

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**DESARROLLO DE SISTEMA SCADA PARA ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN LA
PLANTA FOTOVOLTAICA DEL LABORATORIO DE
INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL**

INGE-2929

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero(a) en Electrónica y Automatización

Presentado por:

Omar Fernando Medina Moreira

Juliette Itai Mera Villamar

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi papá y a mi mamá, los pilares de mi vida, quienes con su apoyo y sacrificio han hecho posible cada uno de mis logros. Este trabajo es tanto suyo como mío.

Por Omar Fernando Medina Moreira

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mi madre, quien ha sido mi mayor ejemplo de vida y mi inspiración para esforzarme cada día en convertirme en una gran mujer. Algún día quisiera llegar a ser, al menos, la mitad de la mujer fuerte y valiente que ella es.

Por Juliette Itai Mera Villamar

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mis padres, quienes con su amor, esfuerzo y sacrificio han sido la base de cada uno de mis logros. Gracias, mamá y papá por enseñarme a nunca rendirme y por acompañarme en cada paso de mi formación personal y profesional.

A la Escuela Superior Politécnica del Litoral, por brindarme los recursos y la formación académica que me permitieron llevar a cabo este proyecto.

Finalmente, a mi pareja y compañera de tesis que me acompañó en el desarrollo de este trabajo.

Por Omar Fernando Medina Moreira

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios, por guiarme siempre por el buen camino y darme la fortaleza necesaria para confiar en mí misma.

A mi madre, Julia, y a mi padre, Jorge, por haberme criado con amor, inculcarme valores y apoyarme incondicionalmente durante todos estos años de mi carrera.

A mis mascotas, Romeo, Roma y Molly, por acompañarme en mis desvelos y regalarme su amor sincero.

A mis amistades, que a lo largo de mi vida universitaria convirtieron los momentos más difíciles en instantes llenos de risas y compañía.

Y, finalmente, a mi pareja y compañero de tesis, cuyo apoyo incondicional fue fundamental para culminar con éxito este proyecto.

Por Juliette Itai Mera Villamar

Declaración Expresa

Nosotros, Omar Fernando Medina Moreira y Juliette Itai Mera Villamar, acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 10 de junio del 2025.

Omar Fernando Medina Moreira

Juliette Itai Mera Villamar

Evaluadores

Ing. Cortez Álvarez Dennys Dick.

Profesor de Materia

Ing. Cevallos Ulloa Holger Ignacio, Dr.

Tutor de proyecto

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar un sistema SCADA orientado a la supervisión, y análisis de armónicos en una planta fotovoltaica, con el fin de mejorar la confiabilidad y eficiencia del monitoreo eléctrico. La hipótesis plantea que la integración de un sistema automatizado permite identificar anomalías en tiempo real y generar registros que faciliten la toma de decisiones. La justificación se basa en la necesidad de contar con herramientas que aseguren la calidad de la energía y el cumplimiento de normas internacionales. Para su ejecución se implementaron técnicas de adquisición de datos, procesamiento digital de señales y visualización en LabVIEW, utilizando módulos DAQ de National Instruments, normas IEEE 519-2022 como referencia técnica, y criterios de diseño basados en seguridad y confiabilidad. Los resultados demostraron la correcta detección de armónicos en señales de voltaje, el cálculo automático de índices THD y el registro de alarmas ante condiciones fuera de norma. Además, se validó la interfaz SCADA como una herramienta eficaz para la supervisión en tiempo real. Se concluye que el sistema desarrollado permite optimizar el monitoreo de la planta fotovoltaica, aporta una base sólida para la integración de bases de datos y constituye un modelo aplicable a entornos industriales similares.

Palabras clave: SCADA, armónicos, monitoreo, calidad de energía, fotovoltaica

Abstract

This project aims to develop a SCADA system focused on supervision and harmonic analysis in a photovoltaic plant, with the purpose of improving reliability and efficiency in electrical monitoring. The hypothesis states that the integration of an automated system enables real-time anomaly detection and generates records that facilitate decision-making. The justification lies in the need for tools that ensure power quality and compliance with international standards. For its implementation, data acquisition techniques, digital signal processing, and visualization in LabVIEW were applied, using National Instruments DAQ modules, IEEE 519-2022 standards as technical references, and design criteria based on safety and reliability. The results demonstrated the correct detection of harmonics in voltage signals, the automatic calculation of THD indices, and the registration of alarms under out-of-standard conditions. Furthermore, the SCADA interface was validated as an effective tool for real-time supervision. It is concluded that the developed system optimizes photovoltaic plant monitoring, provides a solid foundation for database integration, and constitutes a model applicable to similar industrial environments.

Keywords: SCADA, harmonics, monitoring, power quality, photovoltaic

Índice general

Resumen.....	viii
<i>Abstract</i>	ix
Índice general.....	x
Abreviaturas	xiv
Simbología	xv
Índice de figuras.....	xvi
Capítulo 1.....	1
1. Introducción	2
1.1 Descripción del Problema	2
1.2 Justificación del Problema	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Energía Solar Fotovoltaica.....	4
1.4.2 Generación Fotovoltaica	4
1.4.3 Análisis de la Radiación Solar del Planeta	4
1.4.4 Análisis de las variables para el aprovechamiento de la energía solar	5
1.4.5 Celdas o Paneles Solares.....	5
1.4.6 Armónicos en la Red Eléctrica: Definición e Identificación	6
1.4.7 Causas de la Presencia de Armónicos.....	7

1.4.8	Métodos de Identificación.....	7
1.4.9	Efectos Negativos	8
1.4.10	Medidas de Mitigación	8
1.4.11	Planta Fotovoltaica.....	8
1.4.12	Importancia del Monitoreo SCADA	14
1.4.13	SCADA en sistemas educativos e industriales	14
Capítulo 2.....		16
2.	Metodología.....	17
2.1	Formulación de alternativas de solución	17
2.2	Selección de la mejor alternativa	18
2.3	Diseño conceptual y metodología de diseño	19
2.3.1	Arquitectura conceptual	19
2.3.2	Metodología de diseño.....	19
2.3.3	Razonamiento metodológico	20
2.4	Diseño detallado del sistema	20
2.4.1	Normativas y fundamentos técnicos	22
2.4.2	Criterios de diseño y selección de recursos	22
2.5	Justificación del diseño y métodos utilizados	23
2.6	Implementación y validación	25
2.7	Especificaciones técnicas del sistema SCADA desarrollado	27
2.7.1	Hardware.....	27

2.7.2	Software	28
2.7.3	Requerimientos funcionales.....	28
2.8	Consideraciones éticas y legales	28
2.8.1	Consideraciones éticas	29
2.8.2	Consideraciones legales y normativas	29
Capítulo 3.....		30
3.	Resultados y análisis.....	31
3.1	VI (Virtual Instrument)	31
3.2	Panel Frontal	33
3.3	Análisis de Voltaje	35
3.3.1	Caso 1: 1 foco LED de 25 W.....	35
3.3.2	Caso 2: Conjunto de 3 focos LED (25 W + 4 W + 4 W).....	36
3.3.3	Caso 3: Carga total compuesta por 3 focos LED (25 W + 4 W + 4 W) y 2 cargadores de celular (20 W + 5 W).	37
3.4	Análisis de Corriente.....	40
3.4.1	Caso 1: 1 foco LED de 25 W.....	40
3.4.2	Caso 2: Conjunto de 3 focos LED (25 W + 4 W + 4 W).....	41
3.4.3	Caso 3: Carga total (3 LEDs + 2 cargadores).	42
3.5	Sistema de alarmas	44
Capítulo 4.....		46
4.1	Conclusiones y recomendaciones	47
4.1.1	<i>Conclusiones</i>	47

<i>4.1.2 Recomendaciones</i>	48
Referencias.....	50

Abreviaturas

AC	Corriente Alterna (Alternating Current)
CC/DC	Corriente Continua (Direct Current)
DAQ	Data Acquisition (Adquisición de Datos)
DC	Direct Current (Corriente Continua)
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MPY	Milésimas de pulgada por año (Mils Per Year)
NI	National Instruments
PCC	Point of Common Coupling (Punto de Acoplamiento Común)
PV	Photovoltaic (Fotovoltaico)
RMS	Root Mean Square (Valor Eficaz)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
THD	Total Harmonic Distortion (Distorsión Armónica Total)
TDD	Total Demand Distortion (Distorsión Total de Demanda)
UPS	Uninterruptible Power Supply (Sistema de Alimentación Ininterrumpida)
VFD	Variable Frequency Drive (Variador de Frecuencia)

Simbología

A	Amperio
f	Frecuencia (Hz)
Hz	Hertz (unidad de frecuencia)
I	Corriente eléctrica (A)
Irms	Corriente en valor eficaz (A)
kW	Kilovatio (unidad de potencia activa)
kWh	Kilovatio-hora
P	Potencia activa (W)
Q	Potencia reactiva (var)
S	Potencia aparente (VA)
THD	Distorsión Armónica Total
TDD	Distorsión Total de Demanda
V	Voltio
V1	Componente fundamental de tensión (V)
Vh	Componente armónica de tensión de orden h
Vrms	Tensión en valor eficaz (V)
W	Watt (unidad de potencia activa)
Ω	Ohmio (unidad de resistencia eléctrica)

Índice de figuras

Ilustración 1 Entrenador Solar (Christiani y Lucas-Nülle, s. f.)	9
Ilustración 2 Placa de simulación de módulos solares (Christiani y Lucas-Nülle, s. f.).....	10
Ilustración 3 Resistencia de carga (Christiani y Lucas-Nülle, s. f.).....	11
Ilustración 4 Dispositivo de medición	12
Ilustración 5 Inversor fuera de red	13
Ilustración 6 Inversor trifásico	13
Ilustración 7 NI 9225 para voltaje	24
Ilustración 8 NI 9227 para corriente	24
Ilustración 9 (IEEE 519-2022, pág. 17) Límites de distorsión armónica para el voltaje.....	25
Ilustración 10 Chasis NI cDAQ-9174.....	26
Ilustración 11 Diagrama de bloques de la programación.....	31
Ilustración 12 Adquisición de datos.....	31
Ilustración 13 Procesamiento de señales.....	32
Ilustración 14 Visualización y registro de información	33
Ilustración 15 Panel Frontal	33
Ilustración 16 Panel frontal con datos del caso 1	35
Ilustración 17 Gráficos de voltaje del caso 1	36
Ilustración 18 Panel frontal con datos del caso 2	36
Ilustración 19 Gráficos de voltaje del caso 2	37
Ilustración 20 Panel frontal con datos del caso 3	37
Ilustración 21 Gráficos de voltaje del caso 3	38
Ilustración 22 Panel frontal con datos del caso 1	40
Ilustración 23 Gráficas de corriente del caso 1	40
Ilustración 24 Panel frontal con datos del caso 2	41

Ilustración 25 Gráficas de corriente del caso 2	41
Ilustración 26 Panel frontal con datos del caso 3	42
Ilustración 27 Gráficas de corriente del caso 3	42
Ilustración 28 Sistema de alarmas.....	44
Ilustración 29 Planta Solar	58
Ilustración 30 Panel Solar	58
Ilustración 31 Pruebas con el panel solar.....	59
Ilustración 32 Reemplazo de batería de la planta solar.....	59
Ilustración 33 Voltaje de la batería	60
Ilustración 34 Regulador de carga solar conectado	60
Ilustración 35 Voltaje entregado por el inversor.....	61
Ilustración 36 Voltaje entregado a la carga.....	61
Ilustración 37 Pruebas en la planta solar.....	62
Ilustración 38 Modulo DAQ conectado	62
Ilustración 39 Validación de datos con analizador de energía.....	63
Ilustración 40 Pruebas finales en la planta solar	63
Ilustración 41 Uso de pinza amperimétrica para medición de corriente.....	64
Ilustración 42 Validación de las gráficas de voltaje y corriente	64

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del Problema

El presente proyecto busca potencializar el uso que se le da a la Planta Fotovoltaica que se encuentra en el laboratorio de Instrumentación Industrial de la ESPOL. En la actualidad dicha planta no cuenta con un sistema que permita a quién la usa supervisar su funcionamiento o analizar la calidad de la energía que se genera en ella, esto limita el aprendizaje práctico de los estudiantes en temas relacionados a la planta como energía solar, automatización y monitoreo de sistemas. La solución que se presenta no solo ayuda a nuestra universidad, si no también otras instituciones con equipos similares. Además, en el sector energético del país se necesitan cada vez más profesionales que tengan conocimientos con sistemas de supervisión y diagnóstico. Es por ello por lo que, crear un SCADA educativo que incluya análisis de armónicos no solo permitirá usar mejor la planta, sino también preparar mejor a los estudiantes para los desafíos que se puedan llegar a presentar en áreas de energías renovables y automatización.

1.2 Justificación del Problema

Esta solución es adecuada porque permite aprovechar la Planta Fotovoltaica de la universidad, convirtiéndola así en una herramienta educativa. Al inducir un sistema SCADA con características de análisis de armónicos, se desarrolla un ambiente práctico en donde los alumnos serán capaces de trabajar con tecnología parecida a la que se usa dentro de la industria real.

Este recurso, fortalece la formación técnica en áreas clave como automatización, monitoreo eléctrico y calidad de energía, observando así las demandas que hay actualmente en el sector energético. El diseño de bajo costo lo hace aplicable en otras instalaciones o instituciones.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

Desarrollar un sistema SCADA con funciones de análisis de armónicos en la Planta Fotovoltaica de la ESPOL, mediante los equipos de Lucas Nuelle, para optimizar su uso como herramienta educativa en el área de la automatización y energías renovables.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Evaluar el funcionamiento del sistema mediante pruebas para validar su efectividad como herramienta educativa.
- Integrar todos los componentes del sistema en la planta fotovoltaica, con el propósito de fomentar su uso práctico en la formación técnica de los estudiantes.
- Desarrollar una interfaz gráfica interactiva utilizando software SCADA, para que los usuarios visualicen el funcionamiento del sistema de forma clara y didáctica.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar es uno de los recursos más abundantes en el planeta, y sirve como una solución efectiva para suministrar calefacción, agua caliente y también energía eléctrica, de una manera natural, ilimitada ya que es renovable y limpia debido a que no contamina.

1.4.2 Generación Fotovoltaica

La conversión fotovoltaica es el proceso mediante el cual la energía solar (luz) se transforma en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. Este efecto ocurre en materiales semiconductores, como el silicio, cuando los fotones liberan electrones que generan una corriente eléctrica. (Duffie y Beckman, 2013)

1.4.3 Análisis de la Radiación Solar del Planeta

La radiación solar es la principal fuente de energía para la Tierra y constituye el recurso fundamental para la generación de electricidad a través de sistemas fotovoltaicos. Se define como la energía electromagnética emitida por el Sol, que llega a la superficie terrestre en forma de ondas electromagnéticas, principalmente en longitudes de onda visibles e infrarrojas. (Duffie y Beckman, 2013)

La radiación disminuida que llega a la superficie terrestre, llamada Radiación Global, se distribuye en 3 categorías las cuales al sumarlas producen el valor de dicha radiación. Estas 3 clasificaciones son:

- Radiación Directa
- Radiación Difusa
- Radiación Reflejada

1.4.4 Análisis de las variables para el aprovechamiento de la energía solar

El aprovechamiento eficiente de la energía solar depende de un conjunto de variables ambientales, geográficas, técnicas y operativas que influyen directamente en el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. Analizar estas variables permite optimizar el diseño, la instalación y la operación de plantas solares, maximizando su producción energética y prolongando su vida útil.

