



2019 10 al 13 de septiembre - Cartagena de Indias, Colombia

RETOS EN LA FORMACIÓN DE INGENIEROS EN LA ERA DIGITAL

PLANTAS FOTOVOLTAICAS DIDÁCTICAS: RENOVACIÓN DEL PROCESO DE APRENDIZAJE EN UN PANORAMA DE ENERGÍAS RENOVABLES

Fernando Augusto Herrera León, Francisco Javier Amórtegui Gil, David Nova Rodríguez, John Edwin Martínez Álvarez, David Enrique Santos Borja

**Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia**

Resumen

El desarrollo a nivel mundial y colombiano de los sistemas fotovoltaicos ha promovido la masificación e implementación de proyectos e instalaciones de pequeña escala con los respectivos retos en el campo regulatorio, de política pública para los próximos tres años. De la misma manera, en el campo académico es necesario incentivar a nivel curricular líneas de formación y capacitación de profesionales de ingeniería quienes serán responsables del diseño, construcción y evaluación de los proyectos fotovoltaicos.

Este artículo describe las características funcionales del laboratorio de sistemas fotovoltaicos desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia y su aplicación en procesos de aprendizaje, investigación e innovación en programas pregrado, posgrado para estudiantes y profesionales en ingeniería. La metodología de aprendizaje experiencial se soporta con dos plantas de inyección de energía a la red eléctrica y una planta tipo aislada, permitiendo una aproximación conceptual a los desempeños de ingenieros en el diseño, simulación, instalación, inspección, puesta en marcha, almacenamiento, monitoreo y uso final de la energía en los distintos contextos geográficos y técnicos.

Los laboratorios y las prácticas fueron probadas en una primera etapa con estudiantes y profesionales de ingeniería e integran la tecnología emergente de las plataformas digitales de los equipos fotovoltaicos, con el fin de generar un espacio académico y técnico para el análisis de información y datos en tiempo real relativos al desempeño y evaluación de la operación de las plantas; permitirá investigar sobre las tendencias en las variables ambientales y meteorológicas de la zona, producir indicadores y parámetros de impacto y viabilidad de los proyectos desde la

perspectiva económica y financiera, complementando la formación y capacitación de los profesionales encargados de diseñar, operar y evaluar instalación fotovoltaicas en Colombia.

Palabras clave: instalaciones fotovoltaicas; aprendizaje experiencial; generación de energía; laboratorios de ingeniería

Abstract

The worldwide and Colombian development of photovoltaic systems has promoted the massification and implementation of small-scale projects and installations with the respective challenges in the regulatory field, of public policy for the next three years. In the same way, in the academic field it is necessary to incentivize curriculum and training programs of engineering professionals who will be responsible for the design, construction and evaluation of photovoltaic projects.

This article describes the functional characteristics of the laboratory of photovoltaic systems laboratories developed at the National University and the guides for learning, research, innovation and training in undergraduate, postgraduate and professional engineering programs. The experiential learning methodology is supported with two injection plants to the electric grid and an isolated type plant to carry out design, simulation, installation, inspection, start-up, storage, monitoring and final use of energy processes in different geographical and technical contexts

The laboratories and practices were tested initially with students and engineering professionals who integrate the technological capacity of the digital platforms of the photovoltaic equipment for the analysis of information and data in real time relative to the performance and evaluation of the operation of the plants; It allows the investigation of the trends in the environmental and meteorological variables of the area to generate indicators and parameters of impact and viability of the projects from the economic and financial perspective to contribute to the training and qualification of the professionals in charge of designing, operating and evaluating photovoltaic installation in Colombia.

Keywords: photovoltaic systems; experiential learning; power generation; engineering labs

1. Introducción y Motivación

Los laboratorios universitarios apoyan los procesos de enseñanza y aprendizaje de las labores en ingeniería, permitiendo validar y reforzar la apropiación del conocimiento teórico y fenómenos físicos mediante una aproximación experimental. Estos espacios y actividades son motivadores del aprendizaje para los participantes, gracias a la posibilidad de trabajar las diferentes problemáticas, y mediante experimentos y prácticas comprender los fenómenos presentes. La tendencia en la formación en Ingeniería se orienta a fortalecer procesos de investigación e innovación para lo cual los laboratorios cumplen un papel relevante con los equipos adquiridos, desarrollados (simuladores) y pruebas acreditadas. La ampliación de la matriz energética en los últimos años se asocia al uso de energías renovables (ER): De acuerdo con la UPME el 85% de los

