

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **OPERACIÓN DEL SISTEMA DE POTENCIA A ESCALA DEL LABORATORIO FÍSICO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

#### **OPERACIÓN EN PARALELO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO CON LA RED ELÉCTRICA DE LA EEQ**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
EN ELECTRICIDAD**

**ADRIÁN MATEO TORRES ORTIZ**

**adrian.torres@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: Prof. JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA, Ph.D.**

**jesus.jativa@epn.edu.ec**

**DMQ, octubre 2022**

## CERTIFICACIONES

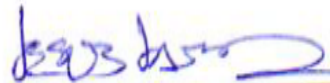
Yo, ADRIÁN MATEO TORRES ORTIZ declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



---

**Adrián Mateo Torres Ortiz**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Adrián Mateo Torres Ortiz, bajo mi supervisión.



---

**Prof. Jesús Amado Játiva Ibarra, Ph.D.**

**DIRECTOR**

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

---

**NOMBRE DEL REVISOR**  
**REVISOR 1 DEL TRABAJO DE**  
**UNTEGRAACIÓN CURRICULAR**

---

**NOMBRE DEL REVISOR**  
**REVISOR 2 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**



## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Yo, Adrián Mateo Torres Ortiz, a través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

**ADRIÁN MATEO TORRES ORTIZ**

**Prof. JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA, Ph.D.**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo lo dedico a mis padres y a todas las personas que me han estado apoyando, guiándome y dándome su consejo en todos estos años que han sido mi paso por la universidad.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres que a pesar de que me he demorado un poco han sido muy pacientes y nunca me han presionado hasta agotarme, que han confiado en mí y gracias a ellos he culminado esta etapa.

A todas las personas con las que me he cruzado en estos años, que de alguna manera me han enseñado que la vida no solo es estudiar, si no también saber distribuir el tiempo en otras actividades que me fortalezcan como persona.

Gracias a todos por estar conmigo durante todo este proceso.

## TABLA DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	III
DEDICATORIA .....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
TABLA DE CONTENIDO .....	VI
RESUMEN .....	IX
ABSTRACT .....	X
1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Objetivo general .....	1
1.2 Objetivos específicos .....	1
1.3 Alcance .....	2
1.4 Marco teórico .....	3
1.4.1 Resumen de los Principios de Funcionamiento de los Módulos de Generación Eléctrica .....	3
1.4.1.1 Instalaciones desde la Red Eléctrica de la EEQ al Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia .....	3
1.4.1.2 Grupo Motor-Generador .....	5
1.4.1.2.1 Máquina de inducción de rotor bobinado .....	5
1.4.1.2.2 Motor de corriente continua .....	5
1.4.1.3 Emulador Eólico .....	6
1.4.1.4 Generador Fotovoltaico .....	8
2 METODOLOGÍA .....	12
2.1 Descripción del Generador Fotovoltaico .....	13
2.1.1 Arreglo de los paneles fotovoltaicos. ....	13
2.1.2 Inversor trifásico de potencia .....	14
2.1.2.1 Etapa de control .....	14
2.1.2.2 Etapa de aislamiento .....	15
2.1.2.3 Controlador de compuerta o Gate Driver .....	15
2.1.2.4 Etapa de Potencia .....	16
2.1.2.5 Capacitor de la barra DC. ....	16
2.1.2.6 Protecciones del inversor. ....	16
2.1.2.6.1 Protección de sobrevoltajes .....	16
2.1.2.6.2 Protección de sobrecorriente para los IGBTs .....	17

2.1.2.6.3	Protección de sobrecorriente en la carga .....	17
2.1.2.6.4	Disipador de potencia de los IGBTs .....	18
2.1.3	Sensores .....	19
2.1.3.1	Sensor de corriente DC.....	19
2.1.3.2	Sensor de corriente AC.....	19
2.1.3.3	Sensor de voltaje DC .....	20
2.1.3.4	Sensor de voltaje AC .....	20
2.1.4	Filtro trifásico .....	21
2.1.5	transformador trifásico de aislamiento .....	22
2.2	Descripción de la tarjeta LaunchPad Delfino TMS320F28377S de Texas Instrument.....	23
2.2.1	Etapas de generación de energía solar .....	23
2.2.2	Sistema de control del inversor trifásico de potencia .....	24
2.2.3	Configuración del adc .....	25
2.2.4	Lazo de control de corriente .....	25
2.2.5	Controladores PI.....	25
2.2.6	Modulación PWM sinusoidal.....	27
2.3	Descripción del programa de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) .....	28
2.4	Descripción del programa para el lazo de enclavamiento de fase (PLL) .....	30
3	PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	34
3.1	Pruebas y Resultados .....	34
3.1.1	Factibilidad de operación en paralelo del generador fotovoltaico con la red eléctrica de la eq. ....	34
3.1.1.1	Límites operativos del generador fotovoltaico .....	34
3.1.1.1.1	Límites de voltaje .....	34
3.1.1.1.2	Límites de corriente.....	35
3.1.1.1.3	Límites de potencia activa .....	36
3.1.1.1.4	Resultados de los límites de operación del generador fotovoltaico.....	36
3.1.1.2	Procedimiento para la operación en paralelo del generador fotovoltaico con la red eléctrica de la EEQ. ....	37
3.1.2	Operación en paralelo del generador fotovoltaico con la red eléctrica de la EEQ. ....	38
3.1.3	Operación de forma aislada del generador fotovoltaico. ....	44
3.1.3.1	Focos ahorradores.....	45



3.1.3.2	Focos LED.....	49
3.1.4	Análisis del contenido armónico del sistema.....	52
3.1.4.1	Operación en paralelo con la red Eléctrica Quito .....	53
3.1.4.1	Operación con cargas aisladas .....	54
3.1.4.1.1	Focos ahorradores .....	54
3.1.4.1.2	Focos LED .....	55
3.2	Conclusiones .....	57
3.3	Recomendaciones .....	58
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
5	ANEXOS .....	60

## RESUMEN

El presente proyecto trata sobre la operación del Generador Fotovoltaico del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia de manera aislada y conectado en paralelo a la red eléctrica de la Empresa Eléctrica Quito. Primero se analizan los cuatro módulos de generación eléctrica, seguido de una descripción detallada del generador fotovoltaico.

En el generador fotovoltaico se estudian los componentes físicos tanto como el software, el primero se enfoca en el inversor de potencia y los elementos que lo componen, como los sensores, protecciones y otros. El software se centra en la tarjeta TMS320F28377S de Texas Instrument. El sistema de control se desarrolla en esta tarjeta y mediante la utilización de las mediciones obtenidas por medio de sensores de voltaje y corriente en alterna y continua.

Para determinar la factibilidad de operación en paralelo del sistema fotovoltaico, se realiza un estudio de los límites de operación del generador fotovoltaico, así como un procedimiento para la correcta operación en paralelo de las dos fuentes de energía.

Para verificar que el sistema se encuentre funcionando de manera adecuada se realizan pruebas de operación en paralelo con la red eléctrica y pruebas operando el generador de forma aislada, alimentando cargas y obteniendo valores de voltajes, corrientes y potencias inyectadas, cuyos resultados se presentan en figuras.

**PALABRAS CLAVE:** Generador fotovoltaico de laboratorio, operación aislada y en paralelo, Lazo de Enclavamiento de Fase PLL, Punto de Máxima Transferencia de Potencia MTTP, Inversor con IGBT, Modulación sinusoidal por ancho de pulso.

## **ABSTRACT**

This project deals with the operation of the Photovoltaic Generator of the Physical Laboratory of Electrical Power Systems in isolation and connected in parallel to the electrical grid of Empresa Eléctrica Quito. First, the four power generation modules are analyzed, followed by a detailed description of the photovoltaic generator.

In the photovoltaic generator, the physical components are studied as well as the software, the former focuses on the power inverter and the elements that compose it, such as sensors, protections and others. The software focuses on the TMS320F28377S card from Texas Instrument. The control system is developed on this board and through the use of measurements obtained by means of voltage and current sensors in alternating and direct current.

To determine the feasibility of parallel operation of the photovoltaic system, a study of the operating limits of the photovoltaic generator is carried out, as well as a procedure for the correct parallel operation of the two energy sources.

In order to verify that the system is working properly, operation tests are performed in parallel with the electrical network and tests are performed operating the generator in isolation, feeding loads and obtaining values of voltages, currents and injected power, the results of which are shown in the figures.

**KEYWORDS:** Laboratory photovoltaic generator, isolated and parallel operation, Phase Locked Loop PLL, Maximum Power Transfer Point MTTP, Inverter with IGBT, Pulse Width Sinusoidal Modulation.

# 1 INTRODUCCIÓN

En este documento se presenta inicialmente un resumen de los principios de funcionamiento de los cuatro módulos de generación eléctrica con los que cuenta el Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia: el autotransformador trifásico de tres devanados, el grupo motor-generador, el emulador de energía eólica y el generador fotovoltaico. Una vez explicados los módulos se realiza una descripción detallada del Generador Fotovoltaico, luego se elabora una descripción de la tarjeta LaunchPad Delfino TMS320F28377S de Texas Instruments, de la etapa de generación de energía solar, control del inversor trifásico de potencia, modulación PWM sinusoidal, etapa de potencia del inversor trifásico de potencia, sensores de voltaje y corriente, etapa de filtrado, etapa de elevación de voltaje, sistema de generación de energía fotovoltaica y protecciones de los componentes del generador fotovoltaico.

Se estudian y se describen los algoritmos y programas de máxima transferencia de potencia y del lazo de enclavamiento de fase del generador fotovoltaico.

Finalmente, se comprueba la factibilidad, se ejecuta y se establecen los límites de operación en paralelo, se realiza un reporte de pruebas de funcionamiento de las dos fuentes de generación con datos de niveles de voltaje, magnitudes de corrientes, niveles de armónicos de corriente y voltaje, valores de potencias activa y reactiva transferidos a la carga eléctrica; pérdidas de potencia activa y reactiva en los equipos eléctricos en operación individual y paralelo.

Además, se elabora un procedimiento para la operación en paralelo de las dos fuentes de generación: generador fotovoltaico y red de la EEQ, que sirve para la implementación de prácticas de laboratorio para estudiantes de la Carrera de Electricidad.

## 1.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del proyecto es definir las condiciones de funcionamiento del generador fotovoltaico existente en el Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia para su operación en paralelo con la red eléctrica de la Empresa Eléctrica Quito y el suministro de energía a las cargas eléctricas a través del sistema de transmisión.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Realizar un estudio de los equipos que se encuentran en el Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia, con énfasis en la funcionalidad, límites operativos y protecciones de los componentes del generador fotovoltaico, así como de sus programas de máxima transferencia de potencia y lazo de enclavamiento de fase.
- Realizar pruebas sobre el generador fotovoltaico: operación aislada, en paralelo con la red de la EEQ y suministrando energía tanto a la red externa como a las cargas eléctricas del Laboratorio para comprobar el correcto funcionamiento y evaluar los resultados de las mediciones.
- Realizar un análisis de los resultados de las pruebas de funcionamiento de la fuente de generación fotovoltaica tomados, con mediciones de voltajes, corrientes, armónicos de corriente y voltaje, potencias activas y reactivas consumidas en los diferentes componentes del laboratorio y aquellos transferidos a la carga eléctrica.

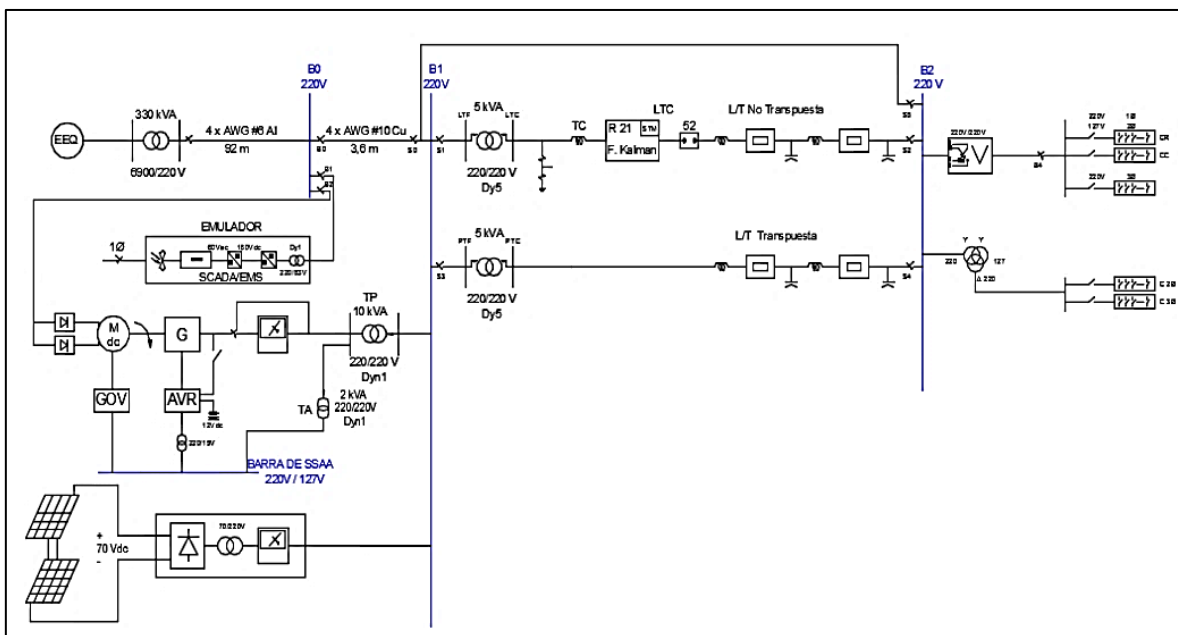
### **1.3 ALCANCE**

El proyecto se centra en el estudio del funcionamiento del generador fotovoltaico, que consta principalmente de paneles solares, un inversor trifásico de potencia el cual contará con un elemento semiconductor que funcionará como interruptor que permitirá extraer la máxima potencia de los paneles fotovoltaicos y una etapa de modulación PWM sinusoidal. Para la etapa de control se utilizará una tarjeta LaunchPad que contiene un microcontrolador TMS320F28377S definido de la familia C2000 de Texas Instrument, la etapa de medición cuenta con sensores de voltaje y corriente, una etapa de filtrado para la eliminación del contenido armónico de la salida del inversor de potencia, una etapa de elevación de voltaje mediante un transformador de acoplamiento a la red y protecciones del generador fotovoltaico.

Una vez analizadas las etapas del sistema fotovoltaico, se realiza un estudio de los parámetros de configuración del microcontrolador, donde se habilitarán registros de interrupciones, PWM, ADC, reloj y sintonización de contadores. Por medio de los programas Code Composer Studio se describirá el algoritmo MPPT para encontrar el punto de máxima transferencia de potencia, así como también el lazo de enclavamiento de fase del generador fotovoltaico, teniendo en cuenta la medición de señales y el algoritmo de la técnica PLL para la sincronización del generador fotovoltaico con la red.

## 1.4 MARCO TEÓRICO

En el Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia se encuentran disponibles cuatro módulos de generación de energía eléctrica: la red eléctrica de la EEQ, el grupo motor-generator, el emulador de energía eólica y el generador fotovoltaico. El laboratorio cuenta además con un sistema de cuatro barras con sus debidas protecciones, líneas de distribución y transmisión a escala, transformadores de potencia y distribución, diferentes cargas que simulan cargas residenciales, comerciales e industriales y un sistema SCADA/EMS para la adquisición de datos el cual es parte del emulador de energías renovables de la marca FESTO. En la Figura 1, se encuentra a manera detallada el diagrama unifilar del Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia.



**Figura 1.** Diagrama Unifilar del Sistema Eléctrico de Potencia del Laboratorio

### 1.4.1 RESUMEN DE LOS PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MÓDULOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

#### 1.4.1.1 Instalaciones desde la Red Eléctrica de la EEQ al Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia

Para tener un acoplamiento del Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia con la Red Eléctrica de la EEQ, el edificio de Química – Eléctrica tiene un cuarto de transformación subterráneo, donde existe un transformador trifásico que se muestra en la Figura 2, cuyo

fabricante es la Industria Andina de Transformadores Cía. Ltda. (INATRA). Se trata de un transformador de los años 80, cuyos datos de placa se encuentran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Característica del Transformador de la EEQ

<b>TRANSFORMADOR TRIFÁSICO INATRA</b>	
Potencia nominal	300 kVA
Voltaje del primario	6000 kV
Voltaje del secundario	210 V
Corriente del primario	26,3 A
Corriente del secundario	8,2 A
Número de fases	3
Voltaje de CC. %	3,97 %
Tipo de conexión	DY5



**Figura 2.** Transformador trifásico INATRA de la Red Eléctrica de la EEQ

Esta cámara de transformación del edificio también tiene dos transformadores de potencia de marca Hitachi – Line y tres seccionadores de potencia los cuales se distribuyen en las tres fases de la instalación, los cuales se muestran en la Figura 3.



**Figura 3.** Transformadores de potencia Hitachi-Line y seccionadores

### 1.4.1.2 Grupo Motor-Generador

El grupo motor-generador se encuentra constituido principalmente por dos máquinas que tienen un acoplamiento mecánico. La primera es un motor de corriente continua la cual funciona como máquina motriz, esta simula una turbina de una central hidroeléctrica, la segunda máquina se trata de un generador de rotor bobinado, el cual se encargará de transformar la energía mecánica del motor en energía eléctrica [1].

Este grupo motor-generador se encuentra montado sobre un chasis de tipo U desarmable, cuyas dimensiones son 150 x 50 x 6 cm correctamente alineado, para la alineación hay que tomar en cuenta que el motor DC es la parte fija y el generador es la parte ajustable [1].

#### 1.4.1.2.1 Máquina de inducción de rotor bobinado

Esta máquina consta de dos devanados para AC, el devanado del estator se conecta a la red eléctrica y el devanado del rotor se conecta en cortocircuito con una resistencia externa.

El rotor es de 6 polos, 3 bobinas por polo, 18 bobinas por fase, 3 bobinas por grupo, 6 ranuras por fase (inicio de fase), el bobinado del rotor es imbricado de doble capa, cuenta con 54 ranuras y su paso polar fraccionario es 1-9. El estator cuenta con 6 polos, 4 bobinas por polo, 24 bobinas por fase, 4 bobinas por grupo, 18 grupos por polo-fase, 8 ranuras por fase (inicio de fase), el bobinado es imbricado de doble capa, cuenta con 72 ranuras y su paso polar fraccionario es 1-12 [1].

#### 1.4.1.2.2 Motor de corriente continua

El motor de corriente continua cuenta con un rotor de 4 polos que tiene 87 delgas y 29 ranuras. Para que el grupo motor generador funcione a velocidad sincrónica, el motor DC debe operar en las condiciones de voltaje y corriente presentes en la Tabla 2. Estos valores permiten obtener la potencia mecánica que necesita para generar 220 V a una frecuencia de 60 Hz en vacío [1].

**Tabla 2.** Valores del motor DC para obtener la velocidad sincrónica del generador

Potencia	10 HP
Corriente de campo	5,15 A
Corriente de armadura	1,07 A
Voltaje de campo	186 $V_{DC}$
Voltaje de armadura	130 $V_{DC}$
Velocidad	1200 rpm
Tipo de conexión	Compuesto aditivo



En la Tabla 3, se indican los valores de resistencia de cada devanado del motor de corriente continua [1].

**Tabla 3.** Resistencias de los devanados del motor de corriente continua

Devanados	Resistencia [ $\Omega$ ]	Corriente [ $A_{DC}$ ]	Voltaje [ $V_{DC}$ ]
Armadura con interpolos $R_{ab}$	0,519	4,104	2,131
Serie $R_s$	163,7	0,914	149,8
Campo $R_f$	0,112	3,701	0,424

En la Tabla 4, se presentan los valores de impedancia e inductancia de los devanados del motor de corriente continua [1].

**Tabla 4.** Impedancia e inductancia del motor de corriente continua

Devanados	Impedancia [ $\Omega$ ]	Inductancia [ $mH$ ]
Armadura con interpolos $R_{ab}$	2,9661 $\angle$ 73,87	7,5538
Serie $R_s$	0,49668 $\angle$ 51,48	1,0308
Campo $R_f$	2630,5 $\angle$ 55,18	0,00559

En la Tabla 5, se presentan los valores de las resistencias de los devanados del generador sincrónico [1].

**Tabla 5.** Resistencias de los devanados del generador sincrónico

Devanados	Resistencia [ $\Omega$ ]	Corriente [ $A_{DC}$ ]	Voltaje [ $V_{DC}$ ]
Campo $R_f$	0,570	5,272	2,673
Armadura $R_{an}$	0,206	4,312	0,889
Armadura $R_{bn}$	0,204	4,380	0,894
Armadura $R_{cn}$	0,205	4,312	0,884

### 1.4.1.3 Emulador Eólico

El emulador Eólico permite la simulación del comportamiento del viento que se encarga del movimiento de las aspas de un aerogenerador, esto con la unión de un grupo de equipos y programas, permiten la recreación de una central de generación eólica [2].

Este emulador cuenta con una interfaz de adquisición de datos a través del software LVDAC-EMS el cual proporciona medidas de corriente, voltaje, potencia, torque, velocidad, frecuencias y otras.

Incluye un analizador de señales a modo de osciloscopio que permite revisar fasores, armónicos que se almacenan en una tabla de datos la cual se puede exportar en un archivo de Excel y cuya finalidad es graficar estos resultados.

El emulador cuenta con un dinamómetro de cuatro cuadrantes/ fuente de alimentación el cual consta de un motor/generador DC de imanes permanentes cuya velocidad sincrónica es de 2500 rpm, un torque magnético de hasta 3 Nm y una potencia de hasta 350 W. La fuente de alimentación de cuatro cuadrantes tiene las siguientes especificaciones: 150 V, 5 A y 500 W. El emulador también cuenta con un microcontrolador integrado. [2]

La parte delantera del emulador cuenta con dos salidas analógicas, para velocidad y torque respectivamente, dos entradas para el termistor que mide temperatura, una entrada para un comando analógico externo y dos salidas de codificador de eje, también cuenta con un interruptor el cual sirve para seleccionar que tipo de operación va a realizar el módulo y distintos botones para control [2].

En la Tabla 6, se muestran los modos de operación del emulador eólico.

**Tabla 6.** Modos de operación del dinamómetro [2]

<b>DINAMÓMETRO</b>	
Freno de torque constante en dos cuadrantes	
Motor de impulsión y freno en sentido horario	
Motor de impulsión y freno en sentido antihorario	
Motor de impulsión y freno en sentido horario a velocidad constante	
Motor de impulsión y freno en sentido antihorario a velocidad constante	
Motor de impulsión y freno a torque constante positivo	
Motor de impulsión y freno a torque constante negativo	
<b>FUENTE DE ALIMENTACIÓN</b>	
Fuente de voltaje	
Fuente de corriente	
Fuente de poder a 50 Hz	
Fuente de poder a 60 Hz	
Barra de 200 V DC	
Cargador flotante de batería de plomo ácido	

En la Tabla 7, y Tabla 8, se muestran los datos de las máquinas que forman parte del emulador eólico.

