores, para frecuencias de conmutación, pérdidas en conducción y facilidad de manejo y diseño optimizando en gran parte este tipo de convertidores.

Así mismo (PERICO, 2019) en su proyecto de titulación presentó el “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN INVERSOR TRIFÁSICO CONTROLADO EN TENSIÓN A PARTIR DE UN BUS DC”, publicado por la UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS en el cual establece construir un inversor DC - AC que tenga posibilidad de entregar salidas

monofásicas y generar una tensión trifásica, el sistema debe tener la capacidad de controlar la tensión trifásica.

Planteamiento del problema

En la actualidad la mayoría de empresas o instituciones superiores implementan múltiples tipos de sistemas trifásicos, debido a que posee una serie de ventajas, como son la economía de transporte de energía para sus líneas y elementos que requieren potencia constante para su óptimo funcionamiento.

En la Unidad de Gestión de Tecnologías en la asignatura de Electrónica de Potencia, no se cuenta con módulos para realizar prácticas relacionadas con inversores utilizando elementos industriales, por los que los estudiantes realizan pruebas por etapas pero no de todo el sistema en conjunto, lo que involucra un costo para la adquisición de diferentes elementos.

Por esta razón es importante implementar un módulo didáctico para que el estudiante pueda verificar el funcionamiento de un inversor, realizar mediciones de amplitud, frecuencia y desfase de las señales de corriente alterna trifásica generadas a partir de una fuente de corriente continua

La implementación de un inversor trifásico, ayudara a que los estudiantes de la carrera de Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación desarrollen destrezas en la parte práctica, fundamentada en el conocimiento teórico que actualmente reciben mediante clases y simulaciones.

Justificación

En el Ecuador existen instituciones de educación superior que tienen el objetivo de formar profesionales, los mismos que tienen que realizar prácticas similares al campo laboral. La Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", posee la carrera en

Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación donde específicamente es importante realizar prácticas de inversores.

El presente proyecto podrá ser considerado como elemento complementario al área de electrónica de potencia en donde se podrá realizar comprobaciones, modificaciones de fases, frecuencia y amplitud de la corriente alterna y determinar de forma específica las características que posee un sistema trifásico, los mismos que al estudiante permitirán desarrollar destrezas en la parte práctica, fundamentada en el conocimiento teórico. La ejecución del mencionado trabajo beneficiará directamente a los estudiantes de la carrera en Tecnología Superior en Automatización e Instrumentación quienes realizan las prácticas en las respectivas áreas de Electrónica de Potencia y podrán adquirir conocimientos a futuro para un desempeño laboral, también puede servir como base para la realización de nuevas investigaciones.

La implementación del proyecto se lo realizará mediante la investigación de inversores trifásicos, tipos de modulación y los elementos que intervienen en la parte de control y potencia. Luego se realizara la simulación del circuito de control para determinar el tiempo de modulación, después se seleccionara los elementos con el propósito de crear un módulo didáctico para el desarrollo de prácticas de laboratorio orientadas a la asignatura de electrónica de potencia.

Objetivos

Objetivo General

Implementar un inversor trifásico mediante IGBTs para prácticas de electrónica de potencia

Objetivos Específicos

- Establecer información acerca de un inversor trifásico mediante IGBTs para obtener una corriente desfasada.
- Desarrollar la programación en el microcontrolador para determinar el tiempo y la magnitud de disparo a los IGBTs.
- Seleccionar los equipos y dispositivos que se utilizarán en la implementación de un inversor trifásico
- Realizar las pruebas del sistema implementado para garantizar el buen funcionamiento y operatividad.

Alcance

Este proyecto tiene como finalidad implementar un módulo de inversión trifásica para realizar prácticas de Electrónica de Potencia, donde se podrá visualizar formas de ondas con diferentes características como desfase, amplitud y frecuencia.

Marco teórico

El presente trabajo requiere la revisión de bibliografía y conceptos referentes al control en aplicaciones de electrónica de potencia, la teoría de los convertidores de potencia, así como teoría relacionada con inversores y sus diferentes técnicas de modulación.

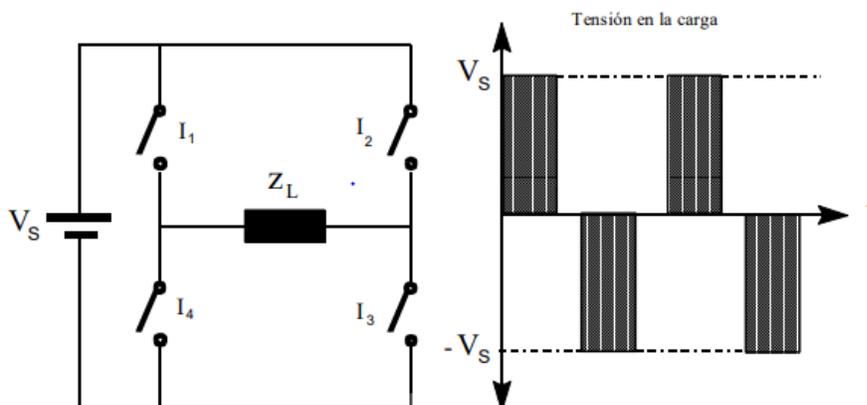
Fundamentos básicos de los inversores

Para conseguir una corriente alterna partiendo de una corriente continua se necesita un conjunto de interruptores que puedan ser conectados y desconectados a una determinada carga de manera que la salida sea positiva y negativa alternativamente. (García Paredes, Torres Escandón, & Zúñiga Burgos, 2002)

Cada uno de estos interruptores debe de estar constituido por un par de tiristores o transistores para que la corriente pueda circular de los dos sentidos, aunque en la práctica cada interruptor estará compuesto por un tiristor o transistor y un diodo. El circuito básico se lo puede observar en la Figura 1. (García Paredes, Torres Escandón, & Zúñiga Burgos, 2002)

Figura 1

Circuito básico de configuración de puente



Nota. Se utiliza cuatro interruptores los cuales se cierran dos a dos; durante el primer periodo se cierra I1 e I3, y durante el otro periodo lo hacen el I2 e I4. Tomado de (García Paredes, Torres Escandón, & Zúñiga Burgos, 2002)

Inversores de potencia

Los convertidores de DC a AC se conocen como inversores. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador, tanto el voltaje de salida como la frecuencia pueden ser fijos o variables. (Salazar Salvador, 2012)

Si se modifica el voltaje DC y la ganancia del inversor se mantiene constante, es posible obtener un voltaje a la salida. Por otra parte, si el voltaje DC es fijo y no controlable, se puede obtener un voltaje de salida variable si se varía la ganancia del inversor. La ganancia del inversor se puede definir como la relación entre el voltaje de salida en AC y el voltaje de entrada en DC. (Salazar Salvador, 2012)

El usos de inversores es muy común en aplicaciones industriales tales como motores de AC de velocidad Variable, la calefacción por inducción, las fuentes de respaldo y las fuentes de poder, alimentaciones interrumpibles de potencia. Los inversores se pueden clasificar básicamente en dos tipos inversores monofásicos e inversores trifásicos. Cada tipo puede utilizar dispositivos con activación y desactivación controlada (es decir BJT, MOSFET, IGBT, GTO) o tiristores de conmutación forzada según el tipo de aplicación. Estos inversores utilizan por lo general las señales de control PWM para producir un voltaje de salida. (Salazar Salvador, 2012)

Clasificación de los inversores de potencia

Existen una variedad de circuitos inversores desde los más simples hasta los más complejos se clasifican en dos grupos como son inversores monofásicos e inversores trifásicos.

Inversores monofásicos

Los inversores monofásicos tiene como función cambiar un voltaje de entrada en DC a un voltaje simétrico de salida en AC, con la magnitud y frecuencias desfasas.

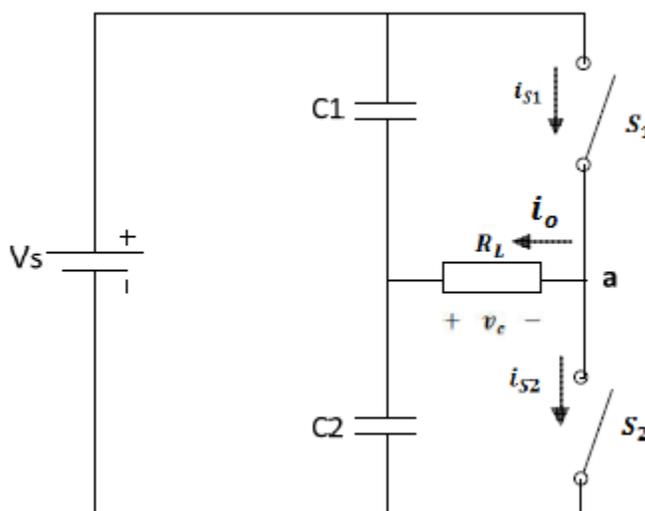
(Rodríguez Ortíz, Carlos Andrés, 2004)

Inversor monofásico de medio puente.

El circuito consiste en un par de dispositivos de conmutación S_1 y S_2 conectados en serie a través de una fuente de voltaje DC V_s , y una carga conectada entre el punto a y el punto central 0 en la unión de los dos capacitores C_1 y C_2 , los cuales dividen el voltaje de entrada V_s como se indica en la Figura 2. (Salazar Salvador, 2012)

Figura 2

Inversor monofásico de medio puente



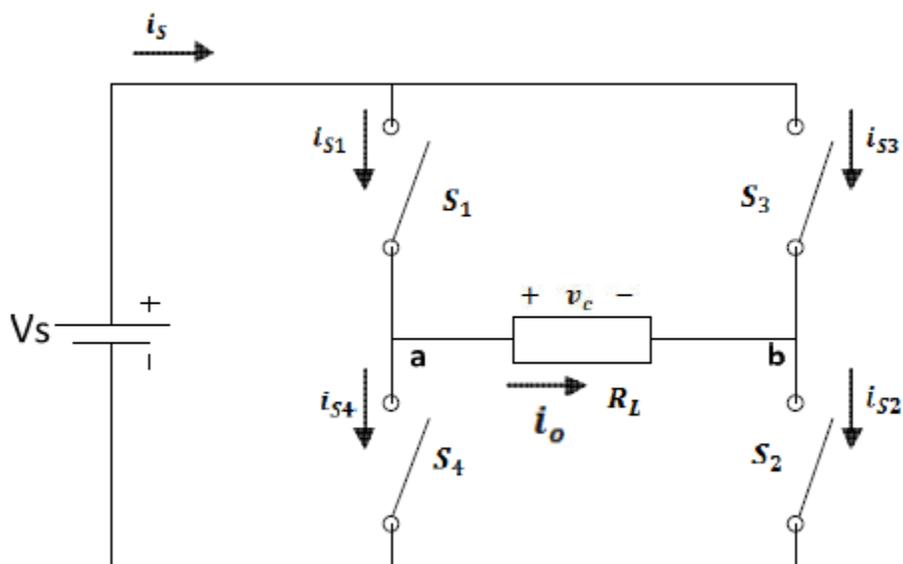
Nota. Tomado de (Salazar Salvador, 2012)

Inversor monofásico de puente completo.

El inversor en puente completo está formado por 4 interruptores de potencia totalmente controlados, típicamente transistores MOSFET o IGBTs, tal y como se muestra en la Figura 3. (Salazar Salvador, 2012)

Figura 3

Inversor monofásico de puente completo



Nota. Los interruptores simulan una conexión a los IGBTs.

Tomado de (Salazar Salvador, 2012)

La tensión de salida V_c puede ser $+V_s$ ó $-V_s$ ó 0 , dependiendo del estado de los interruptores. La Tabla 1, muestra la tensión de salida que se obtiene al cerrar determinadas parejas de interruptores. La forma de onda para el voltaje de salida se muestra en la Figura 4. Además muestra el desplazamiento de la onda cuadrada conjuntamente con el periodo y el voltaje es proporcional a la fuente de alimentación. (Salazar Salvador, 2012)

Tabla 1

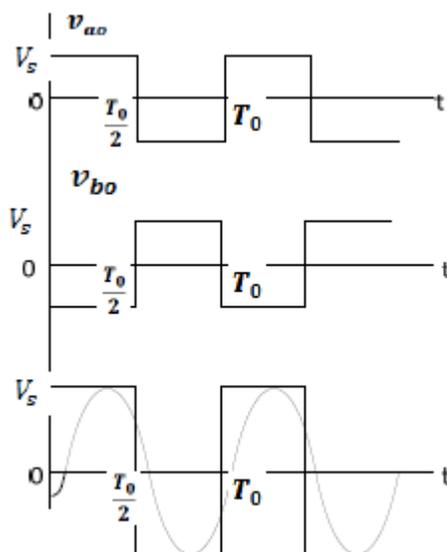
Posibles combinaciones de los interruptores

Interruptores cerrados	Tensión de salida V_c
S1 y S2	+ V_s
S3 y S4	- V_s
S1 y S3	0
S2 y S4	0

Nota. S1 y S4 no debería estar cerrados al mismo tiempo, ni tampoco S2 y S3 para evitar un cortocircuito en la fuente DC. Los interruptores reales no se abren y se cierran instantáneamente, por lo tanto debe tenerse en cuenta los tiempos de conmutación al diseñar el control de los interruptores. Tomado de (Salazar Salvador, 2012)

Figura 4

Formas de onda de la salida inversor monofásico puente completo.



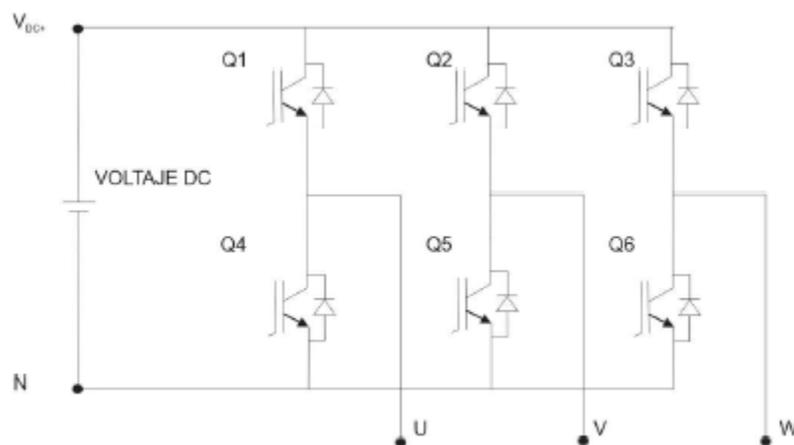
Nota. Tomado de (Salazar Salvador, 2012)

Inversores trifásicos

El estudio de los inversores trifásicos se puede realizar a través de tres inversores monofásicos separados. Un inversor trifásico es aquel que consta de una entrada de voltaje DC y entrega a la salida tres fases, por lo general es usado en aplicaciones de alta potencia, existen diferentes topologías y modulaciones dentro de los inversores trifásicos cada una con ventajas y desventajas, así como aplicaciones para las que tienen más aceptación que en otras. La topología más común dentro de los inversores trifásicos es la conocida como tipo puente, que se puede observar en la Figura 5. Esta topología consta de tres ramales, cada uno con 2 semiconductores de potencia (Sánchez Freire, 2019)

Figura 5

Configuración básica de un Inversor Trifásico



Nota. Esta topología como se puede observar necesita que los semiconductores soporten un voltaje de bloqueo igual a la del bus DC. Tomado de (Sánchez Freire, 2019)

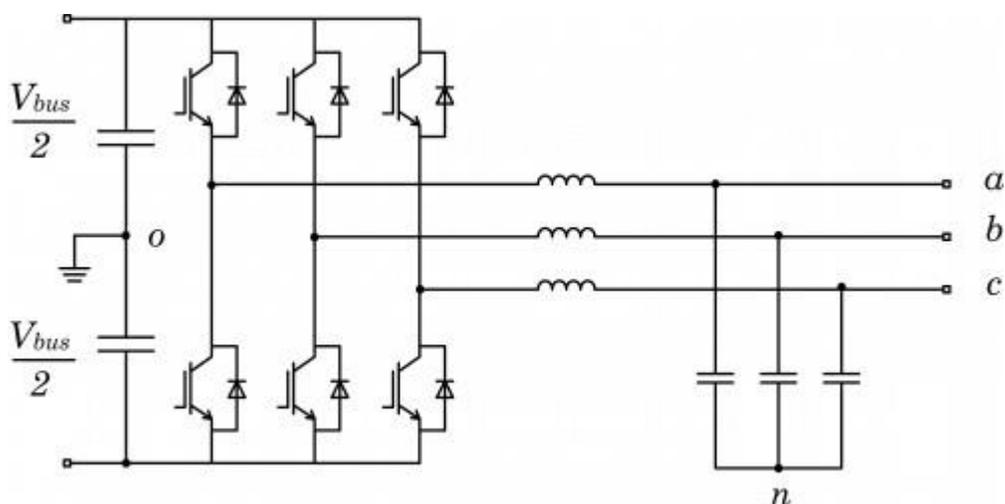
El sistema de señales generado a la salida de debe cumplir con algunas condiciones para que sea considerado un sistema trifásico:

- Los voltajes deben ser igual en módulo.
- Desfase de 120° eléctricos entre Fases.
- Los voltajes tendrán la secuencia (U, V, W) o (U, W, V).

Para eliminar la necesidad de utilizar filtros armónicos a la salida del inversor, como se indica en la Figura 6. Se utiliza semiconductores que sean capaces de conmutar a altas frecuencias y obtener una señal sinusoidal lo más cercana a la ideal. (Alomoto Fajardo & Pilco Pilco, 2017)

Figura 6

Principio de operación de un inversor trifásico



Nota. Tomado de (Alomoto Fajardo & Pilco Pilco, 2017)

Generación de distintas formas de onda alterna al variar los ciclos de apertura y cierre de los interruptores, configuración de un puente trifásico de tiristores a la red.

Características de un inversor trifásico.

Al estar en un modo de operación el inversor presenta una serie cambios y comportamientos en su estructura debida a que en la red eléctrica presenta no mantiene el voltaje ideal las características de muestra en la Tabla 2.

Tabla 2*Características en modo de operación*

En modo de operación
1. Voltaje y corriente de salida.
2. Tipo de onda (cuadrada, triangular, cuadrada modificada, sinusoidal)
3. Bajo auto consumo y alto rendimiento.
4. Capacidad de sobrecarga.
5. Regulación de parámetros a la salida.
6. Límite de voltaje a la entrada.
7. Regulación de la frecuencia.
8. Facilidad de reparación y mantenimiento
9. .Distorsión armónica total THD baja

Nota. Tomado de (Alomoto Fajardo & Pilco Pilco, 2017)

Inversor trifásico de fuente de tensión.

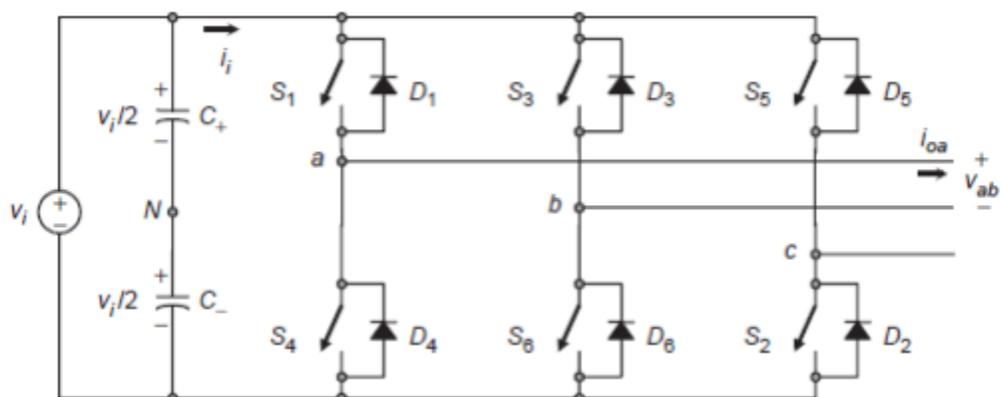
Los VSI monofásicos cubren aplicaciones de potencia de gama baja y los VSI de tres fases cubren las aplicaciones desde media hasta alta potencia. El propósito principal de estas topologías es proveer una fuente de voltaje trifásica, donde la amplitud, fase y frecuencia de los voltajes siempre puedan ser controlables. La topología VSI estándar de tres fases es mostrada en la Figura 7. (García Rojas, 2014)

De la misma forma que en los VSI monofásicos, los interruptores de cualquier posición del inversor (1 y 4, 3 y 6, o 5 y 2) no pueden ser conectados simultáneamente, porque esto daría como resultado un corto circuito a través del suministro de voltaje del enlace de DC. De modo semejante, para evitar los estados indefinidos en el VSI y de esa manera voltajes de línea a la salida indefinidos, los interruptores de cualquier posición del inversor no pueden ser desconectados simultáneamente, de lo contrario

esto resultará en voltajes que dependerán de la polaridad de la corriente de línea respectiva. (García Rojas, 2014)

Figura 7

Inversor trifásico de fuente de voltaje en puente.



Nota. Tomado de (García Rojas, 2014)

Para generar una forma de onda dada de voltaje, el inversor debe maniobrar los interruptores de un estado a otro, por lo que los voltajes de línea resultantes consisten en valores discretos de voltajes que son, 0, y $-v_i$ para la topología. La selección de los estados para generar la forma de onda deseada, se realiza mediante las técnicas de modulación de ancho de pulso las cuales aseguran el uso de los estados válidos. (García Rojas, 2014)

Reguladores de voltaje en los inversores.

