

---

# Desarrollo de una Plataforma Educativa para la Enseñanza de Señales Trifásicas

---

Danika Geraldine Andrino Jiménez





UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Desarrollo de una Plataforma Educativa para la Enseñanza de  
Señales Trifásicas**

Trabajo de graduación presentado por Danika Geraldine Andrino  
Jiménez para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería  
Mecatrónica

Guatemala,

2026



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Desarrollo de una Plataforma Educativa para la Enseñanza de  
Señales Trifásicas**

Trabajo de graduación presentado por Danika Geraldine Andrino  
Jiménez para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería  
Mecatrónica

Guatemala,

2026


Vo.Bo.:

(f)   
Ing. Kurt Kellner

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Kurt Kellner

(f)   
Ing. Marvin Najarro

(f)   
M. Sc. Carlos Esquit

Fecha de aprobación: Guatemala 6 de enero de 2026

Primeramente, doy gracias a la Universidad del Valle de Guatemala por ayudarme en mi educación y formación como ingeniera en mecatrónica, gracias a mi asesor Kurt Kellner quien me ayudo y apoyo durante el desarrollo de este proyecto de graduación.

Finalmente. Agradezco a mis padres, David Andrino y Silvia Jiménez, quienes me apoyaron y ayudaron financieramente, durante estos años como estudiante de la universidad, dándome la oportunidad de enfocarme en mis estudios.

<b>Prefacio</b>	<b>I</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>V</b>
<b>Índice de cuadros</b>	<b>VI</b>
<b>Resumen</b>	<b>VII</b>
<b>Abstract</b>	<b>VIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. 'Economic single-phase to three-phase converter topologies for fixed and variable frequency output' . . . . .	3
2.2. '3-Phase Signal Generator Circuit using Opamp' . . . . .	4
2.3. 'SPWM Generator Module (without Using Microcontroller)' . . . . .	5
2.4. 'Sinusoidal PWM signal generation technique for three phase voltage source inverter with analog circuit and simulation of PWM inverter for standalone load and micro-grid system' . . . . .	5
<b>3. Justificación</b>	<b>7</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>8</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	8
4.2. Objetivos específicos . . . . .	8
<b>5. Alcance</b>	<b>9</b>
<b>6. Marco teórico</b>	<b>10</b>
6.1. Modulación SPWM . . . . .	10
6.2. Los osciladores . . . . .	11

6.3. Los inversores . . . . .	19
<b>7. Circuito electrónico</b>	<b>21</b>
<b>8. Cálculos y simulaciones</b>	<b>23</b>
8.1. Señal triangular . . . . .	23
8.2. Señal sinusoidal y desfases . . . . .	24
8.3. Simulación SPWM y su inversión . . . . .	25
8.4. Inversor de voltaje trifásico y filtro RC . . . . .	26
8.5. Diferenciador y amplificador . . . . .	26
8.6. Análisis de los resultados simulados . . . . .	27
<b>9. Pruebas físicas</b>	<b>31</b>
9.1. Pruebas con el generador de fuentes . . . . .	31
9.2. Pruebas con los osciladores . . . . .	33
9.3. Pruebas con placas de circuito impreso . . . . .	36
9.4. Diseño del manual de usuario . . . . .	37
<b>10. Conclusiones</b>	<b>38</b>
<b>11. Recomendaciones</b>	<b>40</b>
<b>12. Referencias</b>	<b>41</b>
<b>13. Anexos</b>	<b>43</b>
13.1. Circuitos y PCBs local . . . . .	43
13.2. Manual de usuario . . . . .	43

1.	Circuit diagram of Single-Phase to Three-Phase Converter. [2]	4
2.	Circuit diagram of SPWM Module [3]	5
3.	Circuit diagram of SPWM Inverter[5]	6
4.	Sinusoidal PWM technique [6]	10
5.	Voltage modulation range SPWM [6]	11
6.	Forma canónica de un sistema de retroalimentación positiva o negativa [7]	12
7.	Gráfica de fase de secciones RC [7]	13
8.	Respuesta de frecuencia del amplificador operacional [7]	14
9.	Bandwidth del Op amp y frecuencia de oscilación [7]	15
10.	Forma canónica de un sistema de retroalimentación positiva o negativa[7]	16
11.	Amplificador con retroalimentación positiva y negativa [7]	16
12.	Oscillator Weig Bridge [7]	17
13.	Ejemplo oscilador sinusoidal Weig Bride [7]	18
14.	Oscilador triangular bipolar [8]	18
15.	Inversor de fuente de voltaje [9]	20
16.	Diagrama de bloques del circuito	21
17.	Diagrama de bloques de la fuente de poder [4]	22
18.	Esquemático preliminar del control e inversor del circuito	22
19.	Oscilador triangular simulado de 600Hz	24
20.	Circuito amplificador desfasador [8]	25
21.	Oscilador sinusoidal simulado de 60Hz	25
22.	Señal PWM sinusoidal simulado	25
23.	Señal PWM sinusoidal simulado invertido	26
24.	Inversor de voltaje trifásico	26
25.	Filtro RC del inversor de voltaje	27
26.	Circuito amplificador diferenciador	28
27.	Circuito amplificador no inversor	29
28.	Comparacion señales del oscilador, filtro y amplificador	30

29.	Gráfica de las señales sinusoidales de las pruebas físicas . . . . .	32
30.	Señal PWM sinusoidal simulado en LTspice . . . . .	32
31.	Gráfica de las Señales del Inversor de trifásico físico . . . . .	33
32.	Señal PWM sinusoidal simulado en LTspice . . . . .	33
33.	Gráfica del oscilador triangular . . . . .	34
34.	Gráfica del oscilador triangular . . . . .	34
35.	Gráfica del PWM sinusoidal usando osciladores . . . . .	35
36.	Gráfica del PWM sinusoidal usando osciladores . . . . .	35
37.	Señales trifásicas finales . . . . .	36
38.	Pruebas con la plataforma en PCB . . . . .	36
39.	Pruebas con la plataforma en PCB . . . . .	37
40.	Plataforma educativa primeras pruebas . . . . .	44

---

Índice de cuadros

---

1. Tabla de los estados válidos de los interruptores [9] . . . . . 20

El presente proyecto de graduación tuvo como objetivo principal diseñar e implementar una plataforma educativa, para la generación, modulación y análisis de señales trifásicas. El problema identificado es que, cuando se abordan sistemas trifásicos, se suele necesitar de varios equipos de laboratorio solo para un estudiante. No se tiene lo suficiente para cada usuario, necesitando depender de simulaciones digitales, lo que limita la experimentación directa con estas señales.

La plataforma propuesta integra osciladores de onda senoidales y triangulares, utilizando amplificadores operacionales, junto a un sistema de desfasamiento, para la obtención de tres señales. Se empleó la técnica de modulación sinusoidal por ancho de pulso (SPWM, por sus siglas en inglés), aplicada a un inversor trifásico de voltaje. Adicionalmente, se incorporaron filtros analógicos para la reconstrucción de la señal, junto con un módulo de diferenciación y amplificación, que permiten al usuario realizar ajustes necesarios.

La metodología consistió en la investigación de la técnica de modulación, la generación de ondas, inversor trifásico y los filtros, siguiendo de la simulación y prueba física. Para la observación del debido funcionamiento de cada etapa, culminando en el diseño y fabricación de cuatro tarjetas de circuito impreso (PCBs). Estos fueron fabricados con el equipo de la universidad, para la detección de errores y posibles mejoras. Luego fueron enviados a fabricar las placas en los Estados Unidos. Resultando en un prototipo funcional que opera sin la necesidad de equipos adicionales de generación, junto con un manual de cómo usar la plataforma.

**Palabras clave:** amplificador operacional, Inversor trifásico, modulación sinusoidal por ancho de pulso (SPWM), plataforma educativa.

The main objective of this graduation project was to design and implement an educational platform for the generation, modulation and analysis of three-phase signals. The identified problem is that, when dealing with three-phase systems, several pieces of laboratory equipment are often needed for a single student, and there is not enough equipment available for each user, requiring reliance on digital simulations, which limits direct experimentation with these signals.

The proposed platform integrates sinusoidal and triangular wave oscillators, using operational amplifiers, along side with a phase-shifting system, to generate the three required signals. Sinusoidal pulse-width modulation (SPWM) was used, applied to a three-phase voltage inverter. Additionally, analog filters were incorporated for signal reconstruction, along with a differentiation and amplification module, allowing the user to make the necessary adjustments.

The methodology consisted of investigating the modulation technique, wave generation, three-phase inverter and filters, followed by simulation and physical testing to observe the proper functioning of each stage. This culminated in the design and fabrication of four printed circuit boards (PCBs). Initially, these were manufactured using the university's equipment to identify errors and possible improvements, and then the boards were sent to be manufactured in the United States. The result was a functional prototype that operates without the need for additional generation equipment, along with a user manual for the platform.

**Palabras clave:** operational amplifier, three-phase inverter, sinusoidal pulse-width modulation (SPWM), educational platform.

El estudio y enseñanza de los sistemas trifásicos constituye un pilar fundamental para la formación de ingenieros electrónicos y mecánicos. Este contenido suele ser integrado en cursos teóricos y de laboratorio. Sin embargo, se requiere de varios equipos especializados para recrear las señales, como generadores de funciones y fuentes de alimentación, necesitando depender de simulaciones. Esto limita el impacto de la experiencia de aprendizaje para el estudiante, al no poder interactuar directamente con los experimentos y fortalecer su comprensión conceptual y práctica. En este contexto, surge la necesidad de desarrollar una herramienta didáctica que sea portable, segura y diseñada específicamente para entornos académicos.

El siguiente proyecto está delimitado en el desarrollo de una plataforma física analógica, capaz de trabajar a bajo voltaje, con cuatro módulos que pueden ser utilizados por separado o en conjunto. Este incorpora osciladores de onda, modulación SPWM, filtros de tercer orden y un módulo de diferenciación y amplificador, para corregir desfases y ajustar el nivel de la señal. Durante el desarrollo de la plataforma, se detectó un desfase no deseado en la evaluación de los filtros RC, es por ello que se incorporaron la modulación de diferenciador y amplificación, para corregir la distorsión de fase y el nivel de la señal. Sin embargo, la plataforma depende de una etapa de generación de potencia, que puede ser provista con una fuente de poder DC, que son comunes en un laboratorio electrónico. La metodología realizada incluyó la investigación de cada módulo mencionado, simulación y pruebas de cada etapa en físico, culminando en la fabricación de cuatro placas de circuito impreso (PBCs). Adicionalmente, se elaboró un manual de usuario, para guiar al docente y estudiantes en el adecuado uso de la plataforma.

Los resultados obtenidos de las simulaciones, pruebas físicas y de las placas, demostraron lograr manifestar señales trifásicas desfasadas  $120^\circ$  entre sí, aunque las señales de las placas fabricadas localmente mostraron un poco de ruido, que pudo ser causado por la deficiencia de alguno de los componentes del circuito. Además,

se diseñaron y fabricaron los circuitos impresos de cada etapa, primero localmente y gracias a esto se logró detectar un error en el esquemático del inversor, corrigiéndolo y enviado a fabricar con un proceso profesional de PCBs, que incluye la serigrafía de la placa. Se lograron diseñar, simular y verificar todas las fases de la plataforma, así como fabricar los circuitos impresos de cada módulo, junto con su manual de usuario.

Para crear una señal trifásica desde cero, se necesita varios circuitos eléctricos y topologías que ayuden en cada fase: convertir una señal sinusoidal en tres señales, lograr que las mismas señales estén desfasadas  $120^\circ$ , al mismo tiempo poder cambiar su frecuencia y amplitud.

### **2.1. 'Economic single-phase to three-phase converter topologies for fixed and variable frequency output'**

Este artículo fue realizado en el año 1993, con el fin de proponer varias topologías económicas para la conversión de una señal de una fase a tres fases, con pocos dispositivos, como semiconductores, simultáneamente manteniendo una alta calidad de voltajes en las salidas.

La primera topología que presenta es un convertidor de medio puente, con dos semiconductores y dos diodos. Convierte la señal en una trifásica balanceada, con frecuencia y voltaje fijo. Su desventaja primaria es que los interruptores principales son sometidos al doble de voltaje pico. Otro circuito similar, pero con cuatro interruptores activos también es mostrado, pero no a sido analizado y testeado por completo [1]. También existe una topología full-bridge con 6 interruptores.[1] La última topología que se presenta. Proporciona un *neutral point-clamped converter*, con ocho interruptores activos y cuatro diodos de sujeción. Proporciona un PWM de nivel cinco controlado, sin armónicos y los diodos ayudan que los interruptores estén sometidos a la mitad del voltaje de entrada. Este circuito es muy útil en casos de alto voltaje y potencia. [1]

Cada topología demostró poder convertir una señal de una fase, en una trifásica, con bastante estabilidad y confiabilidad. Este artículo, sobre todo, sirve como un pun-

to de partida de inspiración de posibles configuraciones que ayuden en crear señales trifásicas.

## 2.2. '3-Phase Signal Generator Circuit using Opamp'

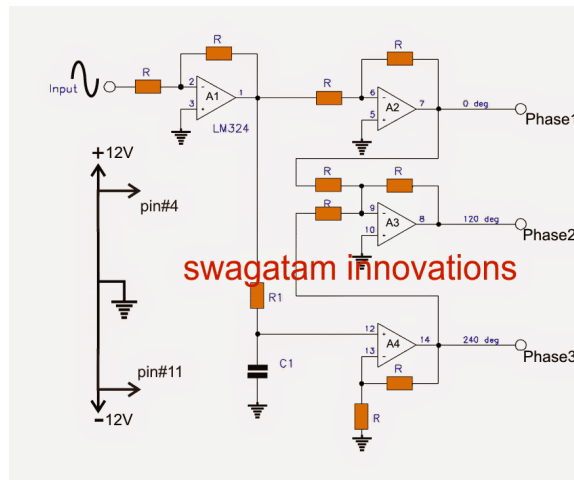
El circuito propuesto (Figura 1) es un convertidor de una señal sinusoidal de una fase, en una trifásica desfasadas  $180^\circ$  entre sí . Utiliza amplificadores operacionales como componentes principales, con el objetivo de incorporar la conversión de una fase a tres fases, de forma rápida y fácil de implementar.[2]

El circuito utiliza un total de cuatro amplificadores operacionales, con diferentes fases que también desfasan las señales, con una frecuencia fija. Una señal sinusoidal es introducida en el input del circuito, donde es primero invertido y amortiguado, convirtiéndose en la señal maestra para el resto del proceso.[2] La señal maestra amortiguada entonces entra en la fase 1, que también lo invierte y amortigua, esencialmente siendo un seguidor invertido. Simultáneamente entra a la fase 3, que es un amplificadores operacionales no inversor con ganancia de 2, para reponer la pérdida de señal causada por la configuración RC, al igual que desfasa la señal  $240^\circ$ .[2] La fase 2 básicamente suma las señales de salida de las fases 1 y 3, desfasadas  $0^\circ$  y  $240^\circ$ . Esto causa un desfase de  $300^\circ$ , que simultáneamente es invertida y desfasada un adicional  $180^\circ$ , creando el desfase de  $120^\circ$  esperado.

Se puede utilizar la siguiente ecuación para los parámetros del circuito:

$$R_1 = \frac{\sqrt{3} * 10^6}{2\pi fC} [2]$$

**Figura 1.** Circuit diagram of Single-Phase to Three-Phase Converter. [2]

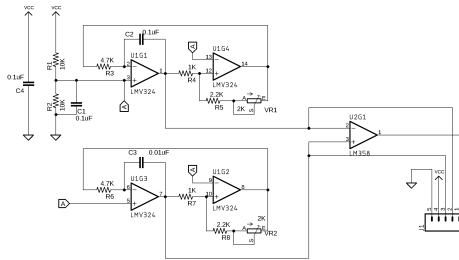


### 2.3. 'SPWM Generator Module (without Using Microcontroller)'

La modulación SPWM consiste en comparar una señal de referencia con una señal portadora, comúnmente una senoidal y una triangular. Esta comparación resulta en la generación de pulsos cuadrados con ancho variable. Esta técnica es muy utilizada para modificar el ciclo de trabajo de una señal periódica. A través de canales de comunicación o controlar energía enviada a una carga.

