



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**

**CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE INVERSOR DE  
CORRIENTE DC/AC CON SALIDA DE ONDA SENOIDAL  
PURA**

PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ELECTRICIDAD

**AUTORES:**

Steeven Alexander Armas Enríquez

Andy Mauricio Remache Pino

**TUTOR:**

Ing. Ms.C Marco Aníbal León Segovia

Latacunga, Agosto 2025



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Armas Enríquez Steeven Alexander y Remache Pino Andy Mauricio, declaramos ser autores de la presente propuesta tecnológica **“CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO INVERSOR DE CORRIENTE DC/AC CON SALIDA DE ONDA SENOIDAL PURA”**, siendo el Ing. Ms.C Marco Aníbal León Segovia tutor del presente proyecto; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en la presente propuesta tecnológica, son de nuestra exclusiva responsabilidad.



Armas Enríquez Steeven Alexander

C.I. 050407683-7



Remache Pino Andy Mauricio

C.I. 0504441072-2

## AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor de la propuesta Tecnológica sobre el título:

**“CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE INVERSOR DE CORRIENTE DC/AC CON SALIDA DE ONDA SENOIDAL PURA”**, de Armas Enríquez Steeven Alexander y Remache Pino Andy Mauricio, de la carrera de **INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**, considero que dicho informe investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico – técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, agosto 2025

Tutor



Ing. Ms.C Marco Aníbal León Segovia

C.I. 0502305402


## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto los postulantes: Armas Enriquez Steeven Alexander y Remache Pino Andy Mauricio, con el título de Proyecto de Titulación: **“CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE INVERSOR DE CORRIENTE DC/AC CON SALIDA DE ONDA SENOIDAL PURA”**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar el CD correspondiente según la normativa institucional.

Latacunga, agosto 2025

Para constancia firman:



Ing. Jessica Nataly Castillo Fiallos M.Sc.

C.C. 0604590216



Ing. Byron Paul Corrales Bastidas M.Sc.

C.C. 0502347768



Ph.D. Secundino Marrero Ramirez

C.C. 0502305402

## ***AGRADECIMIENTO***

Agradezco primeramente a Dios, por haberme dado la vida, la salud y la sabiduría necesaria.

A mi padre Cirilo Armas, por su ejemplo de trabajo y perseverancia.

A mi madre Fanny Enríquez, por su amor incondicional, apoyo constante y sus palabras de aliento en los momentos difíciles.

A los docentes de la carrera, por compartir sus conocimientos y experiencias con entrega y vocación. Su guía ha sido fundamental en mi formación.

Extiendo un agradecimiento especial a mi compañero de tesis Andy Remache, por su responsabilidad, compromiso y compañerismo durante todo el proceso. También a mis amigos y compañeros de la carrera de Electricidad, con quienes compartí aprendizajes, esfuerzos y momentos inolvidables. Cada uno aportó de forma única a esta etapa que hoy culmina. Gracias por el apoyo y por ser parte de este camino. Este logro también es suyo.

**Steeven Armas**

## ***DEDICATORIA***

Dedico este trabajo con toda mi gratitud a mi padre Cirilo Armas, por ser un ejemplo de fortaleza, disciplina y dedicación constante. A mi madre Fanny Enríquez, por su apoyo incondicional, su fe en mí y por ser mi mayor fuente de inspiración. Sus sacrificios y enseñanzas han sido el pilar fundamental en mi vida. Gracias por enseñarme a nunca rendirme y a seguir adelante con humildad. Este logro es tan suyos como mío.

También dedico este esfuerzo a mis hermanos Jonathan y Danny Armas, quienes con su cariño, apoyo y ejemplo me han motivado a superarme cada día. Su presencia ha sido una fuente de ánimo constante en los momentos más difíciles. A ellos les agradezco por creer en mí y estar siempre cerca, incluso en silencio. Cada paso dado en este camino lo hice con ustedes en mente. Esta meta alcanzada es parte de nuestro crecimiento como familia.

**Steeven Armas**

## ***AGRADECIMIENTO***

Quiero agradecer, en primer lugar, a Dios y a la Virgen por guiarme y darme fuerzas en cada etapa de este proceso. También extendo mi profundo agradecimiento a toda mi familia, en especial a la familia por parte de mi madre, quienes me han acompañado y apoyado incondicionalmente durante todo mi recorrido universitario.

Agradezco de manera especial a mi compañero de tesis Steeven Armas, con quien he compartido una valiosa amistad durante los últimos semestres, y cuyo compromiso fue fundamental para culminar este proyecto.

De igual manera, expreso mi gratitud a mis amigos, amigas y a todas las personas que formaron parte de este camino, ya sea al inicio, en el transcurso o al final de esta etapa. A cada uno de ustedes, gracias por su apoyo constante.

Finalmente, agradezco al Ing. Marco León, por su valiosa guía, dedicación y apoyo como docente y tutor de nuestra tesis. Su acompañamiento fue clave para alcanzar esta meta.

**Andy Remache**

## ***DEDICATORIA***

Dedico este trabajo de titulación con todo mi amor y gratitud a mi madre, Nancy Marlene Pino Pila, quien no solo ha sido una madre ejemplar, sino también un padre para mí. Su fortaleza, sacrificio y entrega incondicional han sido el pilar fundamental de mi vida. Gracias por enseñarme a luchar con valentía por mis sueños y nunca rendirme, incluso en los momentos más difíciles.

A mi hermana, la Ingeniera Katty Pamela Remache Pino, mi ejemplo de perseverancia y superación. Gracias por tu apoyo constante, tus consejos y por inspirarme a seguir adelante con disciplina y determinación. Tu esfuerzo y logros han sido una gran motivación para mí.

También extendo esta dedicatoria con profundo cariño a toda mi familia: tíos, tías, primos y primas, quienes han estado presentes en distintos momentos de mi vida, brindándome su apoyo, palabras de aliento y acompañándome con afecto sincero en este camino.

**Andy Remache**

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**

**TÍTULO:** “CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE INVERSOR DE CORRIENTE DC/AC CON SALIDA DE ONDA SENOIDAL PURA”

**Autores:**

Armas Enriquez Steeven Alexander

Remache Pino Andy Mauricio

**RESÚMEN**

El presente proyecto de tesis se basa en la construcción de un prototipo de inversor de corriente que convierta una señal de corriente continua (DC) en una señal de corriente alterna (AC) con salida de onda senoidal pura. Este tipo de inversores son fundamentales en sistemas de generación de energía renovable, especialmente en instalaciones fotovoltaicas y aplicaciones que requieren una calidad de energía óptima para alimentar equipos electrónicos sensibles y modernos, por lo que el desarrollo del prototipo se orienta en el diseño de una topología electrónica eficiente, utilizando componentes como transistores de potencia, controladores de modulación por ancho de pulso y demás elementos eléctricos y electrónicos, que contribuyen a la obtención de una onda senoidal pura. De tal manera que con este tipo de inversor se busca reducir significativamente las distorsiones armónicas, mejorando el rendimiento energético y prolongar la vida útil de los equipos y componentes.

Es así, que para el cumplimiento del tema establecido se toma en cuenta el proceso de implementación, donde se consideraron parámetros técnicos como el nivel de tensión de entrada, la frecuencia de salida, la potencia nominal y las condiciones de operación segura de los componentes. Además, se desarrolló un sistema de control que regula el funcionamiento del inversor, optimizando su eficiencia y estabilidad ante variaciones en la carga, y los resultados obtenidos evidencian un comportamiento estable del prototipo, con una forma de onda de salida cercana a una senoidal pura y una eficiencia aceptable para aplicaciones residenciales o de pequeña escala. Este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones orientadas al escalado del diseño, la mejora del rendimiento y la integración de sistemas inteligentes de monitoreo y protección, las cuales ayudan al aprendizaje y cuidado ambiental.

**Palabras clave:** inversor, corriente, parámetros, prototipo, ondas

**TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI**  
**FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES**

**THEME:** “CONSTRUCTION OF A DC/AC POWER INVERTER PROTOTYPE WITH PURE SINE WAVE OUTPUT”

**Authors:**

Armas Enriquez Steeven Mauricio

Remache Pino Andy Mauricio

**ABSTRACT**

The present thesis project is based on the construction of a current inverter prototype that converts a direct current (DC) signal into an alternating current (AC) signal with a pure sine wave output. These types of inverters are fundamental in renewable energy generation systems, especially in photovoltaic installations and applications that require optimal energy quality to power sensitive and modern electronic equipment. Therefore, the development of the prototype is focused on designing an efficient electronic topology, using components such as power transistors, pulse width modulation controllers, and other electrical and electronic elements, which contribute to obtaining a pure sine wave. In such a way that with this type of inverter, the aim is to significantly reduce harmonic distortions, improving energy performance and prolonging the lifespan of the equipment and components.

Thus, for the fulfillment of the established topic, the implementation process is taken into account, where technical parameters such as the input voltage level, output frequency, nominal power, and safe operating conditions of the components were considered. Additionally, a control system was developed to regulate the operation of the inverter, optimizing its efficiency and stability in the face of load variations, and the results obtained demonstrate stable behavior of the prototype, with an output waveform close to a pure sine wave and an acceptable efficiency for residential or small-scale applications. This work lays the foundation for future research aimed at scaling the design, improving performance, and integrating intelligent monitoring and protection systems, which contribute to environmental learning and care.

**Keywords:** inverter, current, parameters, prototype, waves

## INDICE

DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	iii
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
DEDICATORIA .....	vii
AGRADECIMIENTO .....	viii
DEDICATORIA .....	ix
RESÚMEN.....	x
ABSTRACT .....	xi
1. INFORMACIÓN GENERAL .....	1
2. INTRODUCCIÓN .....	2
2.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	3
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
2.3.1 Objeto de investigación.....	4
2.3.2 Campo de acción .....	4
2.4 BENEFICIARIOS .....	4
2.4.1 Beneficiarios directos.....	4
2.4.2 Beneficiarios indirectos.....	4
2.5 JUSTIFICACIÓN .....	5
2.6 OBJETIVOS.....	5
2.6.1 Objetivo general .....	5
2.6.2 Objetivos específicos .....	6
2.7 SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS .....	7
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	8
3.1 ANTECEDENTES .....	8

3.2	MARCO REFERENCIAL .....	10
3.2.1	Corriente eléctrica.....	10
3.2.2	Señales eléctricas .....	12
3.2.3	Ondas .....	13
3.2.4	Inversor .....	16
4.1	Diseño Conceptual.....	22
4.2	Matriz de relación de variables.....	23
4.3	Diagrama de funcionamiento básico.....	24
4.4	Diagrama de flujo .....	26
4.5	Diseño del inversor DC-AC trifásico .....	26
4.5.1	Cálculo de corriente de entrada DC.....	27
4.5.2	Diseño del inversor SPWM.....	27
4.5.3	Selección del MOSFET .....	27
4.5.4	Filtro LC por fase .....	28
4.5.5	Transformador elevador.....	28
4.6	SELECCIÓN DE COMPONENTES.....	29
4.6.1	Batería .....	29
4.6.2	Tarjeta controladora.....	30
4.6.3	Selección de MOSFETS .....	31
4.6.4	Driver de compuerta para los MOSFETSS.....	33
4.6.5	Inversor lógico.....	34
4.6.6	Transformador elevador.....	35
4.7	PROCEDIMIENTO DE IMPLEMENTACIÓN TÉCNICA.....	36
4.7.1	Habilitación de periféricos esenciales en STM32CubeMX .....	36
4.7.2	Asignación de pines .....	40
4.8	PROCESO DE GENERACIÓN DE SEÑALES .....	41
4.8.1	Disparos del STM32 y señal invertida con tiempo muerto.....	41

4.8.2	Señales complementarias extraídas del STM32 .....	42
4.8.3	Señales amplificadas del IR2113.....	42
4.8.4	Señales de disparo en el puente H completo .....	43
4.8.5	Señal portadora.....	44
4.9	ELABORACIÓN DEL DISEÑO DE LA PCB .....	44
4.9.1	Conexión del STM32 con optoacopladores disparadores.....	44
4.9.2	Circuito de conexión de los drivers IR2113 .....	45
4.9.3	Módulo de conmutación con puente H de MOSFETS .....	46
4.9.4	Generación de tierra virtual.....	47
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	48
5.1	Procedimiento para la validación experimental .....	48
5.1.1	Verificación de la señal alterna sin filtrar por fase .....	49
5.1.2	Aplicación del filtro LC .....	50
5.1.3	Visualización de señal senoidal en dos fases simultáneas .....	51
5.1.4	Efecto de carga desbalanceada en la salida del inversor.....	52
5.2	EVALUACIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS.....	54
5.2.1	Tensión fase-neutro.....	54
5.2.2	Tensión línea-línea.....	55
5.2.3	Frecuencia .....	55
5.2.4	Desfase entre fases.....	56
5.3	Evaluación de parámetros eléctricos..... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	62
7.	ANEXOS.....	66

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Matriz de relación de dependencia de variables .....	23
Tabla 2 Matriz de variables de entrada .....	23
Tabla 3 Matriz de variables de salida.....	24
Tabla 4: Comparación de baterías .....	29
Tabla 5 Comparación de tarjetas de control.....	30
Tabla 6 Comparación de MOSFETS. ....	32
Tabla 7 Comparación de drivers.....	33
Tabla 8 Comparación del inversor lógico. ....	34
Tabla 9 Comparación de transformadores elevadores. ....	35
Tabla 10 Comparativa técnica de MOSFETS vs IGBTs.....	48
Tabla 11 Detalle de costos del proyecto. ....	57
Tabla 12 Gastos indirectos. ....	58
Tabla 13 Comparación de gastos directos e indirectos. ....	59
Tabla 14 Comparación técnica de prototipo y el modelo comercial. ....	61

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Corriente continua.....	10
Figura 2: Corriente alterna .....	11
Figura 3: Onda cuadrada .....	15
Figura 4: Onda triangular .....	15
Figura 5: Onda senoidal .....	16
Figura 6: Tipos de inversores .....	17
Figura 7: Inversor autónomo .....	18
Figura 8: Inversor de conexión a la red.....	18
Figura 9: Inversores híbridos.....	19

Figura 10: Inversor de onda cuadrada.....	19
Figura 11: Inversor de onda senoidal modificada.....	20
Figura 12: Inversor de onda senoidal pura .....	20
Figura 13: Inversor de sistema modular.....	21
Figura 14: Inversor de sistema central .....	21
Figura 15: Diagrama de funcionamiento básico del inversor trifásico. ....	25
Figura 16: Diagrama de flujo del funcionamiento del inversor trifásico. ....	26
Figura 17: Interfaz de configuración del GPIO. ....	37
Figura 18: Interfaz de configuración del NVIC.....	38
Figura 19: Interfaz de configuración del RCC. ....	39
Figura 20: Interfaz de configuración de SYS. ....	39
Figura 21: Interfaz de configuración de TIM1. ....	40
Figura 22: Asignación física de los pines del microcontrolador STM32F103C8Tx. ....	41
Figura 23: Disparos generados por el STM32 con su señal inversa. ....	42
Figura 24: Señales complementarias generadas por el STM32.....	42
Figura 25: Señales amplificadas por el IR2113.....	43
Figura 26: Disparos de compuerta aplicados a los transistores del puente H completo. ....	43
Figura 27: Señal portadora a 25kHz. ....	44
Figura 28: Diagrama esquemático de conexión del STM32. ....	45
Figura 29: Circuito de control de compuertas mediante IR2113.....	46
Figura 30: Esquemático del módulo de puente H.....	47
Figura 31: Esquemático de la red de capacitores para tierra virtual. ....	47
Figura 32: Señal alterna sin filtrar por fase (fase A).....	50
Figura 33: Filtro LC aplicado en cada fase. ....	50
Figura 34: Señal alterna filtrada por fase (fase A).....	51

Figura 35: Señales senoidales en dos fases (A y B).....	52
Figura 36: Señales senoidales en dos fases (A y B).....	53
Figura 37: Señal bajo condición de carga desbalanceada (fase A cargada).....	53
Figura 38: Error relativo porcentual de la tensión fase-neutro.....	55
Figura 39: Error relativo porcentual de la tensión línea-línea.....	55
Figura 40: Error relativo porcentual de la frecuencia. ....	56
Figura 41: Error relativo porcentual del desfase entre fases. ....	56

# 1. INFORMACIÓN GENERAL

## Título del Proyecto:

“Construcción de un prototipo de inversor de corriente DC/AC con salida de onda senoidal pura”

## Modalidad de titulación:

Propuesta Tecnológica

Proyecto de Investigación

## Carrera:

Ingeniería en Electricidad

## Proyecto de titulación vinculado al proyecto:

Desarrollo de sistemas inteligentes aplicados a la ingeniería eléctrica.

## Equipo de trabajo:

Ing. Ms.C León Segovia Marco Aníbal

Tutor

Armas Enríquez Steeven Alexander

Estudiante

Remache Pino Andy Mauricio

Estudiante

## Área de Conocimiento:

07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía

## Línea de investigación:

Optimización energética y sostenibilidad en sistemas de conversión de energía.

## Sub líneas de investigación de la carrera:

Diseño y desarrollo de sistemas de conversión energética de corriente continua a corriente alterna (DC/AC)

## 2. INTRODUCCIÓN

Los inversores de corriente se han convertido en componentes clave para proporcionar energía de alta calidad dentro de los sistemas modernos debido a que posibilitan la transformación de corriente continua (DC) en corriente alterna (AC) la cual es necesaria para alimentar una amplia gama de dispositivos eléctricos y electrónicos. De tal manera que la corriente continua es aquella que se caracteriza por un flujo constante y unidireccional de electrones siendo esta usada en fuentes de almacenamiento como baterías o paneles solares, mientras que la corriente alterna se caracteriza por presentar variaciones periódicas de polaridad y magnitud permitiendo la transmisión de corriente a grandes distancias evitando pérdidas menores y facilitando su adaptación hacia diferentes niveles de voltaje.

Es así, que los inversores de corriente con salida de onda senoidal pura son esenciales para proporcionar energía de alta calidad a fin de minimizar distorsiones que pueda afectar el funcionamiento de equipos sensibles. Por lo que su conversión se basa en el cumplimiento de etapas como la conmutación que se crea pulsos de corriente alterna a partir de la corriente continua con transistores electrónicos, la segunda etapa es la modulación que ayuda al control del ancho y frecuencia de los pulsos a fin de aproximarla a una onda, y finalmente se realiza el filtrado que suaviza la señal de salida u onda alterna para que esta sea limpia y apta para los equipos. Tomando en cuenta estos aspectos se puede mencionar que estos inversores son capaces de reproducir de manera más precisa la forma de la onda de la red eléctrica permitiendo así el uso en cargas eléctricas como motores, sistemas de comunicación, equipos informáticos y demás elementos eléctricos. [1]

De tal manera que el presente proyecto se enfoca en la construcción de un prototipo de inversor de corriente, capaz de convertir la corriente continua (DC) proveniente de fuentes como baterías, paneles y sistemas fotovoltaicos en corriente alterna (AC) con una forma senoidal pura, la cual es comparable a la que se suministra por las redes eléctricas convencionales. Para esto se toma en cuenta la selección óptima de los componentes electrónicos, el desarrollo de técnicas avanzadas de modulación y control, además de la implementación de mecanismos de protección y regulación de la red eléctrica.

Finalmente, se establece que la importancia del presente proyecto radica en su contribución a la confiabilidad de sistemas autónomos de energía y la mejora de la calidad del suministro eléctrico logrando así su estabilidad, por lo que su desarrollo no solo representa un desafío

técnico, sino también un apoyo significativo al fortalecimiento de tecnologías limpias y sostenibles.

## **2.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA**

El crecimiento en la adopción de fuentes de energía renovable, como la energía solar fotovoltaica, en especial en zonas rurales y urbanas que tienen limitado o intermitente acceso a la red eléctrica han impulsado la necesidad de tener sistemas electrónicos de potencia capaces de gestionar y transformar eficientemente la energía solar convirtiéndose así en una alternativa viable para el suministro eléctrico. Por lo que en los sistemas fotovoltaicos la energía eléctrica se obtiene en forma de corriente continua (DC), la cual debe ser convertida en corriente alterna (AC) para su uso comercial, industrial o doméstico, esta conversión debe ser realizada de manera precisa y eficiente garantizando así su compatibilidad con distintos tipos de cargas como de computadoras, equipos, motores de inducción y electrodomésticos modernos, los cuales requieren una forma de onda senoidal pura para funcionar de manera segura y eficiente.

Uno de los principales problemas técnicos en el diseño de inversores AC/DC radica en lograr una señal de salida senoidal pura eliminando armónicos y distorsiones presentes en las ondas cuadradas o senoidales modificadas, ya que dichas distorsiones en las señales alternas pueden causar interferencias electromagnéticas, calentamiento excesivo de los componentes y equipos además de la pérdida de eficiencia energética y daños progresivos en los dispositivos conectados. De tal manera que para evitar estos efectos es necesario implementar técnicas de modulación como la del ancho de pulso senoidal (SPWM), junto con otros sistemas y elementos como transistores, mosfet y microcontroladores que suavicen la forma de onda de salida.

Todos estos sistemas mencionados son costosos por lo que los inversores de onda cuadrada actualmente predominan por su bajo costo, pero su alta distorsión armónica (THD) reduce la vida útil de equipos sensibles y son ineficientes con cargas inductivas. Y por otra parte a pesar de los avances tecnológicos en muchas regiones que tienen deficiencia de energía aun no cuentan con soluciones accesibles y de bajo costo que ofrezcan una conversión DC/AC confiable con salida senoidal pura que permita el acceso al suministro de energía y de buena calidad para proteger todos sus componentes eléctricos de posibles daños y pérdidas.

## **2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿De qué manera la construcción de un prototipo de inversor de corriente DC/AC con salida de onda senoidal pura aportará a los estudiantes y a sociedad en general a diferencia de los inversores convencionales?

## **2.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN**

### **2.3.1 Objeto de investigación**

El objeto del presente proyecto es el diseño de sistemas de conversión DC/AC

### **2.3.2 Campo de acción**

33 Ciencias Tecnológicas /3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 3306.02 Tecnología de la conversión de energía. 33 Ciencias Tecnológicas / 3322 Tecnología energética / 3322.05 Fuentes no convencionales de energía. 33 Ciencias Tecnológicas / 3306.08 Sistemas de control eléctrico.

## **2.4 BENEFICIARIOS**

### **2.4.1 Beneficiarios directos**

Los principales beneficiarios del presente proyecto serán los estudiantes de la carrera de ingeniería eléctrica, quienes podrán utilizar el inversor para el desarrollo de proyectos académicos, además les servirá como una herramienta didáctica y técnica para el aprendizaje de conceptos como electrónica de potencia, modulación PWM, filtrado de señales y diseño de sistemas para el control de inversores.

### **2.4.2 Beneficiarios indirectos**

Personas y comunidades de zonas que tienen difícil o limitado acceso a la red eléctrica ya que se podrán contar con un inversor confiable para transformar la energía y así poder utilizar sus electrodomésticos y equipos de manera segura.

Por otra parte, también serán las empresas industriales o del sector energético quienes podrán implementar sistemas de conversión de energía más eficientes y confiables para el desarrollo de sus actividades. Es decir, los beneficiarios indirectos son la sociedad en general quienes

podrán obtener acceder a la energía eléctrica para el desempeño de sus funciones además de ir conociendo nuevas innovaciones relacionadas a fuentes de energía renovable a fin de suministrar energía eléctrica de calidad en cualquier momento que lo necesiten en especial si existe cortes de luz a no se tenga acceso a una red convencional.

## **2.5 JUSTIFICACIÓN**

La necesidad de tener soluciones energéticas eficientes, sostenibles y adaptables a diferentes entornos ha impulsado el desarrollo de tecnologías que optimicen el uso de fuentes renovables como la energía solar, por lo que uno de los principales retos en el campo técnico es la conversión de la energía generada en corriente continua (DC) a corriente alterna (AC) la cual debe ser de calidad y compatible con los dispositivos y quipos electrónicos ya que se busca alimentarlos de manera adecuada para que operen correctamente y evitar cualquier tipo de daño en los mismos.

Por ello, la construcción de un prototipo de inversor de corriente que convierta la energía continua en una salida de onda senoidal pura representa una solución técnica y viable, tomando en consideración la parte académica el presente proyecto promueve el aprendizaje practico en áreas como de electrónica, control de señales y sistemas relacionados a la corriente. Mientras que desde el punto ambiental y social se fomenta el uso eficiente de tecnologías limpias además de apoyar la electrificación de comunidades que se encuentran alejadas a una red eléctrica convencional mejorando así la calidad de vida de los habitantes del sector.