nuevos proyectos de generación ER corresponden a proyectos de energía solar fotovoltaica. Además, para el año 2030 se estima un consumo de un 30% de energías limpias o renovables no convencionales. Es así como se configura un reto en términos de despliegue de infraestructura, inversión, regulación y la formación de profesionales íntegros. Debido a esto, el Departamento de Ingeniería eléctrica y electrónica de la Universidad Nacional de Colombia está actualizando los programas curriculares mediante el diseño e implementación de una metodología basada en el aprendizaje experiencial, con el fin de aportar componentes de formación, investigación e innovación a los estudiantes de ingeniería, tanto de pregrado como de posgrado, para enfrentar el reto en el desarrollo de los proyectos fotovoltaicos. Esta metodología está basada en la adquisición de los conocimientos en contextos diversos y prácticos, donde de manera interactiva, amigable y modular se puede conocer las más importantes generalidades de un sistema fotovoltaico. Dispuestos para esto espacios tales como laboratorios, talleres, plantas de generación fotovoltaicas, entre otros, compuestos por herramientas de emulación solar, equipos de medición de última tecnología, componentes de medición de las variables de desempeño de la planta en tiempo real, lo cual en conjunto guía al estudiante y participante a conocer las condiciones necesarias para la instalación, puesta en marcha y monitoreo de una planta fotovoltaica de pequeña escala. Finalmente, para efectos de sostenibilidad energética, los laboratorios y sus plantas fotovoltaicas instaladas en los edificios del Campus de la Universidad Nacional contribuyen a la generación de energía para lograr el abastecimiento propio e inyectar a la red interna.

2. Objetivos de aprendizaje y metodología

Las necesidades de formación y actualización en el campo de sistemas fotovoltaicos a nivel nacional e internacional están asociadas con iniciativas de actualización curricular y con nuevos campos y oportunidades de desarrollo profesional en Ingeniería desde una perspectiva multidisciplinaria técnica, ambiental, social, económica y regulatoria.

2.1. Objetivos

La propuesta de formación de estudiantes y profesionales en energías renovables y la construcción de un laboratorio de sistemas fotovoltaicos se concibe a partir de los siguientes objetivos de aprendizaje de tal forma que logren la capacidad de:

1. Diseñar, especificar y operar pequeñas plantas de generación fotovoltaica.
2. Identificar los criterios de conformidad de productos para sistemas fotovoltaicos.
3. Analizar el desempeño de plantas fotovoltaicas de acuerdo con las condiciones ambientales y de la carga conectada.
4. Aplicar los programas de simulación y las plataformas digitales para la evaluación de plantas fotovoltaicas.
5. Diseñar e implementar equipos y procedimientos de prueba y simulación de sistemas fotovoltaicos.

2.2. Metodología

Para la metodología de trabajo para el logro de los objetivos de aprendizaje considera los siguientes actividades y productos:

- Elaborar un proyecto con el diseño y simulación de una planta fotovoltaica integrando conocimientos, conceptos, requisitos normativos y buenas prácticas de ingeniería.
- Diseñar y realizar protocolos, prácticas y experiencias de laboratorio para identificar relaciones entre los conceptos, criterios de diseño y la operación real de la planta en condiciones controladas.
- Emular actividades regulatorias del ejercicio de ingeniería como evaluación de la conformidad de productos, interventoría e inspectoría de instalaciones eléctricas.
- Adquisición de información y datos, procesamiento y análisis de los resultados para mejorar el diseño y especificación de la planta considerando el contexto geográfico, social, económico y técnico.
- Identificar oportunidades de mejora y nuevos desarrollos en el proceso de diseño y prueba de sistemas fotovoltaico en laboratorio y terreno.

2.3. Infraestructura

El laboratorio de sistemas fotovoltaicos instalado en el campus de la Sede Bogotá tiene las siguientes características:

Planta I: La figura 1 presenta los componentes del sistema fotovoltaico cuya potencia es de 5,6 kWp conectado a la red eléctrica (*ON GRID*), compuesto de 14 módulos solares de 400 W, 7 microinversores de 900 W, suministra energía al laboratorio de ensayos industriales LABE, cuenta con sistema de medición de parámetros energéticos y eléctricos, instalación con protecciones eléctricas, una estación meteorológica con medición en tiempo real de irradiancia, temperatura ambiental y de módulos, humedad y velocidad de viento, Ver figura 2 . Los componentes del sistema consideran el diseño y la instalación logran versatilidad y flexibilidad en la combinación de los módulos permitiendo obtener las siguientes configuraciones:

- 7 subsistemas o pequeñas plantas independientes con uno o dos módulos en paralelo.
- 3 subsistemas o pequeñas plantas independientes con orientación norte- oriente y 3 subsistemas o pequeñas plantas orientados suroccidente.
- 7 subsistemas o pequeñas plantas independientes con periodos de limpieza diferentes.