- **Radiación Solar Global:** Es la variable más importante, pues determina cuánta energía solar está disponible para convertir en electricidad. Se mide en kWh/m²/día. La cantidad y calidad de la radiación varía según: la ubicación geográfica, la altitud, las condiciones climáticas y la época del año.
- **Temperatura Ambiente:** Afecta directamente al rendimiento de los módulos solares. Aunque más sol implica más energía, una temperatura elevada disminuye la eficiencia de conversión de los paneles, especialmente los de silicio. Cada grado por encima de 25°C puede reducir la eficiencia entre 0.3 y 0.5 % en promedio.
- **Ángulo de Inclinación y Orientación:** La inclinación óptima del panel depende de la latitud del lugar y tiene como objetivo maximizar la captación de radiación directa. La orientación ideal en el hemisferio sur es hacia el norte y viceversa.
- **Tipo y Tecnología de Panel Solar:** Los paneles monocristalinos tienen mayor eficiencia en espacios reducidos. Los policristalinos ofrecen un buen rendimiento en zonas soleadas y son más económicos. Los de película delgada pueden funcionar mejor en condiciones difusas, pero con menor rendimiento total.

1.4.5 Celdas o Paneles Solares

Son los que convierten la energía de radiación electromagnética en energía eléctrica. Cuando esta radiación realiza el contacto con el material semiconductor, este convierte en

energía eléctrica en forma de corriente continua para que así esta energía se pueda utilizar de manera inmediata, así como también se la pueda almacenar en un banco de baterías.

1.4.6 Armónicos en la Red Eléctrica: Definición e Identificación

En condiciones ideales, las señales de tensión y corriente en un sistema eléctrico deben mantener una forma de onda senoidal pura a una frecuencia fija (50 o 60 Hz, según el sistema). No obstante, la presencia de cargas no lineales en la red genera distorsiones en estas ondas, las cuales pueden descomponerse mediante la serie de Fourier en componentes senoidales de mayor frecuencia, denominadas armónicos (Arrillaga y Watson, 2003).

Los armónicos son componentes de corriente o voltaje cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Por ejemplo, si la frecuencia fundamental es de 60 Hz, el tercer armónico corresponde a 180 Hz, el quinto a 300 Hz, y así sucesivamente. Su presencia indica una desviación del comportamiento ideal y una posible degradación de la calidad de la energía (IEEE, 2022).

El Total Harmonic Distortion (THD) se define como la relación entre la raíz cuadrática media (RMS) de todas las componentes armónicas de tensión o corriente, excepto la fundamental, y el valor RMS de la componente fundamental. Matemáticamente, se expresa como:

$$THD\% = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100$$

Esta expresión permite cuantificar el nivel de distorsión armónica presente en una señal periódica respecto a su forma de onda ideal (puramente senoidal). El resultado se expresa en porcentaje, indicando qué fracción de la señal total está compuesta por armónicos.

El cálculo del THD se realiza habitualmente a partir de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) aplicada a la señal, lo que permite descomponerla en sus componentes de frecuencia. De acuerdo con la norma IEEE Std 519-2022, el límite recomendado de distorsión armónica total de tensión en sistemas de baja tensión es del 5%, mientras que los límites de corriente dependen de la relación entre la corriente de carga y la corriente de cortocircuito en el punto de acoplamiento común (PCC) (IEEE, 2022).

1.4.7 Causas de la Presencia de Armónicos

Los armónicos se originan principalmente por el funcionamiento de cargas no lineales, es decir, aquellas cuya impedancia no permanece constante con respecto a la tensión aplicada. Este tipo de cargas distorsiona la corriente absorbida, generando armónicos que se propagan por la red. Entre los principales equipos que producen armónicos se encuentran:

- Variadores de frecuencia (VFD)
- Fuentes conmutadas (SMPS)
- Iluminación LED o fluorescente con balastros electrónicos
- Computadoras y equipos electrónicos
- Sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS)

1.4.8 Métodos de Identificación

- **Medición Instrumental:** La forma más precisa de identificar armónicos es mediante el uso de analizadores de calidad de energía. Estos equipos permiten medir el espectro armónico y calcular indicadores clave como el Total Harmonic Distortion (THD), esto cuantifica la distorsión total en porcentaje respecto a la componente fundamental.
- **Manifestaciones en el Sistema:** Además de las mediciones directas, la presencia de armónicos puede detectarse a través de diversas características en la operación de la red, tales como:

- Calentamiento excesivo en transformadores y motores
- Ruidos eléctricos o vibraciones en equipos electromecánicos
- Disminución de la eficiencia energética
- Mal funcionamiento o falla prematura de equipos electrónicos

1.4.9 Efectos Negativos

La presencia de armónicos afecta la calidad de la energía y puede generar múltiples consecuencias técnicas y económicas, tales como:

- Incremento de pérdidas en conductores y transformadores debido al efecto Joule
- Disminución de la vida útil de los equipos eléctricos
- Resonancia con bancos de capacitores
- Interferencia electromagnética en sistemas sensibles (IEEE, 2022)

1.4.10 Medidas de Mitigación

Para reducir el impacto de los armónicos en la red eléctrica, se pueden implementar diferentes estrategias:

- Instalación de filtros armónicos (pasivos o activos)
- Uso de transformadores especiales, como los de conexión zig-zag
- Diseño adecuado de bancos de capacitores para evitar resonancias
- Selección de equipos con bajo contenido armónico o con filtros incorporados

1.4.11 Planta Fotovoltaica

En el laboratorio de Instrumentación Industrial yace una planta fotovoltaica la misma que cuenta con los siguientes equipos:

Entrenador Solar



Ilustración 1 Entrenador Solar (Christiani y Lucas-Nüsse, s. f.)

El entrenador solar permite simular de manera realista el movimiento solar, lo que facilita la realización de experimentos en laboratorio sin depender de la luz solar directa y de las condiciones ambientales externas. Está conformado por un módulo solar acoplado a un proyector halógeno que actúa como fuente de radiación artificial. La intensidad lumínica de este proyector puede regularse mediante un dimmer, lo cual posibilita la recreación de distintos escenarios de irradiancia, desde condiciones de baja radiación hasta niveles máximos similares a la radiación solar natural. De esta manera, se logra un entorno controlado y repetible para el análisis experimental.

Placa de simulación de módulos solares

El simulador de módulo solar constituye una herramienta versátil que permite emular hasta tres paneles fotovoltaicos de manera independiente, lo cual resulta fundamental para realizar pruebas en entornos académicos y de investigación. Gracias a su diseño, brinda la

posibilidad de controlar con precisión la intensidad lumínica aplicada a cada módulo, reproduciendo así condiciones similares a las de operación real en campo. Este nivel de control simula escenarios repetibles y comparables, ayudando a el análisis del comportamiento eléctrico y energético de los paneles bajo distintas condiciones de irradiancia.

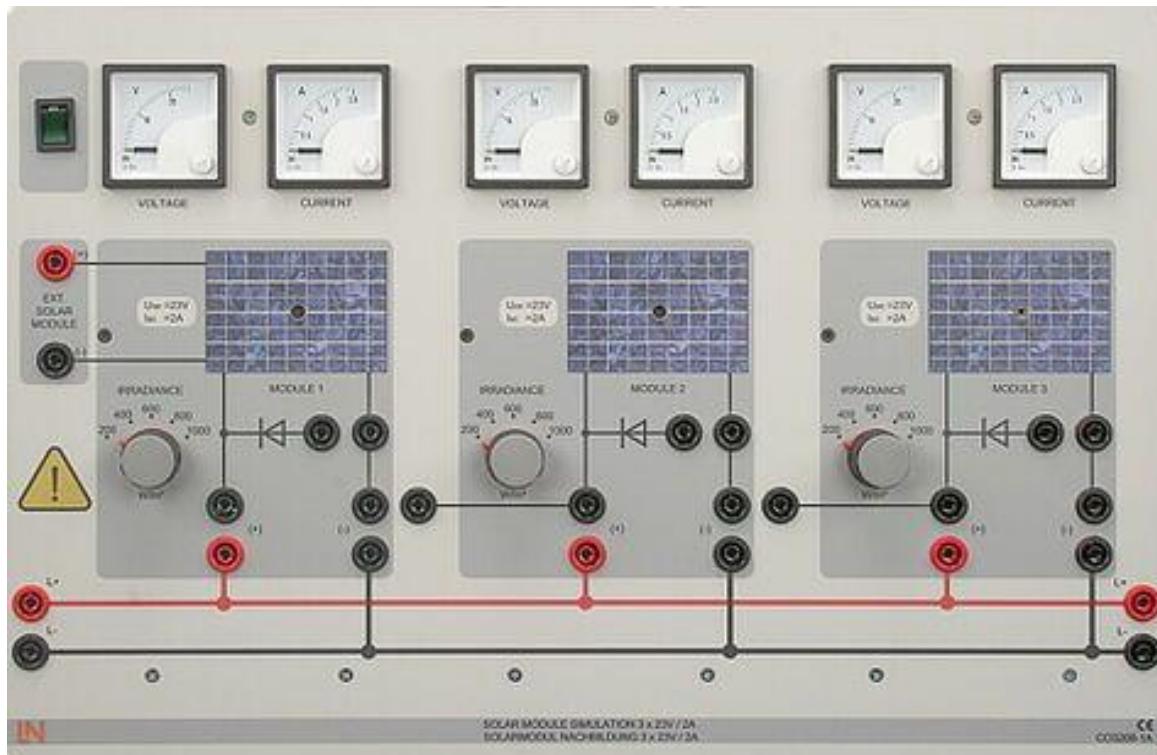


Ilustración 2 Placa de simulación de módulos solares (Christiansen y Lucas-Nüsse, s. f.)

Resistencia de carga para módulos solares y unidades de energía solar.

La resistencia de carga utilizada en el sistema es compatible con módulos solares, reguladores de carga e inversores, lo que permite su aplicación en una amplia gama de ensayos experimentales. Su función principal consiste en registrar curvas características de los dispositivos evaluados o actuar como carga en condiciones controladas, proporcionando resultados confiables y repetibles. Este equipo dispone de una resistencia ajustable en un rango de 0 a 1 kΩ, con una potencia máxima de 500 W, regulada mediante un bobinado escalonado.

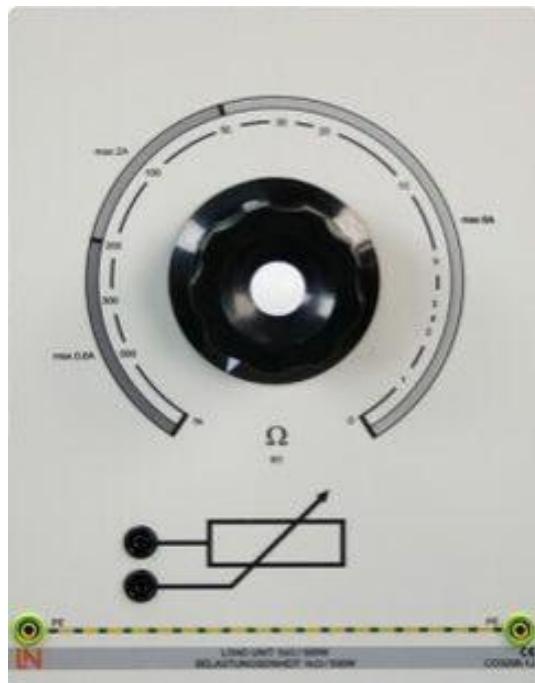


Ilustración 3 Resistencia de carga (Christiani y Lucas-Nülle, s. f.)

Dispositivo de Medición

El dispositivo de medición universal ha sido desarrollado para abordar los requerimientos de las áreas de máquinas eléctricas, electrónica de potencia y sistemas de accionamiento. Ofrece protección contra sobrecargas, permite mediciones precisas independientemente de la forma de la señal, y sustituye hasta cuatro instrumentos tradicionales: amperímetro, voltímetro, medidor de potencia y medidor de ángulo de fase. Dispone de una pantalla gráfica táctil a color de 5,7", interfaz USB aislada y software compatible para visualización en PC.



Ilustración 4 Dispositivo de medición

Inversor fuera de red 230 V, 275 VA

Para poder utilizar dispositivos eléctricos convencionales en sistemas solares autónomos, es necesario transformar la corriente continua (CC) generada en corriente alterna (CA). Para ello, se emplea una placa con un inversor diseñado para sistemas aislados y convierte una entrada de 12 V CC en una salida de 230 V CA. Este tipo de inversor cuenta con un sistema de protección contra descarga profunda, lo que permite conectarlo directamente a una batería de plomo.



Ilustración 5 Inversor fuera de red

Inversor trifásico grid-tied inverter

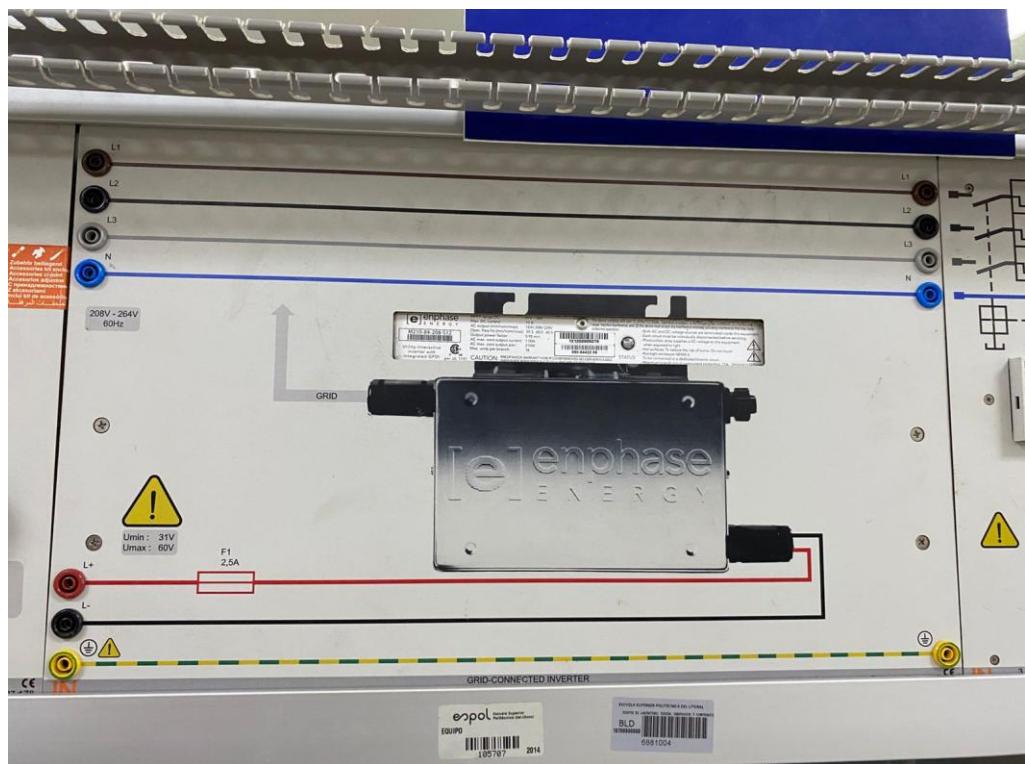


Ilustración 6 Inversor trifásico

El equipo corresponde a un inversor trifásico conectado a la red, fabricado por la empresa Enphase Energy, y está destinado a aplicaciones en sistemas fotovoltaicos. Su

función principal consiste en transformar la energía generada en corriente continua (DC) por los paneles solares en corriente alterna (AC), adecuada para su integración con la red eléctrica. Opera en un rango de tensión de 208 V a 264 V, con una frecuencia de 60 Hz, y se conecta mediante líneas trifásicas identificadas como L1, L2, L3 y neutro (N). Dispone de entradas de corriente continua señaladas como L+ y L-, las cuales cuentan con protección mediante un fusible de 2,5 A. Este dispositivo está fuera de uso hasta la fecha en la que se realizó en esta investigación.

