

DISEÑO DE PUESTO DE TRABAJO PARA EL DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Workplace design for the development of power quality laboratory practices

Ing. Victor Antonio Morera Cobián, <https://orcid.org/0009-0004-5302-0635>

MSc. Frank Grau Merconchini*, <https://orcid.org/0000-0002-0174-5309>

MSc. Eduardo López Pérez, <https://orcid.org/0009-0008-2179-6809>

Universidad de Oriente, Cuba

*Autor para correspondencia. email decanofie@consejo.uo.edu.cu

Para citar este artículo: Morera Cobián, V. A., Grau Merconchini, F. G. y López Pérez, E. (2024). Diseño de puesto de trabajo para el desarrollo de prácticas de laboratorio de calidad de la energía eléctrica. *Maestro y Sociedad*, 21(1), 47-60. <https://maestrosociedad.uo.edu.cu>

RESUMEN

Introducción: En este trabajo, se describe el diseño de un modelo físico para el estudio de los indicadores de calidad de la energía eléctrica en redes eléctricas monofásicas de baja tensión. Materiales y métodos: El modelo propuesto, emplea elementos de instrumentación moderna, permitiendo la medición de tensiones y corrientes en el sistema mediante una Tarjeta de Adquisición de Datos y su posterior procesamiento con el empleo de una computadora personal y el software Matlab. Resultados: El modelo permite estudiar cargas no lineales que se utilizan comúnmente en redes residenciales y de servicios, caracterizar las mismas y determinar los indicadores de calidad del producto técnico. Discusión: El empleo de este modelo, tributa al desarrollo de prácticas de laboratorio de Calidad de la Energía, con los medios de enseñanza apropiados para el desarrollo de habilidades y conocimientos asociados a calidad de la energía eléctrica en los sistemas electroenergéticos de baja tensión, lo que tributa a la formación de profesionales en el pregrado y el posgrado de esta especialidad. Conclusiones: Se constata que las prácticas están diseñadas para realizarse de forma virtual, lo cual no contribuye a que los estudiantes desarrollen habilidades de medición, modelado y simulación de las redes de distribución secundarias y sus principales cargas.

Palabras clave: calidad de la energía, modelo físico, prácticas de laboratorio.

ABSTRACT

Introduction: In this work, the design of a physical model for the study of electrical energy quality indicators in low-voltage single-phase electrical networks is described. Materials and methods: The proposed model uses elements of modern instrumentation, allowing the measurement of voltages and currents in the system using a Data Acquisition Card and its subsequent processing with the use of a personal computer and Matlab software. Results: The model allows studying non-linear loads that are commonly used in residential and service networks, characterizing them and determining the quality indicators of the technical product. Discussion: The use of this model contributes to the development of Energy Quality laboratory practices, with the appropriate teaching aids for the development of skills and knowledge associated with the quality of electrical energy in low voltage electroenergy systems, which which contributes to the training of undergraduate and graduate professionals in this specialty. Conclusions: It is confirmed that the practices are designed to be carried out virtually, which does not contribute to students developing measurement, modeling and simulation skills of secondary distribution networks and their main loads.

Key words: Power quality, physical model, laboratory practices.

Recibido: 19/10/2023 Aprobado: 4/12/2023

INTRODUCCIÓN

Las prácticas de laboratorio desempeñan un importante papel en el proceso de enseñanza de las asignaturas de ciencias técnicas. Esta forma organizativa de la docencia, se caracteriza por el carácter activo que le confieren al proceso de aprendizaje, logrando así la consolidación del conocimiento, que el estudiante se acerque de forma natural al trabajo científico-investigativo que se desarrollen habilidades experimentales (Pesa *et al.*, 2014; Hernández *et al.*, 2018; Williams *et al.*, 2020; Martínez *et al.*, 2023)

El empleo de los instrumentos electrónicos permite la medición y el procesamiento de la información (variables físicas) a partir de las cuales se realiza la medición, utilizando dispositivos analógicos y/o digitales (Lopes *et al.*, 2021). En la actualidad, la tendencia es a desarrollar sistemas de instrumentación que aprovechen las potencialidades de la instrumentación electrónica, la digitalización de las señales analógicas (empleando convertidores analógicos-digitales) y su análisis mediante el procesamiento digital de las señales. La instrumentación virtual permite sustituir los elementos de hardware por el software en un procesador digital, garantizando ampliar la capacidad de procesamiento y la automatización en su funcionamiento (Riaz *et al.*, 2021).

En los laboratorios del Departamento Docente de Eléctrica es necesaria la determinación, con un alto nivel de exactitud, de diversas magnitudes físicas. Estas magnitudes resultan necesarias para el cálculo de parámetros, condiciones de operación y control de los sistemas electroenergéticos (Lopes *et al.*, 2021).

Las disciplinas de Sistemas Electroenergéticos y Sistemas Electromecánicos, cuentan con cuatro laboratorios en su conjunto, Estos están dedicados al estudio de los sistemas eléctricos en distintos regímenes de operación, al estudio de las protecciones eléctricas y al estudio de las máquinas eléctricas y los accionamientos. Aunque estos laboratorios tienen un propósito didáctico, sus instalaciones son empleadas también para realizar estudios de casos en investigaciones vinculadas a maestrías en las especialidades de Control Automático e Ingeniería Eléctrica. Por otra parte, estas instalaciones son utilizadas como apoyo en el desarrollo de servicios científico técnicos a empresas del territorio, las cuales, están comúnmente vinculadas al estudio de la calidad de la energía en estas empresas.

La calidad de la energía eléctrica tiene un gran impacto en la eficiencia electroenergética y el ahorro de energía eléctrica. Tener un suministro de energía eléctrica inadecuado puede representar grandes pérdidas económicas en una empresa (Chattopadhyay *et al.*, 2011; Arghandeh *et al.*, 2013).