Además, esta iniciativa se encarga de promover el acceso a una energía libre, segura, sostenible y moderna para todos, por lo que el desarrollo del inversor no solo resuelve una necesidad técnica concreta, sino que también contribuye de manera significativa al avance científico, educativo, económico y ambiental permitiendo así explorar soluciones innovadoras sobre el manejo de la energía que ayudan a estabilizar los sistemas de energía.

## **2.6 OBJETIVOS**

### **2.6.1 Objetivo general**

Construir un prototipo de inversor de corriente DC/AC con salida de onda senoidal pura mediante el uso de técnicas y control a fin de garantizar una señal de salida estable y adecuada.

### **2.6.2 Objetivos específicos**

- Investigar el estado del arte de las tecnologías y métodos actuales de conversión de energía eléctrica para la obtención de una onda senoidal pura.
- Seleccionar los componentes electrónicos adecuados para el diseño de un prototipo de inversor de corriente que permita generar una señal de salida senoidal pura.
- Construir un prototipo funcional y práctico del inversor DC/AC tomando en consideración diferentes condiciones de carga
- Validar el prototipo de inversor a través de la eficiencia tomando en consideración su potencia.

## 2.7 SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS

OBJETIVOS	ACTIVIDADES (TAREAS)	RESULTADOS	TÉCNICAS O INSTRUMENTOS
Investigar el estado del arte de las tecnologías y métodos actuales de conversión de energía eléctrica para la obtención de una onda senoidal pura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revisión bibliográfica sobre los principios de conversión eléctrica</li> <li>• Identificación de las formas de onda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comprensión de los fundamentos teóricos claros de la conversión DC/AC</li> <li>• Formas de onda senoidal bien identificadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigación en libros de electrónica de potencia Artículos científicos y técnicos.</li> <li>• Simulaciones básicas en software.</li> </ul>
Seleccionar los componentes electrónicos adecuados para el diseño de un prototipo de inversor de corriente que permita generar una señal de salida senoidal pura.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cálculo de los parámetros eléctricos necesarios para la selección de componentes.</li> <li>• Identificación de transistores, y microcontroladores según la compatibilidad con el sistema</li> <li>• Selección de los componentes necesarios para la obtención de la onda senoidal pura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parámetros establecidos para el inversor</li> <li>• Componentes seleccionados según los parámetros necesarios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método de criterios ponderado</li> <li>• Tablas comparativas y visualización de datos</li> </ul>
Diseñar y construir un prototipo funcional y práctico del inversor DC/AC tomando en consideración diferentes condiciones de carga.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño del circuito del inversor con base en los componentes seleccionados</li> <li>• Desarrollo de pruebas funcionales con diferentes tipos de cargas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prototipo de inversor desarrollado</li> <li>• Validación del inversor bajo distintos tipos de carga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Software de diseño y simulación</li> <li>• Instrumentos de medición como multímetros</li> </ul>
Validar el prototipo de inversor a través de la eficiencia tomando en consideración su potencia.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicación de la fórmula que ayudan a medir la eficiencia.</li> <li>• Pruebas de funcionamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtención del porcentaje de eficiencia</li> <li>• Validación correcta del inversor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de fórmulas necesarias</li> <li>• Verificación del funcionamiento estableciendo características claras</li> </ul>

*Fuente: Los autores*

### **3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

#### **3.1 ANTECEDENTES**

En Instituto Universitario Aeronáutico se desarrolló el proyecto de grado titulado “Convertidor DC/AC de Alta Potencia”, en el cual se diseñó e implementó un inversor monofásico con una capacidad máxima de 1200 vatios, capaz de convertir una tensión continua en una salida de señal alternada de 220 V, con el propósito de ofrecer una solución energética alternativa para viviendas ubicadas en zonas estratégicas rurales. El proyecto no solo tuvo como meta construir un prototipo funcional, sino también profundizar en el estudio de las energías alternativas y con distintos tipos de inversores, comparando su rendimiento y funcionalidad. Para alcanzar estos objetivos, se investigaron diversas formas de salida de onda y configuraciones de conmutación, optando finalmente por una señal cuasisenoidal en una topología Push-Pull, controlada por un microcontrolador PIC16F886 y asistida por el integrado SG3524. El diseño incluyó el desarrollo del esquema eléctrico y la fabricación de la placa PCB, aunque en la etapa de pruebas surgieron problemas asociados a la disipación de potencia en los diodos de protección, los cuales debieron ser retirados. A pesar de estos inconvenientes, se logró un funcionamiento estable, comprobado mediante la operación de una carga resistiva de 150 W. Finalmente se concluyó que la implementación de un filtro PI y componentes diseñados para cargas de hasta 1000 W mejoraría notablemente la calidad de la señal. [2]

Por otro lado, en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo el proyecto técnico titulado “Implementación de inversor DC/AC para motor trifásico de vehículos eléctricos para un banco de pruebas”, se enfocó directamente en la necesidad de adaptar los sistemas educativos e investigativos a las tecnologías emergentes como la electromovilidad. El proyecto tiene como objetivo la construcción de un banco de pruebas que permite analizar el comportamiento de motores eléctricos trifásicos, como los utilizados en vehículos eléctricos, y en particular, diseñar un inversor DC/AC capaz de controlar su velocidad y consumo. Para lograrlo, se diseñó un inversor trifásico controlado por el microcontrolador ATMEGA328P, cuya lógica de conmutación fue simulada en los entornos de Matlab/Simulink y Proteus, permitiendo evaluar previamente el comportamiento de las señales PWM que activan los transistores de potencia. El sistema fue implementado físicamente sobre una estructura diseñada en SolidWorks, y los ensayos realizados con un motor del vehículo Hyundai Ioniq demostraron que el inversor podía entregar hasta 3000W de potencia, operando con una corriente máxima de 25A y una tensión de 120VDC. Los resultados obtenidos evidenciaron la capacidad del sistema para variar la

velocidad del motor bajo diferentes condiciones, con una respuesta eficiente y protegida gracias a la inclusión de dispositivos como interruptores termo magnéticos. Este proyecto demuestra cómo el diseño e implementación de inversores DC/AC es crucial no solo para la operación de motores eléctricos, sino también para la formación de ingenieros capacitados en tecnologías sostenibles y de vanguardia. [3]

Finalmente, en el trabajo investigativo desarrollado por Jhon López en la Universidad de Sucre, titulado “Inversor DC/AC semi-cuasi-Z”, esta investigación se enfoca principalmente en la implementación de un inversor monofásico de tipo fuente-semi-cuasi-Z sin transformador, una topología que permite mayor eficiencia y menor número de componentes activos, lo que resulta ideal para aplicaciones residenciales de bajo consumo energético. El proyecto combina simulaciones en PSIM con pruebas experimentales, utilizando una técnica de modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM) para sintetizar una forma de onda lo más cercana posible a una señal sinusoidal pura. Durante la validación experimental, se identificaron desafíos relacionados con el índice de modulación y la simetría de la señal, los cuales fueron superados mediante ajustes en la amplitud y el nivel de offset de la señal moduladora. Este trabajo aporta al conocimiento técnico sobre nuevas configuraciones de inversores y resalta la importancia de la experimentación para lograr resultados confiables y reproducibles, especialmente cuando se busca mejorar la eficiencia y reducir el costo en sistemas de energía renovable, con un inversor que ofrece un diseño simple, accesible y altamente eficiente. [4]

En conjunto, estas tres investigaciones evidencian la importancia de continuar explorando, diseñando y perfeccionando inversores DC/AC como componentes fundamentales en sistemas modernos de conversión energética. Desde la automatización del seguimiento solar para maximizar la captación fotovoltaica, pasando por el desarrollo de inversores trifásicos adaptados a motores eléctricos, hasta la implementación de topologías innovadoras, por lo que todos estos trabajos demuestran que los inversores no solo son vitales para adaptar la energía renovable a distintos tipos de cargas, sino que además presentan desafíos técnicos y de control que requieren constante estudio. Estos antecedentes confirman que el diseño de inversores DC/AC eficientes, confiables y adaptables a nuevas tecnologías es un campo de investigación vigente y estratégico para el desarrollo de soluciones energéticas sostenibles y renovables.

## 3.2 MARCO REFERENCIAL

### 3.2.1 Corriente eléctrica

Es el flujo ordenado de cargas eléctricas generalmente electrones que se mueven a través de un conductor. En si es la diferencia potencial entre dos puntos que se caracteriza por ser parte fundamental para el funcionamiento de dispositivos eléctricos y electrónicos. La corriente eléctrica se mide en amperios y representa la cantidad de carga que pasa por un punto del circuito en segundo. [5]

#### 3.2.1.1 Tipos de corriente eléctrica

##### 3.2.1.1.1 Corriente Continua

Es conocida por su abreviatura DC, se caracteriza por ser una corriente que sus cargas eléctricas como los electrones fluyen o se mueven en una misma dirección desde el polo negativo hacia el polo positivo. Este tipo de corriente es empleada en dispositivos móviles, computadoras y demás aparatos electrónicos donde se requiere una energía estable y uniforme, en conclusión, la corriente continua es el flujo constante de electricidad en una sola dirección [6]

- **Polo positivo:** Es conocido también como ánodo representa el punto de origen de la corriente y se caracteriza por ser la mayor potencia eléctrica ya que se encarga de atraer electrones y se distingue por su signo positivo (+).
- **Polo negativo:** Es considerado como cátodo representando la potencia menor del sistema eléctrico, se caracteriza por la liberación de los electrones y se distingue por el signo negativo (-) [6]

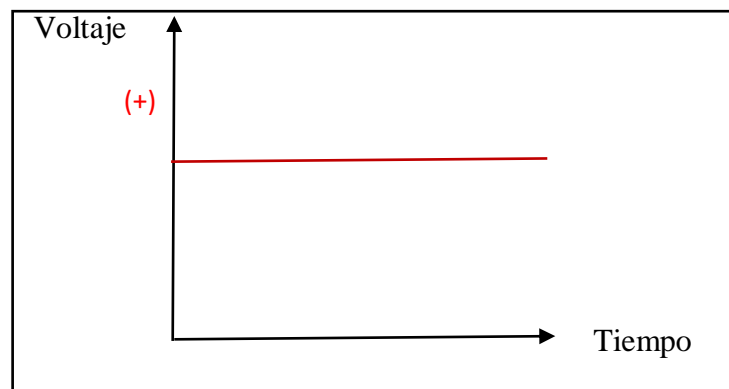


Figura 1: Corriente continua

### 3.2.1.1.2 Corriente alterna

Es el tipo de corriente eléctrica que va cambiando a lo largo del tiempo, se la conoce por su abreviatura AC y se caracteriza porque la magnitud y la dirección presentan variaciones de tipo cíclico por lo que este tipo de corriente se maneja de manera senoidal representada por una curva y está a la vez es denominada frecuencia llegando a ser inestable a comparación con la corriente continua.

En conclusión, la corriente alterna se identifica por el flujo eléctrico que cambia según el sentido de los electrones y se compone de tres elementos:

- **Fase:** Representa el potencial en la corriente alterna, posee un voltaje y una intensidad determinada, es muy utilizada para conexiones a larga distancia ya que la intensidad se mantiene y no disminuye con el espacio ni el tiempo.
- **Neutro:** Se lo conoce como diferencia de potencial o conductor, su corriente es de cero voltios, sirve de punto de retorno para la corriente eléctrica permitiendo cerrar el circuito y logrando mantener el equilibrio en el sistema eléctrico por lo que se considera esencial para el funcionamiento seguro y eficiente de instalaciones eléctricas
- **Tierra:** Es considerada una medida de seguridad que se emplea para proteger a las personas y a los equipos de posibles fallas eléctricas, se encarga de la desviación de la corriente hacia el suelo, permitiendo estabilizar el sistema eléctrico a fin de mantener el voltaje dentro de un rango seguro para evitar daños de sobretensiones [6]

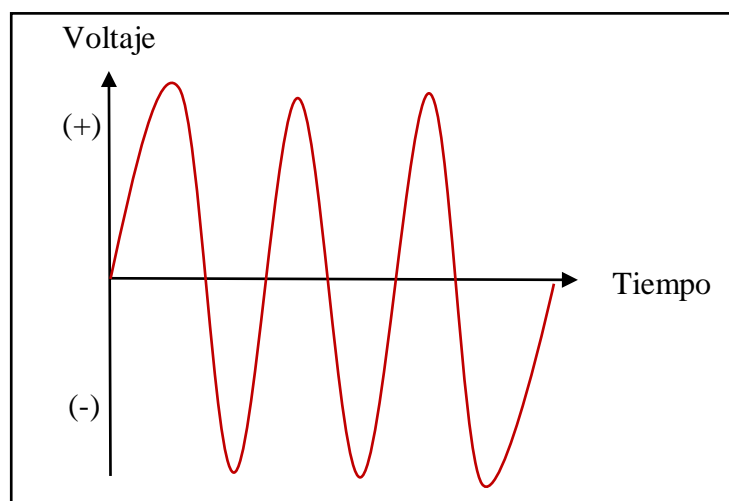


Figura 2: Corriente alterna

### **3.2.1.2 Diferencias entre corriente continua y alterna**

- La corriente alterna cambia de polaridad periódicamente, mientras que la corriente continua permanece constante en una misma dirección.
- La forma de onda de la corriente alterna es sinusoidal y de la corriente continua se representa como una línea recta
- La corriente alterna se genera en centrales hidroeléctricas mientras que la corriente continua se genera en baterías, paneles solares y otros generadores.
- La corriente alterna es más eficiente para transportar energía a largas distancias mientras que la corriente continua no es utilizada para este fin porque se produce una pérdida de energía
- La corriente alterna es más fácil de convertir a distintos voltajes mediante transformadores. [7]

### **3.2.1.3 Métodos de medición de la corriente eléctrica**

La corriente eléctrica se puede medir a partir de dos métodos el directo que se caracteriza por la utilización de instrumentos como multímetros, galvanómetros, osciloscopios y demás elementos que permiten medir la corriente y a la vez ayudan a identificar otras características eléctricas de los circuitos como la resistencia, capacidad e inductancia.

Por otra parte, el segundo método es el indirecto el cual se basa en calcular la corriente tomando en consideración otras magnitudes eléctricas como la resistencia y el voltaje a partir de la ley de Ohm ( $I=V/R$ ). [8]

### **3.2.2 Señales eléctricas**

Las señales eléctricas son variaciones en el tiempo generadas por algún fenómeno electromagnético que son utilizadas para transmitir información o representar fenómenos físicos en sistemas eléctricos y electrónicos. [9]

Las señales eléctricas son representaciones físicas de información a través de variaciones controladas de voltaje o corriente dentro de un sistema eléctrico, son fundamentales en la transmisión y procesamiento de datos en todo tipo de dispositivos que requieren el uso de

electricidad y se caracterizan por poseer propiedades de amplitud, frecuencia, fase y forma de onda, las cuales determinan el comportamiento de las señales y su transmisión, siendo cruciales en el uso de aplicaciones, componentes y materiales ya que una distorsión en la señal puede afectar la precisión y confiabilidad del sistema eléctrico. [10]

Tomando en consideración los conceptos anteriormente mencionados se puede entender a las señales eléctricas como los distintos niveles de tensión, corriente, resistencia y energía que se puede medir con la ayuda de instrumentos técnicos que permiten conocer la cantidad de corriente existente en un determinado lugar o en los materiales eléctricos.

### **3.2.2.1 Importancia de las señales eléctricas**

Las señales eléctricas son fundamentales prácticamente en el uso de todos los sistemas eléctricos y electrónicos modernos por lo que su importancia radica en que permiten transmitir, procesar y representar información de forma eficiente, rápida y precisa hacia los componentes, materiales e instrumentos que requieran electricidad a fin de lograr una tensión o potencia estable evitando que se dañen y logrando un funcionamiento adecuado. [10]

### **3.2.3 Ondas**

Son fenómenos que consisten en la propagación de propiedades físicas o perturbaciones a través de un medio o el espacio, llevando energía de un lugar a otro, es decir de inicio a fin por lo que las ondas se basan en función del tiempo y de la intensidad. [11]

Las ondas en si son efectos causados por propiedades físicas o perturbaciones existentes, estas pueden ser modificadas por la variación de diversos factores como el aire, densidad y demás aspectos que influyen para la alteración en un determinado campo.

#### **3.2.3.1 Características de las ondas**

- **Amplitud:** Se relaciona con la cantidad de energía transportada por la onda, por lo que se define como una medida de fuerza del voltaje, presión y otros aspectos que interfieren en los movimientos de las ondas.
- **Longitud de onda:** Es la distancia física mínima de separación entre dos puntos consecutivos en relación a una onda, por lo que se caracteriza por la separación de dos puntos que se encuentran en un mismo estado de oscilación.

- **Frecuencia:** Se define como la velocidad a la que se produce un número de ciclos o formas de onda completa, la frecuencia se mide en hercios Hz, y está inversamente relacionada con el periodo o longitud de la forma de la onda que es una medida de la distancia entre dos picos similares en ondas adyacentes, un ejemplo claro es que si las frecuencias son altas los periodos tienden a ser cortos.
- **Velocidad:** Es la rapidez con la que se propaga la onda, esto depende del medio mediante el cual viaja la onda como la electricidad, vibración, viento y demás elementos que pueden llegar a perturbar la señal.
- **Fase:** Es la colocación temporal de un ciclo en relación con una forma de onda o punto en el tiempo, la fase relaciona matemáticamente a las ondas con el movimiento circular, es decir con un círculo completo que se identifica por sus 360°. [12]

### 3.2.3.2 Clasificación de las ondas

- **Mecánicas:** Para Sears & Zemansky definen a las ondas mecánicas como “Perturbaciones que requieren un medio material para propagarse ya que su transmisión se basa en las interacciones entre las partículas del medio”. Tomando en cuenta esto se puede decir que las ondas mecánicas son perturbaciones que se propagan a través de un medio material sean sólidos, líquidos y gases, se caracterizan por ir transportando energía sin trasladar materia de manera permanente; por lo que las partículas del medio vibran alrededor de su posición de equilibrio, transmitiendo energía de unas a otras [13]
- **Electromagnéticas:** Es aquella que se propaga a través del espacio vacío o de un medio material, se forma por dos componentes perpendiculares entre sí, un campo eléctrico y un campo magnético los cuales varían en el tiempo y en el espacio, además pueden tener frecuencias diferentes que determinan la longitud de onda y su energía [14]
- **Eléctricas:** Son perturbaciones que se dan en el campo eléctrico, el cual es una fuerza que actúa sobre partículas cargadas, estas pueden variar en el tiempo y en el espacio generando cambios de intensidad y dirección del campo, lo que permite transportar energía a través de medios conductores como cables, líneas de transmisión, conectores eléctricos y demás elementos que transmiten corriente para el funcionamiento de materiales, máquinas y componentes que funcionan con corriente [14]

### 3.2.3.3 Tipos de ondas

- **Ondas cuadradas:** Son ondas que pasan de un estado a otro de tensión a intervalos regulares en un tiempo muy reducido, por lo general son utilizados para probar amplificadores debido a que este tipo de señales contienen en sí mismas todas las frecuencias, un ejemplo claro de estas señales se da en los televisores, radios y ordenadores. Por otra parte, las ondas cuadradas se caracterizan por cambiar de valores extremos sin la necesidad de un estado intermedio, por lo que se puede asociar a los pulsos eléctricos debido a que estos son 0 y 1. [15]

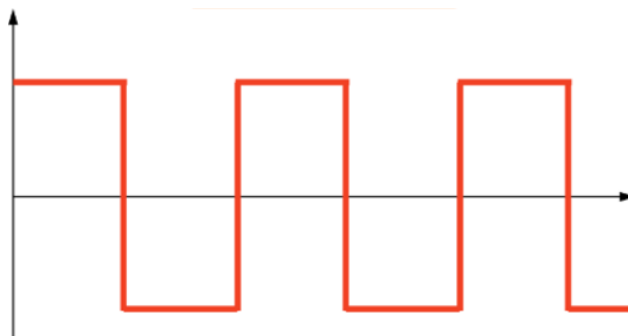


Figura 3: Onda cuadrada

- **Ondas triangulares:** Son aquellas que se producen en circuitos diseñados para controlar voltajes de forma lineal como el por ejemplo el barrido horizontal de un osciloscopio analógico, o el barrido sea horizontal o vertical de una televisión. Por lo que las transiciones entre el nivel mínimo y máximo de las señales son denominadas rampas debido a que van cambiando a un ritmo constante. [16]

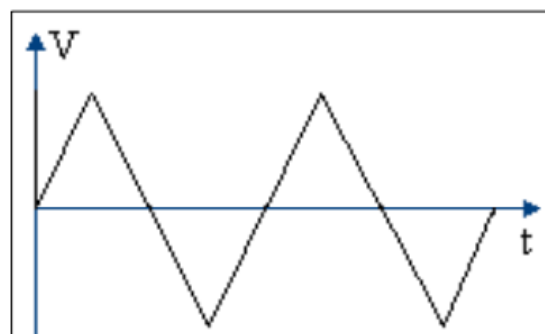


Figura 4: Onda triangular

- **Ondas senoidales:** Son aquellas ondas que representan una magnitud cuya variación viene dada por una función trigonométrica del tiempo seno, coseno, etc. Por lo tanto,

si la magnitud cambia de sentido dentro del intervalo correspondiente a cada periodo se denomina onda senoidal. [16]

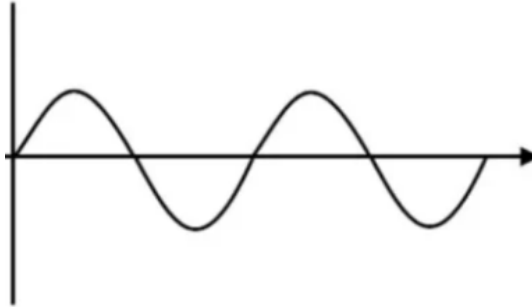


Figura 5: Onda senoidal

### 3.2.4 Inversor

Es un dispositivo electrónico de potencia que se caracteriza por la conversión de un voltaje de entrada continuo a un voltaje de salida alterno donde su frecuencia puede variar dependiendo de la modulación, por lo que los inversores se utilizan en gran variedad de aplicaciones desde fuentes pequeñas de alimentación para computadoras hasta aplicaciones industriales que sirven para controlar altas potencias, además de poder ser empleados en la red eléctrica o en instalaciones eléctricas aisladas. [17]

#### 3.2.4.1 Aplicaciones del inversor

- **Respaldo de energía:** Los inversores se usan para proporcionar energía de respaldo sea esta residencial o comercial durante los cortes de la red eléctrica, dicho respaldo se da mediante la conversión de energía DC de baterías, paneles solares en energía AC para el funcionamiento de electrodomésticos y equipos esenciales.
- **Sistemas de alimentación ininterrumpida:** Son utilizados en los sistemas UPS para proporcionar energía temporal, garantiza el suministro de energía continuo a dispositivos críticos como computadoras, servidores y equipos que son de ayuda para la sociedad.
- **Vehículos eléctricos:** Se emplean en vehículos eléctricos para convertir la energía DC de la batería en AC y esta ser adicionada al motor.