Una exigencia de los inversores prácticos es la posibilidad de mantener constante el valor eficaz de la tensión de salida frente a las variaciones de la tensión de entrada y de la corriente de la carga, o incluso poder variar la tensión de salida entre unos márgenes más o menos amplios en la Tabla 3 se muestra las soluciones existentes. (García Rojas, 2014)

Tabla 3

Las soluciones existentes para reguladores de voltaje en inversores.

Procedimientos	Definición
Control de la tensión continúa de entrada	El control de la tensión de la fuente que alimenta al inversor, proporcionará una forma directa de controlar el valor eficaz de la salida. Este tipo de inversor se denomina "variable dc-link inverter". (García Rojas, 2014)
Regulación interna en el propio inversor	La tensión de la fuente de entrada es constante y la modulación de ancho de pulso (PWM) en la secuencia de conducción de los transistores, proporciona una cierta regulación de la tensión eficaz de salida y una reducción del contenido armónico, con ciertas restricciones dependiendo del tipo de modulación. (García Rojas, 2014)
Regulación en la tensión de salida	Consiste en disponer de un autotransformador en la salida del inversor, controlado mecánicamente o electrónicamente mediante tiristores. Esta solución incorpora un retraso en la respuesta del sistema y un aumento del volumen si se necesita una tensión de salida elevada. (García Rojas, 2014)

Nota. Tomado de (García Rojas, 2014)

Técnicas de modulación y regulación mediante PWM

En muchas aplicaciones industriales, a menudo es necesario controlar el voltaje de salida de los inversores y existen varias técnicas para modificar la ganancia del inversor. El método más eficiente de controlar la ganancia (y el voltaje de salida) es incorporar en los inversores el control de PWM en la Tabla 4 se evidencia los tipos de modulación existentes hasta la actualidad. (García Rojas, 2014)

Tabla 4

Las técnicas de modulación comúnmente utilizadas son:

Tipos de modulación PWM
1. Modulación de un solo ancho de pulso.
2. Modulación anchos de pulso múltiple.
3. Modulación senoidal del ancho de pulso.
4. Modulación senoidal modificada del ancho de pulso.

Nota. Tomado de (García Rojas, 2014).

Modulación de un solo ancho de pulso.

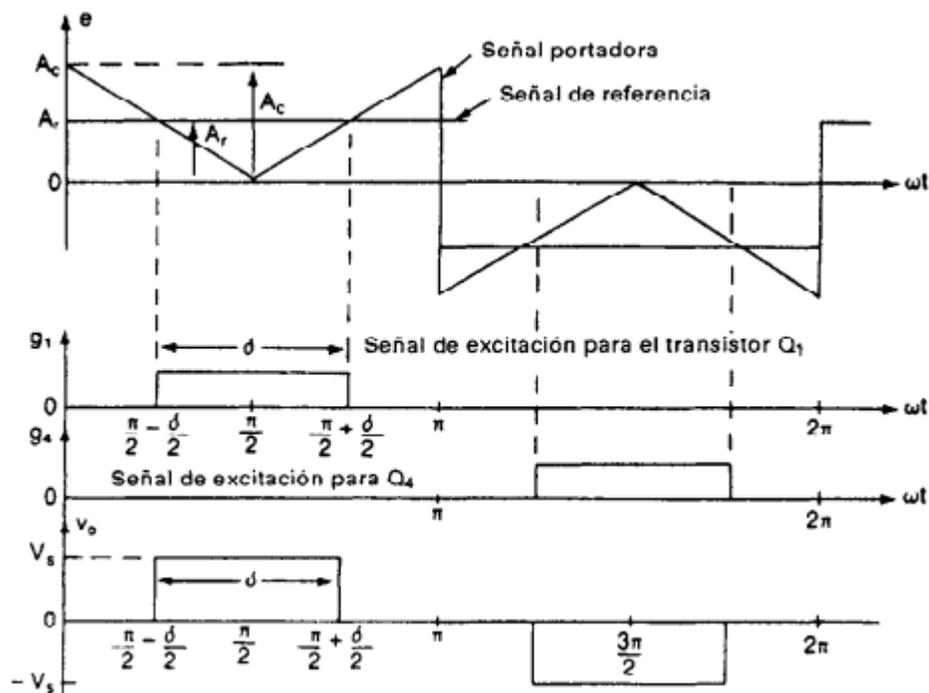
En el control por modulación de un solo ancho de pulso, existe un solo pulso por cada medio ciclo; el ancho del pulso se hace variar, a fin de controlar el voltaje de salida del inversor. Las señales de excitación se generan comparando una señal rectangular de referencia, con una onda portadora triangular, Figura 8. La frecuencia de la señal de referencia determina la frecuencia fundamental del voltaje de salida. Si se varía la amplitud de la onda de referencia desde cero hasta hacerla coincidir con la amplitud de la portadora, el ancho de pulso, puede modificarse desde 0 hasta 180°. La relación entre las amplitudes de ambas ondas constituye la variable de control y se define como

el índice de modulación de la amplitud, o simplemente índice de modulación.

(RODRÍGUEZ PORTILLA, 2017)

Figura 8

Modulación de un solo ancho de pulso



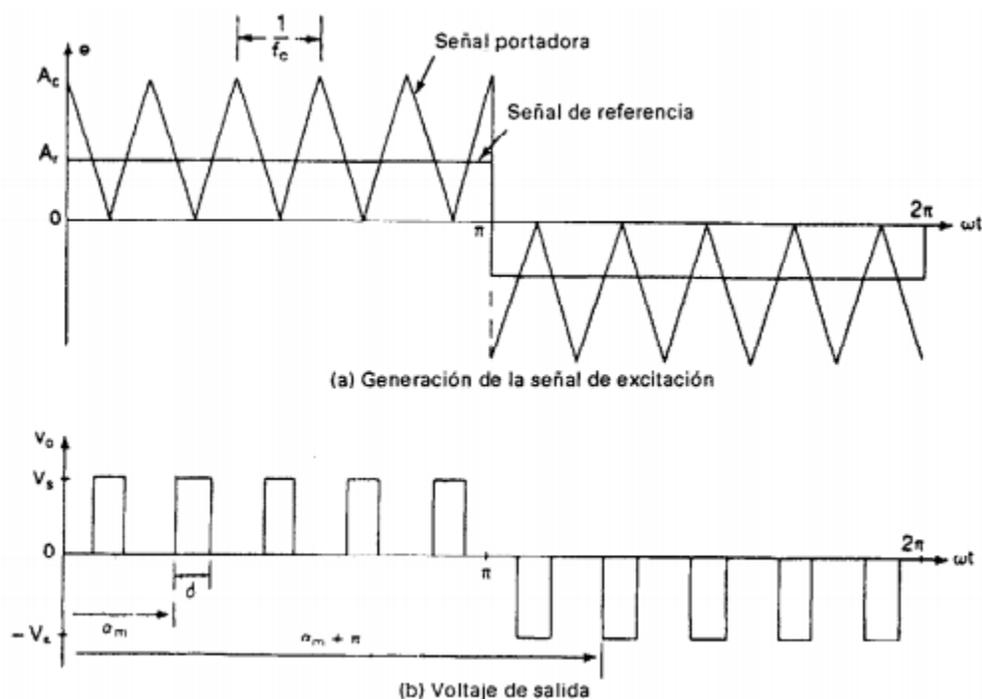
Nota. Tomado de (RODRÍGUEZ PORTILLA, 2017)

Modulación de ancho de pulso múltiple.

Utilizando varios pulsos en cada medio ciclo de voltaje de salida puede reducirse el contenido armónico. La generación de señales de excitación para activar o desactivar los dispositivos aparece en la Figura 9, mediante la comparación de una señal de referencia con una señal de onda portadora triangular. La frecuencia de la señal de referencia establece la frecuencia de salida, y la frecuencia de la portadora determina el número de pulsos por cada ciclo y el índice de modulación controla el voltaje de salida. Este tipo de modulación también se conoce como modulación uniforme de ancho de pulso (UPWM).

Figura 9

Modulación de ancho de pulso múltiple.



Nota. Tomado de (RODRÍGUEZ PORTILLA, 2017)

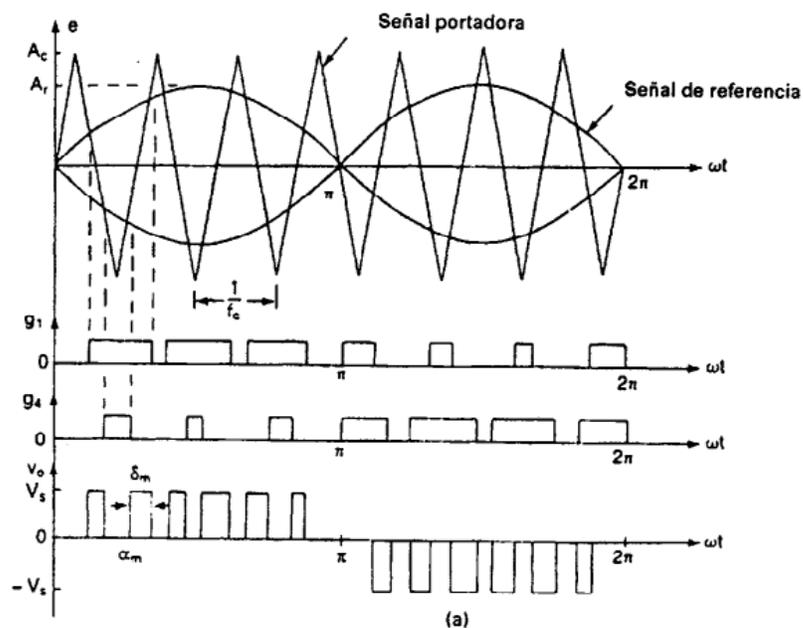
Modulación senoidal del ancho de pulso (SPWM).

La modulación sinusoidal por ancho de pulsos (SPWM) consiste en generar pulsos de ancho proporcional a la amplitud de una señal de referencia o moduladora. Esta última consiste en una señal sinusoidal típica que es comparada con una señal portadora cuya forma es triangular como se muestra en la Figura 10. Los puntos de intersección demarcan los momentos en los que ocurren los flancos de subida y de bajada de los pulsos de anchura variable; esta señal pulsante contiene implícitamente toda la información sobre la onda moduladora (amplitud y frecuencia) y el fin es poder transmitir estas características hacia el lado de potencia donde se encuentra la carga, reproduciendo los pulsos con la acción de los dispositivos de disparo forzado y la fuente de voltaje DC que alimenta el puente inversor. (García Rojas, 2014).

En vez de mantener igual el ancho de todos los pulsos, como es el caso de la modulación múltiple, el ancho de cada pulso varía en proporción con la amplitud de una onda senoidal evaluada en el centro del mismo pulso. El factor de distorsión y las armónicas de menor orden se reducen en forma significativa.

Figura 10

Modulación senoidal del ancho de pulso (SPWM).



Nota. La señal obtenida a la salida del inversor como consecuencia de la aplicación de este tipo de pulsos de control no corresponde explícitamente a una señal sinusoidal, sino que viene con una serie de armónicos superiores asociados a dicho proceso.

Tomado de (García Rojas, 2014).

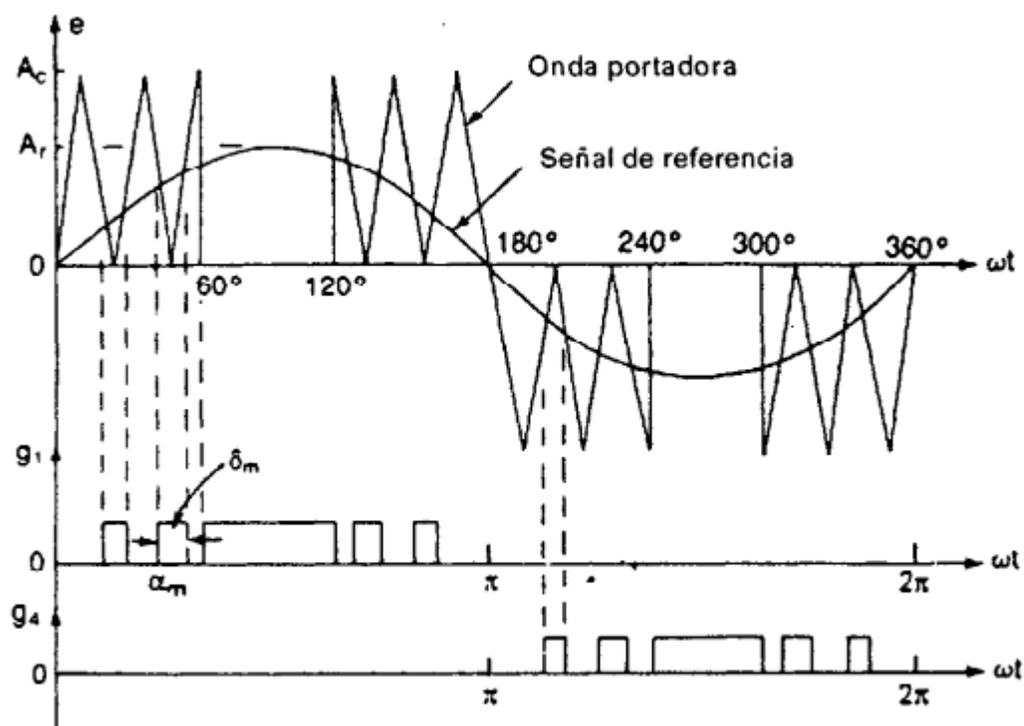
Modulación senoidal modificada de ancho de pulso (MSPWM)

Los anchos de los pulsos más cercanos al pico de la onda senoidal no cambian en forma significativa con la variación del índice de modulación. Esto se debe a las características de una onda senoidal; la técnica SPWM se puede modificar de tal manera que la onda portadora se aplique durante el primero y el último intervalo de 60°

de cada medio ciclo (es decir de cero a 60° y de 120 a 180°) como se observa en la Figura 11. Este tipo de modulación se conoce como MSPWM y la componente fundamental se incrementa y las características armónicas mejoran. Esto reduce el número de conmutaciones de los dispositivos de potencia y las pérdidas por conmutación.

Figura 11

Modulación senoidal modificada de ancho de pulso.



Nota. Tomado de (García Rojas, 2014)

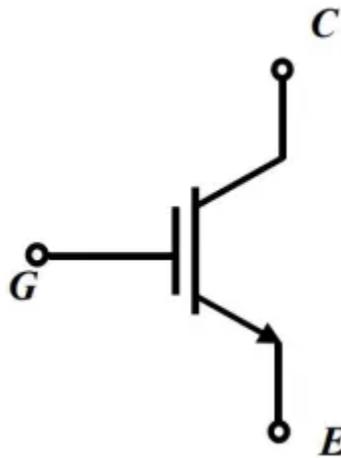
Transistor bipolar de compuerta aislada (IGBTs)

Con la aparición del IGBT se dispone actualmente de un dispositivo semiconductor clave para muchas aplicaciones en Electrónica de Potencia. Se fabrica utilizando una combinación de técnicas MOS y bipolares. Su característica de entrada es comparable con la de un transistor de efecto de campo de auto bloqueo (MOSFET) y

por lo tanto se puede controlar casi sin potencia. Del lado de salida, el IGBT es similar al transistor bipolar de potencia (BJT) y, consecuentemente, puede conmutar tensiones relativamente altas (600 a 1400 V) así como también altas corrientes (100 A), con frecuencias relativamente altas y bajas pérdidas en la Figura 12, se muestra la simbología del IGBT de canal n. (Silva Monteros, 1994)

Figura 12

Símbolo de un IGBT canal n



Nota. En esta imagen se muestra los terminales de conexión. Tomado de (Silva Monteros, 1994)

Estructura Básica de un IGBTs

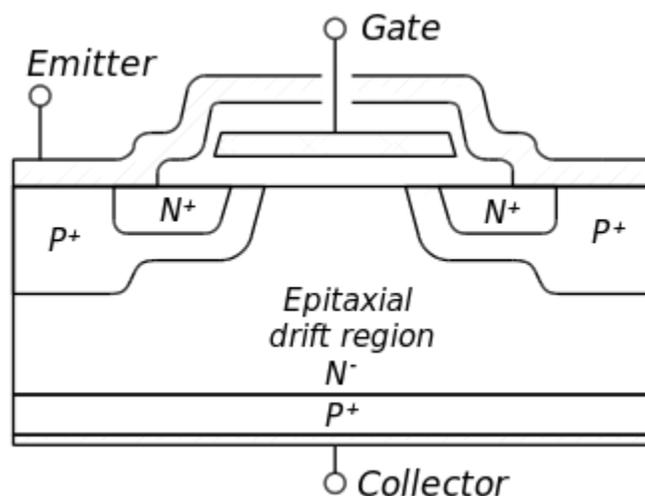
Un corte de la sección vertical de un IGBT genérico de canal n es mostrado en la Figura 12. Esta figura es muy similar a la de un corte de la sección vertical de un MOSFET del mismo tipo de canal, la principal diferencia está en la presencia de la capa p+ que forma el drenaje del IGBT.

Esta capa forma una juntura p y n , la cual inyecta portadores minoritarios dentro de lo que podría ser la región de desplazamiento del drenaje del MOSFET vertical. La compuerta y la fuente del IGBT son colocadas fuera en una geometría interdigitada

similar a la usada en un MOSFET vertical como se indica en la Figura 13. (Silva Monteros, 1994)

Figura 13

Vista de un corte vertical de un IGBT



Nota. En esta imagen se observa los elementos internos del IGBT. Además los terminales de conexión.

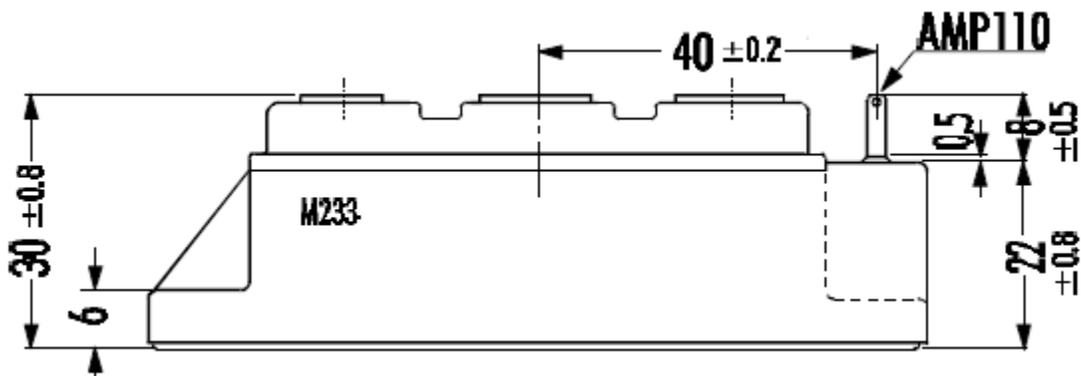
Tomado de (Silva Monteros, 1994)

IGBTS 2MBI 200N- 060

El módulo IGBT es una combinación de dispositivos electrónicos que soportan corriente y voltajes altos debido a que su construcción está hecho de semiconductores resistentes a fuertes cargas, el dimensionamiento, construcción y los terminales de conexión se indica en la Figura 14 y Figura 15.

Figura 14

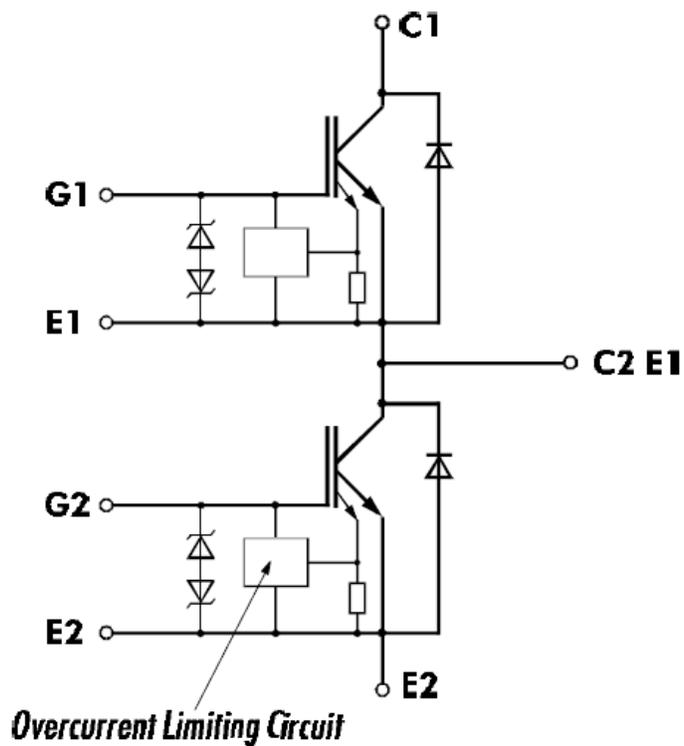
Dimensionamiento del IGBT 2MBI 200N – 060



Nota. Esta imagen corresponde al diseño externo del IGBT. Tomado de FUJI Electric.

Figura 15

Construcción interna de IGBT



Nota. Esta imagen muestra los terminales de conexión. Tomado de FUJI Electric.

Características de los IGBTs 2MBI 200N- 060

Los IGBTs están diseñados para soportar altas magnitudes de corriente y voltaje así como para diferentes ambientes de funcionalidad a continuación se detalla las características en la Tabla 5.

Tabla 5

IGBT Module (N series)

Características IGBTs 2MBI 200N- 060

1. RBSOA cuadrado
 2. Voltaje de saturación bajo
 3. Menos disipación total de energía
 4. Característica de FWD mejorada
 5. Inductancia parásita interna minimizada
 6. Función de limitación de sobre corriente (~ 3 veces la corriente nominal)
-

Nota. Esta tabla muestra las características del IGBT. Tomado de FUJI Electric.