1.4.12 Importancia del Monitoreo SCADA

En un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) bien implementado, muchas de estas variables se pueden medir, registrar y analizar en tiempo real, lo cual es esencial para:

- Detectar pérdidas,
- Predecir mantenimiento,
- Optimizar la operación y el retorno económico.

1.4.13 SCADA en sistemas educativos e industriales

Los sistemas SCADA han evolucionado hasta convertirse en una herramienta fundamental tanto en entornos industriales como educativos. En el ámbito industrial, su aplicación abarca desde el control de procesos en plantas de generación eléctrica hasta la supervisión de redes de distribución, con el objetivo de garantizar la eficiencia, seguridad y confiabilidad de la operación (Singh y Saxena, 2015). Estos sistemas permiten integrar sensores, actuadores y equipos de automatización dentro de una interfaz centralizada, lo cual ayuda a realizar una supervisión en tiempo real y la toma de decisiones.

En el contexto de las energías renovables, los SCADA son especialmente relevantes porque permiten monitorear variables críticas como potencia, voltaje, corriente, calidad de

energía y niveles de distorsión armónica. Esto asegura que los sistemas fotovoltaicos o eólicos puedan operar dentro de los parámetros establecidos por normativas internacionales (Galloway y Hancke, 2013). Además, ofrecen la capacidad de extender la vida útil de los equipos y reducir costos de mantenimiento.

Desde la perspectiva educativa, los SCADA proporcionan un entorno práctico en el que los estudiantes pueden adquirir competencias en automatización, monitoreo eléctrico y gestión de calidad de energía. Proyectos universitarios han demostrado que integrar laboratorios remotos o simulados basados en SCADA permite a los alumnos experimentar con situaciones reales sin los riesgos asociados a un entorno industrial (Díaz, Domínguez, y García, 2017). Por ejemplo, la Universidad de Oviedo en España ha desarrollado plataformas virtuales que reproducen sistemas de control industrial a través de SCADA accesibles en línea (González, Méndez, y Salazar, 2020).

Asimismo, la literatura resalta el uso de SCADA como herramienta de enseñanza en el sector energético. Pérez, Ramírez y Ortega (2018) destacan que la integración de estas plataformas en los cursos de ingeniería eléctrica mejora la comprensión de los estudiantes sobre la dinámica de redes de potencia y fortalece sus competencias para el mercado laboral. También, Mohan, Andersen y Jensen (2019) presentaron la implementación de un laboratorio de energías renovables que integra SCADA con sistemas fotovoltaicos y eólicos, mostrando cómo la educación en este campo se alinea directamente con la realidad industrial.

Por otro lado, empresas líderes como Siemens y Schneider Electric han publicado manuales técnicos de sus plataformas SCADA (Siemens AG, 2020; Schneider Electric, 2021). Estos documentos destacan la aplicabilidad de SCADA no solo como software de control, sino también como estándar de la industria para la digitalización y automatización de procesos.

Capítulo 2

2. METODOLOGÍA.

2.1 Formulación de alternativas de solución

Con el propósito de implementar un sistema SCADA orientado al análisis de armónicos en la planta fotovoltaica, se analizaron distintas alternativas tecnológicas. Cada opción se evaluó con base en criterios de precisión, escalabilidad, facilidad de integración, compatibilidad con el entorno académico, capacidad de visualización y potencial de análisis de calidad de energía.

- **Uso de sistemas SCADA comerciales:** Estos sistemas, ofrecidos por proveedores especializados, proporcionan plataformas robustas y de alta fiabilidad. Sin embargo, su costo elevado y la limitada capacidad de personalización restringen su aplicabilidad en entornos educativos, donde se busca flexibilidad y libertad de diseño.
- **Desarrollo de una plataforma basada en software libre y microcontroladores:** Esta opción representaba una alternativa de bajo costo, con amplia personalización y acceso al código fuente. No obstante, su implementación demandaba tiempos prolongados de programación, así como un mayor esfuerzo en la validación de resultados, lo que podía afectar la confiabilidad en la detección de armónicos.
- **Implementación de un sistema SCADA con LabVIEW y una tarjeta de adquisición de datos (DAQ):** Esta alternativa integraba un entorno gráfico de desarrollo con hardware especializado, garantizando precisión en la adquisición de señales, facilidad de integración con sensores de voltaje y corriente, y una interfaz flexible para el análisis en tiempo real. Además, se adaptaba a los recursos ya disponibles en el laboratorio, lo que reducía costos y aseguraba continuidad académica.

La comparación de estas opciones permitió establecer un marco de análisis técnico y económico que facilitó la elección de la alternativa más adecuada para las necesidades del laboratorio y los objetivos del proyecto.

2.2 Selección de la mejor alternativa

Tras la evaluación comparativa de las opciones planteadas, se seleccionó como solución más adecuada la implementación de un sistema SCADA utilizando LabVIEW y una tarjeta de adquisición de datos (DAQ).

La decisión se fundamentó en los siguientes aspectos:

- **Flexibilidad en el diseño:** LabVIEW ofreció un entorno de programación gráfica intuitivo que facilitó la creación de interfaces personalizadas y la incorporación de módulos de análisis específicos y el cálculo de armónicos (THD).
- **Compatibilidad con el entorno académico:** La integración con hardware de National Instruments (NI) permitió un uso inmediato de los equipos disponibles en el laboratorio. Esto redujo la necesidad de nuevas inversiones y sobre todo aseguró continuidad en la capacitación de los estudiantes.
- **Precisión y confiabilidad:** Los módulos NI 9225 y NI 9227 garantizaban mediciones de voltaje y corriente con estándares industriales, asegurando la fidelidad de las señales para el análisis espectral y la validación de condiciones operativas.
- **Escalabilidad:** El diseño modular posibilitaba iniciar con un entorno monofásico de 120 V, disponible en el laboratorio, y posteriormente adaptarse a configuraciones trifásicas sin necesidad de rediseñar todo el sistema.
- **Eficiencia en la visualización:** El entorno SCADA desarrollado en LabVIEW proporcionó una interfaz gráfica amigable, con representación en tiempo real de formas de onda, espectros de frecuencia y alertas automáticas, elementos clave para la enseñanza y el diagnóstico.

Se podría decir que, la alternativa elegida representó un equilibrio entre costo, precisión, adaptabilidad y capacidad pedagógica, convirtiéndola en la opción más viable para cumplir los objetivos del proyecto.

2.3 Diseño conceptual y metodología de diseño

2.3.1 *Arquitectura conceptual*

El sistema SCADA se estructuró bajo una arquitectura modular de cinco niveles, con el propósito de facilitar la escalabilidad, el mantenimiento y la claridad en la operación:

1. **Sensado:** Incorporación de sensores para la medición de variables eléctricas críticas (voltaje y corriente).
2. **Adquisición de datos:** Uso de una tarjeta de adquisición (DAQ) para muestrear señales en tiempo real, garantizando sincronización y confiabilidad.
3. **Procesamiento:** Aplicación de algoritmos en LabVIEW para el cálculo de valores RMS, análisis armónico mediante FFT y detección de condiciones anómalas.
4. **Visualización:** Desarrollo de una interfaz gráfica intuitiva en LabVIEW con indicadores, espectros y alarmas en tiempo real.
5. **Almacenamiento:** Registro histórico de mediciones para análisis comparativos y validación de tendencias operativas.

2.3.2 *Metodología de diseño*

El diseño siguió una estrategia en etapas secuenciales:

1. **Levantamiento de requerimientos:** Se identificaron necesidades técnicas y educativas: monitoreo en tiempo real, análisis de armónicos y cumplimiento normativo (IEEE 519-2022).

2. **Selección de sensores y módulos:** Se eligieron los módulos NI 9225 (voltaje) y NI 9227 (corriente) por su precisión industrial y compatibilidad con el entorno académico.
3. **Programación en LabVIEW:** Se desarrollaron rutinas de adquisición y procesamiento utilizando bloques gráficos, lo que permitió simplificar la construcción del sistema y su depuración.
4. **Implementación de análisis armónico:** Se incorporaron algoritmos basados en FFT para el cálculo de distorsión armónica total (THD) y la identificación de armónicos individuales relevantes.
5. **Validación experimental:** El sistema se probó bajo condiciones controladas de laboratorio con cargas lineales y no lineales.

2.3.3 Razonamiento metodológico

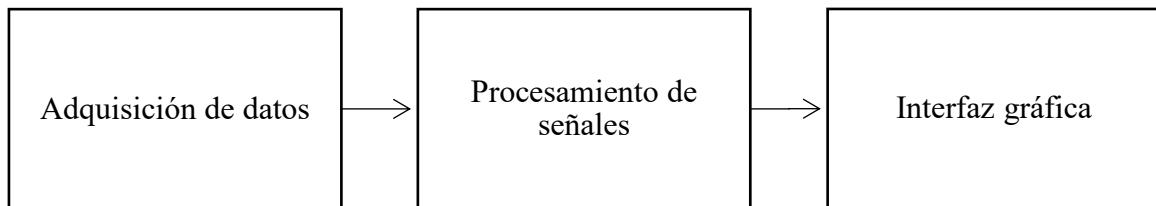
La elección de esta metodología respondió a tres factores principales:

- **Educativo:** proporcionar un entorno didáctico realista para estudiantes de ingeniería eléctrica.
- **Técnico:** asegurar precisión en la adquisición y análisis de datos.
- **Práctico:** mantener un diseño adaptable a entornos monofásicos y trifásicos, con proyección hacia su uso en contextos industriales.

2.4 Diseño detallado del sistema

El sistema SCADA desarrollado para la planta fotovoltaica tiene como objetivo principal la supervisión continua y en tiempo real de variables eléctricas fundamentales, entre ellas el voltaje, la corriente y la distorsión armónica total (THD). Estas variables son críticas para evaluar el comportamiento dinámico del sistema y ofrecer una operación eficiente, segura y conforme a los estándares de calidad de energía.

El diseño del sistema se planteó bajo un enfoque modular, lo cual permite su escalabilidad, mantenimiento y futura expansión hacia sistemas más complejos. Se organizaron tres bloques funcionales principales:



- Un módulo de adquisición de datos, encargado de recibir las señales analógicas provenientes del inversor monofásico a través de los módulos NI 9225 (para voltaje) y NI 9227 (para corriente).
- Un módulo de procesamiento de señales, que se encarga del cálculo del valor eficaz (RMS), el análisis espectral mediante transformada rápida de Fourier (FFT), y la detección de condiciones anómalas mediante comparadores y estructuras condicionales.
- Finalmente, un módulo de visualización, compuesto por una interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW que muestra en tiempo real las formas de onda, espectros de frecuencia y alertas visuales.

Este enfoque no solo facilita la comprensión y depuración del sistema durante su desarrollo, sino que además permite que cada componente funcione de manera independiente y sea sustituido o mejorado sin afectar el resto del sistema.

La plataforma LabVIEW fue seleccionada por su flexibilidad, su entorno de programación gráfica y su estrecha compatibilidad con hardware de National Instruments. Esto permite una integración eficiente entre la adquisición de señales y su representación gráfica, brindando al usuario una visualización clara del estado eléctrico de la planta.

El diseño del sistema contempla inicialmente la operación en un entorno monofásico de 120 V, correspondiente a las condiciones disponibles en el laboratorio.

Además, se ha incorporado la capacidad de generar alarmas automáticas cuando los valores medidos sobrepasan umbrales críticos, con base en los límites establecidos por la normativa IEEE Std 519-2022, la cual define los parámetros aceptables para distorsión armónica en sistemas eléctricos. Esto convierte al SCADA no solo en una herramienta de monitoreo, sino también en un sistema de diagnóstico.

2.4.1 Normativas y fundamentos técnicos

El diseño se basa en las recomendaciones de la norma IEEE 519-2022, que establece límites permisibles de distorsión armónica en sistemas eléctricos de potencia. Además, se aplican fundamentos de instrumentación industrial para el acondicionamiento y adquisición de señales alternas usando módulos diferenciales (NI 9225 y NI 9227). Se emplean transformadas rápidas de Fourier (FFT) para el análisis espectral, una técnica ampliamente validada en la detección de armónicos en sistemas de energía eléctrica. (IEEE, 2022; NI, 2022)

2.4.2 Criterios de diseño y selección de recursos

Se eligieron recursos de National Instruments debido a su precisión, confiabilidad y compatibilidad con el entorno de desarrollo LabVIEW. La elección del entorno de desarrollo obedece a la capacidad de LabVIEW para integrar módulos de adquisición y análisis de datos

en tiempo real, utilizando bloques gráficos que facilitan el diseño SCADA en entornos académicos y profesionales. (NI, 2022; González et al., 2020)

2.5 Justificación del diseño y métodos utilizados

La implementación del sistema SCADA utilizando LabVIEW ha permitido el desarrollo de una solución personalizada, flexible y orientada a las condiciones reales de operación del laboratorio fotovoltaico. Este entorno de desarrollo gráfico proporciona una plataforma robusta para integrar en un mismo sistema la adquisición, el procesamiento y la visualización de datos eléctricos en tiempo real. Gracias a su arquitectura modular, LabVIEW facilita el diseño de interfaces intuitivas para el monitoreo de parámetros críticos, como el voltaje, la corriente y la distorsión armónica total (THD), permitiendo que el usuario final interprete de forma clara y rápida el estado del sistema.

La metodología aplicada en este proyecto se basa en la observación continua del comportamiento eléctrico de la planta. La capacidad del sistema para detectar desviaciones en el valor eficaz (RMS) de las señales, así como alteraciones en la calidad de energía asociadas a distorsiones armónicas, convierte al SCADA en una herramienta efectiva de diagnóstico y prevención.

Uno de los aspectos clave de esta implementación es el uso de módulos de adquisición de datos de National Instruments (NI 9225 para voltaje y NI 9227 para corriente), los cuales permiten mediciones con precisión industrial, garantizando una representación fiel de las condiciones eléctricas reales. La sincronización entre la adquisición y el procesamiento de señales permite analizar eventos transitorios, registrar el comportamiento de la carga en diferentes condiciones de operación, y generar alarmas automáticas ante sobrecargas, sobrevoltajes o presencia excesiva de armónicos.