El circuito propuesto (Figura 2) muestra como generar un módulo SPWM, usando amplificadores operacionales para crear 2 osciladores de señales triangulares de 10k Hz y 1k Hz. También usando otro amplificador para comparar ambas señales.[3]

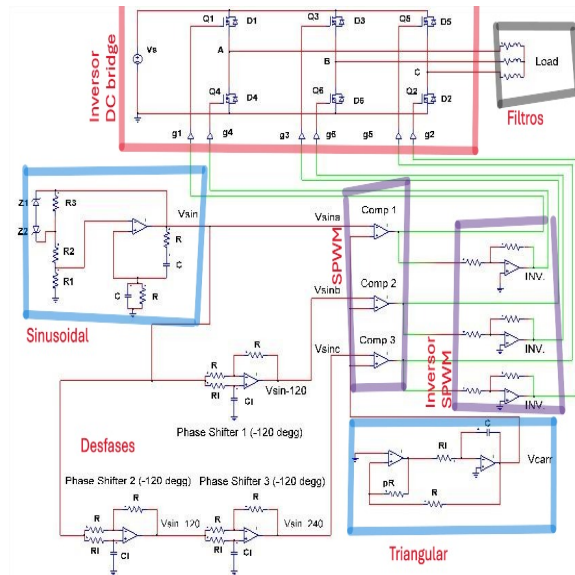
**Figura 2.** Circuit diagram of SPWM Module [3]



### 2.4. 'Sinusoidal PWM signal generation technique for three phase voltage source inverter with analog circuit and simulation of PWM inverter for standalone load and micro-grid system'

El siguiente artículo presenta un circuito SPWM usando un inversor con MOSFETS (Figura 3), para crear una señal sinusoidal trifásica. Utiliza una señal de referencia sinusoidal de 50 Hz, generada por un oscilador Wien Bridge, y una señal portadora triangular de 10k Hz, generada usando un circuito integrador y comparador. Al mismo tiempo se tiene un circuito que desfasa la señal sinusoidal a 120° y 240, cada señal desfasada es comparada con la señal triangular, para después ser conectadas en un inversor de fuente de voltaje y un circuito de filtrado LCL, para conseguir 3 señales sinusoidales.

**Figura 3.** Circuit diagram of SPWM Inverter[5]



La Universidad del Valle suministra a los estudiantes y catedráticos osciloscopios, fuentes de poder, generadores de funciones, entre otros dispositivos para construir y simular diversos circuitos que ayuden en la enseñanza y entendimiento de los conceptos y teoría electrónica. Sin embargo, dependiendo del circuito que se quiere enseñar, las prácticas de laboratorios pueden ser limitadas en su alcance y los catedráticos necesitan utilizar otros métodos de enseñanza, como la simulación de circuitos electrónicos.

Actualmente, para recrear circuitos trifásicos en la Universidad del Valle de Guatemala, se utilizan tres generadores de funciones y 2 fuentes de voltaje. Estos recursos que la Universidad no puede suministrar individualmente a cada alumno. Por esta razón, al enseñar este tema, los circuitos únicamente se simulan y no se construyen.

El objetivo de este proyecto es diseñar una plataforma educativa, que asista a los catedráticos y estudiantes en el aprendizaje de sistemas trifásicos en los laboratorios, completamente analógica. Esta plataforma reducirá significativamente los recursos requeridos para este circuito, otorgando herramientas a cada alumno individualmente y proporcionar a los catedráticos nuevas formas de enseñanza en diversos cursos.

### 4.1. Objetivo general

Implementar una plataforma educativa de generación de señales trifásicas con SPWM y un inversor.

### 4.2. Objetivos específicos

- Diseñar y simular la fase de generación de SPWM.
- Diseñar y simular un circuito inversor de fuente de voltaje trifásico.
- Verificar el funcionamiento de los circuitos SPWM e Inversor trifásico en un prototipo.
- Diseñar los circuitos impresos de los módulos SPWM, Inversor trifásico y módulos adicionales.
- Redactar un manual de usuario.

El proyecto abarca desde el diseño y simulación hasta pruebas de una plataforma educativa de generación de señales trifásicas. También el diseño y fabricación de circuitos impresos localmente con el equipo disponible en la Universidad del Valle de Guatemala. Se fabricaron cuatro módulos:

- Generación de oscilación
- SPWM
- Filtrado
- Diferenciación y amplificación

El proyecto no abarca el diseño e implementación de una fuente de poder que alimente la plataforma (antes del módulo de generación de oscilación). Por esta razón es necesario utilizar una fuente DC regulada para el funcionamiento de este proyecto. Tampoco se considera la incorporación de módulos adicionales ni guías de laboratorio para la plataforma o pruebas con diferentes cargas.

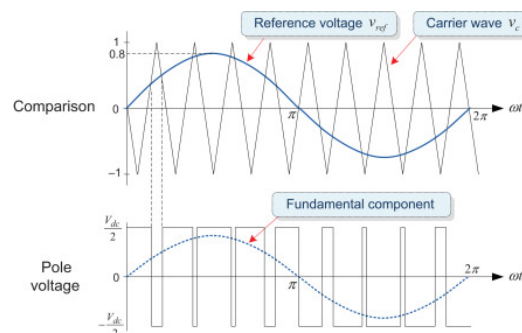
## 6.1. Modulación SPWM

Una técnica PWM muy utilizada es la *Sinusoidal PWM technique*, donde se comparan dos señales en tiempo real, una siendo comúnmente una señal sinusoidal de referencia y la otra una señal triangular portadora (*Carrier*) y se puede determinar los estados de conmutación para cada polo en el inversor [6]:

- Voltaje de referencia  $>$  Carrier triangular: interruptor superior encendido
- Voltaje de referencia  $<$  Carrier triangular: interruptor inferior encendido

La señal triangular tiene una frecuencia considerablemente grande, comparada con la señal sinusoidal, al mismo tiempo el voltaje pico de la señal debe ser mayor al de la referencia, para cumplir la necesaria condición de modulación lineal. Dando como resultado una señal PWM con un ciclo de trabajo fluctuante, la Figura 4 muestra este sistema. [6]

**Figura 4.** Sinusoidal PWM technique [6]



### 6.1.1. Onda modular y Onda portadora

Este tipo de técnicas PWM es normalmente llamada *Carrier-based PWM technique*, al utilizar una señal portadora con alta frecuencia para modulación de voltaje, mientras que la señal de referencia es comúnmente llamada onda modular, es común utilizar una señal triangular como la onda portadora para la modulación de voltaje AC, pero existen diferentes técnicas PWM que utilizan diferentes formas de ondas moduladoras. [6]

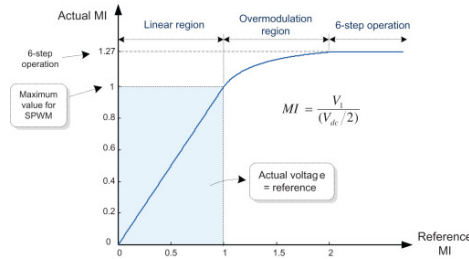
Al comparar la señal referencia con la señal portadora, es importante encontrar el índice de modulación, siempre cuando la relación de la frecuencia de ambas señales es lo suficientemente grande [6], usando la ecuación 1.

$$v_{01} = \frac{V_{dc}}{2} MI \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\text{Donde: } v_{ref} \leq \frac{V_{dc}}{2}$$

El rango de  $0 \leq MI \leq 1$  es llamado el rango modular lineal, que se puede observar en la Figura 5, donde el inversor puede generar un voltaje de salida proporcional al de la referencia. Sin embargo, si  $MI > 1$  es el rango llamado sobre modulación, el voltaje de referencia excede el voltaje pico de la onda portadora triangular, causando que el inversor no pueda producir un voltaje de salida proporcionalmente lineal al de la referencia [6], También se puede calcular la modulación de la amplitud, siendo  $M_a = \frac{A_{ref}}{A_c}$ , y la frecuencia, siendo  $M_f = \frac{f_{ref}}{f_c}$  [5].

**Figura 5.** Voltage modulation range SPWM [6]



## 6.2. Los osciladores

Circuitos osciladores con amplificadores operacionales son diseñados intencionalmente para que se mantengan en un estado inestable y generar señales uniformes muy usados como referencias en aplicaciones de audio, generadores de funciones, sistemas digitales y de comunicación. Existen dos clases de osciladores: sinusoidales y de relajación. El primero utiliza amplificadores RC o LC, pueden tener frecuencia

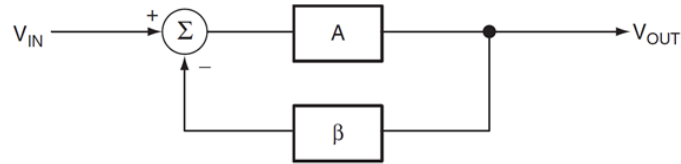
ajustable o fijas usando cristales, mientras que los osciladores de relajación generan ondas triangulares, diente de sierra, cuadradas, exponenciales y de pulso [7].

Estos osciladores operan sin la necesidad de alguna señal de entrada, usando una combinación de retroalimentación positiva y negativa para mantener el amplificador operacional en un estado inestable, resultando en una señal de salida que oscila [7].

### 6.2.1. Requerimientos de oscilación

La forma canónica de un sistema de retroalimentación ayuda en la demostración de los requisitos necesarios para que un circuito oscile. La figura 6 demuestra el diagrama de bloques del sistema y la ecuación 2 es la función de transferencia del mismo. Los osciladores utilizan la señal de salida creada por la red de retroalimentación como su entrada, siendo el ruido del voltaje el proveedor del impulso inicial de la señal si es configurado en retroalimentación positiva. Durante cierto tiempo, la salida se acumula y empieza a oscilar según la frecuencia configurada por los componentes del circuito [7].

**Figura 6.** Forma canónica de un sistema de retroalimentación positiva o negativa [7]



$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A}{1 + A\beta} \quad (2)$$

Oscilación es el resultado del sistema no pudiendo encontrar un estado estable, porque su función de transferencia no se puede satisfacer. Esto es posible sólo cuando  $(1 + A\beta) = 0$ ,  $A\beta = -1$  de la ecuación 2, esto es llamado el Criterio de *Barkhausen*, esta restricción también requiere que la ganancia del sistema sea 1 con un desfase de  $180^\circ$ , siendo la ecuación equivalente  $A\beta = 1 \angle -180$  para sistemas de retroalimentación negativo, la expresión cambia a  $A\beta = 1 \angle 0$  para retroalimentación positiva [7].

Cuando estas condiciones son cumplidas, el voltaje de salida del sistema inestable aumenta al infinito y cuando se acerca a cualquier límite del riel de poder, causa que cambie la ganancia de los componentes activos en el amplificador, cambiando el valor de  $A$ , resultando que  $A\beta \neq 1$  y el voltaje desacelera de cargar infinitamente y eventualmente se detiene [7].

Al llegar a este punto, 3 cosas pueden ocurrir [7]:

- El sistema se estabiliza y se bloquea en el riel eléctrico.

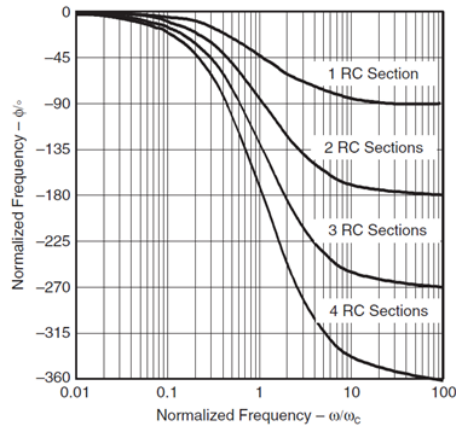
- La carga inicial puede causar que el sistema se sature por bastante tiempo, después se vuelve lineal y se dirige al otro riel. Esto causa oscilaciones altamente distorsionadas (quasi square waves), creando los osciladores de relajación.
- El sistema se mantiene lineal y logra invertir su dirección, creando una onda sinusoidal.

### 6.2.2. Desfase en los osciladores

Los osciladores son dependientes de los componentes activos y pasivos del circuito, que también provocan cierta cantidad de desfase que puede variar con la temperatura, pero tiene una tolerancia inicial amplia. Un circuito RC o RL de un polo contribuye con un desfase de  $90^\circ$  por polo, por esto se deben usar como mínimo dos para satisfacer el desfase de  $180^\circ$ . Circuitos LC y LR tienen 2 polos y de por sí contribuyen con el desfase requerido, pero sólo suelen ser utilizados en aplicaciones de altas frecuencias, en osciladores de baja frecuencia son utilizados múltiples circuitos RC [7].

El circuito sólo oscila en la frecuencia que se acumula en el desfase de  $180^\circ$ , determinando la frecuencia del circuito y la tasa de cambio de fase con la frecuencia  $\frac{d\varphi}{d\omega}$  determina la estabilidad del mismo. Cuando las secciones de RC están en cascada, el desfase incrementa por el número total de secciones  $n$  [7].

**Figura 7.** Gráfica de fase de secciones RC [7]



La frecuencia de oscilación es muy dependiente en este cambio de fase, que se muestra en la Figura 7, se requiere un gran cambio en el  $d\varphi$ , para un pequeño cambio en la frecuencia  $d\omega$ . A pesar de que dos circuitos RC en cascada son suficientes para el requerido desfase de  $180^\circ$ , estos osciladores presentan baja estabilidad de frecuencia, si se aumenta las secciones a 3 y 4, el  $\frac{d\varphi}{d\omega}$  es mayor y la estabilidad mejora significativamente, siendo la configuración de 4 secciones la más estable, como un amplificador operacional viene en paquetes cuádruples, este es el máximo número de secciones que este tipo de osciladores puede tener. Circuitos que usan cristales o resonadores cerámicos son los osciladores más estables, al tener  $\frac{d\varphi}{d\omega}$  bastante alto, pero sólo son ideales para circuitos con frecuencias altas, al ser más pesados, costosos y

grandes [7].

### 6.2.3. Ganancia en el oscilador

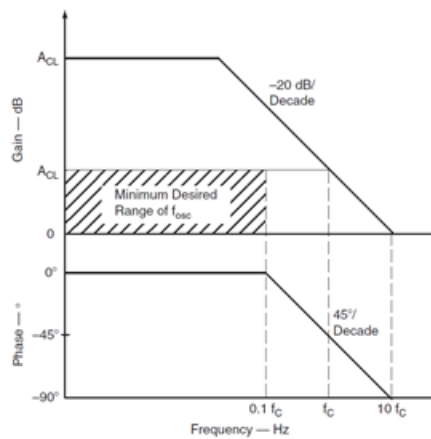
Los osciladores deben tener una ganancia igual a 1, en condiciones normales si este se excede el circuito se estabiliza y paran las oscilaciones, pero si se excede con un desfase de  $-180^\circ$ , el componente activo reduce la ganancia hacia 1 de forma no lineal y el circuito continúa oscilando [7].

En las peores condiciones, si la ganancia es muy baja, el sistema y las oscilaciones son deficientes, si es demasiado alto las ondas se asemejan a unas cuadradas y ganancia excesiva resulta en la distorsión del sistema. Algunas configuraciones requieren de circuitos auxiliares para ajustar la ganancia; cuando se requiere poca distorsión en la salida. Algunos constituyen insertar componentes no lineales en la retroalimentación, otros en ganancia de control automática (*AGC*) y hasta limitantes como resistencias y diodos [7].

### 6.2.4. Impacto del amplificador operacional en el oscilador

Es imperativo escoger el amplificador operacional adecuado para nuestro oscilador, normalmente se asume que los mismos tienen un ancho de banda infinito y que no tiene ninguna dependencia a la frecuencia, en la realidad la ganancia del loop  $A\beta = 1$  si es dependiente de la frecuencia [7].