Aplicaciones de los IGBTs 2MBI 200N - 060.

Tabla 6

Aplicaciones de los IGBTs 2MBI 200N - 060

Aplicaciones de los IGBTs 2MBI 200N - 060

1. Conmutación de alta potencia
 2. Controles de motor de CA
 3. Controles de motor de CC
 4. Fuente de poder ininterrumpible
-

Nota. Esta tabla indica las aplicaciones de los IGBT's. Tomado de FUJI Electric.

Calificaciones de los IGBT's 2MBI 200N - 060.

Tabla 7

Calificaciones y características máximas IGBTs 2MBI 200N - 060

Items	Symbols	Ratings	Units
Collector-Emitter Voltaje	V_{CES}	600	V
Gate – Emitter Voltaje	V_{GES}	± 20	V
Continuous	I_C	200	
Collector Current	$I_{C\ PULSE}$	400	A
1ms			
Continuos	$-I_C$	200	
1ms	$-I_{C\ PULSE}$	400	
Max. Power Dissipation	P_C	780	W
Operating Temperature	T_I	+150	°C
Storage Temperature	T_{stg}	-40 ~ +125	°C
Isoltaion Voltaje AC.1min	V_{is}	2500	V
Screw Torque	Mounting *1	3,5	Nm
	Terminals *1	3.5	

Nota. Esta tabla muestra los rangos ideales de operación. Tomado de FUJI Electric.

Características eléctricas de los IGBTs 2MBI 200N - 060.

Tabla 8

Características eléctricas de los IGBTs 2MBI 200N - 060

Items	Symbols	Test Condition	Min	Typ.	Max.	Units
Zero Gate Voltage Collector Current	ICES	$V_{GE}=0V$ $V_{CE}=600V$			2.0	mA
Gate-Emitter Leakage Current	IGES	$V_{CE}=0V$ $V_{GE}=\pm 20V$			30	μA
Gate-Emitter Threshold Voltage	$V_{GE(th)}$	$V_{GE}=20V$ $I_C=200mA$	4.5		7.5	V
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(sat)}$	$V_{GE}=15V$ $I_C=200A$			2.8	V
Input capacitance	C_{ies}	$V_{GE}=0V$		13200		
Output capacitance	C_{oes}	$V_{CE}=10V$		2930		pF
Reverse Transfer capacitance	C_{res}	$f=1MHz$		1330		
Turn-on Time	tON	$V_{CC}=300V$		0.6	1.2	μS
	t_r	$I_C=200A$		0.2	0.6	

Items	Symbols	Test Condition	Min	Typ.	Max.	Units
Turn-off Time	tOFF	$V_{GE}=\pm 15V$		0.6	1.0	
	tf	$R_G=9.1W$		0.2	0.35	
Diode Forward On-Voltage	VF	$I=200A V_{GE}=0V$			3.0	V
Reverse Recovery Time	trr	$I_F=200A$			300	ns

Nota. Esta tabla muestra las características y mediciones. Tomado de FUJI Electric.

Datos térmicos de los IGBTs 2MBI 200N - 060.

Tabla 9

Datos térmicos del IGBTs 2MBI 200N - 060

Items	Symbols	Test Condition	Min	Typ.	Max.	Units
Thermal Resistance	Rth(j-c)	IGBT			0.16	°C/W
	Rth(j-c)	Diode			0.35	
	Rth(c-f)	With Thermal Compound		0.025		

Nota. Tomado de FUJI Electric. Todas las características se las puede encontrar en el Anexo A.

Optoacoplador u optoaislador

Un optoacoplador o también conocido como optoaislador es un interruptor que es activado mediante una luz infrarroja emitida por un diodo led hacia un fototransistor o cualquier otro dispositivo capaz de detectar los infrarrojos. Cuando esta luz es interrumpida o bloqueada por algún objeto el circuito se abre actuando como un interruptor abierto. (Mecafenix, 2018)

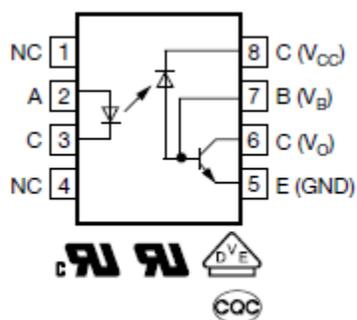
Optoacoplador 6N135

El optoacoplador 6N135 es un dispositivo el cual funciona con un diodo emisor infrarrojo, ópticamente acoplado a un transistor foto detector de alta velocidad. Una conexión por separado para el fotodiodo y la salida del transistor colector, aumenta la velocidad por varios órdenes de magnitud sobre los acoplamientos convencional de

fototransistores por reducir la capacitancia de la base-colector de la entrada del transistor, la disposición interna se observa en la Figura 16.

Figura 16

Disposición interna del optoacoplador 6N135.



Nota. Tomado de (VISHAY). Para observar el direccionamiento dirigirse al Anexo B.

Características Optoacoplador 6n135

Tabla 10

Características Optoacoplador 6n135

Características Optoacoplador 6n135
1. Voltajes de prueba de aislamiento: 5300 VRMS
2. Compatible con TTL
3. Velocidades de bits altas: 1 Mbit / s
4. Alta inmunidad a interferencias de modo común
5. Ancho de banda 2 MHz
6. Salida de colector abierto
7. Posibilidad de cableado de base externa
8. Categorización de materiales: para obtener definiciones de cumplimiento, consulte

Nota. Esta tabla muestra las características del aislador. Tomado de (VISHAY)

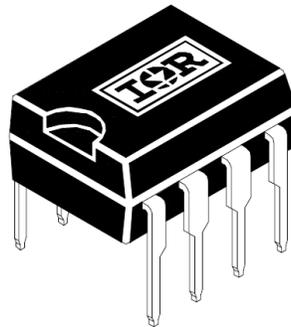
Drivers de disparo de los IGBTs

El IGBT es un dispositivo semiconductor activado por voltaje aplicado entre compuerta y emisor, por lo cual se debe tener en consideración que los IGBT situados en la parte superior del puente deben tener una diferencia de voltaje de control distinta a los situados en la parte inferior, los cuales presentan la misma diferencia. (Erazo Mayorga, 2014)

Debido esto se ha seleccionado el circuito integrado IR2102 se observa en la Figura 17 , cuya función es crear una tierra virtual para la activación del IGBT superior y conservar la referencia propia para en inferior, permitiendo así en manejo de una rama de puente inversor. (Erazo Mayorga, 2014)

Figura 17

Circuito integrado vista externa IR2102



Nota. Esta imagen indica el diseño externo. Tomado de (Rectifier, 2004)

Características principales del IR2102

En la Tabla 11 se menciona las diferentes características así como también niveles de voltaje de operación. Además, la compatibilidad con los elementos de potencia IGBT o MOSFET los cuales se denominan a continuación:

Tabla 11*Características del regulador*

Características principales
1. Permite manejar entradas TTL
2. Opera con voltaje del puente inversor de hasta 600V
3. Genera una tierra virtual para el IGBT superior de la rama
4. Al generar tierra virtual disminuye el uso de fuente para cada IGBT superior de la rama

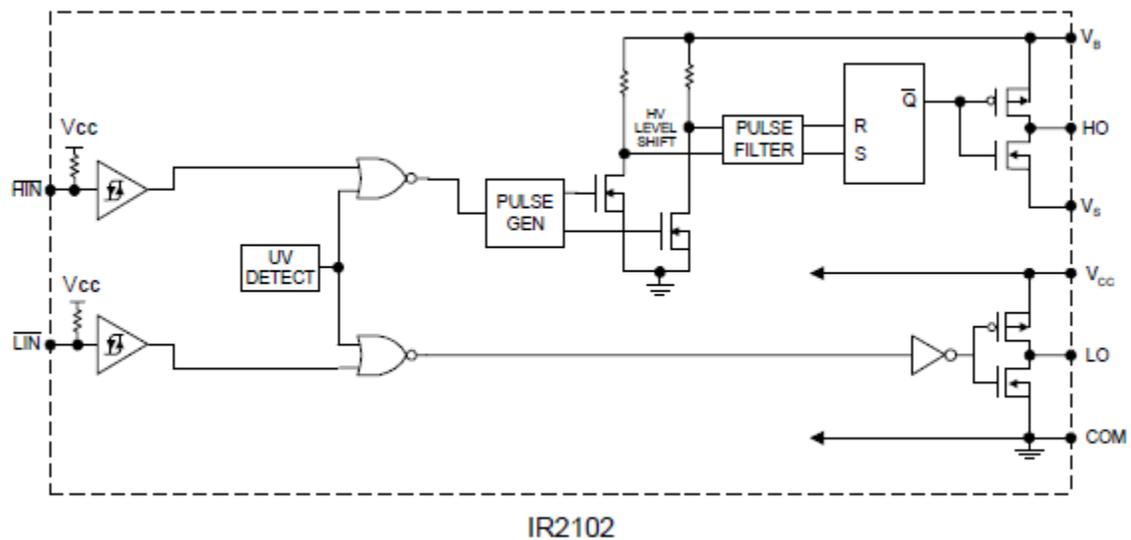
Nota. Esta tabla muestra las características de IR2102. Tomado de (Rectifier, 2004)

Drivers de disparo del IGBT (IR2102)

Los IR2101 (S) / IR2102 (S) son de alto voltaje, alta velocidad controladores de MOSFET e IGBT de potencia con canales de salida referenciados del lado alto y bajo. Propiedad tecnológica CMOS inmunes a HVIC y a pestillos. (Rectifier, 2004)

Permiten una construcción monolítica reforzada. La lógica la entrada es compatible con CMOS estándar o LSTTL la construcción interna del regulador de muestra en la Figura 18 . (Rectifier, 2004)

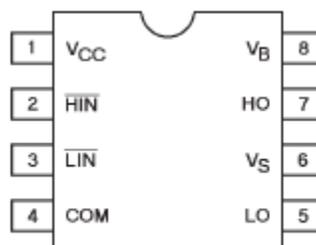
La salida, hasta lógica de 3.3V. Los controladores de salida cuentan con una etapa de búfer de corriente de pulso alta diseñada para un mínimo conductor de conducción cruzada. El canal flotante se puede utilizar para impulsar un MOSFET o IGBT de potencia de canal N en la configuración del lado alto que opera hasta 600 voltios. (Rectifier, 2004)

Figura 18*Conexión interna IR2102*

Nota. Esta imagen muestra la composición interna. Tomado de (Rectifier, 2004)

Distribución de pines (IR2102)

El IR2102 presenta la siguiente distribución de pines en la Figura 19. Las clasificaciones máximas absolutas indican límites sostenidos más allá de los cuales pueden ocurrir daños al dispositivo. Todos los parámetros de voltaje son voltajes absolutos referenciados a COM. Se miden las clasificaciones de resistencia térmica y disipación de potencia montada bajo tablero. (Rectifier, 2004)

Figura 19*Distribución de Pines del IR2102*

Nota. Esta imagen muestra los pines de conexión. Tomado de (Rectifier, 2004)

A continuación en la Tabla 12, se muestra el significado de cada simbología

Tabla 12

Descripción de la simbología IR2102

Símbolo	Descripción
HIN	Entrada lógica para salida de controlador de puerta lateral alta (HO), en fase (IR2101)
$\overline{\text{HIN}}$	Entrada lógica para salida de controlador de puerta lateral alta (HO), fuera de fase (IR2102)
LIN	Entrada lógica para salida de controlador de puerta lateral baja (LO), en fase (IR2101)
$\overline{\text{LIN}}$	Entrada lógica para salida de controlador de puerta lateral baja (LO), fuera de fase (IR2102)
VB	Suministro flotante de lado alto
HO	Salida de accionamiento de puerta lateral alta
VS	Retorno de suministro flotante del lado alto
VCC	Alimentación fija de lado bajo y lógica
LO	Salida de accionamiento de puerta lateral baja
COM	Retorno lateral bajo

Nota. Esta tabla describe la simbología del IR2102. Tomado de (Rectifier, 2004)

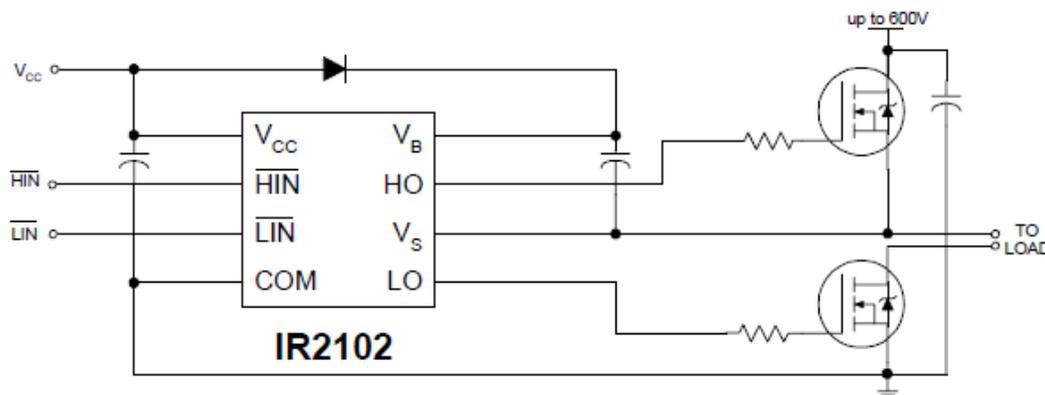
Conexión Típica de Potencia del (IR2102) con IGBT

Para un funcionamiento adecuado, el dispositivo debe utilizarse dentro de las condiciones recomendadas. La clasificación de compensación VS se prueba con todas las fuentes polarizadas a un diferencial de 15 V. En la Figura 20 se muestra la conexión típica del IR2102 con un IGBT. (Rectifier, 2004)

En el Anexo C se puede visualizar más características del IR2102

Figura 20

Conexión típica de potencia del IR2102



Nota. Esta imagen muestra la conexión del IR2102. Tomado de (Rectifier, 2004)

Sistema embebido arduino.

Arduino es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador re-programable y una serie de pines hembra. Estos permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla. (Página Oficial de Arduino, 2005)

Arduino también simplifica el proceso de trabajar con microcontroladores, pero ofrece algunas ventajas para profesores, estudiantes y aficionados interesados sobre otros sistemas a continuación se describe las ventajas de arduino en la Tabla 13.

(Página Oficial de Arduino, 2005)

Tabla 13

Ventajas de la utilización de arduino.

Ventaja	Descripción
Económico	Las placas Arduino son relativamente económicas en comparación con otras plataformas de microcontroladores.

Ventaja	Descripción
Multiplataforma	Las carreras de Arduino Software (IDE) en Windows, Macintosh OS X, y Linux. La mayoría de los sistemas de microcontroladores están limitados a Windows.
Entorno de programación simple y claro	El software Arduino (IDE) es fácil de usar para principiantes, pero lo suficientemente flexible para que los usuarios avanzados también lo aprovechen.
Software de código abierto y extensible	El lenguaje se puede expandir a través de bibliotecas C ++, y las personas que quieran comprender los detalles técnicos pueden dar el salto de Arduino al lenguaje de programación AVR C en el que se basa.
Hardware extensible	Los planos de las placas Arduino se publican bajo una licencia Creative Commons, por lo que los diseñadores de circuitos experimentados pueden crear su propia versión del módulo, ampliarlo y mejorarlo.

Nota. Tomado de Arduino uno (Página Oficial de Arduino, 2005)

Arduino Uno.

Arduino Uno es una placa de microcontrolador basada en ATmega328P. Tiene 14 pines de entrada / salida digital (de los cuales 6 se pueden usar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz (CSTCE16M0V53-R0), una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP y un botón de reinicio. (Página Oficial de Arduino, 2005)

Contiene todo lo necesario para soportar el microcontrolador; simplemente conéctelo a una computadora con un cable USB o enciéndalo con un adaptador de CA a CC o una batería como indica Figura 21. (Página Oficial de Arduino, 2005)

"Uno" significa uno en italiano y fue elegido para marcar el lanzamiento de Arduino Software (IDE) 1.0. La placa Uno y la versión 1.0 del software Arduino (IDE) fueron las versiones de referencia de Arduino, ahora evolucionadas a versiones más recientes. La placa Uno es la primera de una serie de placas USB Arduino y el modelo de referencia para la plataforma; Para obtener una lista extensa de placas actuales, pasadas o desactualizadas, consulte el índice de placas Arduino. (Página Oficial de Arduino, 2005)

Figura 21

Arduino uno

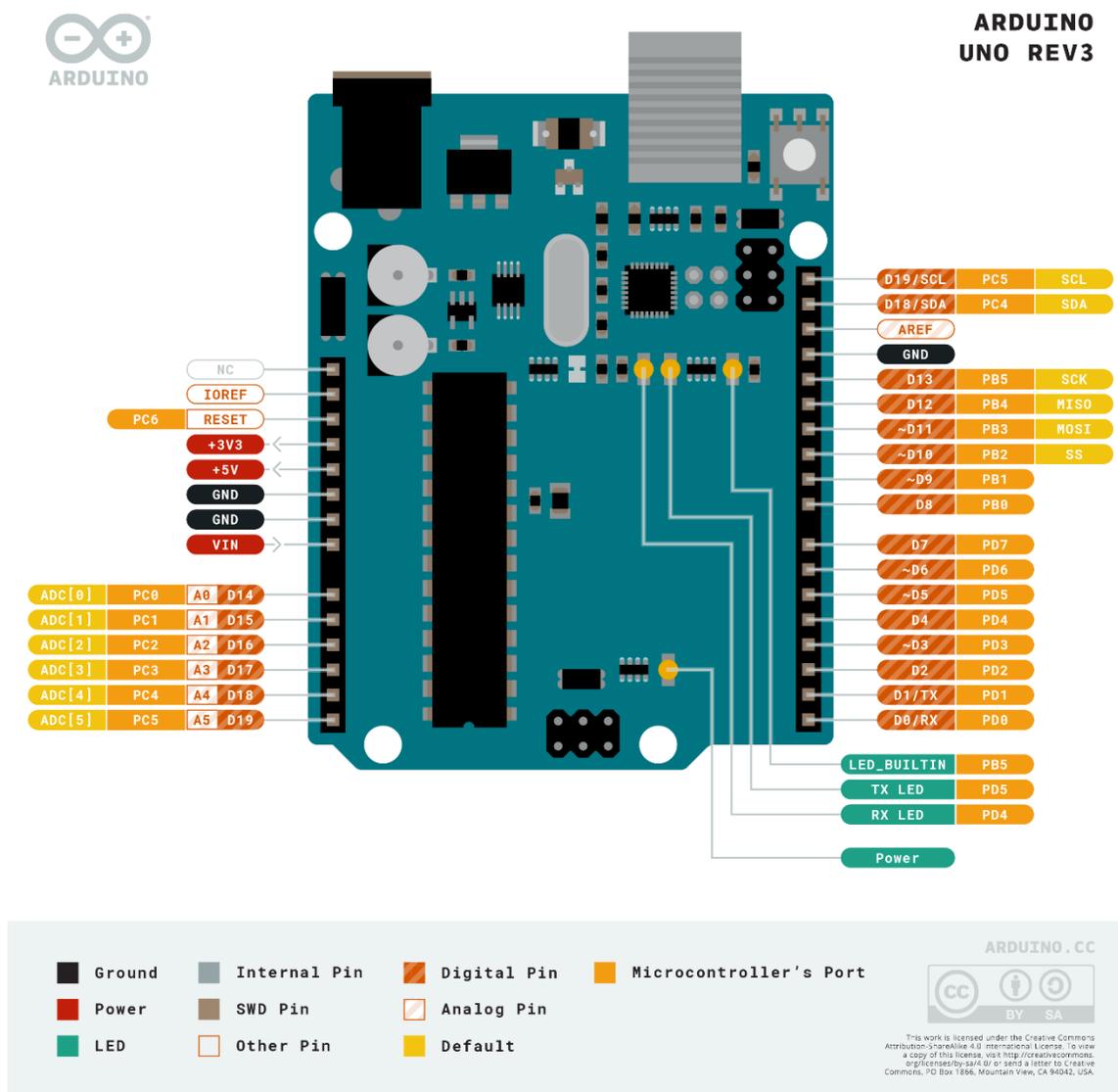


Nota. Diseño externo del arduino uno. Tomado de (Página Oficial de Arduino, 2005)

Los datos de entradas y salidas se observan en la Figura 22, además se visualiza todos los elementos que interactúan, también se especifican las características más importantes del arduino uno en la Tabla 14.

Figura 22

Descripción de entradas y salidas de Arduino Uno



Nota. Localización de pines de conexión externas. Tomado de (Página Oficial de Arduino, 2005)

Tabla 14*Especificaciones Técnicas del Arduino Uno*

Características	Detalles
Microcontrolador	ATmega328P
Tensión de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12 V
Voltaje de entrada (límite)	6-20 V
Pines de E / S digitales	14 (de los cuales 6 proporcionan salida PWM)
Pines de E / S digitales PWM	6
Pines de entrada analógica	6
Corriente CC por pin de E / S	20 mA
Corriente CC para pin de 3.3V	50 mA
Memoria flash	32 KB (ATmega328P) 0,5 KB utiliza el gestor de arranque
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Velocidad de reloj	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Longitud	68,6 milímetros
Anchura	53,4 milímetros
Peso	25 g

Nota. Esta tabla muestra las características del arduino uno. Tomado de (Página Oficial de Arduino, 2005)

Desarrollo

Identificación de la solución

El módulo didáctico posee dos fuentes de poder fijas, un circuito de control cuyo corazón es el arduino uno debido a la capacidad de memoria Flash 32K bytes, SRAM 2K bytes y EEPROM de 1K byte, memoria suficiente para ejecutar las líneas de programación, un puente de IGBT 2MBI 200N – 060 como parte de potencia, asociado al driver IR2102, siendo necesario utilizar un optoacoplador para aislar eléctricamente la parte de potencia y control.