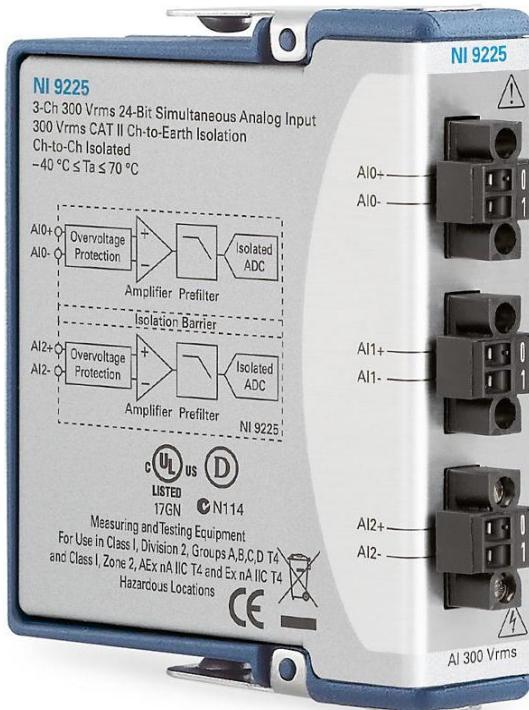


Ilustración 7 NI 9225 para voltaje

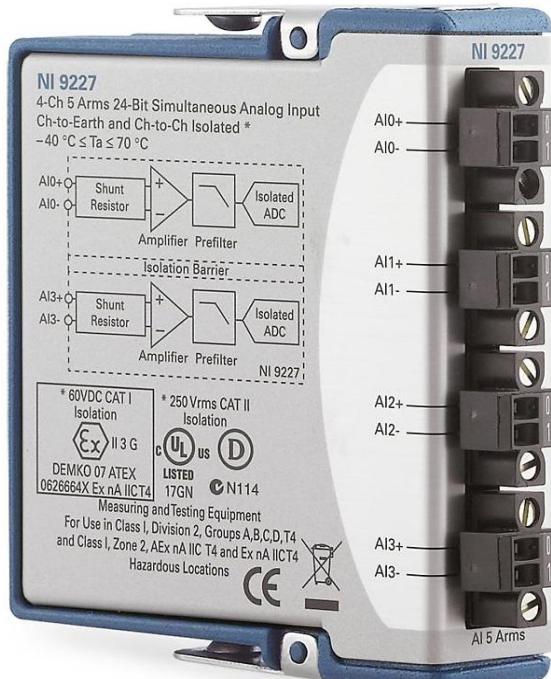


Ilustración 8 NI 9227 para corriente

Además, el sistema fue diseñado para ser adaptable a distintos escenarios operativos, inicialmente monofásico y, en futuras fases, escalable a entornos trifásicos. Esto brinda versatilidad para su aplicación tanto en contextos educativos como industriales. Asimismo, la implementación está alineada con las recomendaciones de la norma IEEE Std 519-2022, que establece los límites admisibles de distorsión armónica en sistemas eléctricos, lo cual asegura que los resultados obtenidos se encuentren dentro de un marco técnico validado. (*Rai & Singh, 2021; IEEE, 2022; National Instruments, 2023*)

Tensión de bus V en el PCC	Armónico individual (%)	Distorsión armónica total THD(%)
$V \leq 1,0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5*

Ilustración 9 (IEEE 519-2022, pág. 17) Límites de distorsión armónica para el voltaje

2.6 Implementación y validación

La implementación del sistema SCADA se llevó a cabo utilizando el entorno de programación gráfica LabVIEW, el cual proporciona una plataforma poderosa y versátil para el desarrollo de aplicaciones de adquisición y análisis de datos en tiempo real. Se empleó como hardware de adquisición el chasis NI cDAQ-9174, el cual permite la conexión de múltiples módulos de entrada analógica, y se integraron específicamente los módulos NI

9225, para la medición de voltaje, y NI 9227, para la medición de corriente. Estos módulos fueron seleccionados por su alta precisión, su compatibilidad con señales eléctricas industriales y su capacidad de operar en sistemas monofásicos y trifásicos.



Ilustración 10 Chasis NI cDAQ-9174

El sistema se implementó inicialmente bajo condiciones de prueba con un inversor monofásico de 120 V, simulando el comportamiento de una planta fotovoltaica en operación. Esta configuración permitió validar las funcionalidades principales del SCADA, tales como la adquisición sincronizada de señales de voltaje y corriente, el cálculo del valor eficaz (RMS), la generación de gráficas de forma de onda y espectros de frecuencia, y la activación de alarmas ante condiciones fuera de los parámetros normales.

Durante la fase de validación, se conectaron cargas resistivas puras para simular una operación estable y posteriormente cargas no lineales, con el objetivo de inducir distorsiones armónicas que pudieran ser detectadas y analizadas por el sistema. Los valores medidos por

el SCADA fueron comparados con los datos obtenidos mediante instrumentos de medición externos calibrados, tales como multímetros RMS y analizadores de potencia, para asegurar la confiabilidad y precisión del sistema implementado.

El análisis de la distorsión armónica total (THD) fue una de las pruebas clave dentro del proceso de validación. Para ello, se utilizó el módulo FFT de LabVIEW y se compararon los resultados obtenidos con los límites establecidos por la norma IEEE Std 519-2022, la cual define los niveles aceptables de distorsión para distintas categorías de sistemas eléctricos. Esta comparación permitió verificar que el sistema no solo es capaz de detectar la presencia de armónicos, sino también de cuantificarlos con la precisión requerida para su aplicación en entornos académicos o industriales. (NI, 2023; IEEE, 2022)

En conjunto, la implementación y validación del SCADA demostraron su capacidad para operar de manera confiable en tiempo real, procesar información crítica del sistema eléctrico y presentar los resultados de forma visual, clara y comprensible para el usuario final.

2.7 Especificaciones técnicas del sistema SCADA desarrollado

El sistema SCADA desarrollado se implementa con base en especificaciones técnicas que aseguran su correcto funcionamiento y aplicabilidad educativa e industrial.

2.7.1 Hardware

- Computador anfitrión: Procesador Intel Core i5, 8 GB de RAM y puerto USB compatible con dispositivos NI-DAQ.
- DAQ (Data Acquisition): NI cDAQ-9174 con módulos NI 9225 (medición de voltaje) y NI 9227 (medición de corriente), lo cual permite capturar señales trifásicas en tiempo real.
- Sensores: Transformadores de corriente (TCs) y de potencial (TPs) calibrados para operar en rangos de laboratorio.

- Fuente experimental: Planta fotovoltaica del Laboratorio de Instrumentación Industrial de ESPOL.

2.7.2 Software

- Entorno de programación: LabVIEW 2023, con librerías para análisis espectral y medición de calidad de energía.
- Base de datos: Registro de alarmas en formato .tdms y almacenamiento opcional en SQL para análisis posterior.
- Normativas aplicadas: IEEE 519-2022 (límites de distorsión armónica), IEC 61000 (compatibilidad electromagnética), y NEC (National Electrical Code) para seguridad eléctrica.

2.7.3 Requerimientos funcionales

- Medición en tiempo real de tensiones y corrientes RMS.
- Análisis espectral de armónicos con cálculo de THD.
- Activación de alarmas ante sobrevoltaje, bajo voltaje y distorsión armónica fuera de norma.
- Interfaz amigable con indicadores visuales y registro automático de eventos.

Estas especificaciones garantizan que el sistema pueda ser replicado en entornos similares, con un equilibrio entre costo, rendimiento y facilidad de uso (IEEE, 2022; NI, 2023; IEC, 2019).

2.8 Consideraciones éticas y legales

El desarrollo e implementación del sistema SCADA contempla tanto principios éticos como normativos que rigen su validez en un entorno académico y su posible escalamiento hacia aplicaciones industriales.

2.8.1 Consideraciones éticas

- Respeto al uso responsable de los equipos del laboratorio, evitando configuraciones que pongan en riesgo la seguridad de los usuarios o del sistema.
- Garantía de accesibilidad: el diseño se orienta a estudiantes de distintos niveles, favoreciendo la formación técnica inclusiva.
- Transparencia académica: los resultados se registran y documentan de forma íntegra, evitando manipulación de datos.

2.8.2 Consideraciones legales y normativas

- Cumplimiento con las normas IEEE 519-2022 sobre calidad de energía.
- Adopción de criterios de seguridad eléctrica definidos en IEC 61000 y NEC.
- Protección de la propiedad intelectual: el proyecto se desarrolla con software bajo licencia académica de National Instruments (NI, 2023).
- Uso exclusivo con fines educativos y de investigación, respetando los lineamientos internos de la universidad.

Estas consideraciones aseguran que el sistema no solo cumpla con los objetivos técnicos y educativos del proyecto, sino también con los estándares éticos y legales necesarios para su aplicación en contextos académicos y profesionales.

Capítulo 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 VI (Virtual Instrument)

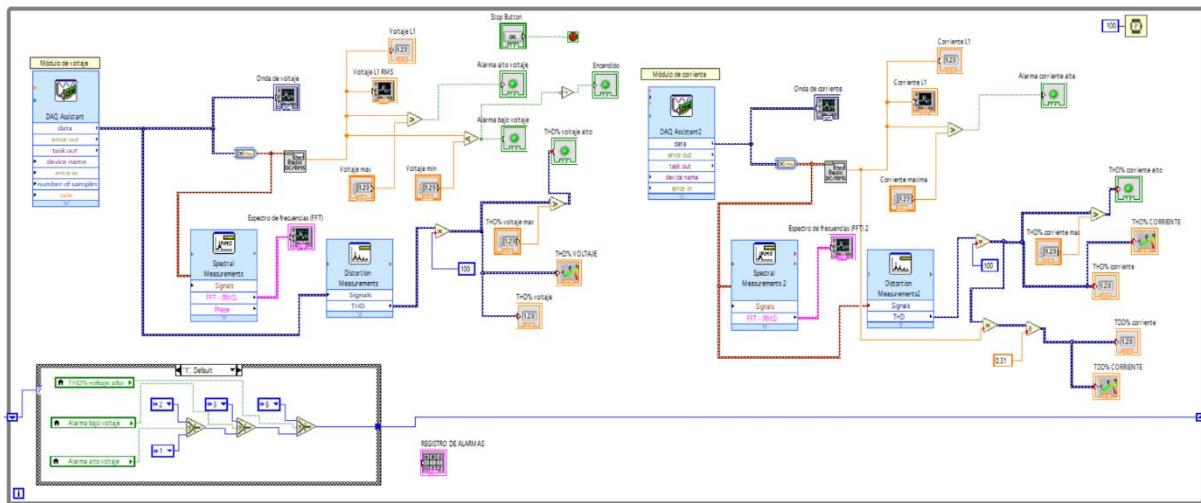


Ilustración 11 Diagrama de bloques de la programación

El programa elaborado en LabVIEW constituye el núcleo del sistema SCADA diseñado para la supervisión y análisis de parámetros eléctricos en la planta fotovoltaica. El diagrama de bloques presentado se encuentra estructurado en tres etapas principales: adquisición, procesamiento y visualización de la información.

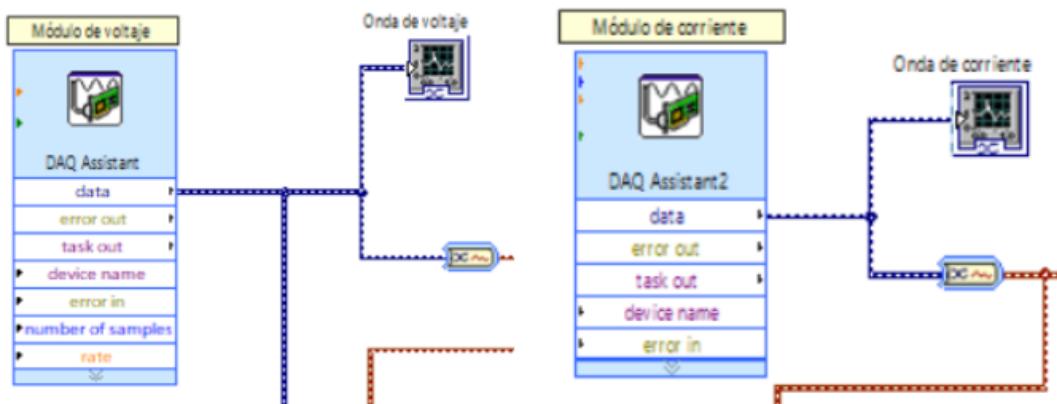


Ilustración 12 Adquisición de datos

En la primera etapa, la adquisición de datos se realiza mediante el chasis NI cDAQ-9174, al cual se encuentran acoplados los módulos NI 9225 para la medición de voltajes y NI

9227 para la medición de corrientes. Estos dispositivos permiten la digitalización de las señales analógicas provenientes de la planta, garantizando un muestreo confiable y adecuado para el análisis en tiempo real.

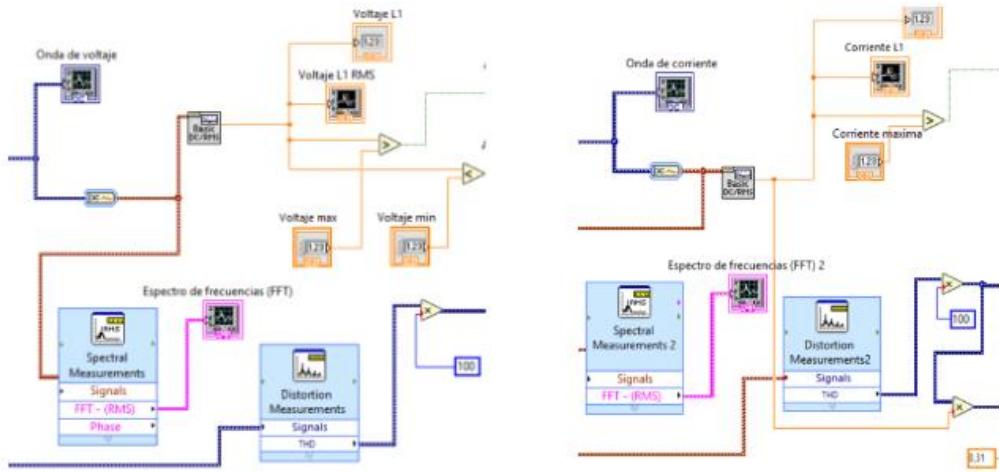


Ilustración 13 Procesamiento de señales

La segunda etapa corresponde al procesamiento de señales. En esta sección se efectúan los cálculos de los valores eficaces (RMS) de voltaje y corriente, así como la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para el análisis espectral. A partir de este procesamiento es posible determinar el Total Harmonic Distortion (THD) y el Total Demand Distortion (TDD) de corriente, indicadores que permiten evaluar la calidad de la energía en función de la carga conectada. Adicionalmente, se incorporan bloques de comparación con umbrales definidos, los cuales posibilitan la detección de condiciones anómalas de operación y la activación de señales de alerta dentro del sistema SCADA.

Finalmente, la tercera etapa corresponde a la visualización y registro de la información. Los resultados obtenidos se presentan en gráficos de forma de onda y espectros de frecuencia, así como en indicadores numéricos que muestran los valores de RMS, THD y TDD. Esta interfaz gráfica facilita la supervisión en tiempo real por parte del operador y, a su vez, permite el almacenamiento de datos históricos que sirven como respaldo para el análisis posterior.