**Figura 8.** Respuesta de frecuencia del amplificador operacional [7]

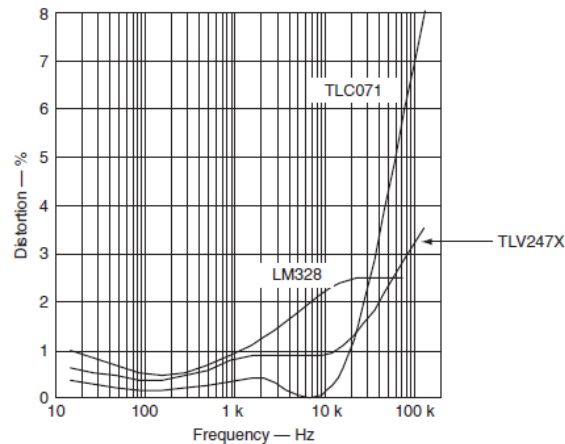


La Figura 8 muestra la ganancia vs la respuesta de frecuencia,  $A_{CL}$  (*closed loop gain*) se puede encontrar con la siguiente ecuación [7]:

$$A_{CL} = \frac{A}{1 + A\beta} = \frac{\frac{1}{\beta}}{1 + \frac{1}{A\beta}} = \frac{A_{CLideal}}{1 + \frac{A_{CLideal}}{A_{OL}}} \quad (3)$$

Donde  $\frac{1}{\beta}$  representa  $A_{CLideal}$  (*ideal closed loop gain*), que es normalmente especificado por el sistema en donde se interseca con  $A_{OL}$  (*open loop gain*). Durante este punto, llamado  $f_0$ , el  $A_{CLideal}$  es atenuado 3dB y decae a una tasa de 20 dB, lo cual empeora aún más por el amplificador operacional, que también contribuye un desfase de  $45^\circ$  en ese punto, algunos tienen un desfase mayor, esta zona debe ser evitada o compensada por otro circuito. Un amplificador operacional debe de ser escogido con un *bandwidth* mínimo de una década arriba de la frecuencia del oscilador, como se puede observar en la Figura 9 [7].

**Figura 9.** Bandwidth del Op amp y frecuencia de oscilación [7]



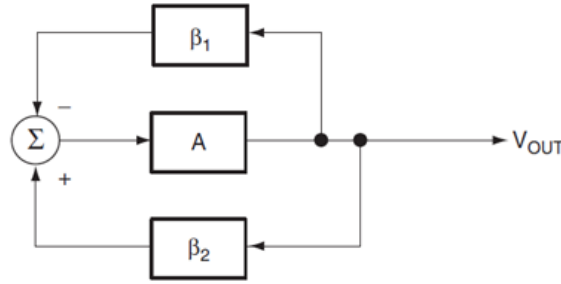
El oscilador *Wein bridge* requiere de un *bandwidth* de ganancia mayor de  $43\omega_{OSC}$  para lograr mantener una ganancia y frecuencia en un rango del 10% de los valores esperados. Como ultima consideración es el *slew rate* limitante del amplificador, este tiene que ser mayor de  $2\pi V_p f_0$ , donde  $V_p$  es el voltaje pico de la señal de salida y  $f_0$  la frecuencia de oscilación o distorsión de la misma señal [7].

### 6.2.5. Análisis del oscilador

El diseño de un oscilador utiliza diversas combinaciones de retroalimentación positiva y negativa, como se muestra en la Figura 10. Cuando se utilizan ambas combinaciones, la retroalimentación negativa es combinada en un termino y la Figura 10 se convierte en la Figura 6. La retroalimentación positiva se representa como  $\beta = \beta_2$  y el análisis es simplificado, si se usa el negativo,  $\beta_2 = 0$  y se ignora la retroalimentación positiva [7].

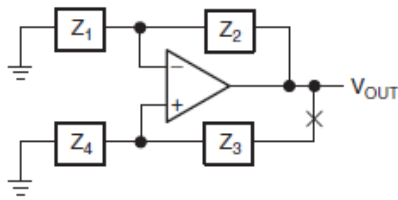
En la Figura 11a se muestra la forma general de un oscilador con retroalimentación positiva y negativa, para analizar el circuito se debe quebrar el loop, donde esta la X, y se aplica una señal de testeo  $V_{TEST}$ , siendo el voltaje de salida analizado en el circuito equivalente mostrado en la Figura 11b [7].

**Figura 10.** Forma canónica de un sistema de retroalimentación positiva o negativa[7]

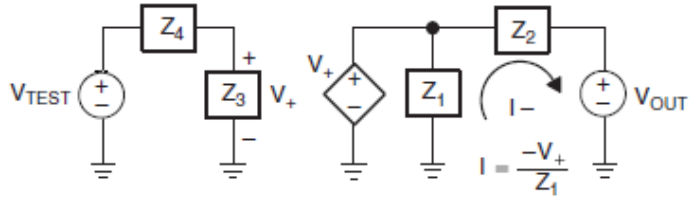


**Figura 11.** Amplificador con retroalimentación positiva y negativa [7]

(a) Circuito original



(b) Circuito equivalente con loop de ganancia



$$V_+ = V_{TEST} \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} \quad (4a)$$

$$V_{OUT} = V_+ \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} \quad (4b)$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{TEST}} = \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} \quad (4c)$$

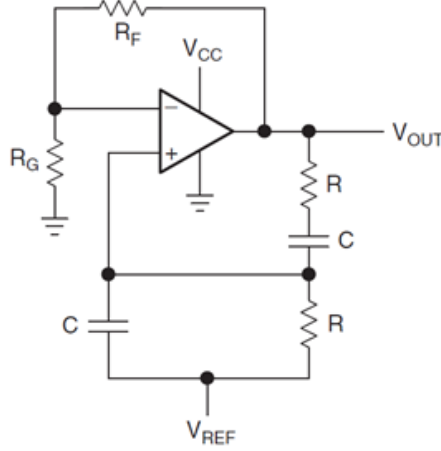
Se utiliza la ecuación 4a para encontrar  $V_+$ , que después es considerado una señal de entrada en un amplificador no inversor, resultando en la ecuación 4b, utilizando ambas ecuaciones para sustituir  $V_+$  se obtiene la ecuación de la función de transferencia 4c. Estas ecuaciones solo son validas si el open *loop gain* del op amp es lo suficientemente grande y la frecuencia de oscilación es  $< 0.1\omega_{3dB}$  [7].

### 6.2.6. Oscilador sinusoidal Weig Bridge

Este oscilador sinusoidal es el mas simple y conocido [12], usado bastante en circuitos para aplicaciones de audio, utiliza pocos componentes y tiene buena estabilidad de frecuencia. Una de las desventajas de este oscilador es que la amplitud de salida es igual al de los rieles, saturando el op amp y causando que tenga alta distorsión de salida [7].

La transferencia de función del circuito se vio en la sección anterior, siendo  $Z_1 = R_G$ ,  $Z_2 = R_F$ ,  $Z_3 = R_1 + \frac{1}{sC_1}$  y  $Z_4 = R_2 \parallel \frac{1}{sC_2}$ . Primero se rompe el loop entre  $Z_1$  y la salida, se aplica un  $V_{TEST}$  en  $Z_1$  y se calcula  $V_{OUT}$ , se calcula  $V_+$  usando 5b y cada

**Figura 12.** Oscillator Weig Bridge [7]



término es multiplicado por  $\frac{R_2 C_2 s + 1}{R_2}$ , para finalmente substituir  $s = j\omega_0$ ,  $\omega_1 = \frac{1}{R_1 C_2}$ ,  $\omega_2 = \frac{1}{R_2 C_2}$ , obteniendo 5c [7].

$$V_+ = V_{TEST} \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} = V_{TEST} \frac{\left(\frac{R_2}{R_2 C_2 s + 1}\right)}{\left(\frac{R_2}{R_2 C_2 s + 1}\right) + \left(R_1 + \frac{1}{C_1 s}\right)} \quad (5a)$$

$$\frac{V_+}{V_{TEST}} = \frac{1}{1 + R_1 C_2 s + \frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{R_2 C_1 s} + \frac{C_2}{C_1}} \quad (5b)$$

$$\frac{V_+}{V_{TEST}} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} + j\left(\frac{\omega_0}{\omega_1} - \frac{\omega_2}{\omega_0}\right)} \quad (5c)$$

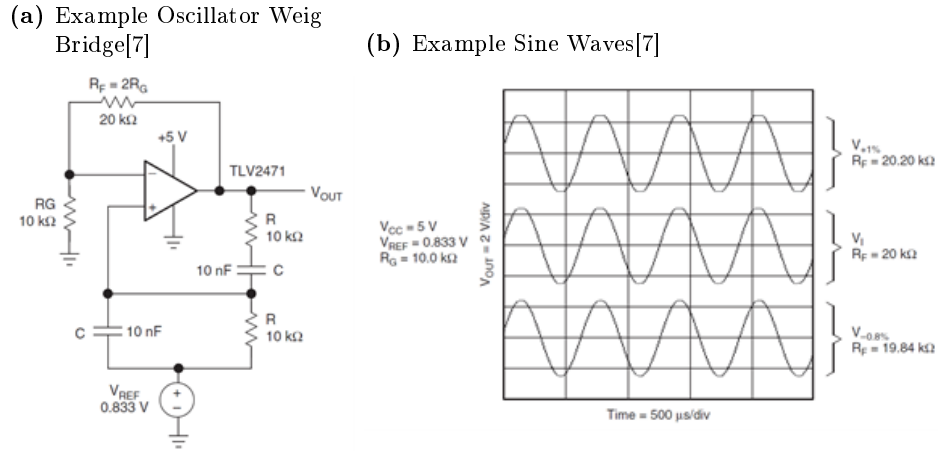
La ecuación puede ser simplificada aún más, ambos capacitores tienen que contribuir  $90^\circ$  para el desfase requerido de  $180^\circ$ , requiriendo que  $c_1=c_2$  y  $r_1=r_2$ , cancelando  $\omega_0$  y también remueve cualquier cambio de amplitud por la frecuencia, resultando en la ecuación 6 [7].

$$\frac{V_+}{V_{TEST}} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} + j\left(\frac{\omega_0}{\omega_1} - \frac{\omega_2}{\omega_0}\right)} = \frac{1}{3 + j(0)} = \frac{1}{3} \quad (6)$$

El resultado es un factor de retroalimentación de  $\beta = \frac{1}{3}$ , en consecuencia, la ganancia de retroalimentación negativa debe ser  $A = 3$ , para que  $|A\beta| = \frac{1}{3}$ . Para cumplir este requisito,  $R_f = 2R_g$ , y para calcular su frecuencia de oscilación [7].  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ .

La Figura 13a muestra un ejemplo de un circuito oscilador weig bridge, con una frecuencia de 1.57k Hz, la Figura 13b muestra las señales de salida del circuito, se puede observar cierta distorsión causado por las tolerancias de los componentes, este aspecto crece cuando se incrementa el valor de  $R_f$  y las oscilaciones paran cuando el mismo es reducido más del 0.8 % [7].

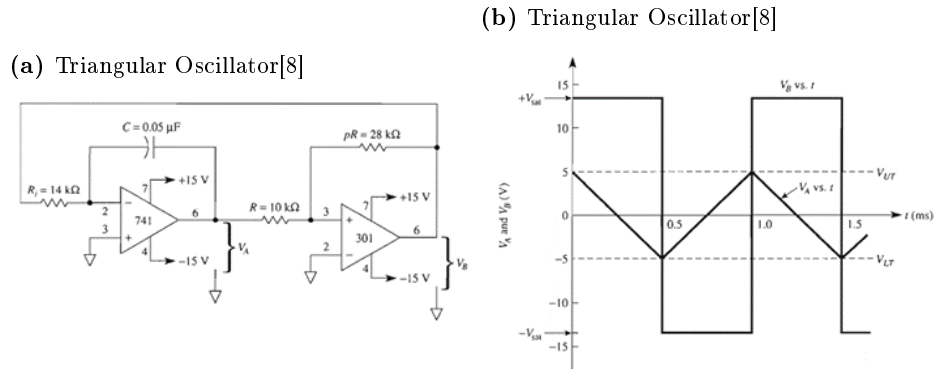
**Figura 13.** Ejemplo oscilador sinusoidal Weig Bride [7]



### 6.2.7. Oscilador triangular bipolar

La Figura 14a presenta un generador de onda triangular bipolar, donde se utiliza un integrador donde sale la señal triangular  $V_a$  y un comparador, donde se genera una señal cuadrada  $V_b$ , que se puede observar en la Figura 14b [8].

**Figura 14.** Oscilador triangular bipolar [8]



Cuando  $V_b$  llega al voltaje de saturación del op amp, esto fuerza una corriente constante  $\frac{V_a}{R_i}$  en el capacitor, que causa que la señal cuadrada cambie de un voltaje de saturación al otro, esto se repite para el otro voltaje extremo y así continuar las oscilaciones indefinidamente[8].

Para este oscilador, existe una relación bastante importante entre la resistencia  $R$  y  $pR$ .

$$p = \frac{pR}{R} \quad (7)$$

Esta relación ayuda en calcular la frecuencia del circuito.

$$f = \frac{p}{4R_i C} \quad (8)$$

Esta relación también es crucial en el voltaje pico a pico de la señal triangular.

$$V_{LT} = \pm \frac{V_{SAT}}{p} \quad (9)$$

### 6.3. Los inversores

Los inversores se utilizan principalmente como convertidores, transformar voltaje DC en una señal AC. Son muy utilizados en diversos tipos de aplicaciones industriales, como variadores de velocidad ajustables (ASDs), sistemas de alimentación ininterrumpida, compensadores VAR, filtros activos de potencia, entre otros. Existen diferentes topologías de inversores, de fuente de voltaje, fuente de corriente y fuente de impedancia, siendo el primero el más conocido y usado al comportarse como una fuente de voltaje natural, requerido para diversas aplicaciones industriales[9].

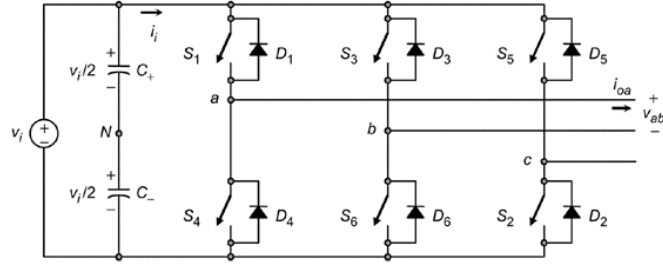
Los inversores constituyen el uso de diodos u switches de poder, que genera ondas con transiciones rápidas, se usa técnicas de modulación que ayuda en controlar el tiempo y la secuencia usada para prender y apagar los semiconductores, una de estas técnicas es el SPWM [9].

#### 6.3.1. Inversor de fuente de voltaje trifásico (VSI)

Este tipo de topología es usada en aplicaciones de poder medio y alto, con el objetivo de proveer una fuente de poder trifásica, con amplitud, frecuencia y fase controlable, usando técnicas de modulación. El circuito este compuesto por capacitores, diodos e interruptores, la formación de 2 interruptores es llamado “pierna del inversor”, la Figura 15 muestra la topología del VSI y la Tabla 1 muestra todos los estados validos de los interruptores [9]. Para que el inversor opere de forma correcta, se deben seguir las siguientes reglas:

- Los interruptores de las piernas no pueden estar encendidas al mismo tiempo, esto causara un corto circuito en la conexión DC de la fuente de voltaje.
- Los diodos antiparalelos a cada interruptor son necesarios para proveer un camino para las cargas inductivas, si el interruptor ya lo tiene entonces el circuito esta completo.
- Se debe considerar un tiempo muerto, también llamado *blanking time*, en las señales de control de los interruptores para no romper la primera regla.