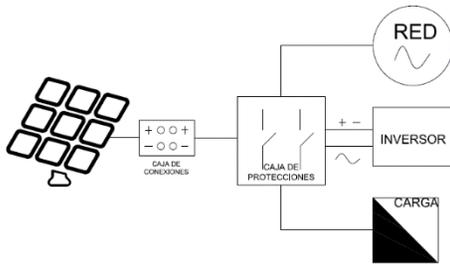


Figura 1: diagrama de bloques: ON-GRID



Figura 2: mediciones de irradiancia

Planta II : un sistema fotovoltaico de 13,2 kWp conectado a la red eléctrica, este sistema está constituido por 33 módulos de 400 W y tres inversores bifásicos de 4,2 kW. Este sistema tiene una orientación hacia el norte, dividido en tres subsistemas de 4,4 kWp cada uno. Su diseño y montaje replica un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica como los instalados en zonas urbanas y rurales de Colombia, permite suministrar energía al edificio y los excedentes se inyectan a la red interna del campus. Ver figura 1.

Planta III : un sistema fotovoltaico aislado de la red eléctrica (*off grid*), compuesto por dos módulos de 330 W, un controlador de carga de 100 V/ 30 A, un inversor de 1.2 kVA y dos baterías de 100 Ah a 12V para suministrar energía a cargas especiales y emular proyectos típicos de zonas no interconectadas. Ver figura 3.

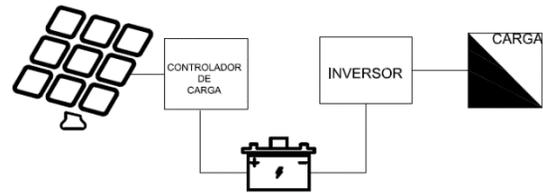


Figura 3: diagrama de bloques OFF-GRID

3. Propuestas de prácticas y experiencias de laboratorio

Las pruebas y experimentos realizadas en las tres plantas fotovoltaicas se resumen en la tabla 1

Prácticas de laboratorio para sistemas fotovoltaicos	Planta I 5,6 kW red	Planta II 13,2 kW red	Planta III 1,2 kW Aislada
Docencia			
Módulos solares y combinaciones Curva tensión -corriente Determinación del punto de máxima potencia Efectos de la temperatura en la potencia y eficiencia. Efectos del sombreado en la operación del sistema Puntos calientes e identificación de defectos constructivos o de montaje.	Módulo y Conjunto	Módulo y Conjunto	Módulo y Conjunto
Objetivo de aprendizaje 2 y 3	x	x	x

PLANTAS FOTOVOLTAICAS DIDÁCTICAS: RENOVACIÓN DEL PROCESO DE APRENDIZAJE EN UN PANORAMA DE ENERGÍAS RENOVABLES

<p>Reguladores de carga y baterías Condiciones tensión - corriente en ciclos de carga y descarga. Puntos de operación Objetivo de aprendizaje 2 , 3</p>			x
<p>Inversores: Evaluación de la operación de protecciones de sobrecarga, cortocircuito, subtensión, sobretensión y control de frecuencia. Protección contra descargas atmosféricas. Operación anti-isla y pérdida de tensión de red Condiciones de operación con distorsión armónica Objetivo de aprendizaje 1 y 2 , 3 , 4</p>	Módulo y Conjunto x	Módulo y Conjunto x	sí dispone del Conjunto DC/AC
<p>Sistemas fotovoltaicos: Dimensionamiento, especificación e integración de componentes. Condiciones de puesta en marcha de plantas fotovoltaicas. Bitácoras y lista de chequeo. Criterios de seguridad eléctrica y eficiencia energética Inspectoría de la instalación y conformidad de productos Objetivo de aprendizaje 1 y 3 , 4</p>	x	x	x
<p>Equipos de medición y registro: Monitoreo en línea de variables energéticas, ambientales y eléctricas. Generación de potencia y energía en cuadrantes. Principios metrológicos. Objetivo de aprendizaje 3 , 4</p>	x	x	x
<p>Sistemas fotovoltaicos: Análisis económico y financiero: indicadores de evaluación y viabilidad de proyectos fotovoltaicos: VPN, CAU, tasa interna de retorno, valor del KWh generado. Objetivo de aprendizaje 3 , 4</p>	x	x	x
Investigación			
<p>Efecto de la polución ambiental en el desempeño de la planta. Estimación de ciclos de limpieza y mantenimiento. Objetivo de aprendizaje 3 , 5</p>	Módulo Conjunto	Módulo Conjunto	Módulo Conjunto
<p>Caracterización de la irradiancia en la zona versus bases de datos globales y regionales. Determinación de tiempos promedios de irradiancia. Principios metrológicos. Objetivo de aprendizaje 1 , 3 , 5</p>	Módulo Conjunto	Módulo Conjunto	Módulo Conjunto
<p>Evaluación de la orientación e inclinación de los módulos en el desempeño energético de la planta. Identificación de condiciones óptimas de operación. Objetivo de aprendizaje 1 , 3 , 5</p>	Módulo Conjunto	Módulo Conjunto	Módulo Conjunto
Innovación			
<p>Simulador solar Determinación de la curva tensión- corriente de módulos fotovoltaicos Objetivo de aprendizaje 1 , 2 , 5</p>	x	x	x
<p>Trazador de curvas V-I de módulos fotovoltaicos en configuración individuales o grupos instalados.</p>	x	x	x