La diversidad de esquemas, niveles de tensión, equipamiento, pruebas y prácticas de laboratorio que se realizan en estas instalaciones exige el empleo de sistemas de instrumentación que sean capaces de Lopes *et al.* (2021):

- Medir magnitudes eléctricas y otras magnitudes físicas, de manera directa o indirecta, tales como tensión, corriente, potencias, factor de potencia, resistencia, impedancia, reactancia, velocidad, posición, torque o momento y tiempo. Además, muchas de estas magnitudes deben ser medidas de manera simultánea.
- Operar en sistemas con diversidad de tensiones, con niveles de BT (120, 230, 380 y 440 V) y niveles de instrumentación o control (<10V), así como en sistemas de CA y CD.
- Flexibilidad y adaptabilidad del sistema de instrumentación que le permita adecuarse a nuevos esquemas o condiciones experimentales.
- Determinar con una elevada precisión los indicadores que dan cuenta de la calidad de la energía eléctrica.

En la actualidad, la instrumentación existente en los laboratorios dista mucho de cumplir con estos requisitos. En su mayoría, estos instrumentos se caracterizan por:

- Poseer más de 25 años de explotación, por lo que se puede decir que presentan un alto grado de obsolescencia y deterioro, siendo en su mayoría de la década de los 80 del pasado siglo.
- No se encuentran calibrados, por lo que no se puede asegurar su nivel de precisión.
- Restricciones en la escala de medición, que de conjunto con una arquitectura “cerrada”, impide que puedan ser empleados en distintos esquemas.
- No existencia de analizadores de redes monofásicos y trifásicos para el desarrollo de estudios.

Estas limitaciones impiden que se exploten todas las potencialidades de estas instalaciones, reduciéndose drásticamente el número de estudiantes en los laboratorios y presentándose problemas en la determinación de los parámetros a estudiar en los ensayos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los sistemas electroenergéticos son evaluados a partir de la calidad del servicio y la calidad del producto o calidad de la onda. El primer grupo abarca los tiempos de interrupción y la energía dejada de servir, así como las pérdidas de energía de acuerdo al tipo de sistema y el nivel de tensión en el que operan. El segundo, considera la distorsión de las formas de onda de las tensiones y las corrientes, sus variaciones de amplitud y de frecuencia (Chattopadhyay *et al.*, 2011, Arghandeh *et al.*, 2013).

La evaluación de la calidad de la onda se realiza a partir de indicadores de calidad. Entre los indicadores más importantes a considerar están los siguientes:

- Desviación de la tensión (Ud).
- Desviación de la frecuencia (Δf).
- Desbalance de tensión (kv).
- Desbalance de corriente (ki).
- Distorsión armónica (DA) individual de corriente y de tensión.
- Distorsión armónica total (THD) de corriente y de tensión.

La asignatura Calidad de la Energía Eléctrica, pertenece al currículo Optativo–Electivo de la carrera de Ingeniería Eléctrica. La misma, forma parte de la Disciplina Sistemas Electroenergéticos en el Plan de Estudios E y se imparte en el primer período del tercer año de esta carrera.

En el sistema de habilidades declarado para esta asignatura, resulta importante relacionar las siguientes:

- Conocer los indicadores de calidad de la energía eléctrica e interpretarlos físicamente.
- Conocer las normas para la calidad de la energía eléctrica y su implementación en sistemas electroenergéticos de media y baja tensión.
- Conocer la metodología para determinar los indicadores de la calidad de la energía eléctrica en sistemas electroenergéticos de media y baja tensión.
- Aplicar los programas de computación existentes al análisis de sistemas de cierta complejidad, incluyéndose la interpretación de los resultados.

Para cumplir con estas habilidades, el estudiante debe ser capaz de analizar la calidad de la energía eléctrica en sistemas de media y baja tensión, así como calcular los indicadores de calidad y aplicar las normas vigentes para su evaluación en los sistemas. De ahí entonces que, como parte del sistema de conocimientos de la asignatura, los estudiantes deben ser capaces de:

- Determinar los indicadores de calidad y caracterizar la calidad de la energía eléctrica en un sistema de acuerdo a sus indicadores.
- Emplear las normas de calidad de la energía eléctrica y su aplicación.
- Emplear la metodología para la medición directa e indirecta de los indicadores de calidad. Sistemas de instrumentación moderna. Instrumentos registradores. Procesamiento digital de señales de corriente y tensión. Interpretación de los resultados.

En cambio, las prácticas están diseñadas para realizarse mediante el empleo de la computadora a escala de simulación. Esta limitación está dada precisamente por las limitaciones existentes con el empleo de modelos físicos que sean capaces de simular cargas lineales y no lineales en una red de baja tensión, así como los elementos de instrumentación que requieren estos modelos para estudiarse a escala de un laboratorio físico.

Para dar solución a las limitaciones con el desarrollo de las prácticas de laboratorio en la asignatura de Calidad de la Energía Eléctrica, se prevé la construcción de un puesto de trabajo que incorpore los elementos de instrumentación que permitan la caracterización de distintas cargas en redes de distribución de baja tensión. El esquema de instrumentación empleado en este trabajo está basado en la utilización de un convertidor analógico–digital, cuyo propósito es el de medir la tensión y la corriente a la entrada de la carga.

El procesamiento de las señales medidas se realizarán empleando una computadora personal, mediante el empleo de herramientas de software profesionales y otras diseñadas con este propósito.

Las cargas lineales y no lineales serán simuladas mediante el empleo de elementos reales encontrados en estos sistemas, tales como cargas de alumbrado de diferentes tecnologías, cargas puntuales de 110 y 220 V, ya sean lineales o no lineales, como por ejemplo cargas motoras (ventiladores), cocinas de inducción, equipos de televisión, audio, refrigeración o cualquier otro elemento que sea de interés su estudio.

Sistema de instrumentación

Como convertidor analógico–digital se utiliza una Tarjeta de Adquisición de Datos (TAD) marca IOtech, de serie DAQBoard/1000 (Personal DaqUser’s Manual, s. f.).