**Figura 15.** Inversor de fuente de voltaje [9]

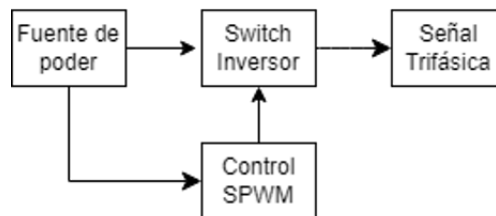


**Cuadro 1.** Tabla de los estados válidos de los interruptores [9]

State	No.	$v_{ab}$	$v_{bc}$	$v_{ca}$	Space Vector
$S_1, S_2, S_6$ ON, $S_4, S_5, S_3$ OFF	1	$v_i$	0	$-v_i$	$\vec{v}_1 = 1 + j0.577$
$S_1, S_2, S_3$ ON, $S_4, S_5, S_6$ OFF	2	0	$v_i$	$-v_i$	$\vec{v}_2 = j1.155$
$S_2, S_3, S_4$ ON, $S_1, S_5, S_6$ OFF	3	$-v_i$	$v_i$	0	$\vec{v}_3 = -1 + j0.577$
$S_3, S_4, S_5$ ON, $S_1, S_2, S_6$ OFF	4	$-v_i$	0	$v_i$	$\vec{v}_4 = -1 - j0.577$
$S_4, S_5, S_6$ ON, $S_1, S_2, S_3$ OFF	5	0	$-v_i$	$v_i$	$\vec{v}_5 = -j1.155$
$S_1, S_5, S_6$ ON, $S_2, S_3, S_4$ OFF	6	$v_i$	$-v_i$	0	$\vec{v}_6 = 1 - j0.577$
$S_1, S_3, S_5$ ON, $S_2, S_4, S_6$ OFF	7	0	0	0	$\vec{v}_7 = 0$
$S_2, S_4, S_6$ ON, $S_1, S_3, S_5$ OFF	8	0	0	0	$\vec{v}_8 = 0$

El principal objetivo de la plataforma educativa, es que funcione sin ninguna herramienta externa, para lograr esto se necesitaran diversas fases y circuitos para desarrollar la señal trifásica.

**Figura 16.** Diagrama de bloques del circuito



La Figura 16 es el diagrama de bloques que representa las fases que se necesita para el proyecto. La sección de la Fuente de poder consiste en conectar la plataforma directamente a la corriente de 120VAC y alimentar todo el circuito, la Figura 17 demuestra el proceso para realizar la conexión [4], que por el momento, no forma parte de este proyecto. La sección de Control PWM sinusoidal, es la encargada de controlar la frecuencia de switcheo de la sección del Inversor de voltaje Trifásico, usando osciladores de señal triangular y sinusoidal, terminando en el filtrado de las señales del Inversor trifásico, usando circuitos RC o LC y así obtener las 3 señales sinusoidales esperadas.

La Figura 18 muestra el circuito preliminar del control SPWM y el Inversor, donde se usa un oscilador triangular como la señal Carrier de 600Hz, y un oscilador sinusoidal como la señal de referencia de 60Hz (secciones). Para el control de inversor trifásico, se

Figura 17. Diagrama de bloques de la fuente de poder [4]

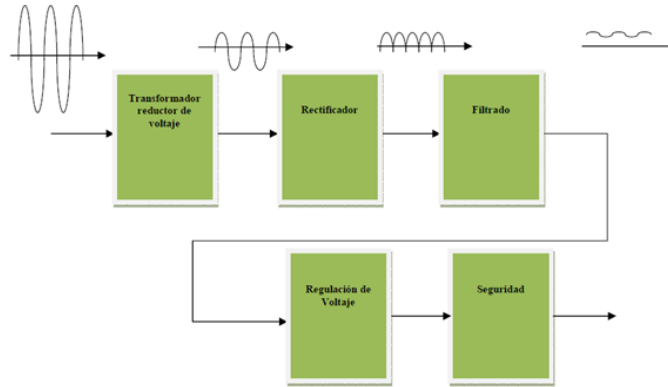
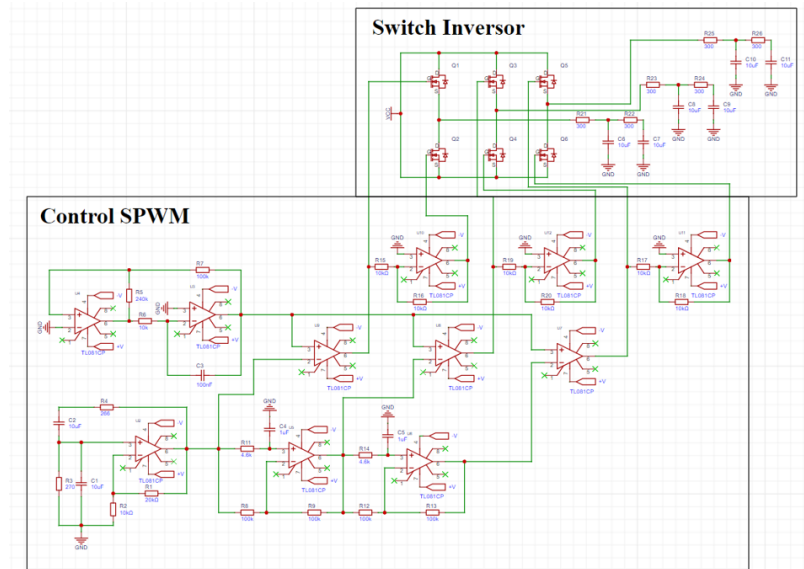


Figura 18. Esquemático preliminar del control e inversor del circuito



necesita desfasar la señal sinusoidal a  $120^\circ$  y  $240^\circ$ , obteniendo 3 señales de referencia, después cada señal es comparada con la señal portadora, obteniendo 3 señales SPWM, terminando con la inversión de estas señales, con un total de 6 señales. Necesitamos un total de 3 señales SPWM y 3 señales invertidos para evitar causar corto circuito en los inversores, terminando con los filtros RC o LC para filtrar las señales cuadradas y convertirlas en sinusoidales. Cabe destacar que la alimentación de los amplificadores esta aislada de la alimentación de los inversores.

### 8.1. Señal triangular

Para el diseño de un oscilador triangular con una frecuencia de 600Hz, un capacitor de 100nF y la resistencia  $R_i = 10k\Omega$ , se utilizará la ecuación 8, despejando para la variable  $p$ .

$$p = 4fR_iC = 2.4 \quad (10)$$

Después se utiliza la ecuación 7 para encontrar el valor de la resistencia  $pR$ , siendo  $R = 100k\Omega$ .

$$pR = R * p = 240k\Omega \quad (11)$$

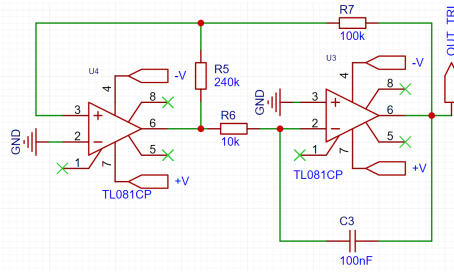
Adicionalmente, por la relación de la ecuación 7, tenemos que encontrar el voltaje pico a pico de la señal triangular resultante del circuito, alimentando el amplificador con  $\pm 17V$ .

$$V_{LT} = \pm \frac{V_{sat}}{p} = 7.08V \quad (12)$$

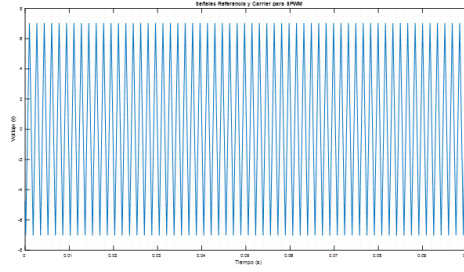
Se decidió en este voltaje, para que la alimentación del oscilador sinusoidal pueda ser mínimo de 5V y mantenerse en el rango de modulación lineal  $0 < MI < 1$ .

**Figura 19.** Oscilador triangular simulado de 600Hz

(a) Esquemático del circuito



(b) Señal triangular y cuadrada



Para simular el circuito, se utilizó el simulador LTSpice, es una simulación con más parámetros que se aproxima mejor a la realidad. En la Figura 19 se muestra la señal cuadrada y la señal triangular de 600Hz.

## 8.2. Señal sinusoidal y desfases

Para el diseño del oscilador Weig Bridge, con una frecuencia de 60Hz y capacitores de 10uF, se utilizaron las ecuaciones de la sección 6.2.6, despejando para encontrar el valor de la resistencia  $R$ .

$$R = \frac{1}{2\pi f C} \approx 265.26\Omega \quad (13)$$

También se debe calcular la ganancia del circuito, siendo  $R_f = 21k\Omega$  y  $R_g = 10k\Omega$ . Se decidió en una ganancia mayor que 3, para compensar por las tolerancias de las resistencias en el circuito real.

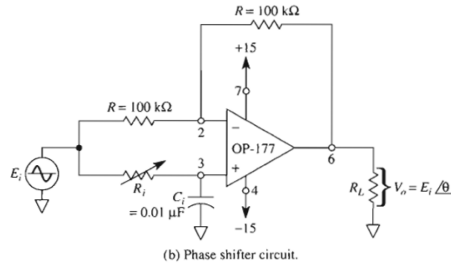
$$A = 1 + \frac{R_f}{R_g} = 3.1 \quad (14)$$

Para el cálculo de fase de la señal, se utiliza el circuito mostrado en la Figura 20 y la siguiente ecuación para calcular la resistencia  $R$  [8], usando un capacitor de 1uF.

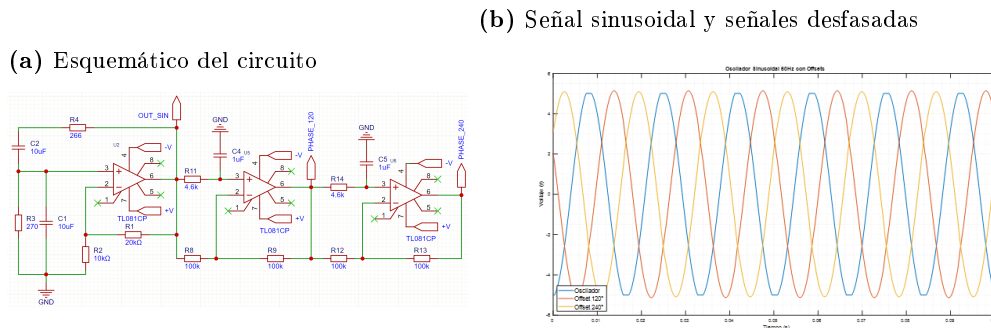
$$R_i = \frac{\tan(\frac{\theta}{2})}{2\pi f} \approx 4.6k\Omega \quad (15)$$

La Figura 21a muestra el oscilador sinusoidal, junto con 2 circuitos amplificador desfasador, para así desfasar la señal en  $120^\circ$  y  $240^\circ$ . La gráfica 21b muestra las señales de cada fase.

**Figura 20.** Circuito amplificador desfasador [8]

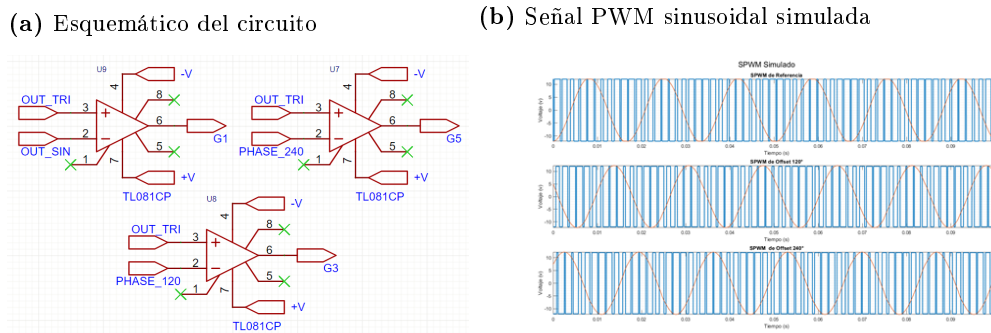


**Figura 21.** Oscilador sinusoidal simulado de 60Hz



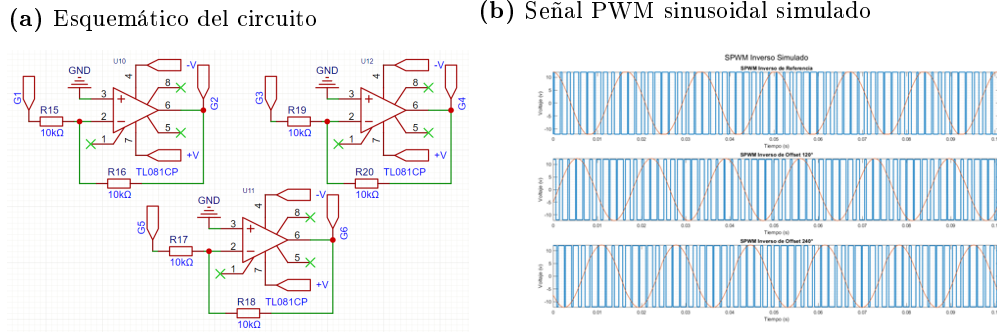
### 8.3. Simulación SPWM y su inversión

**Figura 22.** Señal PWM sinusoidal simulado

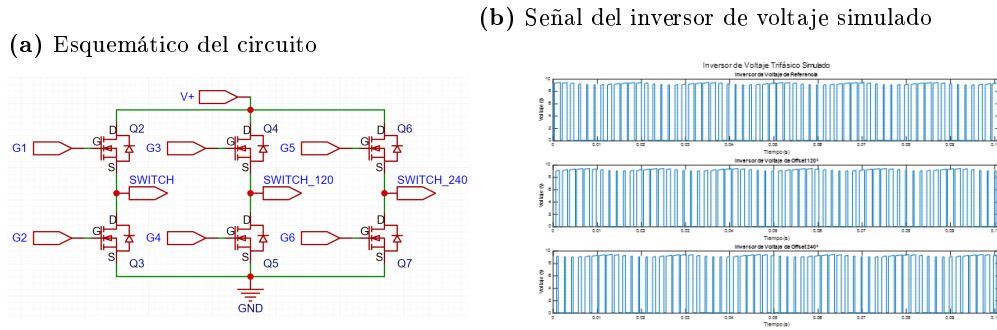


Teniendo la señal Carrier y la señal de referencia junto con sus desfases, se puede desarrollar el PWM sinusoidal para cada una de las señales sinusoidales, utilizando un simple comparador que se observa en la Figura 22a. Después se utiliza un simple inversor de ganancia 1, para invertir las señales SPWM, como se muestra en las Figuras 23, que son necesarias para evitar corto circuito en el inversor de voltaje

**Figura 23.** Señal PWM sinusoidal simulado invertido



**Figura 24.** Inversor de voltaje trifásico



## 8.4. Inversor de voltaje trifásico y filtro RC

Con las 6 señales de SPWM, se conectan directamente al pin Gate de los transistores MOSFETS, como se muestra en las Figuras 24, procurando no mezclar entre los desfases.

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \longrightarrow R = \frac{1}{2\pi fC} \approx 300\Omega \quad (16)$$

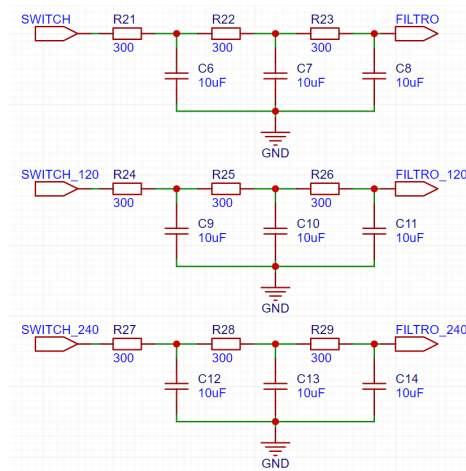
Para el calculo del filtro RC pasa bajos, se utilizó la ecuación 16, despejando para calcular la resistencia, con un capacitor de 10uF.

## 8.5. Diferenciador y amplificador

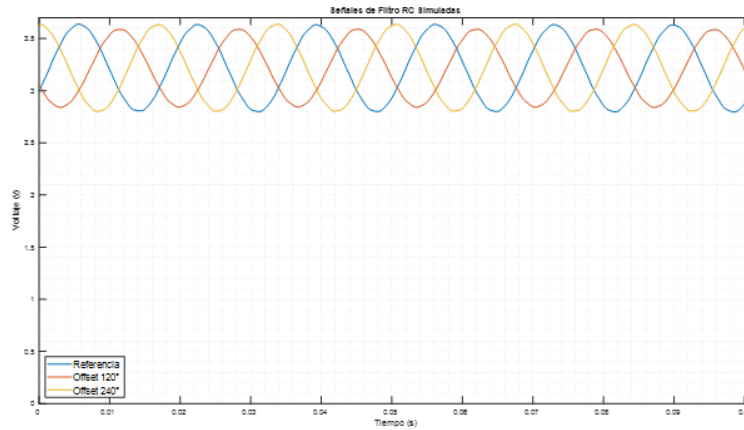
La Figura 25b muestra el final del generador de señales trifásicas, pero también demuestra un problema al utilizar filtros, que desfasan las señales y disminuyen el voltaje  $V_{pp}$  de las señales. Para rectificar esto, se utiliza un circuito amplificador diferenciador, que nos ayudará a centrar las señales, terminando con un circuito amplificador no inversor, con un potenciómetro para ajustar la ganancia y aumentar el voltaje de las señales trifásicas (figuras 26 y 27).