Además contiene tomas para realizar mediciones de cada etapa incluida la placa laca neutra, todo el módulo cuenta con un enchufe de 110V de 3 clavijas (tipo B), un disyuntor para proteger al módulo en caso de existir sobre corriente a causa de posibles errores de conexión que puedan generar en el desarrollo de las prácticas. También cuenta con una lámpara que indica que el módulo se encuentra energizado todo lo mencionado se muestra en el diagrama de bloques, Figura 23.

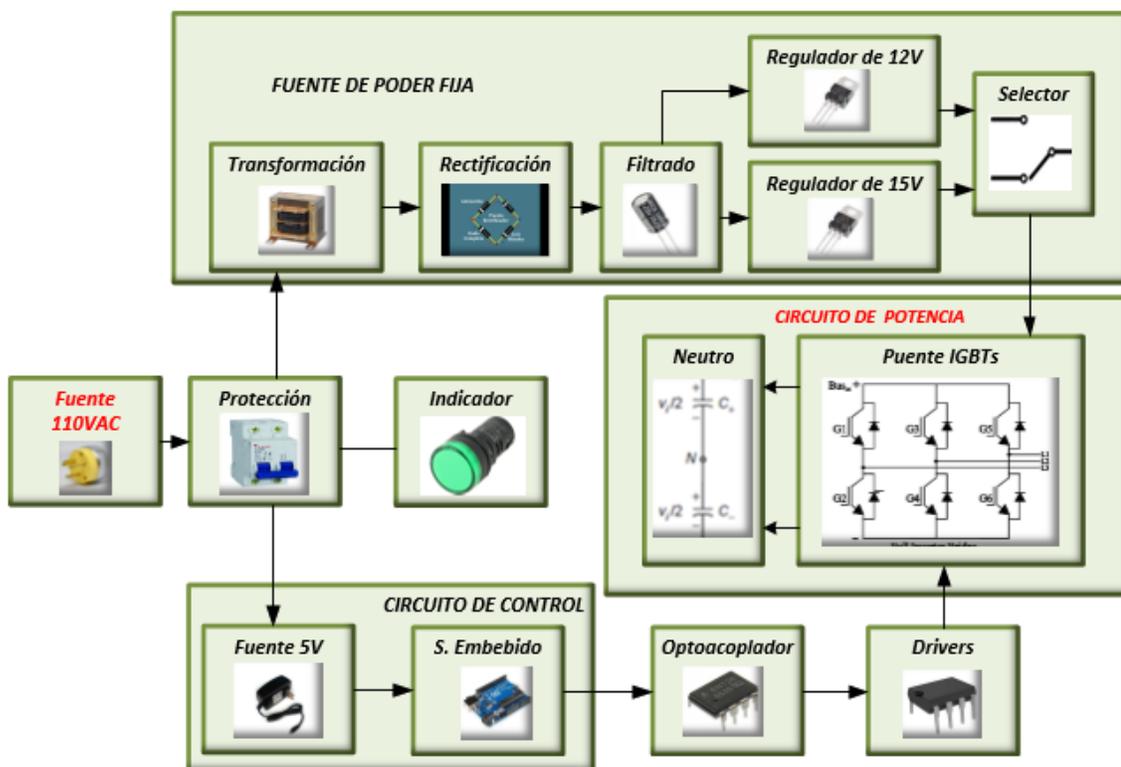
En este capítulo se detalla cómo se diseñó e implemento cada una de las etapas del módulo; en la primera etapa se realizó la construcción de fuentes de tensión fijas con valores de 12Vcd y 15Vcd, necesarias para el funcionamiento de los circuitos electrónicos que realizan la inversión trifásica, cabe recalcar que las fuentes de tensión solo se puede utilizar una a la vez. Así mismo tiene los terminales para conectar una fuente externa de diferente valor de ser el caso.

La siguiente etapa cuenta con un sistema de control el mismo que permite controlar los tiempos de disparo y la modulación de seis señales SPWM (Modulación sinusoidal por ancho de pulso); distribuidas de la siguiente manera dos para cada fase, una para el ciclo positivo y otra para el ciclo negativo estas señales son utilizadas para

la conmutación de los IGBT's mediante optoacopladores (opto diodos con salida a transistor), con el fin de aislar el circuito de control con la parte potencia.

Figura 23

Diagrama de bloques para el inversor trifásico



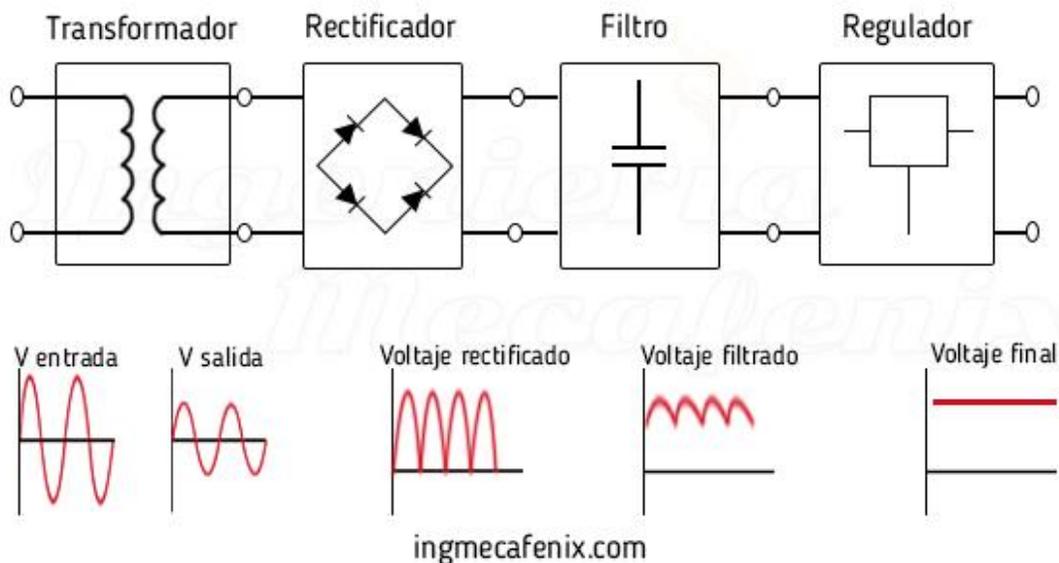
Nota: En esta figura se muestra un diagrama de bloques mismo que describe cada paso ejecutado para realizar la inversión trifásica.

Fuente de alimentación fija

La fuente de alimentación fija es necesaria para proporcionar una tensión a todos los elementos que conforman el módulo de inversión trifásico para ello es necesario realizar ciertos procedimientos la cual permita convertir la corriente alterna en corriente continua. En la Figura 24 se muestra los pasos que se deben realizar para el desarrollo una fuente de tensión fija.

Figura 24

Fases del diseño de una fuente de alimentación fija



Nota. Muestra las Fases del diseño de una fuente de alimentación. Tomado de (Ingeniería Mecafenix, 2018)

Etapa de transformación

En la etapa de desarrollo de fuente de tensión fija es necesario utilizar el transformador la cual se muestra en la Figura 24. El mismo que se encarga de modificar el voltaje de entrada a un voltaje con mayor o menor amplitud en su salida, dependiendo el tipo de fuente a utilizar. Estos dispositivos solo pueden trabajar con voltaje alterno y es uno de los elementos principales de una fuente de alimentación. (Ingeniería Mecafenix, 2018)

En la Figura 25 se indica las partes de un transformador y su estructura interna y externa. La relación de transformación de la energía está dada por la siguiente ecuación en la cual el Voltaje está directamente relacionado con el número de espiras y esto es

inversamente proporcional a la corriente que atraviesa los arrollamientos en la Tabla 15 se muestra el significado y detalle de la formula.

$$\frac{V1}{V2} = \frac{N1}{N2} = \frac{I2}{I1}$$

Tabla 15

Descripción de la relación de transformación.

Datos	Definición
N1	Número de espiras en el arrollamiento primario.
N2	Número de espiras en el arrollamiento secundario.
V1	Voltaje en el arrollamiento primario.
V2	Voltaje en el arrollamiento secundario.
I1	Intensidad de corriente en el arrollamiento primario.
I2	Intensidad de corriente en el arrollamiento secundario.

Nota. Muestra descripción de la relación del transformador. Tomado de (Ingeniería Mecafenix, 2018).

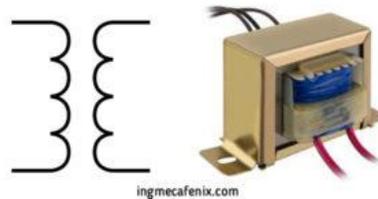
El cálculo realizado en la siguiente ecuación, se determina el valor de la corriente que atraviesa el arrollamiento primario en base al voltaje, corriente del arrollamiento del secundario y el voltaje del arrollamiento primario.

Cálculo de la fuente fija de 12 V.

$$I1 = \frac{I2 * V2}{V1} = \frac{1 \text{ Amp} * 12V}{110V} = 0.11 \text{ Amp}$$

Cálculo de la fuente fija de 15 V.

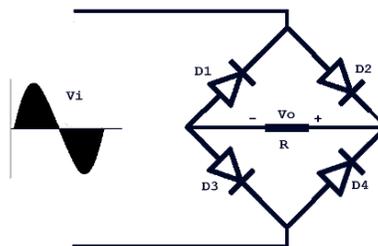
$$I_1 = \frac{I_2 * V_2}{V_1} = \frac{1 \text{ Amp} * 15V}{110V} = 0.14 \text{ Amp}$$

Figura 25*Transformador*

Nota. Muestra la simbología del transformador. Tomado de (Ingeniería Mecafenix, 2018).

Etapa de rectificación

En esta etapa la corriente se convierte en tensión alterna que sale de un transformador a una tensión continua mediante diodos rectificadores cuya función principal rectificar el voltaje del transformador y convertirlo en voltaje directo en la Figura 26 se muestra la simbología del rectificador. (Ingeniería Mecafenix, 2018).

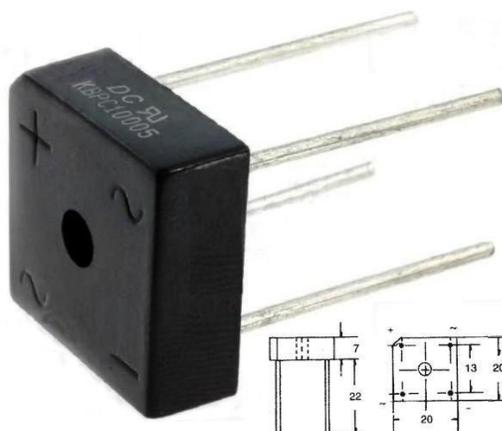
Figura 26*Rectificador*

Nota. Muestra la simbología y la ubicación exacta de los diodos rectificadores. Tomado de (Ingeniería Mecafenix, 2018).

En la Figura 27 se muestra el rectificador de manera física y los pines correspondientes para la instalación.

Figura 27

Estructura externa del puente rectificador



Nota. Muestra el diseño externo del diodo rectificador. Tomado de (Ingeniería Mecafenix, 2018).

La caída de tensión que genera el paso de la corriente por los diodos es de aproximadamente 0,7V cuando el diodo entra en conducción, para desarrollar la fuente fija se utiliza un puente de diodos por lo que se determina que dos diodos trabajan a la vez lo que reduce en 1,4V al valor del voltaje siendo el caso de la fuente que se desea implementar

Se utiliza un transformador con una salida de 12 VAC, la siguiente ecuación permite determinar el valor de la tensión de salida pico (V_{max}).

$$V_{max} = V_i * 1,4142 - D1 - D2$$

$$V_{max} = 12 * 1,4142 - 0,7 - 0,7$$

$$V_{max} = 15,6 V$$

Debido a la necesidad de obtener dos tipos de fuentes fijas de 12VDC y 15VDC para alimentar el puente de IGBT se toma como voltaje de entrada al rectificador de corriente un voltaje de 12 VAC que entrega el transformador en su bobinado secundario.

$$V_{ppr} = 10\% V_{max}$$

$$V_{ppr} = 10\% * 15.6V$$

$$V_{ppr} = 1,56V$$

El voltaje mínimo (V_{min}) se obtiene mediante una formula en la que interviene el valor del voltaje máximo y el valor del voltaje pico rizo.

$$V_{min} = V_{max} - V_{ppr}$$

$$V_{min} = 15,6V - 1,56V$$

$$V_{min} = 14,04V$$

La diferencia entre las tensiones en la entrada y la salida debe ser igual a los 3V de tal manera se puede obtener el voltaje de salida representado de la siguiente manera:

$$V_{out} = V_{min} - 3V$$

$$V_{out} = 14,04V - 3V$$

$$V_{out} = 11,04V$$

Etapas de filtración

En esta etapa del desarrollo de la fuente de tensión el valor de la tensión pico que se obtiene del puente rectificador es necesario emplear un filtro lo que permite tener una tensión constante aunque presenta un pequeño rizo para ello se utilizan capacitores como se muestra en la Figura 28.

Figura 28*Capacitor como filtro*

Nota. Muestra la parte externa del capacitor. Tomado de Filtro capacitor. (Ingeniería Mecafenix, 2018).

La fórmula para calcular el capacitor a seleccionar se muestra a continuación:

$$C = \frac{(5 * I)}{(f * Vmax)}$$

$$C = \frac{(5 * 1)}{(60 * 15,6V)}$$

$$C = 1300\mu F$$

Para la implementación de la fuente de voltaje se utilizará un capacitor de 2200 μ F mismo que se encuentra disponible en el mercado.

El voltaje del capacitor se puede determinar mediante la siguiente fórmula, pero es necesario considerar la disponibilidad en el mercado eligiendo el capacitor que supere el voltaje máximo

$$V_{cap} = V_p * 2$$

$$V_{cap} = 15,6V * 2$$

$$V_{cap} = 31,2 V$$

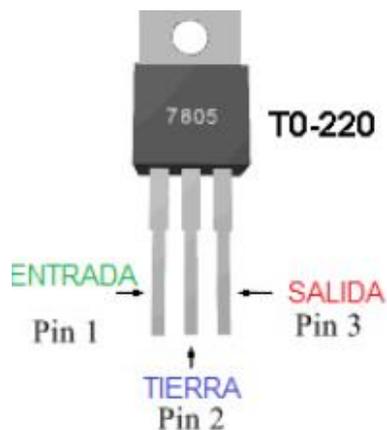
Etapa de regulación

Esta etapa del desarrollo de la fuente de tensión fija se utiliza el regulador 78XX, el cual se encarga de recibir el voltaje del filtro para que en la salida se obtenga un voltaje continuo sin importar las variaciones de voltaje rizado.

Los circuitos integrados reguladores de voltaje de tres terminales como indica la Figura 29. El cual reciben un voltaje de corriente directa no regulado por un terminal, por otro terminal se obtiene el voltaje de salida ya regulado mediante el tercer terminal que dependiendo el caso como es el de los reguladores fijos se conecta directo a tierra. (Boylestad, 2009)

Figura 29

Terminales del regulador



Nota. Esta imagen muestra los puntos de conexión. Tomado de (Ingeniería Mecafenix, 2018).

Reguladores LM 7812, LM 7815.

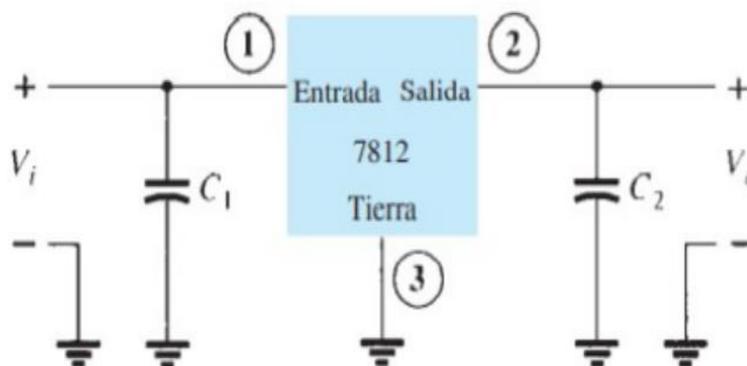
Los reguladores de voltaje fijo cuentan con configuraciones que permiten al usuario establecer un voltaje de salida en un valor deseado. Un dispositivo que permite esta regulación es el LM7812 y el LM7815 el cual se indica en la Figura 30, tiene la

capacidad de entregar un voltaje de salida fijo de 12V y 15V respectivamente y proporciona una corriente superior a 1 A, lo que es necesario para la implementación de la fuente de voltaje fijo. (Boylestad, 2009)

Las fuentes de alimentación DC son dispositivos que a partir de la tensión de red, son capaces de proporcionar una señal de tensión continua para alimentar al circuito al que se conecta. Se utilizan, para alimentar circuitos que requieren trabajar con tensiones continuas; algunos modelos también se utilizan para simular el comportamiento de ciertos componentes como paneles fotovoltaicos o pilas de combustible. (ISO TEST, 1995)

Figura 30

Fuente de alimentación de 12V



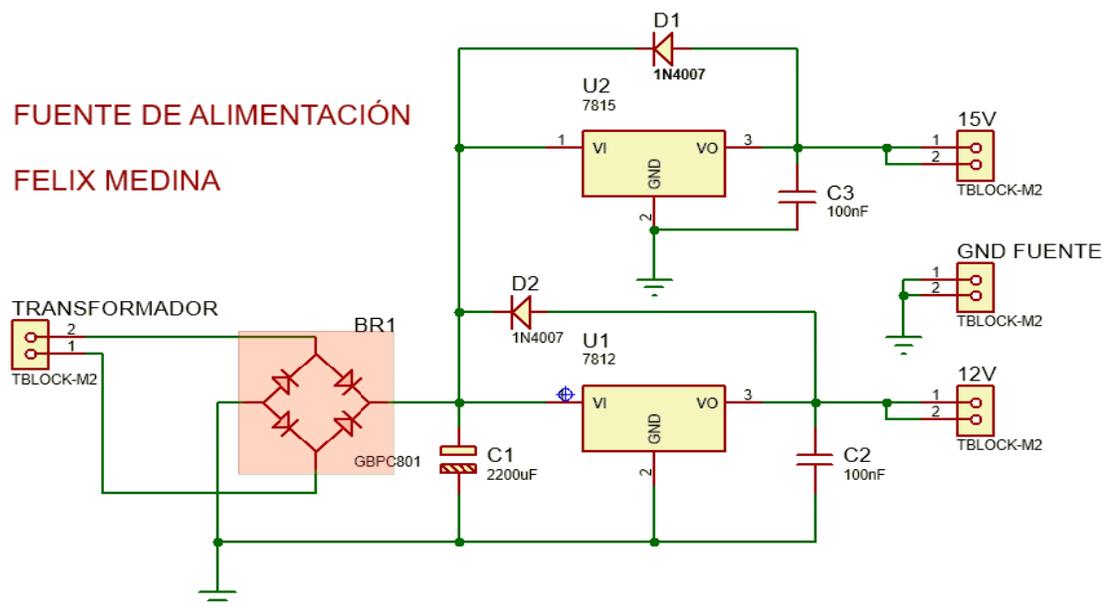
Nota. Muestra el esquema de conexión de elementos de la fuente de alimentación de 12VCD básico. Tomado de Representación de un regulador, Boylestad

Diseño esquemático electrónico de fuente de poder fijo.

El diseño de la fuente de alimentación se realizó mediante el software Proteus el mismo que permite el diseño del esquema electrónico ver Figura 31, placa del circuito impreso ver Figura 32 y la apariencia en 3D del circuito ver Figura 33.

Figura 31

Diseño esquemático electrónico de las fuentes de poder fijas



Nota: Muestra la conexión de los circuitos integrados.

Figura 32

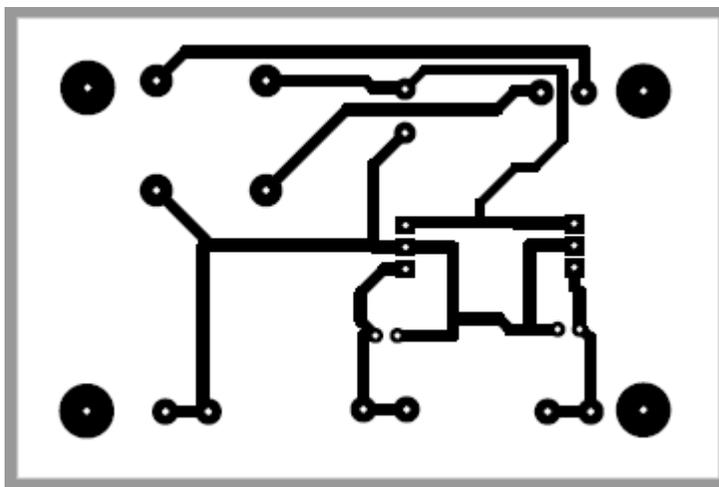
Simulación de la construcción de la fuente de poder regulable



Nota: Muestra simulación en vista 3D de la placa.

Figura 33

Desarrollo de las pistas para el circuito impreso de las fuentes fijas



Nota: Muestra las pistas para realizar la impresión en baquelita.

En base a las necesidades identificadas y a los cálculos realizados en cada una de las etapas de la fuente de poder se implementó las pistas del circuito en baquelita y la construcción de la fuente de tensión fija, como indica el Anexo D.