La TAD DaqBoard/1000, puede ser utilizada en una computadora personal (PC) al conectarse mediante el puerto de interconexión de componentes periféricos (PCI). De esta manera, es posible controlar por software todas sus funciones y emplear las potencialidades de la PC para el procesamiento y almacenamiento de los datos. La comunicación externa con el circuito se realiza mediante un cable con un conector de 68 pines nombrado TB – 100, el cual proporciona el acceso para todas las señales de entrada y salida (Ver figura 1).



Fig. 1 TAD DAQBoard/1000 y conector TB – 100

Entre las principales prestaciones de esta tarjeta se encuentran las siguientes:

- Posee 16 entradas analógicas simples o 8 entradas analógicas diferenciales con, rangos bipolares (de ± 10 V a ± 156 mV a escala completa) y una frecuencia de escaneo de hasta 200 kHz.
- Posee 24 líneas de E/S digital para todo uso.
- Posee 4 entradas de contador, 2 temporizadores de salidas y 2 salidas analógicas.
- Permite la programación de los intervalos de muestreo entre 5 μ s o 10 μ s por cada canal.
- Rango de la tensión de entrada (V_{max}): ± 10 V.

Para acondicionar las señales de tensión y corriente a medir se emplearán dos transductores. Como transductor de tensión se utilizará un autotransformador variable desde 0 hasta el 110 % de la tensión de entrada.

Para acondicionar las señales de tensión y corriente a medir se emplearán dos transductores. Como transductor de tensión se utilizará un autotransformador variable desde 0 hasta el 110 % de la tensión de entrada. Como transductor de corriente se empleará una resistencia shunt de 0.05 Ω , con valores de 75 mV por cada 1,5 A. El esquema para la medición se muestra en la figura 2.

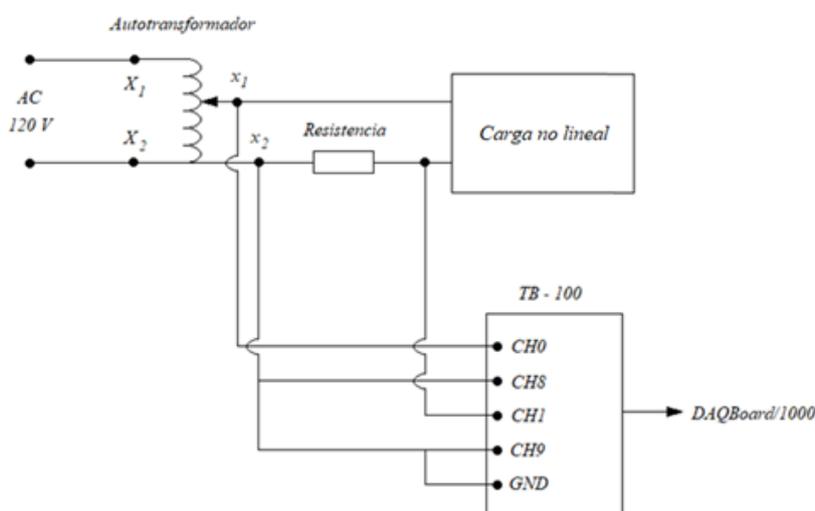


Fig. 2 Esquema para la medición empleando la TAD

Para la configuración de la TAD se empleará una entrada Bipolar de tipo diferencia, empleando dos canales de la forma:

- CH0 (CH0 – CH8), para la medición de la tensión.
- CH1 (CH1 – CH9), para la medición de la corriente.
- GND para la referencia de tierra (punto común del sistema).

La frecuencia de escaneo será de 12 kHz y se realizarán 600 escaneos, para un tiempo de escaneo de 0,05 segundos, lo que se corresponde con aproximadamente tres (3) períodos de la señal para una frecuencia fundamental de 60 Hz.

Computadora personal para el procesamiento digital de las señales

Los requerimientos para empleo de esta tecnología son realmente bajos, el hardware de la tarjeta se conecta por un Slot PCI de la PC y el resto de los requerimientos los imponen el software y son los siguientes:

- P3 a 500MHz o equivalente.
- 128 Mbytes de RAM.
- Sistema Operativo NT/2000/XP.
- Lector de CD/DVD-ROM.

Esquema eléctrico del puesto de trabajo

El puesto de trabajo ha sido dotado de:

- Cargas de alumbrado: Lámparas fluorescentes de 18 W y 36 W, lámparas fluorescentes compactas, lámparas con balasto electrónico, lámparas con balasto y cebador, o lámparas LED de varias potencias.
- Cargas de fuerza: Posee tomacorrientes de 120 y 230V para la conexión de cargas monofásicas puntuales con corriente inferior a los 16 A.
- Otras cargas: Posee tres terminales (L – L – N) para la conexión de cables con conectores tipo banana de propósito general.

En la figura 3 se muestra el esquema eléctrico del puesto de trabajo diseñado.

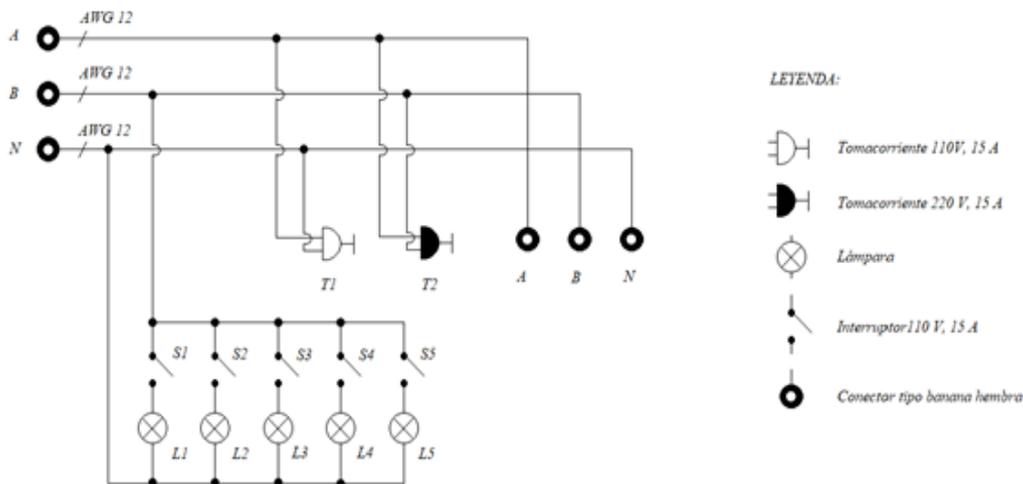


Fig. 3 Esquema eléctrico del puesto de trabajo diseñado para las prácticas de laboratorio.