Figura 25. Filtro RC del inversor de voltaje

(a) Esquemático del circuito



(b) Señal del filtro RC

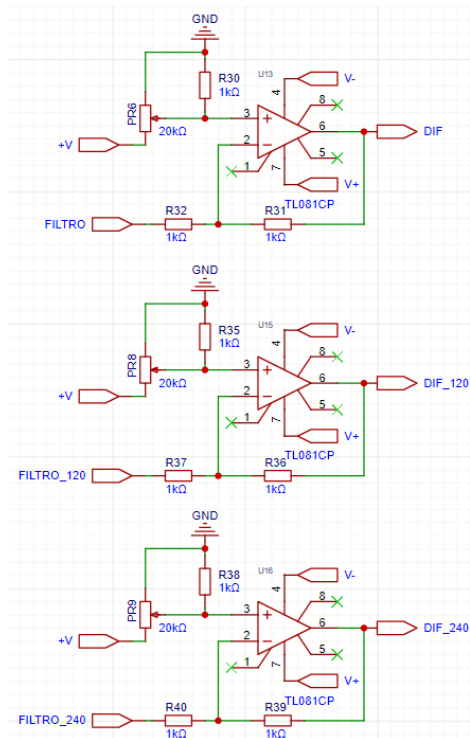


## 8.6. Análisis de los resultados simulados

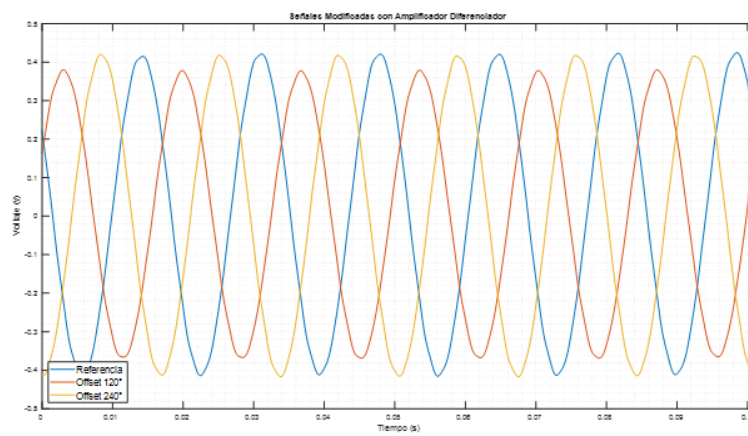
La Figura 28 muestra las ondas resultantes de varias etapas del circuito, la referencia generada por el osciloscopio, la señal filtrada por el filtro pasa bajos y la señal amplificada. Se puede observar que la señal final de los amplificadores está invertida, comparandola con las del filtro, esto es causado por el amplificador diferenciador, que esta en configuracion inversora para centrar las señales. También se puede observar que las señales estan desfasadas cierta cantidad de grados, comparado a la señal generada por el osciloscopio, esto es causado por los capacitores de los filtros.

Figura 26. Circuito amplificador diferenciador

(a) Esquemático del circuito

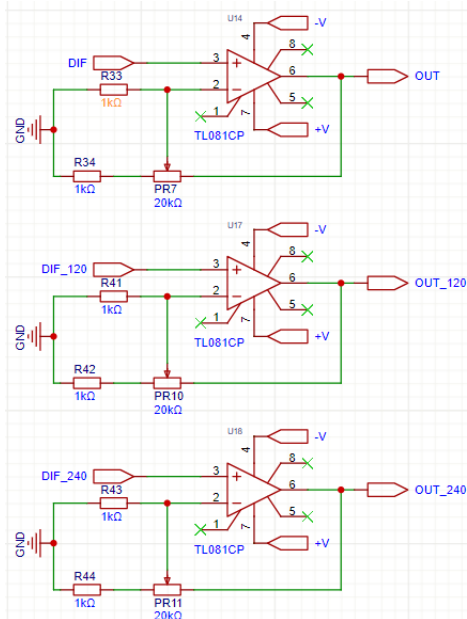


(b) Señal del diferenciador

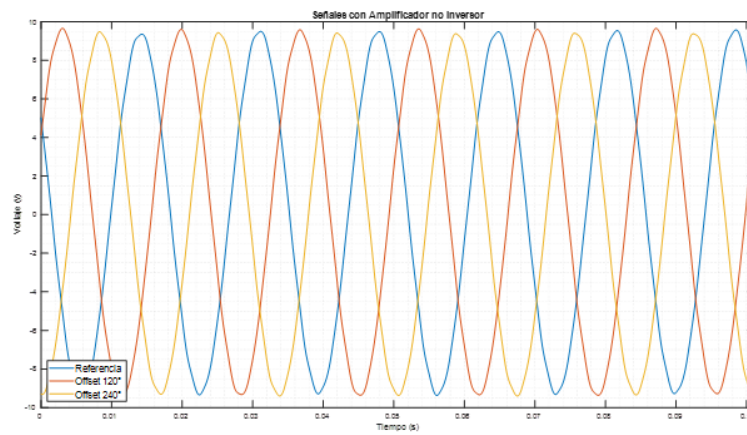


**Figura 27.** Circuito amplificador no inversor

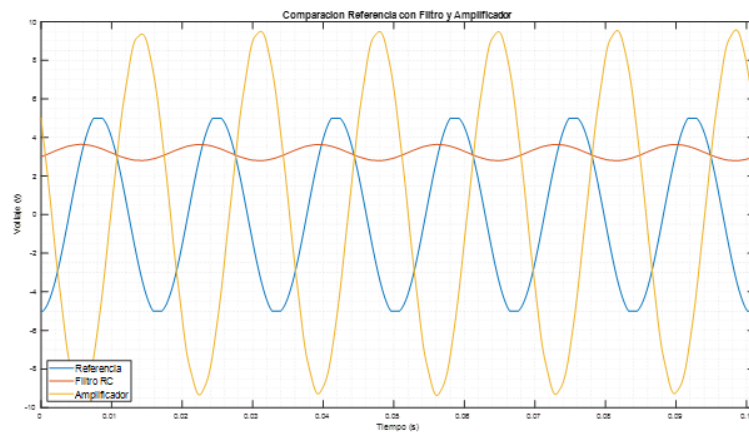
(a) Esquemático del circuito diferenciador



(b) Esquemático del circuito amplificador



**Figura 28.** Comparacion señales del oscilador, filtro y amplificador



## 9.1. Pruebas con el generador de fuentes

Las primeras pruebas físicas del circuito fueron realizadas usando un generador de fuentes, para generar una señal sinusoidal de 60Hz, amplitud 10V, y una señal triangular de 600Hz, amplitud 14V, como una prueba de control teórico, sin las fases de diferenciación y amplificación. Esta prueba sirvió como una referencia, al probar el circuito con los osciladores. Los valores de las resistencias y capacitores son los mismos utilizados y calculados en la sección 8, se utilizó el osciloscopio para muestrear las señales en archivos CSV y se utilizó MATLAB para adquirir y modificar las gráficas.

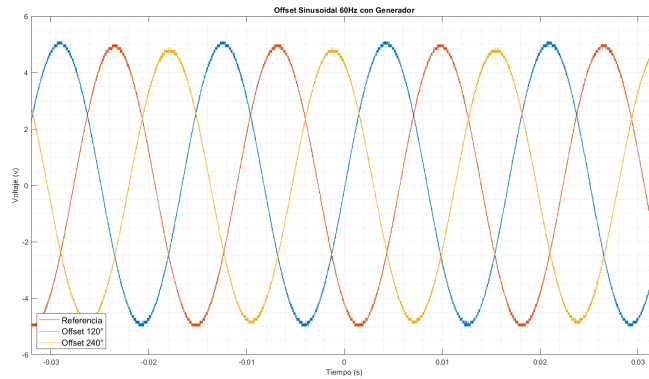
### 9.1.1. Desfases de la señal sinusoidal

La Figura 29 muestra la señal referencia del generador de fuentes y sus desfases. Comparando la gráfica con la simulada en Figura 21b, se puede observar que ambos resultados son muy similares.

### 9.1.2. Señales SPWM

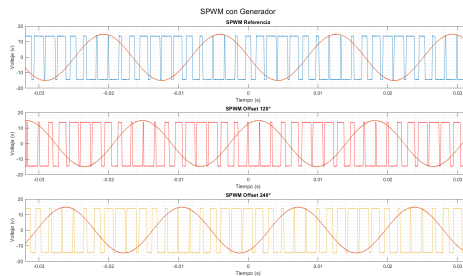
La Figura 30a y 30b muestran las señales SPWM y las mismas invertidas, junto con las señales sinusoidales de referencia, que fueron modificadas para corresponder con el PWM en voltaje y orientación. Comparando ambas gráficas, respectivamente con las señales 22 y 23, son bastante similares, aunque se puede observar cierta pérdida de voltaje, causado por la gran cantidad de componentes utilizados.

**Figura 29.** Gráfica de las señales sinusoidales de las pruebas físicas

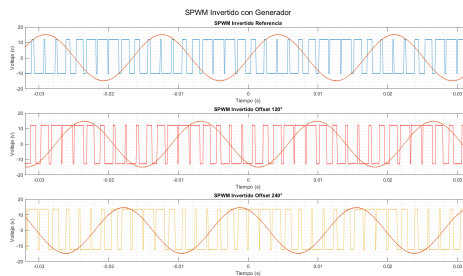


**Figura 30.** Señal PWM sinusoidal simulado en LTspice

(a) Gráfica del PWM sinusoidal de las pruebas Físicas



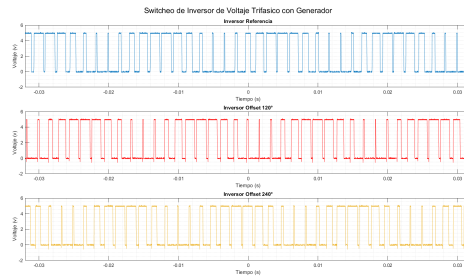
(b) Gráfica del PWM sinusoidal invertido de las pruebas Físicas



### 9.1.3. Inversor de voltaje trifásico físico

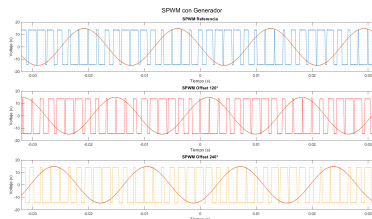
En la Figura 31, se observa las señales del Inversor de voltaje trifásico. Comparando las señales con las gráficas simuladas de Figura 24b, se puede observar que son bastante similares, aunque se puede observar bastante ruido en el real.

**Figura 31.** Gráfica de las Señales del Inversor de trifásico físico

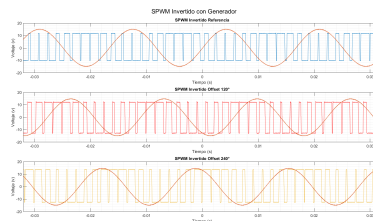


**Figura 32.** Señal PWM sinusoidal simulado en LTspice

(a) Gráfica del filtro RC físico



(b) Gráfica del filtro RC comparada con las señales de referencia



#### 9.1.4. Señal filtrada por Filtro RC

La Gráfica 32a muestra las señales filtradas del inversor, y en la Gráfica 32b son comparadas con sus respectivas señales sinusoidales de referencia. Se puede observar el desfase en el voltaje visto en la simulación (Figura 25b), también se puede observar que las gráficas fueron desfasadas en el tiempo, esto es causado por los capacitores, que desfasan la señal a  $90^\circ$ .

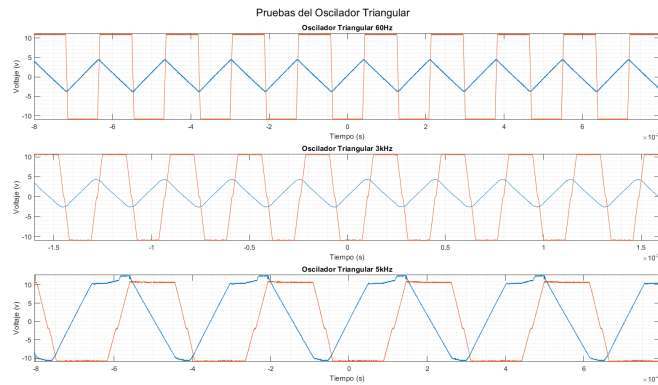
## 9.2. Pruebas con los osciladores

### 9.2.1. Circuito oscilante triangular

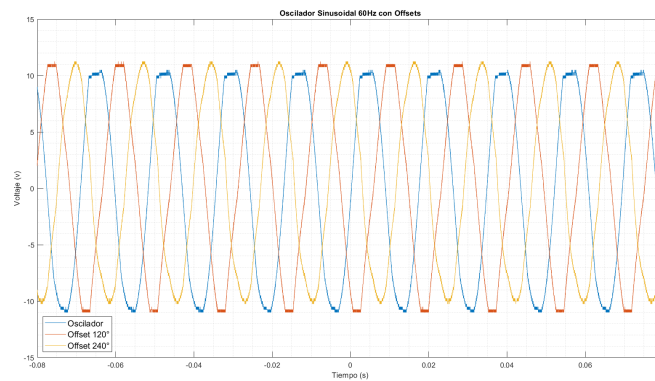
Se realizaron algunas pruebas con el circuito oscilante triangular, para experimentar con las capacidades del amplificador operacional TL081CP, diseñando el circuito para que entregue una señal triangular de 600Hz, 3kHz y 5kHz.

La Figura 33 muestra las pruebas realizadas con el oscilador triangular. Se puede observar que las señales de 600Hz y 3kHz logran crear la señal triangular y cuadrada, pero a 5kHz la señal se distorsiona y pierde su forma.

**Figura 33.** Gráfica del oscilador triangular



**Figura 34.** Gráfica del oscilador triangular



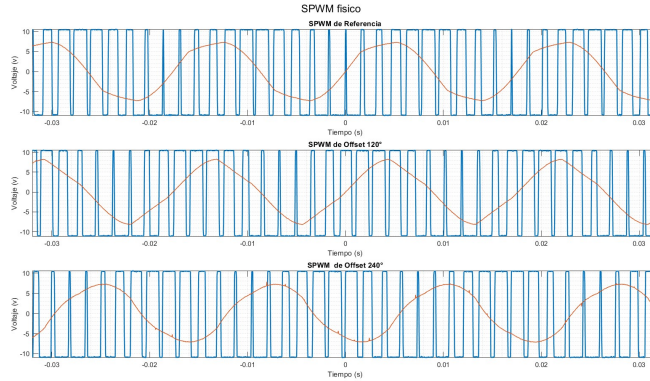
### 9.2.2. Circuito oscilante sinusoidal y desfases

La Figura 34 muestra la señal sinusoidal creada por el oscilador Weig Bridge, junto con sus desfases. Se puede observar que las señales del oscilador y la desfasada de  $120^\circ$  se saturan, por la alimentación de los amplificadores.

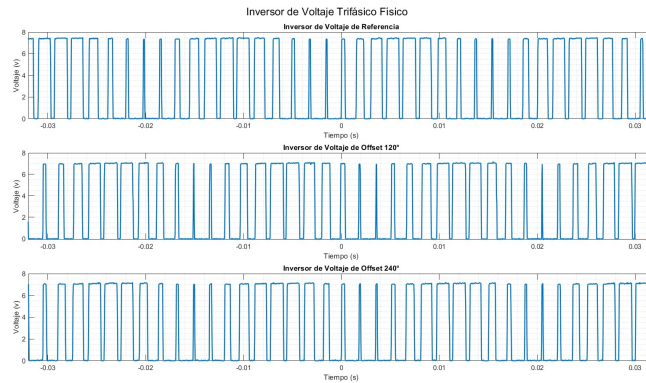
### 9.2.3. PWM Sinusoidal físico

La señal triangular de 600Hz de la Figura 33 y la sinusoidal de la Figura 34 fueron comparadas para crear la señal PWM sinusoidal mostrada en la Figura 35. Se puede observar que la gráfica es bastante similar a otras como 30a, aunque se puede observar algo de ruido en la señal.