- **Aplicaciones industriales:** Contribuyen al control de los motores, variadores de frecuencia y velocidad logrando obtener eficiencia energética y mejor control en los procesos industriales.
- **Acondicionamiento de energía:** Los inversores son utilizados para mejorar la calidad de energía AC regulando el voltaje y la frecuencia a fin de corregir las fluctuaciones de voltaje, armónicos y anomalías de energía suministrando estable y limpia para equipos electrónicos sensibles.
- **Iluminación de emergencia:** Alimentan luces de emergencia y señales de salida durante cortes inesperados de energía, garantizando que los sistemas de iluminación de emergencia permanezcan operativos cuando falle el suministro eléctrico principal [18]

### 3.2.4.2 Tipos de inversores

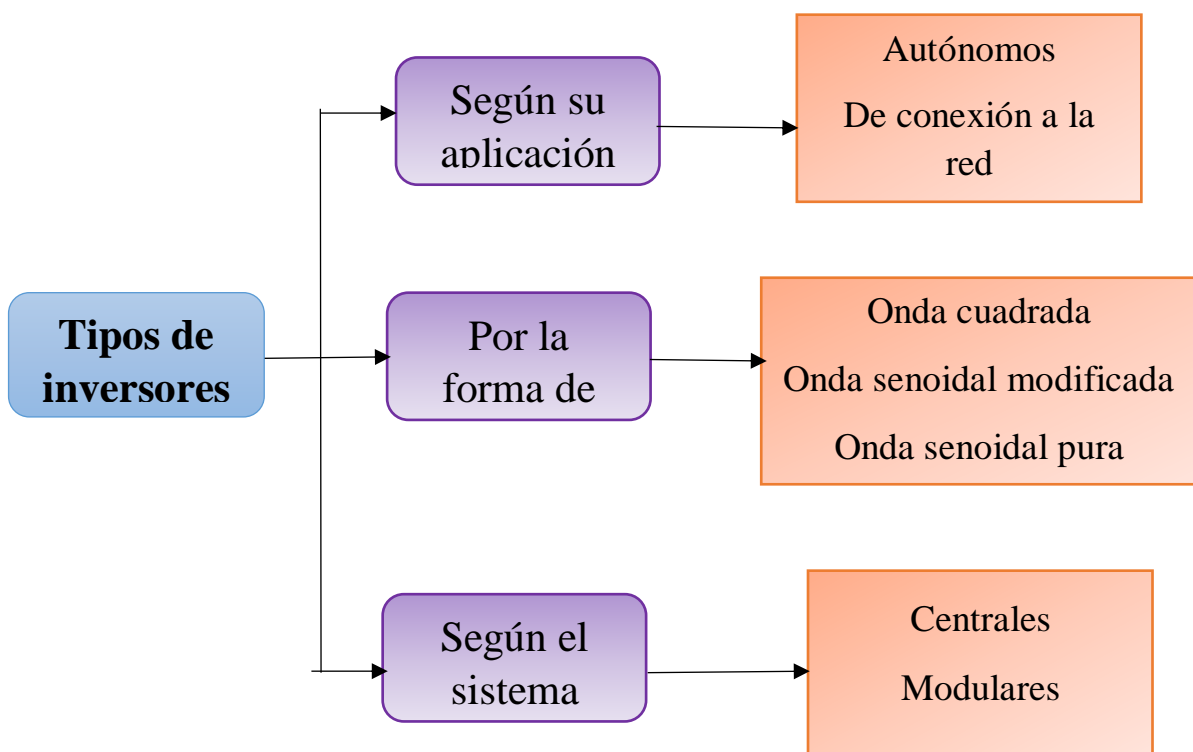


Figura 6: Tipos de inversores

- **Inversores autónomos:** Son conocidos como fuera de red o inversores off-grid, se utilizan en instalaciones solares aisladas a la red eléctrica, por lo que son ideales para

cabañas, fincas y lugares alejados donde no se tiene acceso a la conexión eléctrica. Los inversores autónomos se caracterizan por funcionar en conjunto con sistemas de almacenamiento de energía como las baterías que proporcionan electricidad continua incluso cuando el sol no está disponible. [19]

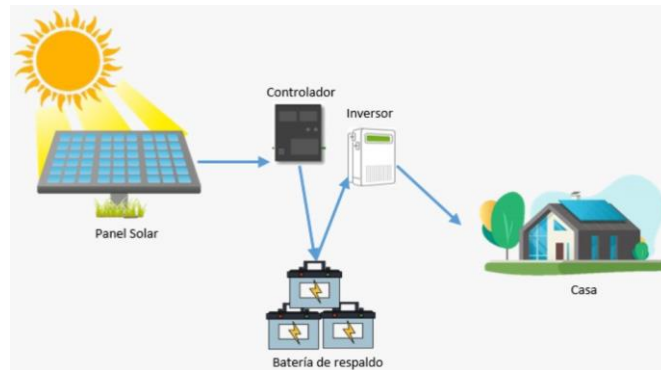


Figura 7: Inversor autónomo

- **De conexión a la red:** Son conocidos como on-grid, se caracterizan porque se pueden conectar tanto a la instalación fotovoltaica como a la red pública, son los más comunes en instalaciones solares residenciales y comerciales, estos inversores no almacenan energía por lo que no funcionan durante un corte de energía debido a que están diseñados para trabajar en sincronía con la red eléctrica. [19]



Figura 8: Inversor de conexión a la red

- **Inversores híbridos:** Son diseñados para poder aprovechar al mismo tiempo las distintas fuentes de energía como la energía fotovoltaica, eólica, red eléctrica y todo aquello que posibilita la acumulación de energía, su uso es apropiado en lugares donde no llega la red eléctrica o es de baja calidad, los inversores híbridos se caracterizan por dimensionar correctamente los recursos y aprovecharlos al máximo. [20]



Figura 9: Inversores híbridos

- Inversores de onda cuadrada:** Son componentes clave en energía para transformar la corriente continua que se obtiene de una placa fotovoltaica en corriente alterna, por lo que sus valores cambian de positivos a negativos sin pasar por puntos intermedios. Este tipo de inversores se utilizan con cargas inductivas o resistivas pequeñas como el encendido de luces básicas, alimentación de equipos de construcción y herramientas de electrónica analógica, ordenadores y equipos domésticos pequeños. [21]

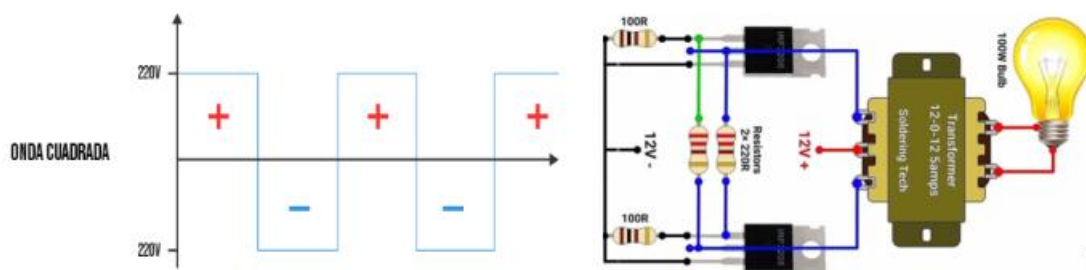


Figura 10: Inversor de onda cuadrada

- Inversor de onda senoidal modificada:** Son dispositivos que convierten la corriente continua (CC) en corriente alterna (AC), este tipo de inversos proviene de la onda cuadrada con algunas alteraciones que utilizan conmutadores electrónicos encargados de modificar los pulsos para que su onda salga lo más parecida a una senoidal pura. Por otra parte, el inversor de onda senoidal modificada se caracteriza por ser más costoso que el de onda cuadrada debido a que es más sofisticado y complejo, es adecuado para aparatos con cargas resistivas e iluminación como televisores, ordenadores y algunos electrodomésticos. [21]

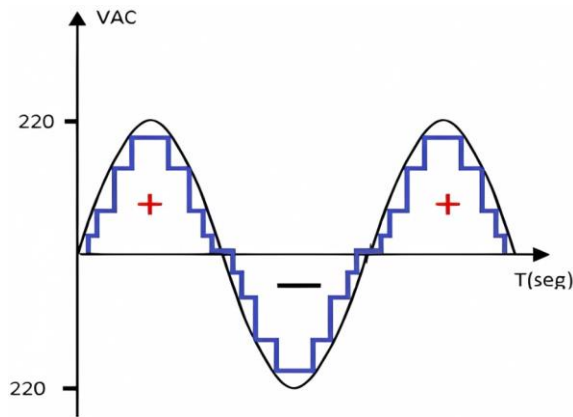


Figura 11: Inversor de onda senoidal modificada

- Inversor de onda senoidal pura:** Se encarga de convertir la corriente continua en alterna de alta calidad generando una frecuencia y una tensión de gran precisión y exactitud donde la onda resultante es más pura o limpia y estable que la misma red eléctrica debido a que utiliza tecnología avanzada como microprocesadores siendo ideales para alimentar equipos electrónicos delicados como computadoras, televisores, equipos médicos y otros aparatos modernos que necesitan un mayor cuidado, además de ser empleados en instalaciones industriales permitiendo el arranque de máquinas con picos de corrientes iniciales elevadas. [22]

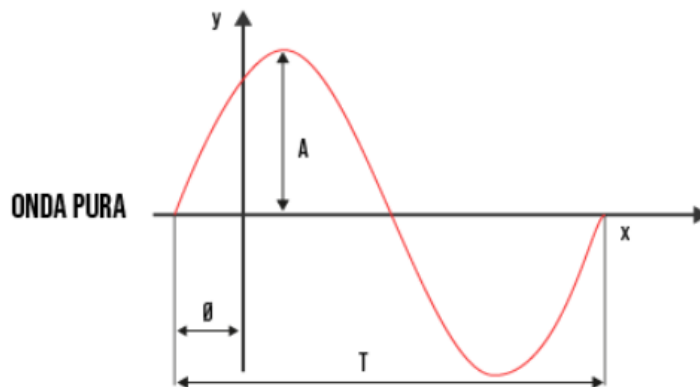


Figura 12: Inversor de onda senoidal pura

- Inversor de sistema modular:** Este tipo de inversor se caracteriza por componerse de varios módulos más pequeños que están conectados de manera paralela y trabajan juntos para convertir la corriente continua en corriente alterna, estos módulos pueden ser quitados o agregados según sea necesario para satisfacer los requisitos de energía de una aplicación específica [23]

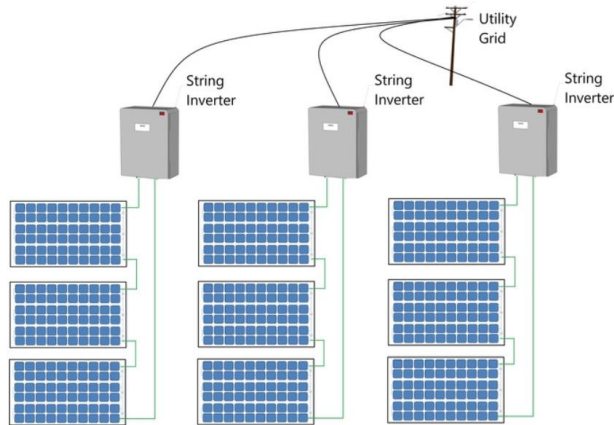


Figura 13: Inversor de sistema modular

- Inversor de sistema central:** Es un convertidor empleado en sistemas de energía solar a gran escala, por lo que está diseñado para convertir energía la corriente continua generada por gran cantidad de paneles solares en corriente alterna para su integración en la red eléctrica. Los inversores centrales son capaces de manejar altas potencias siendo ideales para instalaciones solares comerciales y parques solares de gran tamaño, su diseño permite la conexión de múltiples paneles hacia un único punto de conversión que facilita la gestión centralizada proporcionando eficiencia en la distribución de energía. [24]

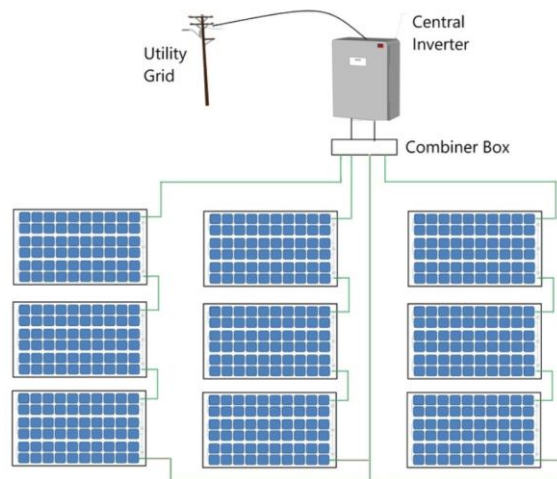


Figura 14: Inversor de sistema central

### 3.2.4.3 Ventajas de los inversores

Los inversores solares tienen varias ventajas significativas dentro de los sistemas de energía solar debido a que permiten el uso de energía generada desde el sol hacia los paneles para el funcionamiento de diversos componentes eléctricos y electrónicos. Entre las ventajas de los inversores solares se tiene:

- Maximizan la producción de los paneles solares mediante un ajuste del PWM de manera individual
- Son adaptables a espacios con sombra o que tienen diseños complejos
- Generan un ahorro económico en la factura eléctrica debido a que reducen la dependencia a la red eléctrica disminuyendo su uso.
- Tienen larga vida útil por lo que pueden durar alrededor de 25 años
- Proporcionan mayor eficiencia minimizando las pérdidas, regulan la baja de tensión y maximizan la energía utilizable.
- Los inversores operan sin generar ruido por lo que son ideales para sitios o lugares residenciales. [25]

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1 Diseño Conceptual**

El diseño conceptual del inversor se basó en la necesidad de convertir energía en corriente continua, proveniente de una fuente de baja tensión (24 VDC), en energía alterna trifásica con una tensión de salida de 220 V entre líneas. Con base en este requerimiento, se definieron cinco etapas funcionales esenciales: alimentación, control, excitación de compuertas, conmutación de potencia y acondicionamiento de salida.

Cada una de estas etapas fue diseñada para cumplir una función específica dentro del proceso de conversión, permitiendo así un control preciso del flujo energético y una separación clara entre los bloques del sistema. Este enfoque modular garantizó una mayor facilidad para el dimensionamiento, construcción, mantenimiento y escalabilidad del sistema. La arquitectura se diseñó de manera tal que la energía suministrada desde la fuente se canalizara inicialmente hacia la etapa de conmutación, la cual sería controlada por señales generadas desde un microcontrolador. Estas señales, de tipo SPWM, serían desfasadas  $120^\circ$  para permitir una generación trifásica balanceada. Posteriormente, se planteó el uso de una red LC por fase para filtrar la señal modulada, y finalmente, el uso de transformadores monofásicos en configuración estrella para elevar la tensión a un nivel adecuado para la carga.

## 4.2 Matriz de relación de variables

La Tabla 1 presenta una clara distinción entre las variables independientes y dependientes del sistema de conversión de energía, lo que resultó fundamental para una comprensión más profunda y estructurada del funcionamiento del inversor trifásico. La identificación de estas variables permitió establecer relaciones clave entre las condiciones de entrada y los resultados esperados en el sistema, facilitando así un diseño técnico coherente y eficiente.

Tabla 1 Matriz de relación de dependencia de variables

<b>Variables independientes</b>	Tensión de entrada (24 VDC), frecuencia de operación (60 Hz), tipo de carga (resistiva), potencia nominal (1.5 kW), técnica SPWM, configuración de salida.
<b>Variables dependientes</b>	Prototipo funcional del inversor trifásico de onda senoidal pura.

La Tabla 2 muestra que las variables de entrada estuvieron directamente relacionadas con el diseño eléctrico del sistema, mientras que la variable dependiente corresponde al prototipo funcional resultante, que cumple con las condiciones de operación establecidas en el diseño.

Tabla 2 Matriz de variables de entrada

Concepto	Dispositivos	Indicadores	Ítem	Técnicas
Señal digital	Microcontrolador	SPWM a 60 Hz y 120° de desfase	Unidad de control	Modulación por ancho de pulso (SPWM)
Señal digital	Driver de compuerta	Activación ON/OFF de IGBTs	Etapas de excitación	Disparo aislado por canal
Señal analógica	Etapas de conmutación	Tensión AC modulada por fase	Inversor trifásico	Conmutación de puente trifásico
Señal filtrada	Filtro LC	Onda senoidal por fase	Red de salida	Atenuación de armónicos

*Responsables: Los autores*

La Tabla 3 muestra que las variables de entrada estuvieron asociadas a señales generadas, procesadas y condicionadas en distintas etapas del inversor, permitiendo obtener una señal senoidal trifásica a la salida del sistema. Cada concepto técnico fue abordado mediante el uso de componentes específicos y técnicas de conversión electrónica de potencia.

Tabla 3 Matriz de variables de salida

VARIABLES DE SALIDA					
Relacionadas con la generación, conversión y entrega de señal alterna trifásica de calidad para cargas resistivas.					
Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Dispositivos
Tensión de salida	Eléctrica de potencia	127 V por fase – 220 V línea–línea	Salida del inversor	Elevación con transformador	Transformador monofásico
Señal por fase	Eléctrica (forma de onda)	Onda senoidal a 60 Hz	Línea de salida	Filtrado LC	Bobina + Condensador
Frecuencia	Parámetro de operación	60 Hz estable	Sistema completo	SPWM controlada	Microcontrolador
Balance de fases	Calidad de red trifásica	Desfase de 120°	Fases A, B y C	Control sincronizado	Unidad de control
Corriente entregada	Capacidad de carga	41.7 A por fase (estimada 24 VDC)	Terminal de carga	Conversión trifásica	Inversor de potencia

La Tabla 3 resume las variables de salida generadas por el sistema. Estas variables caracterizaron el rendimiento del inversor y validaron el cumplimiento de los parámetros de diseño establecidos. Se observó que el sistema fue capaz de entregar una señal senoidal trifásica balanceada, con una frecuencia constante y un nivel de tensión adecuado para la aplicación propuesta.

### 4.3 Diagrama de funcionamiento básico

Con el fin de representar de forma clara la lógica de operación del sistema, se elaboró un diagrama funcional del inversor, dividido en cinco etapas secuenciales que reflejan el proceso de conversión desde la entrada hasta la salida. Estas etapas fueron definidas con base en la función principal que cumple cada subsistema en el proceso global.

En la primera etapa, se dispuso una fuente de alimentación que suministró 24 VDC al sistema. Esta fuente proporciona la energía principal para el funcionamiento del inversor. Su estabilidad y capacidad de corriente resultaron esenciales para garantizar una operación continua y segura.

La segunda etapa correspondió a la unidad de control, que estuvo compuesta por un microcontrolador encargado de generar señales moduladas por ancho de pulso (SPWM) con una frecuencia base de 60 Hz. Se diseñó un sistema que permitió generar tres señales desfasadas entre sí en  $120^\circ$ , correspondientes a las fases A, B y C de una red trifásica. Estas señales fueron la base para el control de la conmutación de los interruptores de potencia.

La tercera etapa consistió en un conjunto de drivers de compuerta, cuya función fue acondicionar las señales provenientes del microcontrolador para que pudieran accionar de manera eficiente los dispositivos de conmutación. Estos circuitos intermedios permitieron adaptar los niveles de tensión y corriente requeridos para abrir y cerrar correctamente los interruptores electrónicos en cada fase.

En la cuarta etapa, se integró el puente inversor trifásico, formado por seis interruptores electrónicos de potencia (dos por fase). Estos dispositivos fueron comandados por las señales SPWM ya acondicionadas, y su función fue transformar la energía continua en señales de corriente alterna moduladas. A la salida de esta etapa, se implementaron filtros LC por fase con el objetivo de eliminar los componentes de alta frecuencia y obtener una señal senoidal lo más limpia posible.

Finalmente, en la quinta etapa, se incorporaron transformadores monofásicos conectados en configuración estrella. Estos dispositivos permitieron elevar la tensión de salida de cada fase desde un valor bajo (posterior a la conmutación) hasta los 127 V fase-neutro, obteniendo así un total de 220 V entre líneas, adecuados para alimentar una carga trifásica resistiva.

La Figura 15 presenta el funcionamiento estructurado, donde se observa el flujo de señal y energía a través de las cinco etapas mencionadas. Esta representación permitió visualizar de forma esquemática cómo interactuaron los componentes del sistema y cómo se transformó la energía en cada fase del proceso.

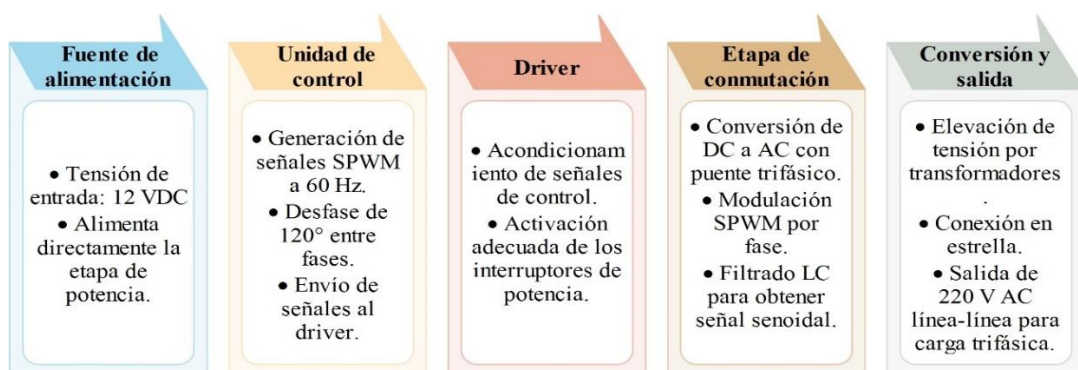


Figura 15: Diagrama de funcionamiento básico del inversor trifásico.

#### 4.4 Diagrama de flujo

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 16 representa la secuencia lógica del funcionamiento del inversor trifásico, desde la activación del sistema hasta la entrega de energía a la carga. En él se detalla el proceso de generación de señales SPWM desfasadas, la conmutación secuencial de los IGBT por fase, así como el filtrado y la elevación de la señal de salida. Este diagrama permitió visualizar de forma clara y ordenada la lógica de control implementada, facilitando el análisis del sistema y su posterior validación funcional.

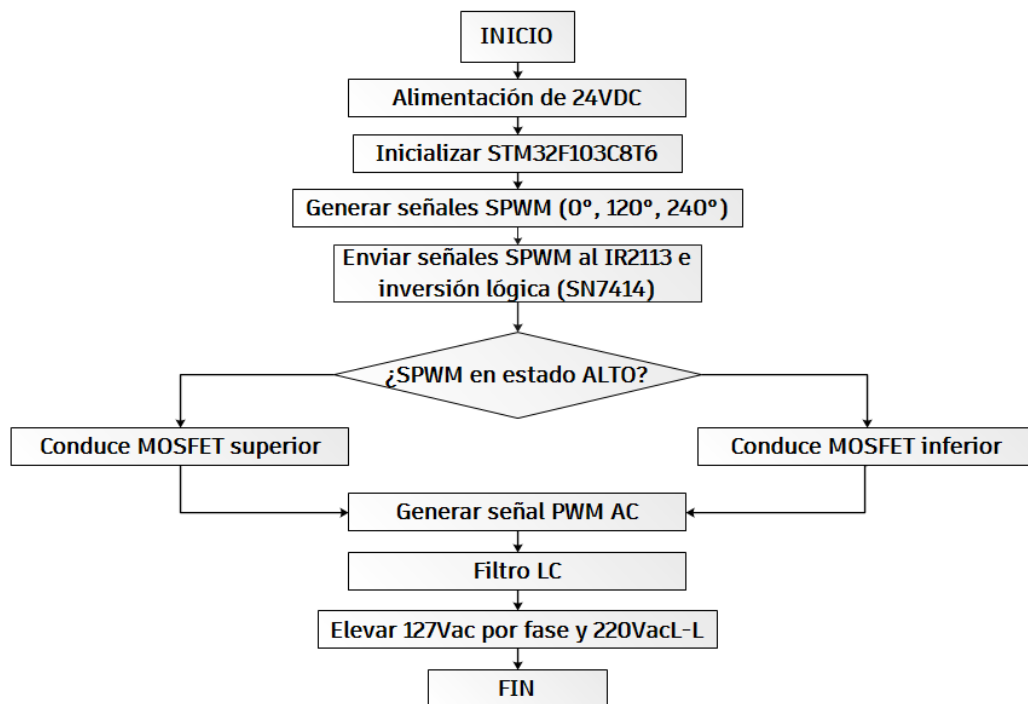


Figura 16: Diagrama de flujo del funcionamiento del inversor trifásico.

#### 4.5 Diseño del inversor DC–AC trifásico

El presente apartado detalla el desarrollo de los cálculos requeridos para el diseño y construcción de un inversor trifásico de corriente continua a corriente alterna (DC/AC) con salida de onda senoidal pura. Se consideran los siguientes datos:

- Potencia activa total de la carga  $P = 1500 \text{ W}$
- Tensión DC de entrada  $V_{DC} = 24\text{V}$
- Tensión de salida deseada (trifásica)  $V_{LL} = 220 \text{ (}127 \text{ V fase – neutro)}$
- Frecuencia  $f = 60 \text{ Hz}$

- Tipo de carga: Resistiva pura  $FP = 1$
- Eficiencia del 85% ( $\eta=0.85$ )
- Topología: Inversor SPWM con transformadores monofásicos

#### 4.5.1 Cálculo de corriente de entrada DC

$$I_{DC} = \frac{P}{V_{DC} \cdot \eta}$$

$$I_{DC} = \frac{1500W}{24V \cdot 0.85}$$

$$I_{DC} = 78.125 A$$

Se necesitan una fuente de 24V capaz de suministrar al menos 80 A continuos.

#### 4.5.2 Diseño del inversor SPWM

El sistema de modulación por ancho de pulso senoidal (SPWM) implementado en el inversor emplea una señal senoidal de referencia a 60 Hz, que se compara con una señal portadora de alta frecuencia. Esta comparación genera pulsos modulados que, en su promedio, reconstruyen una onda senoidal. Para producir una salida trifásica equilibrada, se generan tres señales SPWM desfasadas entre sí 120 grados eléctricos. Estas señales son generadas por un microcontrolador Arduino y se envían a los drivers IR2113, los cuales excitan los IGBTs del puente inversor. Cada fase del inversor se construye con dos IGBTs, por lo que se requieren en total 6 para conformar el sistema trifásico completo.