**Tabla 7.** Datos de placa de la máquina sincrónica de imanes permanentes

Potencia nominal	260 W
Velocidad nominal	6000 rpm
Par nominal	0,41 Nm
Corriente nominal	3 A
Voltaje en la barra del inversor	160 V
Codificador digital	2048 pulsos por revolución
Voltaje Diferencial	$0/5 V_{DC}$
Fuerza Electromotriz	$10,4 \frac{V_{rms}}{1000 rev}$

Dimensiones	308 x 291 x 440 mm
-------------	--------------------

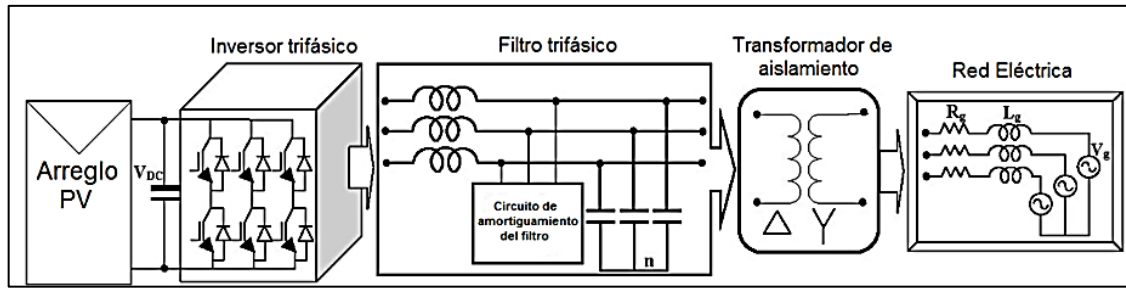
**Tabla 8.** Datos de placa de la máquina de inducción de rotor bobinado

Número de fases	3
Frecuencia	60 Hz
Velocidad subsincrónica	1720 rpm
Velocidad hipersincrónica	1875 rpm
Protección con termistor	10 k $\Omega$
Dimensiones	308 x 291 x 440 mm
<b>MOTOR</b>	
Voltaje del rotor	360/624 V
Voltaje del estator	120/208 V
Corriente nominal	1,15 A
Potencia mecánica	200 W
Fp	0,64 atraso
<b>GENERADOR</b>	
Voltaje del rotor	360/624 V
Voltaje del estator	120/208 V
Corriente nominal	1,33 A
Potencia nominal	200 W
Potencia aparente	480 VA
Fp	0,41 atraso
Velocidad	1800 rpm

#### 1.4.1.4 Generador Fotovoltaico

El Generador Fotovoltaico del Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia está compuesto por etapas que se pueden visualizar en la Figura 4. Este cuenta con un inversor trifásico de potencia, el cual está compuesto por un circuito de control de la compuerta de los elementos semiconductores, una técnica de control para el encendido y apagado, un capacitor para la barra DC y las protecciones del convertidor. El generador tiene un sistema de control para el seguimiento del punto de máxima transferencia de potencia, las señales de disparo de los semiconductores del inversor, el algoritmo del lazo de enclavamiento de fase para que este sistema se pueda sincronizar a la red, el cual será el que permita que se realice correctamente el control de corrientes en el sistema de tal manera que se asegure el correcto funcionamiento de este.

El sistema fotovoltaico cuenta con sensores para voltaje y corriente en AC y DC, filtros para eliminar los armónicos en la etapa de salida del inversor, y un transformador trifásico de voltaje cuya función principal es permitir el acoplamiento con la red [3].



**Figura 4.** Esquema por etapas del generador fotovoltaico

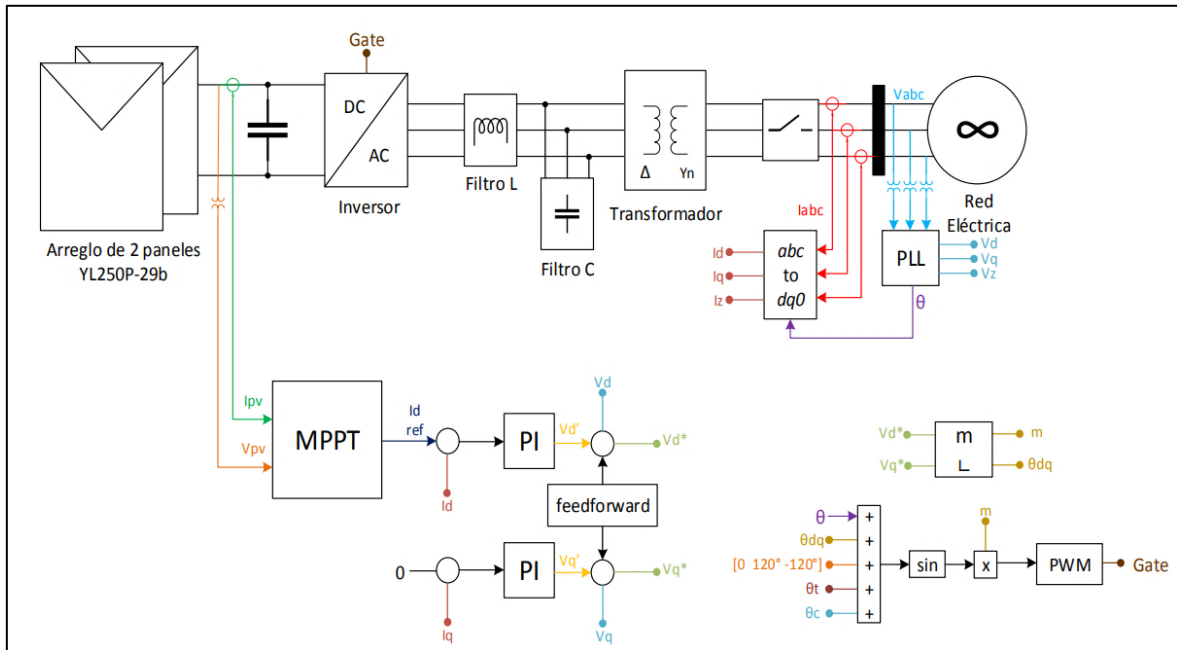
Para el sistema de control, tanto el algoritmo, el acondicionamiento y adquisición de datos, se encuentran realizadas por medio de la tarjeta F28377S de desarrollo definido de la familia C2000 de Texas Instrument la cual contiene un microcontrolador TMS320F28377S que cuenta con un CPU en 32 bits, que por medio de un emulador JTAGXDS100v2 se puede cargar programas y sesiones para la depuración desde una PC en un lenguaje C de programación utilizando el software Code Composer Studio. Los módulos que se encuentran en el sistema de control son PWM y ADC [3].

La tarjeta posee una biblioteca de Texas Instruments para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos en su propio software Control Suite. Las características de este programa se indican en la Tabla 9, donde se encuentran diversas funciones, tales como controladores de tipo PID, tanto como transformadas de Park y Clarke, lazos de enclavamiento de fases de hasta tres fases y los algoritmos del Punto de máxima Transferencia de Potencia (MPPT) [3].

**Tabla 9.** Descripción de la tarjeta F28377S de Texas Instruments

COMPONENTE	CARACTERÍSTICA	JUSTIFICACIÓN
MEMORIA	164 kB de RAM, 1 MB MEMORY FLASH	Por cuestiones de la capacidad de la tarjeta se usa la memory flash.
ADC	Las lecturas son controladas por ePWM, timer e interrupciones. 16 canales, 4 convertidores, 12-16 bits.	Se utilizan distintos canales multiplexados para la lectura de corrientes y voltajes DC y AC.
PWM	Cuenta con un reloj de 100 MHz y 24 salidas PMW mejoradas con tiempos muertos.	Para controlar el inversor de utilizan 6 salidas PWM complementadas incluyendo tiempos muertos.
CPU	Cuenta con una unidad matemática trigonométrica, unidad de punto flotante, unidad viterbi/complejos y es de 32 bits a 200 MHz.	Para leer las señales y algoritmos de control del sistema, necesita una velocidad alta de procesamiento.

En la Figura 5, se puede observar de una manera más detallada las etapas del Sistema Fotovoltaico del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia, donde se encuentran inicialmente el arreglo de dos paneles, seguido por un filtro capacitivo, el inversor trifásico, un filtro pasa bajos de tipo LCL, la etapa de control con el Lazo de Enclavamiento de Fase (PLL) que permite sincronizar el generador con la red y el Punto de Máxima Transferencia de Potencia (MTTP).



**Figura 5.** Diagrama del sistema fotovoltaico

El Sistema Fotovoltaico se encuentra conformado por tres etapas principales que contienen distintas características las cuales se detallan en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Parámetros de las etapas principales del sistema fotovoltaico

<b>INVERSOR TRIFÁSICO DE POTENCIA</b>	
Potencia	500 W
Frecuencia de conmutación	6 kHz
Vin	70 V
Vout	5 – 50 V
Duty – Cycle	10 – 90 %
Corriente en la salida	0,2 – 8 A
Carga máxima	30 Ω
<b>FILTRO</b>	
R	0,15 Ω
L	0,165 mH
C	40 μF
R damping	0,7368 Ω
<b>TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE ACOPLAMIENTO A LA RED</b>	
Potencia	1 kVA

Voltaje del lado primario	32 V
Voltaje del lado secundario	220 V
R equivalente	0,1852 $\Omega$
L equivalente	1,1779 mH
R del núcleo	108,329 $\Omega$
L de magnetización	1,6599 H
Conexión	Dyn1
Frecuencia de red	60 Hz
Taps en el lado primario	7 posiciones en pasos de 2,5 %

## 2 METODOLOGÍA

Para entender el funcionamiento y poder realizar las pruebas necesarias del Generador Fotovoltaico del Laboratorio Físico de Sistemas Eléctricos de Potencia, se realizaron distintos procesos empezando por el estudio del módulo fotovoltaico, describiendo de manera detallada el hardware y el software del generador. El hardware se centra en los componentes principales, cuyo estudio es necesario para saber ciertas características y parámetros para poder conocer los límites de operación del generador. El software es para entender el procedimiento realizado mediante el Software Code Composer Studio, de manera que se describe los programas del Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (o como sus siglas en inglés lo describen MPPT) y el Lazo de Enclavamiento de Fase (o como sus siglas en inglés lo describen PLL), de igual manera entender como por medio de la tarjeta Launchpad Delfino TMS320F28377S de Texas Instrument, se atribuye el control a la etapa de generación de energía solar, control del inversor trifásico de potencia, modulación PWM sinusoidal, ADC y Reloj.

Para determinar la factibilidad de operación en paralelo del generador fotovoltaico con la red de la EEQ se realizaron distintos estudios teóricos, tanto definir los límites operativos, como describir el procedimiento de sincronización con la red eléctrica donde se explicaron las condiciones para dicho proceso.

Se realizan pruebas de funcionamiento al generador, inicialmente de manera aislada sin conectar cargas, para comprobar que se cumplan ciertas condiciones antes de conectarlo a la red, una vez comprobada esta factibilidad, se procede a la conexión, se toman datos de voltaje, corriente y potencia antes y después de la conexión para analizar los cambios. Luego se realizan pruebas del generador fotovoltaico de manera aislada, aquí se intenta simular cargas residenciales por lo cual se conectaron cargas monofásicas, ejemplificadas con focos ahorradores y focos LED, donde se tomaron datos de voltaje, corriente, potencias, armónicos de voltaje y corriente.

Finalmente se realiza el análisis de pruebas donde por medio del software LVDAC-EMS que cuenta con un osciloscopio, un analizador de fasores, y un analizador de armónicos, se obtienen los resultados.

## 2.1 DESCRIPCIÓN DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO

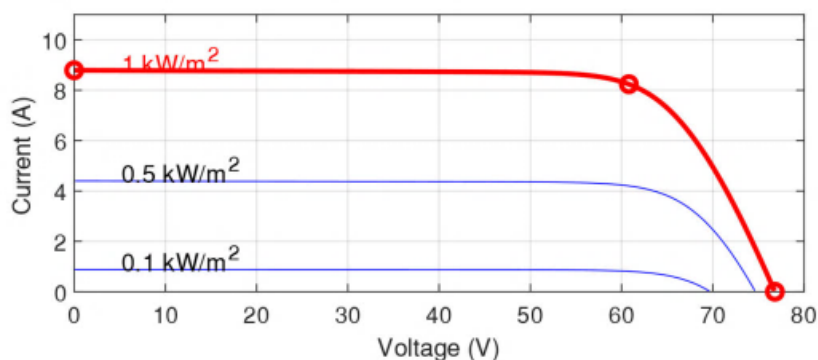
El Generador Fotovoltaico del Laboratorio Físico de sistemas Eléctricos de Potencia se encuentra constituido de varias etapas las cuales se indican en la Figura 5, y se describen en este capítulo. Este Generador fotovoltaico tiene un diseño específico para funcionar sincronizado a la red, los componentes principales son un convertor DC-DC, un inversor de potencia DC-AC, un transformador elevador, y un grupo de elementos para realizar la conexión a la red.

### 2.1.1 ARREGLO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

El sistema cuenta con un arreglo de dos paneles fotovoltaicos Yingli Solar YL250P-29b de 250 W dispuestos en una conexión en serie, cuyas características se representan por las curvas de corriente vs tiempo, las cuales simulan el comportamiento de los paneles e individualmente de las celdas solares. En las curvas se observan tres condiciones sumamente importantes a analizar en los paneles: el punto de máxima potencia, puntos de circuito abierto y cortocircuito [3].

El MPP (Maximum Power Point) o Punto de Máxima Transferencia de potencia se encuentra ubicado de manera distintiva en el codo de las curvas, este punto como su nombre lo indica nos muestra la mayor potencia entregada por el panel solar en condiciones ambientales.

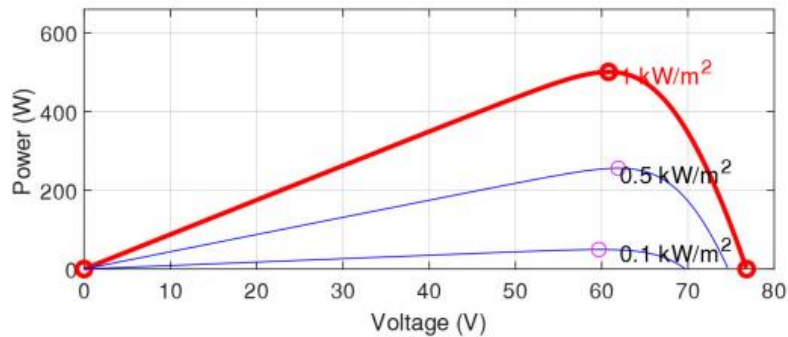
En los otros dos puntos, el de circuito abierto y cortocircuito, el panel no suministra potencia. En la Figura 6, se observa la curva de corriente vs voltaje de la cadena en serie de los dos paneles para una irradiancia de 100, 50 y 100  $\frac{W}{m^2}$  a 25 °C de temperatura [3].



**Figura 6.** Curvas de Corriente vs Voltaje del arreglo en serie de los paneles Yingli de 250 W [3]



La curva de potencia vs voltaje que se indica en la Figura 7, indica la cantidad de potencia que se genera contra el voltaje en el que opera el arreglo de paneles. Esta curva tiene un comportamiento diferente a la presentada en la Figura 6, pero se puede observar que coinciden en el MPP.



**Figura 7.** Curvas de Potencia vs Voltaje del arreglo en serie de los paneles Yingli de 250 W [3]

## 2.1.2 INVERSOR TRIFÁSICO DE POTENCIA

El inversor trifásico de potencia es uno de los principales componentes del sistema ya que es el encargado de convertir la energía continúa suministrada por los paneles fotovoltaicos en energía alterna para poder operarla en paralelo con la red.

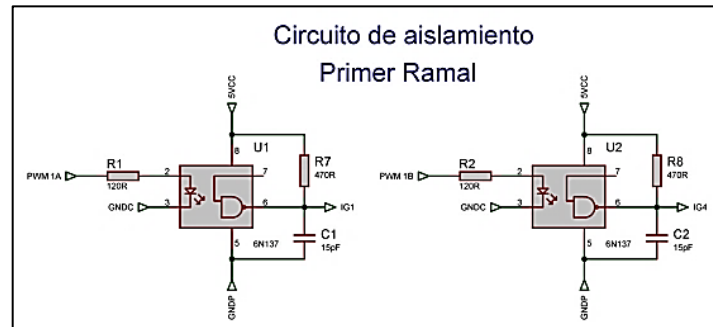
Se trata de un tipo de inversor con fuente de voltaje de dos niveles de puente completo. Este tipo de inversores está compuesto por una fuente de voltaje, en este caso el arreglo de paneles solares, un capacitor de enlace de DC, seis semiconductores (IGBTs) los cuales tienen la función de interruptores ordenados en ramales de dos y un desfase de  $120^\circ$  entre ellos. Cuenta además con un filtro pasa bajos a la salida y estrategias de modulación y control. El inversor se encuentra diseñado de manera que no proporciona un neutro, si no se utiliza un transformador en conexión  $\Delta Y_g$  con la parte central del devanado secundario conectado a tierra antes de que el inversor se sincronice con la red o se alimenten cargas de manera aislada. En la Tabla 10 se presentan los parámetros del inversor fotovoltaico [3].

### 2.1.2.1 Etapa de control

Esta etapa comprende principalmente las entradas de señales de control SPWM para realizar el disparo de los IGBTs [3]. En una sección siguiente se explica el proceso de generación y adecuación de las señales de disparo.

### 2.1.2.2 Etapa de aislamiento

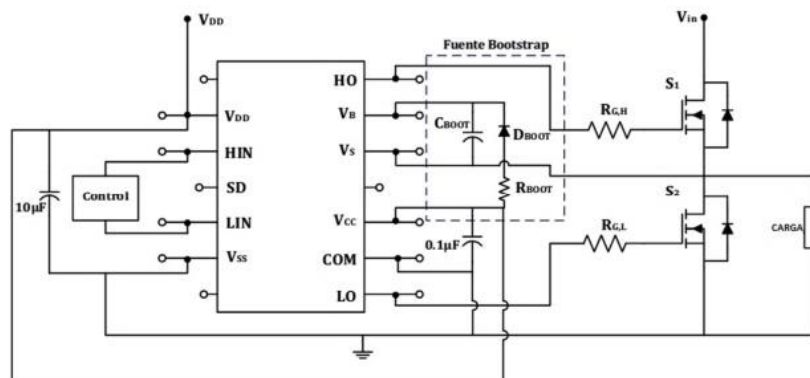
En esta etapa se analiza la protección de los elementos de la etapa de control de las perturbaciones generadas de la etapa de potencia. En esta etapa se encuentran seis optoacopladores 6N137 capaces de trabajar a alta frecuencia a causa de que la etapa de control se encuentra en el orden de los kHz. El circuito de aislamiento para la etapa de control de cada ramal se presenta en la Figura 8 [3].



**Figura 8.** Circuito de aislamiento para los ramales del inversor trifásico de potencia [3]

### 2.1.2.3 Controlador de compuerta o Gate Driver

El controlador de compuerta es un conjunto de elementos por medio de los cuales se proporciona los niveles de voltaje y corriente que se requiere para el control de las compuertas de los IGBTs. Debido a que los tiempos de conmutación son muy pequeños, cuenta con un circuito integrado IR2110, el cual utiliza una técnica de "Bootstrap" que permite el manejo de dos IGBTs con una sola fuente de alimentación, esta característica permite controlar los seis IGBTs que componen el inversor de potencia. En la Figura 9, se observa el esquema de conexión del circuito integrado IR2110 [3].



**Figura 9.** Esquema de conexión del circuito integrado IR2110 [3]

#### 2.1.2.4 Etapa de Potencia

En esta etapa se describe el elemento semiconductor que se utiliza como interruptor para inversor trifásico de potencia, las características que se requieren para su implementación determinan la selección de este, de manera que el semiconductor utilizado en el inversor es el IGBT STGP15M65DF2, cuyas características se presentan en la Tabla 11 [3].

**Tabla 11.** Parámetros del IGBT STGP15M65DF2.

<b>Parámetros del IGBT STGP15M65DF2</b>	
Máxima Corriente	15 A
Voltaje de ruptura	650 V
Voltaje de umbral	7 V
Voltaje de compuerta	20 V
Tiempo de R a cortocircuito	6 us
Capacitancia de transferencia inversa	25 pF
Capacitancia de entrada	1250 pF
Capacitancia de salida	80 pF

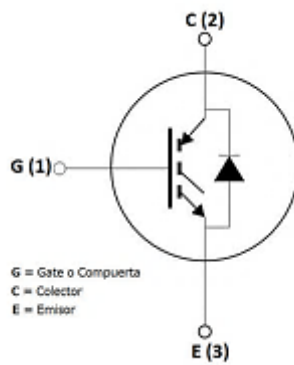
#### 2.1.2.5 Capacitor de la barra DC

Debido a que el voltaje que ingresa al inversor de potencia viene de una fuente de corriente continua que son los paneles solares, se genera ruido, el cual distorsiona la forma de onda original, además de otros factores presentes. Es por esto por lo que se necesita de este capacitor de enlace en la barra de corriente continua del inversor para que de esta manera el voltaje se estabilice, así se amortiguan las fluctuaciones de voltaje que son el resultado de la corriente pulsante que aparece en el lado de corriente continua del inversor.

#### 2.1.2.6 Protecciones del inversor

##### 2.1.2.6.1 Protección de sobrevoltajes

Debido a que en un semiconductor al ser sometido a un voltaje de manera excesiva en la unión PN, esto ocasiona una ruptura y posterior daño del elemento, en este caso las conmutaciones de los IGBTs causan estos sobrevoltajes. Otra causa de estos daños es que, frente a una carga inductiva, existen momentos en las cuales el IGBT debe estar encendido, pero la corriente se mueve en sentido opuesto sin tener camino para fluir, se generan picos de voltaje, entonces debido a esto se selecciona el IGBT STG15M65DF2 cuyo diagrama interno se presenta en la Figura 10, que cuenta con un diodo en antiparalelo de recuperación rápida y suave, que le da in camino a la corriente para fluir y de esta manera se genera una protección contra sobrevoltajes [3].



**Figura 10.** Esquema interno del IGBT [3]

### **2.1.2.6.2 Protección de sobrecorriente para los IGBTs**

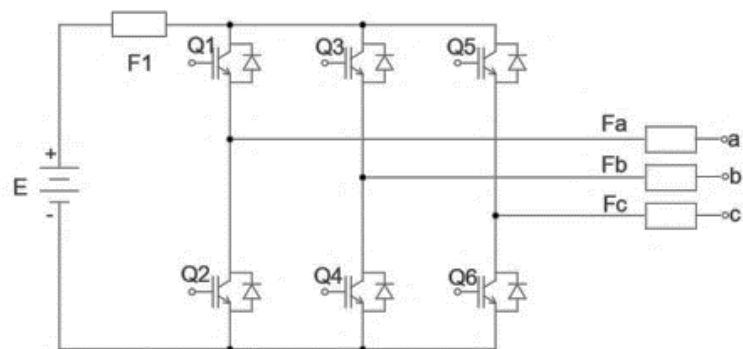
Los límites de corriente en el colector cambian de acuerdo con la temperatura de la unión, mientras mayor esta temperatura, menor es la corriente que se permite para no dañar las uniones internas. En la puerta del IGBT aparece una capacitancia parásita causada por la estructura interna del mismo, entonces la conmutación del IGBT se la modela como una carga y descarga de la capacitancia [4].

La resistencia presente en la compuerta del IGBT se encarga de modificar la corriente, de esta manera afecta la conmutación de este. Mientras más grande es la resistencia, mayor es el tiempo de conmutación y por lo cual hay mayores pérdidas. Pero para poder limitar la corriente de conmutación, es necesario que esta resistencia sea la mínima posible [4].

### **2.1.2.6.3 Protección de sobrecorriente en la carga**

En esta sección se desea que el valor de la corriente en la salida no sea mayor a los 9 amperios, debido a que los convertidores de potencia producen en ciertas circunstancias cortocircuitos, que deben ser controlados de una manera rápida y eficaz, los fusibles presentes en la salida son de 5 A de 5 ciclos por cada segundo, de esta manera se los distribuye en la barra de corriente continua para la protección de los del puente de IGBTs y a la salida en caso de que ocurra un cortocircuito en la carga, como la corriente en la barra de continua puede llegar a los 8 A y en el sistema 7 A, tomando en cuenta un factor de sobrecarga, para la entrada y salida se utilizan fusibles de 5 A y en la barra de continua fusibles de 6 A [3].

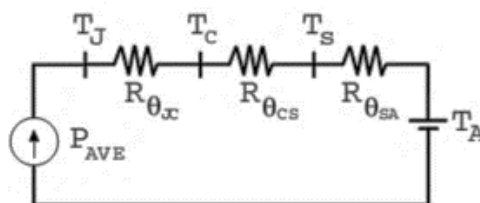
En la Figura 11, se muestra el esquema del inversor trifásico de potencia conformado por los 6 IGBTs.



**Figura 11.** Esquema del inversor trifásico de potencia con fusibles para su protección [3]

#### 2.1.2.6.4 Disipador de potencia de los IGBTs

Debido a las elevadas pérdidas por calor a causa de caídas de corriente y voltaje que circulan por el sistema, se encuentran técnicas como el de pistas gruesas para que soporten la corriente, para separar la conexión a tierra de control, potencia y el uso de disipadores de potencia en forma de calor. Este disipador es de aluminio y presenta un modelo térmico indicado en la Figura 12.