**Figura 35.** Gráfica del PWM sinusoidal usando osciladores



**Figura 36.** Gráfica del PWM sinusoidal usando osciladores



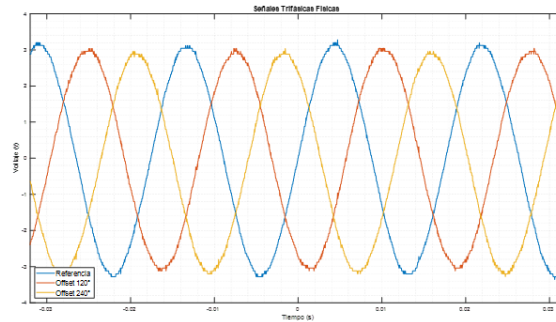
#### 9.2.4. Inversor de voltaje trifásico físico

La Figura 36 muestra la señal obtenida del inversor trifásico en físico. Comparando con la señal mostrada en la Figura 31, podemos observar que las señales son bastante similares.

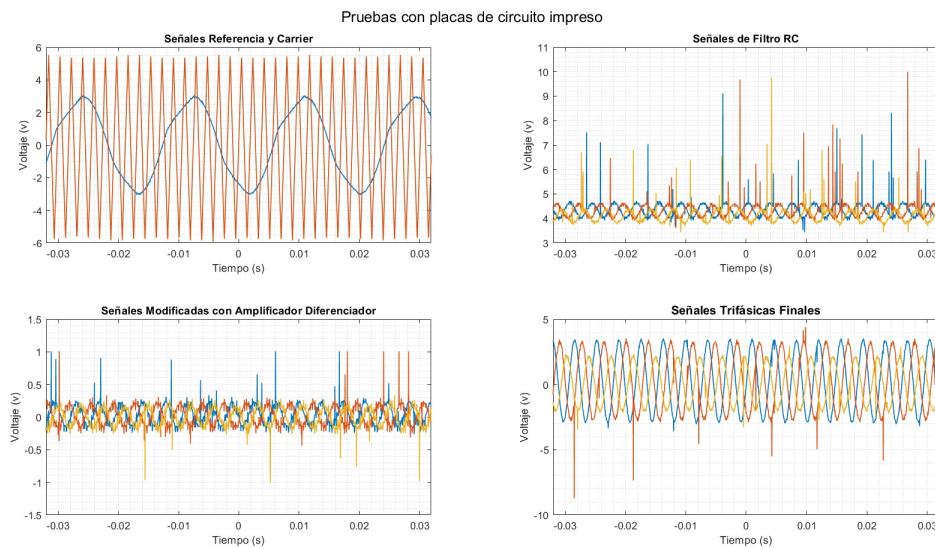
#### 9.2.5. Señales trifásicas finales

La Figura 37 muestra las señales trifásicas finales, usando los diferenciadores para corregir el desfase de la señal y los amplificadores no inversores, para aumentar su voltaje  $V_{pk}$ . Demostrando que se logró crear un generador de señales trifásicas.

**Figura 37.** Señales trifásicas finales



**Figura 38.** Pruebas con la plataforma en PCB



### 9.3. Pruebas con placas de circuito impreso

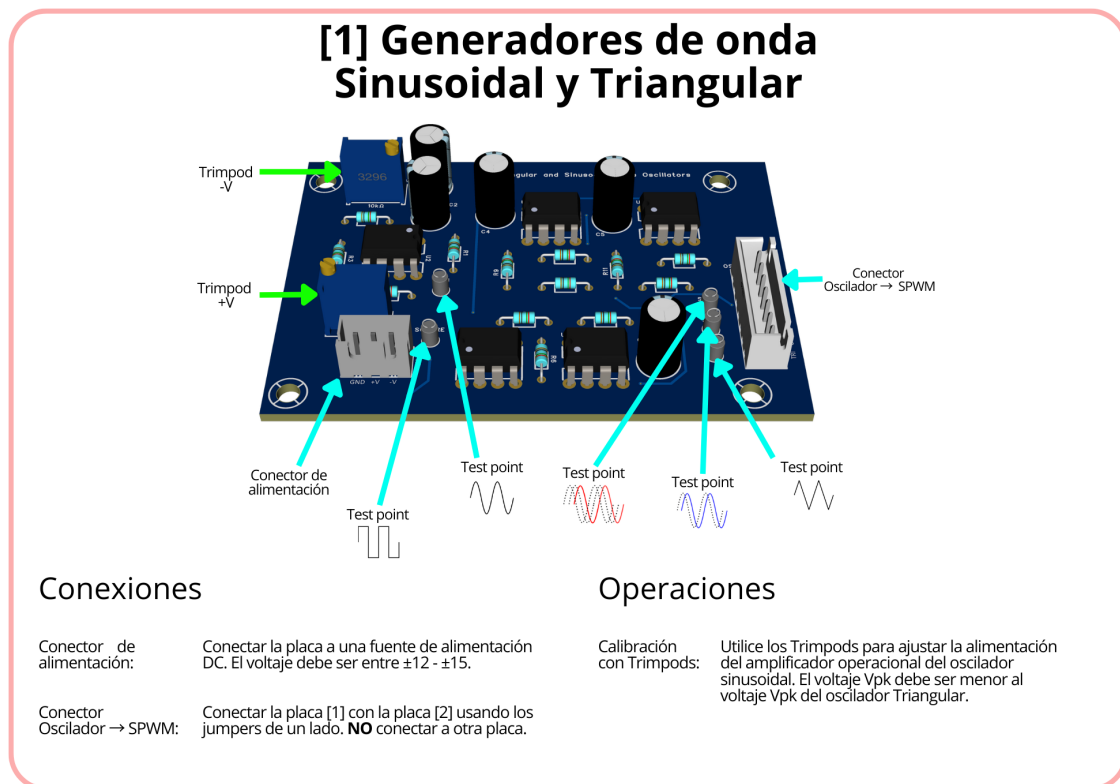
A diferencia de las pruebas anteriores, que fueron realizadas en un protoboard, se encontraron algunos problemas al experimentar con los circuitos impresos. La Figura 38 muestra las señales resultantes de la placa, se puede observar que se presenta mucho ruido en las ondas, esto empieza en los filtros RC y en los amplificadores no inversores parece atenuarse, pero aún está presente. Adicionalmente, el amplificador para la señal sinusoidal de  $240^\circ$  presentó un comportamiento extraño, al intentar amplificar la señal, actuó como un segundo diferenciador, a pesar de ser exactamente igual que los otros amplificadores, que no presentaron problemas y funcionaron correctamente. Un problema adicional que se describió fue en los amplificadores operacionales, específicamente aquellos que realizan las señales SPWM invertidas, estos se calentaban un poco, pero no suficiente para dañar el componente.

El ruido puede ser causado por la placa en sí, que fue fabricada localmente con una

maquina CNC pequeña, queriendo decir que el cobre está expuesto a la intemperie y se oxida poco a poco, afectando las conexiones entre componentes y el rendimiento de las señales. La temperatura alta de los amplificadores operacionales es probablemente causada por demasiada corriente entrando al componente. Finalmente, el comportamiento extraño del amplificador puede ser causado por alguna falla de soldadura. A pesar de estos resultados con los PCBs, por las pruebas realizadas en la sección 9.2.2, sabemos que el circuito completo si es capaz de generar las tres señales trifásicas y estos aspectos pueden mejorarse.

## 9.4. Diseño del manual de usuario

Figura 39. Pruebas con la plataforma en PCB



La Figura 39 muestra una de las páginas del manual de usuario para la plataforma educativa. La principal idea de su desarrollo es que fuera concisa y fácil de entender, señalando puntos de observación y prueba, conexiones entre los módulos y como calibrar ciertas partes de la plataforma. El manual completo se encuentra en los anexos 13.2.

Durante el desarrollo e implementación de la plataforma educativa, se puede concluir que se logró implementar una plataforma educativa de generación de señales trifásicas con SPWM y un inversor. También se pudo diseñar, simular y verificar el funcionamiento de cada fase del circuito, demostrando que la plataforma es parcialmente autónoma, permitiendo generar, modular, filtrar y acondicionar tres señales sinusoidales, desfasadas entre  $120^\circ$ . Terminando con el diseño y manufactura de placas de circuito impreso y la elaboración de un manual de usuario.

Las pruebas físicas realizadas, tanto en protoboard y en PCBs, validaron el funcionamiento de cada módulo de la plataforma. Durante las primeras evaluaciones, se demostró un desempeño estable y con baja interferencia entre cada etapa, verificando el proceso completo de generación de las señales. Gracias a esto, se continuó con el diseño y manufactura de prototipos en PCB, mediante una máquina CNC que la Universidad del Valle de Guatemala provee para sus alumnos, permitiendo compactar e integrar fácilmente los módulos. Sin embargo, se observó bastante presencia de ruido en las señales evaluadas con las placas, posiblemente causado por los limitados métodos de fabricación, dejando el cobre sin protección contra el medio ambiente, causando que se oxide y afecte el rendimiento de las señales, comparadas con las primeras evaluaciones. También este comportamiento inesperado pudo ser el resultado de algún componente defectuoso en el equipo, al observar que algunos amplificadores operacionales se calentaban levemente.

El proyecto ayuda en abordar la problemática principal, la necesidad de demasiados equipos especializados para el estudio de señales trifásicas en los laboratorios. La plataforma es parcialmente autónoma, queriendo decir que es capaz de generar las señales trifásicas sin la necesidad de un generador externo. Esto permite liberar el equipo de laboratorio y expandir significativamente las posibles actividades y formas de enseñanza. A pesar de esto, la presente versión de la plataforma carece de su propio módulo de fuente de poder, por lo que aún necesita un equipo de potencia externa,

pero que se puede agregar en el futuro.

Según los resultados obtenidos durante el desarrollo de este proyecto, se plantean las siguientes recomendaciones, que pueden ayudar a ampliar y fortalecer el alcance de la plataforma y su rendimiento:

- Integración de una etapa de generación de potencia.

El alcance de este proyecto fue limitado a la generación de las señales trifásicas bajo voltaje, se recomienda en futuros trabajos, implementar un módulo de conversión y alimentación, permitiendo a la plataforma ser completamente autónoma.

- Optimizar el diseño del PCB.

El prototipo mostrado en este trabajo utiliza únicamente componentes THT, tomando bastante espacio en la placa. Si se tiene pensado en futuros proyectos, realizar un generador de señales trifásicas con varias frecuencias, se recomienda cambiar los componentes por unos SMD, para reducir el tamaño de los PCBs. También incluir técnicas orientadas a minimizar el ruido eléctrico mostrado en las señales y mecanismos de protección eléctrica.

- Pruebas con grupos de estudiantes.

Se recomienda realizar pruebas con los estudiantes y docentes para obtener retroalimentación en el funcionamiento de la plataforma y facilidad de uso, para mejorar la experiencia del usuario en los laboratorios y en que aspectos se debe mejorar la plataforma.

- 
- [1] P. Enjeti, A. Rahman y R. Jakkli, «Economic single-phase to three-phase converter topologies for fixed and variable frequency output,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 8, n.º 3, págs. 329-335, 1993. DOI: 10.1109/63.233290.
  - [2] S. Majumdar. «3-Phase Signal Generator Circuit using Opamp.» (2024), dirección: <https://homemade-circuits.com/three-phase-signal-generator-circuit/> (visitado 29-03-2024).
  - [3] Utsav. «SPWM Generator Module (without Using Microcontroller).» (2024), dirección: <https://www.instructables.com/SPWM-Generator-Module-without-Using-Microcontrolle/> (visitado 21-04-2024).
  - [4] D. de Electrónica y Mecatrónica, «Fuente de Poder,» *Universidad del Valle de Guatemala*, 2024.
  - [5] N. I. Raju, M. S. Islam y A. Uddin, «Sinusoidal pwm signal generation technique for three phase voltage source inverter with analog circuit and simulation of pwm inverter for standalone load and micro grid system,» *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 3, págs. 647-658, ene. de 2013.
  - [6] S.-H. Kim, «Chapter 7 - Pulse width modulation inverters,» en *Electric Motor Control*, S.-H. Kim, ed., Elsevier, 2017, págs. 265-340, ISBN: 978-0-12-812138-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812138-2.00007-6>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128121382000076>.
  - [7] R. Mancini y R. Palmer, «Chapter 19 - Sine Wave Oscillators,» en *Op Amps for Everyone (Third Edition)*, R. Mancini y B. Carter, eds., Third Edition, Boston: Newnes, 2009, págs. 341-363, ISBN: 978-1-85617-505-0. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-505-0.00019-3>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781856175050000193>.
  - [8] R. F. Coughlin y F. F. Driscoll, *Operational amplifiers and linear integrated circuits, 6th ed.* USA: Prentice-Hall, Inc., 2001, ISBN: 978-0-13-014991-6.

- [9] N. Vázquez y J. Vaquero, «Chapter 10 - Inverters,» en *Power Electronics Handbook (Fifth Edition)*, M. H. Rashid, ed., Fifth Edition, Butterworth-Heinemann, 2024, págs. 293-343, ISBN: 978-0-323-99216-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99216-9.00001-9>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323992169000019>.
- [10] T. Kugelstadt, «Chapter 20 - Active Filter Design Techniques,» en *Op Amps for Everyone (Third Edition)*, R. Mancini y B. Carter, eds., Third Edition, Boston: Newnes, 2009, págs. 365-438, ISBN: 978-1-85617-505-0. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-505-0.00020-X>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978185617505000020X>.
- [11] A. Agarwal y J. Lang, *Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits (The Morgan Kaufmann Series in Computer Architecture and Design)*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2005, ISBN: 1558607358.

En estos anexos se incluye fotos adicionales de lo realizado durante el desarrollo del este proyecto de graduación. La primera parte muestra fotos de los circuitos utilizados para verificar el funcionamiento de la plataforma y los PCBs manufacturados localmente. La parte final muestra la primera versión del manual de usuario del prototipo PCBs.

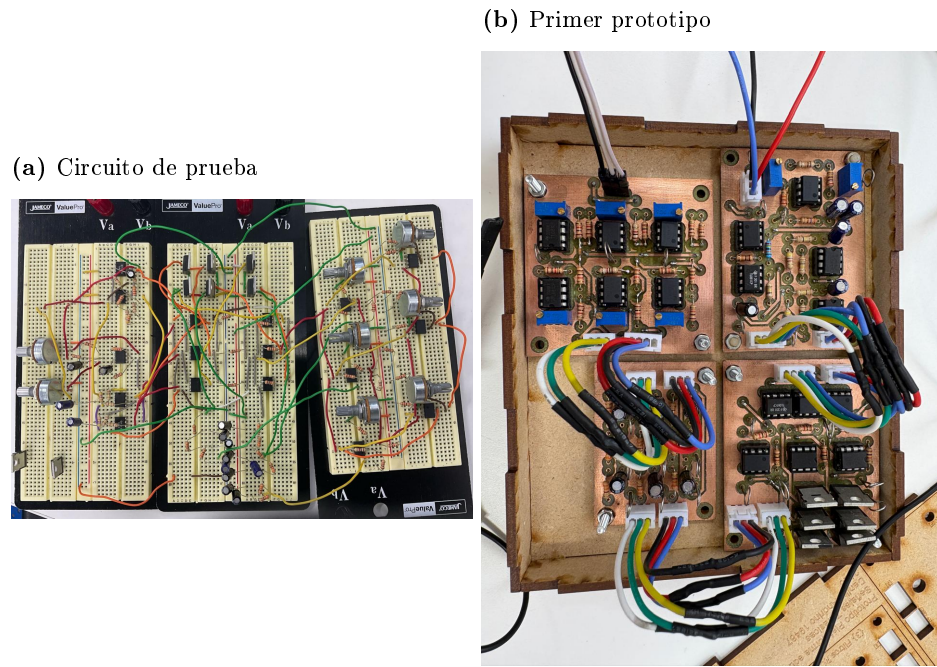
### 13.1. Circuitos y PCBs local

La Figura 40 muestra el circuito utilizado para verificar el funcionamiento del sistema, que siempre fue un prototipo temporal al ser muy frágil, fácilmente un componente o cable se puede desconectar y perderse. Al obtener el resultado esperado de este circuito, se enfocó en el diseño y manufactura de los PCBs, usando una maquina CNC proveída por la universidad. Este prototipo se utilizó para observar por cualquier error presente en el diseño de la placa, al igual de probar que tan cómodo es de utilizar. Durante las pruebas con las placas, se encontró un error en la conexión y esquemáticos de los MOSFETS en el inversor trifásico. Adicionalmente, las conexiones entre las placas resultó ser un poco molesto y también se necesitó chequear constantemente que no se entrecruzasen los conectores de poder, con los conectores de señales, para futuras versiones se decidió juntar ambos en un solo conector.