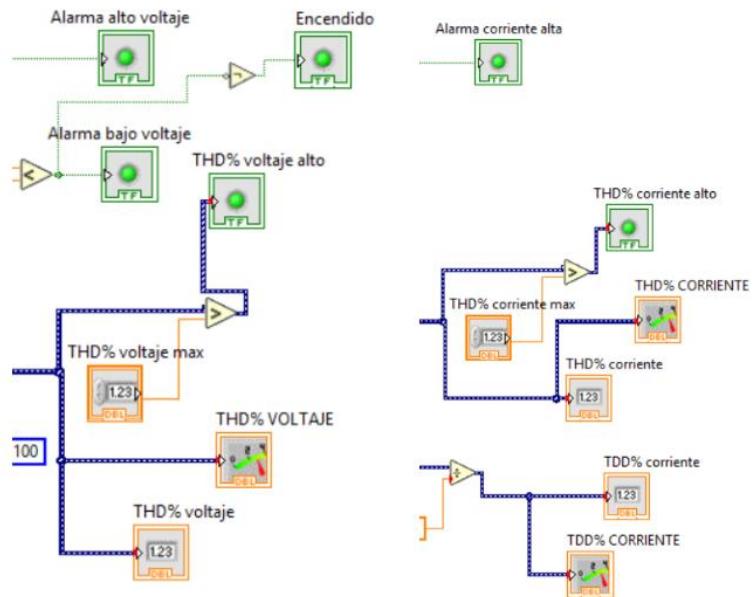


Ilustración 14 Visualización y registro de información

3.2 Panel Frontal

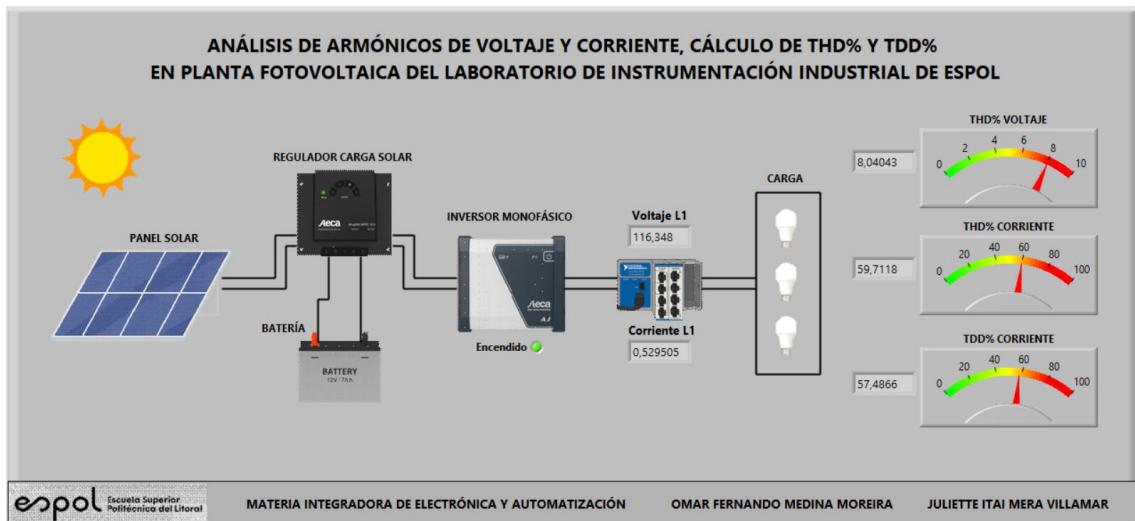


Ilustración 15 Panel Frontal

El procedimiento para el análisis de armónicos de voltaje y corriente en la planta fotovoltaica del Laboratorio de Instrumentación Industrial de la ESPOL se llevó a cabo mediante las siguientes etapas:

Generación de energía fotovoltaica: El sistema inicia con un arreglo de paneles solares que convierte la radiación solar en energía eléctrica de corriente continua (DC). Esta energía es almacenada en un banco de baterías, lo cual garantiza la estabilidad del suministro en condiciones de variación de irradiancia.

Conversión de energía e interconexión: La energía en corriente continua es entregada al inversor fotovoltaico, el cual realiza la conversión a corriente alterna (AC) para su utilización en cargas. Este inversor constituye el punto de enlace entre la planta fotovoltaica y el sistema de monitoreo.

Adquisición de datos: El voltaje y la corriente en la salida del inversor son registrados mediante los módulos de adquisición NI 9225 (voltaje) y NI 9227 (corriente), acoplados al chasis cDAQ-9174. Estos equipos permiten digitalizar las señales y enviarlas al computador para su posterior procesamiento en LabVIEW.

Procesamiento de señales: En el entorno de LabVIEW se implementó un algoritmo que realiza:

- Cálculo de valores RMS de voltaje y corriente.
- Aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obtener el espectro armónico.
- Determinación de los índices de THD (Total Harmonic Distortion) y TDD (Total Demand Distortion) tanto de voltaje como de corriente.

Visualización y supervisión: Los resultados obtenidos son desplegados en indicadores gráficos tipo medidores, los cuales muestran en tiempo real los niveles de distorsión armónica

presentes en el sistema. De esta manera, el operador puede identificar de forma inmediata si los valores medidos se encuentran dentro de los límites establecidos por la normativa vigente.

Evaluación y registro: Finalmente, los valores de THD y TDD se registran para su análisis comparativo, permitiendo evaluar la calidad de la energía suministrada a la carga y generando una base de datos que sirve de referencia para futuros estudios.

3.3 Análisis de Voltaje

En las siguientes figuras se presentan los resultados obtenidos del análisis de voltaje de la fase L1 para tres condiciones de carga representativas:

3.3.1 Caso 1: 1 foco LED de 25 W.

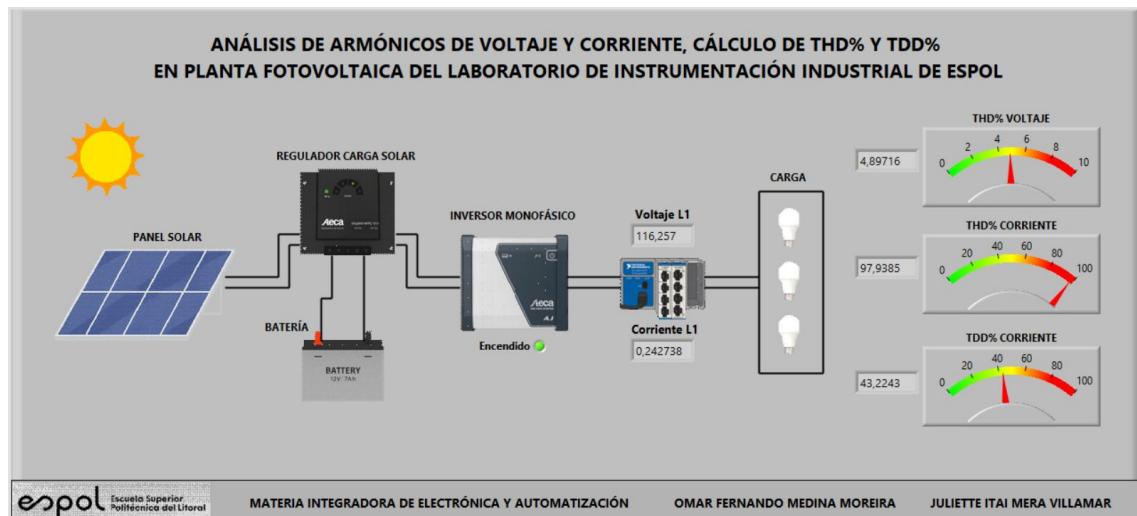


Ilustración 16 Panel frontal con datos del caso 1

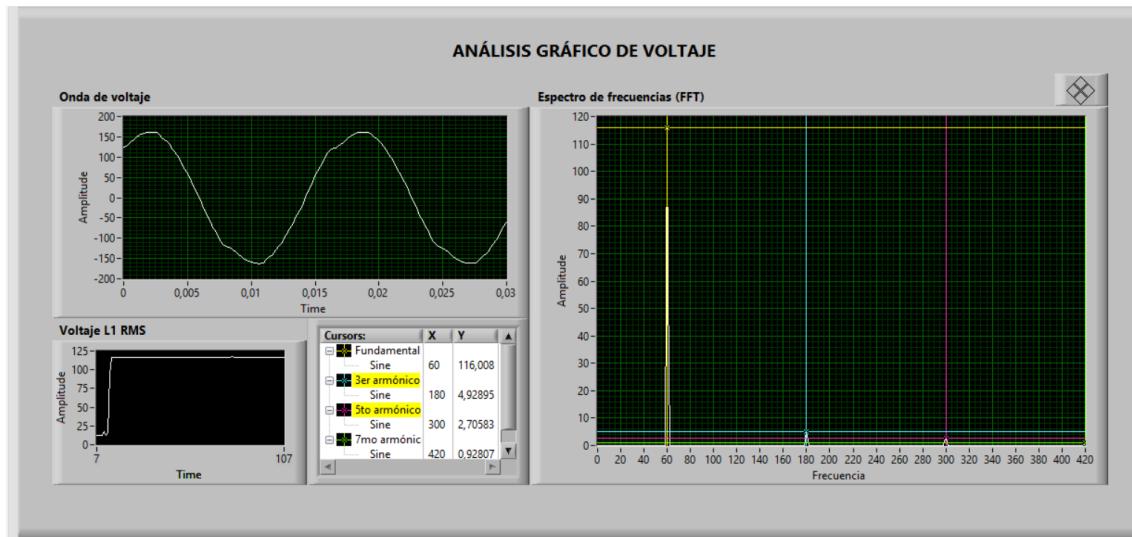


Ilustración 17 Gráficos de voltaje del caso 1

3.3.2 Caso 2: Conjunto de 3 focos LED (25 W + 4 W + 4 W).

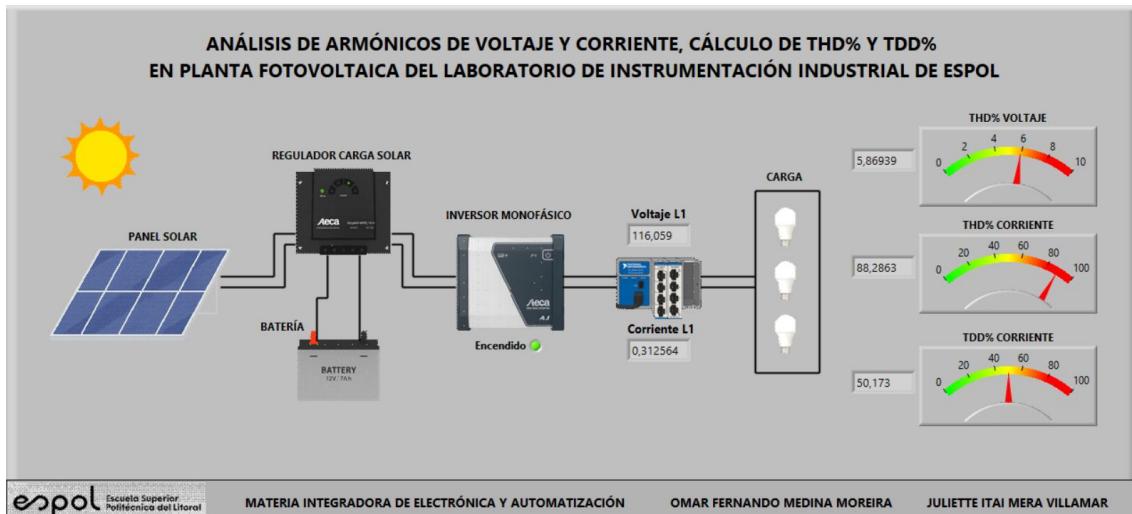


Ilustración 18 Panel frontal con datos del caso 2

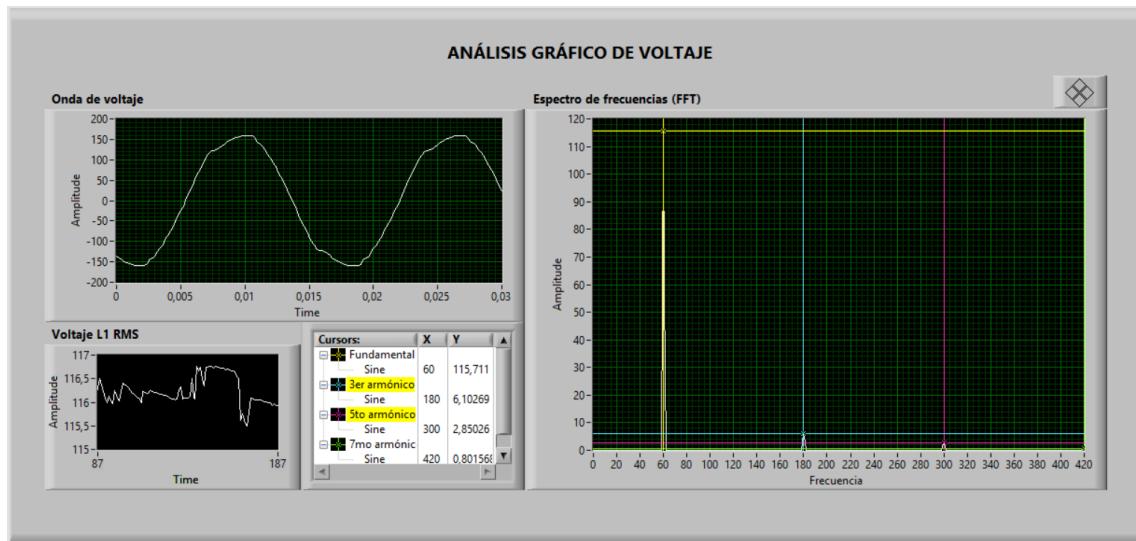


Ilustración 19 Gráficos de voltaje del caso 2

3.3.3 Caso 3: Carga total compuesta por 3 focos LED (25 W + 4 W + 4 W) y 2 cargadores de celular (20 W + 5 W).

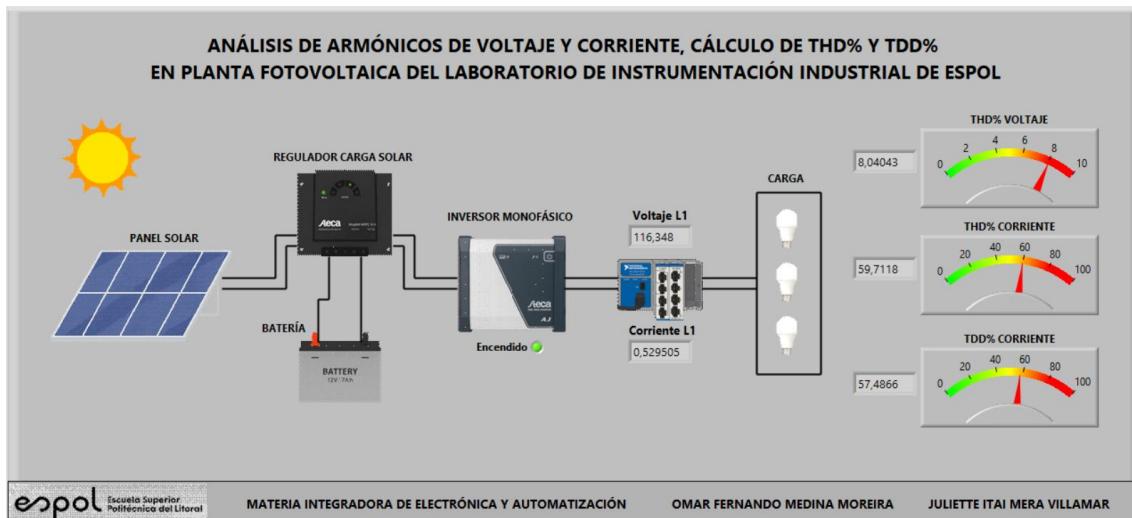


Ilustración 20 Panel frontal con datos del caso 3

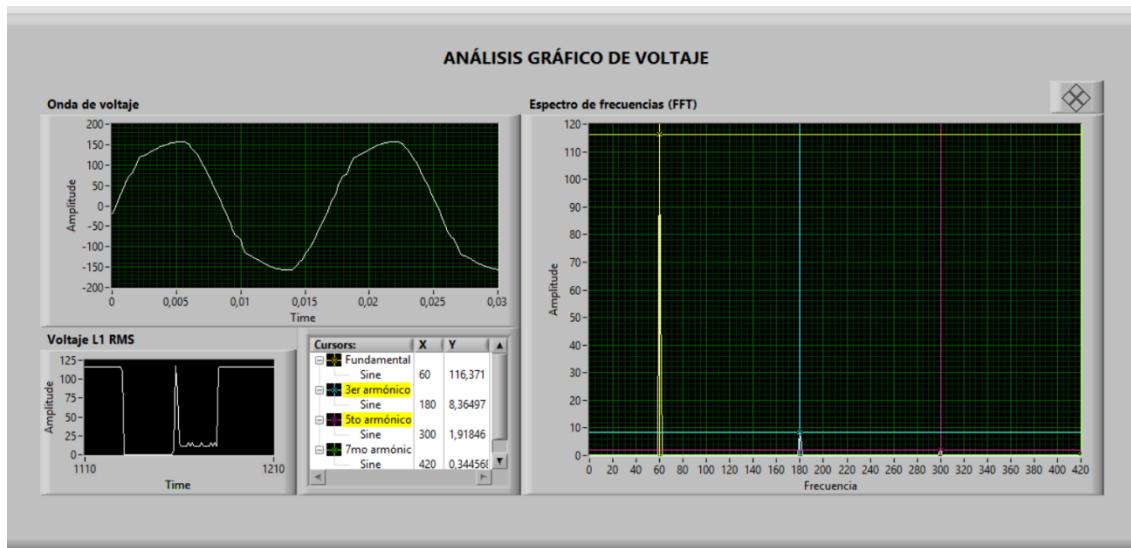


Ilustración 21 Gráficos de voltaje del caso 3

En todos los casos, la forma de onda de voltaje adquirida en el dominio del tiempo mantiene un comportamiento sinusoidal, con una amplitud máxima aproximada de 170 V y un valor eficaz promedio cercano a los 116 V RMS, acorde con los indicadores de las mediciones.