**Figura 12.** Modelo del disipador de potencia [3]

En la Tabla 12, se observan los parámetros del disipador de potencia.

**Tabla 12.** Parámetros de disipador de potencia

<b>DISIPADOR DE POTENCIA</b>	
Potencia de pérdida disipada en cada semiconductor	136 W
Resistencia térmica entre la juntura y la carcasa del semiconductor	1,1 °C/W
Resistencia térmica entre la carcasa del semiconductor y el disipador de calor	0,24 °C/W
Resistencia térmica entre el disipador y el ambiente	0,1718 °C/W
Temperatura de la Juntura del semiconductor	23,36 °C
Temperatura de la carcasa	100 °C
Temperatura del disipador	67,36 °C
Temperatura ambiente	40 °C
Corriente I <sub>c</sub>	15 A
Dimensiones del disipador	263,78 cm <sup>2</sup>

## 2.1.3 SENSORES

### 2.1.3.1 Sensor de corriente DC

El sensor para medir la corriente que sale de los paneles fotovoltaicos es un sensor de efecto hall ACS712ELCTR-20A-T el cual se indica en la Figura 13, cuyo modulo se encuentra basado en el circuito integrado ACS712 de Allegro MicroSystems, ya que se trata de un elemento cuya medida es bidireccional y lineal de tal manera que detecta la corriente eléctrica que fluye por un cable y genera de manera proporcional una señal. El rango de medición es de  $\pm 20A$  en AC, DC y de su menor escala es de 100 mV/A. La medición de corriente se la realiza dentro del circuito integrado que se encuentra aislado del circuito donde se procesa [3].



Figura 13. Sensor ACS712-20A-T [3]

### 2.1.3.2 Sensor de corriente AC

Este sensor se encarga de medir las tres corrientes de línea del inversor, cuyo controlador utiliza los resultados para así controlar los interruptores del inversor PWM.

El sensor SCT013-005 brinda la facilidad de medir las corrientes sin interrumpir el cable donde se requiere realizar la medición, cuya capacidad es de hasta los 5 A, con una resistencia de burden para obtener a la salida una señal de voltaje de  $\pm 1$  Vrms, un voltaje pico de  $\pm 1,414$  V y un voltaje pico-pico de 2,828 V [3].



Figura 14. Sensor de corriente SCT013-005 [3]

### 2.1.3.3 Sensor de voltaje DC

Este sensor de voltaje cuyo esquema se encuentra en la Figura 15, se lo utiliza para detectar el nivel de voltaje y la estabilidad de la barra de corriente continua, de igual manera para el control de lazo cerrado del voltaje en el lado DC.

El circuito del sensor de voltaje DC está compuesto por una etapa de acondicionamiento y un optoacoplador HCNR200 que sirve de aislamiento eléctrico entre la señal que procede de la carga y la entrada analógica de la tarjeta de Texas Instrument [3].

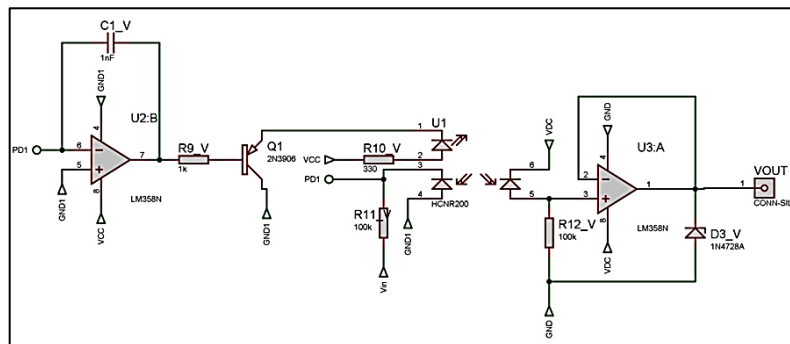


Figura 15. Circuito de acondicionamiento de voltaje con un optoacoplador HCNR200 [3]

### 2.1.3.4 Sensor de voltaje AC

Este sensor mide el voltaje AC de la red, ya que estos valores se necesitan para la implementación del PLL. Se lo utiliza debido a que la tarjeta Texas por medio del ADC no puede medir dichos voltajes ya que el rango de entrada es de (0 a 3,3 V) [3].

El sensor de voltaje ZMPT101B que se indica en la Figura 16, cuenta con un potenciómetro de compensación de múltiples vueltas el cual se encarga de ajustar la salida de AC. Debido a que la onda a la salida del circuito está desplazada de forma que la onda no tiene voltajes negativos, permite leer completamente la onda por medio del ADC. Este desplazamiento depende directamente del valor de voltaje que alimenta el módulo. Este circuito de acondicionamiento de señal se encarga de permitir que el voltaje a la salida del módulo sea leído por medio de cualquier microcontrolador con entrada analógica (ADC) y de esta manera permitir leer los voltajes instantáneos, voltajes pico- pico y voltaje eficaz [3].



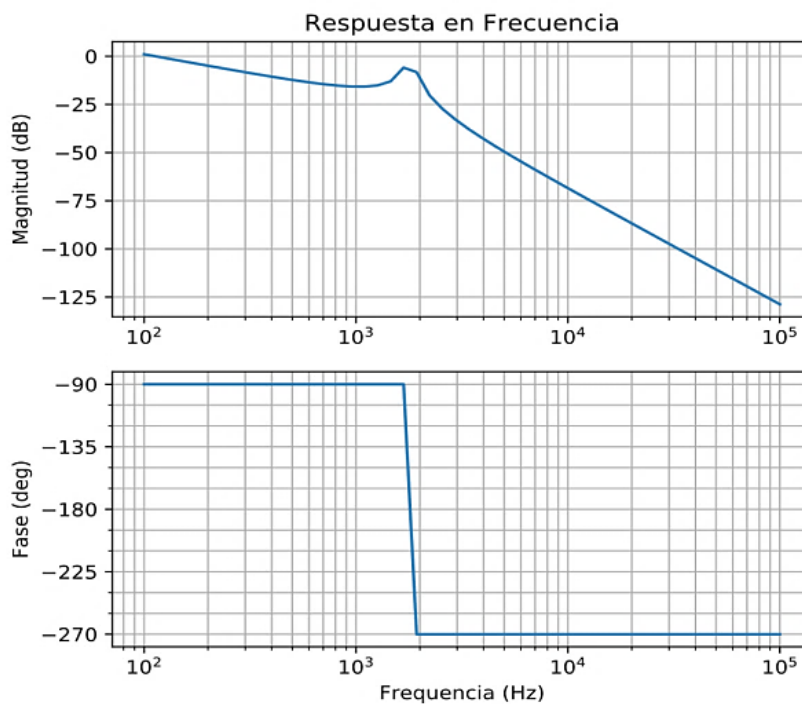
Figura 16. Sensor de voltaje ZMPT101B [3]

## 2.1.4 FILTRO TRIFÁSICO

El filtro utilizado en el sistema fotovoltaico es un LCL cuya atenuación es de 60 [db/década] desde la frecuencia de resonancia, genera poca potencia reactiva y su distorsión de corriente de la red es baja, pero debido a la resonancia que presenta, este puede causar distorsión de corriente en la entrada en un modo dinámico y estacionario. Los valores de los filtros se presentan en la Tabla 10.

La función principal del filtro es mitigar la señal portadora de la PWM, con una frecuencia de 6 [kHz], aun así, este filtro es capaz de atenuar todas las frecuencias a partir de los 100 Hz.

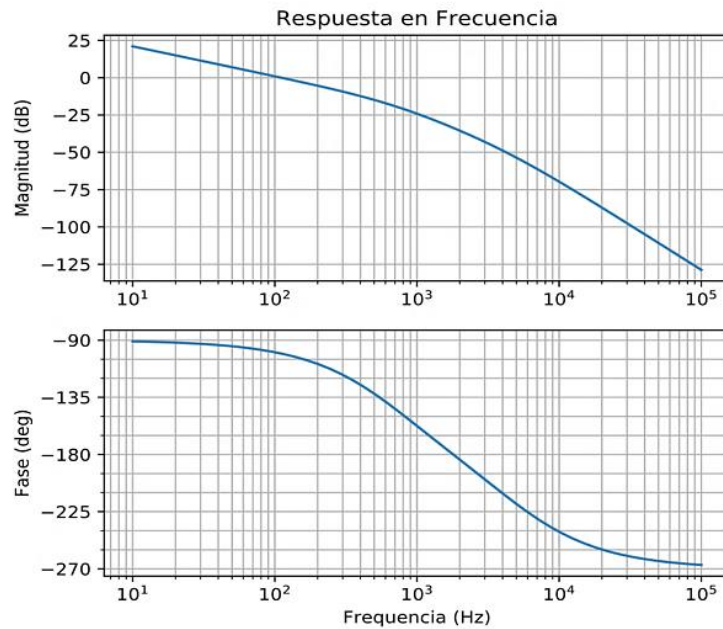
En la Figura 17, se muestra la respuesta en frecuencia sin amortiguamiento del filtro LCL.



**Figura 17.** Respuesta en frecuencia, sin amortiguamiento, filtro LCL [3]

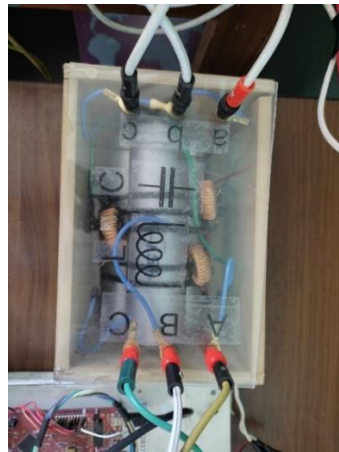
La Figura 18, muestra la respuesta en frecuencia con amortiguamiento del filtro LCL.





**Figura 18.** Respuesta en frecuencia, con amortiguamiento, filtro LCL [3]

La Figura 19, muestra un filtro LC del sistema, donde el otro componente inductivo del filtro LCL es el transformador de acoplamiento a la red.



**Figura 19.** Filtro LC. La otra componente L del filtro es el transformador de acoplamiento a la red

### 2.1.5 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE AISLAMIENTO

Este transformador adapta los niveles de voltaje en la salida del sistema, de manera que eleva el voltaje en la salida AC del inversor al nivel del voltaje de la red, este transformador sirve de aislamiento eléctrico entre el generador fotovoltaico y la red eléctrica, lo cual evita que se inyecten corrientes de continua a la red y así proteger el arreglo de paneles y al

inversor de sobrevoltajes. Se trata de un transformador en seco, libre de aceite y no engorroso por lo cual no tiene fugas de aceite y no necesita del mantenimiento causado por envejecimiento de aceite [3].

Es un transformador de taps, dimensionado de manera en el cual los taps hacen que su voltaje nominal se ajuste de una manera ligera y ayuda a que las protecciones de los IGBTs no se disparen debido a variaciones transitorias de voltaje en la red. Los parámetros principales del transformador se encuentran definidos en la Tabla 10 [3].

El transformador cuenta con un cambiador de taps sin carga, por lo cual para poder cambiar el tap este debe estar desconectado de cualquier alimentación, y este proceso se realiza de manera manual. En la Tabla 13, se observa en número de espiras y el voltaje que tiene el transformador en el devanado secundario en cada posición de los taps.

**Tabla 13.** Número de espiras y nivel de voltaje en cada tap del devanado secundario

Posición del tap	Número de espiras	Nivel de voltaje [V]
1	203	207
2	209	212
3	215	217
4	221	220
5	227	227
6	233	232
7	239	237



**Figura 20.** Transformador de acoplamiento a la res y placa de datos

## 2.2 DESCRIPCIÓN DE LA TARJETA LAUNCHPAD DELFINO TMS320F28377S DE TEXAS INSTRUMENT

### 2.2.1 ETAPA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR

Para la etapa de generación de energía solar, el inversor de potencia es el que se encarga de transformar la corriente continua en corriente alterna, y de este modo mantener de modo

constante la inyección tanto de la máxima potencia activa posible por medio de los algoritmos del seguimiento del punto de máxima potencia, como de la potencia activa requerida por el operario de la red.

### 2.2.2 SISTEMA DE CONTROL DEL INVERSOR TRIFÁSICO DE POTENCIA

El sistema de control se encuentra detallado por medio de algoritmos de control, adquisición de datos y acondicionamiento de señales. Estos algoritmos están realizados en la tarjeta de Texas Instrument F28377S, por medio del software Code Composer Estudio. En este sistema de control se utilizan módulos PWM y ADC.

En la Figura 21, se observa el diagrama de flujo a manera general del sistema de control del inversor de potencia en el cual se pueden observar el proceso en el cual se importan las bibliotecas, se declaran las funciones y demás datos, se detallan los parámetros de ajuste del microcontrolador, tomando en cuenta los registros de interrupciones, PWM, ADC, reloj y la sincronización de los contadores [3].



**Figura 21.** Diagrama de flujo del sistema de control del inversor de potencia

### **2.2.3 CONFIGURACIÓN DEL ADC**

Se trata de un módulo ADC con un circuito simple el cual puede ser duplicado las veces que sean necesarias en el mismo chip y de esta manera permite tomar muestras simultáneas u operar de manera independiente múltiples ADCs. La envoltura de este ADC está basada en un funcionamiento SOS (Start Of Conversion). El multiplexor está conformado de 16 canales para este modo simple.

Las ventanas para la adquisición de datos del ADC se encuentran ligadas de manera directa al reloj del sistema (SYSCLK) y al pre escalador, los cuales determinan el reloj del ADC. Para este ADC se utiliza el ADCCLK definido por defecto con una resolución de 16 bits, por lo cual el núcleo necesita de 29,5 ciclos del ADCCLK con lo cual se puede procesar voltaje y obtener un resultado. Para esto las señales PWM se encuentran configuradas de manera que generan señales de 6 kHz, con el objetivo de obtener 100 mediciones de un ciclo de las señales de corriente y voltaje [3].

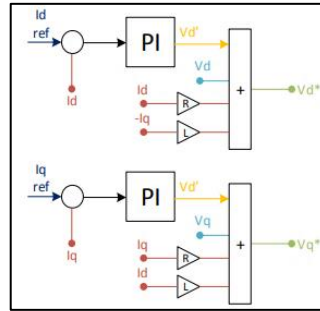
### **2.2.4 LAZO DE CONTROL DE CORRIENTE**

Este lazo de control de corriente es necesario para la inyección de potencia a la red, este lazo se encarga de garantizar el flujo de potencia hacia la red y no de manera opuesta, de esta manera protegiendo los circuitos del sistema.

Este control se basa principalmente en controladores PI. Los cuales permiten controlar el voltaje de la barra de continua e inyectar la potencia activa a la red. Por medio de la transformada de Park se obtienen las corrientes inyectadas a la red y los voltajes de la red, dentro del marco de referencia rotatorio  $dq0$ , como se observa en la Figura 5 [3].

### **2.2.5 CONTROLADORES PI**

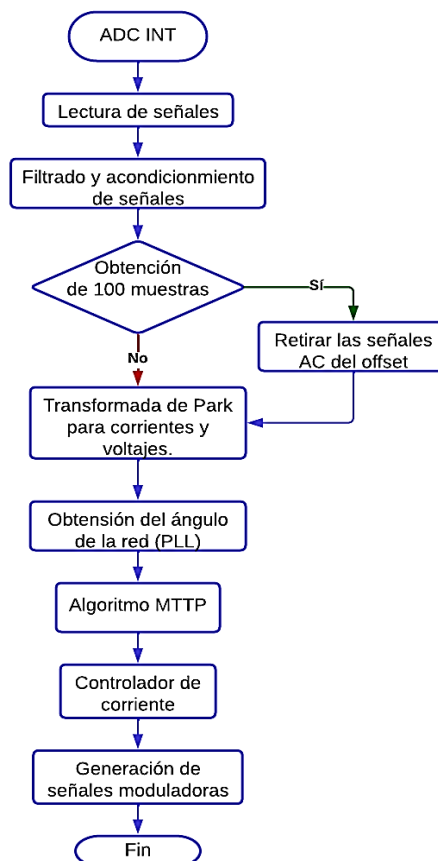
Como se puede observar en la Figura 22, el lazo de control de corriente se encuentra compuesto por dos controladores PI, uno para la corriente en el eje  $d$  y otro para la corriente en el eje  $q$ , una vez que se sintoniza el controlador PI del eje directo, se lo controla en conjunto con el voltaje en la barra de continua. Estos controladores se encargan de que el error entre la señal de entrada y la referencia sea cero variando la señal de control, de manera que las dos señales sean iguales [3].



**Figura 22.** Controladores PI para cada uno de los lazos de control de corriente del eje q y d respectivamente [3]

Para que se garantice que funcione correctamente el lazo de control de corriente, se utiliza una técnica llamada “Feedforward”, la cual permite a los controladores reducir las perturbaciones que vienen de la red de este modo desacoplar las corrientes de los ejes d y q. Por medio de este desacoplamiento es que se reduce el efecto que produce el control de un eje sobre el otro [3].

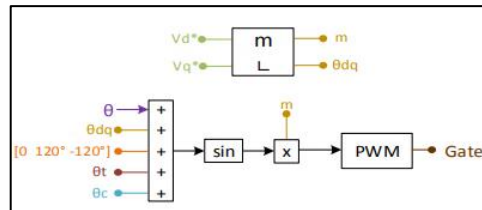
En la Figura 23, se observa la descripción del algoritmo para el lazo de control de corriente el cual se lo realiza dentro de la interrupción del ADC.



**Figura 23.** Diagrama de flujo de la interrupción en el ADC

## 2.2.6 MODULACIÓN PMW SINUSIODAL

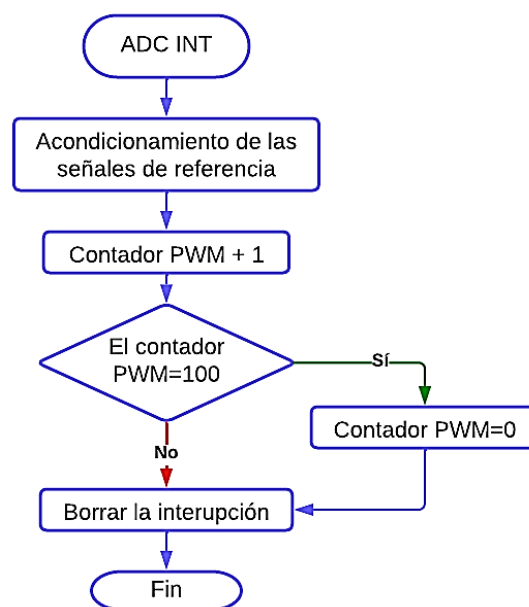
Las señales de disparo son generadas por medio de la técnica SPWM trifásico. Esto se realiza usando el contador en modo UP-DOWN incluido en el módulo PWM para así poder generar la señal portadora [3].



**Figura 24.** Modelo de generación de las señales PWM [3]

En la Figura 24, se puede observar que una vez que se obtienen las variables de salida del controlador de corriente  $v_d^*$  y  $v_q^*$ , se obtienen el módulo y el ángulo que se forman entre  $v_d^*$  y  $v_q^*$ , de esta manera se puede controlar la amplitud que tienen las señales senoidales que son de referencia para el bloque PWM [3].

Para que los registros se encuentren variando de manera senoidal, se necesita que los 100 valores que se obtienen se copien constantemente al registro CMPA. En este punto se realiza la interrupción del módulo PWM de manera coincidente en el mismo punto donde se miden los valores del ADC, de manera que, al obtener nuevamente un valor a la salida del lazo de corriente, este registro se actualice de modo que forme la señal senoidal requerida tal como se observa en el diagrama de flujo de la Figura 25.

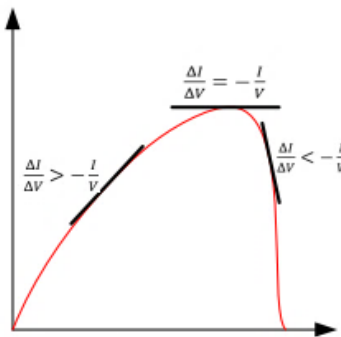


**Figura 25.** Diagrama de flujo de la interrupción del módulo PWM

## 2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (MPPT)

Para que el panel solar funcione de la manera óptima reduciendo costos a través del incremento de la eficiencia, debe trabajar en el punto de máxima potencia para de esta manera extraer la potencia máxima, bajo condiciones de temperatura e irradiancia.

Para el seguimiento del punto de máxima potencia, se utiliza el algoritmo de conductancia incremental debido a la rápida respuesta y eficiencia en el estado dinámico. Este método está basado en que la derivada de la potencia tiene el valor de cero en el punto de máxima potencia. En la Figura 26, se puede ver que, si el panel se encuentra operando en el lado izquierdo del MPP, la derivada es positiva, y si este opera al lado derecho, es negativa. Entonces  $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$  en el MPP,  $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$  al lado izquierdo del MPP y  $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$  al lado derecho del MPP [3].

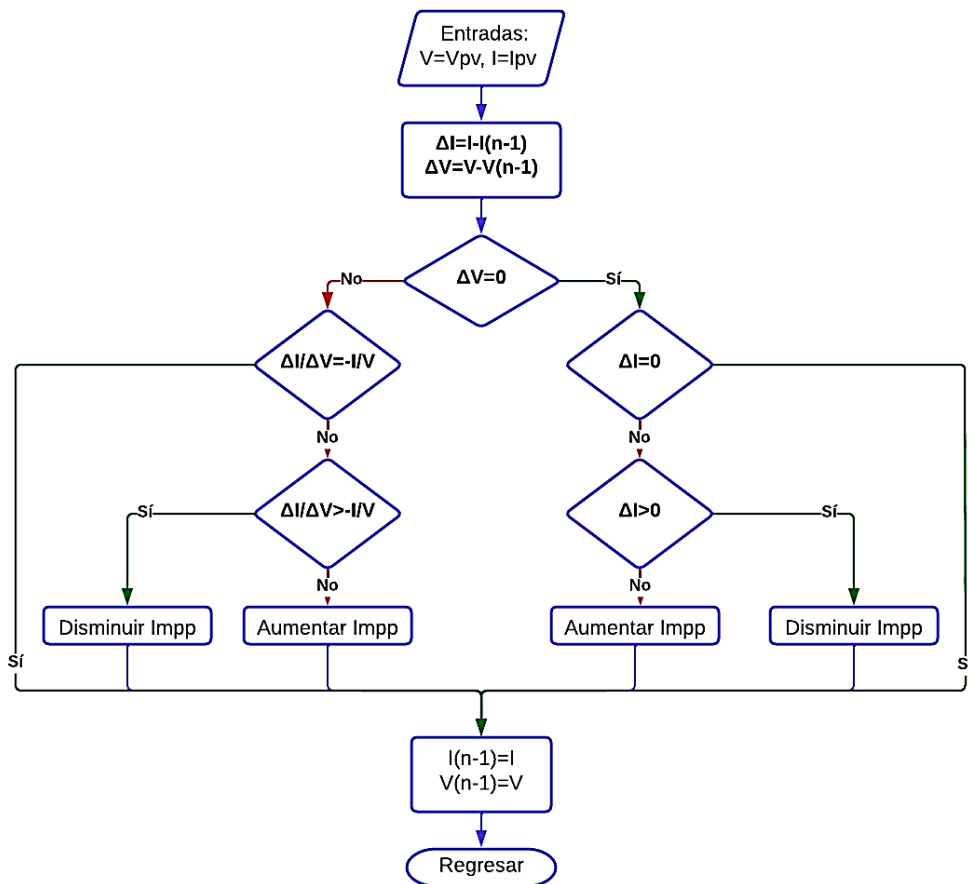


**Figura 26.** Comparación de la conductancia instantánea  $\frac{I}{V}$  y la conductancia incremental  $\frac{\Delta I}{\Delta V}$ , respecto al MPP para el método de conductancia incremental [3]

En el punto de máxima potencia la referencia de voltaje  $V_{PVref}$  es igual al  $V_{MPP}$  y cuando este alcanza el punto de máxima potencia, se mantiene la operación del panel solar, a menos que la corriente varíe, lo que querría decir que las condiciones atmosféricas han cambiado y se busca un nuevo punto de máxima potencia [3].