Procesamiento de las señales y cálculo de los indicadores de calidad

Para el procesamiento digital de las señales se empleó el software Matlab (Khorasani&Deihimi, 2009). Esta herramienta permite el análisis de datos mediante su tratamiento matricial o como arreglos lo que lo hace idóneo para estos estudios. El Matlab cuenta además con poderosas bibliotecas para el análisis de señales, lo cual se puede complementar con el empleo del Simulink, que consiste en una herramienta para la simulación de sistemas físicos mediante diagramas de bloques funcionales a partir de sus modelos matemáticos (IOtechSupportfrom Data AcquisitionToolbox- Hardware Support- MATLAB & Simulink, s. f.).

Para el estudio de estas señales se partirá de determinar los principales valores que caracterizan a las mismas. Para ello se emplear funciones definidas del propio programa que permitan calcular su valor eficaz (RMS), medio (AVG), mínimo (MIN), y máximo (MAX) de cada señal (tabla 1).

Tabla 1. Funciones Matlab para el cálculo de valores característicos de las señales.

Función	Descripción	Sintaxis
rms	Valor RMS de una data	var_salida=rms(var_entrada);
mean	Valor medio de una data	var_salida=mean(var_entrada);
min	Valor mínimo de una data	var_salida=min(var_entrada);
max	Valor máximo de una data	var_salida=max(var_entrada);

El cálculo de la potencia aparente (S) se realiza mediante la expresión:

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (1)$$

Donde:

V_{RMS} e I_{RMS} son los respectivos valores eficaces de la tensión y la corriente determinados con las funciones en Matlab.

La potencia activa (P) para los valores discretos de la data se determina como:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N V_i \cdot I_i}{N} \quad (2)$$

Donde:

V_i e I_i son los respectivos valores instantáneos de la tensión y la corriente.

N es el número de mediciones realizadas (Número de escaneos)

El factor de potencia (PF) se determina como:

$$PF = \frac{P}{S} \quad (3)$$

La potencia reactiva (Q) consumida debe ser calculada como:

$$Q = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \sin(\theta_V - \theta_i) \quad (4)$$

Donde:

θ_V y θ_i son los ángulos de desplazamiento del armónico fundamental de las señales de tensión y corriente respectivamente y su diferencia será el ángulo de defasaje entre ambas señales.

El factor de potencia de desplazamiento será entonces:

$$DPF = \cos(\theta_V - \theta_i) \quad (5)$$

Para determinar la potencia reactiva, así como para calcular el espectro de distorsión armónica de estas señales es necesario emplear el algoritmo de la transformada rápida de Fourier, el cual no es más que la optimización de la transformada discreta para una data.

Una vez calculada la potencia reactiva es posible determinar la potencia de distorsión (D) de este sistema mediante la ecuación:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (6)$$

Para determinar el espectro armónico de amplitud y fase de ambas señales, así como el valor del THD, se emplean los bloques funciones Fourier y THD del Simulink, tal y como se muestra en la Figura 4.

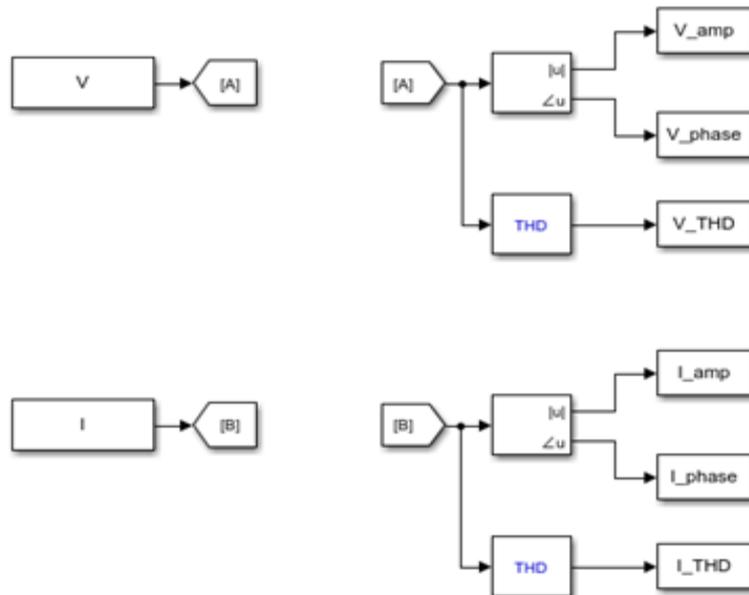


Fig. 4 Empleo de los bloques funcionales Fourier y THD en Simulink del Matlab

Para el correcto empleo del puesto de trabajo para realizar las prácticas de laboratorio en Calidad de la Energía Eléctrica, es necesario seguir y respetar un conjunto de pasos, que garantizarán la calidad de las mediciones y el cuidado de los elementos del sistema de instrumentación. En la figura 5 se muestra un esquema lógico de este procedimiento.