El análisispectral muestra que la componente fundamental se ubica en los 60 Hz, con valores próximos a la tensión RMS medida en cada prueba. Sin embargo, se observa un incremento progresivo de los armónicos conforme aumenta la cantidad y diversidad de cargas:

En el caso 1 se registra un THDv de 4,90 %, donde los armónicos 3.^o y 5.^o alcanzan amplitudes moderadas.

$$THD\% = \frac{\sqrt{4.92^2 + 2.70^2 + 0.93^2}}{116} \times 100 = 4.90\%$$

Utilizando la fórmula para calcular el THDv y utilizando los valores obtenidos en el espectro de frecuencias, se obtiene un valor similar al mostrado en el panel frontal.

En el caso 2 el THDv asciende a 5,87 %, con predominio del 3.er armónico y presencia notable del 5.^o y 7.^o.

$$THD\% = \frac{\sqrt{6.10^2 + 2.85^2 + 0.80^2}}{115.7} \times 100 = 5.86\%$$

Al incrementar la magnitud del tercer armónico, el THDv aumenta por encima del 5%, esto debido al incremento de 2 focos LEDs, que son cargas no lineales.

En el caso 3 el THDv alcanza 8,04 %, constituyendo el valor más alto medido. La mezcla de focos LED y cargadores de celular, que son cargas no lineales más fuentes conmutadas contribuye a la distorsión de la forma de onda de voltaje.

$$THD\% = \frac{\sqrt{8.36^2 + 1.92^2 + 0.34^2}}{116} \times 100 = 7.40\%$$

Se observa una pequeña variación entre el valor obtenido y el valor calculado debido a que el THDv varía bastante cuando el equipo se encuentra entregando la máxima carga.

Analizando estos resultados, se observa que, aunque la señal de tensión conserva un carácter sinusoidal, la presencia de armónicos se intensifica a medida que se incrementa la potencia y diversidad de cargas, siendo más crítico en configuraciones mixtas.

3.4 Análisis de Corriente

En las siguientes figuras se muestran los resultados del análisis de la corriente de la fase L1 para los tres casos de estudio:

3.4.1 Caso 1: 1 foco LED de 25 W.

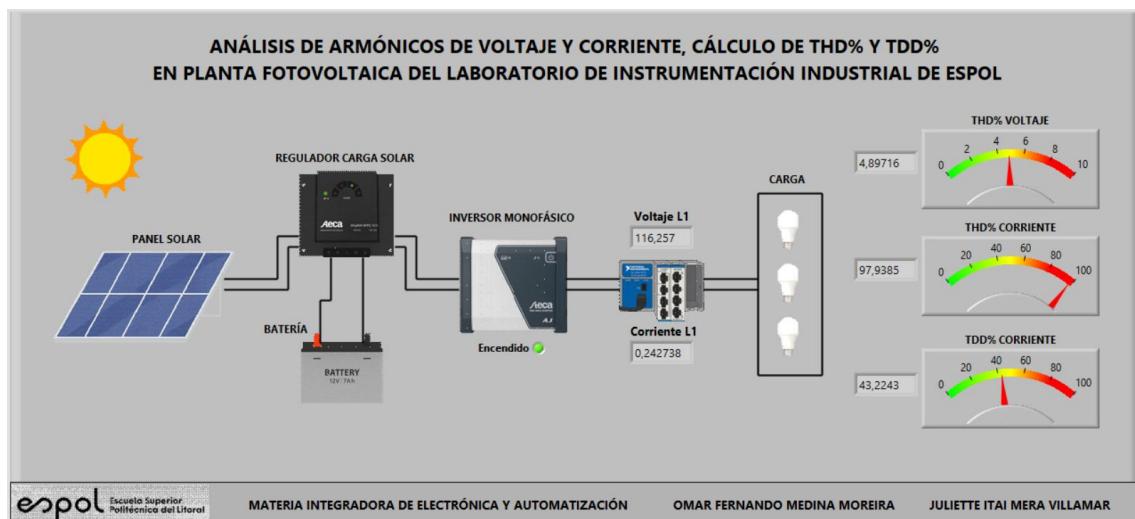


Ilustración 22 Panel frontal con datos del caso 1

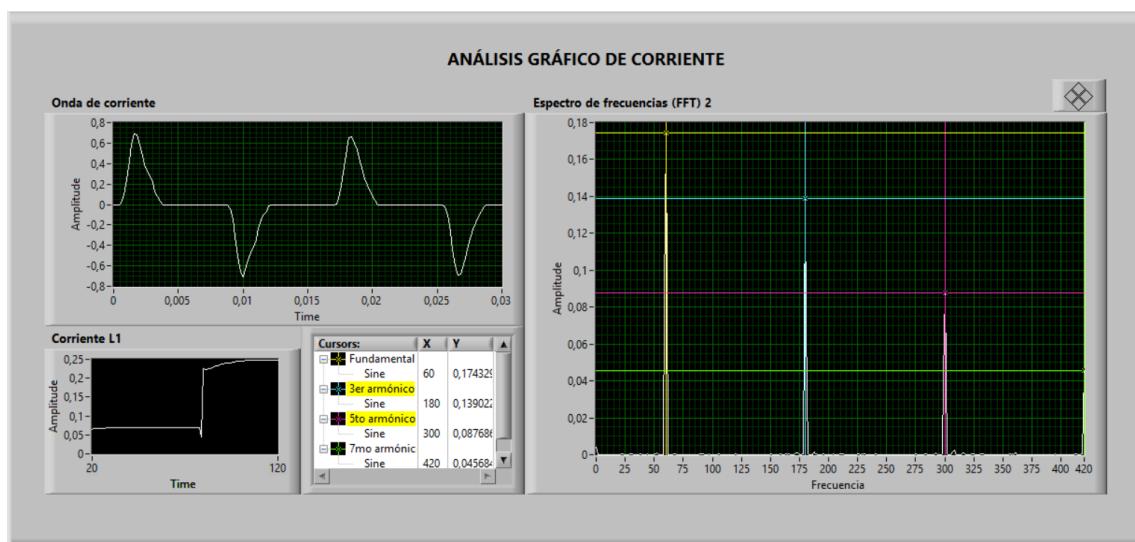


Ilustración 23 Gráficas de corriente del caso 1

3.4.2 Caso 2: Conjunto de 3 focos LED (25 W + 4 W + 4 W).

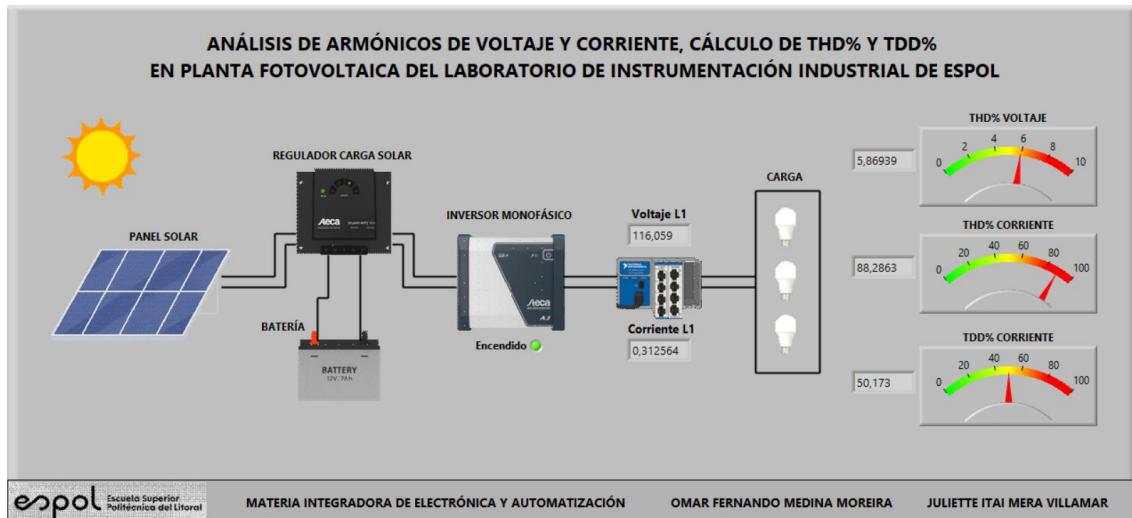


Ilustración 24 Panel frontal con datos del caso 2

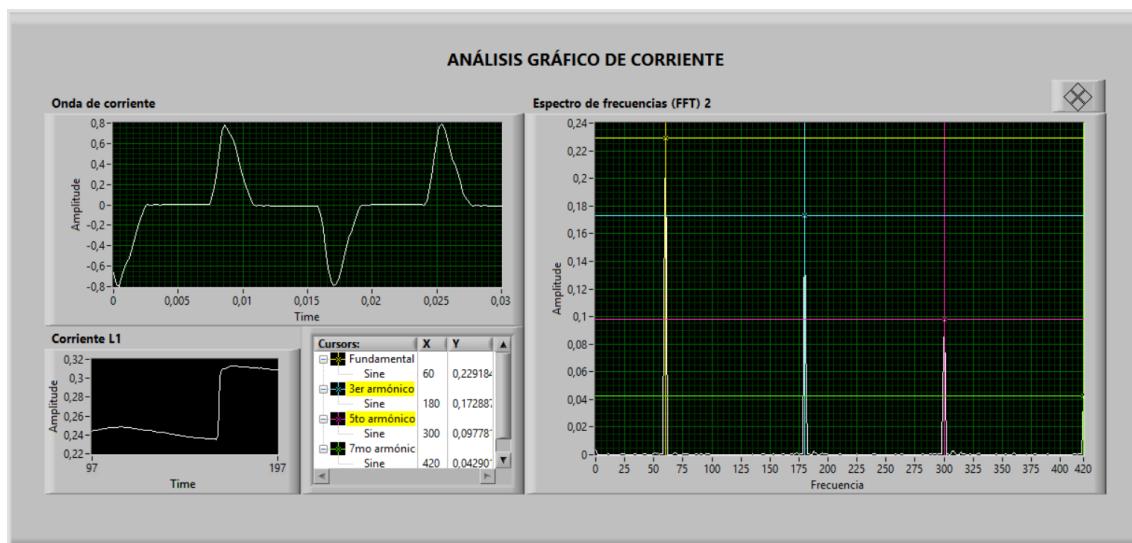


Ilustración 25 Gráficas de corriente del caso 2

3.4.3 Caso 3: Carga total (3 LEDs + 2 cargadores).

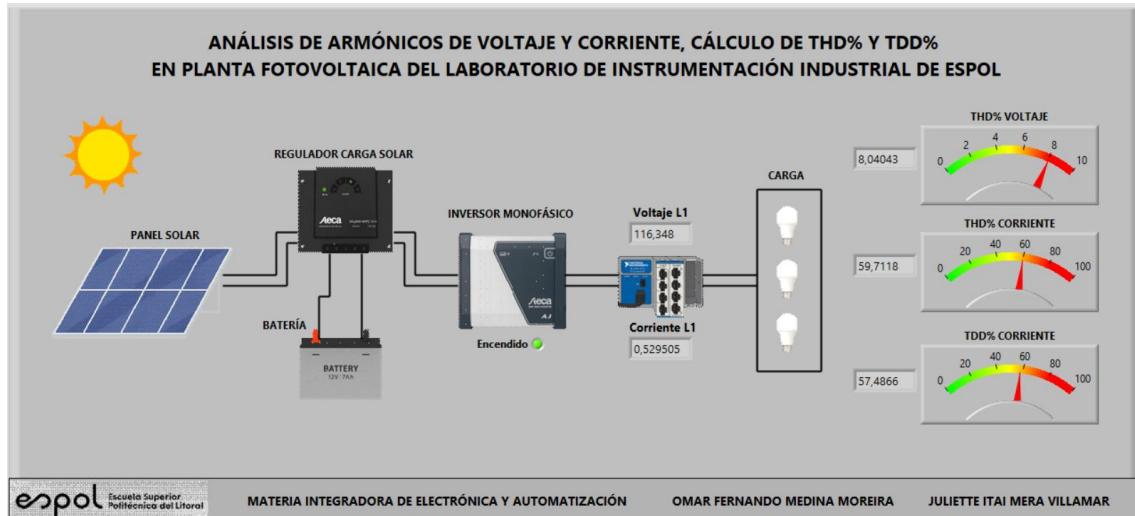


Ilustración 26 Panel frontal con datos del caso 3

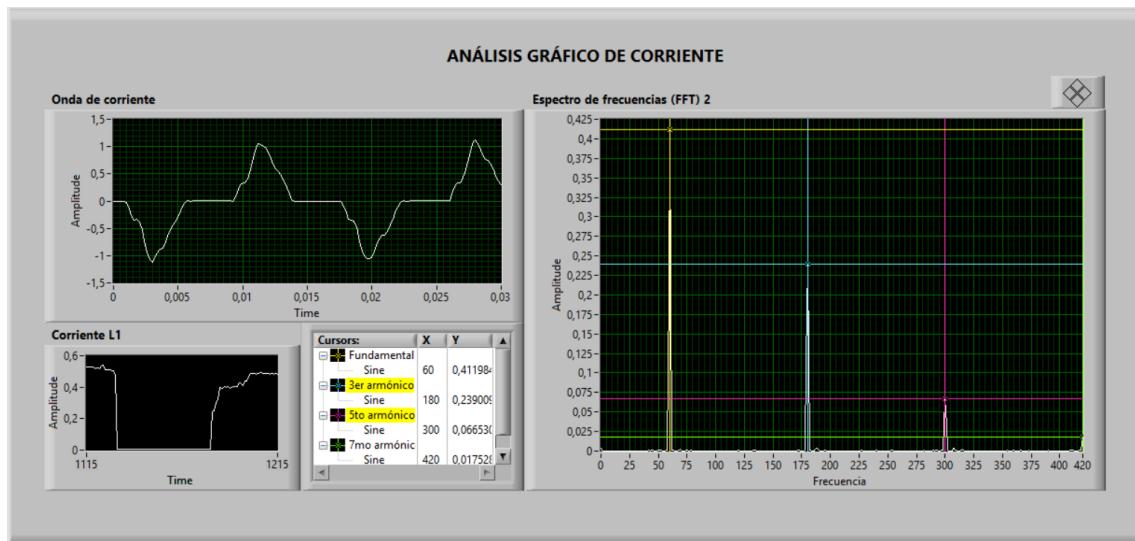


Ilustración 27 Gráficas de corriente del caso 3

En todos los casos, la onda de corriente presenta una distorsión considerable respecto a una sinusoidal ideal, con picos y formas irregulares, reflejando la naturaleza no lineal de las cargas analizadas.