Objetivo de aprendizaje 1, 2, 5			
Calibración de celdas de referencia versus piranómetros. Principios metrológicos. Objetivo de aprendizaje 1, 2, 5	x	x	x
Nuevos procedimientos de prueba para condiciones normales y contingencias, arranque y sobrecarga. Objetivo de aprendizaje 1, 2, 5	x	x	x
Formulación de indicadores de desempeño energético. Objetivo de aprendizaje 1, 3, 4, 5	x	x	x

Con base en la propuesta de la Tabla 1 a continuación se presentan ejemplos de prácticas realizadas:

3.1. Simulador Solar

Objetivo de aprendizaje: Con el desarrollo de la práctica el participante estará en capacidad de caracterizar las variables eléctricas del módulo solar ante diferentes condiciones de irradiancia generadas por un simulador solar.

Procedimiento: En esta práctica se mide la tensión, corriente y potencia máxima a temperatura constante generados por módulo solar, variando su distancia con respecto al emulador solar para variar la irradiancia incidente. Ver figura 4.

Resultados obtenidos: El simulador solar genera pulsos controlados de irradiancia sobre el módulo solar y la celda de referencia. Para obtener la familia de curvas I-V y el punto de máxima potencia a temperatura ambiente. La celda de referencia fue previamente calibrada con un piranómetro. Ver figura 5, 6 y 7.