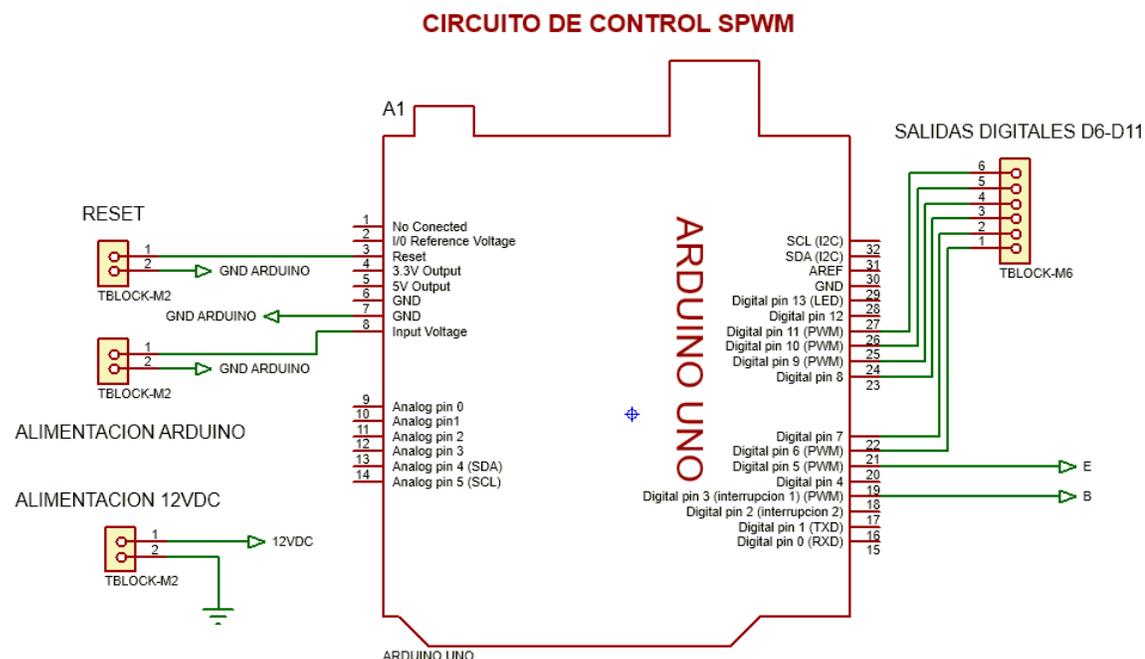
Circuito de control y modulación

Proteus es una herramienta virtual que sirve para el diseño y simulación de circuitos complejos donde se observa el comportamiento ideal de todos los elementos que intervienen en el desfase trifásico. El circuito desarrollado para el control del inversor trifásico está diseñado de tal manera que el Arduino uno pueda ser integrado a la placa de control y mediante el código de programación permita realizar la modulación del SPWM. Se necesita en total seis señales de SPWM debido a que la modulación de cada fase es de 120° y 240° , la inversión se realiza con dos señales SPWM uno para el ciclo positivo y el otro para el ciclo negativo por esa razón se escogió el arduino uno la cual posee un circuito integrado llamado Atmega 328P de acuerdo a sus características

ofrece todo lo necesario para la activación de los IGBTs, en la Figura 34 se muestra el circuito de control de los SPWM y los componentes utilizados.

Figura 34

Circuito de control SPWM



Nota: Este diagrama representa el esquema electrónico del circuito de control.

Circuito de Optoacoplación

El inversor trifásico se define como la inversión de voltaje DC con características similares a la de voltaje AC para ello es necesario aislar la tierra de control con la tierra de potencia el dispositivo electrónico que permite hacer este trabajo es el optoacoplador.

Además este circuito integrado permite obtener la señal SPWM enviada del sistema embebido o microcontrolador con menor ruido debido a su construcción el mismo que funciona con un diodo emisor infrarrojo, ópticamente acoplado a un transistor foto detector de alta velocidad.

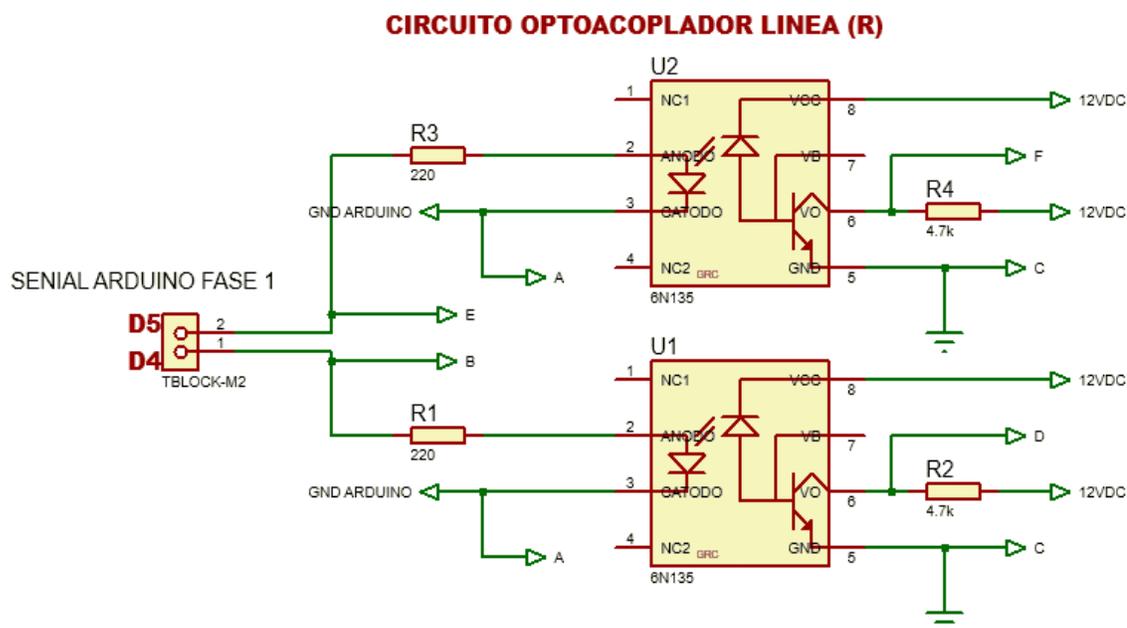
El foto transistor produce una corriente que esta linealmente relacionada a la luz emitida por el diodo emisor infrarrojo. A continuación se representa los circuitos de cada fase R, S y T:

Circuito optoacoplador línea (R).

El control del SPWM de la línea (R) es realizada por el arduino identificada en las salidas digitales D4, D5 los cuales ingresan al circuito de aislamiento 6N135 obteniendo la salida del ciclo positivo D y ciclo negativo F como muestra la Figura 35.

Figura 35

Circuito optoacoplador línea (R)



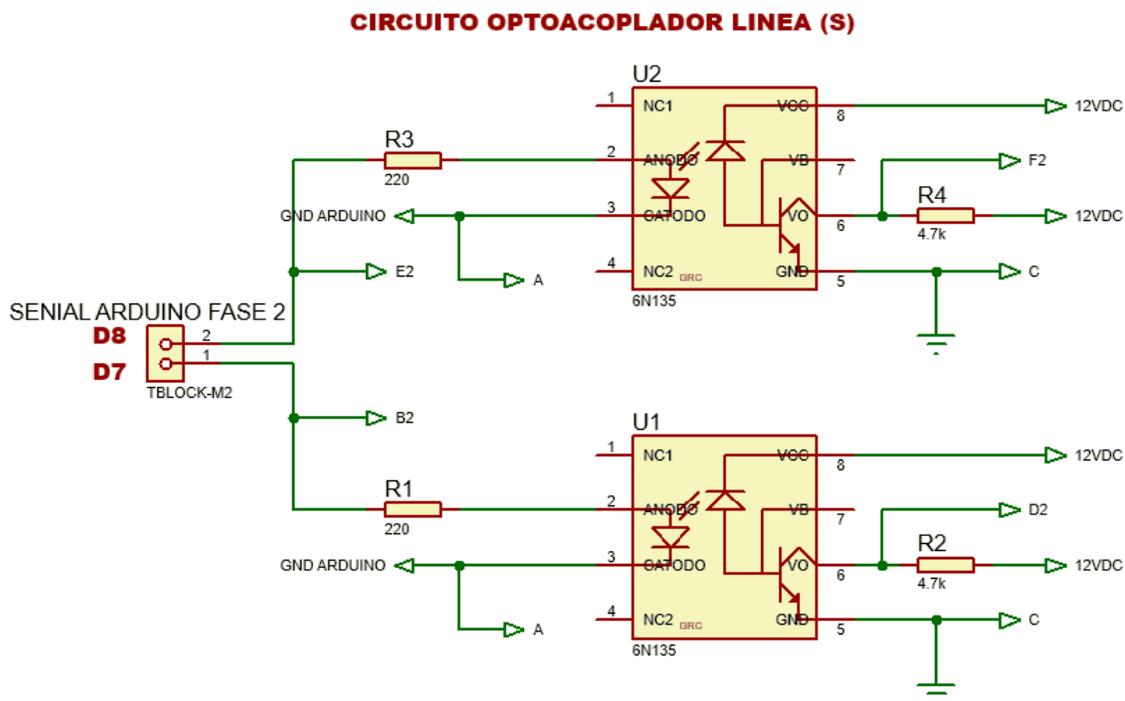
Nota: Representa el esquema electrónico del circuito optoacoplador, Fase (R).

Circuito optoacoplador línea (S).

El control del SPWM de la línea (S) es realizada por el arduino identificada en las salidas digitales D7, D8 los cuales ingresan al circuito de aislamiento 6N135 obteniendo la salida del ciclo positivo D2 y ciclo negativo F2 como muestra Figura 36.

Figura 36

Circuito optoacoplador línea (S).



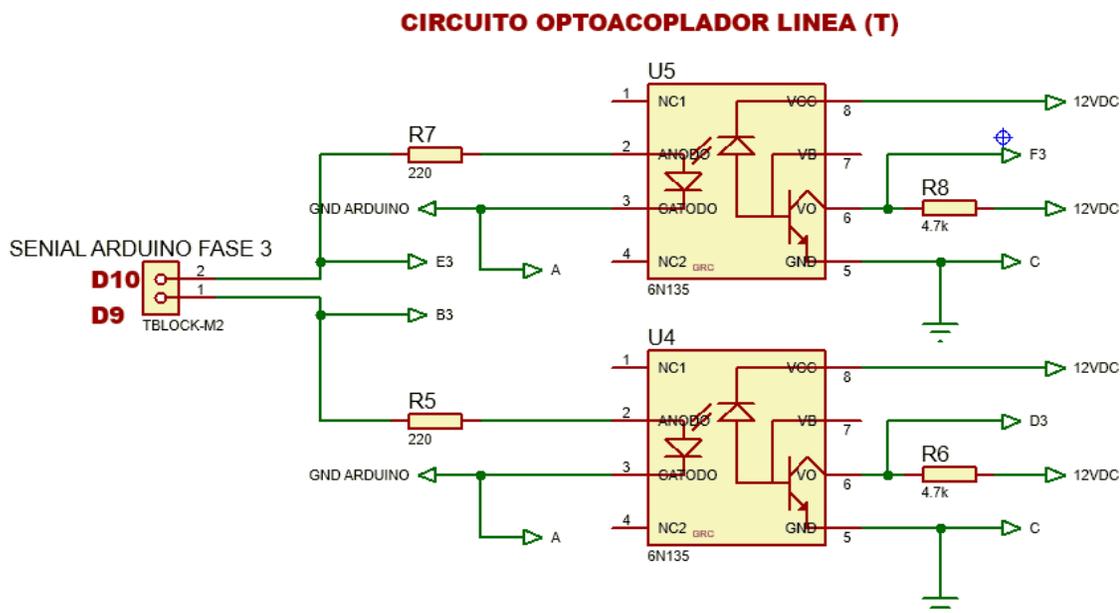
Nota: Representa el esquema electrónico del circuito optoacoplador, Fase (S).

Circuito optoacoplador línea (T).

El control del SPWM de la línea (T) es realizada por el arduino identificada en las salidas digitales D9, D10 los cuales ingresan al circuito de aislamiento 6N135 obteniendo la salida del ciclo positivo D3 y ciclo negativo F3 como muestra Figura 37.

Figura 37

Circuito optoacoplador línea (T).



Nota: Representa el esquema electrónico del circuito optoacoplador, Fase (T).

Circuito de disparo

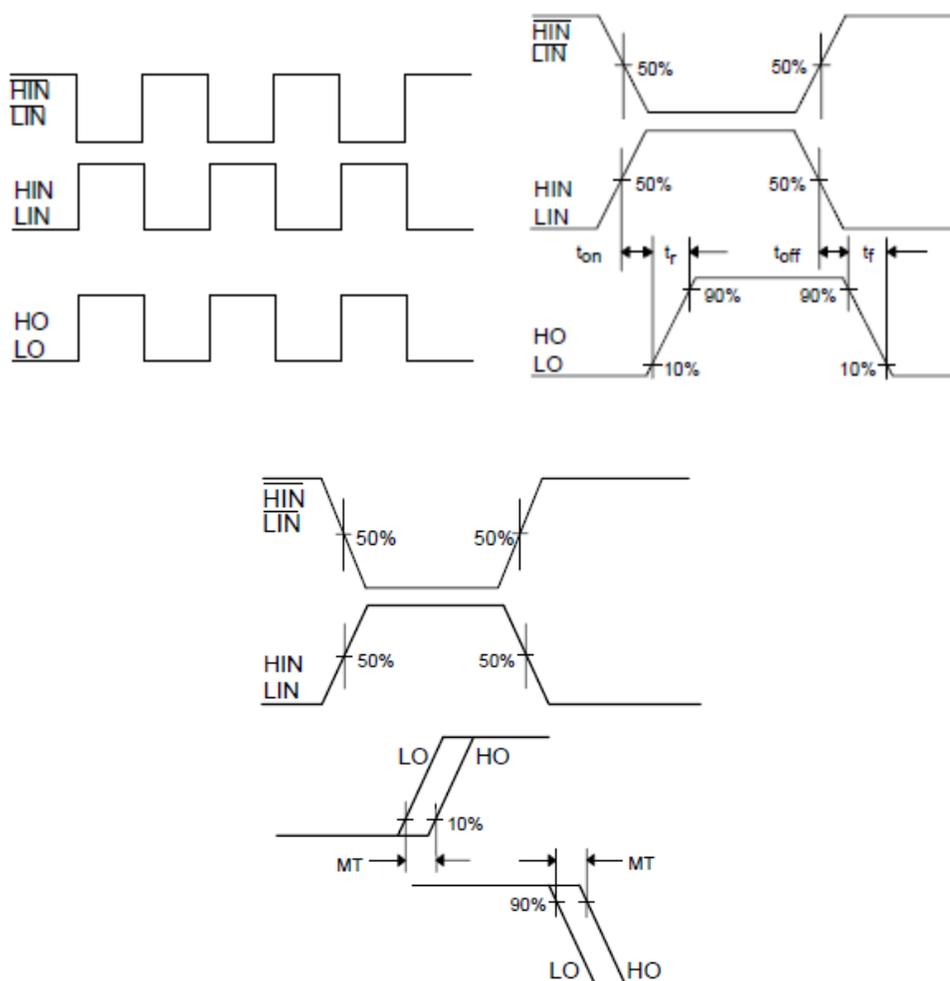
Después de la etapa del optoacoplación viene el driver IR2102 que niega la señal entregada por el optoacoplador. Este driver entrega a la salida un voltaje de 0 y 12 voltios que es el que se debe aplicar en la compuerta IGBT para su conmutación.

La fuente de alimentación del driver es proporcional a la fuente VCD con un voltaje máximo de hasta 600V y los valores de los capacitores recomendados por el fabricante C1 de 22 μ F y C2 de 100nF respectivamente.

En la Figura 38, muestra los rangos de operación del IR2102 los cuales indican la entrada alta HIN y la entrada baja LIN la cual mediante un proceso del circuito integrado se obtiene un voltaje alto y bajo nítido capaz de accionar al IGBT para que realice la conmutación necesaria y desfase correspondiente.

Figura 38

Niveles de operación del IR2102



Nota: Se representa los niveles de salida que depende de la señal que ingresa en el Disparador IR2102. Tomado de (Rectifier, 2004)

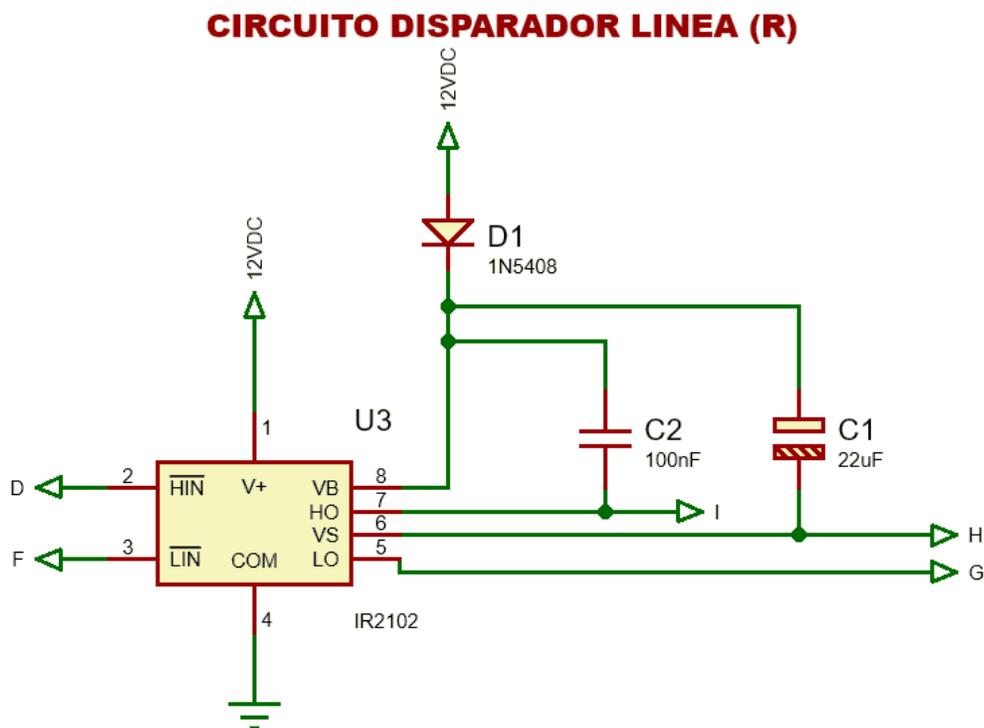
El porcentaje de conmutación de los disparadores varia de 10% a 90% cuando la señal es de 50% se considera como punto puerto donde hay un equilibrio, cuando supera este nivel es considerado como nivel HO y cuando disminuye de este nivel es considerado como LO. A continuación se representa los circuitos de disparo de cada fase R, S y T:

Circuito disparador línea (R).

El control de disparo de la línea (R) es realizada por el disparador IR2102 la cual es necesaria para la conmutación del IGBT, consta de dos entradas una de nivel alto identificada como HIN en donde se conecta la señal del optoacoplador (D) y otra de nivel bajo identificada como LIN la cual se conecta la señal del optoacoplador (F), esta conexión define la señal de salida para la inversión que corresponde a HO en terminal I, VS terminal H y LO terminal G, en la Figura 39, indica la conexión a los elementos de entrada y salida del disparador IR2102.

Figura 39

Circuito disparador línea R



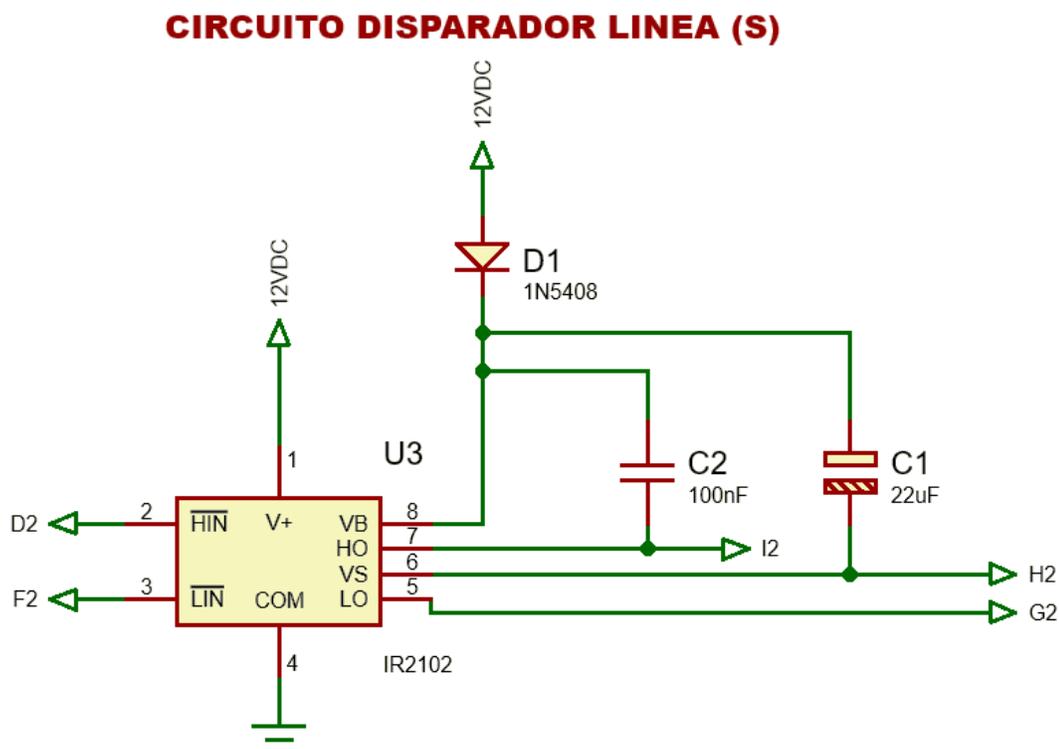
Nota: Representa el esquema electrónico del circuito disparador Fase (R) y las respectivas salidas para la conmutación del IGBT.