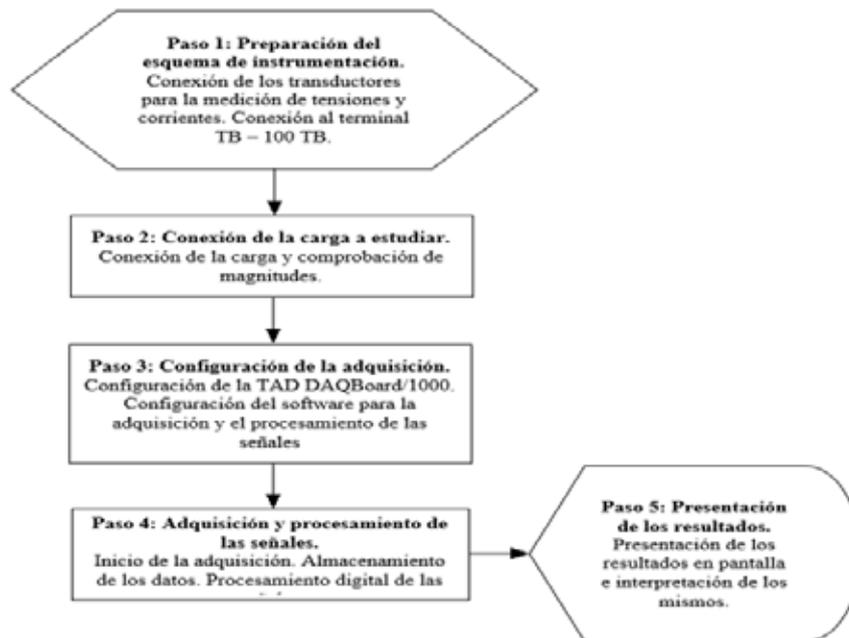


Fig. 5 Procedimiento para el empleo del puesto de trabajo en el desarrollo de las prácticas de laboratorio de Calidad de la Energía Eléctrica

RESULTADOS

Para la prueba del puesto de trabajo se caracterizaron tres cargas que se emplean frecuentemente en redes secundarias de baja tensión. Las cargas estudiadas consisten en:

- Una lámpara fluorescente de 18 W con balasto de 9 W y arrancador o cebador (starter).
- Una lámpara LED de 18 W.
- Un cargador de Baterías de litio de 72 V y 20 Ah.

Lámpara fluorescente de 18 W

La lámpara fluorescente modelo T8 es una lámpara con base tipo G13 con una potencia equivalente de 18 W empleada para aplicaciones domésticas y comerciales. Esta lámpara requiere el empleo de un balasto electrónico o inductivo con arrancador o starter, la potencia del balasto oscila entre los 9 y 18 W en dependencia de la aplicación.

En la tabla 2 se detallan las principales características de esta lámpara y su balasto.

Tabla 2 Detalles de la lámpara fluorescente de 18W y su balasto

Lámpara fluorescente de 18 W	
Tensión nominal(V)	120 V
Modelo	T8 Fino
Modelo de la base	G13
Dimensión (mm)	610
Potencia nominal (W)	18 W
Color de luz	Blanco
Balasto	
Tensión nominal de entrada (V)	120 V
Potencia nominal (W)	9 W

Al realizar las mediciones de la lámpara, las formas de onda de la tensión y la corriente obtenidas se muestran en la figura 6.

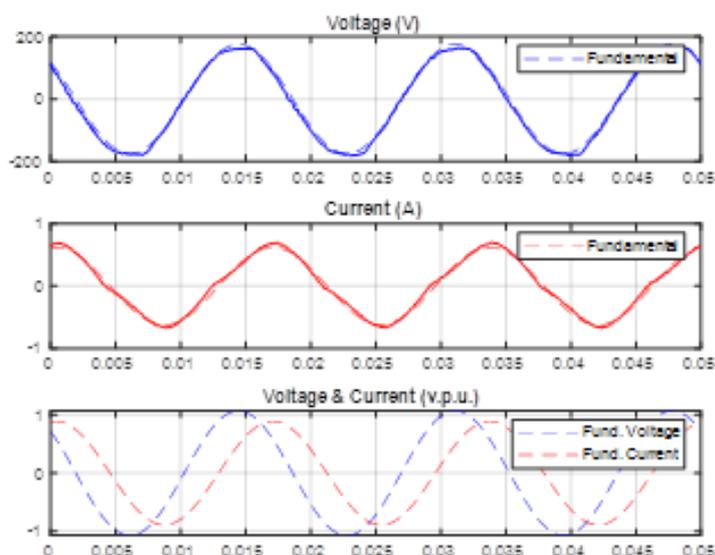


Fig. 6 Formas de onda de la tensión (azul) y la corriente (rojo) de la lámpara fluorescente de 18 W.

Al procesar estas señales se obtuvieron los resultados que se muestran en las tablas 3 y 4.

Tabla 3 Magnitudes fundamentales de las señales de tensión y corriente para la lámpara fluorescente de 18 W.

Magnitudes	Tensión	Corriente
Valor eficaz (RMS)	124,68 V	0,442 A
Valor medio (AVG)	-8,94 V	0,0105 A
Valor máximo (MAX)	164,63 V	0,6988 A
Valor mínimo (MIN)	-181,9 V	-0,6744 A
THD (%)	3,83 %	10,18 %

Tabla 4 Magnitudes fundamentales del sistema para la lámpara fluorescente de 18 W.

Magnitudes	Valor
Potencia activa (W)	29,698 W
Potencia reactiva (VAr)	46,171 VAr
Potencia de distorsión (VAd)	4,424 VAd
Potencia aparente (VA)	55,07 VA
PF	0,5392
DPF	0,545

Defasaje (°)	56,964 °
Frecuencia (Hz)	60,07 Hz

Carga de alumbrado LED de 18 W

La lámpara LED de 18 W es una lámpara de modelo T8 con base G13 diseñada para operar con una tensión de 120 V y frecuencia de 50 o 60 Hz. Estas lámparas se caracterizan por poseer menor consumo energético que las lámparas fluorescentes garantizando una mayor luminancia. En la tabla 5 se muestran las principales características de esta lámpara.

Tabla 5. Detalles de la lámpara LED de 18W.

Lámpara LED de 18 W	
Tensión nominal(V)	120 V
Modelo	T8 Fino
Modelo de la base	G13
Dimensión (mm)	1200
Potencia nominal (W)	18 W
Frecuencia (Hz)	50 – 60
Color de luz	Blanco
Eficiencia (lm/W)	80 lm/W
Flujo (lm)	1440 lm

Al realizar las mediciones de la lámpara, las formas de onda de la tensión y la corriente obtenidas se muestran en la figura 7.