Los valores RMS obtenidos muestran el aumento progresivo de la demanda de corriente conforme crece la carga:

Caso 1: $I_{rms} = 0,243$ A, con un THDi de 97,9 % y un TDD de 43.2 %.

$$THD\% = \frac{\sqrt{0.139^2 + 0.087^2 + 0.045^2}}{0.174} \times 100 = 97.72\%$$

$$TDD\% = \frac{\sqrt{0.139^2 + 0.087^2 + 0.045^2}}{0.50} \times 100 = 34.02\%$$

Se observa que, usando las fórmulas para calcular el THDi y TDD respectivamente, se obtienen valores similares a la simulación.

Caso 2: $I_{rms} = 0,313$ A, THDi de 88,3 % y TDD de 50,2 %.

$$THD\% = \frac{\sqrt{0.173^2 + 0.098^2 + 0.043^2}}{0.229} \times 100 = 88.8\%$$

$$TDD\% = \frac{\sqrt{0.173^2 + 0.098^2 + 0.043^2}}{0.50} \times 100 = 41.01\%$$

Caso 3: $I_{rms} = 0,530$ A, THDi de 59,7 % y TDD de 57,5 %.

$$THD\% = \frac{\sqrt{0.239^2 + 0.066^2 + 0.018^2}}{0.412} \times 100 = 60.3\%$$

$$TDD\% = \frac{\sqrt{0.239^2 + 0.066^2 + 0.018^2}}{0.50} \times 100 = 49.8\%$$

La diferencia entre el TDD medido y el TDD calculado se debe a que los indicadores de corriente RMS y THD no fueron capturados en la misma ventana temporal. Además, el bloque Distortion Measurements calcula el THD a partir de la fundamental del espectro, lo que genera ligeras variaciones en el valor final.

El espectro de frecuencia confirma que la componente fundamental (60 Hz) es dominante, pero acompañada de armónicos impares de magnitud significativa. A mayor cantidad de cargas electrónicas, la distorsión en corriente se acentúa, aunque el THDi tiende a disminuir debido al aumento de la componente fundamental.

La corriente es la variable más afectada por la no linealidad de las cargas, mostrando picos pronunciados en la forma de onda y altos niveles de distorsión. El TDD es el índice más representativo, ya que refleja cómo el incremento de la potencia total amplifica el impacto de los armónicos sobre la red.

3.5 Sistema de alarmas

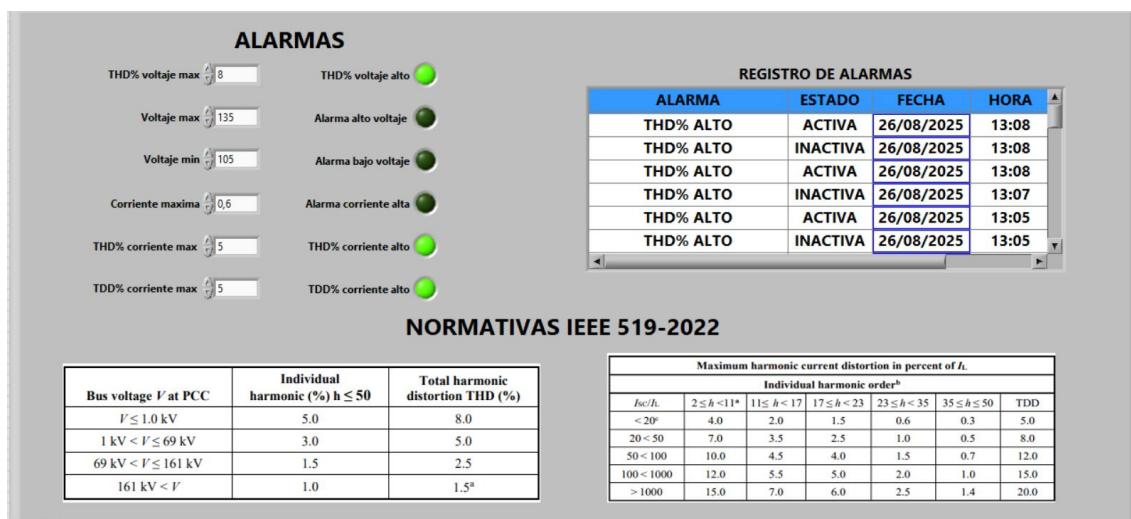


Ilustración 28 Sistema de alarmas

En la figura se presenta la interfaz correspondiente al sistema de alarmas implementado en el SCADA, que permite supervisar en tiempo real si los niveles de voltaje, corriente y distorsión armónica en la planta fotovoltaica superan los máximos definidos.

En la parte izquierda se observan los parámetros de referencia que pueden ser configurados por el operador:

- Límites de voltaje: máximo (130 V) y mínimo (105 V).
- Corriente máxima: establecida en 0,6 A. (Depende de la carga)
- THD% máximo de voltaje y corriente: configurados en 5%.

Cada condición monitoreada está asociada a un indicador LED que cambia de estado en función del valor medido. En la imagen, se evidencia la activación de las alarmas de THD% alto en voltaje y corriente, lo cual se representa con indicadores en color verde que señalan la condición de alerta.

En la parte derecha se encuentra el registro histórico de alarmas, en el cual se almacenan la descripción, estado (activa o inactiva), fecha y hora de ocurrencia. Con este registro se puede llevar un control detallado de las alarmas en el sistema eléctrico.

Finalmente, en la sección inferior se incluyen las tablas de referencia de la normativa IEEE 519-2022, las cuales establecen los límites permisibles de distorsión armónica tanto en voltaje como en corriente.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

El presente capítulo expone los hallazgos más relevantes obtenidos durante el desarrollo e implementación del sistema SCADA para monitoreo y análisis de armónicos en la planta fotovoltaica del laboratorio de instrumentación industrial. Se presentan, en primer lugar, las conclusiones derivadas de la validación experimental del sistema, destacando el cumplimiento de los objetivos propuestos y la efectividad de la solución desarrollada. Posteriormente, se detallan las recomendaciones orientadas a mejorar y ampliar las capacidades del sistema, con el propósito de optimizar su desempeño.

4.1.1 Conclusiones

- El desarrollo e implementación del sistema SCADA para el análisis de armónicos en la planta fotovoltaica permitió cumplir con los objetivos planteados, integrando en una única plataforma la adquisición de datos, el procesamiento de señales y la visualización en tiempo real de parámetros eléctricos.
- La utilización de hardware de National Instruments (NI cDAQ-9174 con módulos NI 9225 y NI 9227) y la programación en LabVIEW posibilitó un monitoreo confiable de la tensión y corriente del sistema, así como el cálculo preciso del valor eficaz (RMS), el índice de distorsión armónica total (THD) y la identificación de armónicos individuales mediante análisis espectral (FFT).
- Los resultados experimentales mostraron que el sistema es capaz de detectar variaciones en la calidad de energía, evidenciando un aumento progresivo del THD de voltaje desde valores desde el 2,02 % hasta un máximo de 8,04 % en condiciones de prueba controladas, pero no se obtuvieron valores más altos de THD% por las limitaciones del inversor monofásico, el cual tiene una potencia máxima de 275VA.

Se verificó que la distorsión está dominada por armónicos impares, especialmente el tercer armónico por el uso de cargas no lineales, mientras que las componentes pares fueron despreciables debido a la simetría de la forma de onda.

- El análisis de corriente evidenció contenidos armónicos significativamente más elevados que en tensión, con valores de THDi que superaron el 100 % en cargas ligeras y TDD superiores al 50 % en condiciones de máxima carga, lo que confirma el fuerte impacto de los dispositivos electrónicos sobre la forma de onda de corriente. Con estos resultados se evidencia la importancia de considerar el TDD como indicador de referencia, ya que refleja de mejor manera la distorsión a la demanda del sistema.
- El SCADA desarrollado incorpora un sistema de alarmas que se activa ante sobrevoltajes, bajos voltajes y niveles elevados de THD de voltaje y corriente, permitiendo actuar de forma preventiva ante condiciones de riesgo. Asimismo, el análisis comparativo con los límites de la norma IEEE 519-2022 confirma la capacidad del sistema para evaluar la conformidad de la planta fotovoltaica en términos de calidad de energía.

4.1.2 Recomendaciones

- Ampliar el sistema para la supervisión de sistemas trifásicos, incorporando la medición de tensiones de línea y corrientes en cada fase, con el fin de obtener un análisis integral de la planta fotovoltaica y su interacción con la red eléctrica.
- Desarrollar un módulo de registro histórico que almacene en una base de datos los valores de tensión, corriente, THD y eventos de alarma, permitiendo un análisis estadístico a largo plazo y la elaboración de reportes automáticos.

- Incorporar conectividad a través de redes locales o internet para permitir la supervisión remota del sistema SCADA y mejorando la capacidad de diagnóstico.
- Incluir herramientas adicionales de análisis de calidad de energía, como medición de factor de potencia y desbalance de tensión, para cumplir con un mayor número de parámetros establecidos en normativas internacionales.
- Realizar pruebas prolongadas conectando el sistema a la planta fotovoltaica en operación y a la red pública, evaluando su desempeño ante variaciones reales de carga y condiciones de generación intermitente.

Referencias

- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). Wiley.
- Díaz, M., Domínguez, A., & García, J. (2017). Remote laboratory for automation practices based on SCADA systems. *Computer Applications in Engineering Education*, 25(6), 963–974. <https://doi.org/10.1002/cae.21846>
- Galloway, B., y Hancke, G. P. (2013). Introduction to industrial control networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(2), 860–880. <https://doi.org/10.1109/SURV.2012.071812.00124>
- Christiani y Lucas-Nülle. (s. f.). *Solar module with solar altitude emulator*. <https://www.lucas-nuelle.us/2776/pid/26595/apg/13767/Solar-module-with-solar-altitude-emulator.htm>
- Christiani & Lucas-Nülle. (s. f.). *Solar module simulation model, 3-fold, 23V/2A*. <https://www.lucas-nuelle.us/2769/pid/40488/apg/21566/Solar-module-simulation-model,-3-fold,-23V-2A.htm>
- Christiani & Lucas-Nülle. (s. f.). *Load unit 1kOhm, 500W*. <https://www.lucas-nuelle.us/2769/pid/40490/apg/21566/Load-unit-1kOhm,-500W.htm>
- National Instruments. (2019). *NI 9225 Datasheet: 300 Vrms, 3-Channel C Series Voltage Input Module*. National Instruments. <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9225-datasheet>
- National Instruments. (2019). *NI 9227 Datasheet: 5 Arms, 4-Channel C Series Current Input Module*. National Instruments. <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9227-datasheet>
- IEEE. (2022). *IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems* (IEEE Std 519-2022). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/IEEEESTD.2022.9797352>

- National Instruments. (2019). *NI cDAQ-9174 Datasheet: 4-Slot USB CompactDAQ Chassis*. National Instruments. <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-cdaq-9174-datasheet>
- Arrillaga, J., & Watson, N. R. (2003). *Power system harmonics* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470871229>
- González, C., Méndez, D., & Salazar, J. (2020). Implementación de sistemas SCADA como herramienta educativa en ingeniería. *Revista Educación en Ingeniería*, 15(30), 77–86. <https://doi.org/10.26507/rei.v15n30.1247>
- Mohan, S., Andersen, P., & Jensen, T. (2019). Integration of SCADA systems in renewable energy laboratories for engineering education. *Proceedings of the Renewable Energy Education Conference (REEC)*, 102–109.
- Pérez, J., Ramírez, A., & Ortega, L. (2018). Educational approaches to SCADA for power engineering students. *International Journal of Electrical Engineering Education*, 55(2), 125–139. <https://doi.org/10.1177/0020720918755772>
- Siemens AG. (2020). *SIMATIC SCADA systems: Technical manual*. Siemens Industry, Automation Division. Disponible en <https://support.industry.siemens.com>
- Schneider Electric. (2021). *EcoStruxure™ SCADA Expert: User guide*. Schneider Electric SE.
- Singh, R., y Saxena, A. (2015). Application of SCADA systems in industry: A review. *International Journal of Computer Applications*, 112(6), 1–5. <https://doi.org/10.5120/19674-1236>
- IEEE. (2022). IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std 519-2022). IEEE.
- IEEE. (2022). *IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems* (IEEE Std 519-2022). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/IEEEESTD.2022.9797352>
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2. IEC.

National Instruments. (2023). LabVIEW 2023 User Manual. Austin, TX: NI.

National Fire Protection Association (NFPA). (2020). NFPA 70: National Electrical Code (NEC). NFPA.

Apéndice A

FICHA TÉCNICA DE LOS COMPONENTES DE LA PLANTA FOTOVOLTÁICA

Entrenador Solar

Especificaciones técnicas:

Proyector halógeno:

- Potencia: 500 W
- Alimentación: 230 V

Módulo solar (para simulador):

- Tensión en vacío: 21 V
- Corriente de cortocircuito: 650 mA
- Potencia máxima: 10 Wp
- Dimensiones: 1200 × 550 × 1100 mm
- Peso: 33 kg

Módulo solar adicional (uso en exterior/laboratorio):

- Potencia máxima: 180 W
- Tensión nominal (Vmp): 36 V
- Tensión en vacío (Voc): 42,4 V
- Corriente máxima (Imp): 5 A
- Corriente de cortocircuito (Isc): 5,4 A
- Dimensiones: 1490 × 700 × 35 mm

Sistema completo:

- Ángulo de inclinación ajustable
- Conexión en serie o paralelo
- Posibilidad de almacenamiento de energía en acumuladores
- Asas para facilitar el transporte
- Dimensiones totales: 1490 × 700 × 70 mm

- Peso: 30 kg

Placa de simulación de módulos solares

Especificaciones:

- Voltaje sin carga: 3×23 V
- Corriente de cortocircuito máxima: 3×2 A
- Regulación de luz: del 20% al 100%
- Incluye: diodo de derivación conectable y protección contra cortocircuitos
- Potencia total: 3×40 VA
- Instrumentación analógica: voltímetro (0–15 V) y amperímetro (0–2,5 A)
- Alimentación: 88–264 VCA, 47–63 Hz
- Dimensiones: $297 \times 456 \times 210$ mm
- Peso: 6,8 kg

Resistencia de carga para módulos solares y unidades de energía solar.