Circuito disparador línea (S).

El control de disparo de la línea (S) es realizada por el disparador IR2102 la cual es necesaria para la conmutación del IGBT, consta de dos entradas una de nivel alto identificada como HIN en donde se conecta la señal del optoacoplador (D2) y otra de nivel bajo identificada como LIN la cual se conecta la señal del optoacoplador (F2), esta conexión define la señal de salida para la inversión que corresponde a HO en terminal I2, VS terminal H2 y LO terminal G2, en la Figura 40, indica la conexión a los elementos de entrada y salida del disparador IR2102.

Figura 40

Circuito disparador línea S



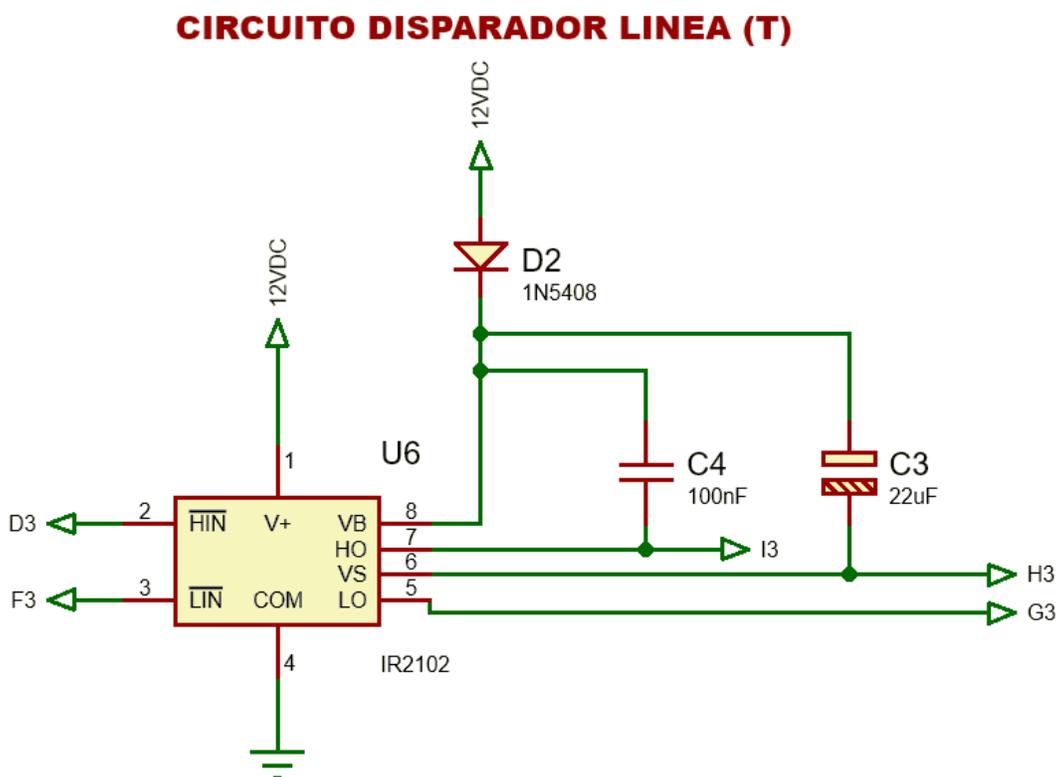
Nota: Representa el esquema electrónico del circuito disparador Fase (S) y las respectivas salidas para la conmutación del IGBT.

Circuito disparador línea (T).

El control de disparo de la línea (T) es realizada por el disparador IR2102 la cual es necesaria para la conmutación del IGBT, consta de dos entradas una de nivel alto identificada como HIN en donde se conecta la señal del optoacoplador (D3) y otra de nivel bajo identificada como LIN la cual se conecta la señal del optoacoplador (F3), esta conexión define la señal de salida para la inversión que corresponde a HO en terminal I3, VS terminal H3 y LO terminal G3, en la Figura 41, indica la conexión a los elementos de entrada y salida del disparador IR2102.

Figura 41

Circuito disparador línea S



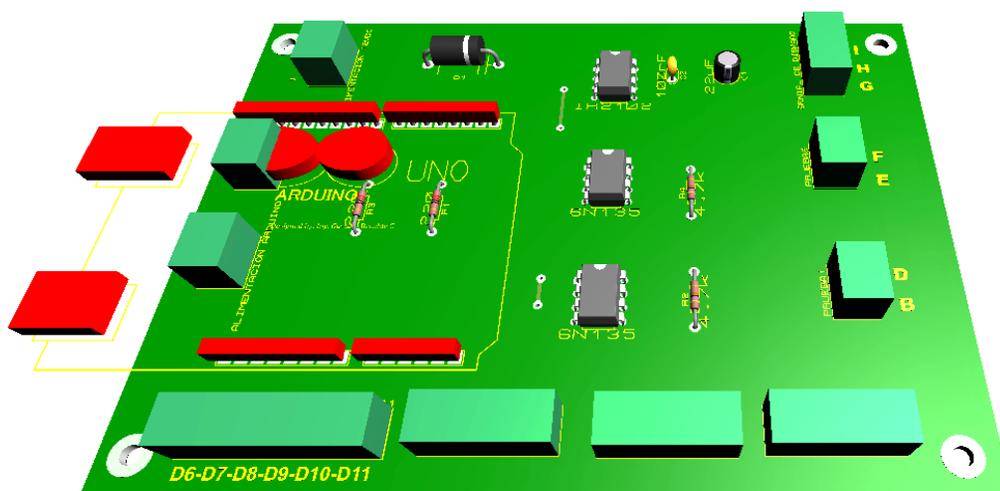
Nota: Representa el esquema electrónico del circuito disparador Fase (S) y las respectivas salidas para la conmutación del IGBT.

Diseño esquemático electrónico del circuito de control.

El diseño esquemático y electrónico se realizó mediante el software proteus el mismo que permite el diseño del esquema electrónico, construcción de la placa del circuito impreso, simulación de proyecto y depuración de errores además, permite una visualización en tercera dimensión 3D para mayor precisión al momento de colocar los elementos en la placa real como se puede observar en la Figura 42.

Figura 42

Simulación de la construcción de circuito de control de la línea (R).

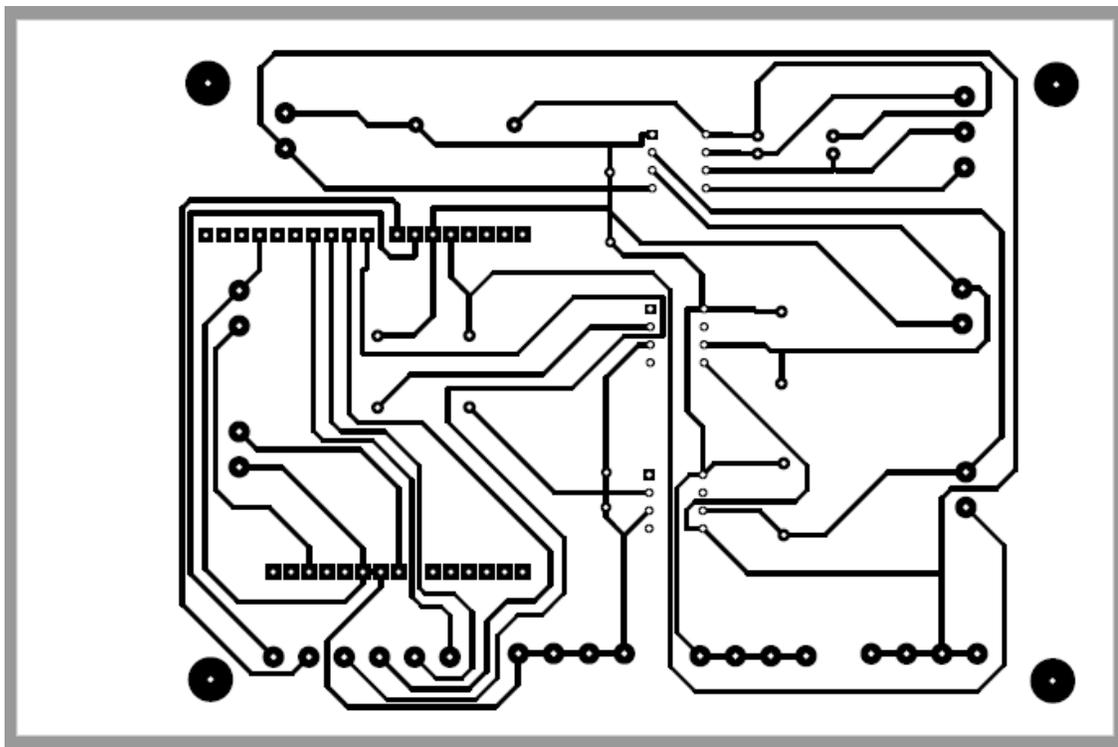


Nota: Esta figura representa la visualización en 3D del circuito de control integrada por sistema embebido arduino. Además, se puede apreciar el circuito de optoacoplación y circuito de disparo de la primera línea (R).

En la vista de tercera dimensión se muestra cada uno de los elementos, terminales de conexión correspondientes para mayor instalación al momento de colocar los dispositivos en la placa de control y potencia del inversor trifásico. En la Figura 43, indica la construcción de las pistas del circuito de control para luego ser implementado de manera física.

Figura 43

Desarrollo de las pistas impresas del circuito de control y línea (R)

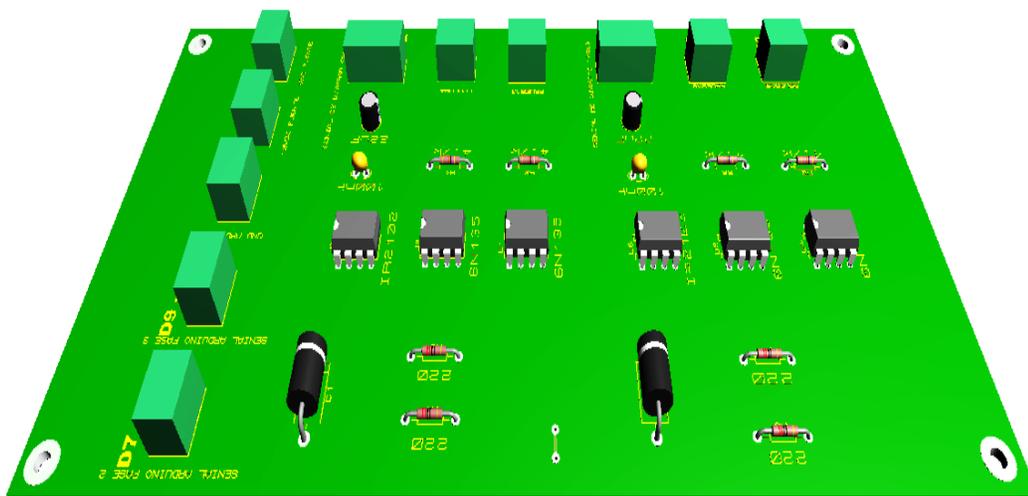


Nota: Esta figura representa las pistas del circuito de control integrada por sistema embebido arduino y el circuito de optoacoplación línea R. En base al diseño realizado en proteus se implementó en baquelita la placa de control como indica el Anexo E.

En la Figura 44 se indica la construcción de la siguiente placa de control, diseñada la conexión línea (S) y línea (T) por medio de proteus el cual permite una mejor comprensión al momento de la instalación y conexión de los elementos en la placa de control y potencia del inversor trifásico.

Figura 44

Simulación del circuito de control línea (S) y línea (T).



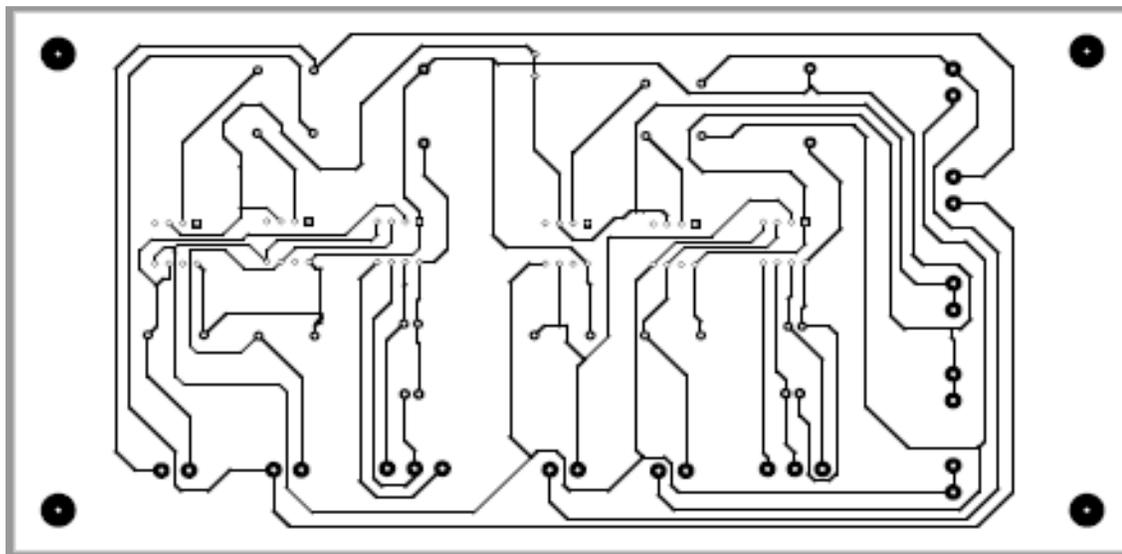
Nota: Esta figura representa la visualización en 3D del circuito de control. Además, se puede apreciar el circuito de optoacoplación y disparo de la línea (S) y línea (T).

En la Figura 45 se indica la construcción de las pistas del circuito de control de la línea (S) y línea (T). El diseño de las pistas se lo realizó en el proteus, software permite manejar el PCB el cual está ubicado en la misma aplicación, proporcionando herramientas que ayudan a modificar la posición de los elementos al gusto del diseñador y crear las pistas de manera automática.

El circuito impreso se lo realiza mediante siguiendo una serie de procedimientos tales como el planchado en la placa baquelita la cual está cubierto de un conductor eléctrico de cobre. Después de realizar este proceso, se continúa con el retiro de cobre mediante el uso de ácido férrico el cual retira todo el cobre proveniente de la placa excepto las pistas, el tiempo que tarda este proceso no está definido debido al comportamiento del ácido y las propiedades que está compuesto. Para finalizar se limpia las pistas con alcohol y está listo para soldar todos los elementos que se requieren en la placa.

Figura 45

Desarrollo de las pistas impresas del circuito de control y línea (R).



Nota: Esta figura representa el desarrollo de las pistas del circuito de control.

En base al diseño realizado en proteus se implementó en baquelita la placa de control línea (S) y línea (T), como indica el Anexo F.

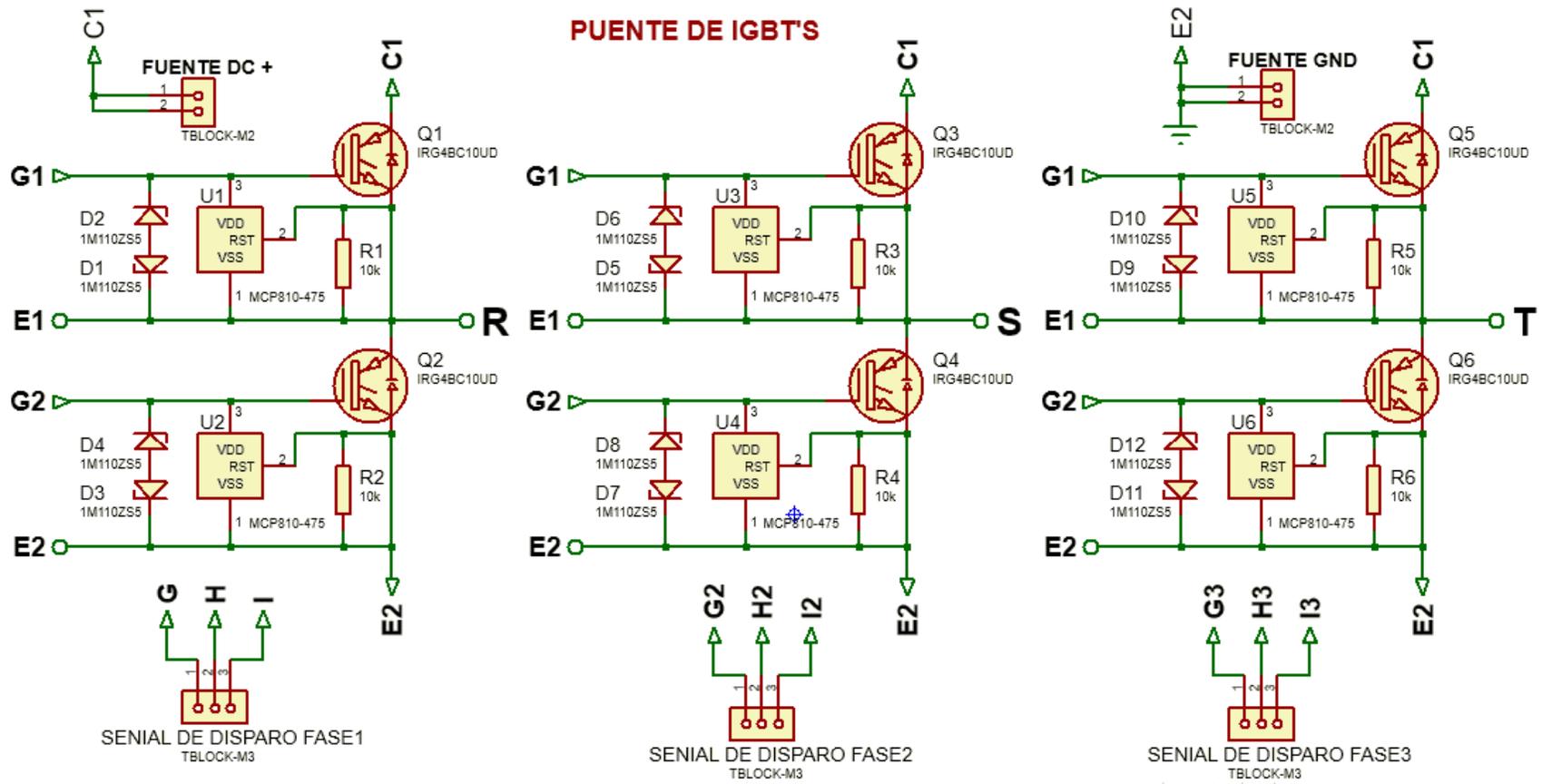
Circuito de Potencia

La inversión trifásica corresponde a la etapa de potencia donde está compuesta por seis IGBT's de potencia los cuales funcionan como interruptores que serán activados o desactivados dependiendo de la señal SPWM enviada por el sistema embebido arduino.

Estas señales están desfasadas 120° por cada línea y son conectadas de manera ordenada en el Gate de cada IGBT que conforman el puente trifásico, en la Figura 46 se indica la conexión al puente IGBT. El mismo que esta simulado en el software proteus con el fin de observar su funcionamiento.

Figura 46

Circuito de potencia, puente IGBT's



Nota: Representa el esquema electrónico del circuito de potencia y los respectivos pines de conexión al puente de IGBT's.

Diseño esquemático electrónico del circuito de potencia.

En esta sección se describe la conexión de los IGBT's el mismo que viene encapsulado en uno solo modulo los dos IGBTs, a continuación se muestra la conexión del encapsulado en la Figura 47.

Además, este encapsulado es proporcionado por la corporación FUJI la cual envía con una hoja de especificaciones dando a conocer todos los datos, configuraciones, terminales y el comportamiento del encapsulado en diferentes sitios ambientales y térmicos con el fin de garantizar su operatividad.

Figura 47

Encapsulado y terminales de conexión del IGBT 2MBI 200N – 060.



Nota: Muestra la estructura externa y los pines de conexión. Tomado de (FUJI ELECTRIC, 1997).

En la Tabla 16 se muestra como es la relación de conexión del IGBT 2MBI 200N – 060 y el driver IR210 en el modo físico y proteus.

Tabla 16

Relación de conexión del IGBT 2MBI 200N – 060 y el driver IR2102

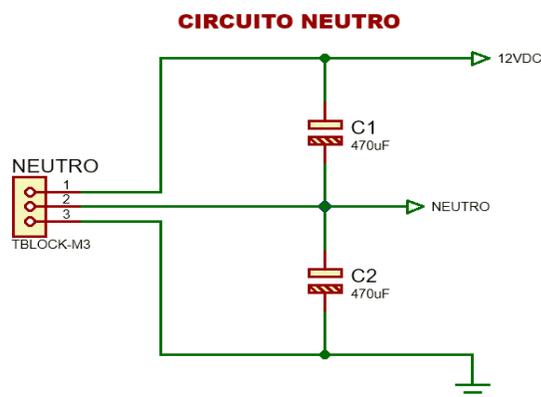
Conexión del IGBT 2MBI 200N – 060 y el driver IR2102						
IGBT 2MBI 200N – 060				Driver IR2102		
Pines del	Conexión física	Conexión en proteus			Conexión física	N° DE PIN
		FASE R	FASE S	FASE T		
	C1	Fuente DC (+)				
	E2	Fuente DC (-)				
I G B T	E1	H	H2	H3	VS	6
	G1	I	I2	I3	HO	7
	G2	G	G2	G3	LO	5
	E2	Fuente GND				
	C2E1	R	S	T		

Nota: Representa la conexión entre proteus y conexión al módulo IGBT.