### 13.2. Manual de usuario

A continuación, se presenta el manual de usuario para la plataforma educativa, la placa que se muestra es una actualizada y ya enviada a fabricarse en los Estados Unidos. Este se enfoca sobre todo en las conexiones entre cada placa, identificar los Test

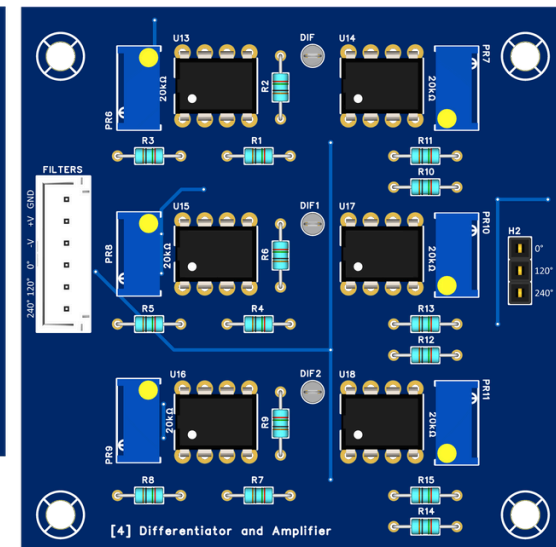
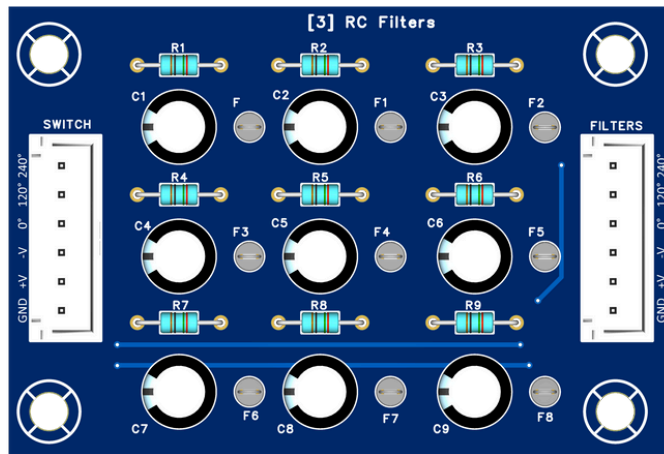
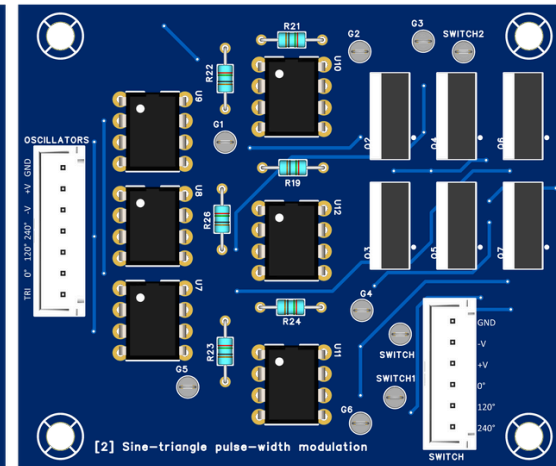
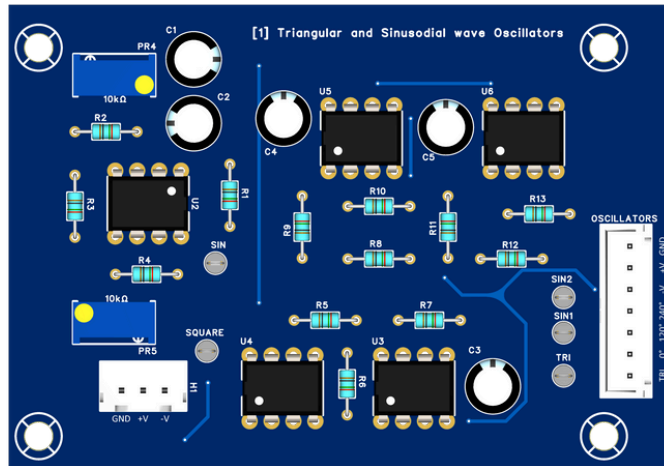
**Figura 40.** Plataforma educativa primeras pruebas



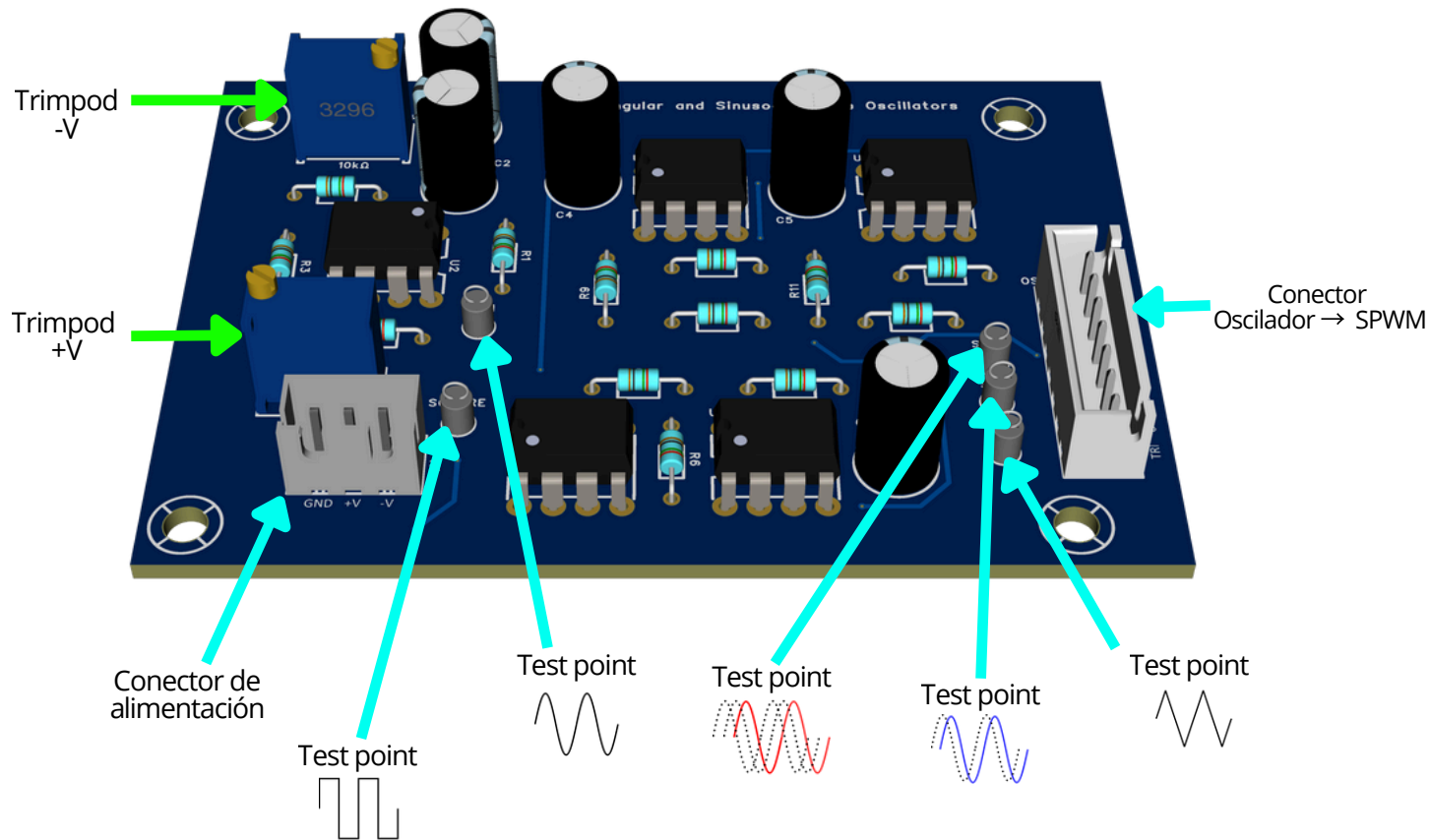
points y como calibrar y manejar los osciladores, los diferenciadores y amplificadores.

# Plataforma educativa Señales Trifásicas

Manual de usuario Rev. 1



# [1] Generadores de onda Sinusoidal y Triangular



## Conexiones

Conector de alimentación:

Conectar la placa a una fuente de alimentación DC. El voltaje debe ser entre  $\pm 12 - \pm 15$ .

Conector Oscilador  $\rightarrow$  SPWM:

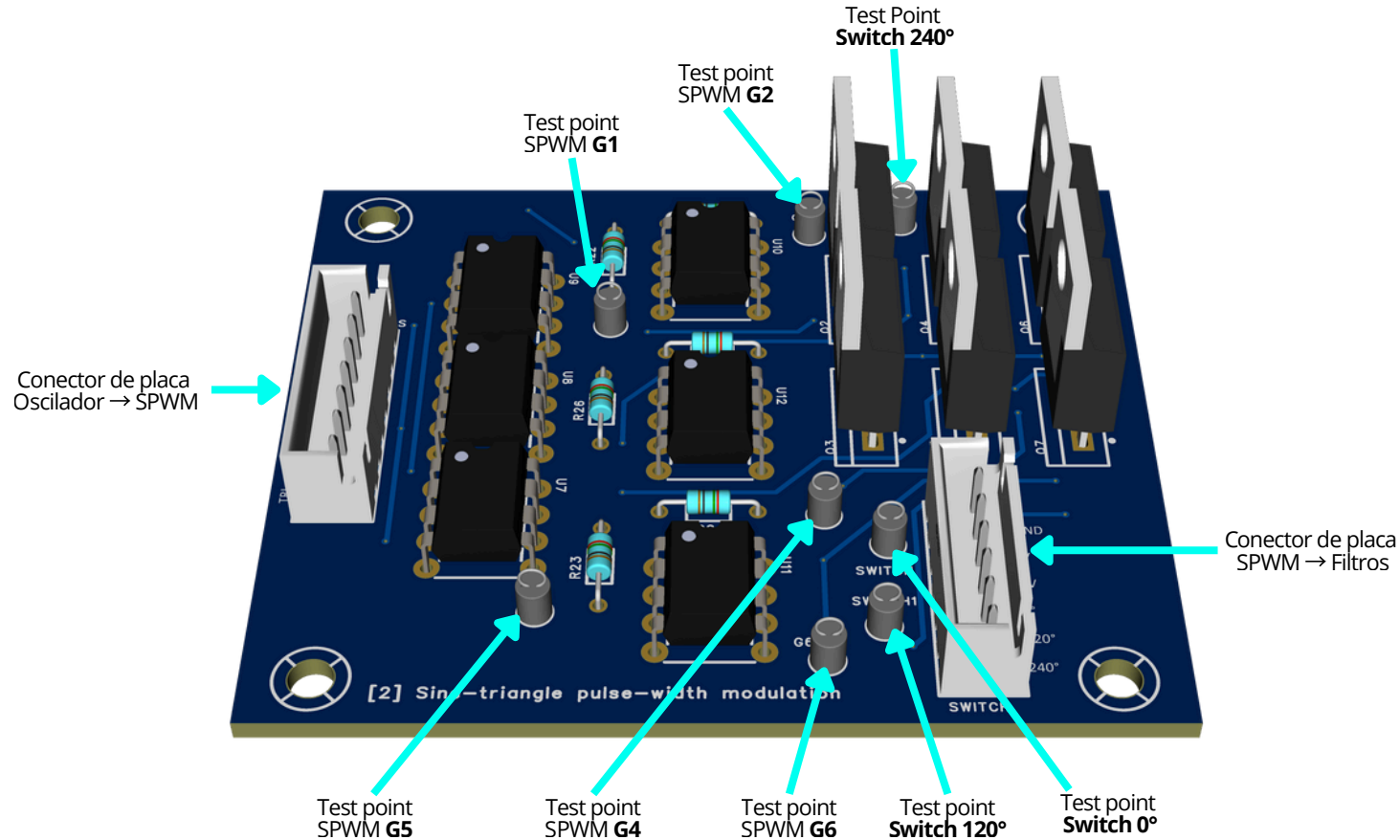
Conectar la placa [1] con la placa [2] usando los jumpers de un lado. **NO** conectar a otra placa.

## Operaciones

Calibración con Trimpods:

Utilice los Trimpods para ajustar la alimentación del amplificador operacional del oscilador sinusoidal. El voltaje  $V_{pk}$  debe ser menor al voltaje  $V_{pk}$  del oscilador Triangular.

# [2] SPWM e Inversor trifásico



## Conexiones

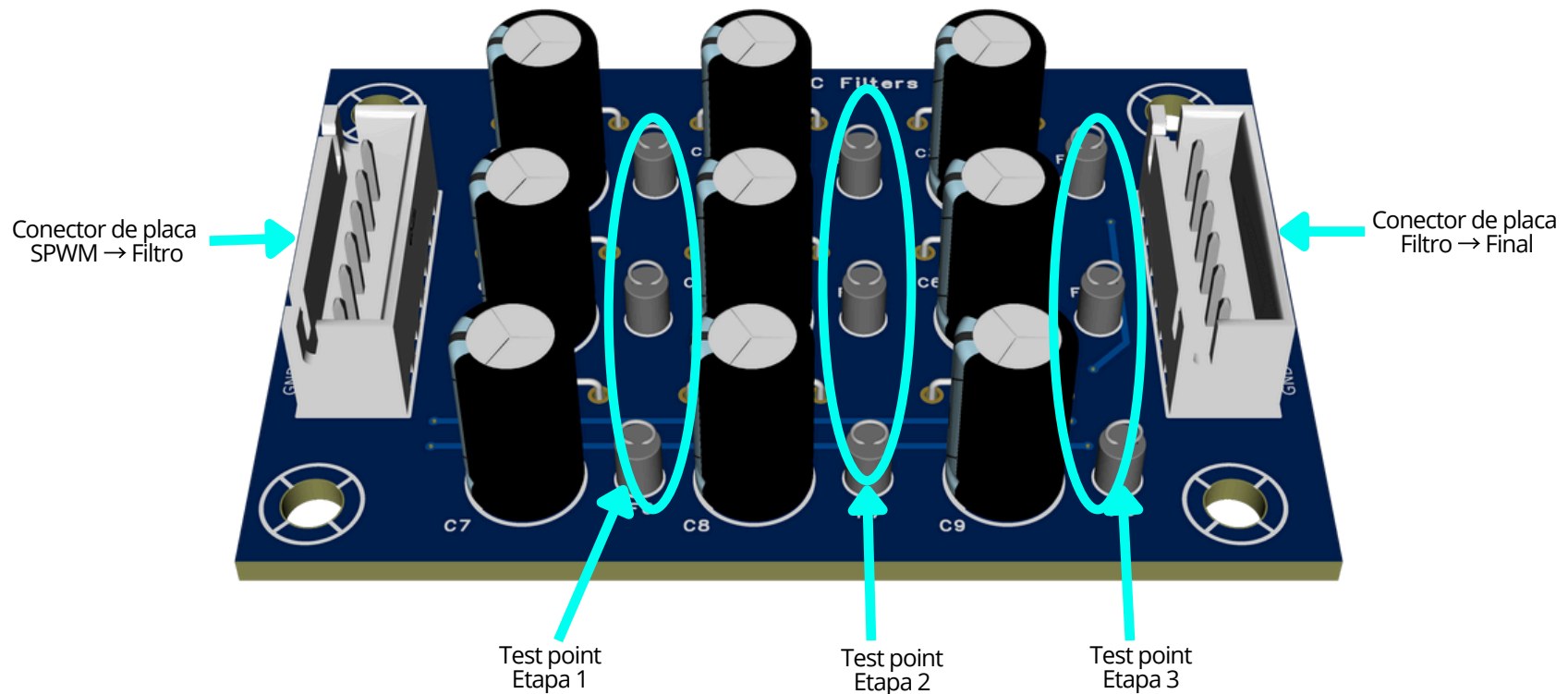
Conector Oscilador → SPWM: Conectar la placa [1] con la placa [2] usando los jumpers de un lado. **NO** conectar a otra placa.