#### 4.5.3 Selección del MOSFET

Para estimar la corriente que debe manejar cada IGBT del inversor, se parte de la potencia total del sistema y se la divide entre las tres fases, obteniendo así una potencia de 500 W por fase. Luego, se aplica la fórmula básica de potencia eléctrica, considerando que cada IGBT conduce corriente desde la fuente de 24 VDC hacia una de las fases del inversor.

$$I_{MOSFET} = \frac{P_{fase}}{V_{DC}}$$

$$I_{MOSFET} = \frac{500}{24}$$

$$I_{MOSFET} = 20.833A$$

#### 4.5.4 Filtro LC por fase

Para obtener una señal de salida senoidal pura a partir de la modulación SPWM generada por el Arduino, se incorporó un filtro pasa bajos tipo LC por cada fase del inversor. Este filtro tiene como objetivo atenuar las componentes de alta frecuencia generadas por la portadora (25 kHz) y permitir el paso de la componente fundamental de 60 Hz.

$$f_c = 2500Hz$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Dónde:

$f_c$  es la frecuencia de corte en Hz

$L$  es la inductancia en henrios

$C$  es la capacitancia en faradios

Se eligió un valor práctico y comercial para el condensador,  $C = 4.4 \mu F$ , debido a su disponibilidad en el mercado y su adecuación para aplicaciones de potencia. A partir de la fórmula de frecuencia de corte se despeja  $L$  y se calcula el valor de la inductancia.

$$L = \frac{1}{(2\pi \cdot 2500)^2 \cdot 4.4 \times 10^{-6}}$$

$$L = 2mH$$

#### 4.5.5 Transformador elevador

El objetivo es elevar cada fase de manera que la tensión sea 127Vac (fase-neutro) con una potencia de 500W.

$$Relación = \frac{127}{24}$$

$$Relación = 5.3:1$$

La corriente del primario (24V) es igual que  $I_{MOSFET}$

$$I_{pri} = I_{MOSFET} = 20.833A$$

La corriente del secundario se obtiene mediante:

$$I_{sec} = \frac{500}{127}$$




$$I_{sec} = 3.94A$$

## 4.6 SELECCIÓN DE COMPONENTES

### 4.6.1 Batería

Para alimentar el inversor trifásico, se requiere una fuente de corriente continua confiable, capaz de suministrar 24 V con suficiente capacidad de corriente y autonomía para una carga de 1.5 kW. Se compararon tres tipos de baterías comunes:

Tabla 4: Comparación de baterías

Especificaciones	Batería Plomo- Ácido	Batería (LiFePO4)	Batería AGM
			
Tensión nominal	24 V	24 V	12 V
Capacidad típica (Ah)	100 Ah	100 Ah	100 Ah
Corriente máxima de descarga	400 A	100–150 A	300 A
Ciclos de vida	500–700 ciclos	2000–5000 ciclos	600–800 ciclos
Peso aproximado	28–30 kg	10–14 kg	25–28 kg
Requiere mantenimiento	Sí	No	No
Eficiencia energética	~75 %	~95 %	~85 %

Responsables: Los autores

Tras la comparación, se seleccionó la batería de ion de litio (LiFePO4) de 24 V / 100 Ah como la opción más adecuada para este sistema, ya que:




- Mayor ciclo de vida: Brinda una vida útil 4 a 6 veces superior a otras tecnologías, lo cual reduce costos de reposición.
- Alta eficiencia energética: Su eficiencia superior al 90 % minimiza pérdidas en la etapa de suministro DC.
- Menor peso y tamaño: Ideal para integrar el sistema en espacios reducidos o proyectos móviles.
- Mantenimiento nulo y alta seguridad: No requiere monitoreo constante ni recarga especial, y las celdas LiFePO4 son reconocidas por su estabilidad térmica.

A pesar de su mayor costo inicial, se justifica su uso por la mejora en eficiencia operativa, durabilidad y confiabilidad del sistema en aplicaciones de energía continua como inversores. Las baterías de plomo-ácido y AGM fueron descartadas por su menor ciclo de vida útil, mayor peso y eficiencia inferior.

#### 4.6.2 Tarjeta controladora

Para la generación de las señales moduladas por ancho de pulso (SPWM), se evaluaron tres opciones de microcontroladores ampliamente utilizados en proyectos de electrónica de potencia: el Arduino Uno, el Arduino Mega y el STM32F103C8T6. La selección se basó en el análisis de características como la cantidad de pines de entrada/salida, capacidad de procesamiento, memoria RAM y capacidades PWM, factores determinantes para la generación de señales trifásicas desfasadas (Tabla 5).

Tabla 5 Comparación de tarjetas de control

Especificaciones	Arduino Mega 2560	Arduino Uno	STM32F103C8T6
			
Procesador	ATmega2560, 16 MHz	ATmega328P, 16 MHz	ARM Cortex-M3, 72 MHz
Memoria RAM	8 KB	2 KB	20 KB

Entradas/Salidas digitales	54	14	37
Entradas analógicas	16	6	10
Pines PWM	15	6	12
Frecuencia PWM	490 Hz	490 Hz	>20 kHz
Consumo estimado	5V / 70 mA	5V / 50 mA	3.3 V / 30–50 mA
Compatibilidad	IDE Arduino, C/C++	IDE Arduino, C/C++	STM32CubeIDE, PlatformIO
Compatibilidad PWM trifásico	Limitada	Limitada	Nativa con timers sincronizados

---

Responsables: Los autores




Aunque el Arduino Uno y el Mega ofrecen una interfaz sencilla y una comunidad amplia de soporte, presentan limitaciones en frecuencia PWM y número de temporizadores dedicados. En cambio, el STM32F103C8T6, basado en arquitectura ARM Cortex-M3, permitió superar estas limitaciones gracias a:

- Su capacidad de generar señales PWM de alta frecuencia (>25 kHz) de forma estable.
- Temporizadores avanzados para control preciso por hardware.
- Mayor velocidad de procesamiento (72 MHz) frente a los 16 MHz de los AVR.

#### 4.6.3 Selección de MOSFETS

Para conmutar las fases del inversor trifásico se requiere un componente electrónico que soporte corrientes elevadas (mínimo 21 A), con tiempos de conmutación rápidos y pérdidas de potencia reducidas, especialmente considerando que el sistema opera con una tensión de entrada baja (24 V). Se consideraron tanto dispositivos tipo MOSFET como IGBT, evaluando su comportamiento térmico, velocidad de respuesta, caída de tensión interna y facilidad de manejo. En la Tabla 6 se comparan tres posibles dispositivos: un MOSFET canal N (IRFZ44N) y dos IGBTs (IRG4PC50W e IRG4BC30W).

Tabla 6 Comparación de MOSFETS.

Especificaciones	IRG4PC50W	IRG4BC30W	IRFZ44N
			
Tensión colector-emisor	600 V	600 V	55V
Corriente de colector (Ic)	46 A	30 A	30 A
RDS(on) / VCE(sat)	0.022 $\Omega$ @ VGS = 10 V	2.0 V @ IC = 25 A	1.5 V @ IC = 15 A
Conmutación	Hasta 20 kHz	Hasta 15 kHz	Hasta 30 kHz
Tensión de compuerta típica	10 V	15 V	15 V
Temperatura de operación	150 °C	125 °C	150 °C
Disipación de potencia	200 W	125 W	300 W
Aplicaciones típicas	Inversores, UPS	Fuentes SMPS	Inversores rápidos

Responsables: Los autores




Tras evaluar los tres dispositivos propuestos, se seleccionó el MOSFET IRFZ44N por su equilibrio entre capacidad de corriente, velocidad de conmutación y facilidad de manejo a tensiones bajas. Aunque los IGBT ofrecen alta tensión de bloqueo, presentan mayores pérdidas por saturación de colector, especialmente en aplicaciones de baja tensión como la presente (24 V). Además, el IRFZ44N es más económico, ampliamente disponible y permite una conmutación más eficiente en frecuencias elevadas como las usadas en SPWM.

El IRFZ44N, operando a 21 A, disipa aproximadamente 9.7 W debido a su resistencia de conducción interna. Para garantizar un funcionamiento térmico seguro, se requiere acoplar el componente a un disipador tipo clip TO-220 o de aletas atornillado, con resistencia térmica menor a 10 °C/W. Se recomienda el uso de pasta térmica entre el encapsulado y el disipador, y en configuraciones múltiples, considerar aislamiento dieléctrico si se comparte el disipador. Esta medida evita el sobrecalentamiento del componente y asegura su durabilidad y eficiencia.

#### 4.6.4 Driver de compuerta para los MOSFETSS

Para la conmutación eficiente de los MOSFETs de potencia, se requiere un circuito intermedio que adapte, amplifique y aíse las señales de control provenientes del microcontrolador. Estos circuitos, conocidos como drivers de compuerta, permiten activar y desactivar los MOSFETs con tiempos de respuesta rápidos y protecciones frente a interferencias o disparos incorrectos. En la Tabla 7 se evaluaron tres drivers comúnmente utilizados en aplicaciones de conmutación de media potencia, comparados a continuación.

Tabla 7 Comparación de drivers.

Especificaciones	IR2110	TLP250	IR2113
			
Tipo de driver	Alto/bajo	Optoacoplador	Alto/bajo
Tensión de entrada	3–20 V	5 V	3–20 V
Corriente de salida pico	2A	2.5A	2A
Aislamiento galvánico	Sí	Sí	Sí
Tiempo de retardo	120ns	500ns	120ns
Rango de tensión de salida	Hasta 600 V	Hasta 500 V	Hasta 600 V
Compatibilidad con SPWM	Alta	Media	Alta
Número de canales	2	1	2
Requiere bootstrap	Sí	No	Sí

Tras la evaluación técnica, se seleccionó el IR2113 como driver de compuerta por las siguientes razones:

- Configuración high/low side: Permite controlar dos MOSFETs por canal (uno superior y uno inferior), lo cual es ideal para topologías de medio puente o puente completo usadas en inversores trifásicos.
- Compatibilidad lógica: Opera con niveles de entrada desde 3 V, lo que facilita su conexión directa con salidas de microcontroladores como el STM32 o Arduino Mega.
- Tiempo de conmutación rápido: Ofrece un retardo de apenas 120 ns, lo que asegura una conmutación eficiente a frecuencias de modulación elevadas como 20–25 kHz.

- Corriente de salida suficiente: Entrega hasta 2 A de corriente de disparo, adecuada para controlar MOSFETs como el IRFZ44N sin necesidad de etapas adicionales.




El TLP250 fue descartado por su retardo elevado y limitación a un solo canal, lo que complica el diseño de control de múltiples fases. Asimismo, el IR2110 fue considerado similar al IR2113, pero se optó por el segundo debido a su mayor disponibilidad en encapsulado PDIP para prototipado.

#### 4.6.5 Inversor lógico

En el diseño del sistema de conmutación del inversor trifásico, fue necesario integrar un circuito que permita invertir digitalmente señales lógicas, con el fin de generar pares complementarios (HIGH/LOW) a partir de una sola señal PWM, evitando la conducción simultánea de dos IGBTs en una misma rama del puente.

Para este propósito, en la Tabla 8 se evaluaron tres circuitos integrados inversores de señal ampliamente utilizados en sistemas digitales y de control: el 74LS04, el CD4049 y el 74HC14 (SN7414). Estos dispositivos permiten adaptar la lógica de control a los requerimientos de los drivers de compuerta, garantizando una conmutación segura y sincronizada.

Tabla 8 Comparación del inversor lógico.

Especificaciones	74LS04 	CD4049 	74HC14 (SN7414) 
Tipo de inversor	No Schmitt Trigger	No Schmitt Trigger	Con Schmitt Trigger
Número de compuertas	6	6	6
Voltaje de operación	4.75–5.25 V	3–15 V	2–6 V
Tiempo de propagación típico	15 ns	100 ns	8 ns
Entrada con histéresis	No	No	Sí
Inmunidad al ruido	Baja	Media	Alta
Salida compatible TTL	Sí	No	Sí
Aplicación recomendada	Digital básica	Inversión analógica	Inversión PWM y limpieza de señal




Tras la evaluación técnica, se seleccionó el CI 74HC14 (SN7414) por las siguientes razones:

- Presencia de Schmitt Trigger: Incorpora histéresis en la entrada, lo cual elimina oscilaciones o interferencias generadas por bordes de señal lentos, ofreciendo una salida limpia y estable.
- Alta velocidad de conmutación: Con un tiempo de propagación inferior a 10 ns, resulta ideal para señales PWM de alta frecuencia como las generadas por el STM32 a 25 kHz.
- Compatibilidad lógica: Funciona con tensiones de entrada desde 2 V, lo que permite su conexión directa a microcontroladores de 3.3 V y 5 V sin requerir adaptación adicional.
- Tamaño compacto y múltiples canales: Dispone de seis inversores en un solo encapsulado DIP de 14 pines, facilitando el diseño del PCB y permitiendo invertir varias señales si fuese necesario.

#### 4.6.6 Transformador elevador

En el diseño del inversor se requiere elevar la señal alterna generada a partir de 9 V DC hasta una tensión eficaz por fase de 127 V AC, con el fin de obtener una salida trifásica de 220 V entre líneas, adecuada para sistemas eléctricos domiciliarios y comerciales en Ecuador. Para ello en la Tabla 9, se seleccionaron tres transformadores monofásicos de relación 12 V → 127 V, uno por cada fase, con una potencia nominal mínima de 600 VA cada uno (considerando que la carga total de 1.5 kW se distribuye entre tres fases con un margen de seguridad del 20 %).

Tabla 9 Comparación de transformadores elevadores.

Especificaciones	EPCOS TMB 127/12V 	Siemens 3TF trifásico 	Schneider Autotrans 220V 
Tensión de entrada	12 V AC	12 V AC	12 V AC
Tensión de salida	127 V AC	220 V L-L	220 V L-L
Frecuencia de operación	60 Hz	60 Hz	60 Hz
Potencia	600 VA	1500 VA	1500 VA
Tipo de enfriamiento	Natural (convección)	Natural o forzado	Natural o forzado

Tipo de aislamiento	Clase B o superior	Clase B o superior	No aplica
Configuración de devanado	Independiente por fase	Estrella-Triángulo (Y- $\Delta$ )	Sin aislamiento galvánico
Aislamiento galvánico	Sí	Sí	No
Modularidad	Alta	Media	Baja

Con base en la comparación presentada, se seleccionaron tres transformadores monofásicos con relación de transformación 12 V/127 V y potencia nominal de 600 VA por unidad. Esta decisión se fundamentó en la necesidad de modularidad, aislamiento galvánico por fase y facilidad de mantenimiento individual. Además, se ajustan de manera óptima al diseño del inversor que genera tres señales SPWM independientes por fase. La disponibilidad comercial del transformador EPCOS TMB 127/12 permite una implementación práctica, segura y estandarizada.

En comparación, el uso de un transformador trifásico o un autotransformador fue descartado debido a su menor flexibilidad, complejidad en mantenimiento y falta de aislamiento por fase en el último caso.

## 4.7 PROCEDIMIENTO DE IMPLEMENTACIÓN TÉCNICA

La implementación del sistema inversor trifásico se desarrolló en una secuencia técnica estructurada, iniciando desde la programación del microcontrolador hasta la verificación de la forma de onda senoidal de salida aplicada a carga. A continuación, se describen los pasos realizados con detalle técnico.

### 4.7.1 Habilitación de periféricos esenciales en STM32CubeMX

Durante la configuración del proyecto en STM32CubeMX, se activaron únicamente los periféricos estrictamente necesarios para la generación de señales SPWM y control del sistema inversor trifásico, los cuales cumplen funciones específicas:

- **GPIO:** Se habilitó el módulo GPIO, permitiendo la asignación de funciones básicas de entrada y salida digital. Este módulo fue fundamental para el control de señales auxiliares, como indicadores LED o líneas de diagnóstico. En particular, se configuró el pin PC13 como salida digital (Output push-pull), sin resistencia de pull-up o pull-

down, y con nivel lógico inicial en bajo como se observa en la Figura 17. Esta salida fue destinada como línea de prueba funcional.

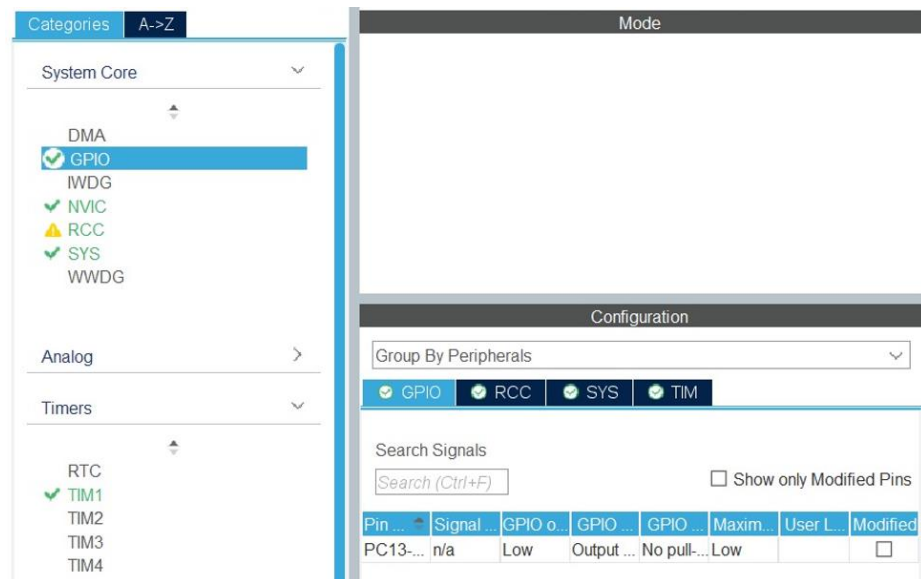


Figura 17: Interfaz de configuración del GPIO.

- **NVIC (Nested Vectored Interrupt Controller):** El sistema de interrupciones del microcontrolador fue configurado mediante la interfaz que permite gestionar eventos críticos del sistema con alta prioridad y mínima latencia. En este proyecto, el NVIC fue activado para habilitar específicamente las interrupciones asociadas al temporizador avanzado TIM1, componente fundamental en la generación de las señales SPWM trifásicas.

Dentro de la tabla de interrupciones habilitadas, se incluyeron los siguientes eventos:

- TIM1 break interrupt
- TIM1 update interrupt
- TIM1 trigger and commutation interrupts
- TIM1 capture compare interrupt

Estas interrupciones se configuraron por defecto de 4 bits, lo cual ofrece una jerarquía suficiente para mantener la sincronización entre el conteo del temporizador, la actualización de los ciclos de trabajo y la generación de flancos de conmutación (Figura 18). Esta coordinación es especialmente importante al trabajar con señales moduladas por ancho de pulso, donde

cualquier desfase podría generar un funcionamiento incorrecto del inversor o incluso una condición de cortocircuito en los MOSFETS.

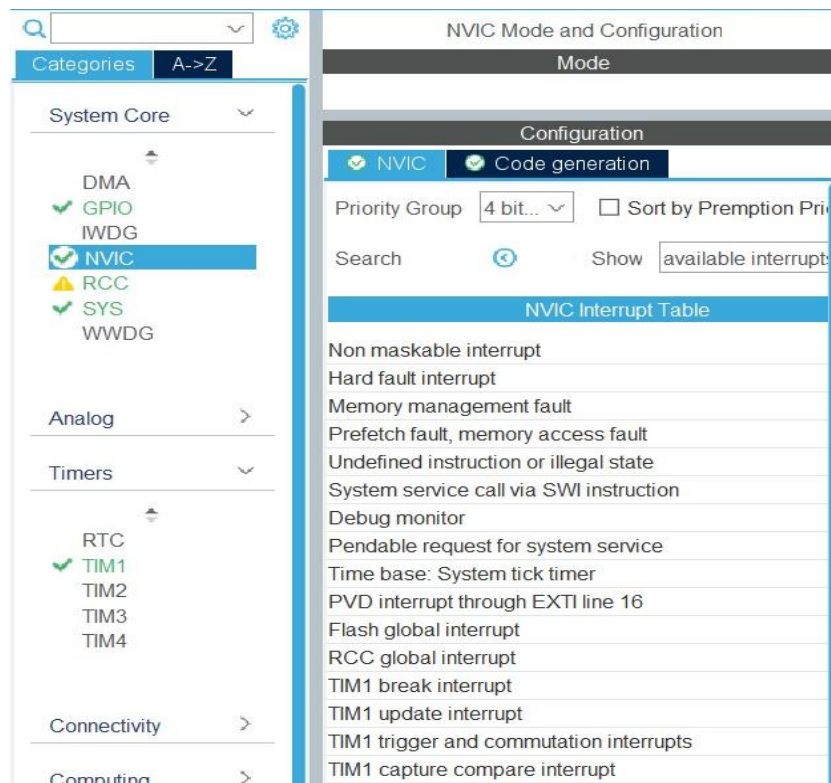


Figura 18: Interfaz de configuración del NVIC.

- **RCC (Reset and Clock Control):** El módulo RCC fue habilitado con el objetivo de garantizar una base temporal precisa y estable para la operación del sistema inversor. En la configuración del microcontrolador STM32F103C8T6 se seleccionó una fuente de reloj de alta velocidad externa (HSE) mediante cristal cerámico, con una frecuencia de 8 MHz. Esta decisión respondió a la necesidad de generar señales PWM con una resolución temporal elevada, así como de sincronizar correctamente las rutinas de actualización del sistema.

Como se ilustra en la Figura 19 se activaron los pines PD0 (RCC\_OSC\_IN) y PD1 (RCC\_OSC\_OUT), correspondientes a la entrada y salida del oscilador externo, siendo necesarios para el correcto funcionamiento del cristal. La opción de reloj de baja velocidad (LSE) fue desactivada, ya que no se requirió temporización de bajo consumo ni funciones de calendario en esta aplicación.

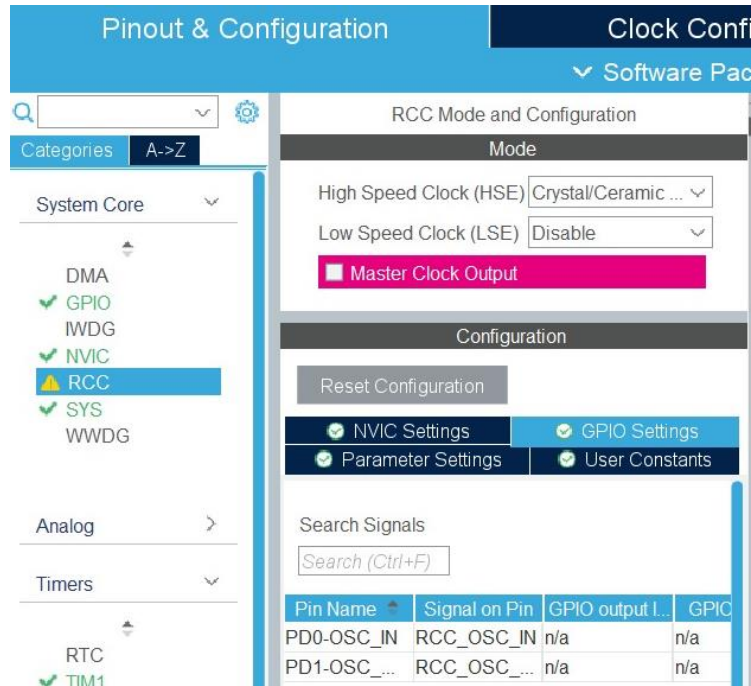


Figura 19: Interfaz de configuración del RCC.

- **SYS:** El módulo SYS fue habilitado para proporcionar las funciones básicas del sistema requeridas durante el desarrollo y operación (Figura 20). Se seleccionó el modo de depuración Serial Wire Debug (SWD), el cual permite la programación y depuración del microcontrolador STM32F103C8T6 utilizando únicamente dos líneas: SWDIO y SWCLK.

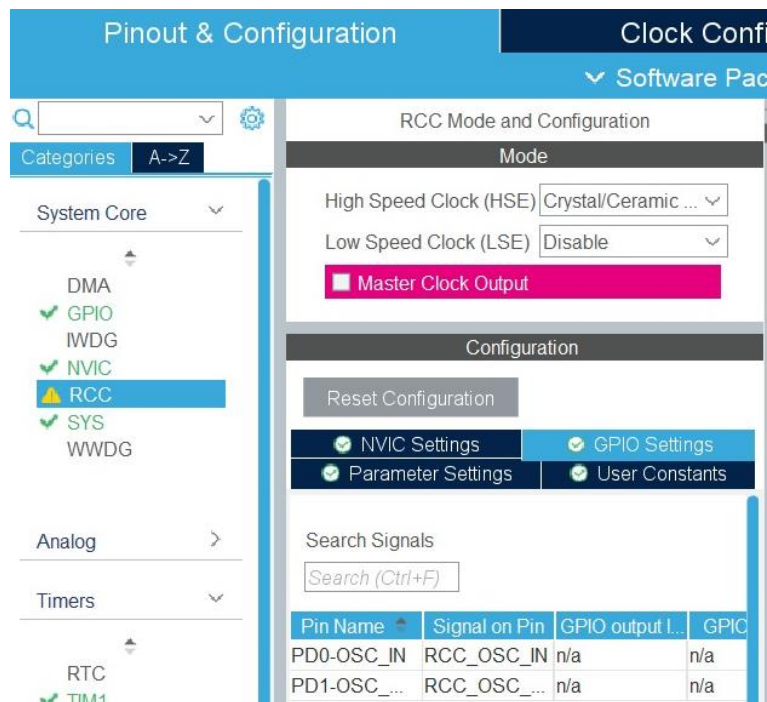


Figura 20: Interfaz de configuración de SYS.