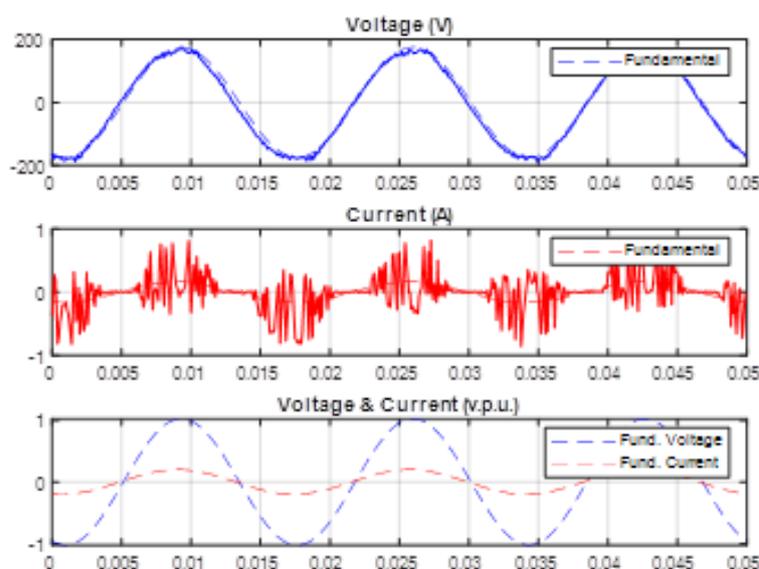


Fig. 7 Formas de onda de la tensión (azul) y la corriente (rojo) de la lámpara LED de 18 W.

Al procesar estas señales se obtuvieron los resultados que se muestran en las tablas 6 y 7.

Tabla 6 Magnitudes fundamentales de las señales de tensión y corriente para la lámpara LED de 18 W.

Magnitudes	Tensión	Corriente
Valor eficaz (RMS)	123,34 V	0,2804 A
Valor medio (AVG)	-6,2549 V	0,003428 A
Valor máximo (MAX)	169,99 V	0,82094 A
Valor mínimo (MIN)	-187,01 V	-0,8756 A
THD (%)	4,249 %	175,18 %

Tabla 7 Magnitudes fundamentales del sistema para la lámpara LED de 18 W.

Magnitudes	Valor
Potencia activa (W)	16,794 W
Potencia reactiva (VAr)	3,226 VAr
Potencia de distorsión (VAd)	30,062 VAd

Potencia aparente (VA)	34,586 VA
PF	0,4857
DPF	0,99564
Defasaje (°)	5,352 °
Frecuencia (Hz)	59,932 Hz

Cargador de baterías de litio

Las baterías de litio, también conocidas como Li – Ion, son un dispositivo con dos o tres celdas de energía conectadas en serie o en paralelo, diseñado para el almacenamiento de energía eléctrica que emplea como electrolito una sal de litio que consigue los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo. Las propiedades de las baterías de Li-Ion, como su ligereza, su elevada capacidad energética, su resistencia a la descarga y su capacidad para funcionar con un elevado número de ciclos de regeneración, han permitido diseñar acumuladores ligeros, de pequeño tamaño y variadas formas, con un alto rendimiento.

A continuación, se detallan las principales características de esta batería y de su cargador (ver tabla 8).

Tabla 8. Detalles de la batería de Litio 72V 20 Ah y su cargador de 72V [19].

Batería Litio 72 V 20 Ah Rali	
Tensión nominal(V)	72 V
Tensión máxima (V)	84 V
Capacidad nominal (Ah,25°C)	20Ah
Estructura de celdas	20 paralelos de 8 baterías 18650 de 2500mA
Peso nominal (Kg)	Aprox. 10,7 Kg
Dimensión (mm)	(265 mm)*(172 mm)*(192 mm)
Corriente máxima de descarga (A)	30 A
Corriente de carga máxima(A)	10 A
Ciclos de carga	800 ciclos
Cargador de 72 V	
Tensión nominal de entrada (V)	120 V
Tensión sin carga (V)	72 V
Tensión de carga (V)	84 V
Corriente de carga (A)	5 A
Tiempo de carga (h)	6 horas

Al realizar las mediciones en el cargador de baterías de Litio de 72V, las formas de onda de la tensión y la corriente obtenidas fueron las siguientes (ver figura 8):

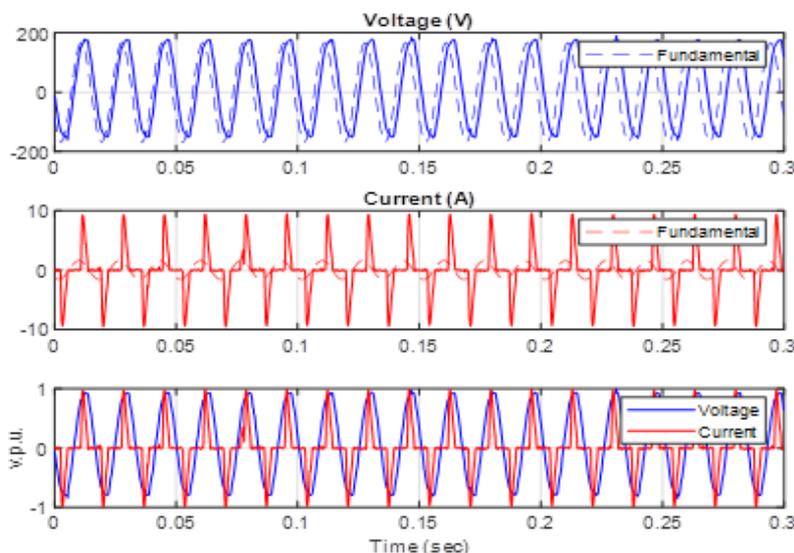


Fig. 8 Formas de onda de la tensión (azul) y la corriente (rojo)

Al procesar estas señales se obtuvieron los resultados que se muestran en las tablas 9 y 10.

Tabla 9 Magnitudes fundamentales de las señales de tensión y corriente para el cargador de baterías de Litio de 72 V.