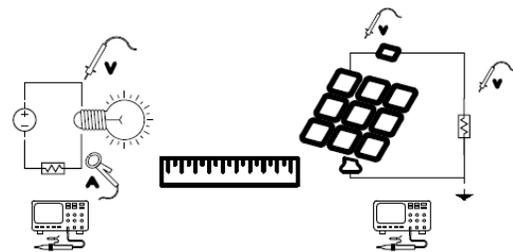


Figura 4: simulador solar

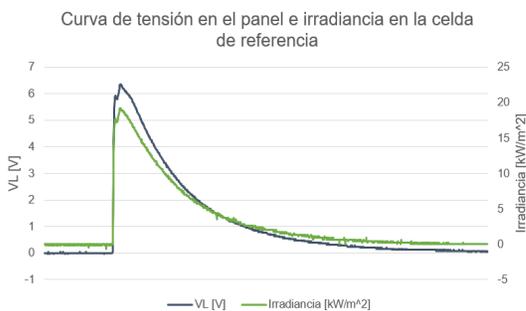


Figura 5: curva panel

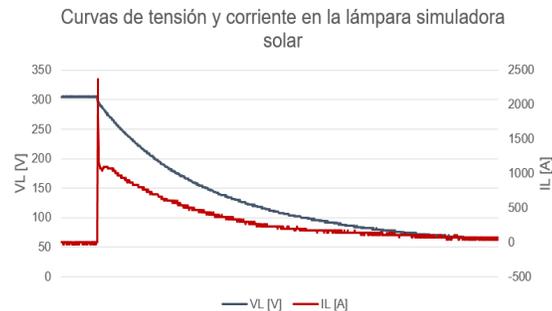


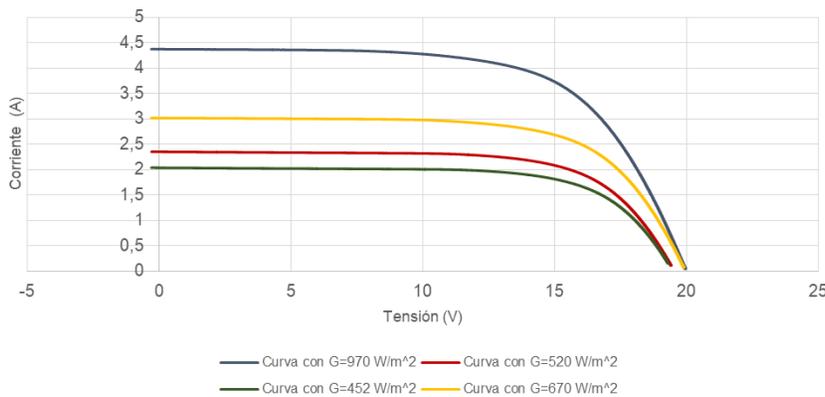
Figura 6: curva del simulador

3.2. Efectos del sombreado en la operación de módulos solares

Objetivo: Con el desarrollo del experimento los participantes estarán en capacidad de identificar los efectos del sombreado en la generación de energía de los módulos solares de acuerdo con sus circuitos equivalentes.

Procedimiento: Realizar sombreados parciales y totales en las celdas de los módulos individuales verificando el efecto en la generación de energía, en la potencia máxima y en curva I/V. En procedimiento de sombreado se aplica adicionalmente a combinaciones de módulos solares para determinar el efecto en dichas etapas con respecto a las condiciones sin sombreado.

Figura 7: curvas MPPT a irradiancia variable



Resultados obtenidos: con el equipo trazador de curvas en el rango de tensión adecuado, se obtienen la característica tensión-corriente del módulo solar sin sombreado, los valores se comparan con las especificaciones del fabricante y con los resultados de sombreado parcial. Con una lectura previa sobre los circuitos equivalentes y los componentes del módulo se discute el "efecto valle" en la curva

I-V y su efecto negativo en el punto de máxima potencia del panel (MPPT).

Finalmente, los resultados del efecto de sombreado parcial y total se llevan a la operación de combinaciones de módulos de la planta fotovoltaica determinando las condiciones en la reducción de la potencia por ende la energía transformada.

3.3. Sistema fotovoltaico aislado de red

Objetivo de formación: al finalizar la práctica el participante estará en capacidad de caracterizar el desempeño energético y eléctrico de los componentes de una planta aislada de la red ante diferentes condiciones ambientales y de carga.

Procedimiento: Se conectan diferentes tipos de cargas, lineales, no lineales, condiciones de corriente de arranque, sobrecarga temporal, se mide la tensión y corriente en los módulos, baterías e inversores y estimando los tiempos de respuesta de acuerdo con los valores de operación prefijados en la programación de los equipos.

Resultados obtenidos:

Respuesta del sistema fotovoltaico aislado (Off-Grid) bajo condiciones de corrientes de arranque y

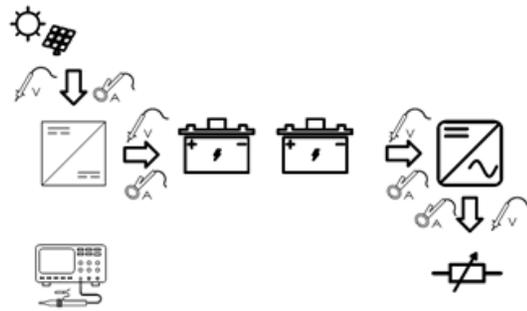


Figura 8: sistema aislado



Figura 9: mediciones sistema aislado

sobrecarga simulando la operación de motores o sistemas de bombeo y cargas con bajo factor de potencia.