- **TIM1:** El temporizador TIM1 fue configurado para la generación de señales SPWM necesarias en el control del inversor trifásico. Al tratarse de un temporizador avanzado, permite salidas complementarias y la inclusión de tiempo muerto, esenciales para evitar la conducción simultánea de los MOSFETs en los brazos del puente. Los canales CH1, CH2 y CH3 fueron habilitados en modo PWM Generation con salidas normales y complementarias (Figura 21).

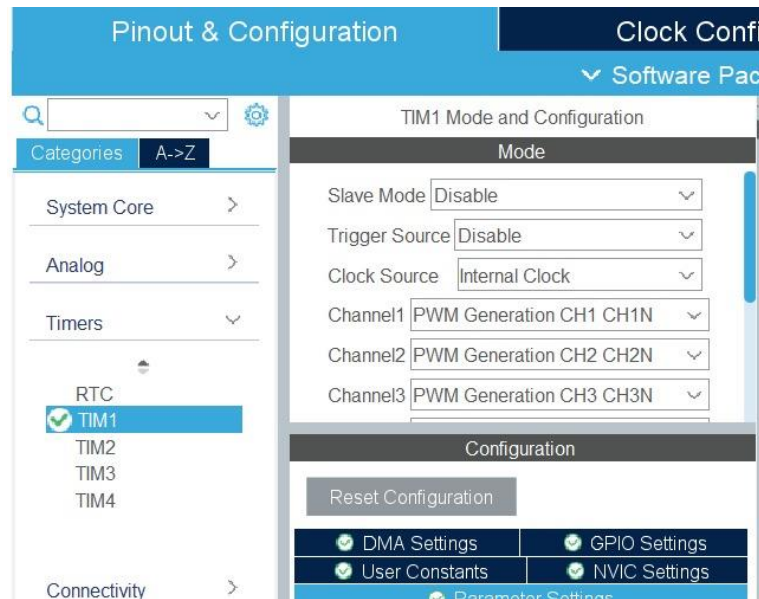


Figura 21: Interfaz de configuración de TIM1.

#### 4.7.2 Asignación de pines

En la Figura 22 se observa la asignación física de los pines del microcontrolador STM32F103C8Tx en encapsulado LQFP48 se estableció de la siguiente forma: los canales del temporizador avanzado TIM1 configurados para la generación de señales SPWM se distribuyeron de manera ordenada por fase. El canal CH1 (PA8) y su complementario CH1N (PB13) corresponden a la fase A, el canal CH2 (PA9) junto con CH2N (PB14) a la fase B, y finalmente CH3 (PA10) con CH3N (PB15) a la fase C.

Esta disposición simétrica favorece el ruteo hacia los drivers IR2113. Adicionalmente, se habilitó el pin PC13 como salida digital auxiliar, mientras que los pines PD0 y PD1 se reservaron para el oscilador externo (RCC\_OSC\_IN y RCC\_OSC\_OUT), garantizando estabilidad en la señal de reloj para una temporización precisa del sistema.



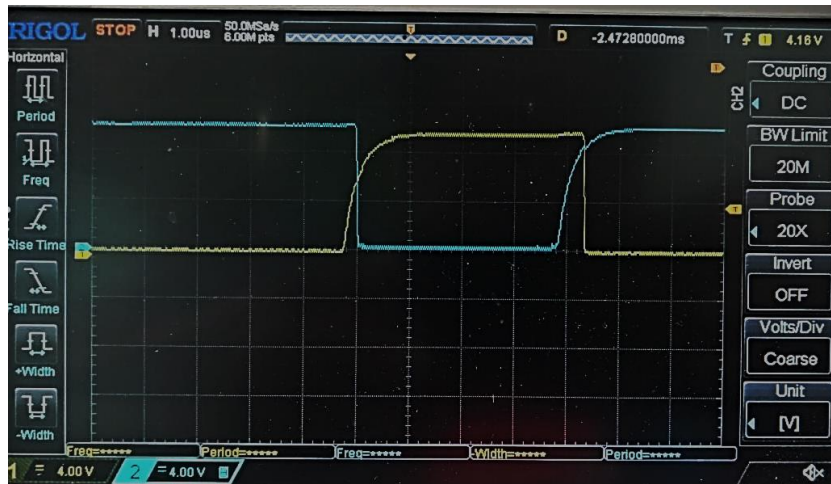


Figura 23:. Disparos generados por el STM32 con su señal inversa.

#### 4.8.2 Señales complementarias extraídas del STM32

A continuación, la Figura 24 ilustra las señales complementarias extraídas de los canales de salida del STM32 con polaridad opuesta. Estas señales, que mantienen una frecuencia de 25 kHz, son dirigidas hacia el driver IR2113 para su posterior amplificación y acondicionamiento. El desfase de seguridad, correspondiente al tiempo muerto, se mantiene entre ambas señales. Esto permite que el IR2113 genere correctamente los pulsos de control para las compuertas alta y baja sin provocar conducción cruzada.



Figura 24: Señales complementarias generadas por el STM32.

#### 4.8.3 Señales amplificadas del IR2113

La Figura 25, se visualizan las señales de salida del driver IR2113, encargado de amplificar las señales de control provenientes del STM32 para garantizar la adecuada excitación de los

MOSFETS IRFZ44N. La amplificación es esencial ya que, los niveles lógicos del microcontrolador no son suficientes para superar la barrera de activación en compuerta de estos dispositivos de potencia. Las formas de onda reflejan la elevación del voltaje de disparo, así como la presencia de picos transitorios característicos del proceso de conmutación. Estos picos se encuentran dentro de márgenes aceptables, resultado de un diseño correcto de la etapa de acoplamiento y protección entre el driver y los MOSFETS.



Figura 25: Señales amplificadas por el IR2113.

#### 4.8.4 Señales de disparo en el puente H completo

Las señales aplicadas a las compuertas de los MOSFETS que conforman el puente H trifásico corresponden a los pulsos SPWM generados y amplificados previamente, y se caracterizan por su sincronización adecuada. El análisis de las formas de onda (Figura 26) confirma una conmutación ordenada y complementaria entre las ramas superior e inferior con un margen temporal que previene la conducción simultánea de los transistores en una misma rama, protegiendo el inversor de cortocircuitos internos bajo condiciones de carga reales.



Figura 26: Disparos de compuerta aplicados a los transistores del puente H completo.

#### 4.8.5 Señal portadora

La Figura 27 muestra la señal portadora utilizada en el proceso de modulación por ancho de pulso senoidal, cuya frecuencia ha sido establecida en 25 kHz. Esta frecuencia fue seleccionada estratégicamente para asegurar una conmutación eficiente de los MOSFETS y minimizar tanto el ruido audible como las pérdidas por conmutación.



Figura 27: Señal portadora a 25kHz.

### 4.9 ELABORACIÓN DEL DISEÑO DE LA PCB

El diseño del circuito impreso fue desarrollado en el software Eagle con el objetivo de integrar todos los componentes electrónicos de forma compacta y funcional. Se partió del diseño del esquemático eléctrico, distribuyendo cada sección del sistema de forma modular para facilitar el enrute y montaje. Cabe destacar que los diagramas presentados corresponden al circuito de una sola fase, y serán replicados para las otras dos, introduciendo un desfase de  $120^\circ$  eléctrico entre ellas, conforme a los requisitos de un inversor trifásico con modulación SPWM.

#### 4.9.1 Conexión del STM32 con optoacopladores disparadores

Con el fin de garantizar un aislamiento eléctrico eficaz entre el microcontrolador STM32 y la etapa de potencia del sistema inversor, se implementó un circuito intermedio basado en optoacopladores (Figura 28). Este circuito tiene como objetivo transmitir de forma segura las señales generadas por el STM32 hacia los drivers IR2113, protegiendo así la lógica de control de posibles transitorios o sobretensiones provenientes de la etapa de salida. En el diseño se emplearon optoacopladores modelo 6N137, los cuales están configurados para trabajar con señales digitales de 3.3 V provenientes del STM32. Cada canal de disparo cuenta con un optoacoplador, acompañado de una resistencia limitadora de corriente en la entrada LED y un transistor de salida que se acopla a una compuerta lógica tipo 74LS14N. Esta última cumple la

función de conformar el pulso, mejorar la inmunidad al ruido y asegurar transiciones limpias antes de ingresar al driver IR2113, se presenta el esquema detallado de esta conexión, donde se observa la distribución de las señales de control provenientes del microcontrolador, su paso por los optoacopladores y los drivers de compuerta.

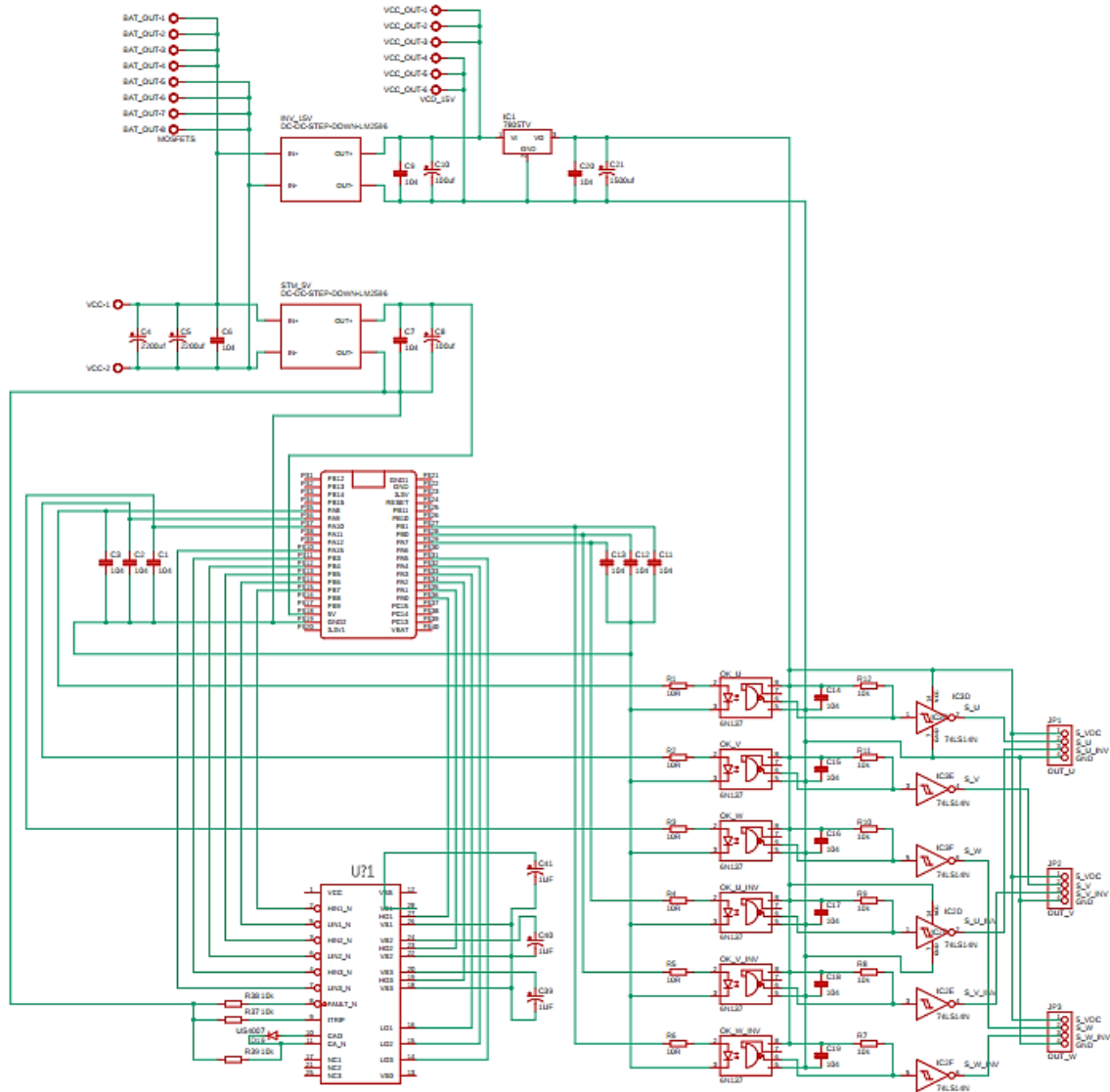


Figura 28: Diagrama esquemático de conexión del STM32.

#### 4.9.2 Circuito de conexión de los drivers IR2113

Como se observa en la Figura 29 se integró la etapa de manejo de compuertas utilizando dos módulos IR2113. Esta sección tiene la finalidad de transmitir correctamente las órdenes de conmutación hacia los transistores de potencia, proporcionando el nivel de tensión necesario para cada canal.

Cada driver dispone de una red de componentes pasivos que permiten su funcionamiento confiable, incluyendo elementos de protección y estabilización. Las salidas de esta etapa se derivan hacia el bloque de potencia mediante un conector de seis pines, diferenciando claramente los canales alto y bajo para cada rama del puente H.

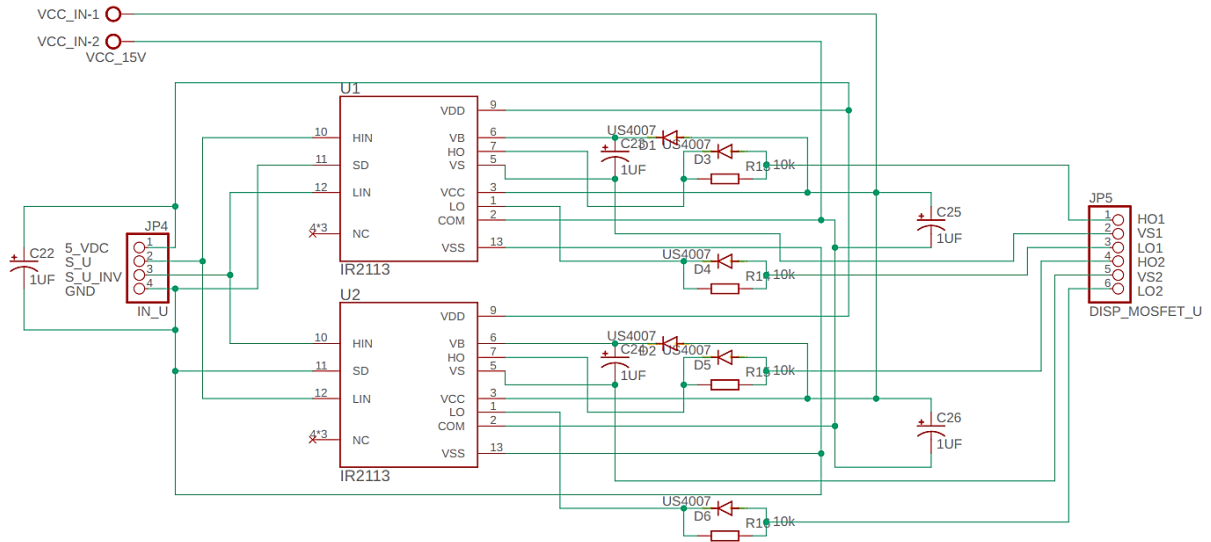


Figura 29: Circuito de control de compuertas mediante IR2113.

### 4.9.3 Módulo de conmutación con puente H de MOSFETS

Se implementó un puente H utilizando transistores MOSFET IRFZ44N. Esta configuración permite el control bidireccional de corriente hacia la carga, en la siguiente figura se aprecia la disposición de los cuatro MOSFETS (Q9, Q10, Q11 y Q12), junto con las resistencias limitadoras de puerta (R33 a R36) y el conector JP12, que facilita la conexión con la etapa de control del driver IR2113. Las señales de compuerta de alta y baja (HO1/LO1, HO2/LO2) están debidamente distribuidas a través de las líneas VS1 y VS2, lo que garantiza una correcta conmutación en cada rama del puente. También se incluyen terminales de entrada de potencia (BAT\_IN2) y de salida hacia la carga (L1\_W-1 y L1\_W-2).

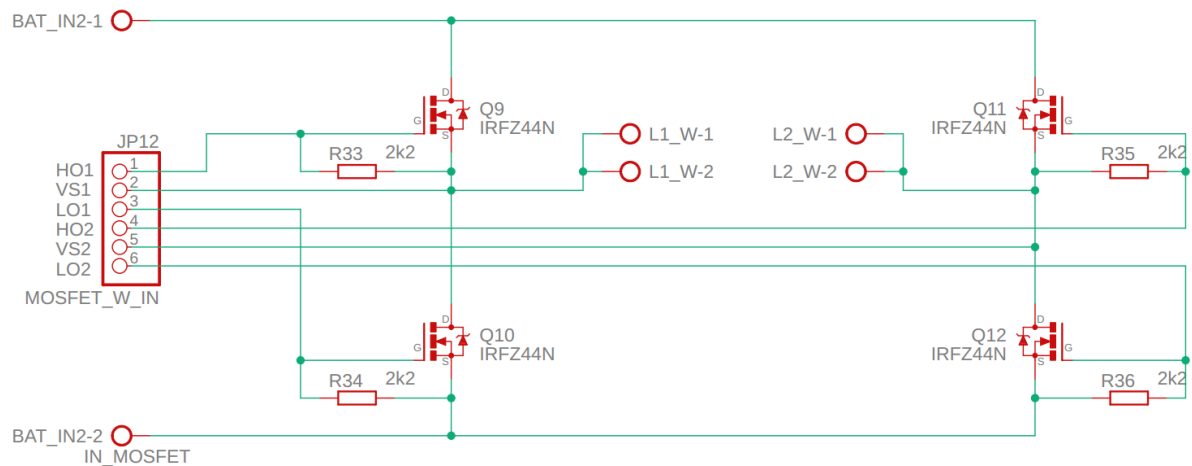


Figura 30: Esquemático del módulo de puente H.

#### 4.9.4 Generación de tierra virtual

Con el objetivo de establecer un punto de referencia común para las etapas de potencia y control, se diseñó una red de capacitores que permite la generación de una tierra virtual a partir de una fuente de tensión simétrica, facilitando de esta forma el manejo de señales bipolares en un sistema alimentado por una única batería de corriente continua.

La configuración consiste en la conexión serie de dos capacitores electrolíticos de igual valor entre los terminales positivo y negativo de la batería. El punto medio entre los capacitores se considera como masa virtual que permite que el sistema funcione como si contara con una referencia central. Esta solución es especialmente útil en aplicaciones donde no se dispone de una fuente dual real.

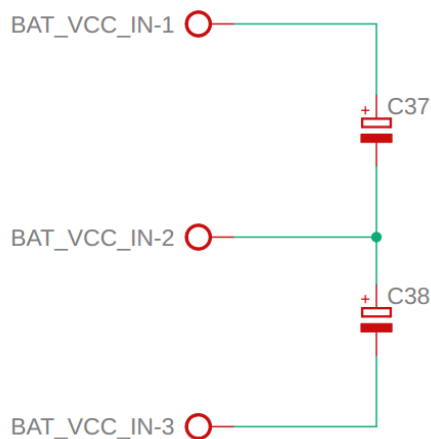


Figura 31: Esquemático de la red de capacitores para tierra virtual.

## 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Comparativa técnica: selección de MOSFETS vs IGBTs

Durante el diseño del inversor trifásico, se evaluaron dos tipos de dispositivos de conmutación: transistores MOSFET canal N y transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT). La selección final del MOSFET IRFZ44N se fundamentó en los parámetros eléctricos del sistema y en el rendimiento requerido para aplicaciones de baja tensión (24 V DC) y alta frecuencia de conmutación (25 kHz). La Tabla 10 presenta una comparación técnica que resume las ventajas y desventajas consideradas:

Tabla 10 Comparativa técnica de MOSFETS vs IGBTs.

Criterio	MOSFET (IRFZ44N)	IGBT (Ej. IRG4PC50W)
Rango de tensión de operación	Ideal para < 100 V (usado con 24 V DC)	Mejor en > 400 V (sobredimensionado para 24 V)
Frecuencia de conmutación	Alta (hasta 100 kHz), eficiente a 25 kHz	Limitada (15–20 kHz máx.), pérdidas por conmutación
Velocidad de respuesta	Muy rápida	Más lenta
Pérdidas por conmutación	Bajas	Moderadas a altas
Tamaño del disipador requerido	Menor ( $\approx$ 10 W por canal con 24 V / 21 A)	Mayor, debido a disipación térmica más elevada
Costo y disponibilidad	Económico y ampliamente disponible	Mayor costo, menor disponibilidad en versión DIP para prototipado
Facilidad de control	Requiere tensión de compuerta (10–15 V)	Requiere corriente de compuerta y driver más robusto
Aplicaciones típicas	Baja tensión, alta frecuencia, electrónica de potencia educativa	Alta tensión, UPS industriales, variadores
Criterio	MOSFET (IRFZ44N)	IGBT (Ej. IRG4PC50W)

El uso del IRFZ44N permitió una mejor integración con los drivers IR2113 y una disipación térmica controlable. En contraste, los IGBT presentaban limitaciones de velocidad,

sobredimensionamiento para el rango de tensión requerido y mayor complejidad térmica, lo que afectaría la eficiencia general del inversor.

## **5.2 Procedimiento para la validación experimental**

Una vez culminada la etapa de ensamblaje y verificación preliminar del prototipo de inversor, se procedió a la validación técnica mediante una serie de pruebas experimentales destinadas a comprobar el cumplimiento de los parámetros eléctricos establecidos durante el diseño. Estas pruebas se llevaron a cabo bajo condiciones controladas y con los equipos debidamente calibrados.

Para el registro y análisis de las señales generadas se utilizó un osciloscopio digital marca RIGOL DS1202, de 50 MHz y 4 canales, el cual permitió la observación precisa de la forma de onda en cada una de las fases del inversor. Dado que las señales de salida podían superar los 100 V AC, se emplearon puntas de prueba atenuadas 10:1, asegurando así la protección del instrumento y la correcta visualización de las señales elevadas. El osciloscopio se configuró con acoplamiento AC, y se ajustó el ancho de tiempo para capturar varios ciclos completos de 60 Hz.

Simultáneamente, se utilizaron dos multímetros digitales, uno conectado en paralelo a la salida de una fase para obtener mediciones exactas de tensión eficaz (RMS), y otro configurado para validar la frecuencia de salida. Estos valores se contrastaron con los registros del osciloscopio para obtener redundancia en la medición y descartar errores por ruido o calibración.

Para evaluar el rendimiento bajo condiciones reales, se conectó una carga resistiva trifásica balanceada, compuesta por tres resistencias cerámicas de potencia montadas sobre disipadores de aluminio. Esta carga fue conectada a través de bornes de seguridad de 4 mm, y se monitoreó su comportamiento térmico durante un periodo sostenido de prueba.

### **5.2.1 Verificación de la señal alterna sin filtrar por fase**

La Figura 32 corresponde a la señal alterna generada por el inversor en una sola fase (fase A), antes de la etapa de filtrado LC. Esta señal fue medida directamente a la salida del puente H, posterior al transformador elevador. El propósito de esta prueba fue verificar la forma inicial de la onda producida por la modulación SPWM y evaluar el nivel de distorsión presente antes de aplicar el filtrado.



Figura 32: Señal alterna sin filtrar por fase (fase A).

La forma de onda evidencia una señal alterna con una frecuencia de 60 Hz, generada por el sistema SPWM controlado por el microcontrolador STM32. Aunque presenta una forma cercana a la senoidal, se observan bordes angulosos y componentes de alta frecuencia incrustadas en la señal, producto de la conmutación a 25 kHz. Este comportamiento es típico de una señal obtenida directamente del puente H sin etapas de suavizado. Por este motivo, se procedió posteriormente a aplicar un filtro LC por cada fase, con el fin de atenuar armónicos y obtener una onda senoidal pura más adecuada para alimentar cargas sensibles. Esta misma forma de señal fue observada en las fases B y C, confirmando la simetría inicial del sistema.