Circuito Neutro

Como etapa final se tiene el circuito neutro debido a que se necesita una tierra para la visualización de señales SPWM provenientes de los elementos de potencia (IGBT's) y apreciar las características de amplitud y desfase correspondiente de cada línea de fuerza.

Además, esta etapa es muy necesario debido a que el driver IR2102 necesita una tierra para realizar el disparo al elemento de potencia. El circuito de configuración neutra se muestra en la Figura 48. La implementación de esta configuración se muestra en el Anexo G.

Figura 48*Configuración Neutra*

Nota: Representa el esquema electrónico del circuito de configuración neutra y los elementos que son utilizadas para el desarrollo.

Diseño esquemático electrónico del circuito neutro.

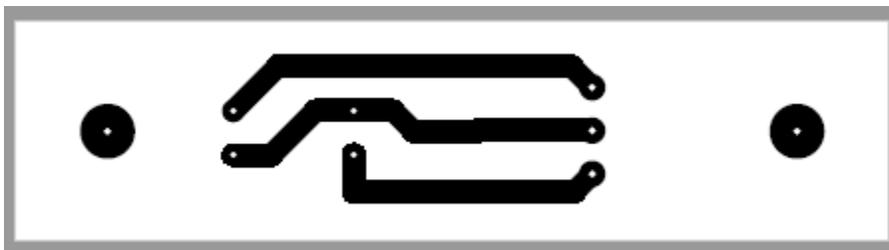
El diseño esquemático y electrónico se realizó mediante el software proteus el mismo que permite el diseño del esquema electrónico, pistas y simulación de proyecto. Además, permite una visualización en tercera dimensión 3D para colocar los elementos en la placa real como se puede observar en la Figura 49. En la Figura 50 muestra el diseño del circuito impreso de la configuración neutra con capacitores.

Figura 49*Vista 3D del circuito neutro*

Nota: Esta figura indica los elementos utilizadas para el desarrollo del circuito de configuración neutra.

Figura 50

Circuito impreso de la configuración neutra.



Nota: Esta figura indica las pistas del circuito de configuración neutra.

Código ejecutable del inversor trifásico y modulación SPWM

El código de ejecución es utilizado para poner en funcionamiento el inversor trifásico mediante el sistema embebido Arduino. Además, es realizado en el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE); que luego lo convierte en un archivo de codificación hexadecimal para ser guardado en el microcontrolador del Arduino. En el Anexo H se puede observar todas las líneas de programación. A continuación se incluye el código relevante, que permite realizar los cálculos y el control de tiempo necesarios para la modulación.

```

if(inicio==1) // ingresa a la condición verdadero o falso verificando el inicio
{
  numero1=senal60[xy]; // en la vvariable numero1 guardo la trama de la señal60
  if(senal60[xy]>=254) // si la señal60 es igual o mayor que 254 se cumple
  {
    // Llega los datos, suma los tiempos, calcula desfase y reinicia proceso
    xy=0; // igualo a 0 el vector xy
    condes120=0; // igualo a 0 a la variable condes120
    condes240=0; // igualo a 0 a la variable condes240
    op=1; // añado el calor de 1 a la variable op
    conver120=((desfase)*120)/180; //realizo los cálculos y los guardo en la variable
    conver240=((desfase)*240)/180; // conver120 y conver 240
  }
}

```

contpulso=0; // igualo a 0 a la variable contpulso

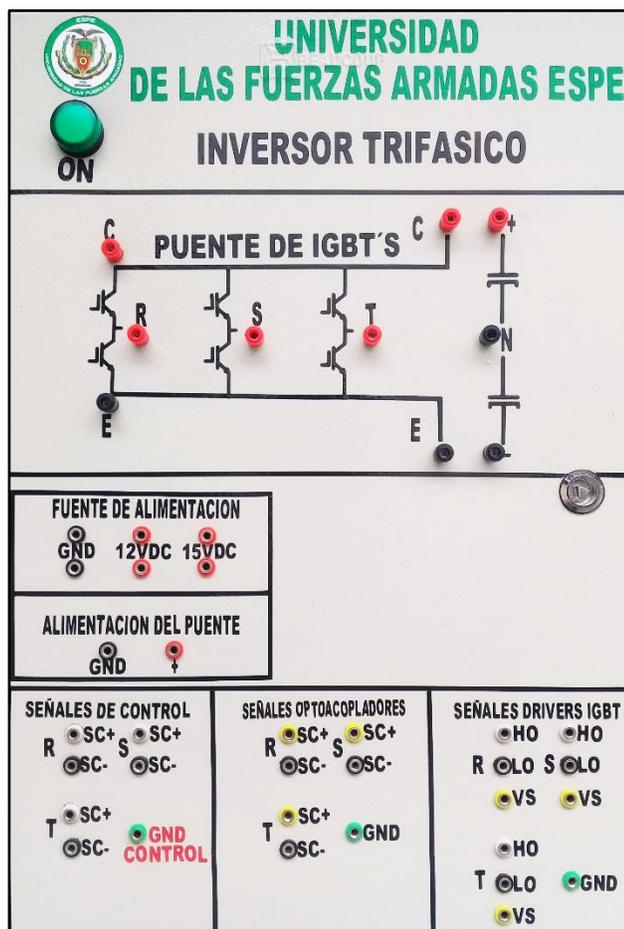
inicio=0; } // igualo a cero la variable inicio

Diseño estructural del inversor trifásico

La estructura del módulo del inversor trifásicos es realizada con el concepto de un módulo portátil, en la parte frontal se encuentran los elementos que son necesarios para la el monitoreo de señales de manera que permita al operador tener acceso a lo necesario como indica la Figura 51.

Figura 51

Vista frontal del módulo inversor



Nota: Los planos del módulo se indican en el Anexo I.

Conexión del enchufe

Para energizar el módulo es necesario conectar a una toma de 110VAC por lo que se posee le enchufe que se observa en la Figura 52. El cual dispone de tres terminales denominadas clavijas (Tipo B).

Figura 52

Conexión del enchufe (tipo B)



Nota: Esta figura representa la conexión física.

Conexión de dispositivo de protección del módulo

Para conservar los elementos electrónicos del módulo se realizó la conexión de un dispositivo de protección denominada disyuntor, observar Figura 53. Este dispositivo funciona como interruptor automático cortando el paso de la corriente eléctrica si se cumplen determinadas condiciones, tales como altibajos de tensión.

Figura 53

Conexión del disyuntor.



Nota: Esta figura representa la conexión física.

Conexión indicador de encendido del módulo

Con el objetivo de identificar que el módulo se encuentre energizado tiene un indicador como muestra la Figura 54.

Figura 54

Luz indicadora del módulo.



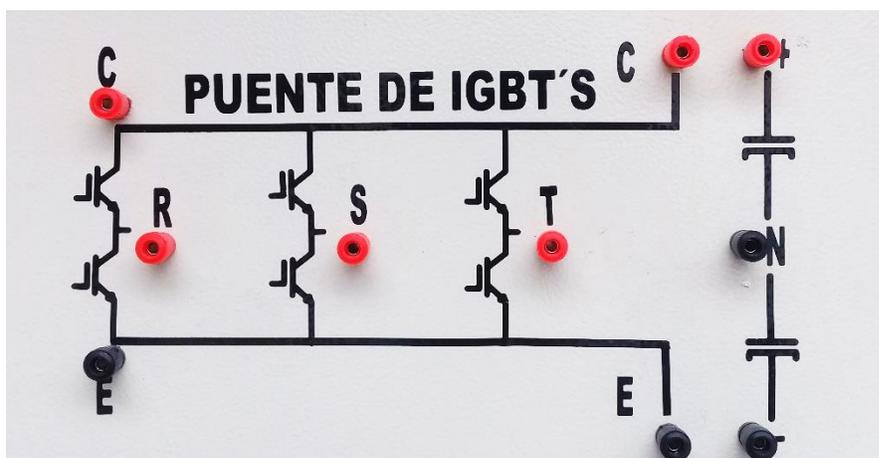
Nota: Esta figura representa la conexión física.

Conexión al puente de IGBT's

El puente de potencia está constituido por tres encapsulados IGBT's 2MBI 200N-060 los mismos que realizan la conmutación y la inversión trifásica. A continuación en la Figura 55, muestra los pines de conexión de estos dispositivos.

Figura 55

Puente de IGBT's



Nota: Esta figura representa la conexión física.

Conexión de la fuente de alimentación.

El inversor trifásico necesita ser alimentado por una tensión DC para luego mediante la modulación se logre realizar el desfase correspondiente de 120° , para ello se crearon dos fuentes de tensión de 12VDC y 15VDC, los mismos que funcionan una a la vez como muestra la Figura 56. Pero caso que el usuario desee energizar con un valor de voltaje diferente, el módulo cuenta con pines de alimentación del puente los cuales están ubicados debajo de la fuente de tensión de 12VDC y 15VDC como se observa en la Nota: Esta figura representa la conexión física.

Figura 57.

Figura 56

Fuente de alimentación de 12VDC y 15 VDC



Nota: Esta figura representa la conexión física.

Figura 57

Alimentación del puente de IGBT's



Nota: Esta figura representa la conexión física.

Tomas de mediciones de las señales de control

Estas tomas pertenecen directamente a la parte de control los mismos que realizan el proceso de modulación, están distribuidas para las fases R, S, T y funcionan al energizarse el módulo como muestra en la Figura 58.

Figura 58

Tomas de mediciones de las señales de control



Nota: Esta figura representa la conexión física.

Tomas de mediciones de señales de optoacopladores

En este punto los optoacopladores realizan el proceso aislamiento del circuito de control con la potencia, están distribuidas para las fases R, S, T y funcionan al energizarse la alimentación al puente de IGBT's como muestra en la Figura 59.

Figura 59

Tomas de mediciones de señales de optoacopladores



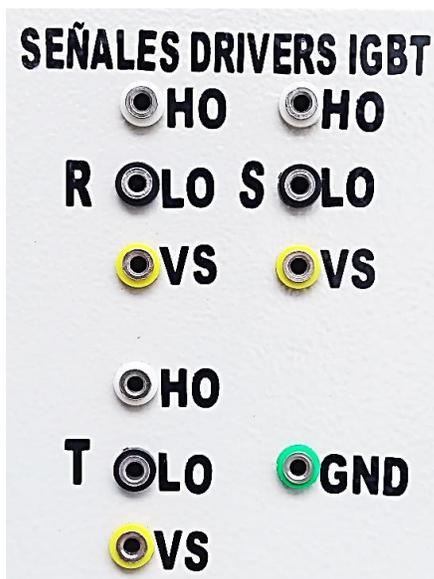
Nota: Esta figura representa la conexión física.

Tomas de mediciones de las señales de drivers de disparo

En estos terminales se puede medir la los parámetros de desfase de cada línea R, S y T por medio de los IR2102 los cuales disparan la señal recibida a los IGBT's para su respectiva conmutación e inversión como se observa en la Figura 60.

Figura 60

Tomas de mediciones de las señales de drivers de disparo.



Nota: Esta figura representa la conexión física.

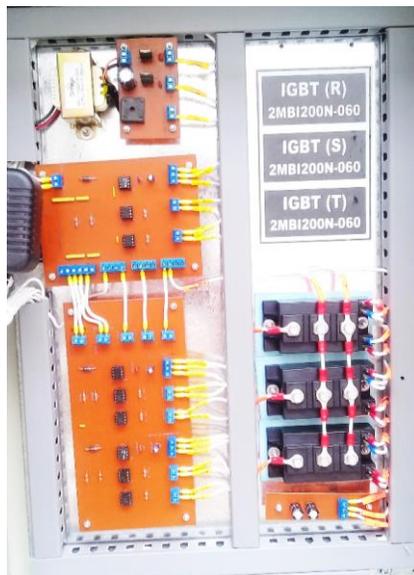
Conexión de los elementos internos del módulo

En la Figura 61 se muestra la conexión interna de los elementos que conforman el módulo tales como; fuentes de tensión, placas de control, circuitos de optoacoplación, circuitos de disparo, circuito neutro y los encapsulados de potencia IGBT's 2MBI 200N - 060. En la Nota: Esta figura representa la conexión física.

Figura 62 se puede apreciar el cableado correspondiente de cada una de las placas al panel frontal y la conexión de indicador de luz del módulo el cual permite la visualización del encendido y apagado.

Figura 61

Conexión de los elementos internos del módulo de inversión trifásico.



Nota: Esta figura representa la conexión física.

Figura 62

Conexión al panel frontal del módulo y luz indicadora



Nota: Esta figura representa la conexión física.

Procedimiento de operación

Los procedimientos de operación del módulo contiene las indicaciones e instrucciones que la persona encargada de poner en funcionamiento el modulo inversor debe seguir para realizar la comprobación y verificación del desfase correspondiente a las líneas R, S y T, en la tabla se detallan las instrucciones que se deben seguir paso a paso. En el Anexo J se indica el manual de procedimiento.

- **Paso N°1:** Verificar que el modulo no este energizado para lo cual se debe comprobar que el enchufe este desconectado a la red eléctrica.
- **Paso N°2:** Verificar que ningún cable debe estar conectado en el panel frontal del módulo.
- **Paso N°3:** Desactivar el disyuntor en caso de que este activo.
- **Paso N°4:** Conectar el enchufe o clavija (Tipo B) a la red eléctrica de 110VAC.
- **Paso N°5:** Activar el disyuntor a la posición de encendido.
- **Paso N°6:** Observar que la luz indicadora del módulo este encendida, caso contrario verificar la energía eléctrica o el enchufe del módulo se encuentre bien conectado.
- **Paso N°7:** Utilizando el multímetro medir las fuentes de alimentación fijas de 12VDC y 15 VDC.
- **Paso N°8:** Con la ayuda de osciloscopio medir los parámetros que ofrece las señales de control (R, S y T); tanto para el ciclo positivo y negativo de cada fase.
- **Paso N°9:** Alimentar los puentes IGBT's con la una sola fuente de tensión fija sea de 12VDC o 15VDC, si es el caso de requerir un voltaje elevado o de menor valor alimentar en los terminales de alimentación del puente.
- **Paso N°10:** Mediante el osciloscopio medir los valores de aislamiento de cada una de las fases en la sección de los optoacopladores.

- **Paso N°11:** Verificar que el desfase obtenido sea de 120° o de 5.55 mS.
- **Paso N°12:** En la sección de señales de los drivers de los IGBT's medir los parámetros de disparo tales como: nivel alto HO, nivel bajo LO y VS de cada una de las fases.
- **Paso N°13:** Desconectar todos los cables de las señales de control, optoacopladores y drivers.
- **Paso N°14:** Alimentar el puente de IGBT'S de la parte superior del módulo con el mismo valor de voltaje con la que se energiza las señales del driver y optoacopladores.
- **Paso N°15:** Energizar los pines del circuito neutro.
- **Paso N°16:** Medir el desfase de en los pines de salida del puente de los IGBT's mediante el osciloscopio.
- **Paso N°17:** Desconectar todos los cables de conexión y guardar.
- **Paso N°18:** Desactivar el disyuntor y finalizar el trabajo.

Pruebas realizadas a los circuitos del módulo inversor.

Con la finalidad de comprobar la funcionalidad del módulo de inversión trifásico se realizó mediciones en los terminales del panel frontal para demostrar el funcionamiento y comprobar los parámetros dados en simulación en lo práctico. Una vez concluidas las verificaciones de la señales de control y potencia siguiendo los procedimiento de operación realizadas en el procedimiento de operación.

Todas las simulaciones correspondientes a cada una de las fases se muestran en el Anexo K y resultados obtenidos se describen a continuación:

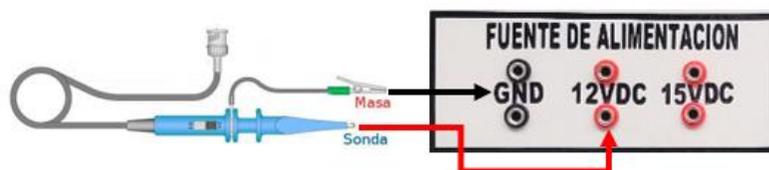
Prueba de la fuente de tensión.

Para realizar las pruebas de fuentes de tensión se realiza la siguiente conexión en el módulo como muestra la Figura 63. La Nota: Esta figura representa la conexión física para realizar las pruebas.

Figura 64 muestra los resultados reales de la fuente de tensión fija mediante un osciloscopio de dos canales. En la Tabla 17 se observan los valores obtenidos previos a la medición realizada.

Figura 63

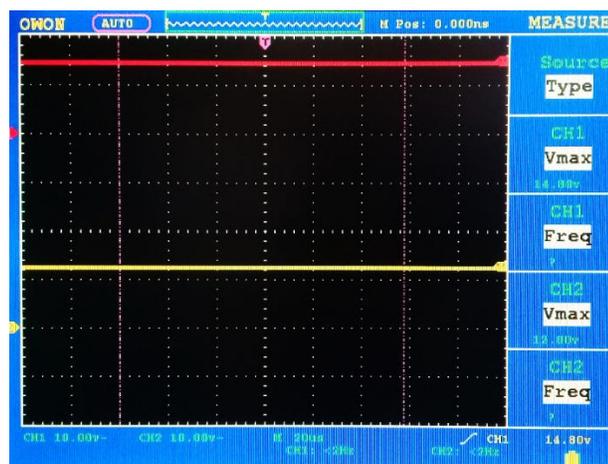
Conexión de la fuente de alimentación



Nota: Esta figura representa la conexión física para realizar las pruebas.

Figura 64

Prueba de resultados de fuentes de tensión



Nota: Los datos de las fuentes se observan a la derecha de la imagen.

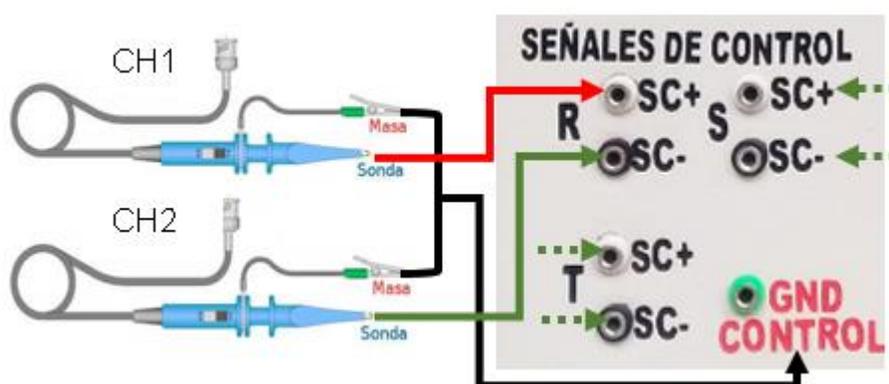
Tabla 17*Mediciones fuentes de alimentación fija*

Tipo de señal	Canal del osciloscopio	Medición ideal	Medida real
Fuente de alimentación fija DC	CH1	15 V	14,80 V
	CH2	12 V	12,80 V

Nota: Esta tabla muestra los datos obtenidos de la medición.

Prueba del circuito de control y modulación.

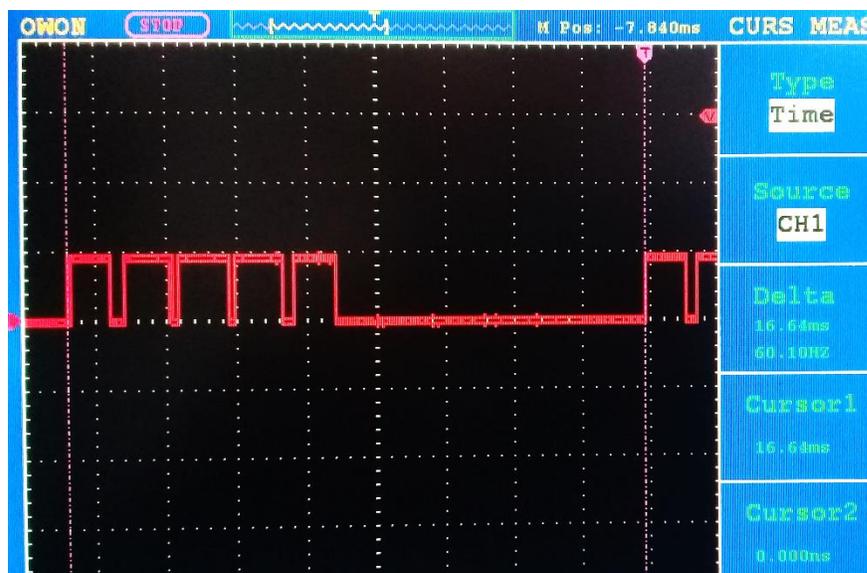
Para realizar las pruebas del circuito de control y modulación se realiza la siguiente conexión en el módulo como muestra la Figura 65. En la Figura 66 muestra los resultados reales de la señal de control fase (R) tales como: periodo y frecuencia. En la Tabla 18 describe los valores obtenidos de cada una de las fases.

Figura 65*Conexión para la medición del circuito de control*

Nota: Esta figura representa la conexión física para realizar las pruebas.

Figura 66

Prueba de resultados del circuito de control y modulación de la fase R



Nota: Los datos de señal modulada se observan a la derecha de la figura.