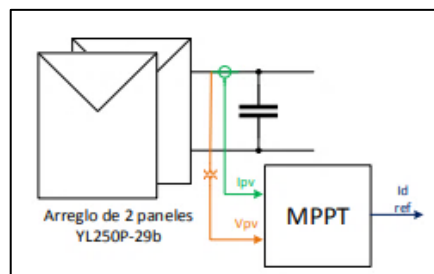
El algoritmo se encuentra detallado de acuerdo con el diseño del controlador PI y de la teoría de potencia instantánea, esto debido a la necesidad de que exista una referencia para controlar la potencia.

En la Figura 27, se puede observar el diagrama de flujo del algoritmo del método de conductancia incremental para el seguimiento del punto de máxima potencia con salida de corriente.



**Figura 27.** Diagrama de flujo del algoritmo de conductancia incremental para el MPPT con salida de corriente

Para implementar el algoritmo MTTP se utilizan dos sensores, los cuales mide el nivel de voltaje en la salida del arreglo de paneles y la corriente de los mismo, tal como se muestra en la Figura 28.



**Figura 28.** Esquema de la implementación del algoritmo MTTP [3]

Para la obtención de  $I_{d_{ref}}$  se ajustan ciertos parámetros para que de esta manera el algoritmo logre de manera adecuada el seguimiento del punto de máxima potencia:

- $I_{máx}$ , Máxima corriente del arreglo de paneles.
- $I_{mín}$ , Mínima corriente del arreglo de paneles (distinta de cero)



- *Step*, Señal de paso para variar la referencia.

El proceso de este algoritmo es importante ajustar el tamaño del paso, se escoge la corriente máxima como la del panel, la cual también se toma como corriente del punto de máxima potencia, el valor de esta corriente es de 8,24 A y debido a que se trabaja en valores en por unidad, esta tendrá en valor de 1. En el caso de la mínima corriente se toma un valor de 0,2 pu, que en este caso se la toma como la corriente que el sistema consume para su buen funcionamiento. El valor que se da al paso es de 0,001 por medio en Simulink [3].

## 2.4 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA PARA EL LAZO DE ENCLAVAMIENTO DE FASE (PLL)

Para aplicaciones fotovoltaicas se implementa por medio de software el lazo de enclavamiento de fase (SPLL) por su facilidad de aplicación, aquí se analiza el SPLL en el Marco de Referencia Sincrónico o SPLL – SRF (Software Phase Locked Loop – Synchronous Reference Frame) [3].

Por medio de los sensores se leen los voltajes de las fases de la red, obteniendo el ángulo de posición del voltaje y así poder garantizar que al momento en el que se disparan los semiconductores, este se encuentre en fase con la red eléctrica [3].

En la ecuación 2.1, se tiene inicialmente el sistema trifásico de las fases abc.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Luego de esto, en la ecuación 2.2, se transforma de *abc* a  $\alpha\beta 0$  por medio de la transformada de Clark con potencia invariante.

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(-\frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Por medio de la transformada de Park se calculan los valores del sistema en el eje de referencia rotatorio, como se muestra en la ecuación 2.3.

$$\begin{bmatrix} d \\ q \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

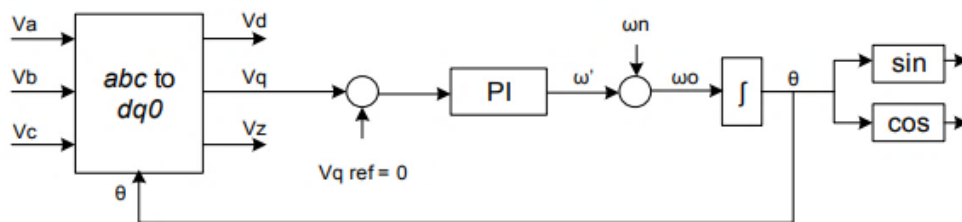
Donde, por medio de las identidades trigonométricas se obtiene la ecuación 2.4.

$$\begin{bmatrix} d \\ q \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \theta) \\ \sin(\omega t - \theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Al enclavarse el PLL,  $\theta = \omega t$ , por lo cual el vector del eje de cuadratura (q) se representa con la ecuación 2.5.

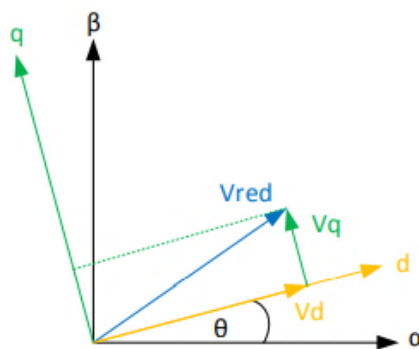
$$q \approx (\omega t - \theta) \quad (2.5)$$

Para que el SPLL-SRF obtenga el ángulo de la red, se sigue el procedimiento del diagrama de bloques de la Figura 29, y el procedimiento detallado.



**Figura 29.** Diagrama de bloques el lazo de enclavamiento de fase por medio de software en el marco de referencia rotatorio [3]

Para el programa de lazo de enclavamiento de fase el voltaje de referencia en el eje de cuadratura es  $V_{q_{ref}}$ .



**Figura 30.** Voltajes de la red representados en los ejes  $\alpha\beta$  y dq [3]

Como se observa en la Figura 30, cuando se logra que el voltaje del eje q sea cero, el voltaje de la red se alinea al eje d. En este punto donde el  $V_q = 0$  el PLL queda enclavado.

Por medio de la función de transferencia del SPLL-SRF se logra calibrar el controlador PI, como indica la ecuación 2.6 [3]:

$$H(s) = \frac{\theta_{salida}(s)}{\theta_{entrada}(s)} = \frac{v_{red} * \left( k_p * s + \frac{k_p}{T_i} \right)}{s^2 + v_{red} * k_p * s + v_{red} * \frac{k_p}{T_i}} \quad (2.6)$$

A partir de la ecuación anterior se obtienen los parámetros  $k_p$  y  $k_I$ , tomando en cuenta que se asume un  $v_{red} = 1$ .

Bajo ciertas consideraciones se escoge un factor de amortiguamiento  $\zeta = 0.7$  y un  $\omega_n = 40 \frac{rad}{s}$ , este ultimo valor se lo escoge tomando en cuenta que debe ser un valor bajo para de esta manera obtener un ancho de banda estrecho y con aun gran rechazo al ruido [3].

Con estos datos se puede calcular la constante de tiempo integral del controlador y con este las constantes  $k_p$  y  $k_I$  del controlador, tal como se muestra en las ecuaciones 2.7, 2.8 y 2.9.

$$T_i = \frac{2 * \zeta}{\omega_n} \quad (2.7)$$

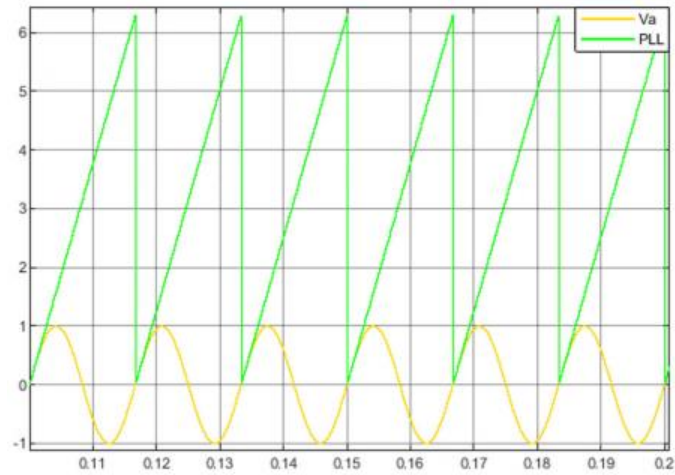
$$k_p = \omega_n^2 * T_i \quad (2.8)$$

$$k_I = \frac{k_p}{T_i} \quad (2.9)$$

Donde se tiene que  $k_p = 56$  y  $k_I = 1600$ . Al considerar que la frecuencia de conmutación es de 6 kHz se obtienen  $B_0 = 56,1333$  y  $B_1 = -55,8667$ . De acuerdo con la Figura 30, el accionamiento de control tiene el nombre de  $\omega'$ . La variación de  $\omega$  se la suma con  $\omega_{red} = 2\pi * f_{red}$ , donde dicho resultado  $\omega_0$  se acumula por medio de un integrador de modo que se obtiene la ecuación 2.10 [3].

$$\theta = \theta_{n-1} + \omega_0 * T_s \quad (2.10)$$

De este modo para que el ángulo que se obtiene no aumente hasta el infinito, se pone un límite en salida de  $\theta$  hasta que obtenga un valor de  $2\pi$ , luego de esto se reinicia esta variable en el microcontrolador, así se obtiene la forma de onda presentada en la Figura 31 [3].



**Figura 31.** Salida del PLL se encuentra en fase con el voltaje de la fase  $a$  [3]

Cuando el ángulo de la red se encuentra en fase con el voltaje de la red en la fase  $a$ , se puede decir que se ha enclavado el PLL.

# 3 PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 3.1 PRUEBAS Y RESULTADOS

### 3.1.1 FACTIBILIDAD DE OPERACIÓN EN PARALELO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO CON LA RED ELÉCTRICA DE LA EEQ

#### 3.1.1.1 Límites operativos del generador fotovoltaico

Los límites se calculan en base a una irradiancia de  $1000 \frac{W}{m^2}$  y una temperatura de 25 °C, debido a que son las condiciones a las que son obtenidos los datos de placa de los módulos fotovoltaicos tanto los valores de cortocircuito, como los de circuito abierto.

**Tabla 14.** Datos del panel solar Yingli YL250P-29b

<b>TABLA DE DATOS DEL PANEL YINGLI YL250P-29b</b>	
Potencia nominal	250 W
Voltaje de circuito abierto	38,4 V
Corriente de cortocircuito	8,79 A
Voltaje a máxima potencia	30,4 V
Corriente a máxima potencia	8,24 V
Temperatura de operación	46°C

#### 3.1.1.1.1 Límites de voltaje

El inversor de potencia es el encargado de establecer las limitaciones de voltaje en DC debido a su funcionamiento.

El voltaje DC mínimo ( $v_{min}$ ) que acepta el inversor que se presenta en la ecuación 3.1, permite que el voltaje AC esté dentro de los valores permitidos de la red.

$$v_{min} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * V_{a'b'}; V_{a'b'} = 32 \quad (3.1)$$

Donde:

$V_{a'b'}$ , voltaje línea a línea del inversor.

Si el inversor se encuentra trabajando en el MPP, se determina que la irradiancia solar mínima aceptada para que se mantenga el voltaje sobre el valor mínimo, se calcula con la ecuación 3.2 [5].

$$G_{min} = \left( \frac{v_{dcmin} - v_{ocstc}}{k_v} + 25 - T_a \right) * \frac{800}{N_{oct} - 20} \quad (3.2)$$

Donde:

$G_{min}$ , irradiación solar mínima.

$v_{dcmin}$ , voltaje mínimo del arreglo de paneles.

$v_{ocstc}$ , voltaje de circuito abierto en condiciones de prueba estándar.

$T_a$ , temperatura ambiente.

$k_v$ , factor de corrección del voltaje, idealmente se toma el valor de 1.

$N_{oct}$ , temperatura normal de funcionamiento de la celda solar.

Además de calcular el voltaje mínimo, también es necesario calcular el voltaje máximo ( $v_{max}$ ), este valor depende del voltaje de cortocircuito ( $v_{oc}$ ) en la conexión de paneles en serie con la que cuente el arreglo. Este valor de voltaje  $v_{oc}$  depende de la temperatura mínima posible en el lugar de la instalación. Estas limitaciones se describen en las ecuaciones 3.3 y 3.4 [5].

$$v_{ocmax} = v_{ocstc} + k_v * \left( T_{amin} + G_{min} * \frac{N_{oct} - 20}{800} - 25 \right) \quad (3.3)$$

$$v_{max} = V_{ocmax} * N_{serie} \quad (3.4)$$

Donde:

$N_{serie}$ , número de paneles en serie.

$T_{amin}$ , Temperatura mínima del lugar de la instalación. 10°C.

### 3.1.1.1.2 Límites de corriente

Estos límites de corriente DC dependen de manera específica de las características del panel y la irradiación solar. La corriente máxima  $i_{dcmax}$ , depende de la irradiación solar y la corriente de cortocircuito del panel  $i_{sc}$  y se describe en la ecuación 3.5 [5].

$$i_{dcmax} = i_{scstc} * \frac{G_{max}}{G_{stc}} * N_{paralelo}; G_{max} = G_{stc} = 1000 \frac{W}{m^2} \quad (3.5)$$

Donde:

$i_{scstc}$ , corriente de cortocircuito en condiciones de prueba estándar.

$N_{paralelo}$ , número de paneles en paralelo.

### 3.1.1.1.3 Límites de potencia activa

La curva PV que se indica en la Figura 7, indica cómo se comporta la potencia con respecto al voltaje DC, para esto se definen tres límites:  $P_{dcvmin}$ ,  $P_{dcvmpp}$  y  $P_{dcvmax}$ , que se indican en las ecuaciones 3.6, 3.7 y 3.8 respectivamente, donde el valor de potencia mínimo se encuentra en la parte izquierda de la curva, la potencia máxima se obtiene cuando en voltaje DC es igual al voltaje  $v_{mpp}$  para cada irradiación solar. El punto final es el de la potencia  $P_{dcvmax}$  que es cuando el voltaje DC es igual al voltaje de circuito abierto. En la Figura 32, se indican los puntos a analizar [5].

$$P_{dcvmin} = v_{min} * I_{dc} \quad (3.6)$$

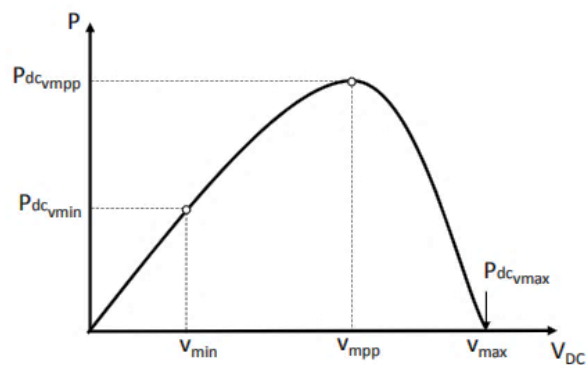
$$P_{dcvmpp} = V_{mpp} * I_{dc} \quad (3.7)$$

$$P_{dcvmax} = v_{max} * I_{dc} \quad (3.8)$$

Con las condiciones de irradiancia y temperatura mencionados, se puede extraer la máxima potencia posible ( $P_{maxarray}$ ) que se extrae del campo fotovoltaico con la mayor irradiancia y la menor temperatura en la que se encuentra la instalación. Aquí se describe la potencia del inversor trifásico con un exceso del 25 % con las ecuaciones 3.9 y 3.10 [5].

$$P_{maxarray} = V_{mpp} * I_{dc} \quad (3.9)$$

$$P_{maxinverter} = 1,25 * P_{maxarray} \quad (3.10)$$



**Figura 32.** Potencia vs Voltaje en el lado de corriente continua, puntos a analizar [5]

### 3.1.1.1.4 Resultados de los límites de operación del generador fotovoltaico

En la Tabla 15, se indican los límites de operación del generador fotovoltaico.

**Tabla 15.** Límites de operación del generador fotovoltaico

<b>LÍMITES DE VOLTAJE</b>	
$v_{min}$	52,25 V
$G_{min}$	689,23 $\frac{W}{m^2}$
$v_{ocmax}$	45,8 V
$v_{max}$	91,6 V
<b>LÍMITES DE CORRIENTE</b>	
$i_{dcmax}$	8,79 A
<b>LÍMITES DE POTENCIA</b>	
$P_{dcvmin}$	459,32 W
$P_{dcvmpp}$	536,19 W
$P_{dcvmax}$	805,164 W
$P_{maxarray}$	536,19 W
$P_{maxinverter}$	670,23 W

### 3.1.1.2 Procedimiento para la operación en paralelo del generador fotovoltaico con la red eléctrica de la EEQ

Como es en el caso de operación en paralelo de dos generadores, es un procedimiento similar para operar en paralelo un generador con la red eléctrica como se indica a continuación:

1. El voltaje del generador debe ajustarse de manera que se iguale al voltaje de la red e incluso este sea superior, en ningún caso este voltaje debe ser inferior.
2. Como se trata de un ajuste a la red la secuencia de fases debe ser la misma.
3. La frecuencia del generador debe ser de 60 Hz incluso se requiere que sea un valor ligeramente superior a la frecuencia de la red.
4. Cuando la fase de los voltajes del generador y la red sean iguales, el sistema puede entrar en sincronismo, para el caso particular del generador fotovoltaico existe un pequeño desfase de aproximadamente 2°.

Al realizar las pruebas podemos ver ciertas circunstancias que perjudican el funcionamiento del generador fotovoltaico, lo primero es que si en el día no hay las condiciones adecuadas de irradiancia y temperatura, este no podrá conectarse en paralelo a la red, y en el caso de forzar la conexión podrían generarse corrientes grandes que dañen los elementos, lo otro es el caso en el que no está a las condiciones mencionadas, el generador no podrá trabajar a su mejor capacidad por lo cual se tendrán resultados muy pobres.

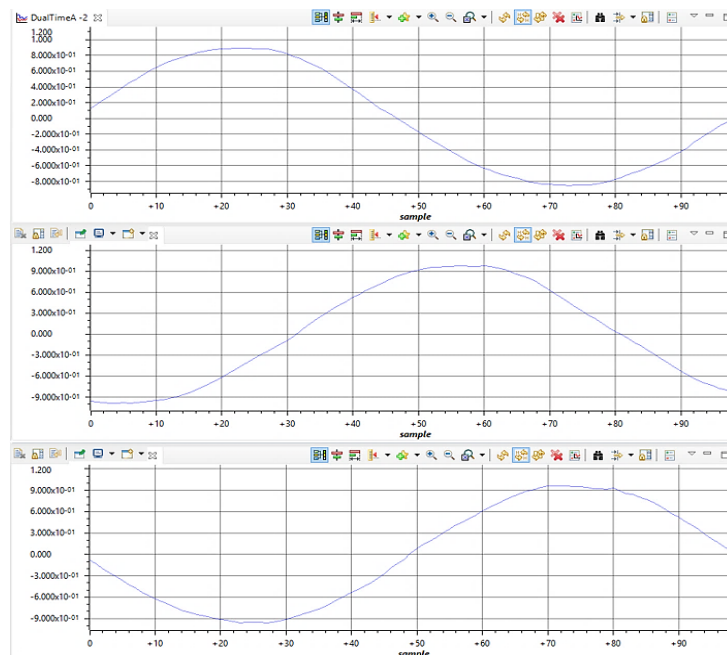


El procedimiento de operación en paralelo del generador fotovoltaico con la red eléctrica de la EEQ se detalla mejor en el Anexo 1.

### 3.1.2 OPERACIÓN EN PARALELO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO CON LA RED ELÉCTRICA DE LA EEQ

En la sección 2.5.1, se mencionan las condiciones que debe cumplir el sistema para que este se pueda conectar en paralelo a la red eléctrica, en esta sección se verificarán las condiciones requeridas por medio del sistema de control.

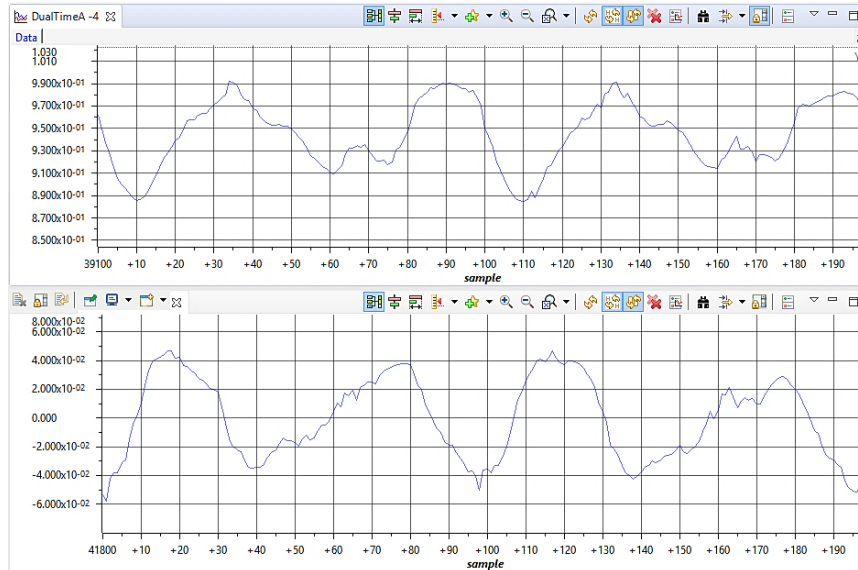
Para verificar el funcionamiento del PLL se deben tomar en cuenta los voltajes de las tres fases de la red. De manera que en la Figura 33, se muestran las señales de voltaje ABC adquiridas por los sensores, las cuales son procesadas por medio del software Code Composer Studio, y se encuentran normalizadas a un valor de 1.



**Figura 33.** Voltajes ABC de la red medidos por los sensores de voltaje

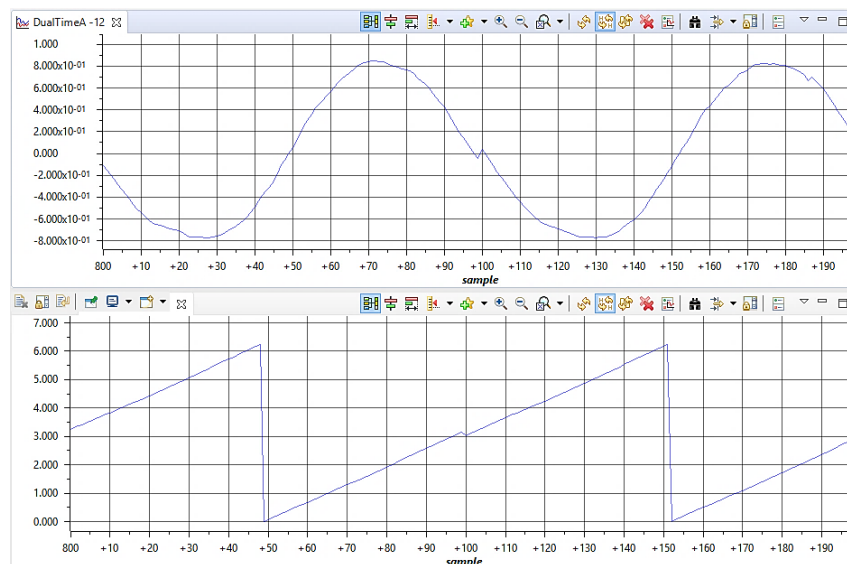
Para obtener de manera correcta los ángulos de los voltajes de la red, se tiene la condición de que el voltaje del eje q debe ser cero, por lo cual a los voltajes se les aplica la transformada directa de Park.

En la Figura 34, se muestra los valores deseados de los voltajes del eje directo y eje de cuadratura que son aproximadamente de 1 y 0 respectivamente, aquí se puede ver oscilaciones debido a que existe desbalances en el voltaje de la red y en la adquisición de datos de los sensores.



**Figura 34.** Voltajes del eje directo y de cuadratura respectivamente

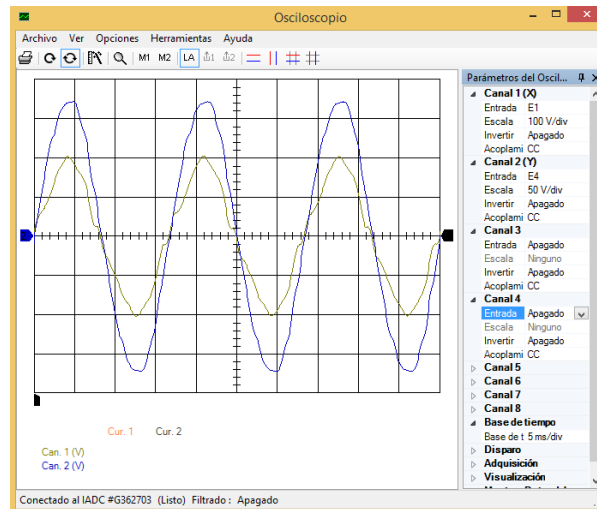
Por medio del PLL se obtiene el ángulo del vector posición de voltaje, en la Figura 35, se observan el ángulo cuyo rango es de  $0$  a  $2\pi$  y el voltaje obtenido con el PLL con referencia en la fase A. Aquí se puede evidenciar la precisión con la cual el PLL se encarga de adquirir el ángulo del vector posición, de manera que el conteo siempre inicie en el mismo punto de la fase A y su referencia no se pierda con respecto a la frecuencia de la red.