### 5.2.2 Aplicación del filtro LC

En esta etapa del ensayo se aplicó el filtro pasabajos tipo LC al sistema inversor, con el fin de suavizar la señal de salida modulada por ancho de pulso (SPWM) y obtener una forma de onda senoidal pura en cada fase. El filtro instalado por fase (Figura 33) estuvo compuesto por una inductancia de 2.2 mH de inductancia (L), junto con cuatro capacitores de 2  $\mu$ F conectados en paralelo, lo que da un total de 8  $\mu$ F (C).

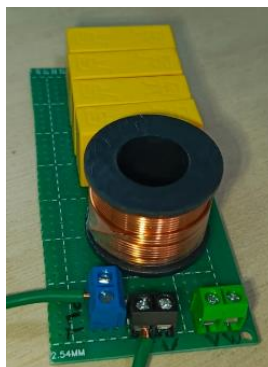


Figura 33: Filtro LC aplicado en cada fase.

Esta configuración se eligió en base a disponibilidad de componentes en el mercado y a su compatibilidad con los requerimientos de frecuencia de corte del sistema, ubicada alrededor de los 2.5 kHz.



Figura 34: Señal alterna filtrada por fase (fase A).

Como se observa en la Figura 34, la señal presenta una forma senoidal mucho más definida y continua en comparación con las señales sin filtrar. La frecuencia medida fue de 59.9 Hz, muy cercana al valor nominal de 60 Hz, y el periodo fue de aproximadamente 16.7 ms. La onda muestra una transición suave entre los picos positivos y negativos, sin presencia visible de pulsos de alta frecuencia o distorsiones por conmutación.

Esta mejora en la calidad de onda confirma el correcto funcionamiento del filtro LC, el cual atenuó las componentes armónicas superiores asociadas a la portadora de 25 kHz del sistema SPWM. La impedancia de la inductancia y la reactancia capacitiva actuaron conjuntamente para permitir el paso de la componente fundamental (60 Hz) y rechazar las de frecuencia más alta. La implementación de múltiples condensadores en paralelo se debió a la falta de disponibilidad de un solo capacitor de 8  $\mu$ F en el mercado local, siendo esta una práctica común y válida en electrónica de potencia para lograr valores personalizados y mejorar el desempeño térmico del filtro.

### 5.2.3 Visualización de señal senoidal en dos fases simultáneas

En esta prueba se realizó la medición simultánea de dos fases (Figura 35) del sistema trifásico (fase A y fase B), utilizando los canales CH1 y CH2 del osciloscopio digital RIGOL. Las señales fueron tomadas a la salida del filtro LC y después de los transformadores elevadores, con el sistema funcionando en vacío, es decir, sin carga conectada. El propósito de esta

medición fue verificar la forma de onda, la estabilidad de frecuencia y el desfase característico de  $120^\circ$  entre fases.



Figura 35: Señales senoidales en dos fases (A y B).

En la imagen se aprecia que ambas fases presentan una forma de onda senoidal con frecuencias de 60.2 Hz (CH1) y 59.5 Hz (CH2), lo cual se encuentra dentro del margen de tolerancia aceptable para sistemas de conversión DC/AC. La diferencia de frecuencia puede deberse a pequeñas variaciones temporales del sistema o ajustes en la resolución del osciloscopio, sin representar un problema funcional. La amplitud pico de ambas señales oscila alrededor de los 170 V, lo que corresponde a una tensión eficaz de aproximadamente 120–124 V, muy cercana al valor deseado de 127 V fase-neutro. Este resultado valida la efectividad del transformador elevador en ambas fases y confirma el correcto filtrado por parte de la red LC.

#### 5.2.4 Efecto de carga equilibrada en la salida del inversor

Se realizaron capturas directas mediante un osciloscopio digital en la salida del sistema conectado a una carga resistiva trifásica balanceada, obteniendo tensiones entre fases con el fin de observar la forma de onda, frecuencia y simetría entre señales. En la imagen se observa una señal de salida senoidal con frecuencia de 60.6 Hz, correspondiente a la tensión entre dos fases del inversor. Las dos ondas (Figura 36) presentan un desfase de  $120^\circ$ , una amplitud similar y buena simetría, lo cual indica que la etapa de control mediante modulación SPWM y el filtrado LC funcionan correctamente. La estabilidad de la frecuencia y la continuidad de la forma de onda confirman que el sistema responde adecuadamente al alimentar cargas resistivas equilibradas.

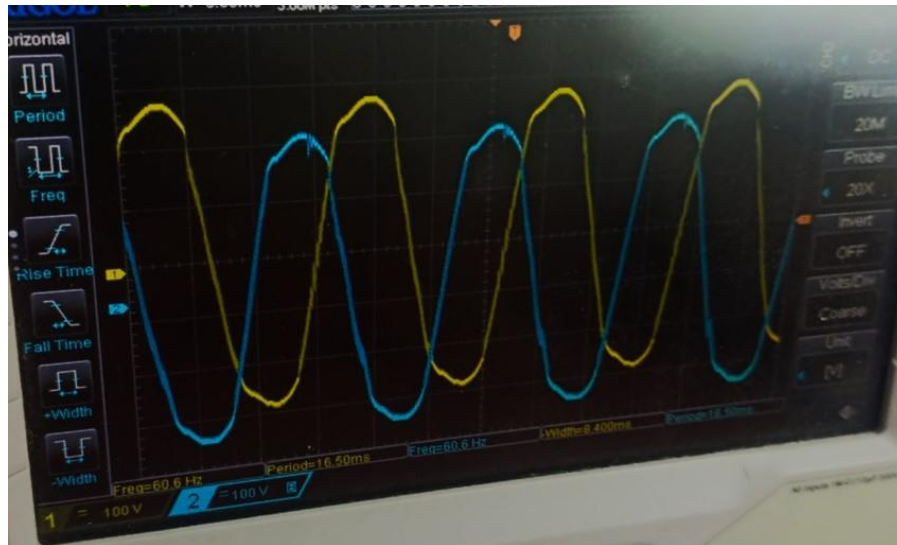


Figura 36: Señales senoidales en dos fases (A y B).

### 5.2.5 Efecto de carga desbalanceada en la salida del inversor

Se conectó una carga resistiva ligera (lámpara) únicamente en la fase A del sistema trifásico. Las fases B y C quedaron sin carga conectada. Se realizó una medición simultánea entre dos fases (A y B) utilizando los canales CH1 y CH2 del osciloscopio, posterior al transformador elevador y al filtro LC. En la figura 35 se observa una distorsión considerable en la forma de onda, especialmente en la fase cargada (línea amarilla), donde la señal presenta deformaciones en los cruces por cero y en los picos de tensión. Esta distorsión se produce debido a la asimetría en la impedancia del sistema trifásico: al estar conectada una carga únicamente en una de las fases, el punto neutro virtual del sistema se desplaza, generando desequilibrios en la distribución de tensiones entre fases, como se observa en la Figura 37.



Figura 37: Señal bajo condición de carga desbalanceada (fase A cargada).

La fase B (línea azul), que permanece sin carga, muestra también una leve perturbación, producto del acoplamiento mutuo entre fases a través del transformador y del sistema común de alimentación. Esta condición puede inducir oscilaciones de tensión y armónicos adicionales debido a la diferencia en los consumos.

Este tipo de fenómeno es típico en sistemas no compensados que carecen de un neutro físico o de un sistema activo de balance. Aunque el inversor genera una señal simétrica en condiciones ideales, la conexión de cargas desbalanceadas puede comprometer la calidad de onda si no se dispone de mecanismos de regulación por software o hardware que mantengan la simetría entre fases. Por ello, es importante mantener cargas equilibradas en sistemas trifásicos autónomos, especialmente cuando se opera sin retorno a tierra o sin sistemas activos de monitoreo de desequilibrio.

### **5.3 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS**

Con el objetivo de validar el desempeño eléctrico del prototipo inversor, se realizaron un total de 20 mediciones bajo distintos escenarios operativos, incluyendo condiciones en vacío, con carga resistiva balanceada y con cargas desbalanceadas. Los datos recopilados permitieron realizar un análisis estadístico de los parámetros eléctricos fundamentales, con el fin de evaluar la consistencia del sistema frente a las especificaciones del diseño.

A continuación, se presenta el análisis individual de los errores relativos obtenidos en 20 mediciones para cada parámetro eléctrico del inversor, considerando los valores promedios y su consistencia en el tiempo:

#### **5.3.1 Tensión fase-neutro**

En la Figura 38 se presenta el error relativo porcentual de la tensión fase-neutro, evaluado a partir de 20 mediciones consecutivas. Se obtuvo un error máximo de 0.81 % y un promedio de 0.72 %, lo cual se mantiene dentro del margen permitido por la norma IEEE Std 519-2014, que establece tolerancias de hasta  $\pm 5$  % para sistemas de distribución. Estos resultados evidencian una buena estabilidad en la salida del inversor y la adecuada selección de la relación de transformación.

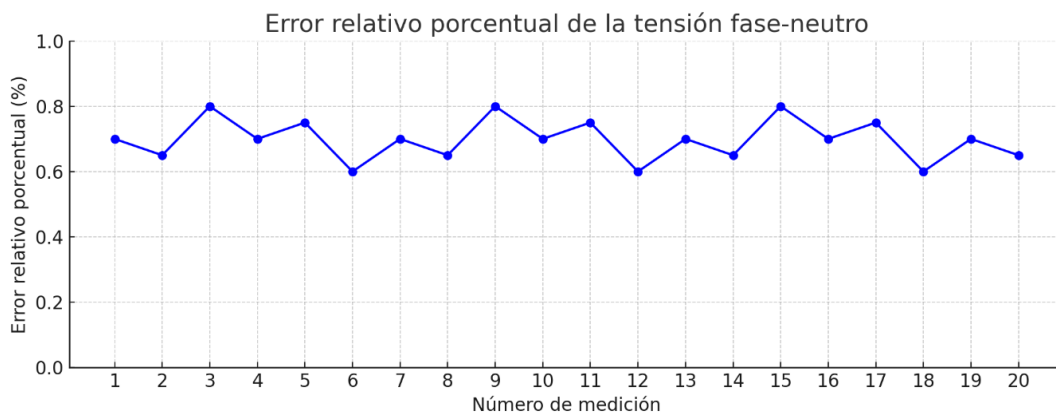


Figura 38: Error relativo porcentual de la tensión fase-neutro.

### 5.3.2 Tensión línea-línea

En la Figura 39 se muestra el error relativo porcentual correspondiente a la tensión entre líneas (línea-línea) evaluado durante 20 mediciones consecutivas. Se observó un error máximo de 0.57 % y un promedio de 0.50 %, ambos muy por debajo del límite de  $\pm 5$  % establecido por la norma NEMA MG1. Este parámetro es fundamental para la operación en sistemas trifásicos equilibrados, y se mantuvo estable a lo largo de todas las pruebas, evidenciando un comportamiento eléctrico confiable por parte del inversor.

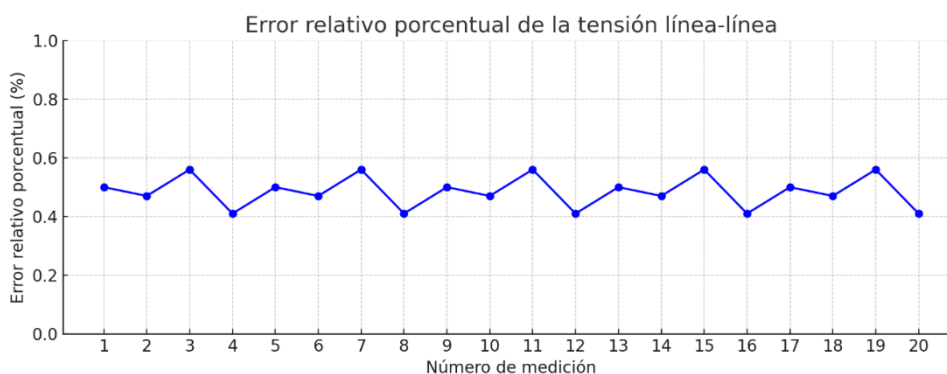


Figura 39: Error relativo porcentual de la tensión línea-línea.

### 5.3.3 Frecuencia

Como se aprecia en la Figura 40, el error relativo porcentual de la frecuencia osciló ligeramente entre mediciones, con un valor máximo de 0.22 % y un promedio de 0.20 %. Esto evidencia un excelente control de temporización por parte del microcontrolador STM32. Según la norma IEEE 1159, las variaciones admisibles en frecuencia para sistemas de distribución pueden alcanzar hasta  $\pm 1$  Hz, por lo tanto, los resultados obtenidos se encuentran ampliamente dentro del margen permitido, garantizando la estabilidad del sistema en condiciones nominales.

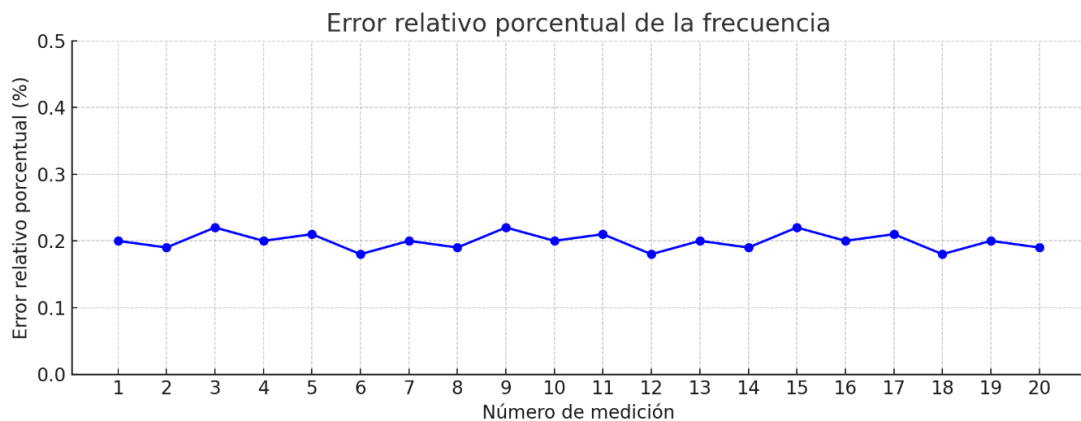


Figura 40: Error relativo porcentual de la frecuencia.

### 5.3.4 Desfase entre fases

En la Figura 41, el error relativo porcentual del desfase entre fases se mantuvo prácticamente constante en las 20 mediciones realizadas, con un valor promedio de 0.29 % respecto al ángulo teórico de  $120^\circ$ . Este resultado evidencia una sincronización angular precisa entre las fases, atribuible al correcto uso de los canales complementarios del temporizador TIM1 del STM32. Esta precisión es crítica para garantizar un sistema trifásico equilibrado y asegurar la correcta operación de cargas conectadas, especialmente aquellas sensibles a variaciones de fase.

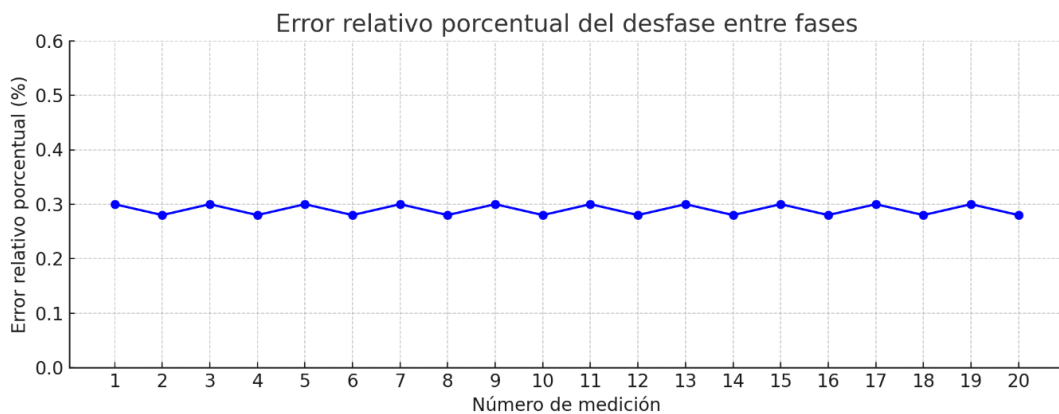


Figura 41: Error relativo porcentual del desfase entre fases.

### 5.4 Análisis de costos

La Tabla 11 muestra los gastos directos asociados a la construcción del prototipo de inversor de corriente DC/AC con salida senoidal pura. Se detalla el número de componentes utilizados, su precio unitario y el costo total por ítem. Entre los elementos de mayor valor se encuentran los capacitores de película metálica, los circuitos integrados IR2130 e IR2113, los MOSFET

IRFZ44N, y el microcontrolador STM32F103C8T6, todos esenciales para las etapas de control y potencia.

Tabla 11 Detalle de costos del proyecto.

<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
Espadines Machos 2,54 mm	9	0,5	4,5
Placas PCB 200x200 mm	4	2,5	10
Circuito Integrado IR2130	1	75	75
Octo-Acoplador Rapido 6N137	6	5,75	34,5
Circuito Integrado 74HC14	2	2,75	5,5
Espadin Hembra 2,54 mm	2	0,5	1
Circuito Integrado IR2113	6	4,75	28,5
STME32 stm32f103c8t6	1	42	42
Step-Down LM2596	2	3,15	6,3
Regulador de tension LM7805	1	0,75	0,75
Mosfets IRFZ44N	12	4,75	57
Capacitor de Pelicula Metalica	12	6,75	81
Transformadores 12v/110v	3	7,5	22,5
Bobinas de nucleo de aire 4 mH	3	3,75	11,25
Plug Banana Hembra pared	6	0,85	5,1
Borneras de 2 pines	33	0,25	8,25
Borneras de 3 pines	2	0,35	0,7
Resistencia de 1/2w 10 ohm	18	0,1	1,8
Resistencia de 1/2w 20 ohm	8	0,1	0,8
Resistencia de 1/2w 30 ohm	1	0,1	0,1
Resistencia de 1/2w 2,2 K ohm	12	0,1	1,2
Resistencia de 1/4w 10 K ohm	6	0,05	0,3
Resistencia de 1/2w 470 ohm	3	0,1	0,3
Baquelita perforada de 100x50 mm	3	1	3
Capacitor ceramico 100 nf/50v	20	0,15	3
Capacitor Electrolitico Polarizado 2200uf/50v	2	0,35	0,7
Capacitor Electrolitico Polarizado 1500uf/50v	1	0,25	0,25

Capacitor Electrolitico Polarizado 1uf/25v	18	0,15	2,7
Capacitor Electrolitico Polarizado 10uf/50v	3	0,15	0,45
Capacitor Electrolitico Polarizado 470uf/50v	2	0,2	0,4
Zocalo 7 pines x lado	8	0,25	2
Disipador de calor	4	2	8
Zocalo 4 pines x lado	6	0,2	1,2
Terminal tipo Pin	40	0,1	4
Cable Macho - Macho XH2,54 mm 6 pines	6	0,35	2,1
Cable Macho - Macho XH2,54 mm 4 pines	6	0,25	1,5
Cable AWG #16 colores	10	0,35	3,5
Base de Acrilico 420x420 mm	1	5	5
Terminal tipo riel Hembra - Macho	12	0,1	1,2
Funda de Cloruro Ferrico	2	1,35	2,7
			440,05

La Tabla 12 presenta los gastos indirectos incurridos durante el desarrollo del prototipo. Estos incluyen transporte para adquisición de materiales, viáticos para pruebas de campo y una estimación razonable de imprevistos, especialmente útil en proyectos de investigación aplicada.

Tabla 12 Gastos indirectos.

<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo/Unidad (USD)</b>	<b>Subtotal (USD)</b>
Transporte	2 personas	10.00	20.00
Viáticos	2 personas	10.00	20.00
Imprevistos	1	10.00	10.00
	<b>Total</b>		<b>50.00</b>

Sumando los gastos directos e indirectos, se obtiene el costo total de implementación del inversor, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13 Comparación de gastos directos e indirectos.

<b>Concepto</b>	<b>Valor (USD)</b>
Gastos directos	440.05
Gastos indirectos	50.00
<b>Total</b>	<b>490.05</b>

#### 5.4.1. Comparativa económica del prototipo VS inversor comercial

Se seleccionó como referencia el inversor Nova Electric CGD-Series (CGD1.5K-24-120), un equipo industrial trifásico con entrada de 24 V DC, potencia nominal de 1 500 W/VA, frecuencia de salida seleccionable (50 o 60 Hz), diseño compacto con microprocesador integrado, protecciones electrónicas avanzadas, y una eficiencia estimada entre 88 % y 90 %. Este equipo está diseñado para aplicaciones industriales críticas, proyectos institucionales y sistemas de respaldo eléctrico. El precio comercial de este tipo de inversores trifásicos oscila en el mercado internacional alrededor de los 1 200.00 USD.

En comparación, el prototipo desarrollado en este trabajo de titulación tuvo un costo total de 490.05 USD, incluyendo materiales electrónicos, módulos de control y potencia, transformadores elevadores, sistema de filtrado, placa de montaje, elementos auxiliares y gastos indirectos como transporte y pruebas. Esta diferencia de precios representa una ventaja económica significativa.

$$\text{Ahorro} = \text{Gasto total} - \text{costo de mercado}$$

$$\text{Ahorro} = 1200.00 - 490.05 = 709.95 \text{ USD}$$

$$\text{Ahorro \%} = \frac{709.95 \cdot 100}{1200} \% = 59.16\%$$

El desarrollo del prototipo de inversor resultó 59.16 % más económico que un equipo comercial equivalente, lo que demuestra su viabilidad técnica y económica. Esta reducción de costos lo convierte en una solución accesible para entornos educativos y de investigación. Además, su diseño modular permite futuras investigaciones y mejoras.

La eficiencia del prototipo fue determinada mediante el análisis experimental de la relación entre la potencia de salida en corriente alterna (AC) y la potencia de entrada en corriente continua (DC), bajo condiciones de carga resistiva trifásica balanceada. Para ello, se tomaron mediciones directas de tensión y corriente en la entrada como en la salida del inversor.

Datos de entrada:

$V_{DC} = 24.8V$  Tensión medida a la entrada del inversor.

$I_{DC} = 0.70A$  Corriente de alimentación en la entrada del inversor.

$$P_{in} = V_{DC} \times I_{DC}$$

$$P_{in} = 248V \times 0.70$$

$$P_{in} = 17.36W$$

La potencia de salida por fase se determinó a partir de las mediciones en la carga resistiva trifásica conectada a la salida del inversor trifásico.

Datos de salida:

$V_F = 115.47V$  Tensión efectiva entre fase y neutro.

$I_F = 0.030A$  Corriente de fase medida

$$P_{out} = 3V_F \times I_F$$

$$P_{out} = 3(115.47V) \times (0.030A)$$

$$P_{out} = 10.39W$$

La eficiencia ( $\eta$ ) del sistema se calcula como el cociente entre la potencia útil entregada en la salida (AC) y la potencia suministrada desde la entrada (DC), expresado como porcentaje:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$$

$$\eta = \frac{3.46}{17.36} \times 100$$

$$\eta = 19.91\%$$

El valor de eficiencia obtenido refleja el rendimiento del prototipo en condiciones reales de funcionamiento, evidenciando la capacidad del sistema para realizar la conversión DC/AC de forma estable y funcional. La eficiencia obtenida es moderada, este resultado es técnicamente aceptable el enfoque académico del diseño, demostrando que el inversor cumple con su propósito educativo y sienta las bases para mejoras futuras orientadas a aumentar el rendimiento global.

La Tabla 14 ilustra una comparativa técnica y económica del inversor desarrollado y el modelo comercial seleccionado.

Tabla 14 Comparación técnica de prototipo y el modelo comercial.