Tabla 18

Mediciones de cada una de las fases RST

Señal de control	Canal del Osc.	Voltaje	V. Periodo (ms)		V. frecuencia (Hz)	
			Ideal	Medido	Ideal	Medido
Fase	N°	Max.	Ideal	Medido	Ideal	Medido
R	CH1	4,60 V	16,66 ms	16,39ms	60 Hz	60,39 Hz
S	CH2	4,80 V	16,66 ms	16,54ms	60 Hz	60,56 Hz
T	CH1	4,60 V	16,66 ms	16,64ms	60 Hz	60,10 Hz

Nota: Esta tabla muestra los datos obtenidos de la medición.

El desfase de cada una de las líneas del circuito de control se lo describe a continuación en la Tabla 19. Las mediciones se las realiza mediante una referencia principal línea (R) ciclo positivo con el uso del osciloscopio, Figura 67.

Figura 67

Medición del tiempo de desfase línea R ciclo positivo con respecto al desfase de la línea S ciclo positivo del circuito de control



Nota: Los datos de medición de desfase se observan a la derecha de la imagen.

Tabla 19

Mediciones del circuito de control líneas (R, S y T).

Mediciones del circuito de control					
Señal de control	Desfase ciclo positivo		Voltaje Aplicado	Desfase ciclo negativo	
	Tiempo (ms)	Frecuencia (Hz)		Tiempo (ms)	Frecuencia (Hz)
R	16,64 ms	60,10 Hz	5 V	8,32 ms	120,2 Hz
RS	5,84 ms	171,2 Hz	5 V	14,16 ms	70,62 Hz
RT	11,76 ms	85,03 Hz	5 V	3,52 ms	284,11 Hz

Nota: Esta tabla muestra los datos obtenidos de la medición.

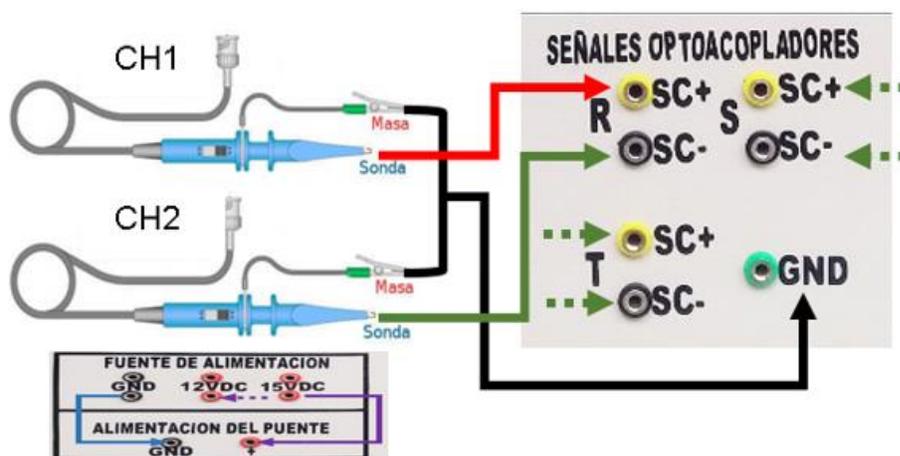
Prueba del circuito de optoacoplación.

Para realizar las pruebas del circuito de optoacoplación se realiza la siguiente conexión en el módulo como muestra la Figura 68. El desfase de cada una de las líneas

del circuito de optoacoplación se lo describe a continuación en la Tabla 20. Las mediciones se las realiza mediante una referencia principal línea (R) ciclo positivo con el uso del osciloscopio, Figura 69.

Figura 68

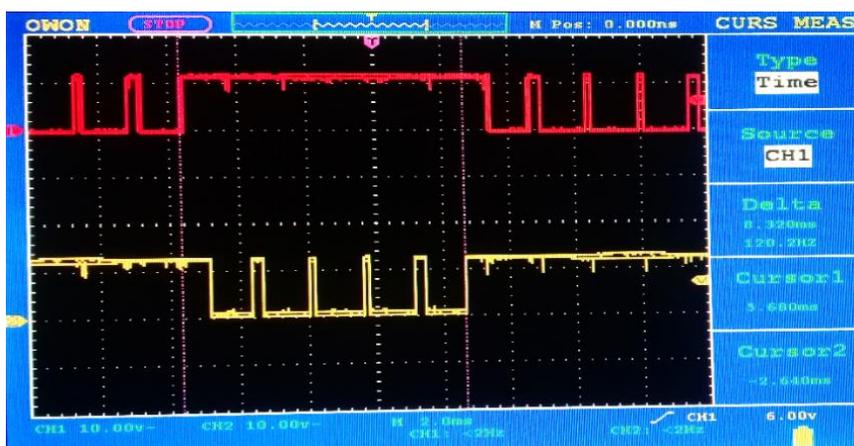
Conexión para realizar la medición de optoacopladores



Nota: Esta figura representa la conexión física para realizar las pruebas.

Figura 69

Medición del tiempo de desfase línea R ciclo positivo con respecto al desfase de la línea R ciclo positivo del circuito de optoacoplación.



Nota: Los datos de medición del circuito de optoacoplación se observan a la derecha de la imagen.

Tabla 20

Mediciones del circuito optoacoplador líneas (R, S y T)

Mediciones del circuito de optoacoplación					
Señal de optoacoplación	Desfase ciclo positivo		Voltaje Aplicado	Desfase ciclo negativo	
	Tiempo (ms)	Frecuencia (Hz)		Tiempo (ms)	Frecuencia (Hz)
R	16,64 ms	60,10 Hz	12 V	8,32 ms	120,2 Hz
RS	5,84 ms	171,2 Hz	12 V	14,16 ms	70,62 Hz
RT	11,76 ms	85,03 Hz	12 V	3,52 ms	284,11 Hz

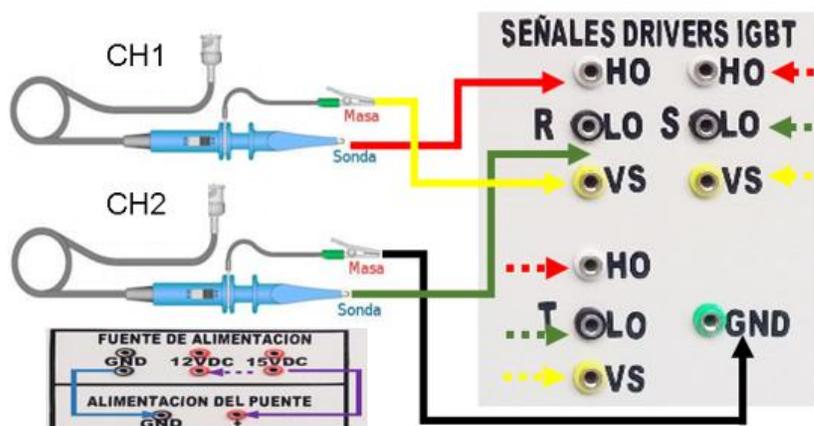
Nota: Esta tabla muestra los datos obtenidos de la medición.

Prueba del circuito de drivers IR2102.

Para realizar las pruebas del circuito de los drivers se realiza la siguiente como muestra la Figura 70. El desfase de cada línea del circuito de los drivers se lo describe a continuación en la Tabla 21. Las mediciones se las realiza mediante una referencia principal línea R(HO) ciclo positivo con el uso del osciloscopio, Figura 71.

Figura 70

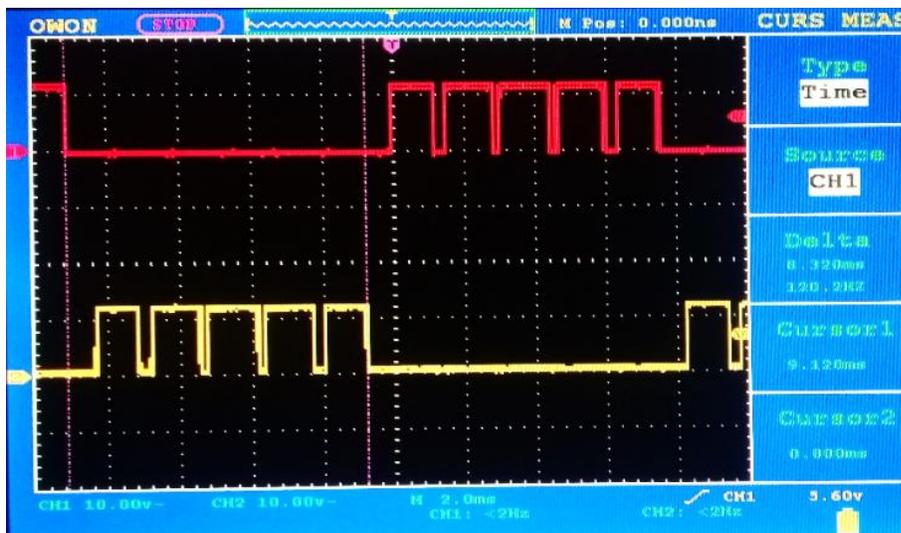
Conexión para realizar la medición de drivers de IGBT.



Nota: Esta figura representa la conexión física para realizar las pruebas.

Figura 71

Medición del tiempo de desfase línea R(HO) ciclo positivo con respecto al desfase de la línea R(LO) ciclo positivo en el circuito de optoacoplación.



Nota: Los datos de medición del circuito de drivers se observan a la derecha de la imagen.

Tabla 21

Mediciones del circuito de drivers líneas (R, S y T)

Señal de optoacoplación	Mediciones del circuito de drivers					
	Desfase ciclo positivo (HO)		Voltaje Aplicado	Desfase ciclo negativo (LO)		
	Tiempo (ms)	Frecuencia (Hz)		Tiempo (ms)	Frecuencia (Hz)	
R	16,64 ms	60,10 Hz	12 V	8,32 ms	120,2 Hz	
RS	5,84 ms	171,2 Hz	12 V	14,16 ms	70,62 Hz	
RT	11,76 ms	85,03 Hz	12 V	3,52 ms	284,11 Hz	

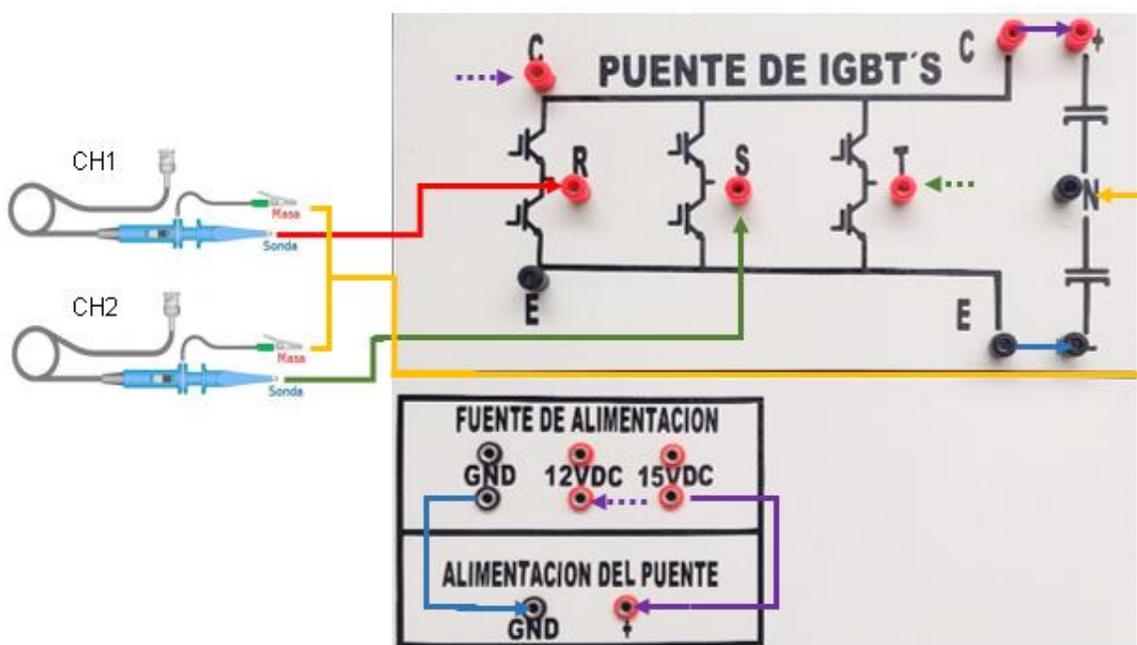
Nota: Esta tabla muestra los datos obtenidos de la medición.

Prueba del circuito inversión 2MBI 200N – 060.

Para realizar las pruebas del circuito de inversión se realiza la siguiente como muestra la Figura 72. El desfase final de cada una de las líneas del circuito de potencia (2MBI 200N – 060); describe a continuación en la Tabla 22. Las mediciones se las realiza mediante una referencia principal línea R con ayuda de la placa neutra, Figura 73.

Figura 72

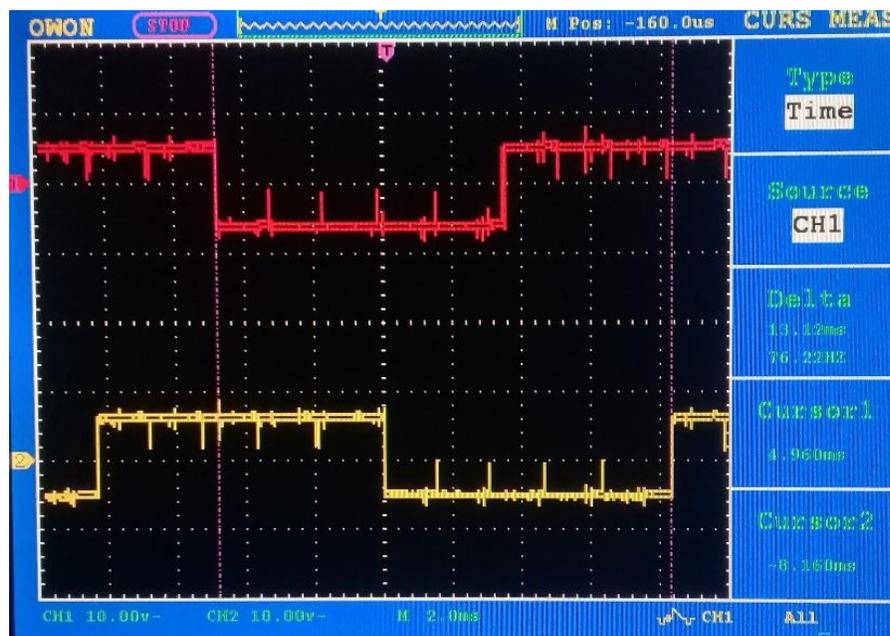
Conexión para realizar las pruebas del circuito de inversión trifásica



Nota: Esta figura representa la conexión física para realizar las pruebas.

Figura 73

Medición de fase R de potencia con respecto a la fase S.



Nota: Los datos de medición se observan a la derecha de la imagen.

Tabla 22

Mediciones del circuito de potencia fase R, s y T.

Mediciones del circuito de potencia					
Señal de control	Desfase ciclo positivo		Voltaje Aplicado	Desfase ciclo negativo	
	Tiempo (ms)	Frecuencia (Hz)		Tiempo (ms)	Frecuencia (Hz)
R	16,64 ms	60,10 Hz	15 V	8,32 ms	120,2 Hz
RS	5,84 ms	171,2 Hz	15 V	14,16 ms	70,62 Hz
RT	11,76 ms	85,03 Hz	15 V	3,52 ms	284,11 Hz

Nota: Esta tabla muestra los datos obtenidos de la medición.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Mediante fuentes bibliográficas y proyectos similares, una inversión trifásica es una conversión de corriente DC a corriente AC, donde el voltaje en AC es proporcional al voltaje aplicado en DC el mismo que se consigue mediante procesos de modulación, aislación y conmutación con los elementos de potencia tales como MOSFET's e IGBT's.
- El proceso de modulación SPWM se lo realiza mediante el sistema embebido arduino uno, este sistema permite ejecutar un código de programación, calculando el tiempo de cada pulso requerido para el desfase de 120° lo cual es equivalente a 5,55mS de cada una de las líneas trifásicas, gracias a que posee seis salidas de modulación en los pines; D4, D5, D7, D8, D9 y D10
- Para aislar eléctricamente los circuitos de control y de potencia es necesario utilizar optoacopladores 6n135 debido a su construcción interna el cual consta de un diodo emisor infrarrojo, ópticamente acoplado a un transistor foto detector de alta velocidad, mismo que permite adquirir a la salida señales con parámetros similares a la señal aplicada en la entrada.
- La conmutación de los IGBT's es un proceso de activación y desactivación precisa dados en un determinado tiempo y depende de los circuitos disparadores o drivers para lo cual se utilizó el IR2102, este circuito ofrece las mismas características mencionadas anteriormente. Además, es compatible con el elemento de potencia.
- Para evidenciar la inversión trifásica se utilizó un osciloscopio con la finalidad de obtener los parámetros de desfase, amplitud, frecuencia y periodo de las líneas de potencia (R, S y T).

Recomendaciones

- Previo a la realización del módulo de inversión trifásica se debe leer el procedimiento de operación con el fin de evitar errores de conexión proporcionado por el Anexo J.
- Se puede utilizar solo una fuente de alimentación sea de 12VDC o 15VDC debido a su diseño.
- En caso de necesitar una fuente de tensión diferente, conectar en los pines de alimentación al puente ubicadas en la parte frontal del módulo, además es muy importante alimentar con esa misma tensión al puente de IGBT'S
- Las tomas de señales de control, optoacopladores y drivers de IGBT's ubicadas en el panel frontal son únicamente para medición y monitorización de parámetros de modulación mediante el osciloscopio, por lo que no se debe conectar otro circuito o carga externa.
- El módulo debe ser utilizado únicamente bajo la supervisión de un docente que tenga conocimiento del funcionamiento del módulo de inversión trifásico.

Bibliografía

- García Rojas, J. C. (2014). *Universidad Central "Marta Abreu"*. Recuperado el 1 de Diciembre de 2020, de Ingeniería eléctrica:
<https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/828/Jos%C3%A9%20Carrillos%20Garc%C3%ADa%20Rojas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Alomoto Fajardo, O. J., & Pilco Pilco, D. D. (17 de Mayo de 2017). *Bibdigital.epn.edu.ec*. Recuperado el 31 de Noviembre de 2020, de Repositorio:
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17278>
- Boylestad, R. L. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. México, D.F: Pearson. Recuperado el 20 de Noviembre de 2020
- Erazo Mayorga, J. P. (Abril de 2014). *ESPN*. Recuperado el 6 de Diciembre de 2020, de Repositorio: <file:///C:/Users/hp/Downloads/CD-5595.pdf>
- FUJI ELECTRIC. (Mayo de 1997). *Commonwealth House*. Recuperado el 26 de Noviembre de 2020, de Fuji Electric (UK) Ltd.: Info@ariat-tech.com
- García Paredes, R., Torres Escandón, W., & Zúñiga Burgos, D. (2002). *Fundamento básico de inversores*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2020, de dspace:
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/1397/1/2657.pdf>
- Ingeniería Mecafenix. (12 de Junio de 2018). *La enciclopedia de la ingeniería*. Recuperado el 2 de Febrero de 2021, de La enciclopedia de la ingeniería:
<https://www.ingmecafenix.com/electronica/fuente-de-alimentacion/>
- ISO TEST. (1995). *Productos de Electrónica*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2020, de <https://isotest.net/comprar/fuentes-de-alimentacion/>

- LÓPEZ, c., CAMACHO, DÍAZ, & GAVIRIA. (2007). *Universidad del Cauca*. Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET):
https://www.academia.edu/28030774/MODULACION_PWM_APLICADA_A_INVERSORES_TRIFASICOS_DENTRO_DEL_ESQUEMA_DE_ACCIONAMIENTOS_ELECTRICOS_AC
- Mecafenix. (16 de Octubre de 2018). *enciclopedia*. Recuperado el 5 de Enero de 2021, de enciclopedia de la ingeniería:
<https://www.ingmecafenix.com/electronica/optoacoplador/>
- Página Oficial de Arduino. (2005). *Arduino IDE*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2020, de Arduino Uno: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>
- Patiño, C. R., Torres, C. A., & Yarce, D. M. (2008). *Dianet*. Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de Fundación Dianet:
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo;jsessionid=E324276CFFE54A1D25FB9161A6E3711C.dialnet01?codigo=4733118>
- PERICO, J. F. (2019). *repository*. Recuperado el 13 de Diciembre de 2020, de repository.usta.edu.co:
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/16488/2019juansilva.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rectifier, I. (4 de Febrero de 2004). *IR WORLD HEADQUARTERS*. Recuperado el 7 de Diciembre de 2020, de IR WORLD HEADQUARTERS: www.irf.com
- Rodríguez Ortiz, Carlos Andrés. (2004). *Diseño e implementación de prácticas para el laboratorio de Electrónica Industrial: Inversor Monofásico*. Bogotá: PONTIFICIA

UNIVERSIDAD JAVERIANA. Recuperado el 31 de Noviembre de 2021, de
<https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/7557>

RODRÍGUEZ PORTILLA, A. (13 de Febrero de 2017). *Repositorio*. Recuperado el 1 de
Diciembre de 2020, de Repositorioinstitucional.buap:
<https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/174>

Salazar Salvador, J. J. (octubre de 2012). *Diseño y análisis de desempeño de un
inversor de voltaje utilizando controladores inteligentes*. Sangolquí. Recuperado
el 30 de Noviembre de 2020, de REPOSITORIO:
<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5869/1/T-ESPE-034346.pdf>

Sánchez Freire, D. A. (12 de Diciembre de 2019). *Diseño e implementación de un
inversor multinivel trifásico topología diode-clamped de baja potencia con
modulación pd-pwm*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2020, de
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20601>

Silva Monteros, C. M. (Diciembre de 1994). *BIBDIGITAL*. Recuperado el 5 de Diciembre
de 2020, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/>:
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/9266>

Anexos