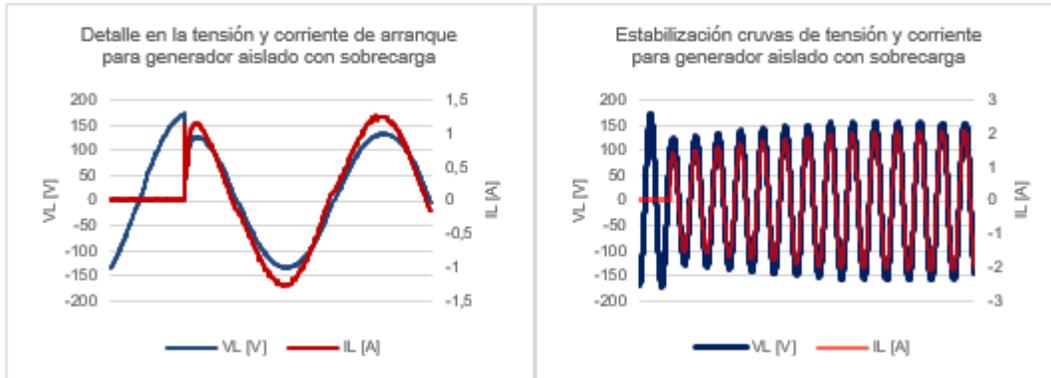


Figura 10: Comparación entre condiciones de arranque y estabilización

Se mide la tensión transitoria en la estabilización del sistema fotovoltaico, el aporte de corriente de los módulos, de las baterías y las condiciones en los ciclos de carga y descarga rápida de las baterías.

El segundo tipo carga es no lineal como las electrónicas de iluminación determinando el efecto en la señal de tensión y corriente, la distorsión y los armónicos respectivos. Para ambas pruebas se evalúa la coordinación de protecciones, el tiempo de operación de las protecciones por sobrecarga, subtensión y los tiempos de recuperación en la operación del sistema

Estas prácticas resumidas en la Tabla 1 han sido aplicadas con un grupo de 25 estudiantes en el Diplomado de instalaciones fotovoltaicas de la Universidad Nacional de Colombia, aplicando los requisitos y procedimientos de la Norma IEC 62109-1, las secciones 690, 705 y 480 del NEC y el Reglamento RETIE.

4. Conclusiones

El diseño e implementación de los sistemas fotovoltaicos instalados en el campus de la Universidad Nacional, permite operarlos como laboratorio para docencia, investigación e innovación, cumpliendo adicionalmente el suministro de energía a los edificios.

La versatilidad y flexibilidad de los sistemas fotovoltaicos instalados permiten su aplicación en ejercicios de emulación, simulación y monitoreo, visualizando la importancia del análisis de información generada por las nuevas plataformas digitales asociados con los equipos.

Se resalta la necesidad de profundizar en la formación sobre seguridad eléctrica de sistemas fotovoltaicos y los aspectos de la práctica de ingeniería en el diseño e inspección de las instalaciones fotovoltaicas dado la tendencia a la masificación en proyectos de pequeña

5. Referencias

- Informes de gestión Unidad de Planeación Minero Energética UPME (2019), Informe de registro de proyectos de generación de electricidad Mayo 2019.
- Reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE Ministerio de Minas y energía.
- IEC 61215-2:2016 Terrestrial photovoltaic (PV) modules -Design and type approval – Part 2: Test Procedures.

Sobre los Autores

El laboratorio de ensayos eléctricos industriales (**LABE**) tiene acreditada la prueba punto de máxima potencia de módulos solares con la Norma ISO 17025, el nuevo laboratorio de alta tensión y energías renovables (**LIAT-ER**), son laboratorios adscritos al Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia una iniciativa apoyada por el Grupo ENEL- CODENSA. Han sido concebidos como escuelas de formación de ingenieros y profesionales donde se brindan espacios académicos y técnicos para que los estudiantes de pregrado, maestría y doctorado complementen la formación brindada en el plan de estudios mediante desempeños auténticos y multidisciplinares propios del ejercicio profesional, de la innovación e investigación en ingeniería.

- **Fernando Augusto Herrera León:** Profesor Asociado Departamento de Ingeniería eléctrica y electrónica de la Universidad Nacional de Colombia. Coordinador académico de los Diplomados en Iluminación e instalaciones fotovoltaicas. Su área de interés es el desarrollo de equipos para investigación, innovación y educación. fherreral@unal.edu.co
- **Francisco Javier Amortegui Gil:** Profesor Asociado Departamento de Ingeniería eléctrica y electrónica de la Universidad Nacional de Colombia. Jefe técnico LABE. fjamorteguig@unal.edu.co
- **David Nova Rodríguez:** Estudiante de posgrado en Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia. Coordinador del área de proyectos del LABE, dnoavar@unal.edu.co
- **John Edwin Martinez Alvarez:** Estudiante de ingeniería industrial, Universidad Nacional de Colombia. Miembro del área de proyectos del LIAT-ER. joemartinezal@unal.edu.co
- **David Santos Borja:** Estudiante de Ingeniería Electrónica, Universidad Nacional de Colombia, Miembro del área de proyectos del LIAT-ER daesantosbo@unal.edu.co.

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2019 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)