<b>Característica</b>	<b>Prototipo desarrollado</b>	<b>Nova CGD1.5K-24-120</b>
Potencia nominal	1 500 W trifásico (SPWM + filtro LC + transformadores)	1 500 VA trifásico, configurable en WYE o split-phase
Tensión de entrada	24 V DC	24 V DC
Frecuencia de salida	60 Hz SPWM	50/60 Hz seleccionable
Tipo de control	STM32 + IR2113 + SN7414 + MOSFETs IRFZ44N	Microprocesador industrial con ATS
Costo total	490.05 USD	~1 200.00 USD
Ahorro	709.95 USD (~59.16 %)	—
Eficiencia	19.91%	90.00%
Ventajas adicionales	Diseño abierto, modular, educativo y adaptable	Estabilidad industrial, garantía, funciones de monitoreo integradas

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

- Se logró construir exitosamente un prototipo de inversor de corriente DC/AC con salida de onda senoidal pura, cumpliendo con los parámetros eléctricos previamente establecidos y generando una señal estable y simétrica. La validación experimental confirmó que la topología implementada, junto con el control mediante modulación SPWM y la etapa de filtrado LC, permitió obtener una señal adecuada para alimentar cargas sensibles bajo condiciones reales de operación.
- La investigación del estado del arte permitió identificar los métodos más eficientes y utilizados en la conversión de energía DC/AC, entre ellos la técnica de modulación por ancho de pulso (SPWM) y el empleo de filtros LC. Estos conocimientos sirvieron de base para seleccionar la estrategia de diseño y componentes adecuados, priorizando tanto la calidad de señal como la viabilidad de implementación.
- Se seleccionaron de manera adecuada los componentes electrónicos claves, como el microcontrolador STM32, los drivers IR2113 y los MOSFETs IRFZ44N, así como transformadores elevadores y elementos pasivos del filtro LC, lo cual garantizó un funcionamiento eficiente, estable y con bajos márgenes de error relativos porcentuales aceptables, analizando en parámetros críticos como frecuencia, tensión y desfase entre fases.
- El prototipo construido es funcional y opera de manera estable bajo distintas condiciones de carga (en vacío, carga balanceada y desbalanceada). El sistema demostró capacidad para mantener la frecuencia nominal de 60 Hz, simetría trifásica y una salida cercana a los 127 V fase-neutro, incluso ante perturbaciones provocadas por desbalances.
- Finalmente, el prototipo alcanzó una eficiencia del 19.91 %, determinada a partir de mediciones directas de tensión y corriente tanto en la entrada DC y en la salida AC bajo condiciones de carga resistiva balanceada. Este resultado confirma que el sistema realiza correctamente la conversión de energía, generando una señal trifásica estable y funcional, lo que valida su aplicabilidad como herramienta técnica y educativa.

## 6.2. Recomendaciones

- Se recomienda replicar este prototipo para aplicaciones de baja potencia en entornos aislados o donde se requiera calidad de señal, como laboratorios, sistemas de respaldo o pequeñas instalaciones fotovoltaicas. Se sugiere considerar mejoras como la incorporación de un control de realimentación para corrección activa del voltaje y el balance entre fases.
- Se recomienda mantener una revisión constante del avance tecnológico en electrónica de potencia, especialmente aquellas basadas en microcontroladores de mayor capacidad o en dispositivos de conmutación más eficientes (IGBTs, SiC-MOSFETs), que pueden ofrecer mejoras en términos de rendimiento térmico.
- Durante la selección de componentes es indispensable considerar no solo la disponibilidad local, sino también el comportamiento térmico, la eficiencia y la compatibilidad electromagnética.
- Se recomienda ejecutar futuros trabajos investigativos para mejorar la protección del sistema, tales como detección de sobrecarga, monitoreo de temperatura y sistemas automáticos de apagado en caso de fallas. Además, se sugiere desarrollar soluciones activas para el balance de carga y el mantenimiento de simetría entre fases, como el uso de controladores digitales con algoritmos de corrección en tiempo real.
- También se recomienda evaluar la eficiencia energética del inversor en distintos entornos de operación, utilizando métodos estandarizados de medición, y contrastar sus resultados frente a nuevas versiones comerciales, a fin de validar su viabilidad para un uso extendido en entornos educativos, rurales o de investigación aplicada.

## Bibliografía

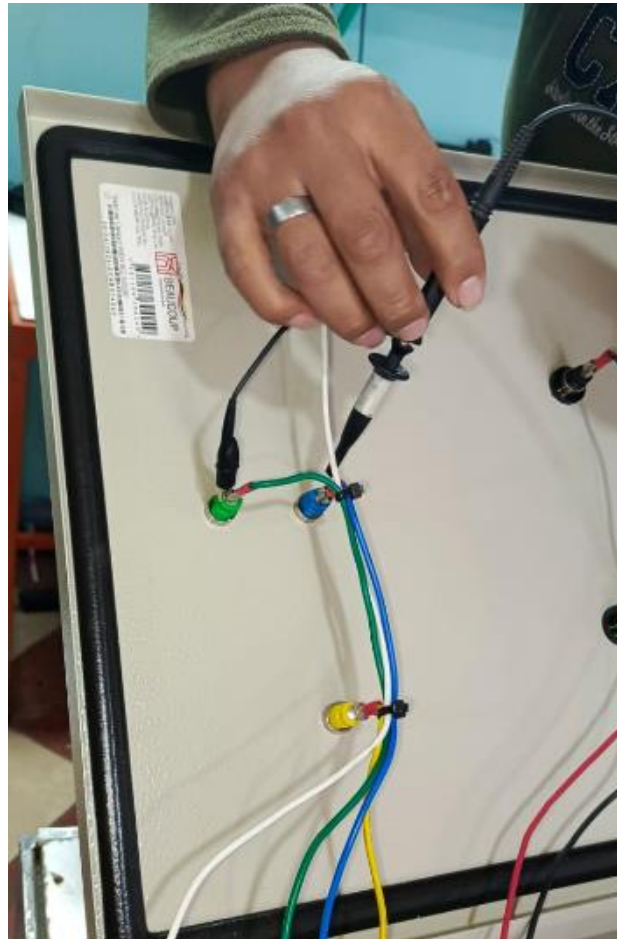
- [1] AutoSolar, «Inversores de corriente,» [En línea]. Available: <http://autosolar.pe/aspectos-tecnicos/que-es-un-inversor-de-corriente?srsId=AfmBOorw13YnQsjR9Skr8kqQur0B4EZOsaWrteKUrBAHMkPwj a6NlmHo>.
- [2] F. Román, «Instituto Universitario Aeronáutico,» [En línea]. Available: <https://rdu.iaa.edu.ar/bitstream/123456789/1131/1/Trabajo%20Final%20de%20Grado.pdf>.
- [3] Q. Daniel, «Repositorio Escuela Politécnica de Chimborazo,» 18 diciembre 2023. [En línea]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/22076/1/65T00545.pdf>.
- [4] L. Edisón, «Universidad Sucre,» 2015. [En línea]. Available: <https://repositorio.unisucre.edu.co/server/api/core/bitstreams/4569757d-46f0-4184-87b2-f1e93b82da09/content>.
- [5] E. M. Purcell, Electricidad y magnetismo, Barcelona, España: Reverte S.A., 2005.
- [6] B. Clegg, 50 temas fundamentales sobre la energía, Barcelona: Blume.net, 2021.
- [7] R. global, «Repsol, energía, futuro y planeta,» 19 diciembre 2024. [En línea]. Available: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/corriente-alterna-y-continua/index.cshtml>.
- [8] J. Blum, «Power Quality,» febrero 2024. [En línea]. Available: <https://www.a-eberle.de/es/conocimiento/cuatro-formas-de-medir-la-corriente/>.
- [9] B. R., «Señales de electricas y circuitos electronicos,» 2016. [En línea]. Available: <https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/2878/1/TESIS%20-%20MERCHAN%20RODRIGUEZ%20YADIRA%20BRIGGITTE.pdf>.
- [10] Rybin J., Generadores de señal, Colombia: Measuring signal generators, 2015.
- [11] F. M. J., Circuitos electricos, Madrid, España: Pearson educación S.A., 2015.
- [12] M. Yadira, «Análisis de señales eléctricas mediante generador de ondas,» marzo 2021. [En línea]. Available: <https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/2878/1/TESIS%20-%20MERCHAN%20RODRIGUEZ%20YADIRA%20BRIGGITTE.pdf>.
- [13] F. José, «FísicaLab,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.fisicalab.com/apartado/ondas-mecanicas>.

- [14] D. Samano, «Ondas y tipos de ondas electromagnéticas,» 29 mayo 2023. [En línea]. Available: <https://www.exem.fr/es/a-que-ondas-estamos-expuestos/>.
- [15] R. Mite, «Diseño de un generador de señales para estudiantes de Ingeniería industrial,» 2017. [En línea]. Available: Repositorio Universidad de Guayaquil.
- [16] I. Roberto, «Generadores de onda y su desarrollo tecnológico,» [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2538/1/CD-0375.pdf>.
- [17] E. libre, «Enciclopedia libre,» 10 Febrero 2025. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Inversor\\_\(electr%C3%B3nica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Inversor_(electr%C3%B3nica)).
- [18] G. Master, «Soluciones integrales de infraestructura y energía,» 2025. [En línea]. Available: <https://grupopc.com/que-es-un-inversor/>.
- [19] R. Nicolás, «Introducción a los inversores solares,» 4 Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://www.junchipower.com/es/introduccion-a-los-inversores-solares-domesticos/>.
- [20] AutoSolar, «Inversor hibrido,» 2020. [En línea]. Available: <https://autosolar.es/aspectos-tecnicos/que-es-un-inversor-hibrido>.
- [21] E. Especialista, «Energía solar,» 12 Junio 2023. [En línea]. Available: <https://energydcac.com/inversor-onda-cuadrada/>.
- [22] G. A. shop, «Ondas en un inversor,» Octubre 2019. [En línea]. Available: [https://atersa.shop/que-son-las-ondas-en-un-inversor/?srsltid=AfmBOopySQrzNUZI1bTqj1Y1wg0deJzoUDbHnBxO7URPzFqQ\\_panTh7P](https://atersa.shop/que-son-las-ondas-en-un-inversor/?srsltid=AfmBOopySQrzNUZI1bTqj1Y1wg0deJzoUDbHnBxO7URPzFqQ_panTh7P).
- [23] Convertronic, «Sistema modular,» [En línea]. Available: <https://convertronic.net/potencia/inversores/2619-sistema-inversor-modular.html>.
- [24] S. Europe, 2007. [En línea]. Available: <https://www.sfe-solar.com/inversores/>.
- [25] B. Ryan, Solar Inverter Guide, Estados Unidos: Publisher S.A., 2025.

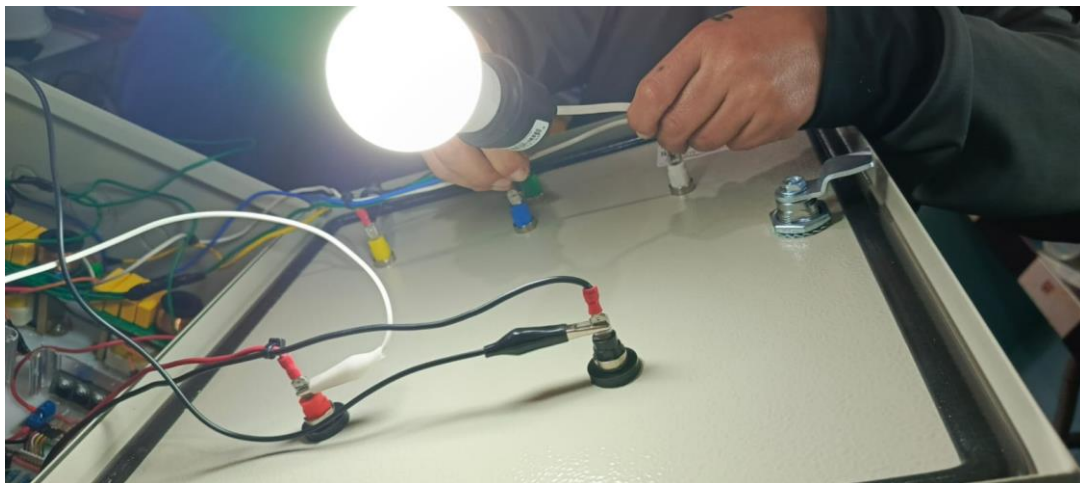
## ANEXOS

### Anexos 1. Funcionamiento del inversor trifásico.

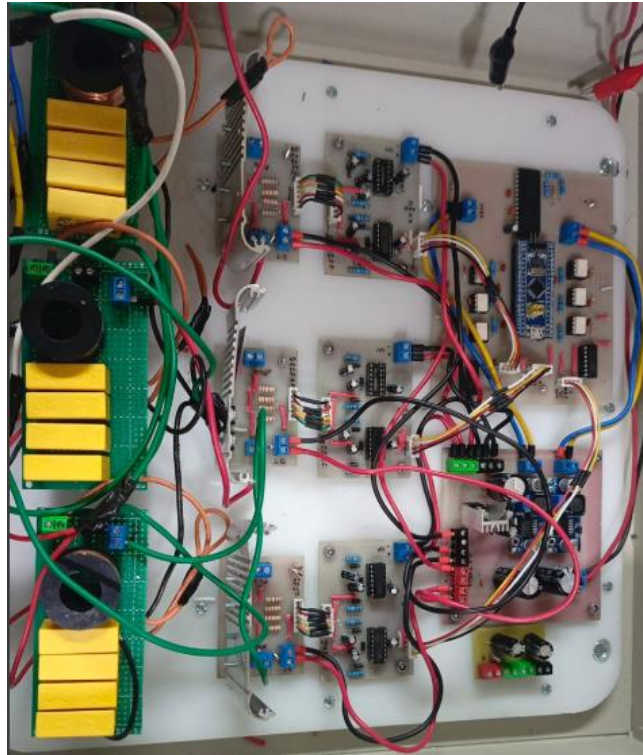
#### Conexión de las puntas del osciloscopio



#### Conexión de carga resistiva en una sola fase



Prototipo ensamblado con todas las etapas: control, potencia y filtrado



Conexión de carga resistiva en las tres fases (una lámpara por fase)



## Anexo 2. Guía de prácticas - inversor trifásico de onda senoidal pura

### **PRÁCTICA : Encendido controlado del inversor trifásico con cargas balanceadas**

#### **Objetivo:**

Verificar el encendido correcto del inversor y ubicación de cargas en cada fase.

#### **Materiales:**

- Fuente 12 VDC
- Inversor trifásico ensamblado
- Multímetro
- Cableado de prueba

#### **Procedimiento:**

1. Conecte el terminal negativo a la batería



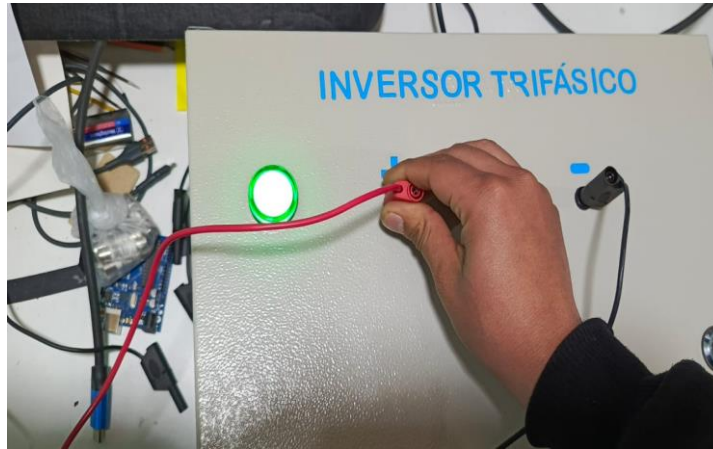
2. Conecte el terminal positivo a la batería



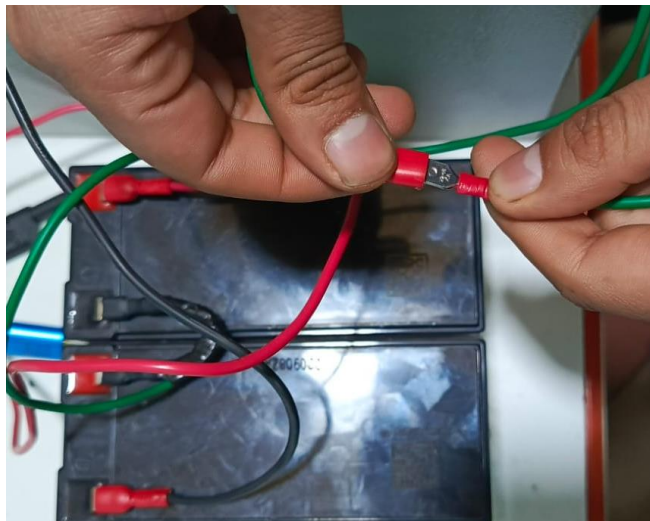
3. Conecte el terminal negativo de la batería al inversor



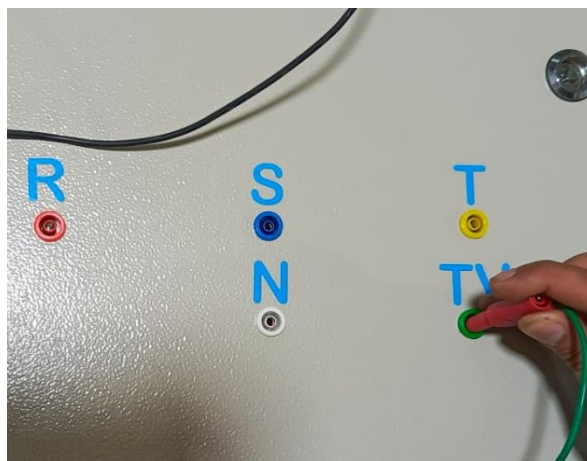
4. Conecte el terminal positivo de la batería al inversor



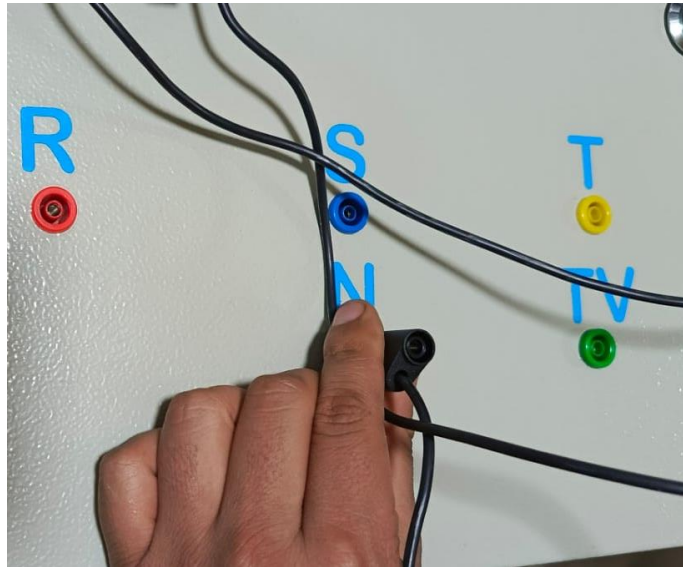
5. Conecte el terminal verde de la tierra virtual a la batería



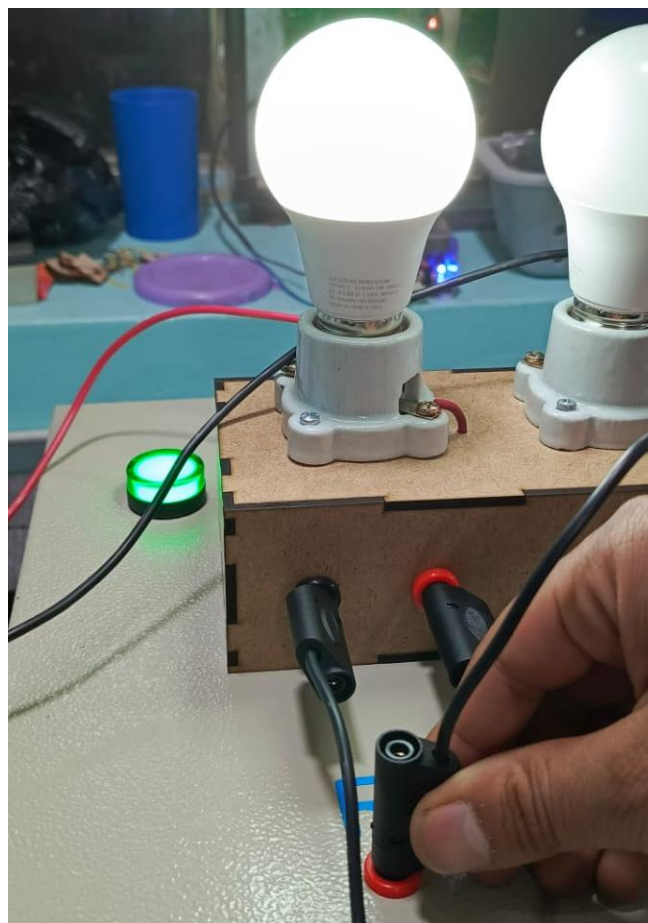
6. Conecte el terminal de la tierra virtual al inversor



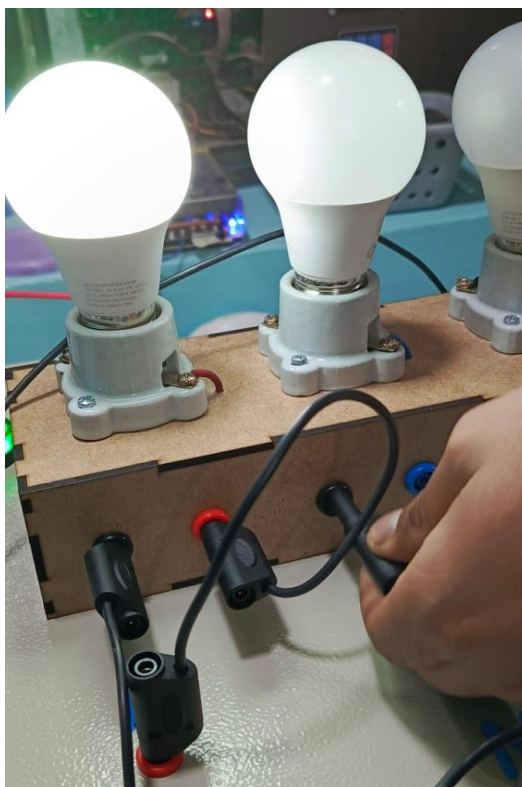
7. Conecte el negativo el neutro de la primera carga al inversor



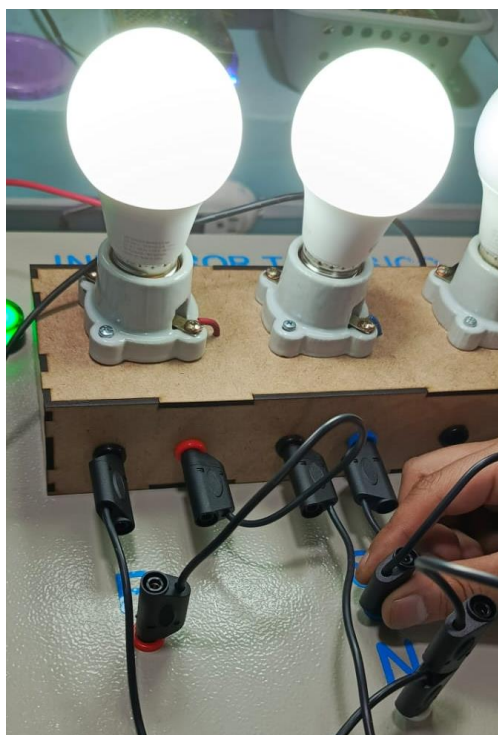
8. Conecte la fase del inversor a la primera carga



9. Conecte el negativo el neutro de la segunda carga al inversor



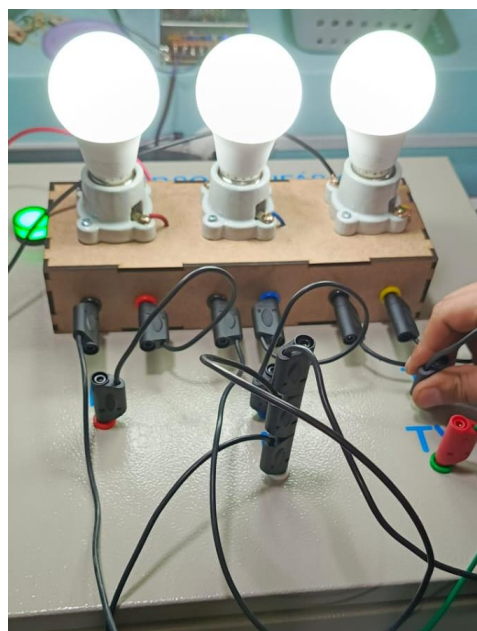
10. Conecte la fase del inversor a la segunda carga



11. Conecte el negativo el neutro de la tercera carga al inversor



12. Conecte la fase del inversor a la tercera carga



**Conclusiones esperadas:**

- El inversor entrega tensiones equilibradas entre fases, confirmando su correcto funcionamiento básico.
- La medición sin carga no debe mostrar caídas.

**Recomendaciones:**

- Utilizar guantes dieléctricos si el inversor genera tensiones altas.
- Verificar que el neutro no esté conectado a masa del sistema si el transformador no lo permite.

## **Inversor DC/AC trifásico con salida de onda senoidal pura**

### **1. Introducción**

El presente manual tiene como finalidad proporcionar las instrucciones necesarias para la correcta operación del inversor DC/AC trifásico con salida de onda senoidal pura. Este equipo está destinado a fines académicos, específicamente para prácticas controladas de laboratorio con cargas resistivas trifásicas balanceadas.

### **2. Descripción general del equipo**

#### **2.1 Finalidad del inversor**

El inversor convierte una entrada de 12 VDC proveniente de una batería o fuente regulada en una salida de 380 VAC trifásico a 60 Hz, generando una onda senoidal pura mediante modulación SPWM controlada por un microcontrolador STM32.