Magnitudes	Tensión	Corriente
Valor eficaz (RMS)	119,46 V	3,635 A
Valor medio (AVG)	12,726 V	2,757•10 ⁻¹⁶ A
Valor máximo (MAX)	190,04 V	9,55 A
Valor mínimo (MIN)	-161,49 V	-9,557 A
THD (%)	5,31 %	97,38 %

Tabla 10. Magnitudes fundamentales del sistema para el cargador de baterías de Litio de 72 V.

Magnitudes	Valor
Potencia activa (W)	294,36 W
Potencia reactiva (VAr)	159,1 VAr
Potencia de distorsión (VAd)	276,75 VAd
Potencia aparente (VA)	434,22 VA
PF	0,678
DPF	0,93
Defasaje (°)	21,49 °
Frecuencia (Hz)	59,91 Hz

Cálculo de los indicadores de calidad en la prueba realizada a la carga de alumbrado fluorescente

A partir del procesamiento de las señales de tensión y corriente a la entrada del puesto de trabajo, es posible determinar los indicadores relacionados con las desviaciones de la frecuencia y de la tensión, así como la distorsión armónica total de corriente y de tensión demandada por esta carga. Estos resultados se muestran en la tabla 11.

Tabla 11 Indicadores de calidad del producto técnico para la carga de alumbrado fluorescente.

Indicador	Valor	Norma	Criterio de evaluación
Δf (%)	0,116 %	1 % (NC 800-1:2011)	En norma
ΔU (%)	3,9 %	± 4 % (NC 800-1:2011)	En norma
THDv (%)	3,83 %	8 % (IEC 61000-2-2)	En norma
THDi (%)	10,18 %	10 % (IEC 61000-3-2)	Fuera de norma

La comparación con los valores normados, revela que los indicadores de desviación de la frecuencia, y de la tensión se encuentran dentro de los valores permisibles. La distorsión armónica total para la tensión en este estudio se encuentra por debajo del valor normado. La distorsión armónica total para la corriente, se encuentra por encima, pero muy cercano del valor normado (10 %). Este análisis demuestra que las lámparas fluorescentes con balasto, no pueden ser consideradas cargas lineales. El valor del factor de potencia es 0,539, lo cual es considerablemente bajo, pese a que estas lámparas incorporan un capacitor para compensar el efecto inductivo del balasto. Al tratarse de una carga con muy bajos niveles de distorsión armónica, el valor del factor de potencia (PF) y el del factor de potencia de desplazamiento (DPF) son prácticamente iguales.

Cálculo de los indicadores de calidad en la prueba realizada a la carga de alumbrado LED

En el análisis de esta carga, es posible comprobar como las desviaciones de tensión y frecuencia se encuentran por debajo de los valores normados (tabla 12). En el caso de la distorsión armónica, la tensión se encuentra por debajo del 8 % normado en la IEC 61000-2-2, en cambio la corriente, posee una distorsión armónica total de un 175 %.

Tabla 12 Indicadores de calidad del producto técnico para la carga de alumbrado LED.

Indicador	Valor	Norma	Criterio de evaluación
Δf (%)	-0,116 %	1 % (NC 800-1:2011)	En norma
ΔU (%)	2,78 %	± 4 % (NC 800-1:2011)	En norma
THDv (%)	4,249 %	8 % (IEC 61000-2-2)	En norma
THDi (%)	175,18 %	10 % (IEC 61000-3-2)	Fuera de norma

Estas cargas no lineales, demandan corrientes con un elevado contenido de armónico. Si bien reducen considerablemente el consumo, en comparación con una lámpara fluorescente de igual potencia, con un

incrementando del flujo luminoso, su principal problema radica en el empeoramiento de este indicador, por lo que su efecto debe ser considerado en el sistema.

Pese a que esta carga no demanda reactivo, por lo que tiene un factor de potencia de desplazamiento de 0,99, los valores de potencia de distorsión son muy elevados, por lo que el factor de potencia global (PF) para estas cargas es de 0,48.

Cálculo de los indicadores de calidad en la prueba realizada al cargador de baterías de Litio de 72 V

En el análisis de esta carga, es posible determinar los indicadores de calidad del producto técnico a partir del procesamiento de las señales de tensión y corriente a la entrada del convertidor. En la tabla 13, se muestran los resultados de los indicadores relacionados con las desviaciones de la frecuencia y de la tensión, así como la distorsión armónica total de corriente y de tensión.

Tabla 13 Indicadores de calidad del producto técnico del sistema para el cargador de baterías de Litio de 72 V.

Indicador	Valor	Norma	Criterio de evaluación
Δf (%)	0,16 %	1 % (NC 800-1:2011)	En norma
ΔU (%)	-0,45 %	± 4 % (NC 800-1:2011)	En norma
THDv (%)	5,31 %	8 % (IEC 61000-2-2)	En norma
THDi (%)	99,27 %	10 % (IEC 61000-3-2)	Fuera de norma

Al igual que en el caso anterior, la comparación con los valores normados revela que los indicadores de desviación de la frecuencia, y de la tensión se encuentran dentro de los valores permisibles. La distorsión armónica total para la tensión en este estudio se encuentra por debajo del valor normado.

Una vez más, la distorsión armónica total para la corriente se encuentra por encima de los valores normados. El análisis de los armónicos individuales, de acuerdo a la Norma IEC 61000-3-2, demuestra que se encuentran por encima del límite normado los armónicos impares hasta el orden 17.