Conector SPWM → Filtros: Conectar la placa [2] con la placa [3] usando los jumpers de un lado. **NO** conectar a otra placa.

## Operaciones

SPWM Test Points: Los test points G1, G3, G5 son la señal SPWM. Los test points G2, G4, G6 son el SPWM invertido de las señales impares respectivamente.

# [3] Filtros RC



## Conexiones

Conector  
SPWM → Filtros:

Conectar la placa [2] con la placa [3] usando los jumpers de un lado. **NO** conectar a otra placa.

Conector  
Filtros → Final:

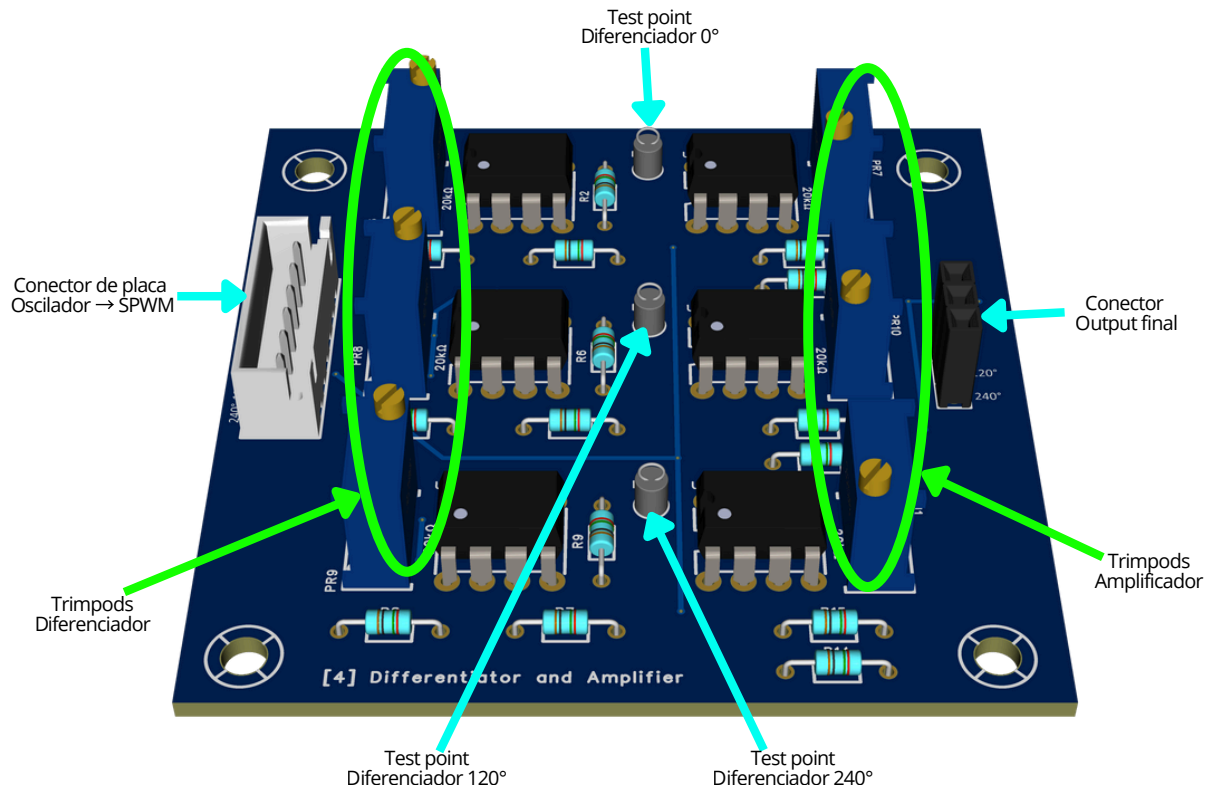
Conectar la placa [3] con la placa [4] usando los jumpers de un lado. **NO** conectar a otra placa.

## Operaciones

SPWM  
Test Points:

Los test points G1, G3, G5 son la señal SPWM. Los test points G2, G4, G6 son el SPWM invertido de las señales impares respectivamente.

# [4] Diferenciador y Amplificador



## Conexiones

Conector Filtros → Final:

Conectar la placa [3] con la placa [4] usando los jumpers de un lado. **NO** conectar a otra placa.

Conector Output Final:

Pines con las señales trifásicas finales.

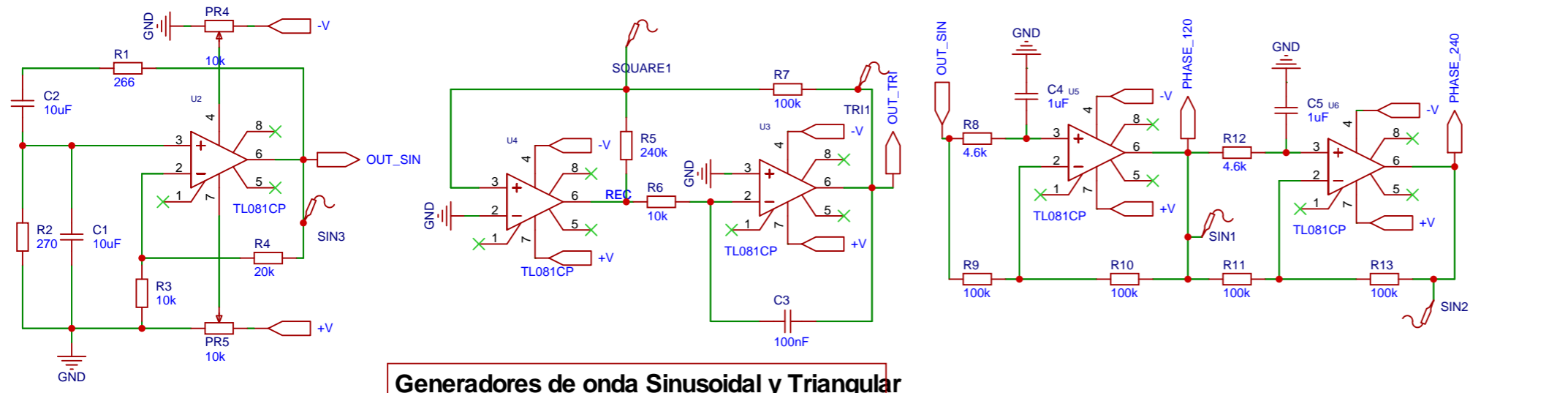
## Operaciones

Trimpods Diferenciador:

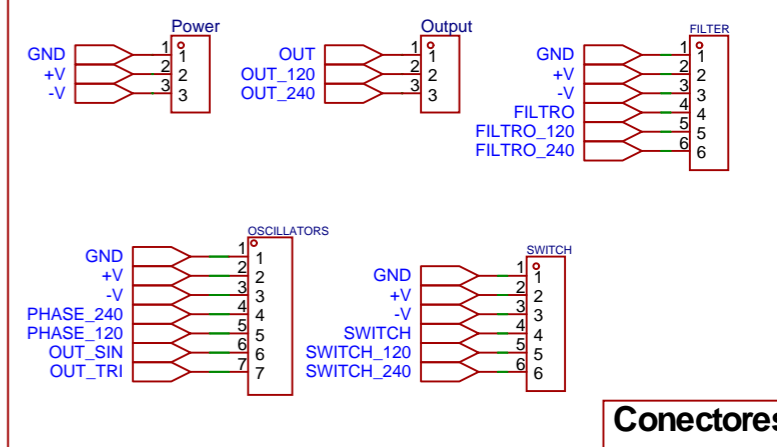
Utilice los trimpods para centrar la señal, que se puede observar en los test points del diferenciador.

Trimpods Amplificador:

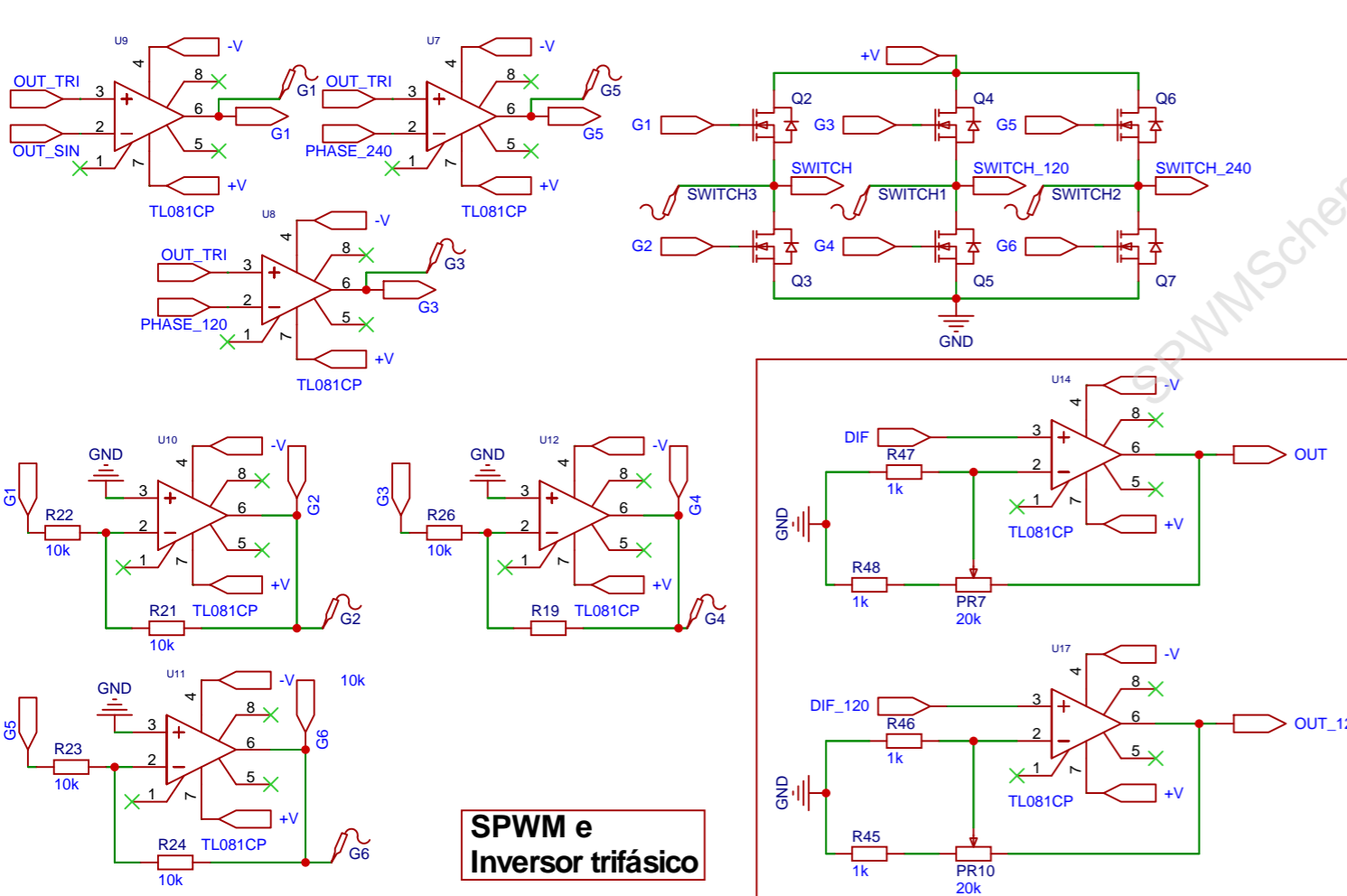
Utilice los trimpods para amplificar las señales trifásicas sinusoidales finales.



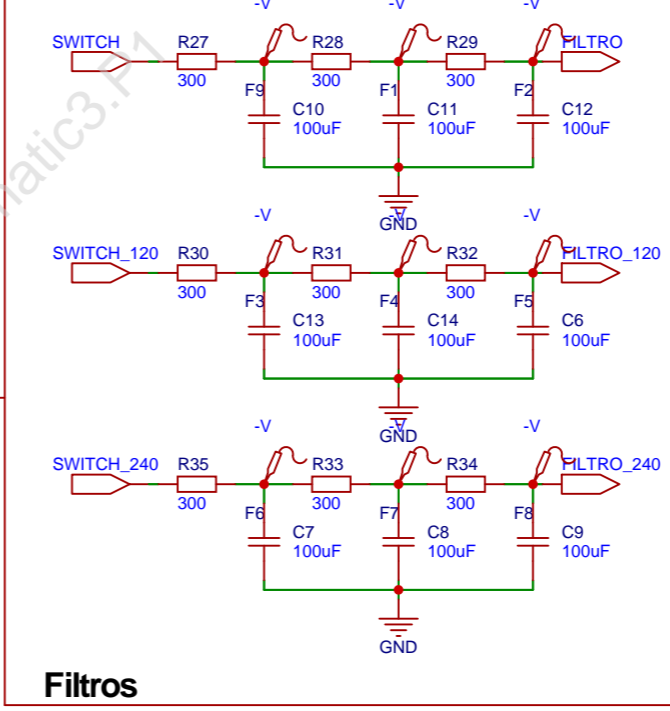
**Generadores de onda Sinusoidal y Triangular**



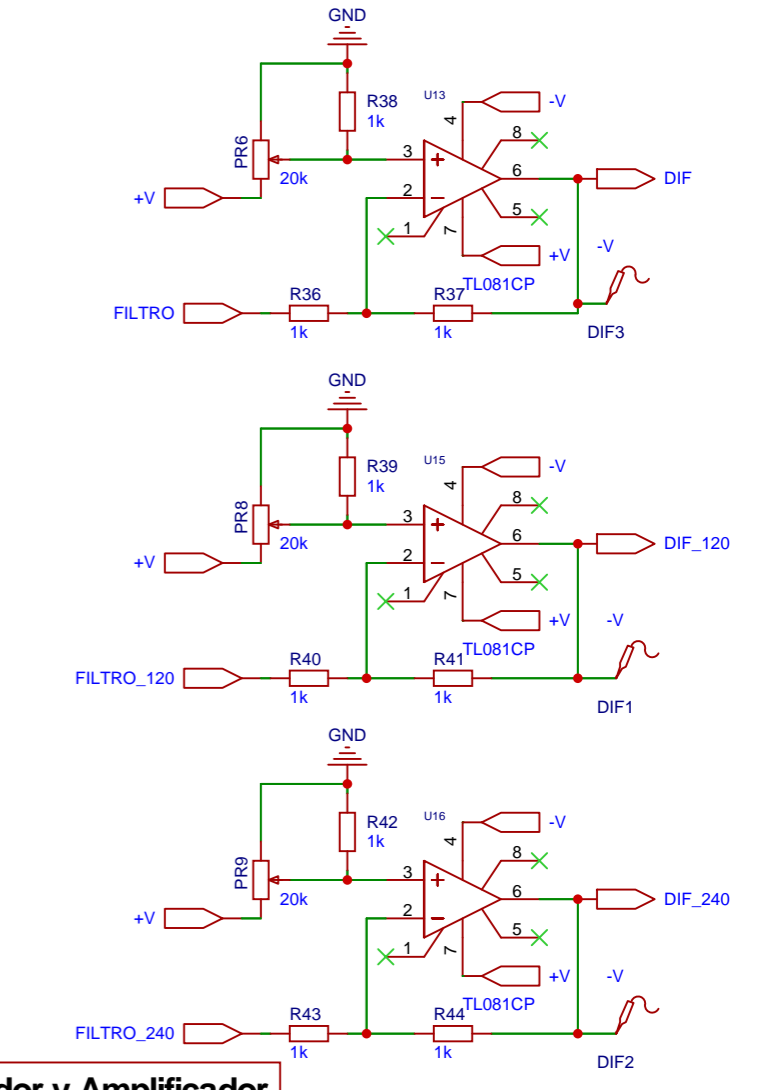
**Conectores**



**SPWM e Inversor trifásico**



**Filtros**



**Diferenciador y Amplificador**