#### **2.2 Características técnicas**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Tensión de entrada DC	12 V
Corriente de entrada máxima	150 A
Tensión de salida AC	220 VAC entre fases (R-S-T)
Tipo de señal de salida	Senoidal pura
Frecuencia de salida	60 Hz
Potencia de carga soportada	Hasta 1500 W

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Tipo de carga permitida	Trifásica resistiva balanceada

### **2.3 Componentes accesibles para el usuario**

- Terminales de entrada: V+ (rojo) y GND (negro)
- Terminales de salida: R, S, T
- Punto de neutro del transformador
- Bornes de conexión con etiquetas
- Modulo con cargas resistivas

### **3. Requisitos para la operación**

- Batería o fuente de 12 VDC con capacidad suficiente para la carga
- Carga trifásica resistiva balanceada
- Supervisión docente obligatoria
- Accesorios de protección: guantes dieléctricos, cables con terminales aislados

### **4. Instrucciones de operación**

#### **4.1 Verificación previa**

Antes de encender el inversor, debe realizarse la siguiente verificación:

- Confirmar polaridad correcta en la entrada de la batería
- Asegurarse de que la carga esté y desconectada
- Verificar que no existen cortocircuitos en la salida
- Revisar el estado físico de los cables y terminales

## **4.2 Secuencia de encendido**

1. Conectar la batería de 12 VDC al inversor, respetando la polaridad.
2. Conectar la carga trifásica a los terminales R, S, T.
3. Conectar la tierra virtual
4. Medir la tensión entre fases: se espera un valor cercano a 220 VAC.
5. Si se desea, medir tensión entre fases y neutro

## **4.3 Secuencia de apagado**

1. Desconectar la carga.
2. Desconectar la fuente de alimentación DC.
3. Esperar unos segundos para disipación completa de energía.

## **5. Conexiones eléctricas**

### **5.1 Entrada de alimentación**

- V+: se conecta al terminal positivo de la batería de 12 VDC
- GND (-): se conecta al terminal negativo o masa

### **5.2 Salidas AC trifásicas**

- R, S, T: salida de 220 VAC entre fases
- Neutro: centro del devanado del transformador

### **5.3 Tierra virtual**

- El sistema cuenta con un punto de masa común para referencia en mediciones.

## **6. Mantenimiento básico**

### **6.1 Recomendaciones generales**

- Realizar limpieza superficial cada 2 semanas con aire seco.
- No introducir líquidos, ni manipular el equipo energizado.
- Verificar que las conexiones estén firmes antes de cada uso.

## **6.2 Señales de advertencia**

- Ausencia de tensión de salida
- Ruidos inusuales
- Olor a quemado o sobrecalentamiento evidente
- Caídas bruscas de tensión con cargas pequeñas

## **7. Seguridad**

- No operar el inversor sin supervisión.
- Usar siempre cables con aislamiento adecuado.
- Nunca tocar las salidas R, S, T mientras el equipo esté encendido.
- Evitar conectar cargas inductivas sin filtros adecuados.

## **8. Conclusiones**

El inversor desarrollado permite simular condiciones reales de una red trifásica para fines académicos, sin depender de una red eléctrica externa. Su uso controlado permite a los estudiantes familiarizarse con mediciones de tensión, frecuencia y calidad de onda, reforzando conceptos de electrónica de potencia y energía renovable.

## Anexo 5. Manual de mantenimiento

### 1. Objetivo

Establecer lineamientos técnicos para garantizar el correcto funcionamiento del inversor trifásico, mediante rutinas de mantenimiento preventivo, detección de fallas y acciones correctivas ya que su aplicación extiende la vida útil del equipo y preserva la seguridad de los usuarios.

### 2. Alcance

Este manual aplica al módulo inversor desarrollado en el laboratorio, y está dirigido al personal docente o técnico autorizado. Los estudiantes no deben intervenir el equipo internamente; su manipulación se limita al uso operativo bajo supervisión.

### 3. Descripción del sistema a mantener

<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>
Entrada	12 VDC
Controlador	STM32F103C8T6 con SPWM trifásico
Driver de compuerta	IR2113
Etapa de potencia	Puente H trifásico con MOSFET IRFZ44N
Filtro de salida	Filtro LC por fase
Etapa de elevación	Transformador trifásico (12 VAC → 380 VAC)
Disipación térmica	Disipadores pasivos o ventilador
Protección	<b>Fusible de entrada DC + fusibles por fase AC</b>

#### 4. Tipos de mantenimiento

Tipo	Responsable	Frecuencia	Descripción
Preventivo	Técnico/docente	Semanal o por sesión	Limpieza, verificación de bornes, revisión de fusibles
Correctivo	Personal autorizado	Según necesidad	Reemplazo de componentes internos o protección fundida

#### 5. Mantenimiento preventivo

##### 5.1 Lista de verificación semanal

Ítem	Acción esperada	Estado (OK/Falla)
Terminales de entrada/salida	Limpios, sin corrosión	
Tornillos de bornes	Ajustados, sin falsos contactos	
Disipador	Limpio y funcional	
Fusible de entrada DC	Sin daño visible, continuidad eléctrica presente	
Fusibles de salida por fase	Sin fundido, sin hollín	
Forma de onda de salida	Senoidal, sin distorsiones	
Temperatura en carga	Dentro de los márgenes normales	

## 6. Revisión y reemplazo de fusibles

### 6.1 Ubicación y función

Fusible	Ubicación en el equipo	Función principal
Fusible principal DC	Línea positiva de entrada (V+)	Protege contra sobrecorriente en alimentación
Fusibles por fase (R, S, T)	Entre puente inversor y transformador	Protegen cada fase ante cortos en la carga

### 6.3 Procedimiento de verificación y cambio

1. Apagar el equipo completamente y desconectar la batería.
2. Esperar al menos 3 minutos.
3. Acceder a la carcasa inferior con destornillador aislado.
4. Verificar cada fusible con multímetro en modo continuidad.
5. Si un fusible está abierto:
  - Reemplazar por uno del mismo tipo, amperaje y tensión.
  - Nunca usar alambres, puentes temporales o fusibles de valor superior.
6. Registrar el reemplazo en el formato de mantenimiento.

## 7. Mantenimiento correctivo

### 7.1 Fallas comunes y diagnóstico rápido

Síntoma	Posible causa	Acción recomendada
No hay salida AC	Fusible fundido, daño en MOSFETs	Revisar fusibles, medir PWM

Síntoma	Posible causa	Acción recomendada
Forma de onda errática	Filtro LC dañado, carga mal conectada	Verificar capacitores y conexiones
Apagado inmediato	Fusible de entrada abierto	Revisión de sobrecarga
Solo una fase activa	Fusible individual de fase fundido	Reemplazo inmediato

## 8. Registro de mantenimiento

Fecha	Actividad	Responsable	Observaciones
28/07/2025	Cambio de fusible Fase R	-----	Falla por conexión incorrecta de carga
04/08/2025	Limpieza y prueba en vacío	-----	Forma de onda correcta

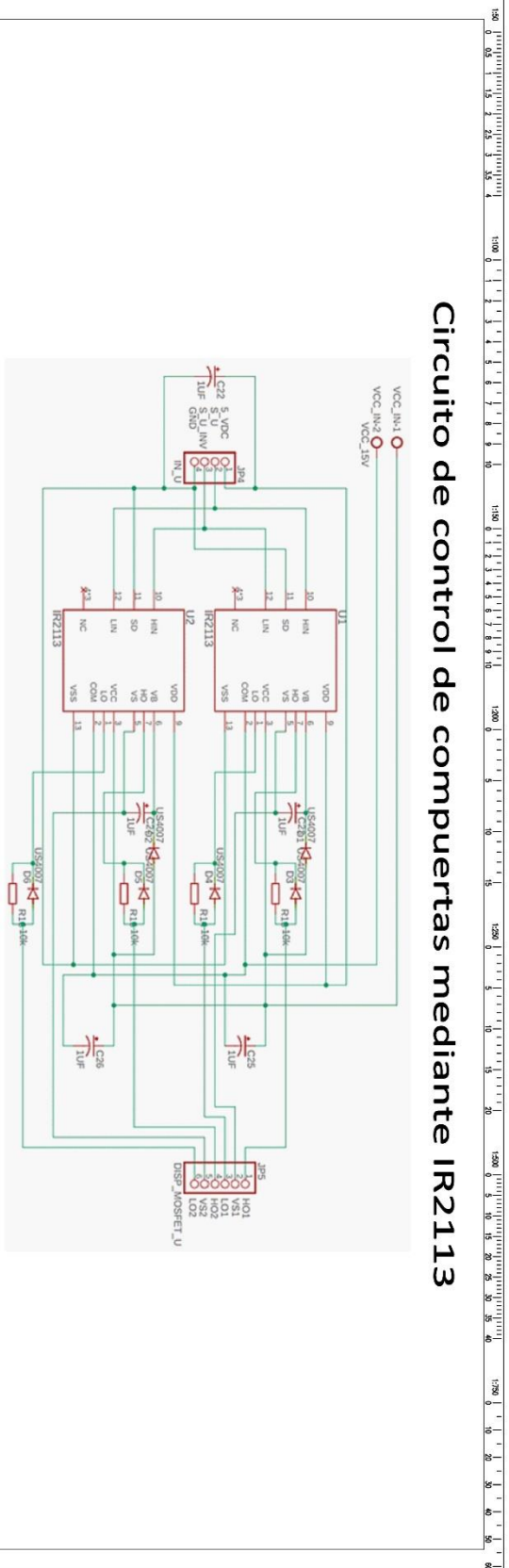
## 9. Recomendaciones finales

- Reemplazar fusibles siempre con valores especificados por el fabricante del prototipo.
- No encender el inversor si un fusible de fase está ausente o fundido.
- Documentar cada reemplazo o inspección para rastreo de fallas futuras.
- Mantener stock de fusibles de repuesto en el laboratorio.

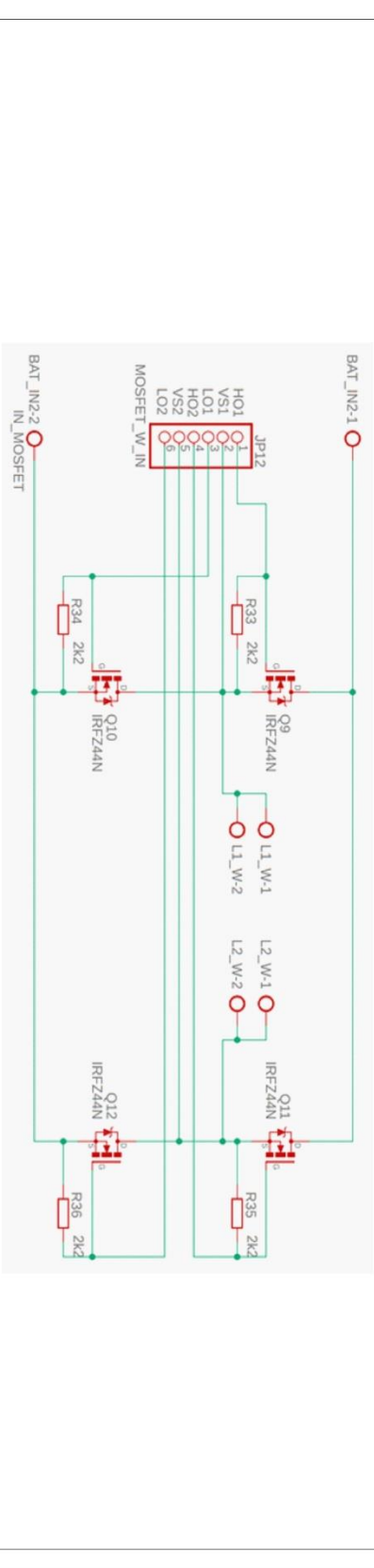
## 10. Conclusión



El mantenimiento sistemático del inversor, junto con la verificación y reemplazo adecuado de fusibles, garantiza la seguridad de los estudiantes y la funcionalidad prolongada del equipo. El sistema de protección implementado evita daños mayores y permite identificar fallas en etapas tempranas.

### Circuito de control de compuertas mediante IR2113

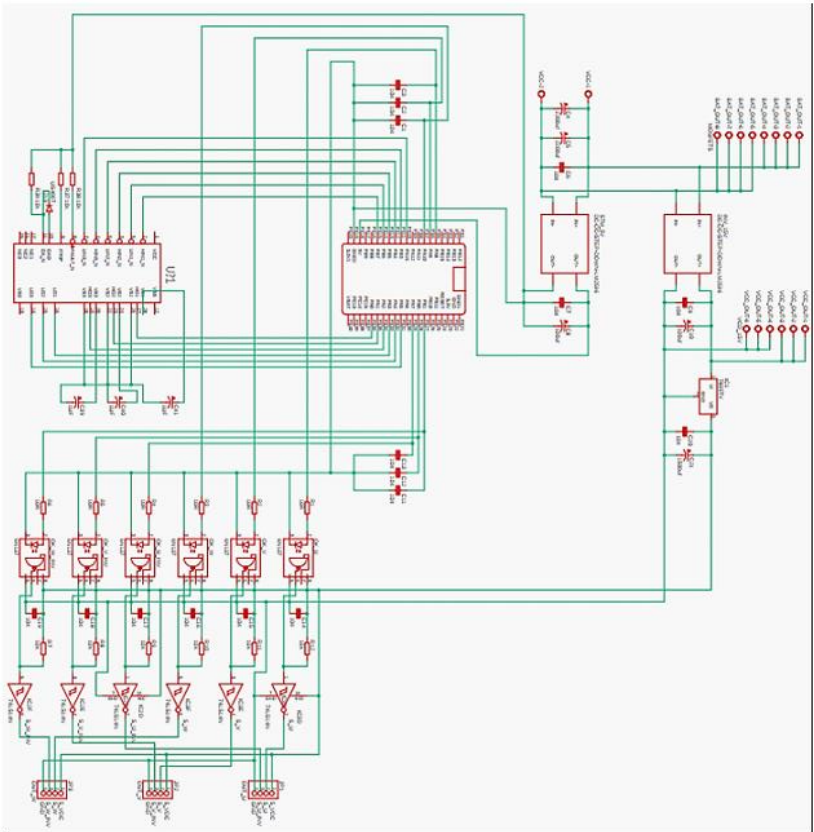


Esquemático del módulo de puente H

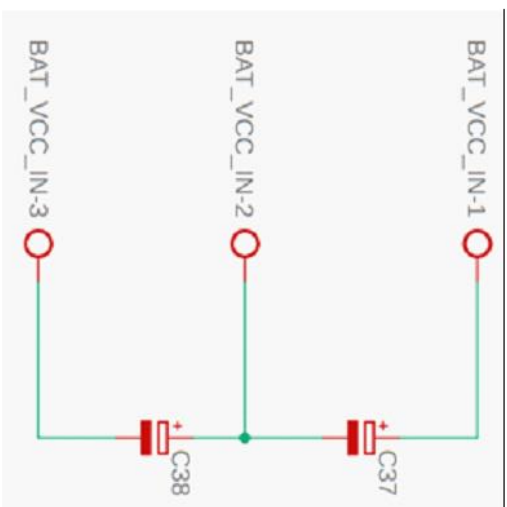


 <p>FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADASCARRERA INGENIERIA EN ELECTRICIDAD</p>	<p>PROTOTIPO DE INVERSOR DE CORRIENTE DC/AC CON SALIDA OBSERVACIONES:</p>	 <p>Steven Alexander Armas RMTSADO POR: Ing. MSc Marco Anibal León Sepoia</p>	<p>DISERNO: Andy Mauricio Remache</p>	<p>ESCALA: 1:10</p>	<p>REVISION: A</p>
	<p>PROYECTO: DE ONDA SENOIDAL PURA. Circuito de control de compuertas IR2113 Esquemático del módulo de puente H</p>				

## Diagrama esquemático de conexión del STM32



## Esquemático de la red de capacitores para tierra virtual



FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APPLICADAS  
INGENIERIA EN ELECTRICIDAD

PROTOTIPO DE INVERSOR DE CORRIENTE DC/AC CON SALIDA DE ONDA SENOIDAL. PARA  
DIAGRAMA DE CONEXION DEL STM32  
DIAGRAMA DE LA TIERRA VIRTUAL

OBSERVACIONES:



DESIGN: Steven Alexander Armas  
REVISADO POR: Andy Mauricio Remache  
Dir. Ms.C. Marco Antonio León Segovia

ESCALAS: 1:10  
FECHA: 01 - AGOSTO - 2025  
No. DE HOJAS: 1 DE 2  
ARCHIVO: UTC-FAC-I-01.dwg  
CÓDIGO: UTC-FAC-I-01.dwg

REVISOR: A

## Anexo 7. Programación del microcontrolador STM32

### Programación principal

*/\**

*\* Generador SPWM trifásico con STM32F103C8T6*

*\* Frecuencia portadora: 25 kHz*

*\* Frecuencia fundamental: 60 Hz*

*\* Salidas:*

*\* - Fase A: CH1 (PA8) y CH1N (PB13)*

*\* - Fase B: CH2 (PA9) y CH2N (PB14)*

*\* - Fase C: CH3 (PA10) y CH3N (PB15)*

*\*/*

*#include "main.h"*

*#include "tim.h"*

*#include "gpio.h"*

*#include <math.h>*

*#define F\_CARRIER 25000 // 25 kHz*

*#define F\_OUT 30 // 60 Hz*

*#define TIMER\_PERIOD 1439 // Para 25kHz con 72 MHz y centro alineado (72e6 / (2 \* 25e3) - 1)*

*#define PI 3.14159265359f*

*float sine\_table\_A[1000];*

*float sine\_table\_B[1000];*

*float sine\_table\_C[1000];*

*int sample\_count;*

```
int index = 0;
```

```
void SystemClock_Config(void);
```

```
void Error_Handler(void);
```

```
void Update_SPWM(void);
```

```
void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef *htim)
```

```
{
```

```
    if (htim->Instance == TIM1)
```

```
    {
```

```
        Update_SPWM();
```

```
    }
```

```
}
```

```
int main(void)
```

```
{
```

```
    HAL_Init();
```

```
    SystemClock_Config();
```

```
    MX_GPIO_Init();
```

```
    MX_TIM1_Init();
```

```
// Llenar tablas seno para cada fase
```

```
sample_count = F_CARRIER / F_OUT;
```

```
for (int i = 0; i < sample_count; i++) {
```

```
    float angle = (2.0f * PI * i) / sample_count;
```

```
    sine_table_A[i] = sinf(angle);
```

```
    sine_table_B[i] = sinf(angle - 2.0f * PI / 3.0f); // -120°
```

```

    sine_table_C[i] = sinf(angle - 4.0f * PI / 3.0f); // -240°
}

// Iniciar PWM y PWMN para las tres fases
HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim1);

HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_1); // PA8
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_1); // PB13

HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_2); // PA9
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_2); // PB14

HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_3); // PA10
HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_3); // PB15

while (1)
{
    HAL_Delay(1); // El trabajo está en la interrupción
}
}

void Update_SPWM(void)
{
    float va = sine_table_A[index];
    float vb = sine_table_B[index];
    float vc = sine_table_C[index];

```

```

TIM1->CCR1 = (uint32_t)((TIMER_PERIOD / 2.0f) * (1.0f + va));
TIM1->CCR2 = (uint32_t)((TIMER_PERIOD / 2.0f) * (1.0f + vb));
TIM1->CCR3 = (uint32_t)((TIMER_PERIOD / 2.0f) * (1.0f + vc));

index++;

if (index >= sample_count) index = 0;
}

void SystemClock_Config(void)
{
    RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};
    RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};

    RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSE;
    RCC_OscInitStruct.HSEState = RCC_HSE_ON;
    RCC_OscInitStruct.HSEPredivValue = RCC_HSE_PREDIV_DIV1;
    RCC_OscInitStruct.HSIState = RCC_HSI_ON;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSE;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLMUL = RCC_PLL_MUL9;
    HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct);

    RCC_ClkInitStruct.ClockType = RCC_CLOCKTYPE_HCLK / RCC_CLOCKTYPE_SYSCLK
    /
        RCC_CLOCKTYPE_PCLK1 / RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;
    RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;
    RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;

```

```

RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;
RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;
HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_2);
}

void Error_Handler(void)
{
  __disable_irq();
  while (1) {}
}

#ifdef USE_FULL_ASSERT
/**
 * @brief Reports the name of the source file and the source line number
 *        where the assert_param error has occurred.
 * @param file: pointer to the source file name
 * @param line: assert_param error line source number
 * @retval None
 */
void assert_failed(uint8_t *file, uint32_t line)
{
  /* USER CODE BEGIN 6 */
  /* User can add his own implementation to report the file name and line number,
   ex: printf("Wrong parameters value: file %s on line %d\r\n", file, line) */
  /* USER CODE END 6 */
}

#endif /* USE_FULL_ASSERT */

```

## Anexo 8. Especificaciones técnicas

### Descripción general

El equipo corresponde a un inversor de corriente DC a AC trifásico con salida de onda senoidal pura, diseñado para convertir 12 VDC de una fuente o batería en una salida de 220 VAC entre fases a 60 Hz, con capacidad de alimentar cargas resistivas trifásicas. El control está basado en modulación SPWM generada por un microcontrolador STM32 y amplificada por un puente trifásico con MOSFETs y transformadores elevadores.

### Aplicación

- Uso académico en prácticas de laboratorio de electrónica de potencia
- Evaluación de sistemas de conversión DC/AC
- Alimentación de cargas trifásicas

### Especificaciones técnicas

#### 3.1. Entrada

Parámetro	Valor
Tipo de alimentación	Corriente continua (DC)
Tensión nominal de entrada	12 VDC
Corriente nominal máxima	4,32 A
Protección	Fusible de entrada rápida de 2 A

#### Salida

Parámetro	Valor
Tipo de salida	Corriente alterna trifásica (AC)
Tensión entre fases	220 VAC
Tensión fase–neutro	110 VAC
Frecuencia nominal	60 Hz $\pm$ 1 %
Forma de onda	Senoidal pura
Tipo de carga soportada	Trifásica resistiva

AVAL DE IMPLEMENTACION

Latacunga, julio del 2025

Ing. Luis Eduardo Hinojosa Guanoluisa

**Analista de laboratorios de CIYA**

Presente. –

En calidad de Analista de Laboratorio de la Universidad Técnica de Cotopaxi, confirmo la realización del proyecto, **“CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CORRIENTE DC/AC CON SALIDA DE ONDA SENOIDAL PURA”**, implementado por los señores estudiantes de la Universidad Técnica de Cotopaxi, carrera de Ingeniería en Electricidad: Armas Enriquez Steeven Alexander con CC: 050407683-7 y Remache Pino Andy Mauricio con CC: 05444107-2.

Es cuanto puedo certifico o en honor a la verdad, se expide el presente documento para el interesado pueda hacer uso para los tramites que considere conveniente.

Atentamente,



Ing. Luis Eduardo Hinojosa Guanoluisa

C.I.0502365810

Analista de laboratorios de CIYA

## ACTA DE ENTREGA Y RECEPCION

En la ciudad de Latacunga, a 1 de Agosto del año dos mil veinte y cinco, en la Universidad Técnica de Cotopaxi se constituye por una parte el Ing. Eduardo Hinojosa Analista de Laboratorio, y los Srs. Armas Enriquez Steeven Alexander con CC: 050407683-7 y Remache Pino Andy Mauricio con CC: 05444107-2, alumnos de la carrera de Ingeniería en Electricidad de Octavo. Se entrega los siguientes dispositivos que fueron autorizados por el Sr. Decano para el trabajo de Titulación. Por pedido del Ing. Marco Aníbal León Segovia M.Sc. tutor de tesis.

N.	Descripción	Cant.	Modelo	N. Serie	Observación
1	INVERSOR TRIFASICO	1	AUTORIA	UTC20250001	FUNCIONANDO
2	MODULO RESISTIVO	1	AUTORIA	UTC20250002	FUNCIONANDO
3	FOCOS 9W 110V	3	OSRAM	C-J6RG1928	FUNCIONANDO
4	BATERIAS 12V/7.5AH	2	FORZ A	FUB-1290	FUNCIONANDO
5	CABLES BANANA MACHO 0.6 MTS	4	AUTORIA	UTC20250003	FUNCIONANDO
6	CABLES BANANA MACHO 0.3 MTS	2	AUTORIA	UTC20250004	FUNCIONANDO
7	CABLES BANANA BATERIAS	3	AUTORIA	UTC20250005	FUNCIONANDO

### ENTREGA CONFORME



Armas Enriquez Steeven Alexander

CC: 050407683-7



Remache Pino Andy Mauricio

CI: 05444107-2

### RECIBI CONFORME



Ing. Luis Eduardo Hinojosa Guanoluisa

C.I.0502365810

Analista de laboratorios de CIYA