Principales especificaciones:

- Corriente máxima según rango de resistencia:
 - 0–50 Ω : hasta 6 A
 - 51–200 Ω : hasta 2 A
 - 201–1000 Ω : hasta 0,6 A
- Conexión: terminales de seguridad de 4 mm
- Dimensiones: $297 \times 228 \times 160$ mm
- Peso: 4,3 kg

Dispositivo de Medición

Entre sus principales características técnicas destacan:

- Medición simultánea de tensión y corriente (hasta 600 V y 20 A)

- Cálculo de potencias activa, reactiva, aparente y factor de potencia
- Medición de valores RMS (AC+DC), RMS-AC y valor medio
- Protección hasta 20 A / 600 V
- Rango de tensiones: 30, 300 y 600 V
- Rango de corriente: 1, 10 y 20 A
- Precisión: $\pm 2\%$
- Selección automática o manual de rangos
- Alimentación: 230 V, 50/60 Hz
- Dimensiones: 297 x 228 x 85 mm
- Peso: 2,5 kg

Inversor fuera de red 230 V, 275 VA

En cuanto a sus especificaciones técnicas:

- Tensión de salida: onda sinusoidal de 230 V $\pm 5\%$
- Potencia nominal: 275 VA
- Eficiencia: 93%

También cuenta con múltiples sistemas de protección:

- Desconexión por sobrevoltaje en la batería
- Protección ante sobrecalentamiento y sobrecargas
- Protección contra cortocircuitos
- Protección contra inversión de polaridad
- Para la conexión, dispone de terminales con conectores de seguridad de 4 mm.

Sus dimensiones son 297 mm de alto, 228 mm de ancho y 145 mm de profundidad, con un peso total de 3,1 kg.

Apéndice B

ANEXO FOTOGRÁFICO



Ilustración 29 Planta Solar



Ilustración 30 Panel Solar



Ilustración 31 Pruebas con el panel solar

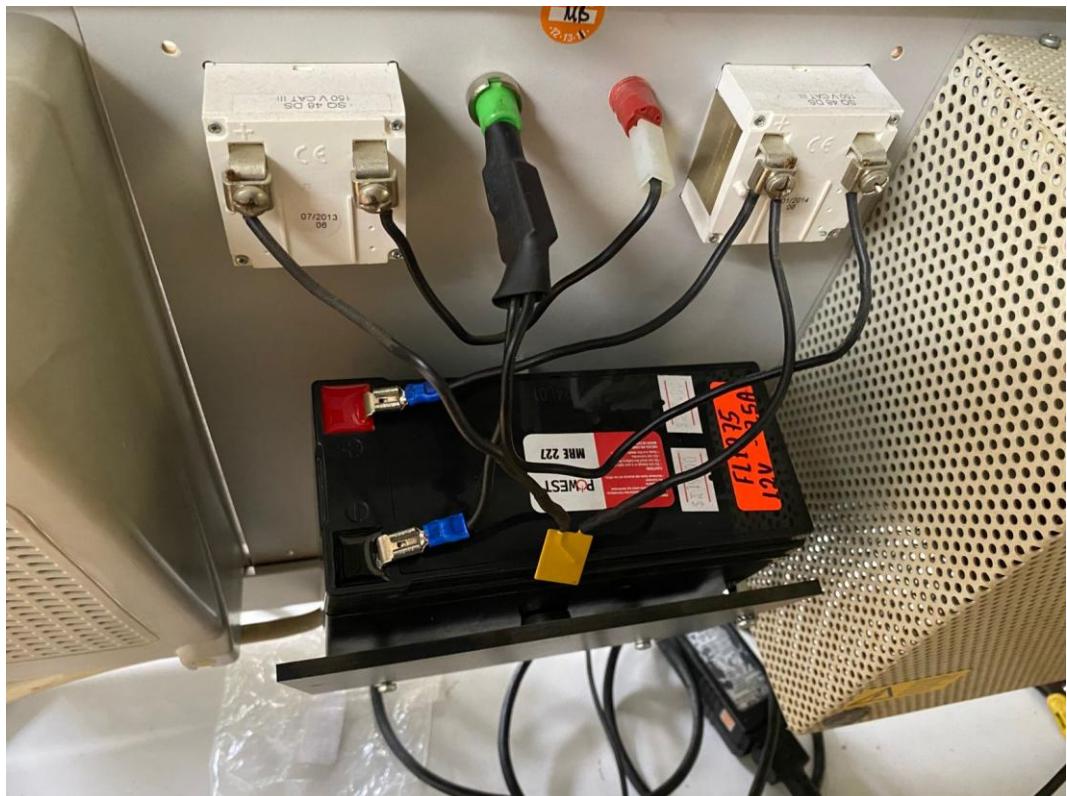


Ilustración 32 Reemplazo de batería de la planta solar



Ilustración 33 Voltaje de la batería



Ilustración 34 Regulador de carga solar conectado

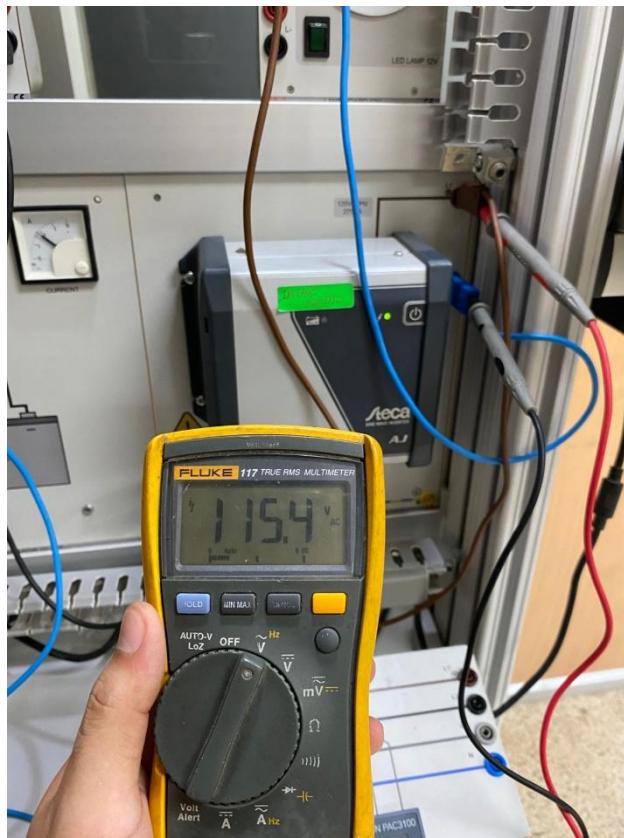


Ilustración 35 Voltaje entregado por el inversor



Ilustración 36 Voltaje entregado a la carga



Ilustración 37 Pruebas en la planta solar

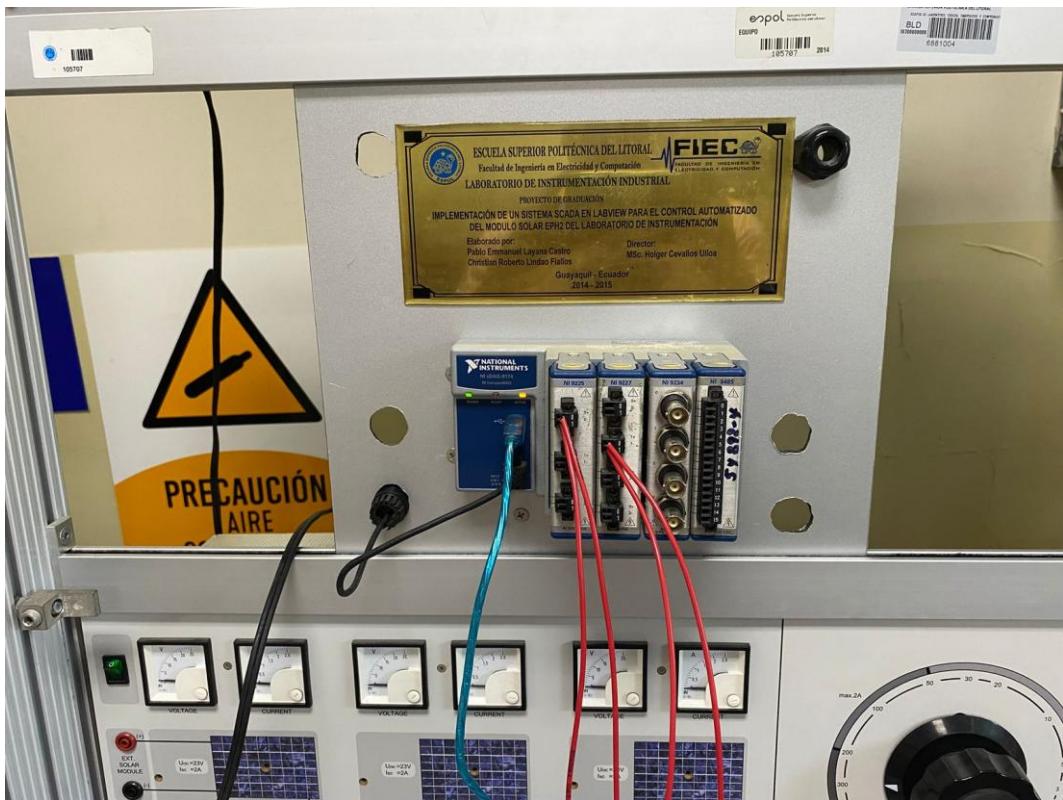


Ilustración 38 Modulo DAQ conectado

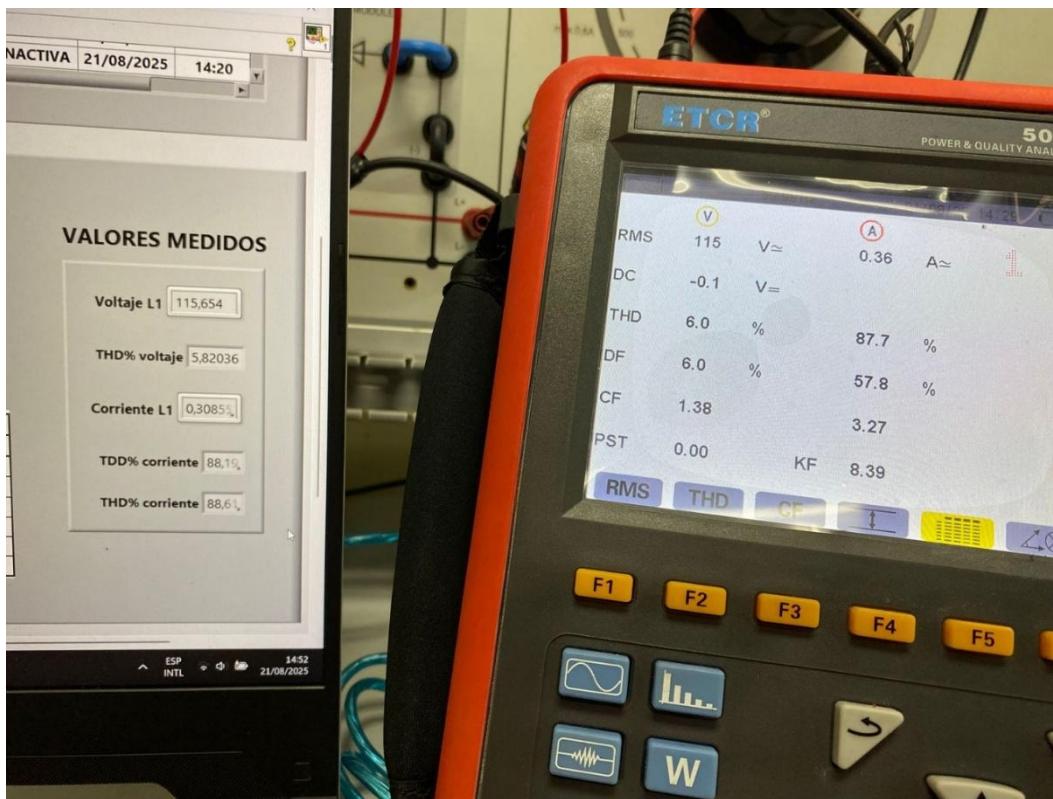


Ilustración 39 Validación de datos con analizador de energía

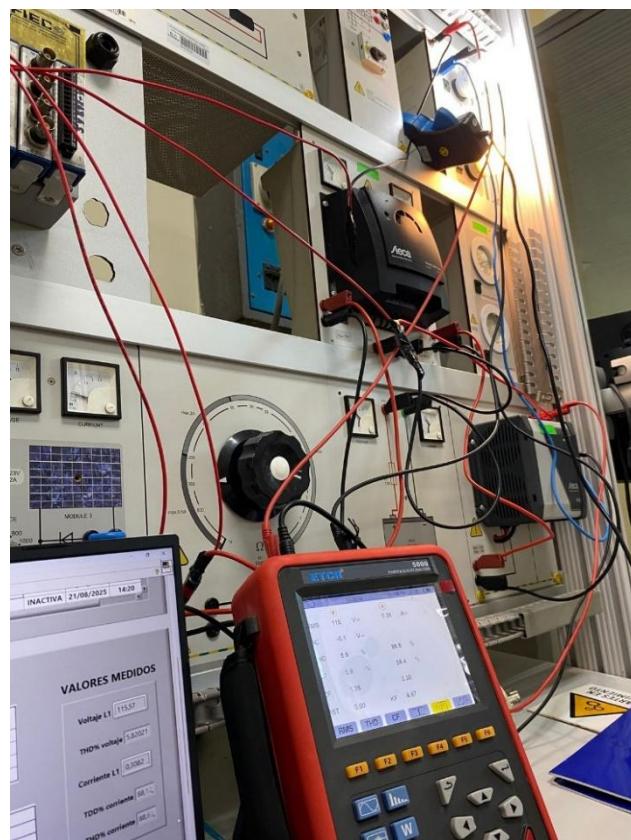


Ilustración 40 Pruebas finales en la planta solar

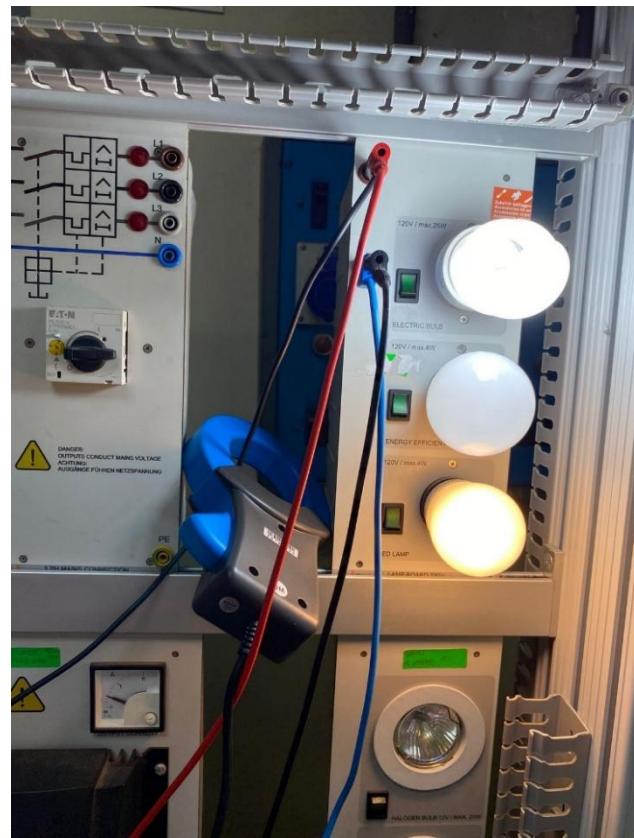


Ilustración 41 Uso de pinza amperimétrica para medición de corriente



Ilustración 42 Validación de las gráficas de voltaje y corriente