**Figura 35.** Angulo del vector posición del voltaje que se obtiene a partir de PLL referente a la fase A

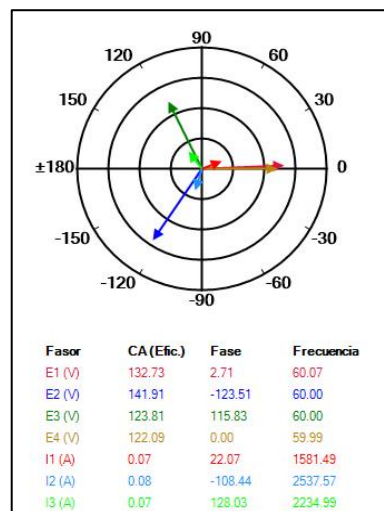
En la Figura 36, se observa como el voltaje de la fase A en la salida del inversor se encuentra en fase con el voltaje de la fase A de la red eléctrica, en un día con las condiciones suficientes de irradiancia y temperatura, el voltaje a la salida del inversor es

mayor que el voltaje de la red, lo que determina una de las condiciones a cumplir para la conexión del generador fotovoltaico a la red. Esta condición se logra debido a que el PLL alinea el vector de voltaje en el marco de referencia sincrónico con el eje directo.



**Figura 36.** Voltaje de la fase A del inversor (azul) y fase de la fase A de la red (dorado)

En la Figura 37, por medio de una herramienta de análisis fasorial incluida en el programa LVDAAC-EMS se pueden observar los fasores de los voltajes de las fases ABC del sistema fotovoltaico. Se puede observar cómo los voltajes se encuentran desfasados  $120^\circ$  en el lado del inversor y en fase con los voltajes de la red.

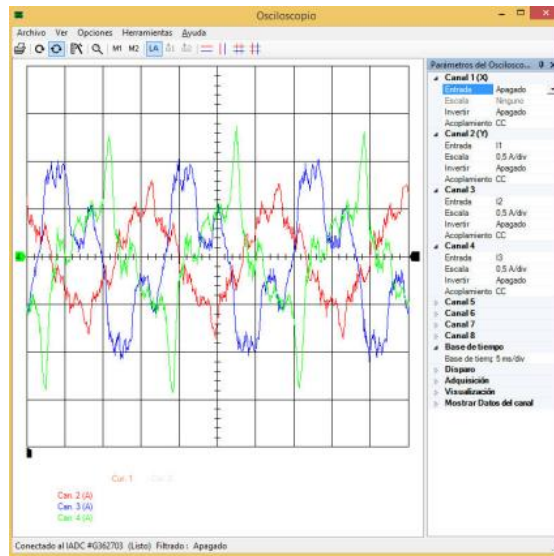


**Figura 37.** Fasores de voltaje de las fases del inversor ABC en la salida del transformador (rojo, verde y azul) y el fasor de voltaje de la fase A de la red (dorado)

Cuando el generador fotovoltaico se encuentra conectado a la red, el sistema de control se encarga de inyectar la potencia activa generada hacia la red, esta inyección de potencia

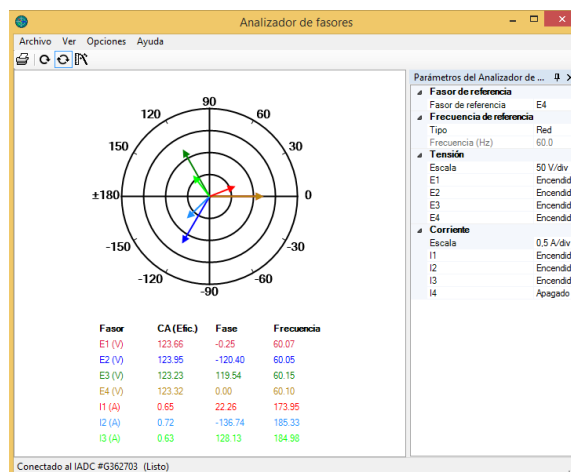
se encuentra asociada a la referencia de la corriente del eje directo, por medio del algoritmo MPPT, por otro lado debido a que la potencia reactiva se asocia al eje de cuadratura, esta se mantiene en cero.

En la Figura 38, se puede observar las corrientes inyectadas hacia la red, la distorsión armónica que se observan en las formas de onda de debe a las perturbaciones por la conexión a la red.



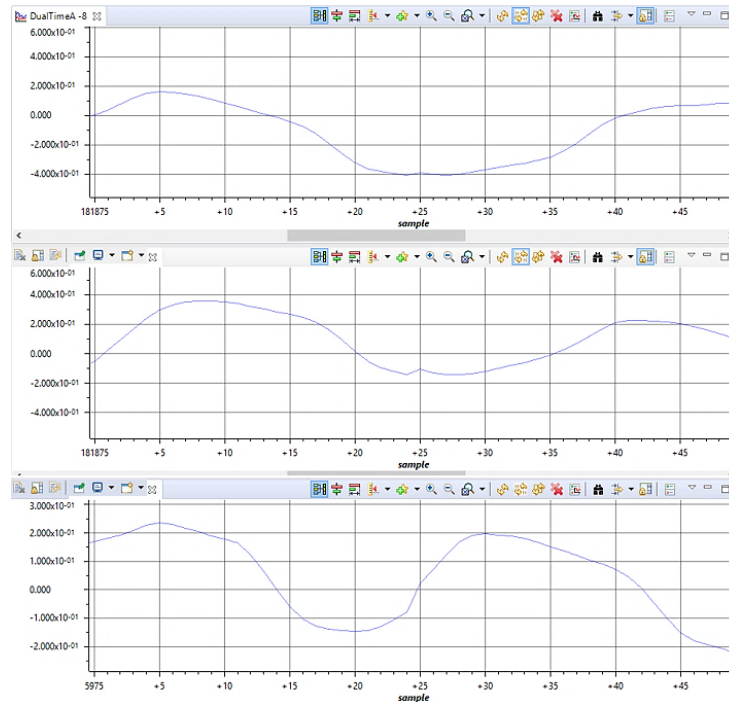
**Figura 38.** Corrientes inyectadas desde el generador fotovoltaico a la red

En la Figura 39, se puede observar los fasores de corriente inyectados a la red, con lo cual se puede determinar que el rendimiento del sistema implementado es satisfactorio con un factor de potencia igual a la unidad.



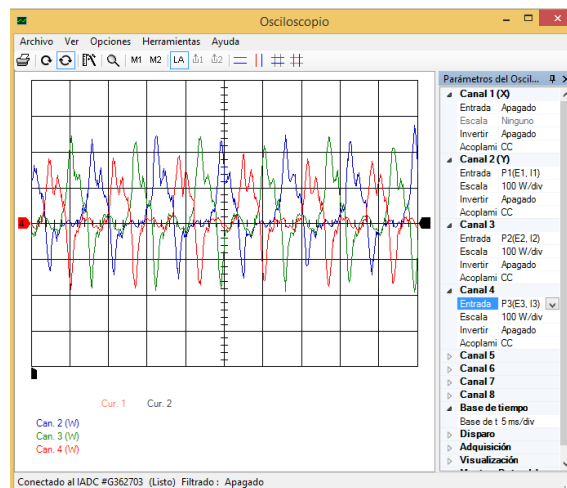
**Figura 39.** Fasores de corriente inyectadas a la red, respecto a los voltajes en la salida del transformador

Para poder realizar el lazo de control, es necesario que el sistema de control tenga lectura de las corrientes de las fases ABC, por lo cual los sensores se encargan de tomar estas medidas por medio del software Code Composer Studio, donde son graficadas como se puede observar en la Figura 40.



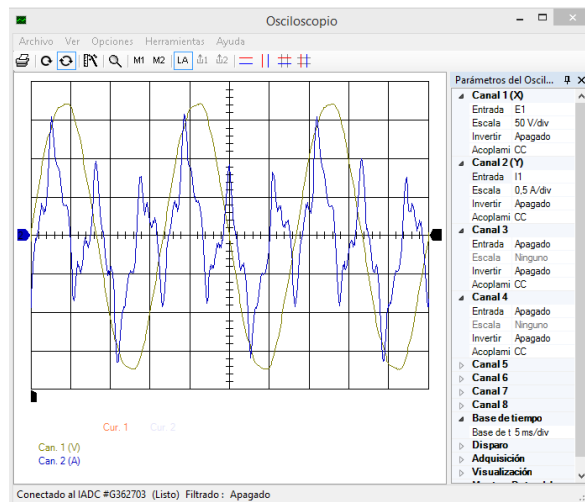
**Figura 40.** Corrientes inyectadas a la red, leídas por los sensores en el Software Code Composer Studio

En la Figura 41, se puede observar la potencia activa inyectada a la red por medio del generador fotovoltaico, como se observa estas potencias se encuentran desfasadas a manera que entregan en cada fase de la red.



**Figura 41.** Potencia activa inyectada a la red

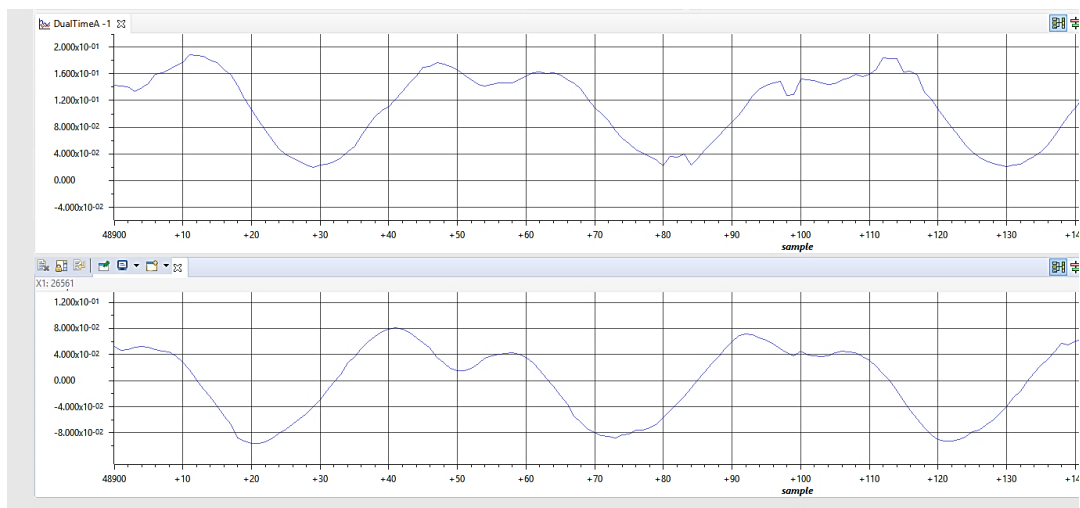
En la Figura 42, se observa como el generador fotovoltaico opera con un factor de potencia cercano a la unidad, aquí se toma la referencia en base al desfase de la señal de corriente.



**Figura 42.** Voltaje (negro) y corriente (azul), observación de un factor de potencia igual a

1

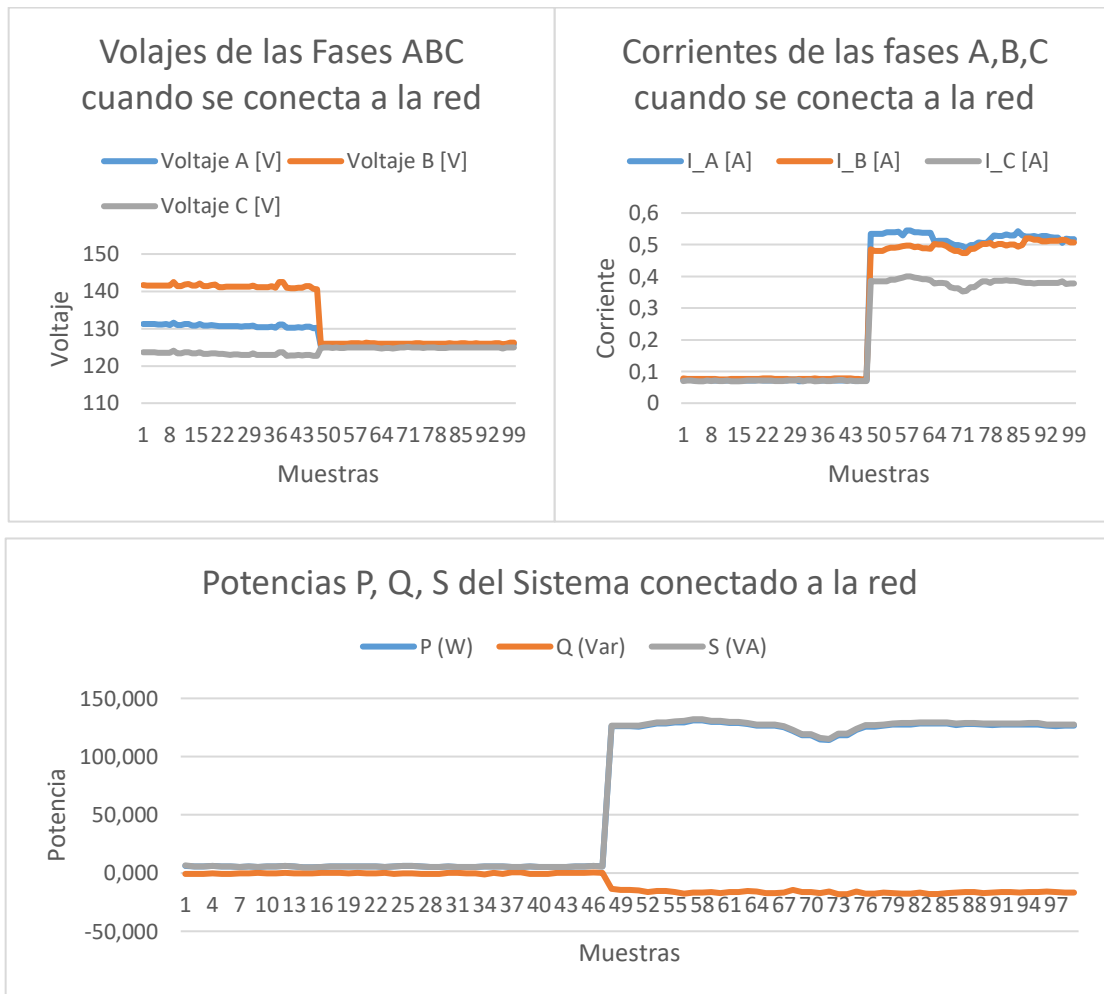
Debido a la transformación realizada en la etapa de control a un sistema de referencia rotatorio, se asocia a la potencia activa el eje d y a la potencia reactiva el eje q. En la Figura 43, se presentan las corrientes del eje d y q, donde toman los valores aproximados de 0,2 y 0 respectivamente.



**Figura 43.** Corrientes inyectadas a la red representadas por los ejes d y q

En la Figura 44, se observa el comportamiento del sistema cuando se conecta la red, tanto en los voltajes que se observa como el nivel de voltaje se iguala en todas las fases a un valor igual al voltaje de la red, en las corrientes se observa como al entrar en sincronismo estas aumentan lo que quiere decir que el sistema se encuentra inyectando corriente a la

red, de igual manera pasa con las potencias, el sistema se encuentra inyectando potencia activa a la red la cual viene directamente relacionada con la corriente del eje directo, por lo tanto la corriente reactiva se mantiene en valores negativos, lo que significa que el sistema se encuentra absorbiendo reactivos.



**Figura 44.** Gráficos de Voltajes, Corrientes y Potencia del Sistema cuando se conecta a la Red

### 3.1.3 OPERACIÓN DE FORMA AISLADA DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO

Para operar de manera aislada el generador fotovoltaico, hay que tomar en cuenta que el interruptor de interconexión a la red se encuentre abierto, sin desenergizar la barra 1 del Sistema Eléctrico de Potencia del Laboratorio ya que esta se encarga del switcheo de los IGBTs y mantiene en funcionamiento el PLL.

Para presentar la operación de del generador fotovoltaico de forma aislada se hacen pruebas con las cargas monofásicas del laboratorio, para esta circunstancia y debido a la

capacidad del generador se realizan la conexión a las cargas correspondientes a sistemas de iluminación de residencias, tanto como focos ahorradores y focos led, cuyos parámetros se encuentran en las Tablas 16 y 17 respectivamente.

**Tabla 16.** Datos de focos ahorradores

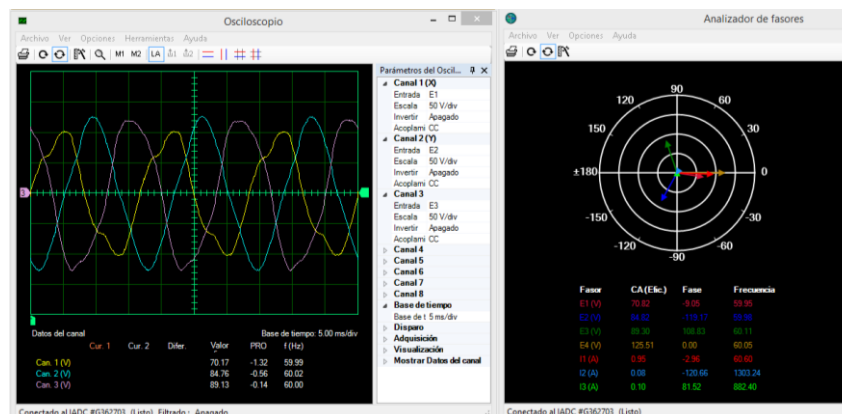
INTERRUPTOR 5				
FASE C	VARIABLES		ARMÓNICOS	
FOCOS AHORRADORES	P	16,54 W	1	-
	V	12,1 V	3	3
	I	0,25 A	5	15,6
	Q	6,89 VAR	7	10
	fp	0,52	9	5
	DC	0,1 %	11	7

**Tabla 17.** Datos de focos LED

INTERRUPTOR 6				
FASE C	VARIABLES		ARMÓNICOS	
FOCOS LED	P	10,09 W	1	100
	V	127 V	3	85,6
	I	0,131 A	5	62,7
	Q	5,246 Var	7	39,9
	fp	0,607	9	25,4
	DC	0,6 %	11	19,7

### 3.1.3.1 Focos ahorradores

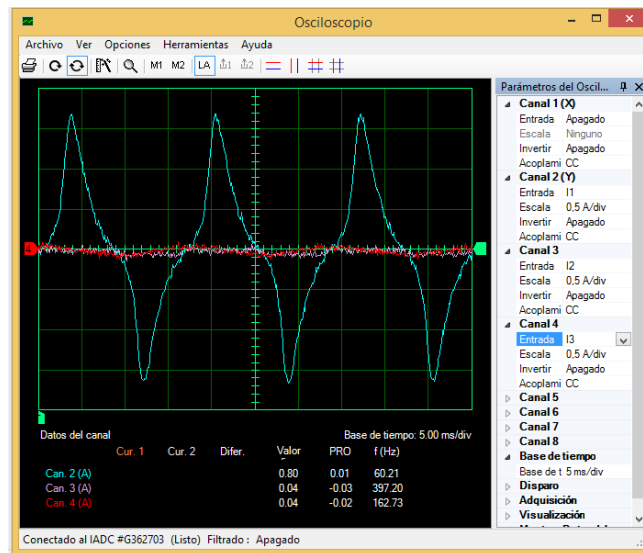
En esta prueba se utilizan focos ahorradores que en conjunto consumen 16,54 W a 12,1 V y 0,25 A, en la Figura 45, se puede observar las formas de onda de voltaje una vez que se han conectado los focos ahorradores, además los fasores de voltaje y corriente.



**Figura 45.** Formas de onda de voltajes y fasores de voltaje y corriente operando con los focos ahorradores

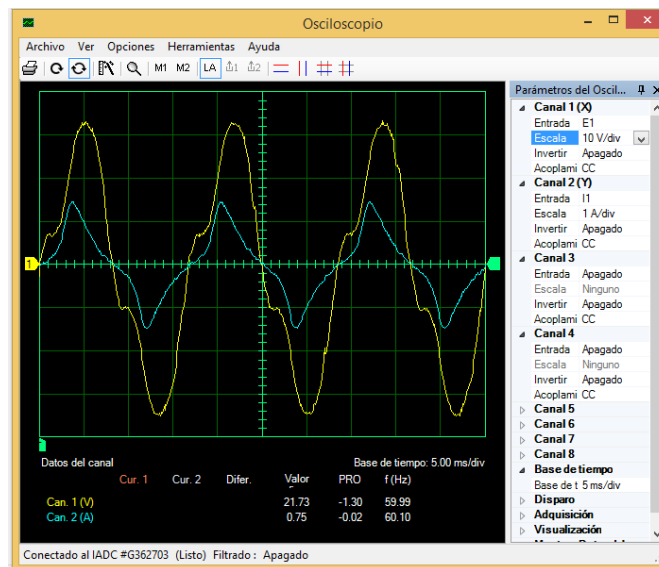


En la Figura 46, debido a que se trata de una carga monofásica, solo se observa la corriente en la fase A.



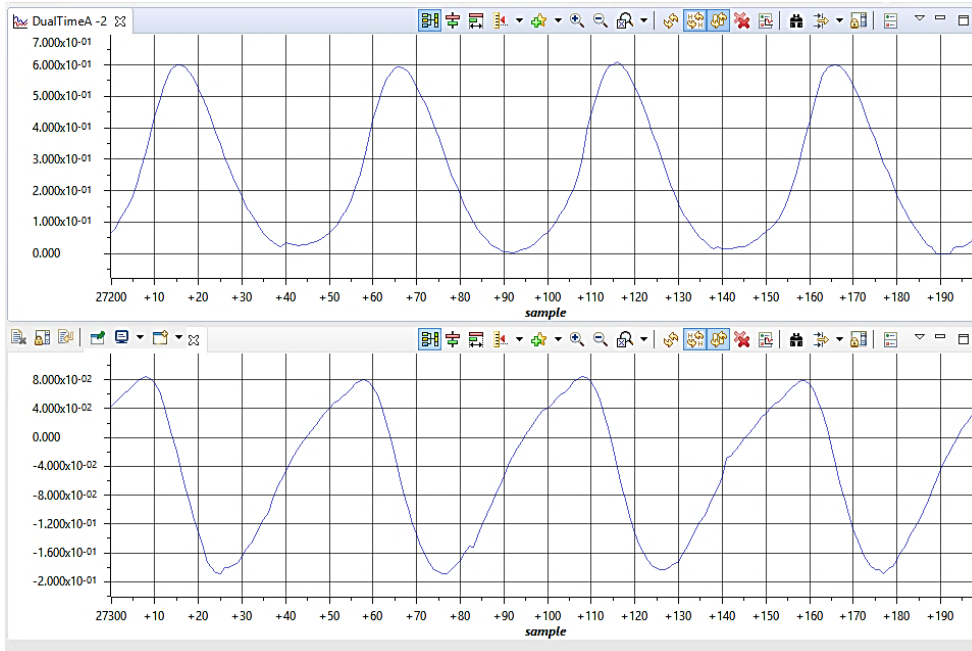
**Figura 46.** Forma de onda de la corriente de la fase A con focos ahorradores

La Figura 47, nos presenta las formas de onda de voltaje y corriente de la carga monofásica, aquí se puede observar cómo estos valores se encuentran en fase.