Impacto en la formación

El desarrollo del puesto de trabajo para realizar las prácticas de laboratorio de calidad de la energía permitirá elevar la calidad de la docencia impartida, así como los niveles de satisfacción de los estudiantes con la docencia. Mediante el empleo de este puesto, los estudiantes y profesores de la carrera de Ingeniería Eléctrica podrán:

- Actualizar y perfeccionar el proceso de enseñanza–aprendizaje de la Instrumentación Virtual y la Calidad de la Energía en la adquisición de habilidades y conocimientos asociados a la calidad y la eficiencia energética aplicada a las redes eléctricas de baja tensión, tanto para el pregrado en la carrera de Ingeniería Eléctrica, como para postgrado en la maestría de esta especialidad.
- Emplear esquemas de instrumentación moderna a partir del empleo de sistemas de adquisición de datos (convertidores analógicos digitales) y los transductores, que permitan el acondicionamiento, el muestreo, la cuantificación y la conversión de señales analógicas para su procesamiento digital.
- Diseñar e implementar prácticas de laboratorio relacionadas con la calidad de la energía para propósitos docentes, que puedan ser empleados en el posgrado y para el desarrollo de servicios científico técnicos en esta área del conocimiento.
- Caracterizar la influencia de las cargas no lineales que comúnmente son empleadas en las redes de distribución residenciales y su influencia en la distribución secundaria.
- Diseñar filtros para la atenuación de la distorsión armónica y la compensación del reactivo en las redes de distribución secundarias.

Esta solución, beneficiaría además las investigaciones en esta área del conocimiento, permitiendo:

- Producir cursos de posgrado en temáticas afines a la instrumentación virtual, la calidad de la energía eléctrica y la eficiencia energética, así como materiales de apoyo para el pregrado y posgrado.
- Producir artículos y otros materiales para publicaciones y eventos científicos.

CONCLUSIONES

El análisis crítico del Programa de la asignatura Calidad de la Energía Eléctrica y sus laboratorios. En este análisis se constata que las prácticas están diseñadas para realizarse de forma virtual, lo cual no contribuye a que los estudiantes desarrollen habilidades de medición, modelado y simulación de las redes de distribución secundarias y sus principales cargas. Con el desarrollo del puesto de trabajo para las prácticas de laboratorio de calidad, empleando un modelo físico, es posible sistematizar conocimientos en esta asignatura, vinculados a determinar los indicadores de calidad, caracterizar la calidad de la energía eléctrica en un sistema, emplear las normas de calidad de la energía eléctrica y aplicar mejoras en los sistemas electroenergéticos para elevar la calidad de la energía y su impacto.

Se presentan tres casos de estudio para ser analizados en el puesto de trabajo creado, consistente en la caracterización de una lámpara fluorescente de 18 W, una lámpara de tecnología LED de 18 W y un cargador de baterías de Litio de 72 V y 20 Ah. Se obtienen los valores y curvas de las tensiones y corrientes en estas cargas, determinándose el valor eficaz, máximo, mínimo, medio y la distorsión armónica total de estas magnitudes. La propuesta permitirá perfeccionar el proceso de enseñanza–aprendizaje de la Instrumentación Virtual y la Calidad de la Energía en la adquisición de habilidades y conocimientos asociados a la calidad y la eficiencia energética aplicada a las redes eléctricas de baja tensión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arghandeh, R., Onen, A., Jung, J. & Broadwater, R. P. (2013). Harmonic interactions of multiple distributed energy resources in power distribution networks. *Electric Power Systems Research*, 105, 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.07.018>
2. Chattopadhyay, S., Mitra, M. & Sengupta, S. (2011). Electric Power Quality. En S. Chattopadhyay, M. Mitra, & S. Sengupta (Eds.), *Electric Power Quality* (pp. 5-12). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0635-4_2
3. Hernández Ferreira, A. A., Hernández Gessa, A., Hernández Ferreira, A. A. & Hernández Gessa, A. (2018). Perfeccionamiento del sistema de prácticas de laboratorio para la disciplina Física de carreras de ingeniería, evaluación de su calidad y del impacto en la formación del profesional. *Revista Universidad y Sociedad*, 10(3), 46-54.
4. IOtech Support from Data Acquisition Toolbox—Hardware Support—MATLAB & Simulink. (s. f.). <https://www.mathworks.com/hardware-support/iotech.html>
5. Khorasani, P. G., & Deihimi, A. (2009). A new modeling of Matlab transformer for accurate simulation of ferroresonance. 2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 529-534. <https://doi.org/10.1109/POWERENG.2009.4915249>
6. Lopes, G. N., Lacerda, V. A., Vieira, J. C. M., & Coury, D. V. (2021). Analysis of Signal Processing Techniques for High Impedance Fault Detection in Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(6), 3438-3447. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3042734>
7. Martínez, M. P., Guardarrama, J. R., Frómeta, Y. G., & Baranda, J. S. (2023). La formación práctica del estudiante de ingeniería eléctrica en el laboratorio de circuitos eléctricos. *Revista Referencia Pedagógica*, 11(1).
8. Pesa, M., Bravo, S., Pérez, S., & Villafuerte, M. (2014). Las actividades de laboratorio en la formación de ingenieros: Propuesta para el aprendizaje de los fenómenos de conducción eléctrica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 31, 642. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2014v31n3p642>
9. Riaz, M. T., Afzal, M. M., Aaqib, S. M., & Ali, H. (2021). Analysis and Evaluating the Effect of Harmonic Distortion Levels in Industry. 2021 4th International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE), 1-7. <https://doi.org/10.1109/ICECE51984.2021.9406283>
10. Williams Serrano, S., Mass Sosa, L. A., Williams Serrano, S., & Mass Sosa, L. A. (2020). Las prácticas de laboratorio en la enseñanza de las ciencias básicas biomédicas ¿antes o después de los seminarios? *MediSur*, 18(2), 285-287.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Declaración de responsabilidad de autoría

Los autores del manuscrito señalado, DECLARAMOS que hemos contribuido directamente a su contenido intelectual, así como a la génesis y análisis de sus datos; por lo cual, estamos en condiciones de hacernos públicamente responsable de él y aceptamos que sus nombres figuren en la lista de autores en el orden

indicado. Además, hemos cumplido los requisitos éticos de la publicación mencionada, habiendo consultado la Declaración de Ética y mala praxis en la publicación.

Ing. Victor Antonio Morera Cobián y MSc. Frank Grau Merconchini: Proceso de revisión de literatura y redacción del artículo.

MSc. Eduardo López Pérez : Revisión y corrección de la redacción del artículo.