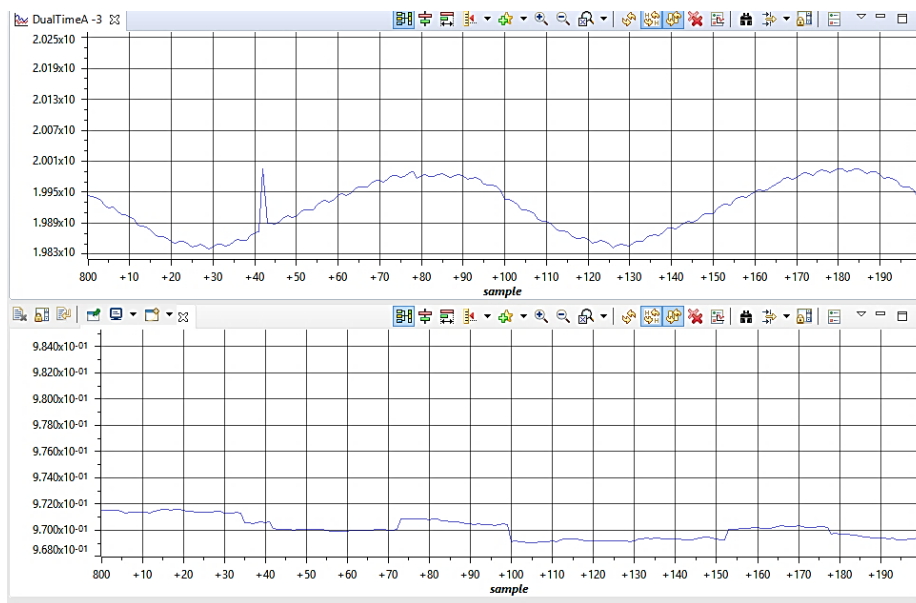
**Figura 47.** Forma de onda de voltaje y corriente con focos ahorradores

En la Figura 48, se observan las corrientes de los ejes directo y cuadratura respectivamente, aquí se verifica que el sistema cuando inyecta potencia reactiva, la corriente del eje directo toma valores mayores cero, mientras que la corriente del eje de cuadratura mantiene valores cercanos cero.



**Figura 48.** Formas de onda de las corrientes del eje directo y eje de cuadratura que se inyectan a la carga

La Figura 49, muestra lo que sucede con el voltaje y la corriente en DC del panel fotovoltaico, donde se puede ver que el voltaje se mantiene en 19,9 V y la corriente en 0,97 A.



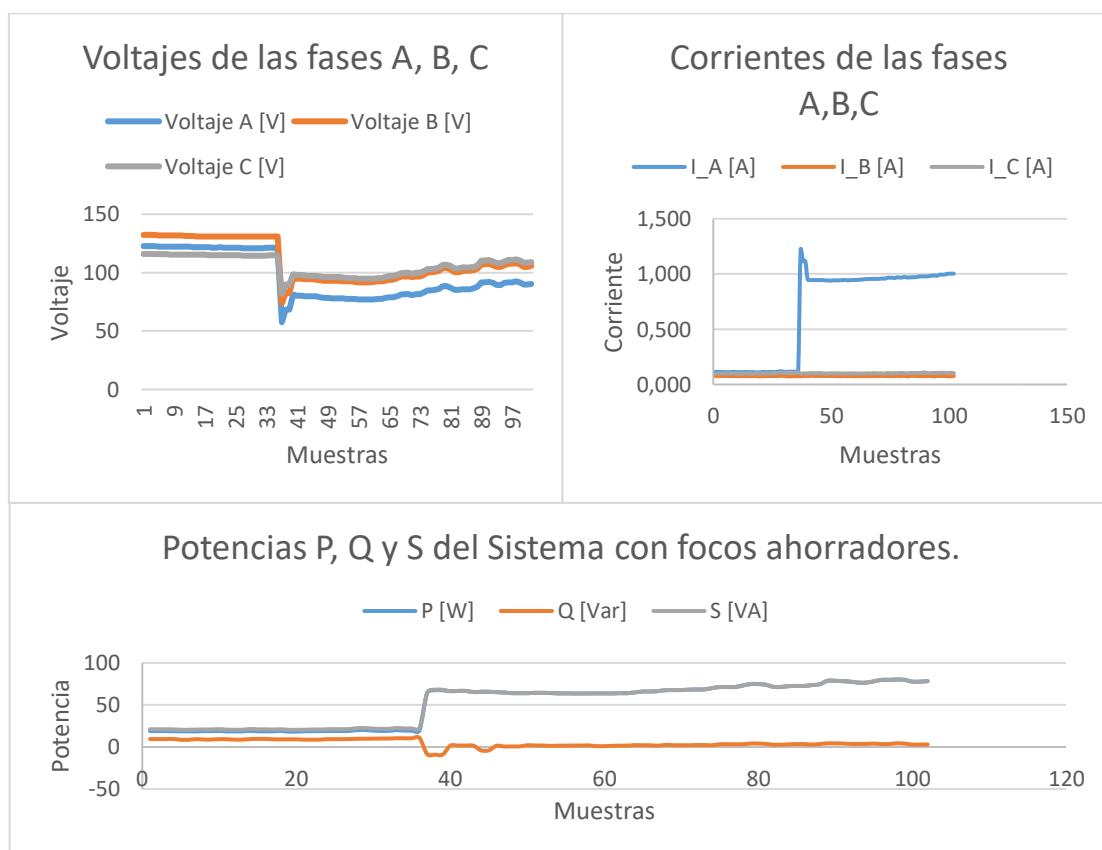
**Figura 49.** Voltaje y corriente DC al conectar los focos ahorradores

La Figura 50, muestra el funcionamiento correcto de los focos ahorradores como carga residencial.



**Figura 50.** Funcionamiento de los focos ahorradores

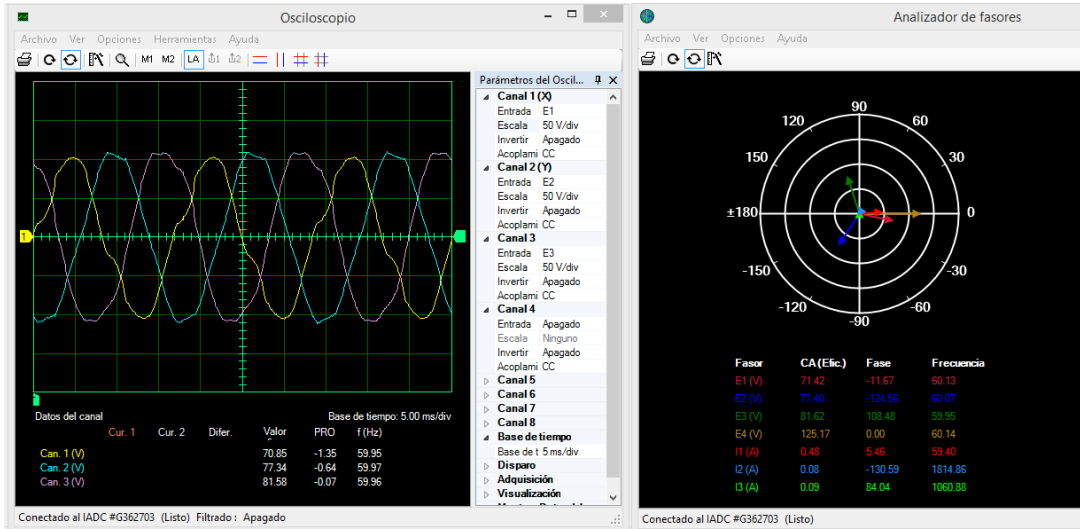
En la Figura 51, se presentan los gráficos de voltaje, corriente y potencia del sistema fotovoltaico cuando alimenta focos ahorradores, como se puede observar el voltaje cae debido al voltaje de las cargas, mientras como se trata de un grupo de cargas monofásico solo se inyecta corriente en la fase A, es ahí que se observa que la carga es de aproximadamente 1 A, mientras que en las potencias se puede observar que solo entrega potencia reactiva a la carga.



**Figura 51.** Gráficos de Voltajes, Corrientes y Potencia del Sistema cuando se alimenta focos ahorradores

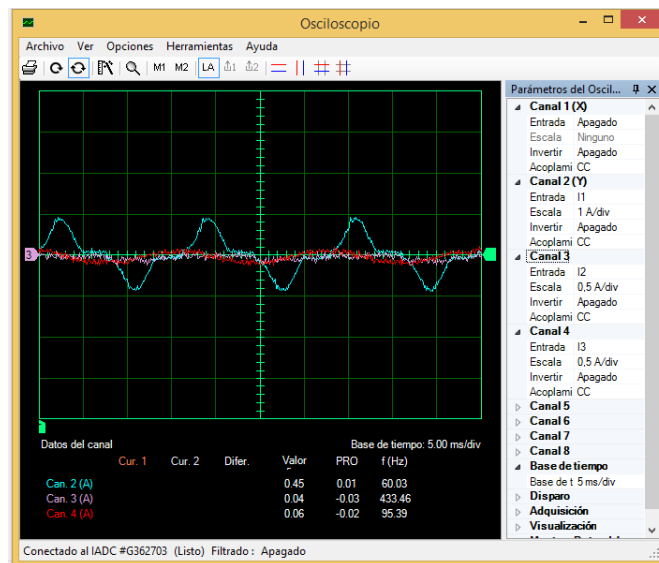
### 3.1.3.2 Focos LED

En esta prueba se utilizan focos ahorradores los cuales en conjunto absorben 10,09 W a 127 V y 0,31 A. En la Figura 52, se observa el comportamiento de los voltajes en y los fasores de voltaje y corriente al conectar los focos LED.



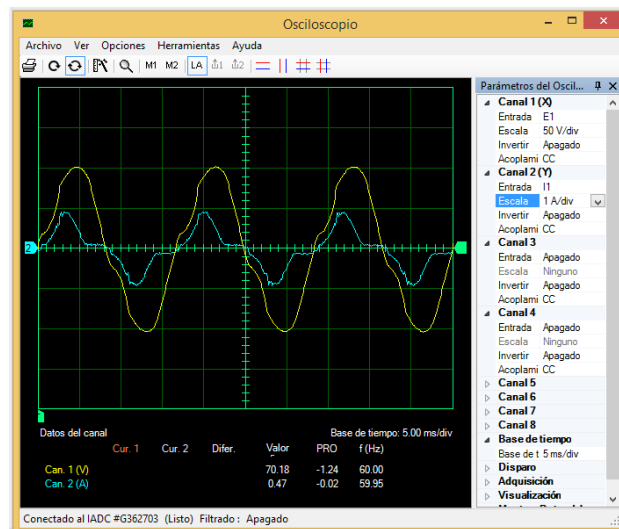
**Figura 52.** Formas de onda de voltajes y fasores de voltaje y corriente operando con los focos LED

La Figura 53, muestra la forma de onda de la corriente, tomando en cuenta de que los focos LED son una carga monofásica por lo cual la corriente indicada es de la fase A.



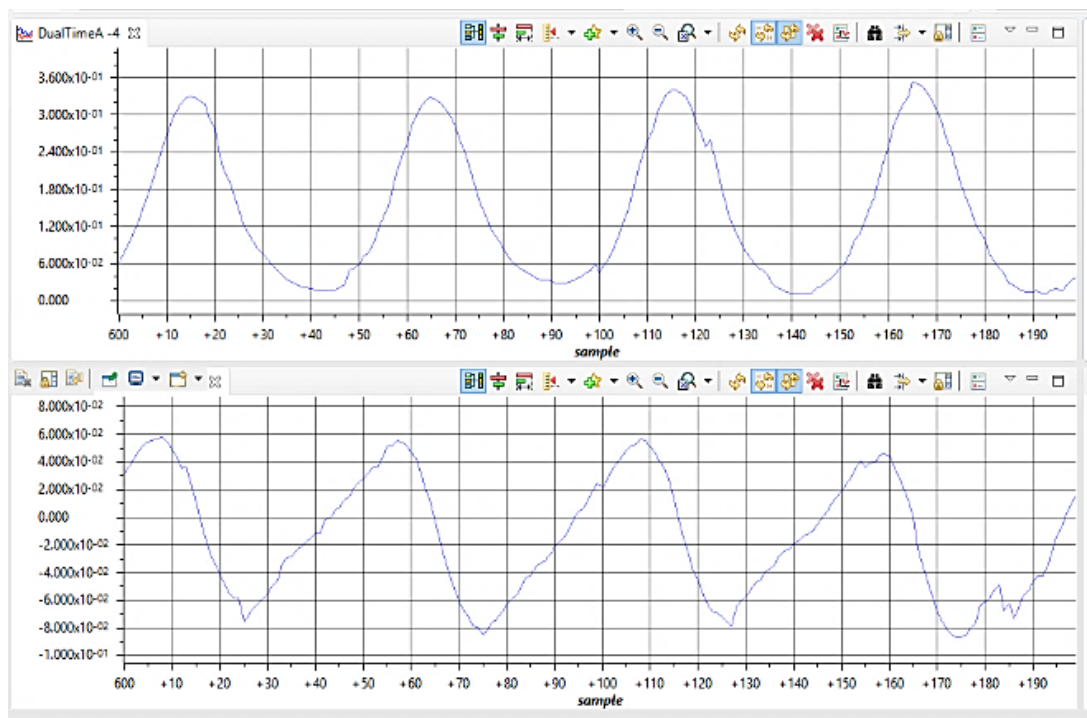
**Figura 53.** Forma de onda de la corriente de la fase A con focos LED

En la Figura 54, se observan el voltaje y la corriente en la corriente en la carga, como se puede ver se encuentran en fase.



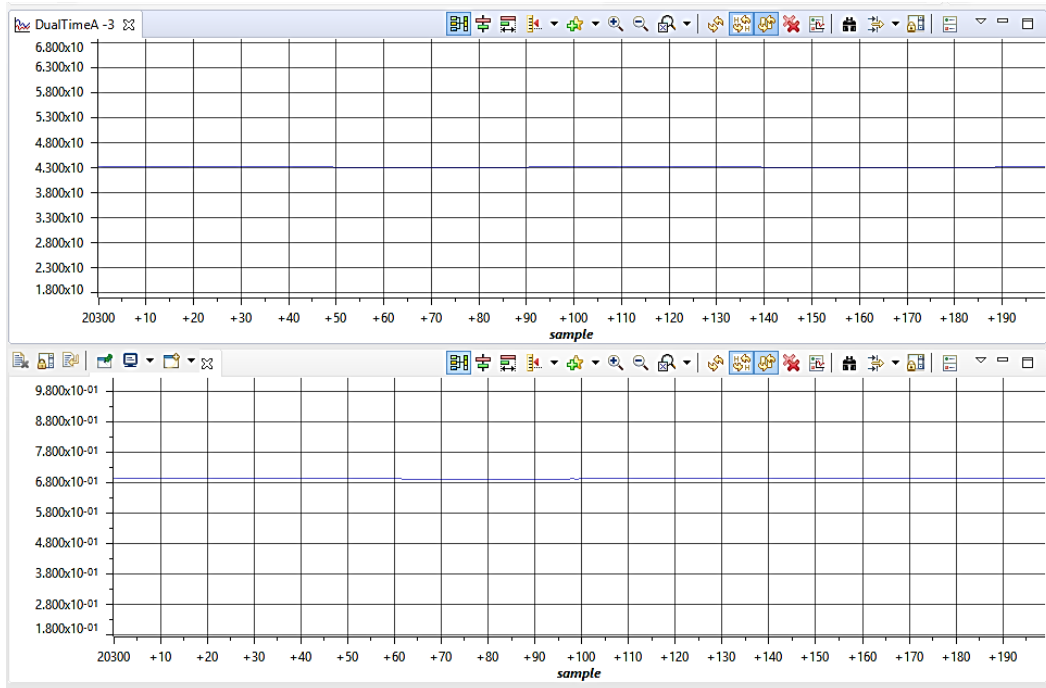
**Figura 54.** Forma de onda de voltaje y corriente con focos LED

En la Figura 55, se observan las corrientes de los ejes directo y cuadratura respectivamente, aquí se verifica que el sistema cuando inyecta potencia activa, la corriente del eje directo toma valores ligeramente mayores a cero, mientras que la corriente del eje de cuadratura mantiene valores cercanos a cero.



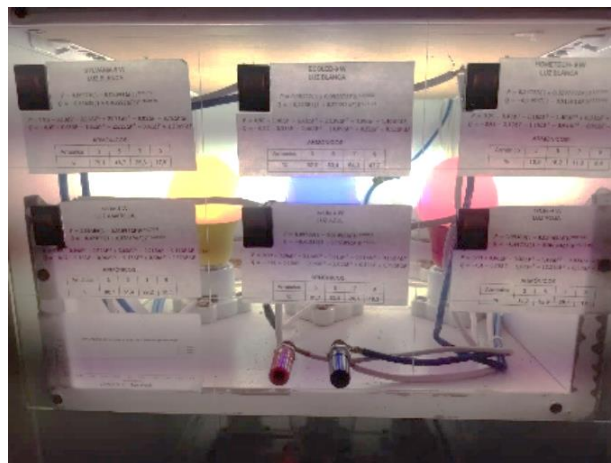
**Figura 55.** Formas de onda de las corrientes del eje directo y eje de cuadratura que se inyectan a la carga

La Figura 56, nos muestra lo que sucede con el voltaje y corriente DC del sistema fotovoltaico cuando se conectan los focos LED.



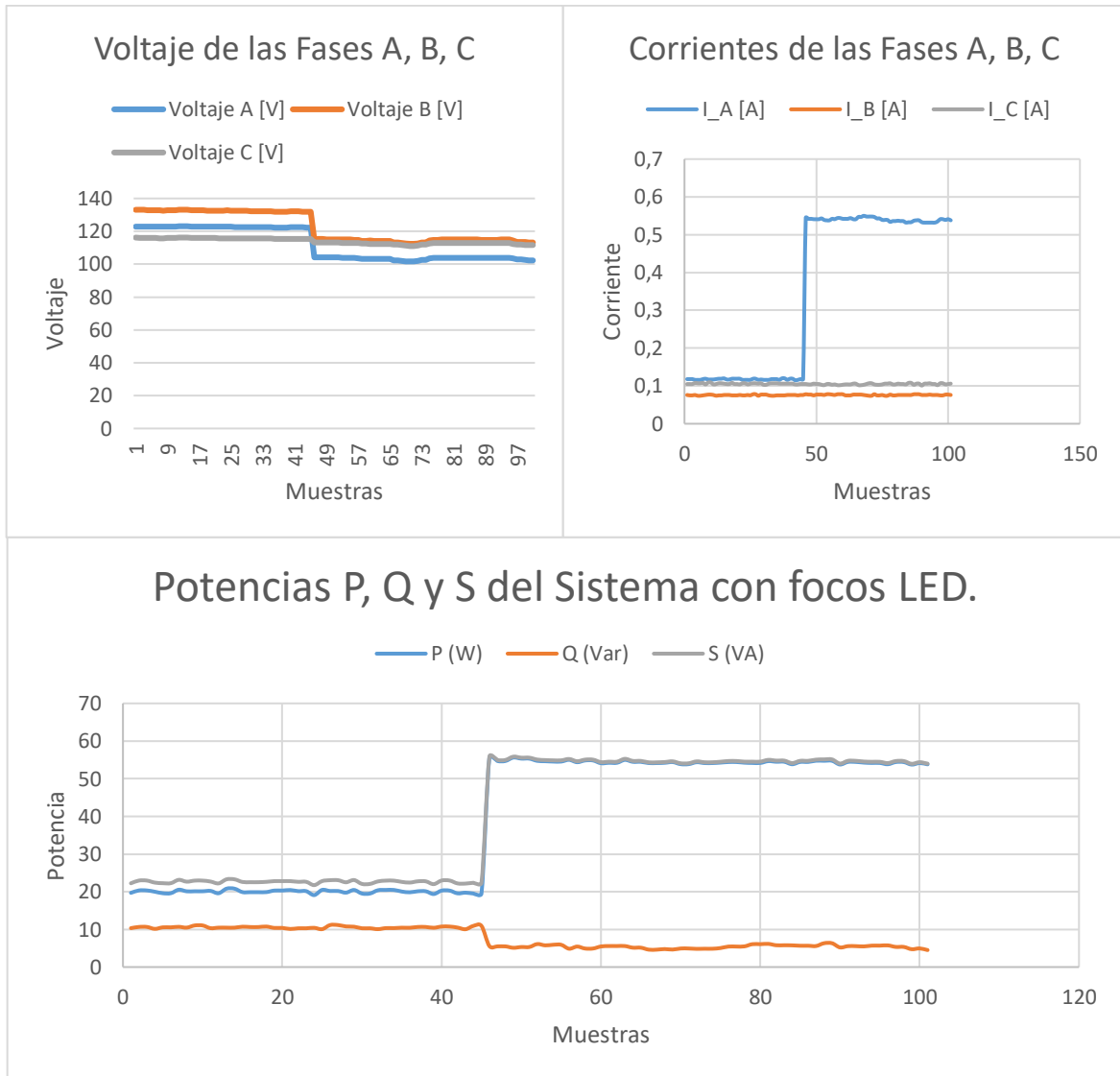
**Figura 56.** Voltaje y corriente DC al conectar los focos LED

La Figura 57, nos muestra el funcionamiento correcto de los focos LED como carga residencial.



**Figura 57.** Funcionamiento de los focos LED

Para el análisis de los gráficos de voltaje, corriente y potencia de la Figura 58, cuya carga son focos LED, se puede decir que los resultados son similares a la de los focos ahorradores ya que pertenecen al mismo grupo de cargas residenciales, con la diferencia del nivel de voltaje para el cual funciona cada uno.



**Figura 58.** Gráficos de Voltajes, Corrientes y Potencia del Sistema cuando se alimenta focos LED

### 3.1.4 ANÁLISIS DEL CONTENIDO ARMÓNICO DEL SISTEMA

En esta sección se observan los resultados y se analiza el contenido armónico de las formas de onda en las secciones analizadas en los resultados para las distintas maneras de operación del sistema.

Por medio del software del equipo LVDAC-EMS se puede observar el contenido armónico de las señales, mostrando el porcentaje de la distorsión armónica THD.

En la Figura 59, se puede observar la distorsión armónica de voltaje a la salida del filtro, esto es a la salida del transformador de acoplamiento a la red, debido a que su forma de onda es una onda senoidal pura, se puede ver que el THD es bajo, de 10,4 %.

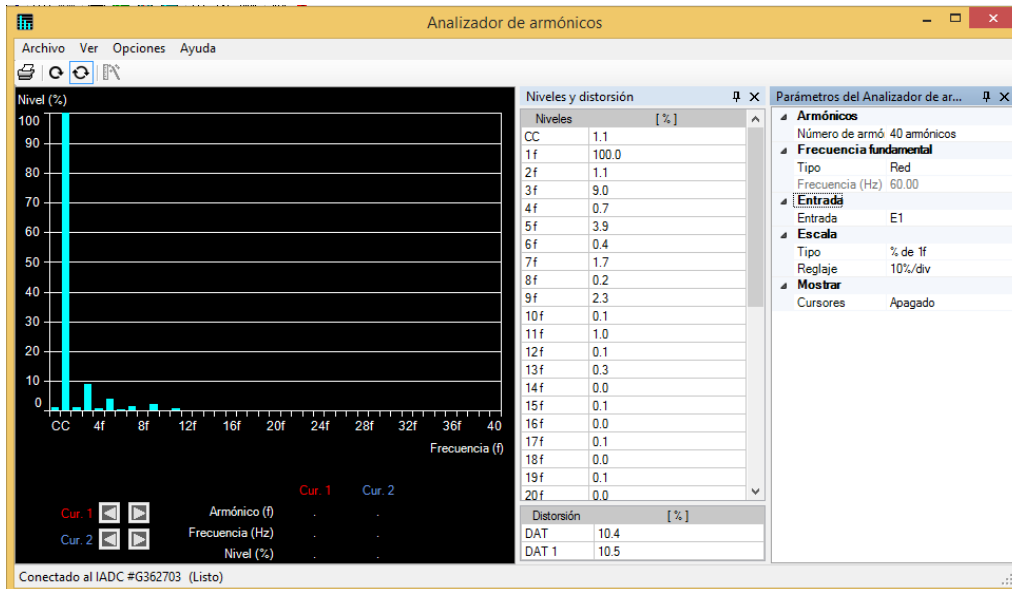


Figura 59. THD del voltaje en la salida del transformador de acoplamiento a la red

### 3.1.4.1 Operación en paralelo con la red Eléctrica Quito

En la Figura 60, se muestra la distorsión armónica total de voltaje cuando el generador fotovoltaico se encuentra operando en paralelo con la red eléctrica. El valor del THD de voltaje es 3,1 %.

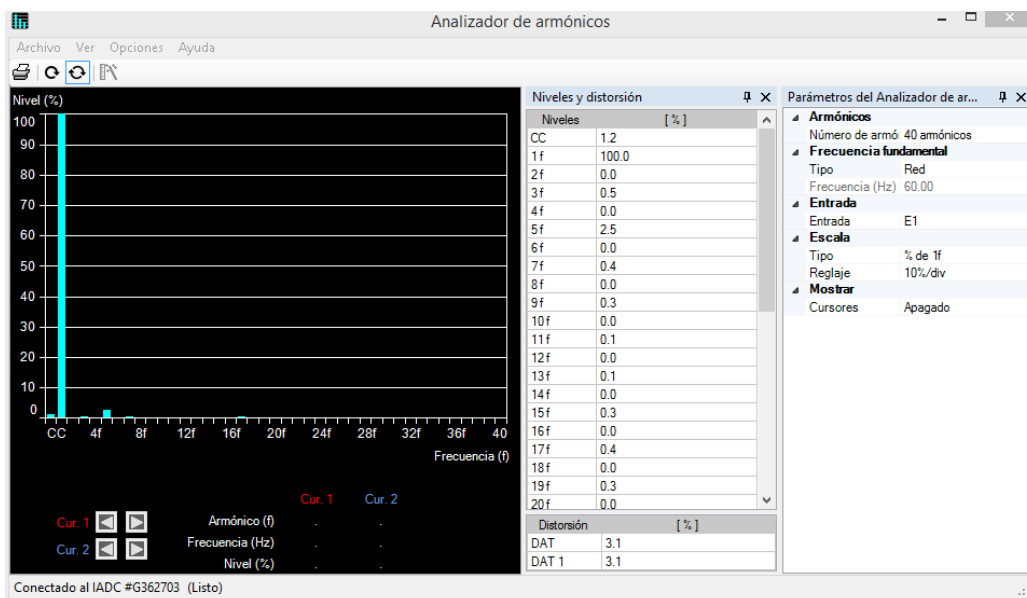


Figura 60. THD de voltaje cuando el sistema se encuentra en paralelo con la red

Ahora, se observa en la Figura 61, que la distorsión armónica total de corriente es un poco alta debido a las características de la red y a que el sistema de control es robusto.



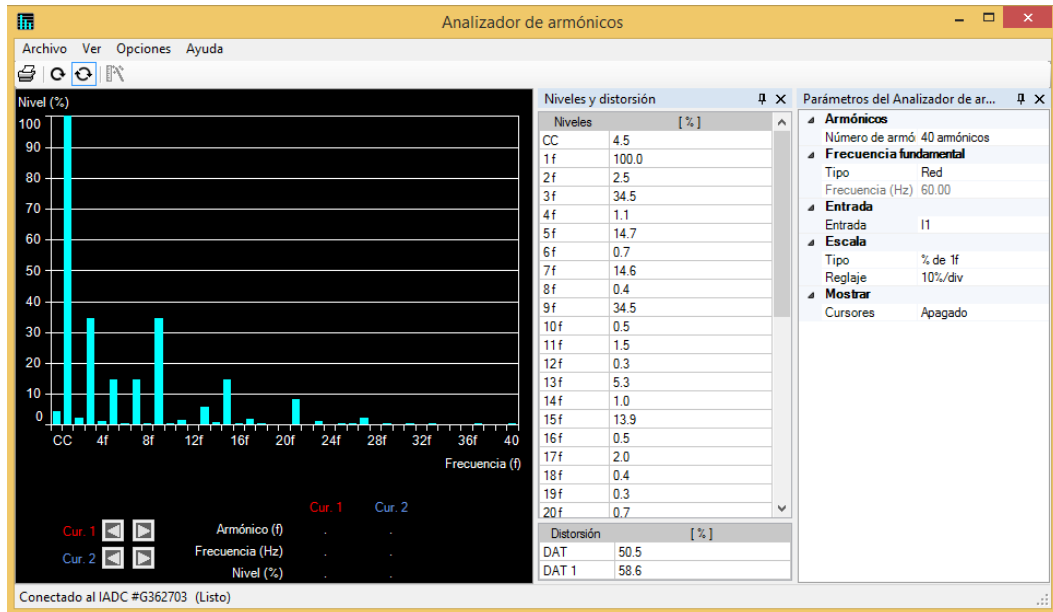


Figura 61. THD de corriente cuando el sistema se encuentra en paralelo con la red

### 3.1.4.1 Operación con cargas aisladas

#### 3.1.4.1.1 Focos ahorradores

En la Figura 62 y Figura 63, se puede observar el THD de voltaje y corriente generados por los focos ahorradores, dándonos los valores de 24,5 % y 29,2 % respectivamente.

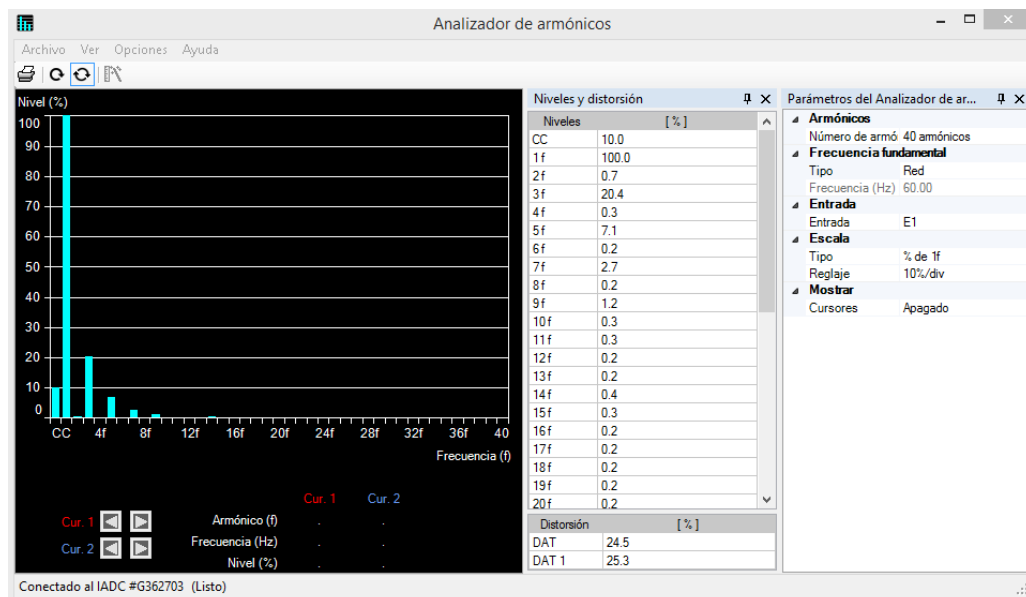


Figura 62. THD de voltaje con focos ahorradores

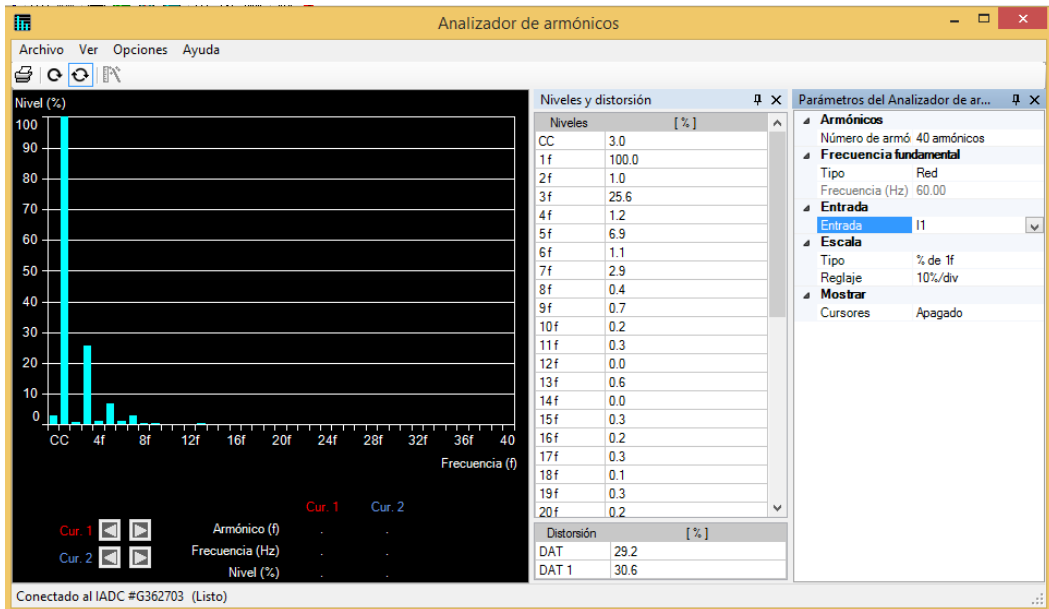


Figura 63. THD de corriente con focos ahorradores

### 3.1.4.1.2 Focos LED

En la Figura 64 y Figura 65, se puede observar el THD de voltaje y corriente generados por los focos LED, dándonos los valores de 12,4 % y 39 % respectivamente.

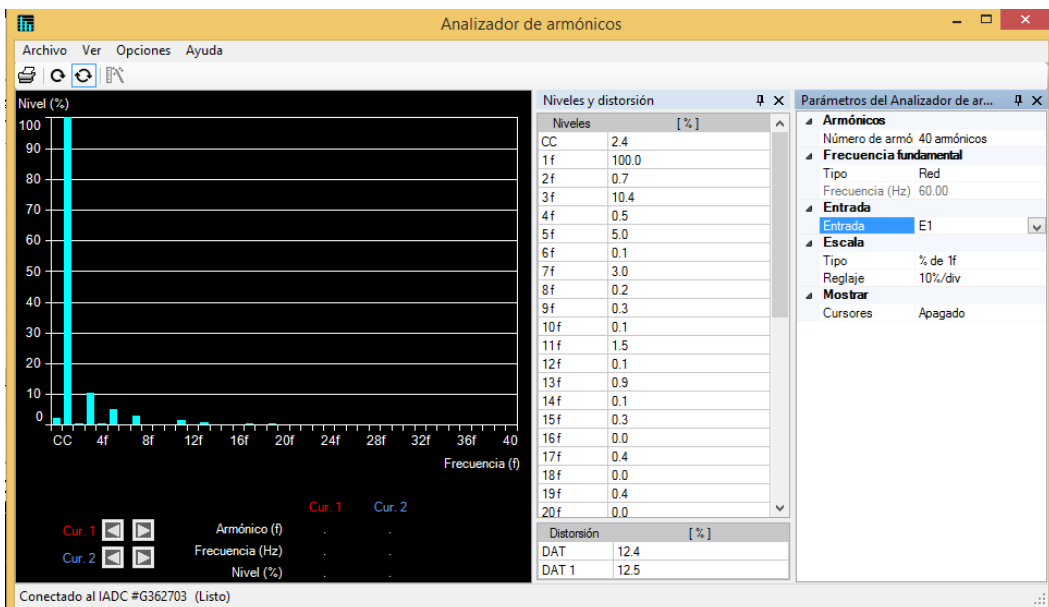


Figura 64. THD de voltaje con focos LED

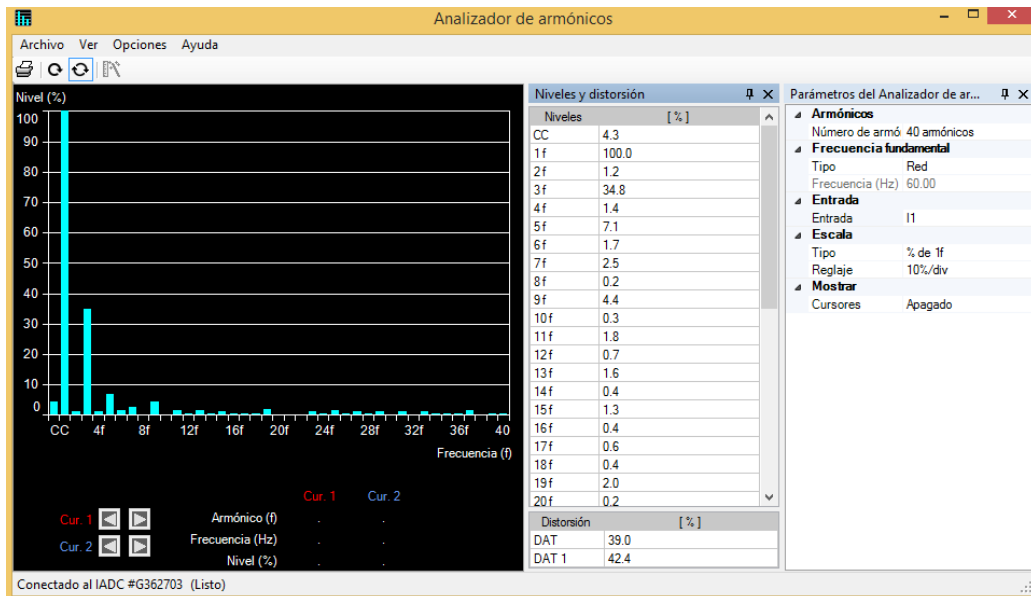


Figura 65. THD de corriente con focos LED

## 3.2 CONCLUSIONES

- El generador fotovoltaico del Laboratorio Físico de sistemas Eléctricos de Potencia cuenta con una serie de condiciones dentro del procedimiento para su encendido, condiciones sumamente importantes, tales como verificar que al energizar la barra 1 del laboratorio, antes de cerrar el interruptor de la barra DC, los valores de voltaje de los ejes directo y cuadratura se encuentre aproximadamente en 1 y 0 respectivamente.
- El algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia permite que los paneles solares, en condiciones de irradiancia y temperatura adecuadas trabajen a su máxima capacidad, tomando en todo momento el valor de máxima potencia en la salida del arreglo de paneles y así el sistema proporcione los mejores resultados, lo cual fue comprobado.
- Con relación a lo analizado respecto a los parámetros del generador fotovoltaico se determina que este se encuentra diseñado para trabajar en paralelo con la red eléctrica, esto porque cuenta con un lazo de control de corriente, el cual solamente permite que el generador inyecte corriente a la red y no viceversa.
- En base a lo analizado, se determina que el sistema en teoría solamente inyecta potencia activa a la red, por lo cual la referencia de corriente en el eje de cuadratura se va a mantener en cero, pero debido a perturbaciones y pequeños errores que suponen a la construcción del equipo, el sistema también entrega y absorbe potencia reactiva, esto se ha demostrado con los datos obtenidos de potencias al ponerlo en paralelo con la red.
- Cuando se analiza la factibilidad de conexión en paralelo con la red, se pudo determinar que este puede realizar dicha operación solamente cuando las condiciones climáticas de irradiancia y temperatura sean las adecuadas y permitan que el voltaje en las fases de salida del transformador de acoplamiento a la red sea igual o mayor que el voltaje de la red.
- En base a los resultados obtenidos tanto para la conexión en paralelo a la red, como la operación aislada con cargas, se pudo determinar que el generador fotovoltaico tiene la capacidad de operar de estos dos modos, pero debido a que la capacidad de los paneles es muy baja, el sistema de control se encuentra configurado de manera que solo trabaje con cierto grupo de cargas pequeñas que no superen la capacidad del equipo, a diferencia de operar con la red, se puede ver que existe

una inyección de potencia activa considerable para analizar en los resultados, pero no lo suficientemente grande como para que sea un gran aporte a la red.

### **3.3 RECOMENDACIONES**

- Para realizar las pruebas de funcionamiento y operación en paralelo del generador fotovoltaico, tomar en cuenta las condiciones climáticas, un punto del día en el cual las condiciones de irradiancia y temperatura sean las mejores.
- Para el procedimiento de operación en paralelo del generador fotovoltaico con la red eléctrica, verificar que se cumplan todas las condiciones de operación, debido a que si esto no se realiza se pueden dañar los componentes del sistema.
- Al hacer funcionar el generador fotovoltaico de manera aislada con cargas, es recomendable verificar que las cargas no sean muy grandes ya que el generador principalmente fue diseñado para operar en paralelo con la red.
- Cuando se quiera alimentar cargas tomar en cuenta que no se debe desenergizar la barra 1 ya que debido a esto funciona el lazo de enclavamiento de fase y se conmutan los IGBTs para su funcionamiento, si se quiere alimentar las cargas del laboratorio, buscar una alternativa para energizar la barra dos del sistema con el generador fotovoltaico.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. W. Cubi y A. C. Pilatuña, "Rediseño e Implementación del Grupo Motor DC-Generador Sincrónico para el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia", Proyecto de Titulación, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2019.
- [2] J. A. Bustos y C. M. Limaico, "Modelación y Simulación de un Control Vectorial de Velocidad de un Aerogenerador en Matlab", Proyecto de Titulación, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2019.
- [3] F. B. Jaramillo y B. J. Silva, "Diseño, Construcción e Implementación de un Generador Fotovoltaico para el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia", Proyecto de Titulación, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2020.
- [4] O. Braco Sola, "Design and simulation of single-phase inverter with digital pwm", M. S. Thesis, Dept. Elect and Comp. SCi., Hochschule Niederrhein Univ., Frefekd, Germany, 2016.
- [5] A. Cabrera Tobar, E. Bullich Massagué, M. Aragües Peñalba y O. Gomis Bellmund, Capability curve analysis of photovoltaic generation systems, Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2016.
- [6] D. A. Motoche, "Medición de Parámetros de la Máquinas Sincrónica de Imanes Permanentes y de Inducción Doblemente Alimentada del Emulador de Generación Eólica del Departamento de Energía Eléctrica", Proyecto de Titulación, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2020.
- [7] Festo Didactic Ltée, Electricity and New Energy, LabVolt Series, Manuales de Usuario del Emulador de Generación Eólica, Quebec, Canadá, 2018.
- [8] J. A. Játiva, Libro "Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia", En revisión, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2022.
- [9] J. Játiva , "Informe Técnico Final Proyecto Junior PIJ 15 24: Modelación, Simulación, Control y Construcción de un Prototipo de Aerogenerador con Máquina Sincrónica de Baja Velocidad de Imanes Permanentes", Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Vinculación, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2019.

## **5 ANEXOS**

**ANEXO I. Procedimiento para la operación en paralelo de las dos fuentes de generación: generador fotovoltaico y red de la EEQ.**

## ANEXO I

### Procedimiento para la operación en paralelo de las dos fuentes de generación: generador fotovoltaico y red eléctrica de la EEQ

Para que el generador opere de la manera adecuada y se pueda cumplir con las condiciones de operación en paralelo del generador fotovoltaico con la red eléctrica, se debe seguir el procedimiento de manera secuencial que se encuentra a continuación:

#### ENCENDIDO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

1. Posicionar los paneles solares de manera que tengan una buena captación de irradiancia.
2. Realizar la conexión en serio de los paneles y conectar los terminales al interruptor de cuchillas de la barra DC.



**Figura I. 1.** Interruptor de cuchillas de la barra DC

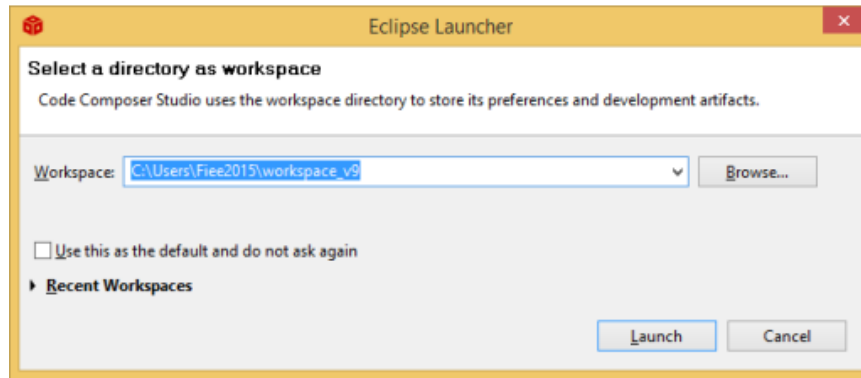
3. Conectar la fuente de 12 V DC al tomacorriente para de esta manera se energicen los circuitos de control.
4. Abrir el programa Code Composer Studio, que se encuentra en la computadora del Laboratorio.



**Figura I. 2.** Ícono del programa Code Composer Studio

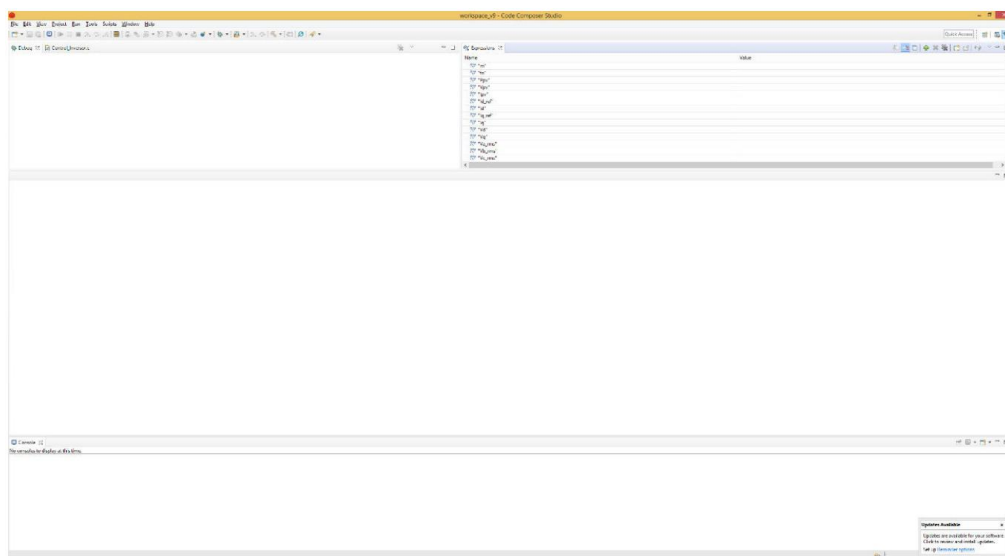
5. Una vez abierto el programa aparecerá la ventana “Eclipse Launcher”, en el Workspace escribir la dirección “C:\Users\Fiee2015\workspace\_v9” si no se la encuentra ya escrita y luego de eso dar clic en “Launch”.





**Figura I. 3.** Ventana “Eclipse Launcher”

6. Aparecerá la interfaz del programa tal como se indica en la Figura I. 4.

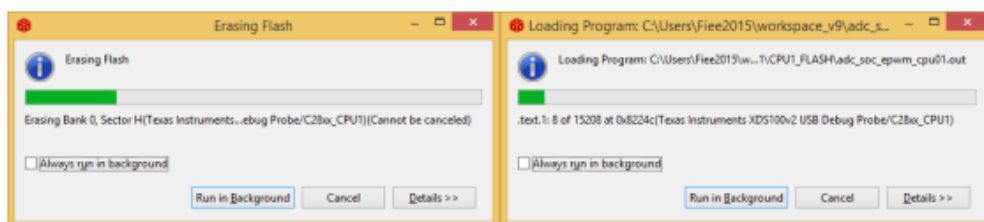


**Figura I. 4.** Ventana de Interfaz del programa Code Composer Studio

7. Conectar la tarjeta de Texas Instrument al computador.
8. Ya en la interfaz buscar el ícono de “Debug” y dar clic, posterior a esto el programa borrará la memoria del microcontrolador y subirá el programa para ser ejecutado.

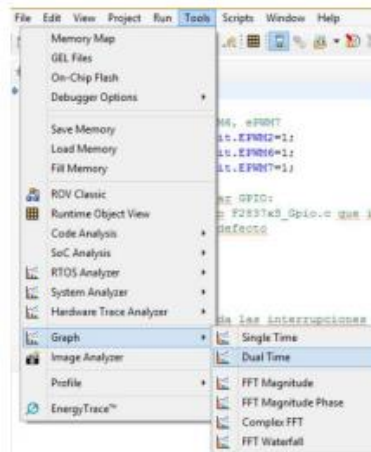


**Figura I. 5.** Función “Debug” del programa Code Composer Studio



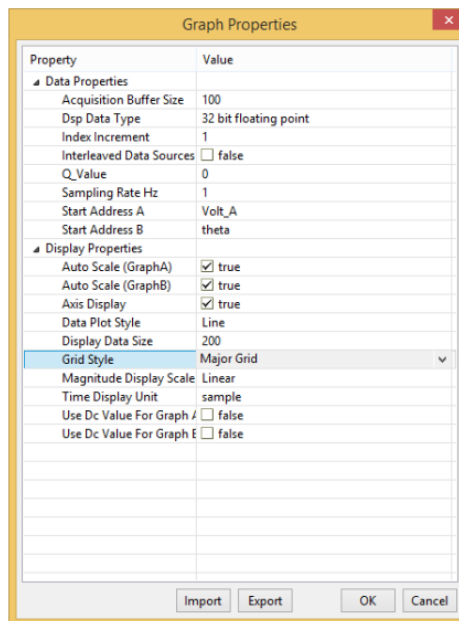
**Figura I. 6.** Ventana del proceso de carga del programa al microcontrolador

9. Cuando termine la carga, configurar los gráficos desde la pestaña “Tools”, “Graph” y finalmente “Dual Time”.



**Figura I. 7.** Procedimiento para graficar las variables.

10. Aquí se configuran los gráficos tal como se muestra en la Figura #. Dentro de esta configuración se tienen las variables que se desean graficar “Start Address A y B”, se escriben las variables y se da en “Ok”.



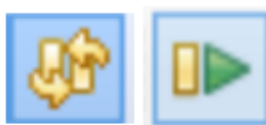
**Figura I. 8.** Configuración de los gráficos del programa Code Composer Studio

Variables para graficar:

- Voltaje de la barra DC: Volt\_pv
- Corriente de la barra DC: Curr\_pv
- Voltajes de la red: Volt\_A, Volt\_B, Volt\_C
- Voltajes de la red en los ejes dq: Volt\_D, Volt\_Q, Volt\_0
- Corrientes inyectadas hacia la red: Curr\_A, Curr\_B, Curr\_C
- Corrientes inyectadas hacia la red en los ejes dq: Curr\_D, Curr\_Q, Curr\_0.

Ángulo de la red obtenido por el PLL: theta

11. Ejecutar el programa por medio del botón “Resume y activar la actualización continua de las variables en la ventana de las gráficas y en la ventana “Expressions”.



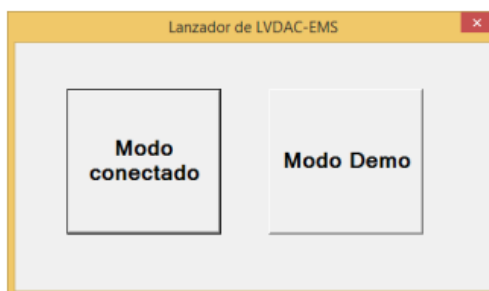
**Figura I. 9.** Actualización continua de variables y botón “Resume”

12. Para poder obtener los datos de las mediciones y visualizar las formas de onda y los fasores de las variables estudiadas se hace uso del software LVDAC-EMS. Ejecutar el programa.



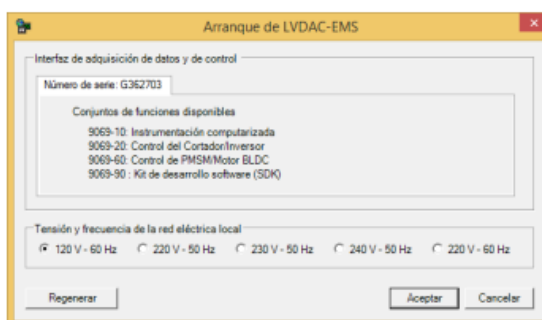
**Figura I. 10.** Ícono del programa LVDAC-EMS.

13. Conectar el cable USB del módulo de Festo a la computadora y también el cable de alimentación a la red.
14. Al abrirlo se observa la ventana “Lanzador de LVDAC-EMS”, seleccionar “Modo conectado”.



**Figura I. 11.** Ventana “Lanzador de LVDAC-EMS”

15. Seleccionar la opción 120V-60Hz en la ventana “Arranque de LVDAC-EMS” y dar clic en “Aceptar”.



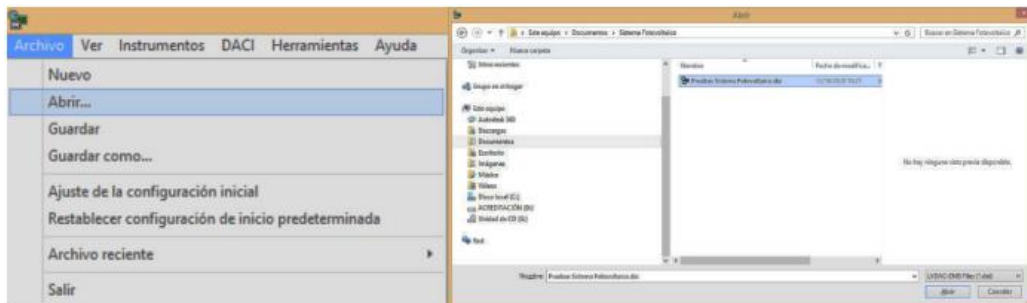
**Figura I. 12.** Ventana “Arranque de LVDAC-SEM”

16. Se abre la interfaz del programa.



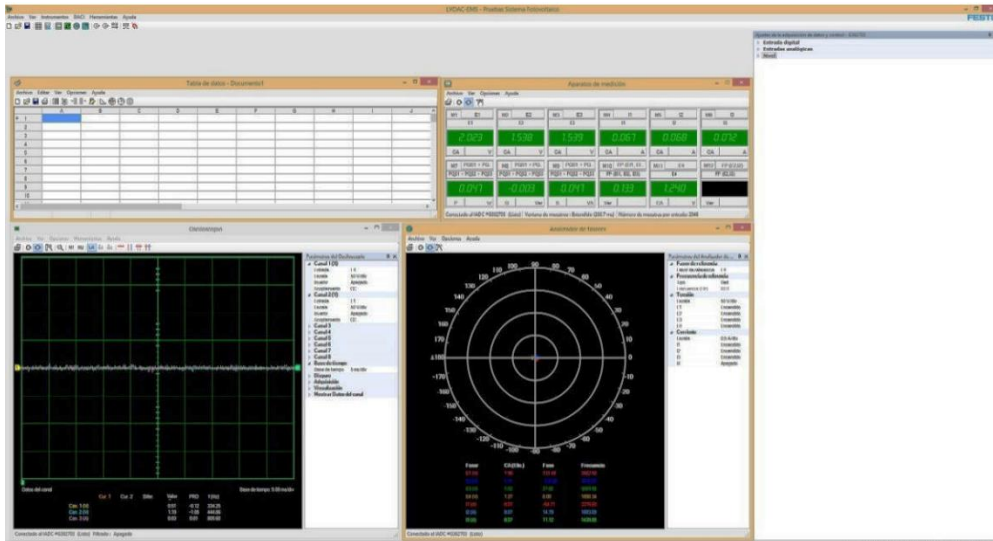
**Figura I. 13.** Interfaz del programa LMDAC-EMS

17. Dar clic en la pestaña “Archivo”, seleccionar “Abrir”. Dirigirse a la dirección “Documentos\Sistema Fotovoltaico” y seleccionar el archivo “Pruebas Sistema Fotovoltaico.dai”. Dar clic en “Abrir”.



**Figura I. 14.** Configuración para obtención de mediciones del Generador Fotovoltaico

18. Se abrirán las ventanas para analizar las mediciones: “Tabla de datos”, “Aparatos de medición”, “Osciloscopio” y “Analizador de fasores”. Por medio de estas ventanas se podrá analizar el correcto funcionamiento del sistema.



**Figura I. 14.** Plantilla para mediciones del generador fotovoltaico

19. Una vez abiertos los programas se procede a energizar generador.

20. Cerrar hacia arriba el “Switch 0”, luego cerrar el breaker trifásico superior de la “Barra 0” para de esta manera quede energizada la “Barra 1”.



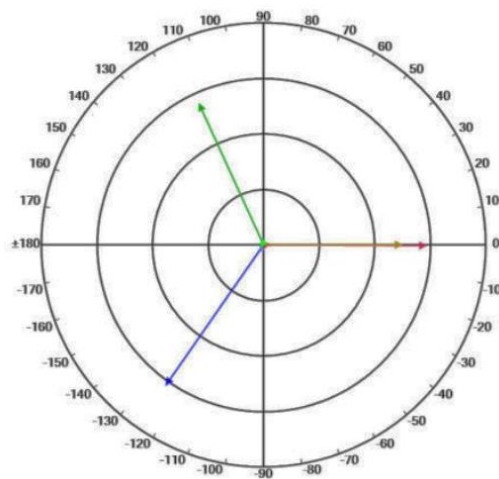
**Figura I. 15.** “Switch 0”, “Barra 0”, “Barra 1”

Una vez que es energizada la “Barra 1”, se observa el voltaje de la fase A de la red en el “Osciloscopio” y el “Análisis de fasores” del programa SVDAC-EMS y para poder verificar que el PLL esté funcionando se observa la ventana de “Expressions” del programa Code Composer Studio, donde los valores de  $V_d$  y  $V_q$  deben tener valores aproximados a 1 y 0 respectivamente y  $f_o$  debe ser cercano a 60. (Estas condiciones deben cumplirse de manera estricta para poder cerrar el interruptor de la barra DC.

21. Se cierra el interruptor de cuchilla de la barra DC.

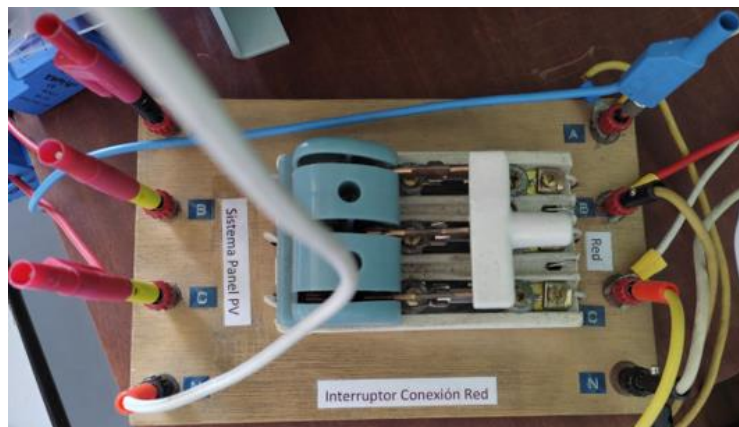
## OPERACIÓN EN PARALELO

1. Verificar que el voltaje de la fase A del generador fotovoltaico sea mayor y se encuentre en fase con el voltaje de la fase A de la red eléctrica.



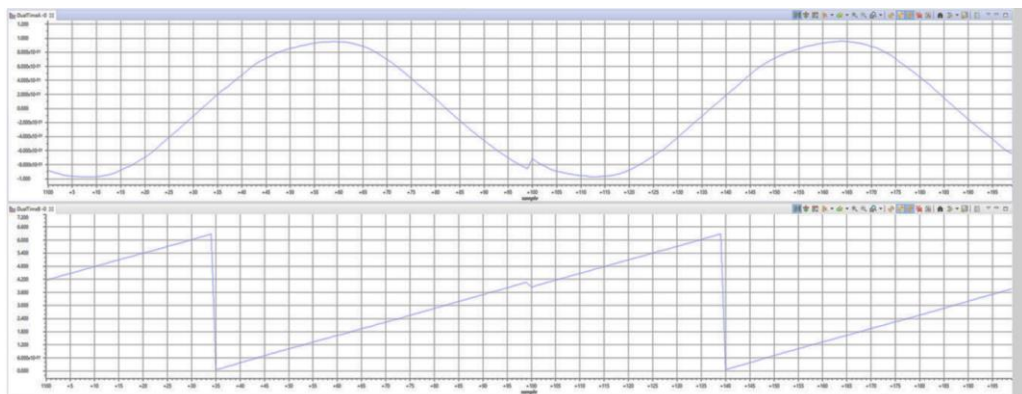
**Figura I. 16.** Fasores de voltaje de las fases A(rojo), B(azul) y C(verde) a la salida del transformador de acoplamiento a la red y fase A(dorado) de la red eléctrica

2. Cerrar el interruptor de conexión a la red eléctrica.



**Figura I. 17.** Interruptor de conexión a la red

Mediante las gráficas de las variables “Volt\_A”, “theta”, “Curr\_D” y “Curr\_Q” en el programa Code Composer se podrá comprobar el funcionamiento adecuado del sistema sincronizado con la red.



**Figura I. 18.** Variables Volt\_A y theta

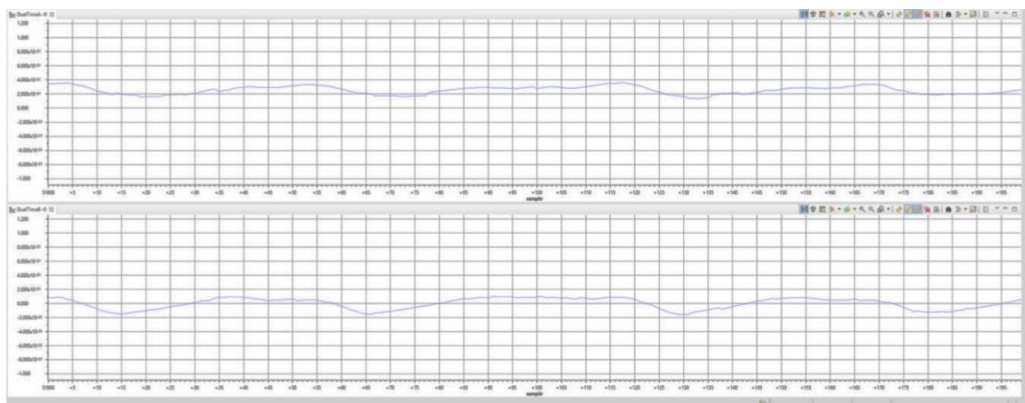


Figura I. 19. Variables Curr\_D y Curr\_Q

### APAGADO DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO

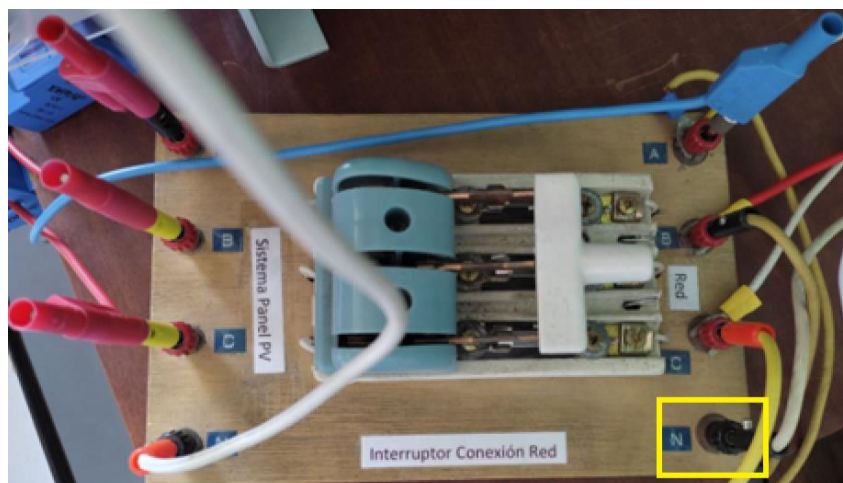
1. Si el generador fotovoltaico se encuentra conectado en paralelo con la red eléctrica, abrir el interruptor de conexión a la red.
2. Abrir el interruptor de la barra DC.
3. Abrir el breaker trifásico superior de la “Barra 0”, luego abrir el “Switch 0”.
4. Cerrar los programas Code Composer Studio y LDVAC-EMS sin guardar los cambios para no desconfigurar la interfaz ni el programa.
5. Desenergizar la fuente de 12 V DC.
6. Desconectar la tarjeta de Texas Instrument.

### CONEXIÓN DEL GENERADOR FOTOVOLTAICO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

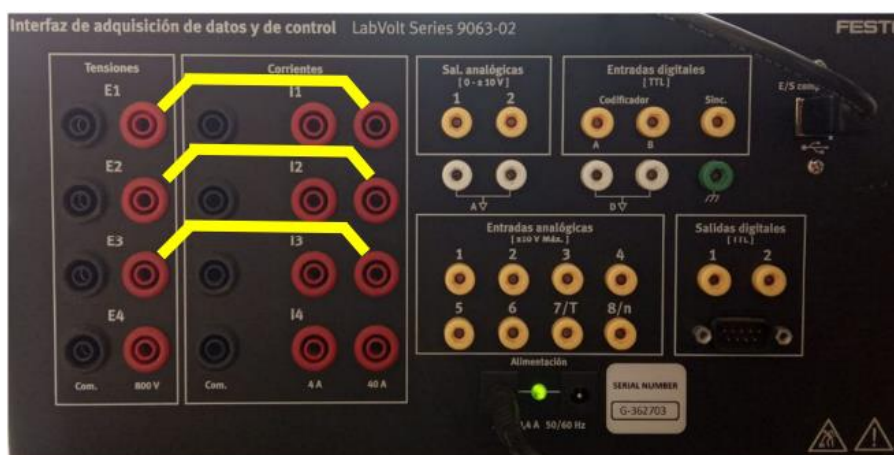
1. Ver que el sistema se encuentre desenergizado.
2. Puentear todos los terminales de voltaje “Com” del módulo y conectarlos al terminal “N” en la salida del interruptor de conexión a la red.



Figura I. 20. Conexión de Neutro para medir Voltajes.

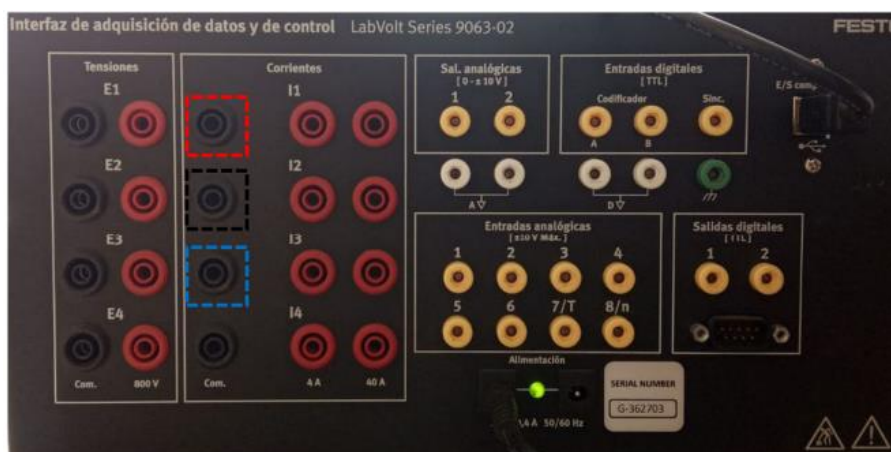


**Figura I. 21.** Conexión del neutro de la red con los terminales “Com” del módulo  
 3. Conectar las fases de los terminales de voltaje de 800 V con los terminales de corriente de 40 A.



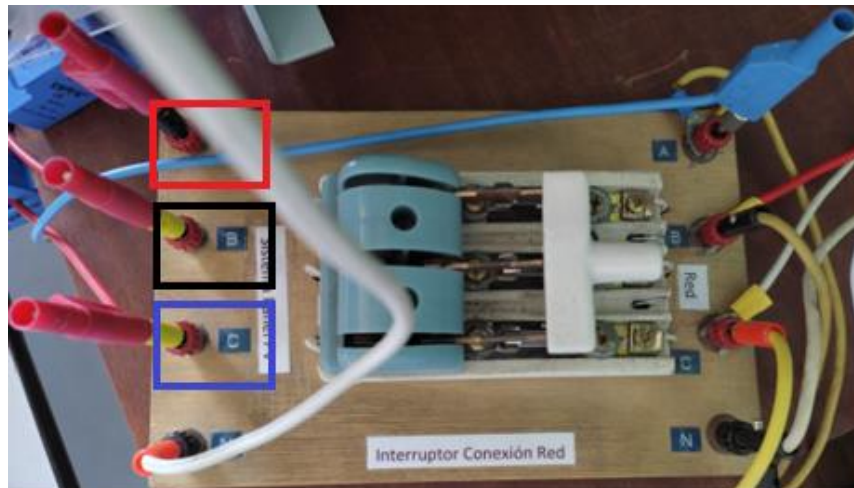
**Figura I. 22.** Conexión para medir corrientes

4. Conectar los terminales de corriente “Com” con las fases de entrada del interruptor de conexión a la red.



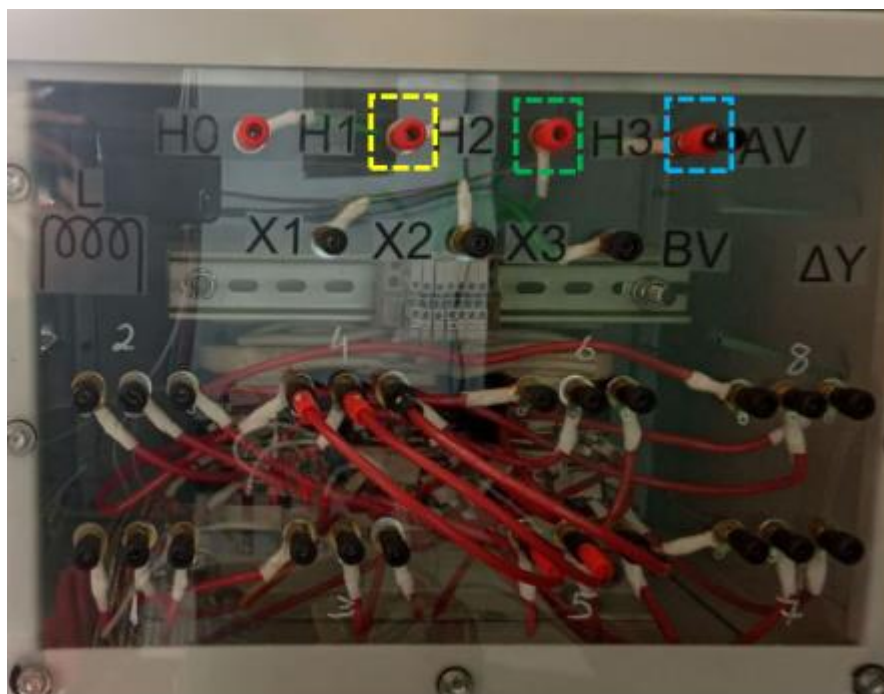
**Figura I.23.** Conexión del módulo de adquisición de datos con el interruptor de conexión a la red



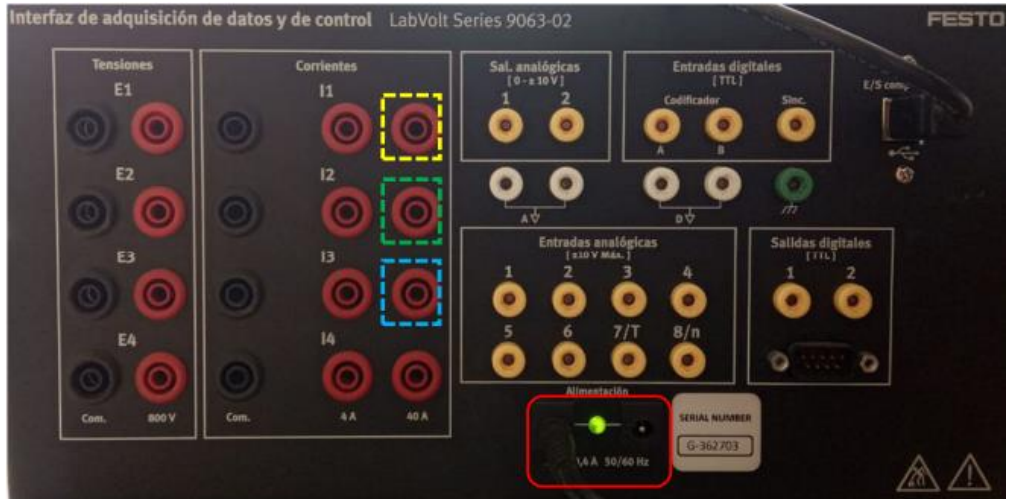


**Figura I. 24.** Conexión del módulo de adquisición de datos con el interruptor de conexión a la red

5. Conectar los terminales “H1, H2 y H3” del transformador de acoplamiento a la red con los terminales de corriente de 40 A del módulo “I1, I2 e I3”.



**Figura I. 25.** Conexión del módulo de adquisición de datos con el transformador trifásico (módulo encendido)



**Figura I. 26.** Conexión del módulo de adquisición de datos con el transformador trifásico (módulo encendido)

6. Ver que el módulo se encuentre encendido y conectado con la computadora de laboratorio.